

BOJAN KRAUT

STROJARSKI PRIRUČNIK

DEVETO HRVATSKO ILI SRPSKO IZDANJE
POTPUNO PRERAĐENO I DOPUNJENO



TEHNIČKA KNJIGA, ZAGREB

IZ PREDGOVORA PRVOM IZDANJU

Strojarski se stručnjak — bilo inženjer, tehničar ili majstor — u svome radu dnevno susreće s mnogobrojnim, ponajčešće brojčanim podacima.

U nas smo dosad upotrebljavali strane priručnike, no njihova je uporaba ograničena zbog visoke cijene i nedovoljnog znanja stranih jezika. Posebno valja spomenuti da ti priručnici ne pružaju materije na takav način kakav bi bio potreban za našu praksu i — što je najznačajnije — u njima nema domaćih standarda i drugih domaćih propisa.

Da bih barem djelomice popunio tu prazninu, odlučio sam se sastaviti ovaj priručnik.

Priručnik treba da je uvijek pristupačan svagdje i svakome, pa je stoga odabran džepni format. To je dakako ograničilo opseg. Zbog toga sam se pri izboru gradiva odlučio za ono što dnevno treba strojarskim inženjerima, tehničarima ili majstorima, pa i studentima strojarstva i dacima srednjih tehničkih učilišta. Izbor gradiva za tako različite stupnjeve znanja nije bio lak. Želio sam se što više približiti nekoj svima korisnoj sredini. Zato će jednome biti nečega previše, a drugome premalo, jednome će neko poglavlje biti preteško, a drugome prejednostavno.

Jezgra je ovoga priručnika brojčani materijal, jednako potreban za sve stupnjeve naobrazbe, za školu i praksu. Ostalo je gradivo sažeto na najnužnije. Posebnu sam pažnju posvetio razvoju nauke o mjerama i novostima na tom polju, koje zadiru u strojarstvo.

Jednadžbe su veličinske. Time je u nekim područjima omogućena i upotreba još ukorijenjenih sustava mjera — tehničkog i toplinskog (kalorijskog), a u svim područjima sviju tehničkih grana upotreba novoga, apsolutnog sustava po Giorgiju. Teškoće, koje su kočile upotrebu Giorgijeva sustava mjera u toplinskoj tehnici, nastojao sam prebroditi sastavom odgovarajućih toplinskih tablica. U ovom su priručniku prvi put u stručnoj literaturi uopće objavljene više-manje potpune strojarske toplinske tablice, koje sadrže sve vrijednosti preračunane i u jedinice Giorgijeva sustava mjera. Time je i u toplinskoj tehnici bitno olakšano računanje s elegantnijim, veličinskim jednadžbama.

Ljubljana, u travnju 1954.

B. K.

Dosadnja izdanja

slovenska izdanja	hrvatska ili srpska izdanja
1954	1956
1964	1963
1967	1965
1973	1970
1976	1975
1981	1976 (1980)**
1981 (A5)*	1982 (1984)**
1987	1986 (1987)**
1987 (A5)*	1988

* Izdanje u A5 formatu. (Sva su druga izdanja bila u A6 formatu.)

** Dotisak

PREGOVOR DEVETOM HRVATSKOM ILI SRPSKOM IZDANJU

Prvo – slovensko (1954), i zatim drugo – hrvatsko ili srpsko (1956) – izdanje ovoga priručnika bilo je rasprodano u roku od po godinu dana, što je pokazalo kolika je bila potražnja za djelima te vrste naše strojarke literature. Ocjene djela, objavljene u stručnim časopisima ili saopćene osobno, također su potvrdile da su oba izdanja postigla svoj cilj.

Tom prilikom ponovno moramo zahvaliti radnim kolektivima – Titovih zavoda »Litostroj« u Ljubljani i Industrije lokomotiva, strojeva i mostova »Đuro Đaković« u Slavonskom Brodu, koji su kao nakladnici omogućili prvo i drugo izdanje priručnika.

Iskustvom stečenim u prvim izdanjima slijedila su nova, stalno dopunjavana izdanja. Djelo je s dosadašnjih devet slovenskih te devet hrvatskosrpskih izdanja doseglo ukupnu nakladu od 290 000 primjeraka. Na taj je način diljem Jugoslavije rašireni priručnik sve više dolazio u upotrebu ne samo na radnim mjestima, već i kao pomagalo pri učenju.

Kako se već razabire iz predgovora prvom izdanju, priručnik je od svoga početka trebao da posluži u dvije glavne svrhe:

- da pomaže strojarskim stručnjacima pri studiju i u praksi – đacima, studentima, tehničarima i inženjerima – mnogim brojčanim podacima iz struke, potrebnim pri svakodnevnom radu, i
- da jedinstveno prikaže sve zakonitosti za sve grane strojarstva veličinskim jednadžbama, tj. u prirodnim međusobnim odnosima veličina (što je bio u vrijeme prvog izdanja priručnika prerani i veoma smion zahvat). Stoga je bilo potrebno prijeći na upotrebu koherentnih jedinica.

U vezi s tim priručnik je već u prvom izdanju, g. 1954, upoznao čitaoce sa suvremenim mjernim jedinicama (tada još Giorgijeva sustava jedinica) te objavio i u tim jedinicama preračunane brojčane podatke. Tim jedinicama (sada međunarodnog sustava jedinica SI) posvetio je priručnik posebnu pažnju i u ovom izdanju, koje je potpuno usklađeno s jugoslavenskim zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima.

Osim toga priručnik je u skladu s najnovijim stanjem standardizacije (JUS, ISO, DIN), a dopunjen je i proširen novim poglavljima.

U novom gradivu valja posebno spomenuti: pročišćeno i dopunjeno poglavlje o matematici; potpuno nanovo napisana poglavlja o osnovnim pojmovima s područja regulacije i elektronske obrade podataka; nadopunjeni podaci o plastičnim tvarinama, pregled područja preoblikovanja te korozije i površinske zaštite.

Da se s novim gradivom priručnik ne bi povećao preko priručnog opsega, u tom izdanju su izostale tablice o potencijama i korijenima brojeva (što više nije potrebno zbog široke upotrebe ručnih računala) kao i posebni dodatak o informatici i računarstvu (jer je u priručnik uključeno novo poglavlje s tog područja).

Naročitu zahvalnost dugujem nakladi »Springer Verlag« Berlin-Heidelberg-New York, i univ. prof. dr E. Schmidt, što su dopustili upotrebu podataka za tablice vodene pare iz djela »Properties of Water and Steam in SI-Units« (1969).

Zahvaljujem Jugoslovenskom zavodu za standardizaciju u Beogradu i ustanovi »Deutscher Normenausschuß« u Berlinu za pristanak i pomoć pri upotrebi brojčanih podataka iz standarda.

Za pomoć pri sastavljanju rukopisa dužan sam zahvaliti u prvom redu dr Jožetu Puharu za mnoge korisne prijedloge, napose pri lančanom i zupčanom prijenosu te tehnološkim postupcima i dr Pavli Mizori-Oblak za neposredno sudjelovanje pri dopunjavanju poglavlja o matematici; umir. prof. Miroslavu Pečorniku za konkretne prijedloge s područja hidromehanike i vlažnog zraka; mr. Dragu Kelšinu za pomoć pri proširenju poglavlja o elektrotehnici, dr Zoranu Karižu za sudjelovanje pri oblikovanju poglavlja o regulaciji, dr Jožetu Duhovniku za predloge o elektronskoj obradi podataka kao i svima drugima koji su mi pomogli korisnim savjetima i upozorenjima.

Toplo zahvaljujem također Anji Baras, za sudjelovanje pri dugotrajnom sastavljanju rukopisa i pažljivom popravljivanju otisaka, i Joži Puhar za uzorno izradene slike.

Zamisao takvog prikaza gradiva da je – zbog boljeg pregleda i veće upotrebljivosti – na jednoj ili dvije susjedne strane sabrano sve što je međusobno tijesno povezano, zahtijevala je mnogo dodatnog rada već pri samom oblikovanju rukopisa, a potom još stalnu i tijesnu suradnju autora sa slagarima.

Tiskara »Ljudske pravice« i njeni radnici strpljivo su ispunjavali mnoge sitne želje autora. Hvala svima!

U Ljubljani, kolovoza 1987

Bojan Kraut

NAPOMENA PREVODIOCA

Po želji nakladnika i u ovom je izdanju upotrebljena stručna terminologija, uvriježena na Fakultetu za strojarstvo i brodogradnju Sveučilišta u Zagrebu, što je sabrana u Tehničkom rječniku Vlatka Đapca (izd. 1970).

Zbog veoma proširenog gradiva bila mi je potrebna pomoć u terminologiji. Tu su mi pružili: prof. dr ing. B. Ostojić, mr. Lovorka Tomašić i dipl. ing. A. Sok na čemu im se najtoplije zahvaljujem.

Jezično je dotjerivanje preuzeo izdavač.

Rijeka, kolovoza 1987

Miroslav Pečornik

SADRŽAJ

PRVI DIO

	Stranica
MATEMATIKA	1
Matematički znakovi	1
Važne vrijednosti (π , e)	2
RACUNANJE S POTENCIJAMA I KORIJENIMA	3
LOGARITMI – Računanje s logaritima	4
Dekadski (Briggsovi) logaritmi – Prirodni logaritmi	5
TRIGONOMETRIJSKE FUNKCIJE – Osnovni odnosi	10
Trigonometrijske funkcije dvaju kutova	11
Sinus, kosinus – Tangens, kotangens	12
Izračunavanje stranica i kutova trokuta	16
LIKOVII TJELA	18
Površina i opseg likova	18
Površine i volumeni tijela	20
KOMBINATORIKA	22
NIZOVI I REDOVI	22
Aritmetički niz – Geometrijski niz	22
Važnji redovi	23
DETERMINANTE – MATRICE	24
APSOLOTNA I SREDNJA VRIJEDNOST	26
BINOMI	26
ALGEBARSKJE JEDNADŽBE	27
Jednadžba n -tog stupnja – Sistem linearnih jednadžbi	27
TRANSCEDENTNE JEDNADŽBE	29
NEJEDNADŽBE	29
ANALITIČKA GEOMETRIJA	30
Pravac – Potencijalne krivulje	30
Čunjosječne	31
Cikličke krivulje	32
FUNKCIJE – Elementarne funkcije	33
Eksponecijalna i logaritamska funkcija – Kutne funkcije	34
Ciklotrične i hiperbolne funkcije	35
DERIVACIJA FUNKCIJE	36
Diferencijal funkcije – Derivacije višeg reda	36
Geometrijsko značenje derivacije funkcije – Parcijalna derivacija	37
INTEGRAL	38
Neodređeni integral – Određeni integral	38
Numerička integracija	40
Višestruki integral	41
DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE	42
VEKTORI	43
Zbrajanje i oduzimanje vektora – Množenje vektora	44
Krivulje u prostoru – Skalarna i vektorska polja	46
Derivacija i integracija vektorskih funkcija	47
LAPLACEOVA TRANSFORMACIJA	48
STATISTIKA	49
Statistička vjerojatnost – Statistički prosjek	49
Razdioba učestalosti	50
Regresija i korelacija – Greške mjerenja	52

SUSTAVI MJERNIH JEDINICA	53
Veličinske jednadžbe i koherentne jedinice – Brojčane jednadžbe	53
MEĐUNARODNI SUSTAV JEDINICA SI	54
Osnovne jedinice	55
Izvedene jedinice	56
Decimalne mjerne jedinice	58
JEDINICE I MJERE VELIČINA	59
Geometrijske veličine – Vremenske veličine	59
Masene veličine – Protočne veličine	63
Veličine za silu – Energetske veličine	64
Toplinske veličine – Molne veličine	66
Veličine zračenja	68
Električne veličine – Svjetlosne veličine	69
STARE JEDINICE I MJERE	71
POSEBNE MJERE	74
Standardni kubni metar	74
Bauméova areometarska skala – Beaufortova skala	74
TVARI	75
SASTAV TVARI	75
Kemijski elementi – Periodični sistem elemenata	76
Svojstva elemenata	80
KEMIJSKI SPOJEVI	81
Kemijske veze – Kemijske reakcije	82
Hidridi – Oksidi	83
Karbidi – Nitridi – Sulfidi – Fosfidi	85
Kiseline i baze – Vrijednosti pH	87
Soli	89
Organski spojevi – Polimeri	92
PREGLED TVARI	97
MEHANIKA	98
Masa i težina – Gustoća tehničkih materijala	98
Kutovi prirodnog pokosa	100
STATIKA	101
Sila – Statički moment sile	101
Ravnoteža sila – Nosači	104
Statika užeta	106
TEŽIŠTA	106
Težišta linija, likova i tijela	106
TRENJE	109
ČVRSTOĆA	112
Naprezanje – Geometrijske karakteristike presjeka	112
Vlak i tlak – Savijanje – Smik – Torzija	114
Izvijanje	120
Složena opterećenja	122
DINAMIKA	124
Kinematika – Kinetika	124
Moment tromosti mase	128
Centrifugalna sila – Sudar	130
Titranje	131

HIDROMEHANIKA	133
Viskoznost	133
HIDROSTATIKA	133
Hidrostatski tlak	133
Atmosfersko stanje	135
HIDRODINAMIKA	136
Bernoullijeva jednadžba	136
Pritisak mlaza	137
Brzina istjecanja – Količna istjecanja	138
Protok	139
Zakoni sličnosti strujanja	140
Otpori strujanja u cijevima i armaturama	141
Otpori gibanja u fluidu	147
HIDRAULIČKI STROJEVI	148
SISALJKE (PUMPE)	148
Dobavna visina – Dopuštena usisna visina – Snaga	148
Stapne sisaljke – Turbopumpe – Ventilatori	150
VODNE TURBINE	154
Vodna snaga – Koristan pad	154
Snaga turbina – Brzohodnost turbina	155
TOPLINA	157
Specifični toplinski kapacitet	157
Entalpija	157
Temperaturna rastezljivost (dilatacija)	157
OSNOVNI ZAKONI TERMODINAMIKE	160
Prvi glavni zakon termodinamike	160
Drugi glavni zakon termodinamike	160
Promjena stanja tvari – Kružni procesi	161
IDEALNI PLINOVI	162
Toplinska svojstva plinova	163
Povratne promjene stanja plinova	165
Prigušivanje	166
Smjese idealnih plinova – Mješanje plinova	167
PARE	168
Zasićena para – Pregrijana para	168
Zrak (toplinska svojstva)	169
Mollierov h, s – dijagram za vodenu paru	171
Zasićena vodena para (tablice)	172
Voda i pregrijana vodena para (tablice)	175
Zasićena para rashladnih tvari	188
Promjene stanja pare	192
SMJESE PLINOVA I PARA	193
Smjesa zraka i vodene pare (vlažni zrak)	193
Suhi i zasićeni vlažni zrak (tablica)	194
Vlažni zrak (tablica)	195
Mollierov h, x – dijagram za vlažni zrak	198
Promjene stanja vlažnog zraka	199

STRUJANJE PLINOVA I PARA	201
Istjecanje iz sapnica – Prigušivanje	201
IZGARANJE	202
Potreba kisika i zraka – Količina dimnih plinova	202
Ogrijevne moći	203
Sastav dimnih plinova – Entalpija dimnih plinova	204
Teoretska temperatura izgaranja – Kontrola izgaranja	205
Goriva	206
PRIJENOS TOPLINE	210
Toplinska vodljivost – Prijelaz topline	210
Toplinska svojstva tvari	212
Toplinsko zračenje – Prolaz topline	218
Tehnički izmjenjivači topline	221
TOPLINSKI UREĐAJI I STROJEVI	222
Simboli	222
PARNI KOTLOVI	223
Ložišta – Izmjenjivači topline	223
Kapacitet (snaga) parnog kotla – Korisnost	225
Napojne pumpe	226
RADNA SPOSOBNOST PARE	227
Eksergija pare – Raspoloživi pad entalpije	227
PARNI STROJEVI	228
Snaga parnih strojeva	228
Stapni parni strojevi – Parne turbine	229
KONDENZACIJA	232
PARNA POSTROJENJA	233
Kondenzacijska parna postrojenja	233
Regenerativno grijanje napojne vode	236
Međupregrijavanje	237
Toplane	237
MOTORI S UNUTRAŠNJIM IZGARANJEM	239
Sistemi Otto i Diesel	239
4-taktni i 2-taktni motori – Indikatorski dijagram	239
Ekonomičnost motora s unutarnjim izgaranjem	241
KOMPRESORI	243
Promjene stanja plina	243
Višestepena kompresija	244
Stapni kompresori – Turbokompresori	245
PLINSKE TURBINE	247
Mlazni motori	249
TOPLINSKE PUMPE	250
Kompresijske toplinske pumpe	250
Apsorpcijske toplinske pumpe	251
Rashladne smjese	252
KLIMATIZACIJA I SUŠENJE	253
Klimatizacija	253
Sušenje	254

ELEKTROTEHNIKA	255
Simboli	255
ISTOSMJERNA STRUJA	256
Ohmov zakon – Kirchhoffovi zakoni	256
MAGNETSKO I ELEKTRIČNO POLJE	262
Magnetsko polje – Gustoća magnetskog polja	262
Induktivitet – Električno polje	263
Kapacitet	265
Vodič električne struje u magnetskom polju	265
IZMJENIČNA STRUJA	266
Otpor za izmjeničnu struju	266
Jednofazni sistem – Trofazni sistem	267
Transformacija izmjenične struje	267
ELEKTRIČNO GRIJANJE	268
ELEKTRIČNA RASVJETA	270
ELEKTROMOTORI	271
Motori istosmjerne struje – Motori izmjenične struje	271
Snaga elektromotora – Izbor elektromotora	273
ELEKTRIČNI VODOVI NISKOGR NAPONA	274
Pad napona	274
Zaštita vodova	275
Zaštitne mjere u niskonaponskim postrojenjima	275
ELEKTRIČNA OPREMA MOTORNIM VOZILIMA	277
ELEKTRONIKA	280
Električni ventili	280
Dioda – Ispravljači	281
Tranzistori – Osnovni tranzistorski spojevi	284
MJERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA	286
AKUSTIKA I OPTIKA	288
Svjetlost	288
Zvuk	289
UPRAVLJANJE – REGULACIJA – AUTOMATIZACIJA	291
REGULACIJSKI ČLANOVI	291
Vremenski odzivi	292
Zamjećivanje veličina	295
Regulacijska petlja	296
Regulacijski uređaj	297
Regulatori	298
ELEKTRONIČKA OBRADA PODATAKA	301
Princip analogne tehnike	302
Princip digitalne tehnike	303
Kodiranje digitalnih podataka	304
Spremanje podataka	306
Armaturna oprema	307
Programska oprema	308
Programski jezici	311
Procesni računari – Pomoć računara	312

DRUGI DIO

ISPITIVANJE MATERIJALA	313
Dijagram	313
MEHANIČKO ISPITIVANJE METALA	314
Vlačno ispitivanje	314
Pokus savijanja – Tlačno ispitivanje	317
Ispitivanje žica torzijom – Ispitivanje žica izmjeničnim pregibanjem	318
Ispitivanje sposobnosti za izvlačenje	318
Ispitivanje udarom po Charpyju	319
ISPITIVANJE TRAJNE ČVRSTOĆE	320
Ispitivanje trajne statičke i dinamičke čvrstoće	320
ISPITIVANJE TVRDOĆE	322
Ispitivanje tvrdoće po Brinellu	322
Ispitivanje tvrdoće po Vickersu	326
Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu	330
Ispitivanje tvrdoće plastičnih tvari	334
ISPITIVANJE BEZ OŠTEĆIVANJA MATERIJALA	336
Magnetsko ispitivanje – Ispitivanje ultrazvukom	336
Ispitivanje rendgenskim zrakama – Ispitivanje γ -zrakama	337
ISPITIVANJE SASTAVA MATERIJALA	338
Kemijska analiza – Ispitivanje iskrenjem	338
Metalografski pregledi	340
KOVINSKI MATERIJALI	341
Kristalna struktura kovina	341
Slitine	342
ŽELJEZO I NJEGOVE SLITINE	343
Čisto željezo – Tehničko željezo	343
Sistem željezo-ugljik	344
Utjecaj brzine ohlađivanja austenita na strukturu čelika	345
Utjecaj elemenata na strukturu čelika	346
TOPLINSKA OBRADA ČELIKA	348
Žarenje čelika – Kaljenje čelika	348
LJEVANO ŽELJEZO	354
Sivi lijev – Tvrdi lijev – Temperovani lijev	354
VRSTE ČELIKA	357
Razdioba čelika – Označivanje vrsta čelika po JUS	357
KONSTRUKCIJSKI ČELICI	360
Opći konstrukcijski čelici	362
Sitnozrnati konstrukcijski čelici	364
Čelici za cementiranje, poboljšanje, nitiranje	364
Magnetski lim – Čelici za automate – Čelici za opruge	369
Hladno valjani čelični lim – Valjana čelična žica	372
Čelik za valjane cijevi – Čelik za kotlovni lim	374
Čelici otporni na kemijske utjecaje	376
Čelici za ventile – Vatrostalni čelici	377
Čelici postojani pri višim temperaturama – Čelici otporni prema habanju	378
ALATNI ČELICI	379
Ugljični alatni čelici	379
Legirani alatni čelici za vruću i hladnu obradu	380
Brzorezni čelici	383

ČELIČNI LIJEV	384
Ugljični čelični lijev	384
Legirani čelični lijev za poboljšanje	384
Kemijски otporan čelični lijev	385
Čelični lijev otporan prema habanju	385
OZNAKE ČELIKA	386
Oznake čelika prema standardima JUS i DIN	386
Oznake domaćih i stranih alatnih čelika	389
TVRDI METALI	390
Lijevani tvrdi metali – Sinterovani tvrdi metali	390
LAKE KOVINE	392
Aluminij – Aluminijske slitine – Magnezijske slitine	392
BAKAR I BAKRENE SLITINE	400
Bakar – Bakrene slitine za gnječenje i lijevanje	400
NIKAL I NIKLENE SLITINE	408
Čisti nikal – Niklene slitine za lijevanje i gnječenje	408
CINK I CINČANE SLITINE	411
Čisti cink – Cinčane slitine za lijevanje	411
OLOVO I OLOVNE TE KOSITRENE SLITINE	412
Čisto olovo – Slitine olova s kositrom i antimonom	412
Kositrene i olovne slitine za ležaje	413
LEMOVI	414
Tvrdi lemovi – Meki lemovi – Srebrni lemovi	414
Aluminijski lemovi	415
POSEBNE SLITINE ZA ELEKTROTEHNIKU	416
TITAN I TITANOVE SLITINE	417
OBLICI KOVINSKIH POLUPROIZVODA	418
ODLJEVCI OD SIVOG LIJEVA	418
Cijevi s koltakom – Cijevi s prirubnicom – Fazonski cijevni komadi	418
ČELIČNI POLUPROIZVODI	422
Čelik u šipkama – Plosnati čelik	422
Čelični kutni profili – Čelični profili – Željezničke tračnice	426
Čelični limovi – Čelične bešavne cijevi	433
Čelična žica – Čelična užad – Čelični lanci	442
ALUMINIJSKI POLUPROIZVODI	451
Aluminijske šipke i žice	451
Aluminijski profili	456
Toplo valjani lim i cijevi	458
POLUPROIZVODI OD BAKRA I BAKRENIH SLITINA	462
Bakrene šipke, lim, žica i užad	462
Cijevi od bakra i bakrenih slitina	464
POLUPROIZVODI OD MJEDI, CINKA I OLOVA	468
NEKOVINSKI MATERIJALI	496
ANORGANSKI NEKOVINSKI MATERIJALI	469
Staklo – Beton – Keramički materijali	469
DRVO	472
PLASTI	473
Mehanička stanja plastu	475
Termoplasti – Elastii – Duroplasti	476
Posebni proizvodi od plastu	482

ELEMENTI STROJEVA	483
Standardni brojevi – Standardne duljinske mjere	483
DOSJEDANJE STROJNIH DIJELOVA	486
Tolerancije mjera – Tolerancije mjerila	486
Dosljedii (nalijeganja)	494
POVRŠINSKA HRPAVOST	500
NAVOJI	504
Metarski navoji s trokutnim profilom ISO	504
Tolerancije metarskih navoja (ISO) – Navojni dosjedi	510
Cijevni navoji	519
Trapezni navoji – Pilasti navoji	520
Obli navoji – Navoji za bicikle – Edisonovi navoji	528
Navoji za oklopne cijevi – Navoji samoreznih vijaka	531
DOPUŠTENA NAPREZANJA	532
Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih materijala	533
Dopuštena naprezanja za čelične konstrukcije	536
Utjecaj oblika predmeta	537
Utjecaj trajanja opterećenja	537
Utjecaj promjenljivog opterećenja	539
NERASTAVLJIVI SPOJEVI	543
Zakovični spojevi – Zavarii	543
Lemljeni spojevi – Lijepljeni spojevi	546
Stezni spojevi	547
RASTAVLJIVI SPOJEVI	548
Spojevi klinovima – Utorni spojevi	548
Spojevi svornjacima i zaticima – Vijčani spojevi	549
STROJNI DIJELOVI ZA PRIJENOS KRUŽNIH GIBANJA	553
Osovine	553
Remenski prijenos – Lančani prijenos	553
Zupčani prijenos	560
Proračun čvrstoće čelnika	568
Parovi stožnika	572
Parovi hiperboloidnih zupčanika	573
Cilindrički pužni prijenos	574
LEŽAJI	576
Klizni ležaji	576
Valjni ležaji	577
Kuglični ležaji – Valjkasti ležaji	577
Bačvasti ležaji – Stožasti ležaji	586
Aksijalni kuglični ležaji – Aksijalni bačvasti ležaji	591
Nosivost valjnih ležaja	597
MAZIVA	601
Ležajna, vretenasta, osovinska i cirkulacijska ulja	603
Ulja za visoki tlak, zupčanike i zupčane prigone	604
Hidrauličko, kompresorsko, turbinsko i cilindarsko ulje	605
Motorno ulje	606
Vazelinsko, izolacijsko ulje i ulje za obradu	607
Masti za mazanje	608
Izbor maziva	609

TEHNOLOGIJA	613
LJEVANJE	613
Modeli	613
Kalupi	614
PLASTIČNA OBRADA	618
Kovanje – Valjanje	618
Utiskivanje – Vučenje – Savijanje – Odrezivanje	619
Oblikovanje plastu	620
ZAVARIVANJE	621
Zavarivanje pritiskom	621
Zavarivanje taljenjem	622
Aluminotermijsko zavarivanje – Otporno zavarivanje	623
Zavarivanje plamenom	624
Rezanje kovina plamenom	625
Elektrolučno zavarivanje	626
Zavarivanje plastu	631
LEMLJENJE	631
LEMLJENJE KOVINA	631
OBRADA KOVINA ODVAJANJEM ČESTICA	632
Osnovi – Geometrijski oblik oštrice	632
Tokarenje	634
Blanjanje i dubljenje	637
Piljenje kovina – Glodanje	640
Brušenje	644
Posebne obrade	647
Postojanost alata	648
Optimalna brzina rezanja	649
Središnja gnijezda	650
Četverobrudi alat	651
Konični dršci za alat	652
MJERENJE KUTOVA I KONUSA	654
KOROZIJA I POVRŠINSKA ZAŠTITA	656
Korozija	656
Površinska zaštita	657
RAZNO	658
TEHNIČKO PISMO	658
Uspravni i nagnuti tisak	658
Normalni formati papira – Mjerila	659
Grčka slova – Rimski brojevi	659
TOVARNE MJERE ŽELJEZNIČKIH VOZILA	660
JUGOSLAVENSKI STANDARDI – JUS	661
IZGOVARANJE STRANIH IMENA	664
IZVORI BROJČANIH PODATAKA	665
KAZALO	667

UPUTE za upotrebu priručnika

1. Pisanje razlomaka s kosom razlomkovom crtom

Zbog skućenog prostora i radi pojednostavnjenja tiskarskog sloga, razlomci su pisani kosom razlomkovom crtom. Pri tome se smatra da se značenje razlomkove crte proteže do prvog znaka plus, minus ili puta:

$$ab/cd = ab/(cd) = (ab)/(cd) = \frac{ab}{cd} \quad ab/c \cdot d = (ab/c) \cdot d = \frac{ab}{c} d$$

$$(a + b)/(c + d) = \frac{a + b}{c + d} \quad a + b/c + d = a + \frac{b}{c} + d$$

2. Označivanje vektora

Vektori su u ovom priručniku označeni:

u tekstu — debljim tiskom simbola (**a**)

u slikama — oznakom površ simbola (\vec{a})

jer bi u tekstu označivanje površ simbola povećalo grafičke teškoće, dok bi u slikama bilo teško izvedivo razlikovanje između običnog i deblje tiskanog simbola.

3. Označivanje lučne mjere

Da u preračunavanju prema jednadžbama ne bi došlo do zamjene između mjere za kut (°) i lučne mjere (rad), simboli su označeni:

$$\begin{array}{ll} \text{za kut (geometrijski)} & \alpha \\ \text{za lučnu mjeru (analitički kut)} & \tilde{\alpha} \end{array}$$

Osim toga je u svim jednadžbama, gdje se pojavljuje lučna mjera, dodano još upozorenje: $\tilde{\alpha}$ (rad).

4. Računanje s veličinskim jednadžbama

U ovom su priručniku u načelu upotrijebljene samo veličinske jednadžbe (vidi str. 53). Pri računanju s veličinskim jednadžbama moraju biti količine svih veličina izražene u **k o h e r e n t n i m** jedinicama.

Sve SI jedinice su međusobno koherentne. Stoga je pri računanju s veličinskim jednadžbama rezultat uvijek pravilan ako se sve mjeri u jedinicama SI.

Za pregledne, jednostavne veličinske jednadžbe mogu se upotrijebiti i druge koherentne jedinice, ako su prikladnije.

Pri kompliciranim veličinskim jednadžbama izbjegavaju se moguće pogreške isključivom upotrebom jedinica SI. Količinske vrijednosti veličina, zadanih u bilo kojim drugim mjerama, valja stoga ponajprije pretvoriti u jedinice SI.

Pri proračunavanju veličine brojčanim jednadžbama (vidi str. 53) moraju biti zadani za svaku veličinu i podaci o njenoj mjeri.

Primjeri*

a) Brzina $v = s/t$

Za: $s = 24 \text{ km}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = 24\,000 \text{ m}$
 $t = 20 \text{ min} = 0,333 \text{ h}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = 1\,200 \text{ s}$

je $v = \frac{24\,000}{1\,200} = 20 \text{ m/s}$

ili $v = \frac{24 \text{ km}}{0,333 \text{ h}} = 72 \text{ km/h} \quad (= 20 \text{ m/s})$

b) Čvrstoća $R_m = F_m/S_0$

Za: $F_m = 7,5 \text{ kN}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = 7\,500 \text{ N}$
 $S_0 = 20 \text{ mm}^2$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

je $R_m = \frac{7\,500}{20 \cdot 10^{-6}} = 375 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \quad (= 375 \text{ MPa})$

ili $R_m = \frac{7\,500 \text{ N}}{20 \text{ mm}^2} = 375 \text{ N/mm}^2 \quad (= 375 \text{ MPa})$

c) Brzina istjecanja $v_0 = \sqrt{2(g h + \Delta p/\rho)}$

Za: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 9,81 \text{ m/s}^2$
 $h = 510 \text{ cm}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 5,1 \text{ m}$
 $\Delta p = 2,5 \text{ bar}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 $\rho = 1 \text{ kg/dm}^3$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$

je $v_0 = \sqrt{2(9,81 \cdot 5,1 + 2,5 \cdot 10^5/10^3)} = 24,5 \text{ m/s}$

č) Toplinski tok $\phi = k(T_1 - T_2)A$

Za: $k = 100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
 $t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} T_1 - T_2 = 50 \text{ K}$
 $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 2 \text{ m}^2$
 $A = 200 \text{ dm}^2$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 2 \text{ m}^2$

je $\phi = 100 \cdot 50 \cdot 2 = 10\,000 \text{ W} \quad (= 10 \text{ kW})$

ć) Prandtlov broj $Pr = \rho c v/\lambda$

Za: $\rho = 0,871 \text{ kg/dm}^3$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 871 \text{ kg/m}^3$
 $c = 1,850 \text{ kJ/kg K}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 1\,850 \text{ J/kg K}$
 $v = 15,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 15,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $\lambda = 0,144 \text{ W/m K}$ $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} = 0,144 \text{ W/m K}$

je $Pr = \frac{871 \cdot 1\,850 \cdot 15,0 \cdot 10^{-6}}{0,144} = 167,8 \quad (-)$

PRVI DIO

MATEMATIKA

Matematički znakovi

=	jednako	|a|	apsolutna vrijednost
≡	istovjetno, identično	a ⁿ	a na (potenciju) m
≠	nije jednako	√	kvadratni korijen
≈	približno jednako	√ ⁿ	n-ti korijen
~	slično	log _b	logaritam za bazu b
≍	sukladno, kongruentno	lg	dekadski logaritam
⊥	okomito	ln	prirodni logaritam
∥	usporedno, paralelno	arc	arkus
≠	paralelno i jednako	sin	sinus
<	manje od	cos	kosinus
>	veće od	tan	tangens
≧	manje ili jednako	cot	kotangens
≧	veće ili jednako	!	faktorijela
∞	beskonačno	(^a / _b)	a povrh b
const	konstantno	i	imaginarna jedinica (i ² = -1)
∠	kut	lim	limes
∩	luk	→	teži k
+	plus – zbrajanje	f()	funkcija
-	minus – oduzimanje	Δ	razlika
·	puta – množenje	d	diferencijal
×	dijeljenje	y' = $\frac{dy}{dx}$	prva derivacija
—	razlomkova crta	y'' = $\frac{d^2y}{dx^2}$	druga derivacija
/	kosa razlomkova crta	$\frac{\partial}{\partial x}$	parcijalna derivacija
()	okrugla	∑	suma, zbroj
[]	uglata	∫	integral
{ }	vitičasta	∫ a	oznake vektora*
⋯	od – do		
⋯ (	od – do isključivo		
%	postotak, procent		
‰	promil		
ppm	dijelovi na milijun (partes pro millione)		

* Podaci desno od vertikalne crte su dani u jedinicama SI. – Pri proračunavanju veličinskih jednadžbi jedinicama SI nije potrebna dimenzijska kontrola.

* U ovom su priručniku vektori označeni: \vec{a} – u slikama, **a** – u tekstu (iz tiskarskih razloga).

Posebni matematički znakovi

\in je element skupa	$(a \in A: a \text{ je element skupa } A)$
\notin nije element skupa	$(b \notin A: b \text{ nije element skupa } A)$
\subset sadržan u skupu	$(A \subset B: \text{skup } A \text{ sadržan je u skupu } B)$
\cup unija skupova	$(A \cup B: \text{unija skupova } A \text{ i } B \text{ sadrži sve elemente, koji su u skupovima } A \text{ ili } B)$
\cap presjek skupova	$(A \cap B: \text{presjek skupova } A \text{ i } B \text{ sadrži sve one elemente, koji su ujedno u skupovima } A \text{ i } B)$
*	
∇ nabra (Hamiltonov operator deriviranja)	Δ Laplaceov operator
*	
N prirodni brojevi	$\mathbf{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$
Z cijeli brojevi	$\mathbf{Z} = \{0, 1, -1, 2, -2, \dots\}$
R realni brojevi (racionalna i iracionalni brojevi)	
Q racionalni brojevi (razlomci)	$\mathbf{Q} = \{m/n; m, n \in \mathbf{Z}; n \neq 0\}$
Iracionalni su svi realni brojevi koji nisu racionalni (mogu se prikazati kao neperiodiski beskonačni decimalni razlomci), npr. $\sqrt{2}$, π , e	
C kompleksni brojevi	$\mathbf{C} = a + bi$
i – imaginarna jedinica ($i^2 = -1$)	a – realna komponenta b – imaginarna komponenta

Važne vrijednosti

Ludolfov broj: $\pi = 3,141\,592\,6535\dots$ ($\approx 22/7$, $\approx 355/113$)

$2\pi = 6,283\,185\dots$	$\pi^2 = 9,869\,604\dots$	$2/\pi = 0,636\,620\dots$
$3\pi = 9,424\,778\dots$	$\sqrt{\pi} = 1,772\,454\dots$	$3/\pi = 0,954\,930\dots$
$4\pi = 12,566\,371\dots$	$\sqrt{2\pi} = 2,506\,628\dots$	$4/\pi = 1,273\,240\dots$
$\pi/2 = 1,570\,796\dots$	$1/\pi = 0,318\,310\dots$	$6/\pi = 1,909\,859\dots$
$\pi/3 = 1,047\,197\dots$	$1/2\pi = 0,159\,155\dots$	$1/\pi^2 = 0,101\,321\dots$
$\pi/4 = 0,785\,398\dots$	$1/3\pi = 0,106\,103\dots$	$\sqrt{1/\pi} = 0,564\,190\dots$
$\pi/6 = 0,523\,599\dots$	$1/4\pi = 0,079\,577\dots$	$\sqrt{1/2\pi} = 0,398\,942\dots$
$\ln\pi = 1,144\,730\dots$	$\lg\pi = 0,497\,149\dots$	

*

Eulerov broj: $e = 2,718\,282\dots$ (Osnova prirodnih logaritama)

$e^2 = 7,389\,056\dots$	$\sqrt[3]{e} = 1,395\,612\dots$	$1/e^2 = 0,135\,335\dots$
$\sqrt{e} = 1,648\,721\dots$	$1/e = 0,367\,879\dots$	$\sqrt{1/e} = 0,606\,531\dots$
	$\lg e = 0,434\,294\dots$	

RAČUNANJE S POTENCIJAMA I KORIJENIMA

Potencije

$a^n = a \cdot a \cdot a \dots$ (n -puta)
 a – osnova, baza
 n – eksponent
 $a^0 = 1 \quad a \neq 0$
 $a^1 = a$

Korijeni

$\sqrt[n]{a} = a^{1/n}$
 a – radikand
 n – korijenski eksponent

$\sqrt[n]{a} = a$

$\lim_{n \rightarrow \infty} a^n = \begin{cases} 0 & \text{za } 0 < a < 1 \\ \infty & \text{za } a > 1 \end{cases}$

Taki eksponenti ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n} = +a^{2n}$

$\sqrt[2n]{+a} = \sqrt[2n]{+a}$

$\sqrt[2n]{-a} = i \sqrt[2n]{+a}$

Lihi eksponenti ($a > 0$)

$(\pm a)^{2n+1} = \pm a^{2n+1}$

$\sqrt[2n+1]{\pm a} = \pm \sqrt[2n+1]{+a}$

*

$a^{-n} = \frac{1}{a^n}$

$a^{-1/n} = \frac{1}{\sqrt[n]{a}}$

$a^{mn} = (a^m)^n = (a^n)^m$

$a^{m/n} = \sqrt[n]{a^m} = (\sqrt[n]{a})^m$

$a^m a^n = a^{m+n}$

$\frac{a^m}{a^n} = a^{m-n}$

$\sqrt[m]{\sqrt[n]{a}} = (a^{1/n})^{1/m} = a^{1/mn} = \sqrt[mn]{a}$

$a^n b^n = (ab)^n$

$\sqrt[n]{a} \sqrt[n]{b} = \sqrt[n]{ab}$

$\frac{a^n}{b^n} = \left(\frac{a}{b}\right)^n$

$\frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}} = \sqrt[n]{\frac{a}{b}}$

*

$0^n = 0$

$\sqrt[n]{0} = 0$

$\lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{n} = \infty$

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$

Neodređeni izrazi: 1^∞ , 0^0 , ∞^0 , $0/0$, ∞/∞ , $0 \cdot \infty$, $\infty - \infty$

LOGARITMI

Logaritmiranje je računaska operacija, pri kojoj tražimo eksponent b iz poznate potencije c i baze a

$$a^b = c$$

Broj b je logaritam broja c za bazu a

$$b = \log_a c$$

(gdje su a i c pozitivni brojevi).

Za bilo koju bazu $a > 0, a \neq 1$ vrijedi:

$$\begin{aligned} \log_a a &= 1 \\ \log_a 1 &= 0 \end{aligned}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \log_a x = \begin{cases} -\infty & \text{za } a > 1 \\ +\infty & \text{za } 0 < a < 1 \end{cases}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \log_a x = \begin{cases} +\infty & \text{za } a > 1 \\ -\infty & \text{za } 0 < a < 1 \end{cases}$$

Računanje s logaritmima

$$\log_a (uv) = \log_a u + \log_a v$$

$$\log_a \frac{u}{v} = \log_a u - \log_a v$$

$$\log_a u^v = v \log_a u$$

$$\log_a \sqrt[v]{u} = \frac{1}{v} \log_a u$$

Primjer

$$\begin{aligned} \log \frac{2a^3 \sqrt{b}}{3c^2 d} &= \log(2a^3 \sqrt{b}) - \log(3c^2 d) = \\ &= \log 2 + 3 \log a + \frac{1}{2} \log b - \log 3 - 2 \log c - \log d \end{aligned}$$

*

Pretvaranje logaritama

$$\log_a u = M \log_b u \quad (M \text{ je modul pretvorbe})$$

U upotrebi su dekadski (Briggsovi) logaritmi s bazom $a = 10$ i prirodni logaritmi s bazom $a = e$ ($e = 2,718282\dots$)

Dekadski (Briggsovi) logaritmi

imaju bazu $a = 10$

Označujemo ih

$$\log_{10} u = \lg u$$

npr.

$$\lg 10 = 1 \quad \lg 10^n = n$$

Svaki se dekadski logaritam sastoji od:

a) **karakteristike** (cijelog broja u logaritmu), tj. potencije broja 10, koja odgovara mjesnoj vrijednosti prve brojke u danom broju u ;

b) **mantise** (decimale u logaritmu), koju za redoslijed brojaka u danom broju u potražimo u tablicama na str. 6 i 7.

Primer:

u	Karakteristika	Mantisa	$\lg u$
642	$\lg 10^2 = 2$	.8075	2,8075
64.2	$\lg 10^1 = 1$	(iz tablica	1,8075
6.42	$\lg 10^0 = 0$	za redoslijed	0,8075
0.642	$\lg 10^{-1} = -1$	brojaka 642)	0,8075 - 1
0,0642	$\lg 10^{-2} = -2$		0,8075 - 2

Prirodni logaritmi

imaju bazu $a = e = 2,718282\dots$

Označujemo ih

$$\log_e u = \ln u$$

npr.

$$\ln e = 1 \quad \ln e^n = n$$

*

Odnos dekadskih i prirodnih logaritama

$$\lg u = 0,4343 \ln u \quad \ln u = 2,3026 \lg u$$

Izračunavanje prirodnih logaritama iz dekadskih

$$\ln 6,42 = 2,3026 \cdot \lg 6,42 = 2,3026 \cdot 0,8075 = 1,8593$$

*

Prirodni logaritmi brojeva od 100 do 999 sabrani su u tablicama na str. 8 i 9. Za sve se druge brojeve izračunavaju pomoću

$$\ln 10 = 2,3026 \text{ i } \ln 10^n = 2,3026 n$$

npr.

$$\ln 642 = 6,4646 \text{ (iz tablica)}$$

$$\ln 6,42 = \ln (642/100) = \ln 642 - \ln 10^2 = 6,4646 - 2 \cdot 2,3026 = 1,8594$$

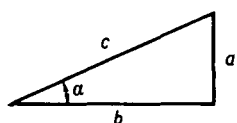
Mantise dekadskih logaritama 100...549

<i>u</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374
11.	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755
12.	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106
13.	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430
14.	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732
15.	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014
16.	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279
17.	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529
18.	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765
19.	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989
20.	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201
21.	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404
22.	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598
23.	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784
24.	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962
25.	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133
26.	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298
27.	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456
28.	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609
29.	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757
30.	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900
31.	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038
32.	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172
33.	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302
34.	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428
35.	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551
36.	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670
37.	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786
38.	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899
39.	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010
40.	6021	6031	6042	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117
41.	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222
42.	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325
43.	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425
44.	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522
45.	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618
46.	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712
47.	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803
48.	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893
49.	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981
50.	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067
51.	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152
52.	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235
53.	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316
54.	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396

Mantise dekadskih logaritama 550...999

<i>u</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55.	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474
56.	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551
57.	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627
58.	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701
59.	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774
60.	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846
61.	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917
62.	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987
63.	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055
64.	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122
65.	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189
66.	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254
67.	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8300	8306	8312	8319
68.	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382
69.	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445
70.	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506
71.	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567
72.	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627
73.	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686
74.	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745
75.	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802
76.	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859
77.	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915
78.	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971
79.	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025
80.	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079
81.	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133
82.	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186
83.	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238
84.	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289
85.	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340
86.	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390
87.	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440
88.	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489
89.	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538
90.	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586
91.	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633
92.	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680
93.	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727
94.	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773
95.	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818
96.	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863
97.	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908
98.	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952
99.	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996

TRIGONOMETRIJSKE FUNKCIJE



U pravokutnom su trokutu:
k a t e t e – stranice a i b uz pravi kut,
h i p o t e n u z a – stranica c nasuprot pravom
kutu.

Trigonometrijske funkcije kuta α su omje-
ri stranica pravokutnog trokuta:

$$\begin{array}{ll} \text{sinus} & \sin \alpha = a/c \\ \text{kosinus} & \cos \alpha = b/c \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{tangens} & \tan \alpha = a/b \\ \text{kotangens} & \cot \alpha = b/a \end{array}$$

Vrijednosti trigonometrijskih funkcija kutova od 0° do 90° sabrane su u tablicama: za sin i cos na str. 12 i 13, a za tan i cot na str. 14 in 15.

Vrijednosti trigonometrijskih funkcija češće potrebnih kutova

$\alpha =$	0°	30°	45°	60°	90°	180°	270°	360°
rad	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$\sin \alpha =$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1	0	-1	0
$\cos \alpha =$	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	1
$\tan \alpha =$	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm \infty$	0	$\pm \infty$	0
$\cot \alpha =$	$\pm \infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	0	$\pm \infty$	0	$\pm \infty$

Trigonometrijske funkcije u različitim područjima kutova

$\varphi =$	$\pm \alpha$	$90^\circ \pm \alpha$	$180^\circ \pm \alpha$	$270^\circ \pm \alpha$	$360^\circ \pm \alpha$
rad	$\pm \alpha$	$(\pi/2) \pm \alpha$	$\pi \pm \alpha$	$(3\pi/2) \pm \alpha$	$2\pi \pm \alpha$
$\sin \varphi =$	$\pm \sin \alpha$	$+\cos \alpha$	$\mp \sin \alpha$	$-\cos \alpha$	$\pm \sin \alpha$
$\cos \varphi =$	$+\cos \alpha$	$\mp \sin \alpha$	$-\cos \alpha$	$\pm \sin \alpha$	$+\cos \alpha$
$\tan \varphi =$	$\pm \tan \alpha$	$\mp \cot \alpha$	$\pm \tan \alpha$	$\mp \cot \alpha$	$\pm \tan \alpha$
$\cot \varphi =$	$\pm \cot \alpha$	$\mp \tan \alpha$	$\pm \cot \alpha$	$\mp \tan \alpha$	$\pm \cot \alpha$

Osnovni odnosi trigonometrijskih funkcija

$$\begin{array}{ll} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1 & \sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \\ \tan \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha & \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} \\ \cot \alpha = \cos \alpha / \sin \alpha & 1 + \tan^2 \alpha = 1 / \cos^2 \alpha \\ \tan \alpha \cot \alpha = 1 & 1 + \cot^2 \alpha = 1 / \sin^2 \alpha \end{array}$$

Trigonometrijske funkcije dvaju kutova

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan \alpha \pm \tan \beta}{1 \mp \tan \alpha \tan \beta}$$

$$\cot(\alpha \pm \beta) = \frac{\cot \alpha \cot \beta \mp 1}{\cot \beta \pm \cot \alpha}$$

Za $\alpha = \beta$ vrijedi:

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\tan 2\alpha = 2 \tan \alpha / (1 - \tan^2 \alpha)$$

$$\cot 2\alpha = (\cot^2 \alpha - 1) / 2 \cot \alpha$$

Nadalje vrijedi:

$$\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$$

$$\cos 3\alpha = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$$

$$2 \sin^2 \alpha = 1 - \cos 2\alpha$$

$$2 \cos^2 \alpha = 1 + \cos 2\alpha$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\tan \alpha \pm \tan \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cos \beta}$$

$$\cot \alpha \pm \cot \beta = \frac{\sin(\beta \pm \alpha)}{\sin \alpha \sin \beta}$$

$$2 \sin \alpha \sin \beta = -\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$$

$$2 \sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$$

$$2 \cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$$

Trigonometrijske funkcije: sinus od 0° do 45°, kosinus od 45° do 90°

sin α							
α	0'	10'	20'	30'	40'	50'	60'
0°	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01454	0,01745
1°	0,01745	0,02036	0,02327	0,02618	0,02908	0,03199	0,03490
2°	0,03490	0,03781	0,04071	0,04362	0,04653	0,04943	0,05234
3°	0,05234	0,05524	0,05814	0,06105	0,06395	0,06685	0,06976
4°	0,06976	0,07266	0,07556	0,07846	0,08136	0,08426	0,08716
5°	0,08716	0,09005	0,09295	0,09585	0,09874	0,10164	0,10453
6°	0,10453	0,10742	0,11031	0,11320	0,11609	0,11898	0,12187
7°	0,12187	0,12476	0,12764	0,13053	0,13341	0,13629	0,13917
8°	0,13917	0,14205	0,14493	0,14781	0,15069	0,15356	0,15643
9°	0,15643	0,15931	0,16218	0,16505	0,16792	0,17078	0,17365
10°	0,17365	0,17651	0,17937	0,18224	0,18509	0,18795	0,19081
11°	0,19081	0,19366	0,19652	0,19937	0,20222	0,20507	0,20791
12°	0,20791	0,21076	0,21360	0,21644	0,21928	0,22212	0,22495
13°	0,22495	0,22778	0,23062	0,23345	0,23627	0,23910	0,24192
14°	0,24192	0,24474	0,24756	0,25038	0,25320	0,25601	0,25882
15°	0,25882	0,26163	0,26443	0,26724	0,27004	0,27284	0,27564
16°	0,27564	0,27843	0,28123	0,28402	0,28680	0,28959	0,29237
17°	0,29237	0,29515	0,29793	0,30071	0,30348	0,30625	0,30902
18°	0,30902	0,31178	0,31454	0,31730	0,32006	0,32282	0,32557
19°	0,32557	0,32832	0,33106	0,33381	0,33655	0,33929	0,34202
20°	0,34202	0,34475	0,34748	0,35021	0,35293	0,35565	0,35837
21°	0,35837	0,36108	0,36379	0,36650	0,36921	0,37191	0,37461
22°	0,37461	0,37730	0,37999	0,38268	0,38537	0,38805	0,39073
23°	0,39073	0,39341	0,39608	0,39875	0,40141	0,40408	0,40674
24°	0,40674	0,40939	0,41204	0,41469	0,41734	0,41998	0,42262
25°	0,42262	0,42525	0,42788	0,43051	0,43313	0,43575	0,43837
26°	0,43837	0,44098	0,44359	0,44620	0,44880	0,45140	0,45399
27°	0,45399	0,45658	0,45917	0,46175	0,46433	0,46690	0,46947
28°	0,46947	0,47204	0,47460	0,47716	0,47971	0,48226	0,48481
29°	0,48481	0,48735	0,48989	0,49242	0,49495	0,49748	0,50000
30°	0,50000	0,50252	0,50503	0,50754	0,51004	0,51254	0,51504
31°	0,51504	0,51753	0,52002	0,52250	0,52498	0,52745	0,52992
32°	0,52992	0,53238	0,53484	0,53730	0,53975	0,54220	0,54464
33°	0,54464	0,54708	0,54951	0,55194	0,55436	0,55678	0,55919
34°	0,55919	0,56160	0,56401	0,56641	0,56880	0,57119	0,57358
35°	0,57358	0,57596	0,57833	0,58070	0,58307	0,58543	0,58779
36°	0,58779	0,59014	0,59248	0,59482	0,59716	0,59949	0,60182
37°	0,60182	0,60414	0,60645	0,60876	0,61107	0,61337	0,61566
38°	0,61566	0,61795	0,62024	0,62251	0,62479	0,62706	0,62932
39°	0,62932	0,63158	0,63383	0,63608	0,63832	0,64056	0,64279
40°	0,64279	0,64501	0,64723	0,64945	0,65166	0,65386	0,65606
41°	0,65606	0,65825	0,66044	0,66262	0,66480	0,66697	0,66913
42°	0,66913	0,67129	0,67344	0,67559	0,67773	0,67987	0,68200
43°	0,68200	0,68412	0,68624	0,68835	0,69046	0,69256	0,69466
44°	0,69466	0,69675	0,69883	0,70091	0,70298	0,70505	0,70711
60'	50'	40'	30'	20'	10'	0'	α
cos α							

Trigonometrijske funkcije: sinus od 45° do 90°, kosinus od 0° do 45°

sin α							
α	0'	10'	20'	30'	40'	50'	60'
45°	0,70711	0,70916	0,71121	0,71325	0,71529	0,71732	0,71934
46°	0,71934	0,72136	0,72337	0,72537	0,72737	0,72937	0,73135
47°	0,73135	0,73333	0,73531	0,73728	0,73924	0,74120	0,74314
48°	0,74314	0,74509	0,74703	0,74896	0,75088	0,75280	0,75471
49°	0,75471	0,75661	0,75851	0,76041	0,76229	0,76417	0,76604
50°	0,76604	0,76791	0,76977	0,77162	0,77347	0,77531	0,77715
51°	0,77715	0,77897	0,78079	0,78261	0,78442	0,78622	0,78801
52°	0,78801	0,78980	0,79158	0,79335	0,79512	0,79688	0,79864
53°	0,79864	0,80038	0,80212	0,80386	0,80558	0,80730	0,80902
54°	0,80902	0,81072	0,81242	0,81412	0,81580	0,81748	0,81915
55°	0,81915	0,82082	0,82248	0,82413	0,82577	0,82741	0,82904
56°	0,82904	0,83066	0,83228	0,83389	0,83549	0,83708	0,83867
57°	0,83867	0,84025	0,84182	0,84339	0,84495	0,84650	0,84805
58°	0,84805	0,84959	0,85112	0,85264	0,85416	0,85567	0,85717
59°	0,85717	0,85866	0,86015	0,86163	0,86310	0,86457	0,86603
60°	0,86603	0,86748	0,86892	0,87036	0,87178	0,87321	0,87462
61°	0,87462	0,87603	0,87743	0,87882	0,88020	0,88158	0,88295
62°	0,88295	0,88431	0,88566	0,88701	0,88835	0,88968	0,89101
63°	0,89101	0,89232	0,89363	0,89493	0,89623	0,89752	0,89879
64°	0,89879	0,90007	0,90133	0,90259	0,90383	0,90507	0,90631
65°	0,90631	0,90753	0,90875	0,90996	0,91116	0,91236	0,91355
66°	0,91355	0,91472	0,91590	0,91706	0,91822	0,91936	0,92050
67°	0,92050	0,92164	0,92276	0,92388	0,92499	0,92609	0,92718
68°	0,92718	0,92827	0,92935	0,93042	0,93148	0,93253	0,93358
69°	0,93358	0,93462	0,93565	0,93667	0,93769	0,93869	0,93969
70°	0,93969	0,94068	0,94167	0,94264	0,94361	0,94457	0,94552
71°	0,94552	0,94646	0,94740	0,94832	0,94924	0,95015	0,95106
72°	0,95106	0,95195	0,95284	0,95372	0,95459	0,95545	0,95630
73°	0,95630	0,95715	0,95799	0,95882	0,95964	0,96046	0,96126
74°	0,96126	0,96206	0,96285	0,96363	0,96440	0,96517	0,96593
75°	0,96593	0,96667	0,96742	0,96815	0,96887	0,96959	0,97030
76°	0,97030	0,97100	0,97169	0,97237	0,97304	0,97371	0,97437
77°	0,97437	0,97502	0,97566	0,97630	0,97692	0,97754	0,97815
78°	0,97815	0,97875	0,97934	0,97992	0,98050	0,98107	0,98163
79°	0,98163	0,98218	0,98272	0,98325	0,98378	0,98430	0,98481
80°	0,98481	0,98531	0,98580	0,98629	0,98676	0,98723	0,98769
81°	0,98769	0,98814	0,98858	0,98902	0,98944	0,98986	0,99027
82°	0,99027	0,99067	0,99106	0,99144	0,99182	0,99219	0,99255
83°	0,99255	0,99290	0,99324	0,99357	0,99390	0,99421	0,99452
84°	0,99452	0,99482	0,99511	0,99540	0,99567	0,99594	0,99619
85°	0,99619	0,99644	0,99668	0,99692	0,99714	0,99736	0,99756
86°	0,99756	0,99776	0,99795	0,99813	0,99831	0,99847	0,99863
87°	0,99863	0,99878	0,99892	0,99905	0,99917	0,99929	0,99939
88°	0,99939	0,99949	0,99958	0,99966	0,99973	0,99979	0,99985
89°	0,99985	0,99989	0,99993	0,99996	0,99998	1,00000	1,00000
60'	50'	40'	30'	20'	10'	0'	α
cos α							

Trigonometrijske funkcije: tangens od 0° do 45°, kotangens od 45° do 90°

Table with 7 columns for angles (0° to 45°) and values for tan α. Includes cot α values at the bottom.

Trigonometrijske funkcije: tangens od 45° do 90°, kotangens od 0° do 45°

Table with 7 columns for angles (45° to 90°) and values for tan α. Includes cot α values at the bottom.

Izračunavanje stranica i kutova trokuta

a) Pravokutni trokut ($\gamma = 90^\circ$)

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

$$a/c = \sin \alpha = \cos \beta = h/b$$

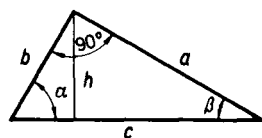
$$b/c = \cos \alpha = \sin \beta = h/a$$

$$a/b = \tan \alpha = \cot \beta$$

$$b/a = \cot \alpha = \tan \beta$$

$$\text{Visina nad hipotenuzom } h = ab/c$$

$$\text{Pitagorin poučak } a^2 + b^2 = c^2$$



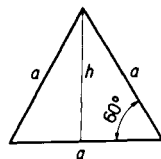
Poznato	Tražimo	
a, b	$c = \sqrt{a^2 + b^2}$ $\tan \alpha = a/b$ $\tan \beta = b/a$	$h = ab/\sqrt{a^2 + b^2}$ $\beta = 90^\circ - \alpha$
a, c	$b = \sqrt{c^2 - a^2}$ $\sin \alpha = a/c$ $\cos \beta = a/c$	$h = (a/c)\sqrt{c^2 - a^2}$ $\beta = 90^\circ - \alpha$
b, c	$a = \sqrt{c^2 - b^2}$ $\cos \alpha = b/c$ $\sin \beta = b/c$	$h = (b/c)\sqrt{c^2 - b^2}$ $\beta = 90^\circ - \alpha$
a, α	$b = a/\tan \alpha = a \cot \alpha$ $c = a/\sin \alpha$	$h = a \cos \alpha$ $\beta = 90^\circ - \alpha$
b, α	$a = b \tan \alpha = b/\cot \alpha$ $c = b/\cos \alpha$	$h = b \sin \alpha$ $\beta = 90^\circ - \alpha$
c, α	$a = c \sin \alpha$ $b = c \cos \alpha$	$h = (c/2) \sin 2\alpha$ $\beta = 90^\circ - \alpha$

b) Jednakostranični trokut

$$a = (b) = (c)$$

$$\alpha = (\beta) = (\gamma) = 60^\circ$$

$$h = \frac{a}{2}\sqrt{3} \approx 0,866a$$

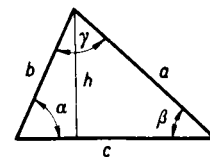


c) Kosokutni trokut

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

$$\sin \alpha = \sin (\beta + \gamma)$$

$$\cos \alpha = -\cos (\beta + \gamma)$$



$$\text{Sinusov poučak } a/\sin \alpha = b/\sin \beta = c/\sin \gamma$$

$$\text{Kosinusov poučak } a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

$$\text{Projekcijski poučak } a = b \cos \gamma + c \cos \beta$$

$$b = a \cos \gamma + c \cos \alpha$$

$$c = b \cos \alpha + a \cos \beta$$

$$\text{Visina (nad stranicom } c) \quad h = a \sin \beta = b \sin \alpha$$

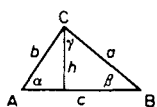
Poznato	Tražimo
$a, b, c,$	$\cos \alpha = (b^2 + c^2 - a^2)/2bc$ $\cos \beta = (a^2 + c^2 - b^2)/2ac$ $\cos \gamma = (a^2 + b^2 - c^2)/2ab$ $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$
a, b, γ	$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma}$ $\tan \alpha = a \sin \gamma / (b - a \cos \gamma)$ $\tan \beta = b \sin \gamma / (a - b \cos \gamma)$ $\beta = 180^\circ - (\alpha + \gamma)$
a, b, α	$c = b \cos \alpha \pm \sqrt{a^2 - b^2 \sin^2 \alpha}$ 1 realno rješenje za: $a = b \sin \alpha$ 2 realna rješenja za: $a > b \sin \alpha$ $\sin \beta = (b/a) \sin \alpha$ $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta)$
a, β, γ	$b = a \sin \beta / \sin (\beta + \gamma)$ $c = a \sin \gamma / \sin (\beta + \gamma)$ $\alpha = 180^\circ - (\beta + \gamma)$

LIKIVI I TIJELA

Površina i opseg likova

A – površina, O – opseg

1. Trokuti



$$A = hc/2$$

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \quad 2s = a + b + c$$

$$A = 1/2 \cdot ab \sin \gamma = 1/2 \cdot ac \sin \beta = 1/2 \cdot bc \sin \alpha$$

$$A = 1/2 \cdot [x_A(y_B - y_C) + x_B(y_C - y_A) + x_C(y_A - y_B)]$$

$$O = a + b + c = 2s$$

Stranice a, b, c
 Kutovi α, β, γ
 Zbroj kutova $\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$
 Visina na c $h = a \sin \beta$ ($h \perp c$)
 Koordinate vršaka $A(x_A, y_A), B(x_B, y_B), C(x_C, y_C)$

2. Četverokuti

Stranice $a, b, (c, d)$

Kutovi $\alpha, \beta, (\gamma, \delta)$

Dijagonala D

Visina h

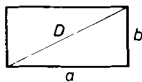


Kvadrat $a (= b) = h, \alpha = 90^\circ$

$$A = a^2$$

$$O = 4a$$

$$D = a\sqrt{2}$$



Pravokutnik $a \neq b = h, \alpha = 90^\circ$

$$A = ab$$

$$O = 2(a + b)$$

$$D = \sqrt{a^2 + b^2}$$

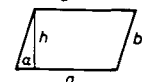


Romb $a (= b) \neq h, \alpha \neq 90^\circ$

$$A = ah = a^2 \sin \alpha$$

$$O = 4a$$

$$h = a \sin \alpha$$

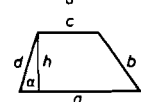


Paralelogram $a \neq b \neq h, \alpha \neq 90^\circ$

$$A = ah = ab \sin \alpha$$

$$O = 2(a + b)$$

$$h = b \sin \alpha$$



Trapez $a \neq b \neq c \neq d$ ($a \parallel c$)

$$A = \frac{a+c}{2} h = \frac{a+c}{2} d \sin \alpha$$

$$O = a + b + c + d$$

$$h = d \sin \alpha$$

3. Višekuti (poligoni)

Broj stranica n Zbroj unutarnjih kutova $180^\circ (n - 2)$

Površinu određujemo rastavljanjem višekuta na trokute. Opseg je zbroj svih stranica.

4. Pravilni višekuti sa n stranica

Središnji kut $2\hat{\varphi} = 2\pi/n$ $\hat{\varphi}$ (rad)

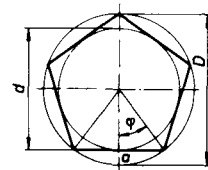
$$2\varphi = 360^\circ/n$$

Površina $A = n(a^2/4) \cot \varphi$

Opseg $O = na$

Promjer opisane kružnice $D = a/\sin \varphi$

Promjer upisane kružnice $d = a/\tan \varphi$



Pravilni likovi	n	$\hat{\varphi}$	φ	A	O	D	d
trokut	3	$\pi/3$	60°	$0,433a^2$	$3a$	$1,1547a$	$0,5774a$
kvadrat	4	$\pi/4$	45°	a^2	$4a$	$1,4142a$	a
peterokut	5	$\pi/5$	36°	$1,7205a^2$	$5a$	$1,7013a$	$1,3764a$
šesterokut	6	$\pi/6$	30°	$2,5981a^2$	$6a$	$2a$	$1,7321a$
osmerokut	8	$\pi/8$	$22,5^\circ$	$4,8284a^2$	$8a$	$2,6132a$	$2,4142a$

5. Krug

Polumjer r , promjer d

$$A = r^2\pi = d^2\pi/4$$

$$O = 2r\pi = d\pi$$
 (= duljina kružnice)

Kružni isječak i odsječak

Polumjer r , središnji kut φ $\hat{\varphi}$ (rad)

$$\text{Luk } l = r\hat{\varphi} \quad \text{Tetiva } i = 2r \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$\text{Visina odsječka } h = r \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\text{Površina odsječka } A_o = \frac{r^2}{2} (\hat{\varphi} - \sin \varphi)$$

$$\text{Površina isječka } A_i = \frac{r^2}{2} \hat{\varphi} = \frac{lr}{2}$$

Kružni vijenac

Vanjski i unutarnji polumjer R, r

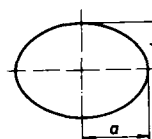
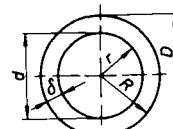
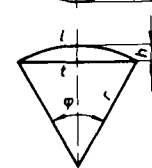
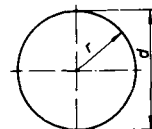
Vanjski i unutarnji promjer D, d

$$A = (R^2 - r^2)\pi = (D^2 - d^2)\pi/4$$

Uski vijenac širine $\delta = R - r$

Srednji polumjer $\rho = (R + r)/2$

$$A = 2\rho\pi\delta$$



6. Elipsa

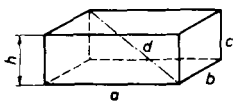
Poluosi a, b

$$A = ab\pi$$

$$O \approx \pi[1,5(a + b) - \sqrt{ab}]$$

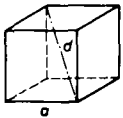
Površine i volumeni tijela

V – volumen, obujam, A_o – površina osnovke (baze), A_p – površina plašta, A – oplošje (ukupna površina), h – visina



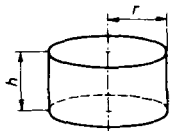
1. Prizma

Pravokutni paralelepiped sa stranicama a, b, c
 $V = A_o h$
 $V = abc$ $A = 2(ab + ac + bc)$

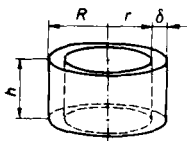


Dijagonala $d = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$
 Kocka s bridom a
 $V = a^3$ $A_o = a^2$ $h = a$
 $A = 6a^2$
 Dijagonala $d = a\sqrt{3}$

2. Valjak



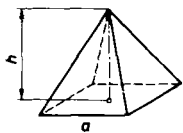
$V = A_o h$
 Uspravni valjak s polumjerom r
 $V = r^2 \pi h$ $A_o = r^2 \pi$
 $A = 2r\pi(r + h)$



Šuplji valjak s polumjerima R i r
 $V = (R^2 - r^2)\pi h$ $A_o = (R^2 - r^2)\pi$
 Šuplji valjak s tankom stijenkom
 Debeljina stijenke $\delta = R - r$

Srednji polumjer $\varrho = \frac{R + r}{2}$
 $V = 2\varrho\pi\delta h$ $A_o = 2\varrho\pi\delta$

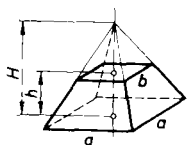
3. Piramida



$$V = \frac{1}{3} A_o h$$

Kvadratna piramida sa stranicom osnovke a i visinom h

$V = a^2 h / 3$
 Kut α između osnovke i pobočke
 $\tan \alpha = 2h/a$



Prikraćena kvadratna piramida sa stranicama osnovki a i b i visinom h

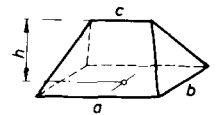
Visina piramide $h = ha/(a - b)$
 $V = h(a^2 + ab + b^2)/3$

4. Klin

Stranice osnovke a, b

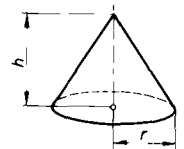
Greben c

$V = (2a + c)bh/6$
 $A_p = (a + c)\sqrt{h^2 + b^2/4} + b\sqrt{h^2 + (a - c)^2/4}$
 $A = A_p + ab$



5. Stožac

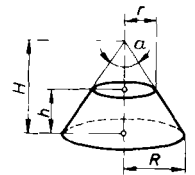
$V = \frac{1}{3} r^2 \pi h$ r – polumjer osnovke
 $A_p = r\pi s$ $s = \sqrt{r^2 + h^2}$
 $A = r\pi(s + r)$



Prikraćeni stožac

R, r – polumjeri osnovki
 h – visina

Visina stošca $H = hR/(R - r)$
 Kut stošca $\tan(\alpha/2) = (R - r)/h$
 $V = (R^2 + rR + r^2)\pi h/3$



6. Kugla Polumjer R , promjer D

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = 4,1888 R^3 = \frac{1}{6} \pi D^3 = 0,5236 D^3$$

$$A = 4\pi R^2 = \pi D^2$$

Kuglin isječak i odsječak

Visina odsječka (kalote) h

polumjer kugline paralele

$$a = \sqrt{h(2r - h)}$$

volumen odsječka

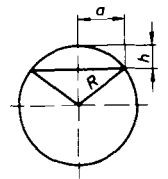
$$V_o = \pi h^2 (R - h/3)$$

volumen isječka

$$V_i = \frac{2}{3} \pi R^2 h = 2,0944 R^2 h$$

površina plašta odsječka

$$A_p = 2\pi R h$$



KOMBINATORIKA

Broj permutacija (poredaka) za n različitih elemenata

$$P(n) = n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$$

Broj permutacija za n elemenata, među kojima je m jednakih

$$P(n) = \frac{n!}{m!}$$

Broj kombinacija n elemenata r -tog razreda:

- bez ponavljanja $K_r(n) = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$

- s ponavljanjem $K_r(n) = \binom{n+r-1}{r} = \frac{(n+r-1)!}{r!(n-1)!}$

Broj varijacija n elemenata r -tog razreda:

- bez ponavljanja $V_r(n) = \binom{n}{r} r! = \frac{n!}{(n-r)!}$

- s ponavljanjem $V_r(n) = n^r$

NIZOVI I REDOVI

Niz: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots$

Red: $a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$

Aritmetički niz

$$a, a + d, a + 2d, a + 3d, \dots, a + (n-1)d, \dots$$

$$d = a_n - a_{n-1} = (a_n - a_1)/(n-1) = \text{konst}$$

Suma n članova aritmetičkog niza

$$s_n = \frac{n}{2}(a_1 + a_n) = \frac{n}{2}[2a_1 + (n-1)d]$$

Neke sume: $s_1 = 1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n}{2}(1+n)$

$$s_2 = 1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = \frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$$

$$s_3 = 1^3 + 2^3 + 3^3 + \dots + n^3 = \frac{1}{4}n^2(n+1)^2$$

Geometrijski niz

$$a, aq, aq^2, aq^3, \dots, aq^{n-1}, \dots$$

$$q = a_n/a_{n-1} = \sqrt[n-1]{a_n/a_1} = \text{konst}$$

Suma n članova geometrijskog niza

$$s_n = a_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

Važniji redovi

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} + \dots \quad \text{nema konačne sume}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \dots + \frac{1}{n^2} + \dots = \pi^2/6$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} + \dots = \pi^2/12$$

Važniji Taylorovi redovi

$$e^{\pm x} = 1 \pm x/1! + x^2/2! \pm x^3/3! + \dots$$

$$a^x = 1 + \frac{\ln a}{1!}x + \frac{(\ln a)^2}{2!}x^2 + \frac{(\ln a)^3}{3!}x^3 + \dots \quad a > 0$$

$$\ln(1 \pm x) = \pm x - x^2/2 \pm x^3/3 - x^4/4 \pm \dots \quad -1 < x < 1$$

$$\ln x = 2 \left[\frac{x-1}{x+1} + \frac{1}{3} \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^5 + \dots \right] \quad x > 0$$

$$\sin x = x/1! - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + \dots$$

$$\cos x = 1 - x^2/2! + x^4/4! - x^6/6! + \dots$$

$$\frac{1}{1 \mp x} = 1 \pm x + x^2 \pm x^3 + \dots \quad -1 < x < 1$$

$$(1+x)^n = 1 + \binom{n}{1}x + \binom{n}{2}x^2 + \binom{n}{3}x^3 + \dots \quad -1 < x < 1$$

n - realni broj

DETERMINANTE

Determinanta 1. reda

$$|a_{11}| = a_{11}$$

Determinanta 2. reda

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}$$

Determinanta 3. reda

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \\ &= a_{11} (a_{22} a_{33} - a_{32} a_{23}) - a_{12} (a_{21} a_{33} - a_{31} a_{23}) + \\ &+ a_{13} (a_{21} a_{32} - a_{31} a_{22}) \end{aligned}$$

Vrijednost determinante n -tog reda izračunamo tako, da skalarno pomnožimo kojigod redak ili stupac sa subdeterminantama tog retka ili stupca, npr.:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} &= a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{23} & a_{24} & a_{21} \\ a_{33} & a_{34} & a_{31} \\ a_{43} & a_{44} & a_{41} \end{vmatrix} + \\ &+ a_{13} \begin{vmatrix} a_{24} & a_{21} & a_{22} \\ a_{34} & a_{31} & a_{32} \\ a_{44} & a_{41} & a_{42} \end{vmatrix} - a_{14} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Vrijednost determinante se ne mijenja, ako zaokrenemo determinantu oko glavne dijagonale (za 180°):

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Ako su u determinanti dva retka ili dva stupca jednaka ili proporcionalna, vrijednost determinante jednaka je nuli:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & ka_{12} \\ a_{21} & a_{22} & ka_{22} \\ a_{31} & a_{32} & ka_{32} \end{vmatrix} = 0$$

MATRICE

Matrica A dimenzije m, n ima m redaka i n stupaca

Ako je $n = 1$, nazivamo matricu – (stupnim) vektorom

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = [a_{ik}]_{m,n} \quad A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix}$$

Dvije su matrice jednake, ako imaju jednake dimenzije i odgovarajuće elemente jednake. Matrica 0 ima kojigod dimenziju, a svi su njeni elementi 0 . Zbrajati možemo matrice samo jednakih dimenzija:

$$A = [a_{ik}]_{m,n} \quad B = [b_{ik}]_{m,n} \\ A + B = [a_{ik} + b_{ik}]_{m,n}$$

Matricu $A = [a_{ik}]_{m,n}$ množimo sa skalarom k (realnim brojem) tako, da svaki element u matrici pomnožimo s k

$$kA = [k a_{ik}]_{m,n}$$

Umnožak matrica $A [a_{ik}]_{m,n}$ i $B = [b_{ik}]_{n,p}$ je matrica

$$C = AB = [c_{ik}]_{m,p}$$

gdje je $c_{ik} = a_{i1} b_{1k} + a_{i2} b_{2k} + \dots + a_{in} b_{nk}$.

Iz elemenata matrice $A = [a_{ik}]_{m,n}$ možemo križanjem redaka ili stupaca tvoriti determinante svih redova.

K matrici $A = [a_{ik}]_{m,n}$ dobivamo transponiranu matricu $A' = [b_{ik}]_{n,m}$ ako redom zapišemo retke u stupce i stupce u retke ($b_{ik} = a_{ki}$).

Ako je $m = n$, matrica je kvadratna. Svako je kvadratnoj matrici pridružena determinanta jednakog sastava. Matrica A je regularna, ako je determinanta različita od 0 .

Kvadratna matrica je simetrična, ako je $A' = A$, a nesimetrična, ako je $A' = -A$.

Matrica $A = [a_{ik}]_{m,n}$ je r -tog ranga, ako je bar jedna determinanta r -tog reda matrice A različita od 0 , a sve višeredne determinante pa su jednake 0 .

Rang matrice se ne mijenja, ako:

- međusobno zamijenimo dva stupca (dva retka)
- elemente nekog stupca (retka) pomnožimo brojem k ($k \neq 0$)
- stupac (redak) pomnožimo proizvoljnim brojem te ga pribrojimo k drugom (stupcu) retku.

APSOLUTNA I SREDNJA VRIJEDNOST

Apsolutna vrijednost

Definicija apsolutne vrijednosti $|a|$ realnog broja a glasi

$$|a| = \begin{cases} a & \text{za } a \geq 0 \\ -a & \text{za } a < 0 \end{cases}$$

Apsolutna vrijednost kompleksnog broja α definirana je jednadžbom

$$|\alpha| = +\sqrt{\alpha\bar{\alpha}} = +\sqrt{a^2 + b^2} \quad \begin{matrix} \alpha = a + b i \\ \bar{\alpha} = a - b i \end{matrix}$$

$$|\alpha| = |-\alpha|$$

Za proizvoljne kompleksne brojeve α i β vrijedi

$$|\alpha\beta| = |\alpha||\beta| \quad ||\alpha| - |\beta|| \leq |\alpha + \beta| \leq |\alpha| + |\beta|$$

Poprečne vrijednosti

Za n realnih brojeva a_1, a_2, \dots, a_n bit će:

– aritmetički prosjek A

$$A = \frac{1}{n} (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$$

– geometrijski prosjek G

$$G = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n} \quad a_1, \dots, a_n > 0$$

– harmonički prosjek H

$$H = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n} \right) \quad a_1, \dots, a_n \neq 0$$

BINOMI

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$(a \pm b)^n = a^n \pm \binom{n}{1} a^{n-1}b + \dots + (-1)^k \binom{n}{k} a^{n-k}b^k + \dots + (-1)^n$$

$$\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

*

$$a^2 + b^2 = (a + ib)(a - ib)$$

$$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$$

$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

ALGEBARSKJE JEDNADŽBE

Jednadžba n -tog stupnja

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 = 0 \quad a_n \neq 0$$

ima u opsegu kompleksnih brojeva n korijena. Korijene takve jednadžbe određujemo, u općem slučaju, poželjnom točnošću metodama numeričke matematike.

Jednadžba prvog stupnja (linearna jednadžba)

$$ax + b = 0 \quad a \neq 0$$

ima jedno rješenje

$$x = -b/a$$

Jednadžba drugog stupnja (kvadratna jednadžba)

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad a \neq 0$$

ima dva rješenja

$$x_{1,2} = \left(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a$$

Diskriminanta jednadžbe

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

Za $\Delta > 0$ ima jednadžba dva različita realna korijena, za $\Delta = 0$ ima jednadžba dva jednaka realna korijena, za $\Delta < 0$ su korijeni jednadžbe konjugirano kompleksni brojevi.

Ako su x_1 i x_2 korijeni jednadžbe $x^2 + px + q = 0$, vrijedi

$$q = x_1 x_2 \quad \text{in} \quad p = -(x_1 + x_2)$$

Jednadžbn višeg stupnja (trećeg, četvrtog . . .) rješavamo jednostavno samo ako je možemo brzo rastaviti.

Sistem dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznane (x, y)

$$a_1 x + b_1 y = c_1 \quad a_2 x + b_2 y = c_2$$

Metode rješavanja:

a) Metoda supstitucije

Iz druge jednadžbe $y = (c_2 - a_2 x) / b_2$ uvrštavamo u prvu jednadžbu.

b) Metoda komparacije

Iz obiju jednadžbi dobivamo nepoznanicu $y = (c_1 - a_1 x) / b_1 = (c_2 - a_2 x) / b_2$.

c) Metoda suprotnih koeficijenata

Jednadžbe množimo takvim brojevima, da dobijemo pri članovima s istom nepoznanicom suprotne koeficijente, a potom ih zbrojimo.

$$a_1 b_2 x + b_1 b_2 y = b_2 c_1 \quad -a_2 b_1 x - b_1 b_2 y = -b_1 c_2$$

Rješenje glasi

$$x = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

Na isti način izračunavamo nepoznanicu y .

Sistem linearnih jednadžbi

Sistem n jednadžbi s nepoznicama x_1, x_2, \dots, x_n

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n \end{aligned}$$

Sistem je homogen, ako je $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$. Ako je ma i jedan $b_k \neq 0$, sistem nije homogen.

Nehomogen sistem jednoliki je rješiv, ako je determinanta sistema

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \neq 0$$

Rješenje sistema glasi tada

$$x_1 = \frac{A_1}{A}, \quad x_2 = \frac{A_2}{A}, \quad \dots \quad x_n = \frac{A_n}{A},$$

gdje su:

$$A_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & b_2 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & b_n & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} \quad A_n = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & b_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & b_n \end{vmatrix}$$

Za nehomogen sistem dviju linearnih jednadžbi s dvije nepoznane

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 y &= c_1 \\ a_2 x + b_2 y &= c_2, \end{aligned}$$

za koje vrijedi $A = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \neq 0$,

glasi rješenje

$$\begin{aligned} x &= \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \\ y &= \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{A} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \end{aligned}$$

TRANSCENDENTNE JEDNADŽBE

Eksponecijalne jednadžbe

Jednostavna se eksponencijalna jednadžba

$$a^x = b \quad a > 0, a \neq 1$$

rješava logaritmiranjem (naravnim ili dekadnim logaritima).

Rješenje glasi $x = \ln b / \ln a$

Logaritamske jednadžbe

Jednostavna logaritamska jednadžba

$$\log_a x = b \quad a > 0, a \neq 1$$

ima rješenje

$$x = a^b$$

Trigonometrijske jednadžbe

Za rješavanje jednostavnih trigonometrijskih jednadžbi, npr.

$$\sin(mx + n) = a \quad m \neq 0,$$

potrebne su tablice vrijednosti trigonometrijskih funkcija ili odgovarajuće računalo. Za jednadžbu $\sin(mx + n) = a$ tražimo iz tablica kut u

$$mx + n = u$$

te dobivamo rješenje

$$x = (u - n)/m$$

*

Numerično rješavanje jednadžbi

U općem slučaju možemo korijene transcendentnih jednadžbi odrediti metodama numeričke matematike.

Realne korijene jednadžbe $f(x) = 0$ pokušavamo izračunati numeričkim metodama tako, da funkciju $y = f(x)$, koja mora biti neprekidna, prikazemo tablicom ili grafički. Korijene dobivamo pri vrijednosti $y = 0$.

NEJEDNADŽBE

Linearna nejednadžba s jednom nepoznicom

$$ax + b \geq 0$$

ima dva rješenja:

$$x \geq \frac{-b}{a} \quad \text{za } a > 0 \quad x \leq \frac{-b}{a} \quad \text{za } a < 0$$

Kvadratnu nejednadžbu s jednom nepoznicom

$$ax^2 + bx + c \geq 0$$

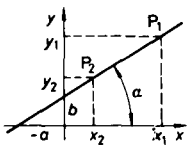
možemo riješiti grafom funkcije

$$y = ax^2 + bx + c$$

tako, da iz slike ustanovimo intervale, gdje je $y \geq 0$.

ANALITIČKA GEOMETRIJA
u ravnini

Pravac



Opći oblik jednađzbe

$$Ax + By + C = 0$$

EksPLICITNI oblik jednađzbe

$$y = mx + b \quad m = \tan \alpha$$

b - odsječak na osi y

Segmentni oblik

$$x/a + y/b = 1$$

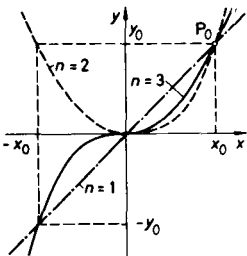
Jednađzba pravca kroz zadanu točku $P_1(x_1, y_1)$ uz prikloni kut α (priklonski koeficijent m)

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

Jednađzba pravca kroz dvije zadane točke $P_1(x_1, y_1)$ i $P_2(x_2, y_2)$

$$(y - y_1)(x_1 - x_2) = (x - x_1)(y_1 - y_2)$$

Potencijalne krivulje



Parabole kroz točku $P_0(x_0, y_0)$

$$y = y_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^n$$

$n = 1$

$$y = y_0(x/x_0) \quad (\text{pravac})$$

$n = 2$

$$y = y_0(x/x_0)^2 \quad (\text{kvadratna parabola})$$

$n = 3$

$$y = y_0(x/x_0)^3 \quad (\text{kubna parabola})$$

Hiperbole kroz točku $P_0(x_0, y_0)$

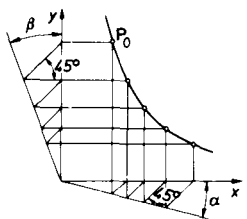
$$yx^m = y_0x_0^m = \text{konst}$$

Konstrukcija krivulje

$$1 + \tan \beta = (1 + \tan \alpha)^m$$

Npr. za $\tan \alpha = 0,25$ je

m	1,1	1,2	1,3	1,4
$\tan \beta$	0,278	0,307	0,336	0,367



Čunjosječnice

Kružnica

Opća jednađzba - za središte u točki (x_0, y_0)

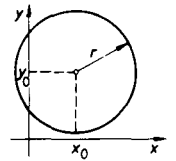
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

Središnja jednađzba - za središte u ishodištu

$$(x_0 = 0, y_0 = 0) \quad x^2 + y^2 = r^2$$

Tjemenska jednađzba - s ordinantnom osi kao tangentom $(x_0 = r, y_0 = 0)$

$$y^2 = 2rx - x^2$$



Elipsa a, b - poluosi (u smjerovima x, y)

Središnja jednađzba

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$$

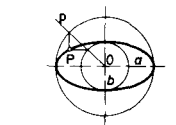
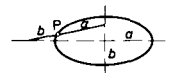
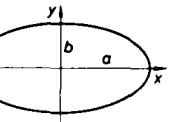
Tjemenska jednađzba

$$y^2 = (b^2/a^2)x(2a - x)$$

Konstrukcija elipse:

a) Ako dužinu, čiju duljinu $a + b$ točka P dijeli na krakove a i b , pomičemo tako, da njene krajnje točke klizu po međusobno okomitim pravcima, opisuje točka P elipsu.

b) Presjecišta kružnica s polumjerima a i b iz zajedničkog središta O s proizvoljnim pravcem p određuje točku P elipse.



Parabola

Tjemenska jednađzba - s ordinatnom osi kao tangentom in s koordinatama žarišta $F(p/2, 0)$

$$y^2 = 2px \quad 2p - \text{parametar}$$

Za parabolu s osi u smjeru ordinate y su u jednađzbi koordinate x i y zamijenjene.

Jednađzba parabole za tjeme s koordinatama (x_0, y_0)

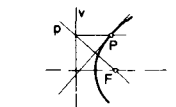
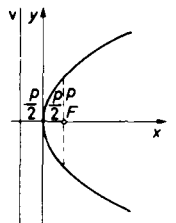
$$(y - y_0)^2 = 2p(x - x_0)$$

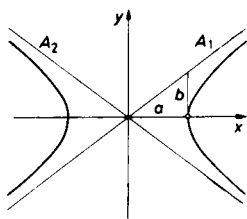
Opći oblik jednađzbe (za os u smjeru ordinate y)

$$y = ax^2 + bx + c$$

Konstrukcija parabole:

Simetrala udaljenosti što je presjeca proizvoljni pravac p kroz žarište F s vodicom v i paralela s osi parabole kroz presjecišta određuju točku P parabole.





Hiperbola (A – asimptote)

Središnja jednadžba

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$$

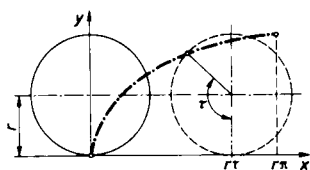
Tjemenska jednadžba

$$y^2 = (b^2/a^2) x (x - 2a)$$

Kod istostrane hiperbole ($a = b$) su asimptote međusobno okomite i zatvaraju s koordinatnim osima kut 45°

$$x^2 - y^2 = a^2$$

Cikličke krivulje (trohoide)



Cikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po pravcu

$$x = r(\tau - \sin \tau)$$

$$y = r(1 - \cos \tau)$$

τ – kut kotrljanja

$$\hat{\tau}(\text{rad})$$

Epicykloida nastaje pri kotrljanju kružnice po vanjskoj strani druge kružnice

$$x = r(m \sin \psi - \sin m\psi)$$

$$y = r(m \cos \psi - \cos m\psi)$$

$$m = (R + r)/r = n + 1$$

$$n = R/r \quad \psi = t/n$$

Hipocikloida nastaje pri kotrljanju kružnice po unutranjoj strani druge kružnice

$$x = r(m \sin \psi - \sin m\psi)$$

$$y = r(m \cos \psi + \cos m\psi)$$

$$m = (R - r)/r = n - 1$$

$$n = R/r \quad \psi = t/n$$

Evolventa (involuta) nastaje pri odmatanju oboda s kružnice

$$x = R(\sin \tau - \hat{\tau} \cos \tau)$$

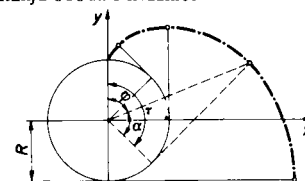
$$y = R(\cos \tau + \hat{\tau} \sin \tau)$$

$$r = R/\cos \alpha$$

$$\hat{\tau} = \tan \alpha$$

$$\varphi = \tan \alpha - \hat{\alpha} = \text{inv } \alpha$$

$$\hat{\tau}, \hat{\alpha}(\text{rad})$$



Evolventna funkcija $\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \hat{\alpha}$

α°	0'	10'	20'	30'	40'	50'
15	0,006 150	0,006 361	0,006 577	0,006 798	0,007 025	0,007 256
16	0,007 493	0,007 735	0,007 982	0,008 234	0,008 492	0,008 756
17	0,009 025	0,009 299	0,009 580	0,009 866	0,010 158	0,010 456
18	0,010 760	0,011 071	0,011 387	0,011 709	0,012 038	0,012 373
19	0,012 715	0,013 063	0,013 418	0,013 779	0,014 148	0,014 523
20	0,014 904	0,015 293	0,015 689	0,016 092	0,016 502	0,016 920
21	0,017 345	0,017 777	0,018 217	0,018 665	0,019 120	0,019 583
22	0,020 054	0,020 533	0,021 019	0,021 514	0,022 018	0,022 529
23	0,023 049	0,023 577	0,024 114	0,024 660	0,025 214	0,025 777
24	0,026 350	0,026 931	0,027 521	0,028 121	0,028 729	0,029 348
25	0,029 975	0,030 613	0,031 260	0,031 917	0,032 583	0,033 260
26	0,033 947	0,034 644	0,035 352	0,036 069	0,036 798	0,037 537
27	0,038 287	0,039 047	0,039 819	0,040 602	0,041 395	0,042 201
28	0,043 017	0,043 845	0,044 685	0,045 537	0,046 400	0,047 276
29	0,048 164	0,049 064	0,049 976	0,050 901	0,051 838	0,052 788
30	0,053 751	0,054 728	0,055 717	0,056 720	0,057 736	0,058 765

FUNKCIJE

Ako je svakoj vrijednosti x za $a \leq x \leq b$ pridružen točno određen realni broj y , kaže se, da je u intervalu $[a, b]$ dana funkcija f , što se piše

$$y = f(x)$$

x – argument ili neodvisna varijabla

$f(x)$ – funkcijska vrijednost

$[a, b]$ – definicijsko područje funkcije

Graf funkcije f (krivulja $f(x)$) je skup svih točaka $(x, f(x))$ u ravnini x, y .

Elementarne funkcije

Polinom ili cijela racionalna funkcija n -tog stupnja je

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad a_n \neq 0$$

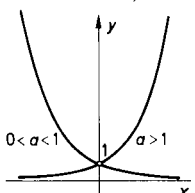
Razlomljena racionalna funkcija je kvocijent dvaju polinoma

$$f(x) = \frac{b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_1 x + b_0}{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0}$$

Eksponecijalna i logaritamska funkcija

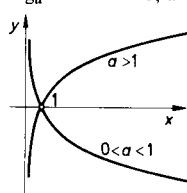
Eksponecijalna funkcija

$$y = a^x \quad a > 0, a \neq 1$$



Logaritamska funkcija

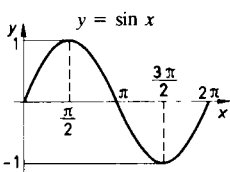
$$y = \log_a x \quad a > 0, a \neq 1$$



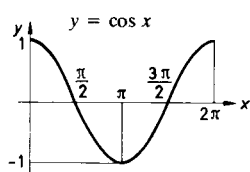
Logaritamske su funkcije inverzne eksponencijalnim funkcijama.

Kutne funkcije

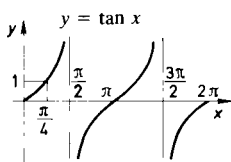
Sinus



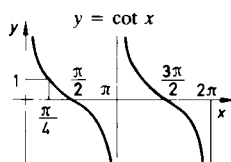
Kosinus



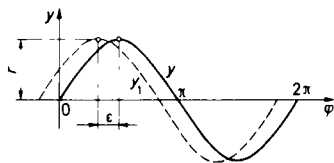
Tangens



Kotangens



Pomaknuta sinusoida



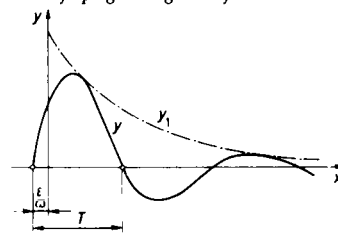
$$y = r \sin \varphi$$

r – amplituda

Za fazni kut ϵ pomaknuta sinusoida

$$y_1 = r \sin (\varphi + \epsilon)$$

Krivulja prigušenog titranja



$$y = ce^{-ax} \sin (\omega x + \epsilon)$$

$$y_1 = ce^{-ax}$$

$$T = 2\pi/\omega$$

Logaritamski dekrement

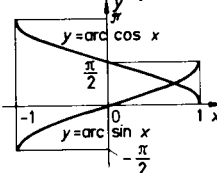
$$\Lambda = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}} = a \frac{\pi}{\omega}$$

y_i i y_{i+1} su ordinate dvaju susjednih ekstrema.

Ciklometrične funkcije

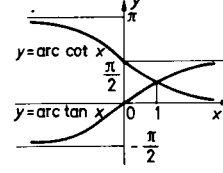
Arkus sinus Arkus kosinus

$$y = \arcsin x \quad y = \arccos x$$



Arkus tangens Arkus kotangens

$$y = \arctan x \quad y = \text{arccot } x$$



Ciklometrične su funkcije inverzija kutnih funkcija. Među njima postoje sljedeće veze:

$$\begin{aligned} \arcsin (-x) &= -\arcsin x \\ \arccos (-x) &= \pi - \arccos x \\ \arcsin x + \arccos x &= \pi/2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \arctan (-x) &= -\arctan x \\ \text{arccot } (-x) &= \pi - \text{arccot } x \\ \arctan x + \text{arccot } x &= \pi/2 \end{aligned}$$

Hiperbolne funkcije

Sinus hiperbolni

$$y = \text{sh } x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

Kosinus hiperbolni

$$y = \text{ch } x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Tangens hiperbolni

$$y = \text{th } x = \frac{\text{sh } x}{\text{ch } x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Kotangens hiperbolni

$$y = \text{cth } x = \frac{\text{ch } x}{\text{sh } x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}$$

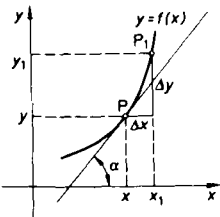
Osnovne veze među hiperbolnim funkcijama:

$$\begin{aligned} \text{ch}^2 x - \text{sh}^2 x &= 1 \\ 1 - \text{th}^2 x &= 1/(\text{ch}^2 x) \\ \text{cth}^2 x - 1 &= 1/(\text{sh}^2 x) \\ \text{sh } 2x &= 2 \text{sh } x \text{ch } x \\ \text{ch } 2x &= \text{ch}^2 x + \text{sh}^2 x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{sh} (x \pm y) &= \text{sh } x \text{ch } y \pm \text{ch } x \text{sh } y \\ \text{ch} (x \pm y) &= \text{ch } x \text{ch } y \pm \text{sh } x \text{sh } y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{sh}^2 x &= (\text{ch } 2x - 1)/2 \\ \text{ch}^2 x &= (\text{ch } 2x + 1)/2 \end{aligned}$$

DERIVACIJA FUNKCIJE



Derivacija funkcije $y = f(x)$ u točki x

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

Osnovna pravila deriviranja

$$\begin{aligned} [u(x) \pm v(x)]' &= u'(x) \pm v'(x) \\ [c \cdot u(x)]' &= c \cdot u'(x) \quad c = \text{konst} \\ [u(x) \cdot v(x)]' &= u'(x)v(x) + u(x)v'(x) \\ [u(x)/v(x)]' &= [u'(x)v(x) - u(x)v'(x)]/[v(x)]^2 \\ \{u[v(x)]\}' &= u'(v) \cdot v'(x) \end{aligned}$$

Derivacija elementarnih funkcija

$y = c$	$y' = 0$
$y = x^n$	$y' = nx^{n-1}$ n – realni broj
$y = \sqrt{x}$	$y' = 1/(2\sqrt{x})$
$y = a^x$	$y' = a^x \ln a$
$y = e^x$	$y' = e^x$
$y = \log_a x$	$y' = 1/(x \ln a)$
$y = \lg x$	$y' = 1/(2.3026 x)$
$y = \ln x$	$y' = 1/x$
$y = \sin x$	$y' = \cos x$
$y = \cos x$	$y' = -\sin x$
$y = \tan x$	$y' = 1/\cos^2 x = 1 + \tan^2 x$
$y = \cot x$	$y' = -1/\sin^2 x = -(1 + \cot^2 x)$
$y = \arcsin x$	$y' = 1/\sqrt{1-x^2}$
$y = \arccos x$	$y' = -1/\sqrt{1-x^2}$
$y = \arctan x$	$y' = 1/(1+x^2)$
$y = \text{arc cot } x$	$y' = -1/(1+x^2)$

Diferencijal funkcije $y = f(x)$ u točki x je $dy = f'(x)dx = df$

Osnovna pravila pri računanju diferencijala

$$\begin{aligned} d[u(x) \pm v(x)] &= du \pm dv & d[u(x) \cdot v(x)] &= u(x)dv + v(x)du \\ d[c \cdot u(x)] &= c \cdot du & d[u(x)/v(x)] &= [v(x)du - u(x)dv]/[v(x)]^2 \end{aligned}$$

Derivacije višega reda

Ako je $f'(x)$ derivacija funkcije $y = f(x)$, tada je derivacija drugoga reda (druga derivacija)

$$f''(x) = [f'(x)]' = y'' = d^2y/dx^2$$

Derivacija n -tog reda funkcije $f(x)$

$$f^{(n)}(x) = [f^{(n-1)}(x)]' = y^{(n)} = d^n y/dx^n$$

Derivacija parametarski zadane funkcije

Za funkciju $x = x(t)$, $y = y(t)$, gdje je t parametar, bit će $y'(x) = \dot{y}(t)/\dot{x}(t)$ i $y''(x) = [\ddot{x}(t)\dot{y}(t) - \dot{x}(t)\ddot{y}(t)]/[\dot{x}(t)]^3$, pri čemu je točkom označena derivacija funkcije s obzirom na parametar t .

Geometrijsko značenje derivacije funkcije

Derivacija funkcije $f'(x)$ jednaka je koeficijentu nakhona tangente na krivulju $f(x)$ u točki x

$$f'(x) = \tan \alpha$$

Tangenta na krivulju $f(x)$ u točki $P_1(x_1, y_1)$

$$y - y_1 = f'(x_1)(x - x_1)$$

Normala na krivulju $f(x)$ u točki $P_1(x_1, y_1)$

$$y - y_1 = [-1/f'(x_1)](x - x_1)$$

Ekstremne vrijednosti funkcije $f(x)$ bit će u točki, gdje je $f'(x) = 0$:

maksimum (A): $f'(x_A) = 0$ $f''(x_A) < 0$

minimum (B): $f'(x_B) = 0$ $f''(x_B) > 0$

Infleksija funkcije $f(x)$ će biti u točki (C), gdje

je $f''(x_C) = 0$ in $f'''(x_C) \neq 0$

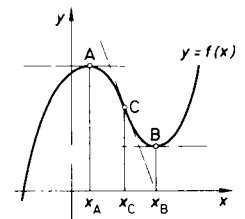
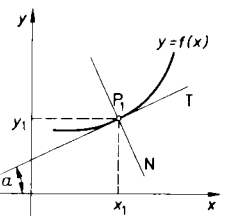
Za krivulju $y = f(x)$ su:

– polumjer kružnice zakrivljenosti

$$r = \sqrt{(1 + y'^2)^3}/|y''|$$

– koordinate središta kružnice zakrivljenosti

$$p = x - [y'(1 + y'^2)]/y'' \quad q = y + (1 + y'^2)/y''$$



Parcijalna derivacija

Parcijalnu derivaciju funkcije $z = f(x, y)$ – npr. po varijabli x – računamo tako, da nezavisnu varijablu x deriviramo, dok nezavisnu varijablu y pritom smatramo konstantom.

Parcijalna derivacija po x funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}$$

Totalni diferencijal funkcije z

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy$$

Parcijalna derivacija po y funkcije $z = f(x, y)$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$$

Derivacije implicitne funkcije $y(x)$, zadane jednadžbom $\varphi(x, y) = 0$

$$y'(x) = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} / \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

INTEGRAL

Neodređeni integral

$\int f(x) dx = I(x) + C$, gdje je $I'(x) = f(x)$, $C = \text{konst}$

Osnovna pravila za izračunavanje neodređenog integrala

$$\int [u(x) \pm v(x)] dx = \int u(x) dx \pm \int v(x) dx$$

$$\int [C \cdot u(x)] dx = C \int u(x) dx$$

Parcijalna integracija (*integratio per partes*)

$$\int u(x) dv = u(x)v(x) - \int v(x) du$$

Neki osnovni integrali

$$\int a dx = ax + C$$

$$\int x^n dx = (x^{n+1})/(n+1) + C \quad n \neq -1$$

$$\int (1/x) dx = \ln x + C$$

$$\int a^x dx = a^x / \ln a + C$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int \ln x dx = x(\ln x - 1) + C$$

$$\int (1/\sin^2 x) dx = -\cot x + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int (1/\cos^2 x) dx = \tan x + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int (1/\sqrt{1-x^2}) dx = \arcsin x + C$$

$$\int \tan x dx = -\ln |\cos x| + C$$

$$\int [1/(1+x^2)] dx = \arctan x + C$$

$$\int \cot x dx = \ln |\sin x| + C$$

$$\int (1/\sqrt{x^2-a}) dx = \ln|x + \sqrt{x^2-a}| + C$$

Uvođenje nove integracijske varijable

$$x = x(t) \quad dx = \dot{x}(t) dt$$

$$\int f(x) dx = \int f[x(t)] \dot{x}(t) dt$$

Primjeri:

- $\int (a+bx)^n dx = \int t^n (1/b) dt = (1/b) (a+bx)^{n+1}/(n+1) + C \quad n \neq -1$
 $a+bx = t \quad dx = (1/b) dt$
- $\int e^{nx} dx = (1/n) e^{nx} + C$ $\int \sin nx dx = -(1/n) \cos nx + C$
 $nx = t \quad dx = (1/n) dt$
- $\int 1/(x^2+4) dx = (1/4) \int 1/[(x/2)^2+1] dx = (1/2) \arctan(x/2) + C$
 $x/2 = t$

Određeni integral

$$\int_a^b f(x) dx = [I(x)]_a^b = I(b) - I(a), \text{ kjer je } I(x) = \int f(x) dx$$

Upotreba određenog integrala

Proračunanje duljine luka krivulje i površine lika

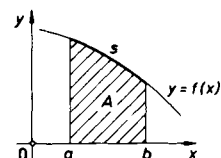
- Krivulja je zadana jednačbom $y = f(x)$,
 $a \leq x \leq b$.

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2} dx \quad ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Površina A lika između luka krivulje i osi x

$$A = \int_a^b f(x) dx$$



- Krivulja je zadana parametarski

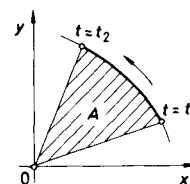
$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt$$

Površina A lika

$$A = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (x\dot{y} - \dot{x}y) dt$$



- Krivulja je zadana polarnim koordinatama

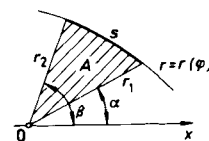
$$r = r(\varphi), \quad \alpha \leq \varphi \leq \beta.$$

Duljina luka s krivulje

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{r^2 + r'^2} d\varphi$$

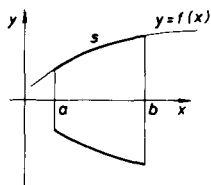
Površina A isječka

$$A = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} r^2(\varphi) d\varphi$$



Izračunavanje površine i volumena rotacijskih tijela

Rotacijsko tijelo nastaje rotacijom krivulje $y = f(x)$ oko osi x , $a \leq x \leq b$.

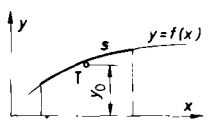


Površina A rotacijskog tijela

$$A = 2\pi \int_a^b y \sqrt{1 + y'^2} dx$$

Volumen V rotacijskog tijela

$$V = \pi \int_a^b y^2 dx$$



Guldinova pravila:

Površina A rotacijskog tijela jednaka je umnošku duljine luka s krivulje i opsega kružnice što ga opisuju njeno težište T :

$$A = 2\pi y_0 s$$

Volumen V rotacijskog tijela jednak je umnošku površine plohe A_s ispod krivulje i opsega kružnice što je opisuje težište T :

$$V = 2\pi y_0 A_s$$

Težišta linija, likova i tijela – vidi st. 106 do 108.

Numerička integracija

Često treba izračunati vrijednost određenog integrala gdje je funkcija $f(x)$ zadana u obliku tablice ili ne poznajemo njen neodređeni integral.

Trapezna jednadžba

Interval $[a, b]$ podijelimo na n jednakih delova širine $h = (b - a)/n$. Konačne točke k -toga podintegrala su

$$x_{k-1} = x_0 + (k - 1)h \quad x_k = x_0 + kh$$

pri čemu vrijedi: $x_0 = a$, $x_n = b$, $f(x_k) = y_k$, pa je

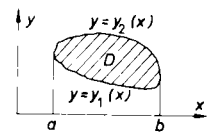
$$\int_a^b f(x) dx \approx h \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + \dots + y_{n-1} + \frac{1}{2} y_n \right)$$

Višestruki integrali

Dvostruki integral

Dvostruki integral funkcije $f(x, y)$ na području D izračunavamo jednadžbom

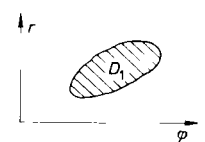
$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy$$



Transformacija dvostrukog integrala u polarne koordinate

$$x = r \cos \varphi \quad y = r \sin \varphi$$

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \iint_{D_1} f(r \cos \varphi, r \sin \varphi) r dr d\varphi$$



Površina područja D_1

$$A = \iint_D dx dy$$

Volumen tijela što ga nad područjem D omeđuju plohe, dane jednadžbama:

$$z = z_1(x, y) \quad \text{in} \quad z = z_2(x, y)$$

gdje su:

$$z_2(x, y) \geq z_1(x, y) \quad (x, y) \in D$$

$$V = \iint_D [z_2(x, y) - z_1(x, y)] dx dy$$

Trostruki integral

Trostruki integral funkcije $f(x, y, z)$ na području V izračunavamo jednadžbom

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \int_a^b dx \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy \int_{z_1(x, y)}^{z_2(x, y)} f(x, y, z) dz$$

Transformacija trostrukog integrala u polarne (kugline) koordinate:

$$x = r \cos \varphi \cos \vartheta \quad y = r \cos \varphi \sin \vartheta \quad z = r \sin \varphi$$

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{V'} f(r \cos \varphi \cos \vartheta, r \cos \varphi \sin \vartheta, r \sin \varphi) r^2 \cos \varphi dr d\varphi d\vartheta$$

DIFERENCIJALNE JEDNADŽBE

Diferencijalna jednadžba s rastavljivim varijablama

$$f(x)dx = g(y)dy$$

Opće rješenje

$$\int f(x)dx = \int g(y)dy + C$$

$C = \text{konst}$

Homogena diferencijalna jednadžba

$$y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

Rješavamo je supstitucijom

$$y = ux, \quad y' = u'x + u$$

Opće rješenje

$$\int \frac{1}{x} dx = \int \frac{1}{f(u) - u} du + C$$

Linearna diferencijalna jednadžba 1. reda

$$y' + g(x)y + h(x) = 0$$

Opće rješenje

$$y = -e^{-G(x)} \int h(x)e^{G(x)} dx + Ce^{-G(x)}$$

gdje je

$$G(x) = \int g(x) dx$$

Homogena diferencijalna jednadžba 2. reda s konstantnim koeficijentima

$$y'' + a_1y' + a_2y = 0$$

Rješenje pomoću

$$y = e^{kx}, \quad y' = ke^{kx}, \quad y'' = k^2e^{kx}$$

otkuda proizlazi karakteristična jednadžba

$$k^2 + a_1k + a_2 = 0$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe ovisno je o korijenima k_1 i k_2 karakteristične jednadžbe:

$$k_1, k_2 - \text{različiti realni brojevi} \quad y = C_1e^{k_1x} + C_2e^{k_2x}$$

$$k_1, k_2 - \text{jednaki realni brojevi: } k_1 = k_2 = k \quad y = (C_1 + C_2x)e^{kx}$$

$$k_1, k_2 - \text{konjugirano kompleksni brojevi: } k_{1,2} = a \pm ib$$

$$y = e^{ax}(C_1 \cos bx + C_2 \sin bx)$$

Nehomogene linearne diferencijalne jednadžbe 2. reda rješavaju se metodom varijacije konstanti.

VEKTORI

Skalari su veličine potpuno određene samo jednim podatkom (npr. vrijeme, masa, radnja, energija, temperatura itd.).

Skalare označujemo simbolima, npr. a .

Vektori su veličine, određene intenzitetom (apsolutnom vrijednošću) i smjerom (npr. sila, moment, brzina, ubrzanje itd.).

Vektore označujemo znakom iznad simbola, npr. \vec{a} ili debljim simbolom, npr. \mathbf{a} ; geometrijski ih prikazujemo orijentiranim dužinama*.

Vektori mogu biti slobodni ili vezani. Slobodni se vektori mogu pomicati u svojem smjeru ili paralelno kamo god u prostoru, a njihovo hvatište može biti svaka točka u prostoru (npr. moment para sila). Vezani se vektori mogu pomicati samo u svojem smjeru, a njihovo hvatište može biti samo neka točka na pravcu u kojem djeluju (npr. sila, kutna brzina). – Više sila koje djeluju u istoj točki su slobodni vektori, ali ako djeluju u različitim točkama, to su vezani vektori.

Apsolutna vrijednost vektora $|\mathbf{a}| = a$ je dužina kojom prikazujemo vektor.

Ako je vektor zadan svojim komponentama (koordinatama)

$$\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$$

vrijedi

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Vektori $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z)$ su jednaki, ako su im jednake sve komponente

$$a_x = b_x \quad a_y = b_y \quad a_z = b_z$$

Radij vektor je vektor, koji vodi od koordinatnoga ishodišta 0 do točke P u prostoru, a označujemo ga sa \mathbf{r}

$$\mathbf{r} = \vec{OP}$$

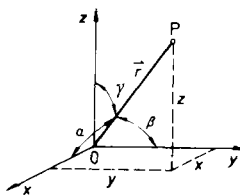
Njegove koordinate su i koordinate točke P(x, y, z)

$$\mathbf{r} = (x, y, z)$$

$$|\mathbf{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Ako vektor \mathbf{r} zatvara s osima koordinata kutove α , β i γ , bit će smjerni kosinusi vektora \mathbf{r}

$$\cos \alpha = \frac{x}{r} \quad \cos \beta = \frac{y}{r} \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$



* U ovom su priručniku vektori označeni sa \vec{a} – u slikama, a sa \mathbf{a} – u tekstu (iz crtačkih i tiskarskih razloga).

Zbrajanje i oduzimanje vektora

Vektore zbrajamo i oduzimamo po zakonu paralelograma.

Zbroj vektora $\mathbf{s} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$

Koordinate zbroja $\mathbf{s} = (s_x, s_y, s_z)$ su

$$s_x = a_x + b_x$$

$$s_y = a_y + b_y$$

$$s_z = a_z + b_z$$

Razlika vektora $\mathbf{d} = \mathbf{a} - \mathbf{b}$

Koordinate razlike $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$ su

$$d_x = a_x - b_x$$

$$d_y = a_y - b_y$$

$$d_z = a_z - b_z$$

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a} \quad (\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}) \quad \mathbf{a} - \mathbf{a} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{0} = (0, 0, 0)$$

Množenje vektora

a) *Množenje vektora skalarom* m , koji je proizvoljan realan broj

$$m\mathbf{a} = (ma_x, ma_y, ma_z)$$

Vektor $m\mathbf{a}$ leži na istom pravcu kao i vektor \mathbf{a} , a njegova je apsolutna vrijednost

$$|m\mathbf{a}| = |m| |\mathbf{a}|$$

Za $m > 0$ vektori \mathbf{a} i $m\mathbf{a}$ su istog smisla

za $m < 0$ vektori \mathbf{a} i $m\mathbf{a}$ su suprotnog smisla

b) *Skalarni produkt dvaju vektora* \mathbf{a} i \mathbf{b} je skalar

$$\mathbf{a}\mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \alpha$$

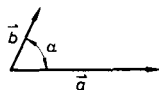
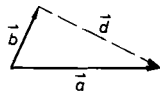
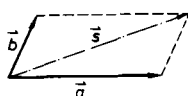
α je kut među vektorima \mathbf{a} i \mathbf{b} ; dobivamo ga iz

$$\cos \alpha = \mathbf{a}\mathbf{b} / (|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|)$$

$$\mathbf{a}\mathbf{b} = \mathbf{b}\mathbf{a} \quad (\mathbf{a} + \mathbf{b})\mathbf{c} = \mathbf{a}\mathbf{c} + \mathbf{b}\mathbf{c}$$

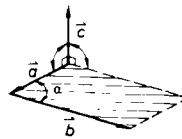
$$\alpha = 0: \quad \mathbf{a}\mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}|$$

$$\alpha = \pi/2: \quad \mathbf{a}\mathbf{b} = 0$$



c) *Vektorski produkt dvaju vektora* \mathbf{a} i \mathbf{b} je vektor

$$\mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$$



koji stoji okomito na ravnini vektora \mathbf{a} i \mathbf{b} . Njegova apsolutna vrijednost jednaka je površini paralelograma, omeđenoga vektorima \mathbf{a} i \mathbf{b} . Vektor \mathbf{c} ima smisao, određen po pravilu desnovojnog vijka.

Koordinate vektorskog produkta $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$ su:

$$c_x = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad c_y = a_2 b_3 - a_3 b_2 \quad c_z = a_3 b_1 - a_1 b_3$$

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a} \quad (\mathbf{a} + \mathbf{b}) \times \mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{c} + \mathbf{b} \times \mathbf{c}$$

$$\text{Za } \alpha = 0, \pi \quad \text{je } \mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

Površina A , koju određuju vektori \mathbf{a} i \mathbf{b} , je

$$\text{za trokut } A = 1/2 |\mathbf{a} \times \mathbf{b}| \quad \text{za paralelogram } A = |\mathbf{a} \times \mathbf{b}|$$

č) *Mješoviti produkt vektora* \mathbf{a} , \mathbf{b} i \mathbf{c} je skalar

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) = \mathbf{a}(\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \times \mathbf{b})\mathbf{c}$$

Apsolutna vrijednost mješovitog produkta jednaka je volumenu V paralelopipeda, konstruiranoga nad vektorima \mathbf{a} , \mathbf{b} i \mathbf{c} u prostoru

$$V = |(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})|$$

d) *Rastavljanje vektora* u ravnini i prostoru

Ako vektori $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ i $\mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z)$ nisu paralelni ($\mathbf{a} \times \mathbf{b} \neq \mathbf{0}$), tada se svaki treći vektor $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$, koji leži u njihovoj ravnini rastavlja u obliku

$$\mathbf{c} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b}$$

gdje su m i n skalari, određeni jednačbama:

$$m = \frac{c_x b_y - c_y b_x}{a_x b_y - a_y b_x} \quad n = \frac{a_x c_y - a_y c_x}{a_x b_y - a_y b_x}$$

Ako vektori \mathbf{a} , \mathbf{b} i \mathbf{c} nisu u istoj ravnini (miješani produkt $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) \neq 0$), tada svaki četvrti vektor \mathbf{d} u prostoru rastavljamo u obliku

$$\mathbf{d} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c}$$

gdje su skalari m , n i p određeni jednačbama:

$$m = \frac{(\mathbf{d}, \mathbf{b}, \mathbf{c})}{(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})} \quad n = \frac{(\mathbf{d}, \mathbf{c}, \mathbf{a})}{(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})} \quad p = \frac{(\mathbf{d}, \mathbf{a}, \mathbf{b})}{(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})}$$

Krivulje u prostoru

Duljinu luka s prostorne krivulje $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$ za $\alpha \leq t \leq \beta$ proračunavamo jednadžbom

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt$$

Ako je krivulja dana jednadžbama $y = y(x)$, $z = z(x)$, bit će duljina luka s za $a \leq x \leq b$ jednaka

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + y'^2 + z'^2} dx$$

Za krivulju danu u vektorskom obliku jednadžbom

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

$$\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t))$$

bit će:

infleksijska zakrivljenost

$$\frac{1}{\rho} = \frac{|\dot{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{r}}|}{|\dot{\mathbf{r}}|^3}$$

torzijska zakrivljenost

$$\frac{1}{\tau} = \frac{(\dot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}}, \ddot{\mathbf{r}})}{|\dot{\mathbf{r}} \times \ddot{\mathbf{r}}|^2}$$

Skalarna i vektorska polja

Skalarno polje $u = u(x, y, z)$

Vektorsko polje $\mathbf{V} = (X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z))$

Operator derivacije (nabla): $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

Gradijent skalarnoga polja u je vektorsko polje

$$\text{grad } u = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \nabla u$$

Divergencija vektorskog polja \mathbf{V} je skalarno polje, određeno jednadžbom

$$\text{div } \mathbf{V} = \nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}$$

Rotor vektorskog polja \mathbf{V} je vektorsko polje, određeno jednadžbom

$$\text{rot } \mathbf{V} = \nabla \times \mathbf{V} = \left(\frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial z}, \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y} \right)$$

Vektorsko je polje \mathbf{V} potencijalno, ako je izvedeno kao gradijent skalarnoga polja u

$$\mathbf{V} = \text{grad } u$$

Vektorsko je polje \mathbf{V} solenoidalno (bez izvora), ako je $\text{div } \mathbf{V} = 0$.

Vektorsko polje \mathbf{V} nema vrtloga, ako je $\text{rot } \mathbf{V} = 0$. Bezvrtložno je vektorsko polje samo tada, ako je potencijalno.

Vektorsko polje \mathbf{V} je harmoničko (Laplaceovo), ako u njemu nema ni izvora, ni vrtloga. Tada postoji takvo skalarno polje u kod kojega je

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \Delta u = 0$$

gdje je

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad - \quad \text{Laplaceov operator}$$

Derivacija i integracija vektorskih funkcija

Definicije vektorske funkcije $\mathbf{a}(t)$ realne varijable t i njene derivacije su iste kao pri skalarnoj funkciji.

Derivacija zbroja i razlike vektora

$$[m\mathbf{a}(t) \pm n\mathbf{b}(t)]' = m\mathbf{a}'(t) \pm n\mathbf{b}'(t)$$

Derivacija skalarnog produkta

$$[\mathbf{a}(t) \cdot \mathbf{b}(t)]' = \mathbf{a}'(t) \cdot \mathbf{b}(t) + \mathbf{a}(t) \cdot \mathbf{b}'(t)$$

Derivacija vektorskoga produkta

$$[\mathbf{a}(t) \times \mathbf{b}(t)]' = \mathbf{a}'(t) \times \mathbf{b}(t) + \mathbf{a}(t) \times \mathbf{b}'(t)$$

Vektor $\mathbf{a}(t)$ s komponentama X , Y i Z (koje su skalarne funkcije)

$$\mathbf{a}(t) = [X(t), Y(t), Z(t)]$$

ima derivaciju

$$\mathbf{a}'(t) = [X'(t), Y'(t), Z'(t)]$$

Funkcija $\mathbf{a}(t, s)$ ima dvije parcijalne derivacije

$$\mathbf{a}_t = \left(\frac{\partial X}{\partial t}, \frac{\partial Y}{\partial t}, \frac{\partial Z}{\partial t} \right) \quad \mathbf{a}_s = \left(\frac{\partial X}{\partial s}, \frac{\partial Y}{\partial s}, \frac{\partial Z}{\partial s} \right)$$

i totalni diferencijal

$$d\mathbf{a} = \mathbf{a}_t dt + \mathbf{a}_s ds$$

Neodređeni integral vektorske funkcije

$$\mathbf{a}(t) = (X(t), Y(t), Z(t))$$

dan je jednadžbom

$$\int \mathbf{a}(t) dt = \left(\int X(t) dt, \int Y(t) dt, \int Z(t) dt \right)$$

a određeni integral za $\alpha \leq t \leq \beta$ jednadžbom

$$\int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{a}(t) dt = \left(\int_{\alpha}^{\beta} X(t) dt, \int_{\alpha}^{\beta} Y(t) dt, \int_{\alpha}^{\beta} Z(t) dt \right)$$

LAPLACEOVA TRANSFORMACIJA

Laplaceov transformat $F(x)$ funkcije $f(t)$ (za realni broj t) definiran je jednačbom

$$F(x) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-tx} f(t) dt \quad x \in \mathbf{C}$$

Svojstva transformacije:

$$L\{a f(t) + b g(t)\} = a L\{f(t)\} + b L\{g(t)\}$$

Za $L\{f(t)\} = F(x)$ je:

$$L\{f(at)\} = 1/a \cdot F(x/a) \quad a > 0$$

$$L\{e^{-at} f(t)\} = F(x + a)$$

$$L\{f'(t)\} = xF(x) - f(0)$$

$$L\{f^{(n)}(t)\} = x^n F(x) - x^{n-1} f(0) - x^{n-2} f'(0) - \dots - x f^{(n-2)}(0) - f^{(n-1)}(0)$$

$$L\{t^n f(t)\} = (-1)^n F^{(n)}(x)$$

Primjeri transformacije:

$f(t)$	$F(x)$	$f(t)$	$F(x)$
1	$1/x$	sh at	$a/(x^2 - a^2)$
t^n	$n!/x^{n+1}$	ch at	$x/(x^2 - a^2)$
e^{at}	$1/(x - a)$	$t e^{at}$	$1/(x - a)^2$
$\sin at$	$a/(x^2 + a^2)$	$t \sin at$	$2ax/(x^2 + a^2)^2$
$\cos at$	$x/(x^2 + a^2)$	$t \cos at$	$(x^2 - a^2)/(x^2 + a^2)^2$

Primjeri inverzne transformacije:

$F(x)$	$f(t)$
1	$\delta(t)$ (impulsna funkcija)
$1/x^n$	$t^{n-1}/(n-1)!$
$1/(x-a)^n$	$t^{n-1} e^{at}/(n-1)!$
$1/(1+ax)$	$1/a \cdot e^{-ta}$
$1/[(x-b)^2 + a^2]$	$1/a \cdot e^{bt} \sin at$
$(x-b)/[(x-b)^2 + a^2]$	$e^{bt} \cos at$
$1/[(x-b)^2 - a^2]$	$1/a \cdot e^{bt} \text{sh } at$
$(x-b)/[(x-b)^2 - a^2]$	$e^{bt} \text{ch } at$

STATISTIKA

Matematička se statistika bavi metodama vrednovanja pokusima dobivenih podataka, da bi ustanovila vjerojatne zakonitosti opaženih slučajnih pojava i veličina.

Statistička vjerojatnost

Relativna učestalost p događaja A određena je omjerom

$$p = \frac{m}{n}$$

gdje znače

n — broj ponavljanja pokusa

m — broj koliko se puta događaj A zbilo.

Relativna je učestalost uvijek

$$0 \leq p \leq 1$$

pri čemu vrijedi

za $p = 0$ je $m = 0$: događaj nije moguć ni pri jednom opažanju,

za $p = 1$ je $m = n$: događaj se zbiva pri svakom opažanju.

Ako je broj n vrlo velik, uzimamo, da je relativna učestalost p približno jednaka *statističkoj vjerojatnosti* događaja A pri pokusu.

Statistički prosjek

Najznačajnije karakteristike slučajnih veličina su prosječna vrijednost i varijanca.

Prosječna vrijednost \bar{x} je broj, oko kojeg su nanizane pokusima dobivene vrijednosti slučajne veličine

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

gdje su

n — broj jednakih pokusa

x_i — vrijednost slučajne veličine pri i -tom pokusu.

Ako su vrijednosti x_i brojčano velike, možemo odabrati približnu prosječnu vrijednost X i računati s razlikama

$$\bar{x} = X + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X)$$

Zbroj odstupanja vrijednosti slučajne veličine x_i od njene prosječne vrijednosti \bar{x} jednaka je 0

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0$$

Mjera rasapa s^2 (varijanca) je pri n pokusa dobivena prosječna vrijednost svote kvadrata odstupanja slučajne veličine x , od njene prosječne vrijednosti \bar{x}

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Standardna devijacija s je realni korijen mjere rasapa

$$s = + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Relativna standardna devijacija (koeficijent varijacije) je

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (= \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%)$$

Ako pokusom izmjerimo dvije slučajne veličine x i y , a pri n mjerenjima dobivamo za njih vrijednosti:

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad \text{in} \quad y_1, y_2, \dots, y_n$$

to će za veličine x i y biti karakterističan broj $s_{x,y}$ (kovarijanca)

$$s_{x,y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

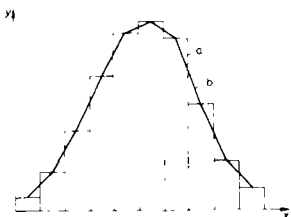
*

Za vrlo veliki osnovni skup vrijedi ukupna devijacija

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2}$$

gdje su: N – kardinalni broj (brojnost osnovnog skupa), m – srednja vrijednost.

Razdioba učestalosti



Histogram je dijagram, koji pokazuje učestalost vrijednosti slučajne veličine. U njemu se na apscisu nanose mjerene vrijednosti, a na ordinatu učestalost.

Iz grafikona razdiobe učestalosti (a) dobivamo spajanjem sredine vrhova izlomljenu crtu (b) koja se to više približava neprekidnoj krivulji, što je sitnija podjela na apscisi.

Pokusom dobiveni histogram je približenje zakonu razdiobe slučajne veličine.

Normalna razdioba

Pri normalnoj razdiobi teče krivulja učestalosti po Gaussovu zakonu

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$

gdje su: m – srednja vrijednost, σ – standardna devijacija

Gaussova krivulja proteže se od $-\infty$ do $+\infty$, a simetrična je s obzirom na vrijednost $x = m$, gdje je najveća učestalost

$$x = m \quad y_{\text{maks}} = 1/\sigma\sqrt{2\pi} = 0,399/\sigma$$

Od te vrijednosti krivulja vrlo naglo pada simetrično s obje strane i ima infleksiju u točkama $x = m \pm \sigma$, gdje je učestalost

$$x = m \pm \sigma \quad y = 0,607 y_{\text{maks}} = 0,242/\sigma$$

Nadalje vrijedi

$$x = m \pm 2\sigma \quad y = 0,135 y_{\text{maks}} = 0,054/\sigma$$

$$x = m \pm 3\sigma \quad y = 0,011 y_{\text{maks}} = 0,004/\sigma$$

Kod manjih vrijednosti σ krivulja je normalne razdiobe strma, a kod većih σ je položita.

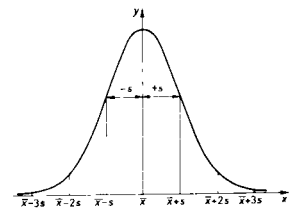
Cjelokupna površina lika među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi iznosi

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} y dx = 1$$

a površine među Gaussovom krivuljom i apscisnom osi u pojedinim intervalima iznose:

u intervalu $m \pm 0,67 \sigma$	$A = 0,5$
u intervalu $m \pm \sigma$	$A = 0,683$
u intervalu $m \pm 2 \sigma$	$A = 0,955$
u intervalu $m \pm 3 \sigma$	$A = 0,997$

Gaussovu krivulju (koja vrijedi za vrlo veliki broj pokusa N) možemo dovoljnom točnošću upotrebiti i pri manjem broju pokusa n , ako u njoj ukupnu devijaciju σ zamijenimo standardnom devijacijom s , a srednju vrijednost m prosječnom vrijednošću \bar{x} .



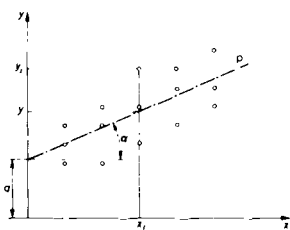
Druge značajnije razdiobe: binomna, Poissonova, Studentova, razdioba χ^2 itd.

Regresija i korelacija

Krivulja koja spaja pokusom dobivenih n točaka, s apscisama x_1, x_2, \dots, x_n i ordinatama y_1, y_2, \dots, y_n nazivamo regresijskom krivuljom odgovarajućih veličina x i y .

Želimo ustanoviti funkcionalnu zavisnost (korelaciju) $y = f(x)$.

Linearna korelacija



Pravac regresije (p)

$$y = a + bx$$

a – odsječak na osi ordinata.

b – koeficijent smjera

$$b = (y - a)/x = \tan \alpha$$

Vrijednosti broja a i b određujemo metodom najmanjih kvadrata, a otuda proizlazi

$$b = \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right) / \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

Jednadžbe regresijskog pravca

$$y - \bar{y} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} (x - \bar{x}) \quad x - \bar{x} = \frac{s_{xy}}{s_y^2} (y - \bar{y})$$

Greške mjerenja

Pri svakom se mjerenju – bez obzira na okolnosti – pojavljuje *mjerna greška* Δx , a to je razlika između izmjerene vrijednosti x_i i stvarne vrijednosti x

$$\Delta x = x_i - x$$

Iz izmjerene vrijednosti, koju po potrebi valja popraviti (npr. greška mjernog uređaja) ili naknadno preračunati, proizlazi *mjerni rezultat*.

Sistematske greške pojavljuju se pod jednakim okolnostima i uvijek s jednakom vrijednošću i jednakim predznakom. Možemo ih lako ustanoviti i odgovarajuće računski ispraviti (npr. netočnost = greška mjernog uređaja).

Slučajne greške javljaju se po mjestima i vremenu potpuno nesređeno, s različitim vrijednostima i predznacima (npr. zbog istrošenosti, trenja i sl.). Ne možemo ih predvidjeti, a ne možemo ni popravljati mjerne rezultate. Zbog slučajnih grešaka postaju mjerni rezultati nepouzdanji. Ovu manu možemo smanjiti samo većim brojem mjerenja.

U suprotnosti sa sistematskim i slučajnim greškama koje prate svako mjerenje, su *mjerne greške*, a to su mjerna odstupanja koja potiču od zabuna mjerioca, nepravilnog mjernog postupka, oštećenog ili pokvarenog mjernog uređaja itd. Mjerne greške treba bezuvjetno izlučiti pri ocjeni mjernih rezultata.

SUSTAVI MJERNIH JEDINICA

Velikinske jednadžbe i koherentne jedinice

Velicina je svaki (fizikalni) pojam koji se može mjeriti, npr.: put, brzina, težina, temperatura, električni otpor itd. Po srodnosti fizikalnih pojava s kojima su vezane, dijelimo veličine na geometrijske, vremenske, mehaničke (masa, sila, rad i snaga), električne, magnetske itd.

Fizikalni zakoni određuju međusobnu zavisnost raznovrsnih veličina. Svaki matematički izraz, koji pokazuje samo međusobno zavisnost veličina zovemo *veličinskom jednadžbom*.*

Velicine mjerimo uspoređivanjem s određenom vrijednošću iste veličine, koju smo odabrali za mjeru. Između različitih mjera odabiremo najprikladniju jedinicu.

Jedinice koje odgovaraju veličinskim jednadžbama su *dimenzijski koherentne jedinice*.

Od dimenzijski koherentnih jedinica možemo samo neke odabrati po volji. Nazivamo ih *osnovnim jedinicama*. Sve ostale jedinice koje određujemo iz osnovnih jedinica s pomoću odgovarajućih veličinskih jednadžbi (*»definiციjske jednadžbe«*) nazivamo *izvedenim jedinicama*.

Broj osnovnih jedinica veoma je malen. Za sve geometrijske veličine dovoljna je samo jedna osnovna jedinica: za duljinu. Kinematika treba već dvije osnovne jedinice: za duljinu i vrijeme. U kinetici moramo tim dvjema dodati i treću: za masu, a električne i magnetske veličine traže još i četvrtu: za jakost električne struje. Osim tih, potrebne su još osnovne jedinice za temperaturu, svjetlosnu jakost i količinu tvari (materije).

Sve druge jedinice možemo izvesti iz tih osnovnih jedinica.

Sustavi jedinica povezuju osnovne i izvedene jedinice u zajedničku dimenzijsku koherenciju. Novi međunarodni sustav jedinica (SI) odlikuje se dimenzijskom koherencijom za sve značajnije veličine u fizici i tehnici.

Brojčane jednadžbe

Ako se pri izboru različitih veličina ne bismo obazirali na jedinice ostalih veličina, mogli bismo fizikalne zakone prikazati samo jednadžbama u kojima bi – kao parazitne koeficijente – trebalo uzimati u obzir i međusobne omjere različitih jedinica.

Takav matematički izraz, prilagođen povoljno odabranim dimenzijski nekoherentnim jedinicama, nije više veličinska jednadžba, već samo *brojčana jednadžba*.

Brojčane se jednadžbe upotrebljavaju samo kada se njima želi prikazati međusobni omjer veličina (npr. prema rezultatima mjerenja kod pokusa) kojih međusobna fizikalna ovisnost (još) nije poznata. U svim slučajevima kad su fizikalne ovisnosti poznate, opravdane su samo veličinske jednadžbe.

* U ovome su priručniku sve jednadžbe pisane u veličinskom obliku.

MEĐUNARODNI SUSTAV JEDINICA SI

Godine 1799. u Francuskoj su uredovno ustanovljene jedinice: m e t a r za duljinu i k i l o g r a m za masu.

Godine 1875. u Parizu je 17 država potpisalo *Međunarodnu metarsku konvenciju*, kojoj su postupno pristupale nove države članice, tako da je konvencija nakon sto godina imala 43 članice potpisnice (među njima i Jugoslaviju), dok je metarski sustav upotrebljavalo već više od 120 država.

Za primanje zaključaka Međunarodne metarske konvencije bile su zadužene *Generalne konferencije za utege i mjere*.

Godine 1901. je prof. Giorgi predložio novi »apsolutni sustav jedinica«, koji je bio prvobitno sastavljen za potrebe elektrotehnike te je, osim jedinica metra i kilograma te s e k u n d e kao jedinice za vrijeme, povezivao sve najznačajnije elektrotehničke jedinice. Taj (»Giorgijev«) sustav jedinica je pokazao velike prednosti i na drugim tehničkim područjima, napose u mehanici. Stoga ga je 9. generalna konferencija za utege i mjere u Parizu god. 1948. definitivno primila kao opće prikladan sustav jedinica, koji ima, osim osnovnih jedinica (metra, kilograma i sekunde) još i četvrtu osnovnu jedinicu – a m p e r kao jedinicu za električnu struju, a nazvan je, po tim osnovnim jedinicama »sustav jedinica MKSA«.

10. generalna konferencija god. 1954. dodala je još dvije osnovne jedinice: stupanj Kelvina (godine 1969. preimenovan u kelvin) za temperaturu i k a n d e l u za jakost svjetla. 11. generalna konferencija je god. 1960. odredila mnogokratnike jedinica i novome sustavu jedinica dala ima **Međunarodni sustav jedinica SI** (*Système International d'Unités*). Na 13. generalnoj konferenciji god. 1967. ustanovljena je nova definicija za sekundu, a na 14. generalnoj konferenciji god. 1971 dodana je još i sedma osnovna jedinica – m o l kao osnovna jedinica za količinu tvari*

Osnovne jedinice međunarodnoga sustava SI su sada:

za duljinu	– metar	m
za masu	– kilogram	kg
za vrijeme	– sekunda	s
za električnu struju	– amper	A
za temperaturu	– kelvin	K
za jakost svjetla	– kandela	cd
za količinu tvari	– mol	mol

U Jugoslaviji je međunarodni sustav jedinica SI uzakonjen g. 1976. Novi zakon o mjernim jedinicama i mjerama objavljen je u veljači 1984. s važnošću od 17. svibnja 1984.

Osnovne jedinice SI:

Osnovna jedinica za duljinu – m e t a r (m), je bila najprije određena razmakom dviju crtica na međunarodnom prametu od platine i iridija pri temperaturi 0 °C. Prametar je bio određen mjerenjem Zemljina kvadranta, i to kao njegov 10-milijunti dio, ali je kasnijim mjerenjima ustanovljeno neznatno odstupanje od te definicije (kraći je za 0,2 mm).

17. generalna konferencija za mjere i utege u Parizu je g. 1983. odredila novu definiciju metra: to je duljina puta koju u vakuumu prevali svjetlost u 1/299792458 sekunde.

Osnovna jedinica za masu – k i l o g r a m (kg) – je određena masom međunarodnog prakilograma od platine i iridija.

Prakilogram je najprije bio određen masom 1 dm³ destilirane vode pri 4 °C i tlaku 1,01325 bar. Kasnijim je mjerenjima ustanovljeno odstupanje i pri izradi prakilograma, koji stvarno odgovara masi od 1,000028 dm³ vode pri 4 °C.

Osnovna jedinica za vrijeme – s e k u n d a (s) – prvobitno je bila određena kao 86400. dio srednjeg Sunčeva dana.

13. generalna konferencija za mjere i utege 1967. god u Parizu utvrdila je i novu definiciju sekunde: to je trajanja 9192631770 perioda zračenja cezija ¹³³Cs.

Osnovna jedinica jakosti električne struje – a m p e r (A) – je istosmjerna električna struja koja protječući u vakuumu kroz dva ravna i međusobno 1 m udaljena paralelna vodiča beskonačne duljine i zanemarljivo malena presjeka uzrokuje među vodičima po svakom metru duljine silu od 2 · 10⁻⁷ N.

Osnovna jedinica za temperaturu (termodinamičku) – k e l v i n (K) – je 273,16. dio temperaturnog intervala između apsolutne nule i trojne točke vode.

Osnovna jedinica za jakost svjetla – k a n d e l a (cd) – je jakost svjetla jednovalnoga zračenja frekvencije 540 · 10¹² Hz i snage 1/683 W/sr. (Hz, W i sr – vidi str. 57)

Jedinica za količinu tvari – m o l (mol) – jest ona količina tvari sustava koja sadrži toliko elementarnih čestica koliko je atoma u 12 g ugljika ¹²C.

Kad upotrebljavamo mol, moraju elementarne čestice biti posebno označene. To mogu biti: atomi, molekule, ioni, elektroni i druge čestice ili posebno označene skupine takvih čestica.

Broj čestica u molu određuje Avogadrova konstanta

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Izvedene jedinice SI

Od osnovnih jedinica međunarodnog sustava jedinica SI izvedene su dimenzijski koherentne jedinice geometrijskih i vremenskih veličina:

za površinu	– m ²	za ubrzanje	– m/s ²
za volumen	– m ³	za kutnu brzinu	– 1/s
za brzinu	– m/s	za kutno ubrzanje	– 1/s ²

Jedinica za silu proizlazi iz Newtonova zakona, da je sila F jednaka umnošku mase m s ubrzanjem a ($F=ma$), iz kojeg slijedi dimenzijski koherentna jedinica

$$\text{za silu} - \text{kg m/s}^2 = \text{N}$$

Ta jedinica sile – nazvana »njutn (N)« – je ona sila koja tijelu mase 1 kg daje ubrzanje 1 m/s².

Iz definicije, da je rad W umnožak sile F s putem s ($W = Fs$) slijedi dimenzijski koherentna jedinica

$$\text{za rad} - \text{N m} = \text{J}$$

Ta jedinica energije (rada) – nazvana »džul (J)« – je rad sile 1 N na putu od 1 m.

U međunarodnom sustavu jedinica SI J je istovremeno i koherentna jedinica za toplinu, koja je samo poseban oblik energije.

Definicija za snagu P , koja je rad W obavljen u vremenu t ($P = W/t$) daje dimenzijski koherentnu jedinicu

$$\text{za snagu} - \text{J/s} = \text{W}$$

Jedinica za snagu – nazvana »vat (W)« – je rad 1 J, izvršen u 1 s. Jedinica za energiju (rad) je dakle i $J = \text{Ws}$.

*

Na te glavne dimenzijski koherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI nastavljaju se jedinice električnih i magnetskih veličina.

Iz zakona o snazi P istosmjerne električne struje, koja je umnožak napona U i struje I ($P = UI$), slijedi dimenzijski koherentna jedinica

$$\text{za napon} - \text{W/A} = \text{V}$$

Ta jedinica napona – nazvana »volt (V)« – je potencijalna razlika između dviju točaka vodiča u kojem se pri protoku istosmerne struje od 1 A troši među tim točkama snaga od 1 W.

Iz Ohmova zakona, po kojem je napon U jednak umnošku struje I i električnog otpora R ($U = IR$) slijedi dimenzijski koherentna jedinica

$$\text{za električni otpor} - \text{V/A} = \Omega$$

Ta jedinica električnog otpora – nazvana »om (Ω)« – je otpor između dviju točaka vodiča među kojima pri naponu od 1 V teče istosmjerna struja od 1 A.

Slično su definirane i ostale koherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI.

Izvedene jedinice međunarodnog sustava jedinica SI koje nose posebno ime:

za frekvenciju	– herc (hertz)	1 Hz = 1 s ⁻¹
za silu	– njutn (newton)	1 N = 1 kg m/s ²
za energiju	– džul (joule)	1 J = 1 N m
za snagu	– vat (watt)	1 W = 1 J/s
za tlak	– paskal (pascal)	1 Pa = 1 N/m ²
za količinu elektriciteta	– kulon (coulomb)	1 C = 1 A s
za električni napon	– volt	1 V = 1 W/A
za električni otpor	– om (ohm)	1 Ω = 1 V/A
za električnu vodljivost	– simens (siemens)	1 S = 1 Ω^{-1}
za električni kapacitet	– farad	1 F = 1 C/V
za električni induktivitet	– henri (henry)	1 H = 1 V s/A
za gustoću magnetskog toka	– tesla	1 T = 1 N/A m
za magnetski tok	– veber (weber)	1 Wb = 1 T m ²
za svjetlosni tok	– lumen	1 lm = 1 cd sr
za razsvjetljenost	– luks (lux)	1 lx = 1 lm/m ²
za radioaktivnost	– bekerel (becquerel)	1 Bq = 1 s ⁻¹
za apsorbiranu dozu zračenja	– grej (gray)	1 Gy = 1 J/kg
za ekvivalentnu dozu zračenja	– sivert (sievert)	1 Sv = 1 J/kg

Koherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI su i jedinice za kutove:

za ravninski kut – radijan 1 rad = puni ravninski kut/2 π

za prostorni kut – steradian 1 sr = puni prostorni kut/4 π

Osim navedenih izvedenih koherentnih jedinica koje imaju posebna imena, koherentne jedinice međunarodnog sustava jedinica SI su i sve jedinice izvedene neposredno iz osnovnih jedinica množenjem ili dijeljenjem, npr.

$$\text{m}^2, \text{m}^3, \text{m}^4, \text{s}^{-1}, \text{s}^{-2}, \text{K}^{-1}$$

$$\text{m/s}, \text{m/s}^2, \text{m}^2/\text{s}, \text{m}^3/\text{s}, \text{kg/s}, \text{kg/m}^3, \text{kg m}$$

ili iz već izvedenih jedinica s posebnim imenom, npr.

$$\text{Nm}, \text{N/m}^2, \text{N/m}^3, \text{Ns/m}^2, \text{rad/s}$$

$$\text{J/kg}, \text{J/K}, \text{J/kgK}, \text{W/(m} \cdot \text{K)}, \text{W/m}^2\text{K}, \text{W/m}^2\text{K}^4$$

Pri jedinicama, koje su množenjem izvedene iz osnovnih jedinica ili izvedenih jedinica s posebnim imenom, valja među umnoženim jedinicama ostaviti vidljiv prostor ili točku (znak za množenje), npr.

$$\text{kg m} = \text{kg} \cdot \text{m} \quad (\text{ne: kgm}), \quad \text{N m} = \text{N} \cdot \text{m} \quad (\text{ne: Nm}),$$

$$\text{W/m K} = \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (\text{ne: W/mK})$$

Jednakovrijedni način pisanja

$$1 \frac{\text{W}}{\text{m K}} = 1 \text{ W/m K} = 1 \text{ W}/(\text{m K}) = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) = 1 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Decimalne mjerne jedinice

S obzirom na to da se mjerena veličina gdje kada mora izraziti neprikladno velikim ili malim brojem jedinica, ustanovljeni su u međunarodnom sustavu jedinica SI i decimalni višekratnici jedinica obilježeni posebnim predmecima:

predmetak	znak	vrijednost	predmetak	znak	vrijednost
deka	da	10^1	deci	d	10^{-1}
hekto	h	10^2	centi	c	10^{-2}
kilo	k	10^3	mili	m	10^{-3}
mega	M	10^6	mikro	μ	10^{-6}
giga	G	10^9	nano	n	10^{-9}
tera	T	10^{12}	piko	p	10^{-12}
peta	P	10^{15}	femo	f	10^{-15}
eksa	E	10^{18}	ato	a	10^{-18}

Ti se decimalni višekratnici dodaju svim osnovnim i izvedenim jedinicama s posebnim imenom, a pišu se ispred tih jedinica i tik uz njih (bez razmaka), npr.

km, mm, μm ; dag, mg; ms, μs ; mA
kN, MN, mN; kJ, MJ; kW, MW, GW,

Pisanjem predmetaka tik uz mjerne jedinice, decimalne se mjerne jedinice razlikuju od izvedenih jedinica koje su umnožak osnovnih ili izvedenih jedinica s posebnim imenom, pri kojima se mora ostaviti razmak (vidi str. 57). Tako treba razlikovati npr.

ms = milisekunda m s = m · s = metar-sekunda
mN = milinjutn m N = m · N = metar-njutn
W/mK = vat po milikelvinu W/m K = W/(m · K) = vat po metar-kelvinu

Pri svakoj je decimalnoj mjernoj jedinici moguć samo jedan predmetak, npr.

$10^{-9}\text{m} = 1\text{ nm}$ (ne: = $1\ \mu\text{mm}$), $10^6\text{g} = 1\text{ Mg}$ (ne: = 1 kkg)

Decimalni se višekratnici ne dodaju jedinicama, izraženim potencijom (npr. jedinicama za površinu, volumen, frekvenciju itd.) Dakle:

$1\text{ mm}^2 = (10^{-3}\text{m})^2 = 10^{-6}\text{m}^2$ (ne: = $1\text{ m}(\text{m}^2) = 10^{-3}\text{m}^2$)
 $1\text{ ns}^{-1} = (10^{-9}\text{s})^{-1} = 10^9\text{s}^{-1}$ (ne: = $1\text{ n}(\text{s}^{-1}) = 10^{-9}\text{s}^{-1}$)
 $1\text{ mm}^2/\text{s} = (10^{-3}\text{m})^2/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (ne: = $1\text{ m}(\text{m}^2/\text{s}) = 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$)

* Upotreba višekratnika da, h, d i c je ograničena; treba ih upotrebljavati samo u slijedećim slučajevima:

dag, dalm, dl, dm, dm^2 , dm^3
ha, hl, cl, cm, cm^2 , cm^3 , cm^4

JEDINICE I MJERE VELIČINA

(dozvoljene jugoslavenskim zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima)

Geometrijske veličine

1. Duljina l , put s

Jedinica SI 1 metar (m)

Druge mjere

nanometar $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{m} = 10^{-6}\text{mm}$
mikrometar $1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$
milimetar $1\text{ mm} = 10^{-3}\text{m}$
centimetar $1\text{ cm} = 10^{-2}\text{m} = 10\text{ mm}$
decimetar $1\text{ dm} = 10^{-1}\text{m} = 10\text{ cm}$
kilometar $1\text{ km} = 10^3\text{m}$
morska milja* = 1852 m

2. Ploha, površina A , S

Jedinica SI 1 kvadratni metar (m^2)

Druge mjere

kvadratni milimetar $1\text{ mm}^2 = 10^{-6}\text{m}^2$
kvadratni centimetar $1\text{ cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2$
kvadratni decimetar $1\text{ dm}^2 = 10^{-2}\text{m}^2$
ar $1\text{ a} = 10^2\text{m}^2$
hektar $1\text{ ha} = 10^4\text{m}^2 = 100\text{ a}$
kvadratni kilometar $1\text{ km}^2 = 10^6\text{m}^2 = 100\text{ ha}$

3. Volumen (obujam, zapremina) V

Jedinica SI 1 kubni metar (m^3)

Druge mjere

kubni milimetar $1\text{ mm}^3 = 10^{-9}\text{m}^3$
kubni centimetar $1\text{ cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3$
kubni decimetar $1\text{ dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$

Mjere za volumen tekućina (i sipkih tvari)

litar** $1\text{ l} (1\text{ L}) = 10^{-3}\text{m}^3 = 1\text{ dm}^3$
mikrolitar $1\ \mu\text{l} (1\ \mu\text{L}) = 10^{-9}\text{m}^3 = 10^{-6}\text{l} (10^{-6}\text{L})$
mililitar $1\text{ ml} (1\text{ mL}) = 10^{-6}\text{m}^3 = 10^{-3}\text{l} (10^{-3}\text{L})$
centilitar $1\text{ cl} (1\text{ cL}) = 10^{-5}\text{m}^3 = 10^{-2}\text{l} (10^{-2}\text{L})$
decilitar $1\text{ dl} (1\text{ dL}) = 10^{-4}\text{m}^3 = 10^{-1}\text{l} (10^{-1}\text{L})$
hektolitar $1\text{ hl} (1\text{ hL}) = 10^{-1}\text{m}^3 = 10^2\text{l} (10^2\text{L})$

* Smije se upotrebljavati samo za označavanje udaljenosti u pomorskom, riječnom i zračnom saobraćaju. - ** Oznake za litar: l i L su jednakovrijedne.

4. Ravninski kut $\hat{\alpha}$

Ravninski kut je dio ravnine između dva pravca koji se sjeku u vrhu kuta. Merimo ga duljinom luka među sjecištima pravaca i kružnice sa središtem u vrhu kuta i to omjerima duljine luka i opsega kružnice ili duljine luka i polumjera kružnice ($m/m = 1$).

Prirodna jedinica za ravninski kut je 1 puni kut*. Puni kut je kut pri kojem je luk jednak opsegu kružnice.

Općenito su u upotrebi mjere za kut α :

- kutni stupanj $1^\circ = \text{puni kut}/360$
- kutna minuta $1' = 1^\circ/60$
- kutna sekunda $1'' = 1'/60 = 1^\circ/3600$

Druge kutne mjere:

- gradus ili gon $1^g = \text{puni kut}/400$
- pravi kut $= \text{puni kut}/4$

Jedinica SI za lučnu mjeru (= analitički ravninski kut) $\hat{\alpha}$ je 1 radijan (rad). Radian je kut, pri kojem je luk jednak polumjeru kružnice.

$$1 \text{ rad} = \text{puni kut}/2\pi = 360^\circ/2\pi = 57,29578^\circ = 57^\circ 17' 45''$$

Zbog razlikovanja su u ovom priručniku označeni:

- kutovi, mjereni u stupnjevima, oznakama $\alpha, \beta, \gamma, \dots$
- lučne mjere, mjerene u radijanima, oznakama $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \dots$

Pretvaranje radijana u kutne stupnjeve

rad	°	rad	°	rad	°	rad	°	rad	°
0,01	0,573	0,32	18,335	0,64	36,670	0,96	55,004	1,28	73,339
0,02	1,146	0,34	19,481	0,66	37,815	0,98	56,150	1,30	74,485
0,04	2,292	0,36	20,626	0,68	38,961	1,00	57,296	1,32	75,630
0,06	3,438	0,38	21,772	0,70	40,107	1,02	58,442	1,34	76,776
0,08	4,584	0,40	22,918	0,72	41,253	1,04	59,588	1,36	77,922
0,10	5,730	0,42	24,064	0,74	42,399	1,06	60,734	1,38	79,068
0,12	6,875	0,44	25,210	0,76	43,545	1,08	61,879	1,40	80,214
0,14	8,021	0,46	26,356	0,78	44,691	1,10	63,025	1,42	81,360
0,16	9,167	0,48	27,502	0,80	45,837	1,12	64,171	1,44	82,506
0,18	10,313	0,50	28,648	0,82	46,983	1,14	65,317	1,46	83,652
0,20	11,459	0,52	29,794	0,84	48,128	1,16	66,463	1,48	84,798
0,22	12,605	0,54	30,940	0,86	49,274	1,18	67,609	1,50	85,944
0,24	13,751	0,56	32,086	0,88	50,420	1,20	68,755	1,52	87,090
0,26	14,897	0,58	33,232	0,90	51,566	1,22	69,901	1,54	88,236
0,28	16,043	0,60	34,377	0,92	52,712	1,24	71,047	1,56	89,381
0,30	17,189	0,62	35,523	0,94	53,858	1,26	72,193	1,57	89,954

* Predložena je (po DIN-u), no međunarodno još nije usvojena, oznaka: pla (lat. *plenus angulus* = puni kut). Jedinica puni kut potpuno odgovara jedinici jedan okretaj (vidi str. 62).

Pretvaranje kutnih stupnjeva, minuta i sekunda u radijane

$$1^\circ = 0,017453 \text{ rad} \quad 1' = 0,000291 \text{ rad} \quad 1'' = 0,000005 \text{ rad}$$

°	rad	°	rad	°	rad	°	rad	°	rad
1	0,017 5	19	0,331 6	37	0,645 8	55	0,959 9	73	1,274
2	0,034 9	20	0,349 1	38	0,663 2	56	0,977 4	74	1,291
3	0,052 4	21	0,366 5	39	0,680 7	57	0,994 8	75	1,309
4	0,069 8	22	0,384 0	40	0,698 1	58	1,012	76	1,326
5	0,087 3	23	0,401 4	41	0,715 6	59	1,030	77	1,344
6	0,104 7	24	0,418 9	42	0,733 0	60	1,047	78	1,361
7	0,122 2	25	0,436 3	43	0,750 5	61	1,064	79	1,379
8	0,139 6	26	0,453 8	44	0,767 9	62	1,082	80	1,396
9	0,157 1	27	0,471 2	45	0,785 4	63	1,099	81	1,413
10	0,174 5	28	0,488 7	46	0,802 9	64	1,117	82	1,431
11	0,192 0	29	0,506 1	47	0,820 3	65	1,134	83	1,448
12	0,209 4	30	0,523 6	48	0,837 8	66	1,152	84	1,466
13	0,226 9	31	0,541 0	49	0,855 2	67	1,169	85	1,483
14	0,244 3	32	0,558 5	50	0,872 7	68	1,187	86	1,501
15	0,261 8	33	0,576 0	51	0,890 1	69	1,204	87	1,518
16	0,279 3	34	0,593 4	52	0,907 6	70	1,222	88	1,536
17	0,296 7	35	0,610 9	53	0,925 0	71	1,239	89	1,553
18	0,314 2	36	0,628 3	54	0,942 5	72	1,256	90	1,571

Pretvaranje kutnih minuta i sekunda u decimale kutnih stupnjeva

'	°	'	°	'	°	'	°	'	°
1	0,017	4	0,067	7	0,117	10	0,167	40	0,667
2	0,033	5	0,083	8	0,133	20	0,333	50	0,833
3	0,050	6	0,100	9	0,150	30	0,500	60	1,000
''	°	''	°	''	°	''	°	''	°
1	0,000	4	0,001	7	0,002	10	0,003	40	0,011
2	0,001	5	0,001	8	0,002	20	0,006	50	0,014
3	0,001	6	0,002	9	0,003	30	0,008	60	0,017

Pretvaranje decimala kutnih stupnjeva u kutne minute i sekunde

°	''	°	''	°	''	°	''	°	''
0,001	4''	0,006	22''	0,01	0'36''	0,06	3'36''	0,1	6'
0,002	7''	0,007	25''	0,02	1'12''	0,07	4'12''	0,2	12'
0,003	11''	0,008	29''	0,03	1'48''	0,08	4'48''	0,3	18'
0,004	14''	0,009	32''	0,04	2'24''	0,09	5'24''	0,4	24'
0,005	18''	0,010	36''	0,05	3'	0,10	6'	0,5	30'
								1,0	60'

5. Prostorni kut

Jedinica za prostorni kut je 1 steradian (sr)

$$1 \text{ sr} = \text{puni prostorni kut}/4\pi$$

Vremenske veličine

1. Vrijeme t

Jedinica SI	1 sekunda (s)
Druge mjere	milisekunda 1 ms = 10^{-3} s kilosekunda 1 ks = 10^3 s minuta 1 min = 60 s sat (hora) 1 h = 60 min = 3600 s dan (dies) 1 d = 24 h = 86 400 s godina (annus)* 1 a = 8760 h = 31 536 ks

2. Brzina v , s

Jedinica SI	1 metar u sekundi (m/s)
Druge mjere	metar u minuti 1 m/min = 1/60 m/s kilometar u sekundi 1 km/s = 10^3 m/s kilometar na sat 1 km/h = 1/3,6 m/s čvor (milja na sat) 1,852 km/h = 0,5144 m/s brzina svjetlosti $c_0 = 299\,792,458$ km/s

3. Ubrzanje, a , \dot{v} , \ddot{s}

Jedinica SI	1 metar u sekundi na kvadrat (m/s ²)
Druge mjera	zemaljsko ubrzanje $g = 9,80665$ m/s ²

4. Frekvencija f

Jedinica SI	1 herc (hertz) (Hz = s ⁻¹)
Druge mjere	kiloherc 1 kHz = 10^3 Hz megaherc 1 MHz = 10^6 Hz gigaherc 1 GHz = 10^9 Hz

5. Kružna frekvencija ω

Jedinica SI	1 sekunda na minus prvu (s ⁻¹)
-------------	--

6. Brzina vrtnje n

Jedinica SI	1 okretaj u sekundi (okr./s)**
Druge mjera	okretaj u minuti 1 okr./min = 1/60 okr./s

7. Kutna brzina ω

Jedinica SI	1 radijan u sekundi (rad/s)
-------------	-----------------------------

8. Kutno ubrzanje ϵ

Jedinica SI	1 radijan u sekundi na kvadrat (rad/s ²)
-------------	--

* S obzirom na prestupne godine vrijedi u prosjeku: 1 a = 8765,76 h = 31 556,736 ks

** Međunarodno je predložena, ali još nije usvojena, oznaka: rev/s (lat. *revolutio* = okretaj). Jedinica okretaj potpuno odgovara jedinici puni kut (vidi str. 60).

Masene veličine

1. Masa m

Jedinica SI	1 kilogram (kg)
Druge mjere	miligram 1 mg = 10^{-6} kg = 10^{-3} g centigram 1 cg = 10^{-5} kg = 10^{-2} g decigram 1 dg = 10^{-4} kg = 10^{-1} g gram 1 g = 10^{-3} kg dekagram 1 dag = 10^{-2} kg = 10 g megagram 1 Mg = 10^3 kg = 1 t tona 1 t = 10^3 kg = 1 Mg kilotona 1 kt = 10^6 kg = 10^3 t megatona 1 Mt = 10^9 kg = 10^6 t atomska jedinica mase* $u = 1,660531 \cdot 10^{-27}$ kg

2. Duljinska masa m_l

Jedinica SI	1 kilogram po metar (kg/m)
Druge mjere	kilogram po kilometru 1 kg/km = 10^{-3} kg/m teks, tex** 1 teks = 10^{-6} kg/m = 1 g/km

3. Plošna masa m_A

Jedinica SI	1 kilogram po kvadratnom metru (kg/m ²)
-------------	---

4. Volumna masa, gustoća (specifična masa)

Jedinica SI	1 kilogram po kubnom metru (kg/m ³)
Druge mjere	gram po kubnom decimetru 1 g/dm ³ = 1 kg/m ³ gram po kubnom centimetru 1 g/cm ³ kilogram po kubnom decimetru 1 kg/dm ³ megagram po kubnom metru 1 Mg/m ³ tona po kubnom metru 1 t/m ³ } = 10^3 kg/m ³

5. Specifični volumen v

Jedinica SI	1 kubni metar po kilogramu (m ³ /kg)
Druge mjera	kubni decimetar po kilogramu 1 dm ³ /kg = 10^{-3} m ³ /kg

6. Moment tromosti mase J

Jedinica SI	1 kilogram-kvadratni metar (kg m ²)
Druge mjere	gram-kvadratni metar 1 g m ² = 10^{-3} kg m ² kilogram-kvadratni milimetar 1 kg mm ² = 10^{-6} kg m ²

* Upotreba je dozvoljena samo u kemiji i fizici.

** Upotreba je dozvoljena samo za dužinsku masu tekstilnoga vlakna ili konca.

Protočne veličine

1. Pretok mase q_m, q, \dot{m}

Jedinica SI	1 kilogram u sekundi (kg/s)		
Druge mjere	gram u sekundi	1 g/s	= 10^{-3} kg/s
	gram u minuti	1 g/min	= $10^{-3}/60$ kg/s
	gram na sat	1 g/h	= $10^{-3}/3600$ kg/s
	kilogram u minuti	1 kg/min	= $1/60$ kg/s
	kilogram na sat	1 kg/h	= $1/3600$ kg/s
	tona u sekundi	1 t/s	= 10^3 kg/s
	tona u minuti	1 t/min	= $10^3/60$ kg/s
tona na sat	1 t/h	= $10^3/3600$ kg/s	

2. Volumenski protok q_v, \dot{V}

Jedinica SI	1 kubni metar u sekundi (m^3/s)		
Druge mjere	kubni metar u minuti	1 m^3 /min	= $1/60$ m^3/s
	kubni metar na sat	1 m^3 /h	= $1/3600$ m^3/s
	litar u sekundi	1 l/s	= 10^{-3} m^3/s
	litar u minuti	1 l/min	= $10^{-3}/60$ m^3/s
	litar na sat	1 l/h	= $10^{-3}/3600$ m^3/s

Veličine za silu

1. Sila F

Jedinica SI	1 njutn, newton ($N = kg\ m/s^2$)		
Druge mjere	mikronjutn	1 μN	= 10^{-6} N
	milinjutn	1 mN	= 10^{-3} N
	kilanjutn	1 kN	= 10^3 N
	meganjutn	1 MN	= 10^6 N

Upozorenje!

Veličine »težina« i »specifična težina« nisu spomenute u jugoslavenskom zakonu o mjernim jedinicama i mjerilima.

Težina G je sila, koja proistječe iz privlačnosti Zemlje za masu m ($G = mg$); mjerimo je dakle kao silu (N). U svakidanjem životu upotrebljavamo »težinu« za vaganjem ustanovljenu masu (g, kg, t).*

»Specifična težina γ « je (zbog prednosti nepromjenljive mase prema promjenljivoj težini) izgubila svoj smisao; stoga je treba u potpunosti zamjeniti gustoćom ρ ($\gamma = \rho g$).

* To je u smislu JUS A.A.1.025 (1980). Po DIN-u valja razlikovati »težinu-silu« (*Gewichtskraft*), mjerenu u N, od »težine« (*Gewicht*), mjerene u kg.

2. Moment sile M , okretni moment T, M_t

Jedinica SI	1 njutn-metar (N m)		
Druge mjere	milinjutn-metar	1 mN m	= 10^{-3} N m
	njutn-milimetar	1 N mm	= 10^{-3} N m
	kilanjutn-metar	1 kN m	= 10^3 N m
	meganjutn-metar	1 MN m	= 10^6 N m

3. Tlak p , naprezanje σ, τ

Jedinica SI	1 paskal, (pascal) ($Pa = N/m^2$)		
Druge mjere	milipaskal	1 mPa	= 10^{-3} Pa
	kilopaskal	1 kPa	= 10^3 Pa
	megapaskal	1 MPa	= 10^6 Pa
	kilanjutn na kvadratni metar	1 kN/m ²	= 1 kPa
	meganjutn na kvadratni metar	1 MN/m ²	= 1 MPa
	njutn na kvadratni milimetar	1 N/mm ²	= 1 MPa
	kilanjutn na kvadr. milimetar	1 kN/mm ²	= 1 GPa
	bar	1 bar	= 10^5 Pa
	milibar	1 mbar	= 10^2 Pa
	mikrobar	1 μ bar	= 10^{-1} Pa
standardni atmosferski tlak	p_a	= 1013,25 mbar	

»Relativni tlak p_e « je razlika apsolutnoga tlaka p i (nekog drugog ali redovno) atmosferskog tlaka p_a : $p_e = p - p_a$

$$\begin{array}{lll} p > p_a & p_e > 0 & \text{pretlak} \\ p < p_a & p_e < 0 & \text{podtlak} \end{array}$$

4. Impuls sile Ft , količina gibanja mv

Jedinica SI	1 njutn-sekunda (N s) = = 1 kilogram-metar u sekundi (kg m/s)		
Druge mjere	milinjutn-sekunda	1 mN s	= 10^{-3} N s = 1 g m/s
	kilanjutn-sekunda	1 kN s	= 10^3 N s = 1 Mg m/s

5. Dinamička viskoznost η

Jedinica SI	1 paskal-sekunda ($Pa \cdot s = N\ s/m^2$)		
Druga mjera	milipaskal-sekunda	1 mPa \cdot s	= 10^{-3} Pa \cdot s

6. Kinematička viskoznost ν

Jedinica SI	1 kvadratni metar u sekundi (m^2/s)		
Druga mjera	kvadratni milimetar u sekundi	1 mm ² /s	= 10^{-6} m ² /s

Energetske veličine

1. *Energija E, rad W, toplina Q*

Jedinica SI	1 džul (Joule) (J = N m)		
Druge mjere	kilodžul	1 kJ	= 10 ³ J
	megadžul	1 MJ	= 1u ⁶ J
	gigadžul	1 GJ	= 1u ⁹ J
	vat-sekunda	1 W s	= 1 J
	vat-sat	1 W h	= 3600 J
	kilovat-sekunda	1 kW s	= 1 kJ
	kilovat-sat	1 kW h	= 3600 kJ
	megavat-sat	1 MW h	= 3600 MJ
	elektron-volt	1 eV	= 0,160 219 aJ

2. *Snaga P, toplinski tok Φ, Q̇*

Jedinica SI	1 vat (watt) (W = J/s)		
Druge mjere	milivat	1 mW	= 10 ⁻³ W
	kilovat	1 kW	= 10 ³ W
	megavat	1 MW	= 10 ⁶ W
	gigavat	1 GW	= 10 ⁹ W
	kilodžul u sekundi	1 kJ/s	= 1 kW
	kilodžul na sat	1 kJ/h	= 1/3600 kW

Toplinske veličine

1. *Temperatura*
 Jedinica SI za (termodinamičku) temperaturu je 1 kelvin (K).
 Jedinica kelvin je 273,16. dio temperaturne razlike između apsolutne nule i trojne točke vode

Druga mjera za temperaturu je stupanj Celzija (°C).
 Stupanj Celzija je 100. dio temperaturne razlike (pri tlaku od 1, 01325 bar) između ledišta i vrelišta vode.

Jedinica kelvin i stupanj Celzija su jednaki: 1 K = 1 °C

a) *Temperaturna skala*

Apsolutna se temperatura *T* mjeri od apsolutne nule (0,00 K).

Celzijeva se temperatura *t* mjeri od ledišta vode (0,00 °C).

$$T(K) - t(^{\circ}C) = 273,15$$

Dakle vrijedi:	<i>T</i>	<i>t</i>
apsolutna nula	0,00 K	-273,15 °C
ledište vode	273,15 K	0,00 °C
trojna točka vode	273,16 K	0,01 °C
vrelište vode	373,15 K	100,00 °C

b) Među istim je temperaturama temperaturna razlika Δ*T*, mjerena u kelvinima (K), jednaka temperaturnoj razlici Δ*t*, mjerenoj u stupnjevima Celzija (°C):

$$\Delta T(K) = \Delta t(^{\circ}C)$$

2. *Temperaturno raztezanje α, β*

Jedinica SI	1 metar po metru i kelvinu	m/(m · K) = K ⁻¹
Druga mjera	mikrometar po metru i kelvinu	1 μm/(m · K) = 10 ⁻⁶ K ⁻¹

3. *Brzina zagrijavanja i ohlađivanja T/t (dT/dt)*

Jedinica SI	1 kelvin u sekundi (K/s)	
Druge mjere	kelvin u minuti	1 K/min = 1/60 k/s
	kelvin na sat	1 K/h = 1/3600 k/s

4. *Specifični toplinski kapacitet c*

Jedinica SI	1 džul po kilogramu i kelvinu (J/kg K)
Druga mjera	kilodžul po kilogramu i kelvinu 1 kJ/kg K = 10 ³ J/kg K

5. *Entalpija H*

Jedinica SI	1 džul (J)
Druga mjera	kilodžul 1 kJ = 10 ³ J

6. *Specifična entalpija h*

Jedinica SI	1 džul po kilogramu (J/kg)
Druga mjera	kilodžul po kilogramu 1 kJ/kg = 10 ³ J/kg

7. *Entropija S*

Jedinica SI	1 džul po kelvinu (J/K)
Druga mjera	kilodžul po kelvinu 1 kJ/K = 10 ³ J/K

8. *Specifična entropija s*

Jednota SI	1 džul po kelvinu i kilogramu (J/K kg)
Druga mjera	kilodžul po kelvinu i kilogramu 1 kJ/K kg = 10 ³ J/K kg

9. *Ogrjevna moć gornja H_g, i donja H_d*

Jedinica SI	1 džul po kilogramu (J/kg)
Druge mjere	kilodžul na kilogram 1 kJ/kg = 10 ³ J/kg
	megadžul po kilogramu 1 MJ/kg = 10 ⁶ J/kg

10. *Toplinska vodljivost λ*

Jedinica SI	1 vat po metru i kelvinu (W/(m · K))
Druga mjera	kilovat po metru i kelvinu 1 kW/(m · K) = 10 ³ W/(m · K)

11. *Toplinski prijelaz α, toplinski prolaz k*

Jedinica SI	1 vat po kvadratnom metru i kelvinu (W/m ² K)
Druga mjera	kilovat po kvadratnom metru i kelvinu 1 kW/m ² K = 10 ³ W/m ² K

Molne veličine

- Molna masa m_m**
Jedinica SI 1 kilogram po molu (kg/mol)
Druge mjere gram po molu 1 g/mol = 10^{-3} kg/mol
kilogram po kilomolu 1 kg/kmol = 10^{-3} kg/mol
- Molni volumen V_m**
Jedinica SI 1 kubni metar po molu (m^3 /mol)
Druge mjera kubni metar po kilomolu 1 m^3 /kmol = 10^{-3} /mol
- Koncentracija tvari (molarost) $1/V_m$**
Jedinica SI 1 mol po kubnom metru (mol/m^3)
Druge mjera kilomol po kubnom metru 1 kmol/ m^3 = 10^3 mol/ m^3
- Molni toplinski kapacitet c_m**
Jedinica SI 1 džul po molu i kelvinu (J/mol K)
Druge mjere džul po kilomolu i kelvinu 1 J/kmol K = 10^{-3} J/mol K
kiložul po kilomolu i kelvinu 1 kJ/kmol K = 1 J/mol K
kiložul po molu i kelvinu 1 kJ/mol K = 10^3 J/mol K
- Molna entalpija h_m**
Jedinica SI 1 džul po molu (J/mol)
Druge mjere džul po kilomolu 1 J/kmol = 10^{-3} J/mol
kiložul po kilomolu 1 kJ/kmol = 1 J/mol
kiložul po molu 1 kJ/mol = 10^3 J/mol
- Molna entropija s_m**
Jedinica SI 1 džul po kelvinu i molu (J/K mol)
Druge mjere džul po kilomolu i kelvinu 1 J/K mol = 10^{-3} J/K mol
kiložul po kilomolu i kelvinu 1 kJ/K mol = 1 J/K mol
kiložul po molu i kelvinu 1 kJ/K mol = 10^3 J/K mol

Veličine zračenja

- Aktivnost radioaktivnoga izvora $A = dN/dt$ (broj jezgri N raspalih u vremenu t)**
Jedinica SI 1 bekerel, becquerel (Bq = s^{-1})
- Apsorbirana doza ionizirajućega zračenja $D = E/m$ (energija zračenja E , dovedena tijelu mase m)**
Jedinica SI 1 grej, gray (Gy = J/kg)
- Ekvivalentna doza ionizirajućega zračenja $BD =$ (biološki učin raznih vrsta zračenja s obzirom na rendgensko zračenje: $B = 1$; npr. za zračenje α je $B = 10$)**
Jedinica SI 1 sivert, sievert (Sv = J/kg)
- Ekspozicijska doza ionizirajućega zračenja Q/m (ionizacijom izazvan naboj Q u zraku mase m)**
Jedinica SI 1 kulon po kilogramu (C/kg)

Električne veličine

- Električna struja I**
Jedinica SI 1 amper (ampère) (A)
Druge mjere nanoamper 1 nA = 10^{-9} A
mikroamper 1 μ A = 10^{-6} A
miliamper 1 mA = 10^{-3} A
kiloamper 1 kA = 10^3 A
- Količina elektriciteta (električni naboj) Q**
Jedinica SI 1 kulon (coulomb) (C = A s)
Druge mjere milikulon 1 mC = 10^{-3} C
kilokulon 1 kC = 10^3 C
amper-sekunda 1 A s = 1 C
amper-sat 1 A h = 3600 C
- Električni napon U**
Jedinica SI 1 volt (V = W/A)
Druge mjere mikrovolt 1 μ V = 10^{-6} V
milivolt 1 mV = 10^{-3} V
kilovolt 1 kV = 10^3 V
megavolt 1 MV = 10^6 V
- Električna jakost polja E**
Jedinica SI 1 volt po metru (V/m = N/C)
Druge mjere milivolt po metru 1 mV/m = 10^{-3} V/m
kilovolt po metru 1 kV/m = 10^3 V/m
volt po milimetru 1 V/mm = 10^3 V/m
- Električni otpor R**
Jedinica SI 1 om (ohm) ($\Omega = V/A$)
Druge mjere miliom 1 m Ω = 10^{-3} Ω
kiloom 1 k Ω = 10^3 Ω
- Specifični (električni) otpor ρ**
Jedinica SI 1 om-metar (Ωm)
Druge mjera om-kvadratni milimetar na metar 1 $\Omega mm^2/m = 10^{-6}$ Ωm
- Električna vodljivost G**
Jedinica SI 1 simens (siemens) (S = 1/ Ω)

8. Kapacitet *C*

Jedinica SI	1 farad ($F = C/V$)		
Druge mjere	pikofarad	1 pF	= 10^{-12} F
	nanofarad	1 nF	= 10^{-9} F
	mikrofarad	1 μ F	= 10^{-6} F
	milifarad	1 mF	= 10^{-3} F

9. Induktivitet *L*

Jedinica SI	1 henri (henry) ($H = Vs/A$)		
Druge mjere	pikohenri	1 pH	= 10^{-12} H
	nanohenri	1 nH	= 10^{-9} H
	mikrohenri	1 μ H	= 10^{-6} H
	milihenri	1 mH	= 10^{-3} H

10. Gustoća magnetskoga toka (magnetska indukcija) *B*

Jedinica SI	1 tesla ($T = N/A \cdot m = Wb/m^2$)		
Druge mjere	nanotesla	1 nT	= 10^{-9} T
	mikrotesla	1 μ T	= 10^{-6} T
	militesla	1 mT	= 10^{-3} T

11. Magnetski tok Φ

Jedinica SI	1 veber (weber) ($Wb = T \cdot m^2$)		
Druge mjere	miliveber	1 mWb	= 10^{-3} Wb

12. Magnetska jakost polja *H*

Jedinica SI	1 amper po metru (A/m)		
Druge mjere	miliamper po metru	1 mA/m	= 10^{-3} A/m
	kiloamper po metru	1 kA/m	= 10^3 A/m
	amper po milimetru	1 A/mm	= 10^3 A/m

Svjetlosne veličine

1. Jakost energetskega zračenja

Jedinica SI	1 vat na steradian (W/sr)		
-------------	---------------------------	--	--

2. Jakost svjetla *I*

Jedinica SI	1 kandela (candela) (cd)		
-------------	--------------------------	--	--

3. Luminancija *B*

Jedinica SI	1 kandela na kvadratni metar (cd/m ²)		
-------------	---	--	--

4. Svjetlosni tok

Jedinica SI	1 lumen (lm = cd · sr)		
-------------	------------------------	--	--

5. Rasvjetljenost *E*

Jedinica SI	1 luks (lux) (lx = lm/m ²)		
-------------	--	--	--

STARE JEDINICE I MJERE (uključivši i anglosaske mjere)

Zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima (1984) ove su jedinice za br - njene za javnu upotrebu u Jugoslaviji. Za uža stručna područja dopuštene su iznimke (koje proizlaze iz međunarodnih ugovora Jugoslavije).

1. Za duljinu

ongstrem, (ångström)	1 Å	= 0,1 nm	= 10^{-10} m
mikron	1 μ	= 1 μ m	= 10^{-6} m
palac, col, inch	1 in. (")	= 25,4 mm	= 0,0254 m
stopa, foot	1 ft. (')	= 12"	= 0,3048 m
jard (yard)	1 yd.	= 3'	= 0,9144 m
fadom, fathom	1 fm.	= 2 yds.	= 1,8288 m

2. Za površinu

barn	1 b	= 100 fm ²	= 10^{-28} m ²
square inch	1 sq. in.	= 6,4516 cm ²	= $645,16 \cdot 10^{-6}$ m ²
square foot	1 sq. ft.	= 9,2903 dm ²	= $92,903 \cdot 10^{-3}$ m ²
square yard	1 sq. yd.		= 0,83613 m ²

3. Za volumen

cubic inch	1 cu. in.	= 16,387 cm ³	= $16,387 \cdot 10^{-6}$ m ³
cubic foot	1 cu. ft.	= 28,32 dm ³	= $28,32 \cdot 10^{-3}$ m ³
cubic yard	1 cu. yd.		= 0,76455 m ³
registarska tona	1 R. T.	= 100 cu. ft.	= 2,832 m ³

4. Za brzinu

foot per minute	1 ft./min.	= 0,00508 m/s
foot per second	1 ft./sec.	= 0,3048 m/s
yard per second	1 yd./sec.	= 0,9144 m/s

5. Za ubrzanje

gal	1 Gal	= 1 cm/s ²	= 0,01 m/s ²
foot per sec. per sec.	1 ft./sec. sec.		= 0,3048 m/s ²
yard per sec. per sec.	1 yd./sec. sec.		= 0,9144 m/s ²

6. Za masu

kvintal, metrička centa	1 q	= 100 kg	
hyl	1 hyl	= 9,80665 kg	
funta, pound (libre)	1 lb.	= 0,45359 kg	
long-tona, long ton	1 L/T	= 2240 lb.	= 1016,05 kg
karat (metrički)	1 k	= 0,2 g	

7. Za gustoću

pound per cubic inch	1 lb./cu. in.	= 27680 kg/m ³
pound per cubic foot	1 lb./cu. ft.	= 16,017 kg/m ³
pound per cubic yard	1 lb./cu. yd.	= 0,59328 kg/m ³

8. Za silu

milipond	1 mp	= 10^{-3} p	= $9,80665 \cdot 10^{-6}$ N
pond	1 p	= 10^{-3} kp	= $9,80665 \cdot 10^{-3}$ N
kilopond	1 kp		= 9,80665 N
megapond	1 Mp	= 10^3 kp	= $9,80665 \cdot 10^3$ N
din	1 dyn	= 10μ N	= 10^{-5} N
sthène	1 st		= 10^3 N
poundal	1 pd.		= 0,138254 N

9. Za tlak i naprezanje

fizikalna atmosfera	1 atm	= 760 mm Hg	= 101325 Pa
tehnička atmosfera	1 at	= 1 kp/cm ²	= 98066,5 Pa
stupac žive (0°C)	1 mm Hg		= 133,323 Pa
stupac vode (4°C)	1 mm H ₂ O	= 1 kp/m ²	= 9,80665 Pa
kilopond			
— po kvadratnom metru	1 kp/m ²	= 1 mm H ₂ O	= 9,80665 Pa
— po kvadratnom centimetru	1 kp/cm ²	= 1 at	= 98066,5 Pa
— po kvadratnom milimetru	1 kp/mm ²		= 9806650 Pa
barye	1 barye	= 0,1 N/m ²	= 10^{-1} Pa
pièze	1 pz	= 1 kN/m ²	= 10^3 Pa
hectopièze	1 hpz	= 1 bar	= 10^5 Pa
inch of mercury	1 in. Hg		= 3386 Pa
inch of water	1 in. H ₂ O		= 249,1 Pa
pound per square inch	1 p. s. i.		= 6895 Pa
pound per square foot	1 p. s. f.		= 47,88 Pa
pound per square yard	1 p. s. y.		= 5,320 Pa
long ton per square inch	1 L/T s. i.		= 15444151 Pa
long ton per square foot	1 L/T s. f.		= 107251 Pa

10. Za dinamičku viskoznost

centipoaz	1 cP		= 10^{-3} Pa s
poaz (poise)	1 P		= 10^{-1} Pa s
dekapoaz	1 daP		= 1 Pa s

11. Za kinematičku viskoznost

centistoks	1 cSt	= 1 mm ² /s	= 10^{-6} m ² /s
stoks (stokes)	1 St		= 10^{-4} m ² /s

stupnjevi po Engleru °E:

°E	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
mm ² /s	1,00	1,82	2,82	3,92	5,08	6,25	7,41	9,66	11,8
°E	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
mm ² /s	16,7	21,1	29,5	37,4	45,2	52,9	60,8	68,4	76,0

Iznad 10°E = 76 mm²/s treba za svaki 1°E dodati 7,6 mm²/s.

12. Za energiju, rad, toplinu

kilopond-metar	1 kp m		= 9,80665 J
konjska snaga-sat	1 KM h (KS h)		= $2,648 \cdot 10^6$ J
kalorija	1 cal		= 4,1868 J
kilokalorija	1 kcal		= 4186,8 J
litar-atmosfera	1 l at		= 98,0665 J
erg	1 erg		= 10^{-7} J
foot-pound	1 ft.-lb.		= 1,3558 J
horse power-hour	1 HP h		= $2,685 \cdot 10^6$ J
british thermal unit	1 BTU		= $1,055 \cdot 10^3$ J

13. Za snagu, toplinski tok

kilopond-metar u sekundi	1 kp m/s		= 9,80665 W
konjska snaga	1 KM (KS)		= 735,499 W
kalorija u sekundi	1 cal/s		= 4,1868 W
kilokalorija na sat	1 kcal/h		= 1,163 W
erg u sekundi	1 erg/s		= 10^{-7} W
foot-pound per second	1 ft.-lb./sec.		= 1,3558 W
horse power	1 HP		= 745,7 W
british thermal unit per hour	1 BTU/h		= 0,293 W

14. Za temperaturu

stupanj Fahrenheita (°F) je definiran temperaturama: ledište vode 32 °F, vrelište vode 212 °F. Preračunavanje na temperaturnoj skali

$$x \text{ °F} = \frac{5}{9} (x - 32) \text{ °C} = \frac{5}{9} (x - 32) + 273 \text{ K}$$

15. Za električne veličine

za gustoću magnetskoga toka	1 gauss		= 10^{-4} T
za magnetski tok	1 maxwell		= 10^{-8} Wb
za magnetsku jakost polja	1 oersted		= $10^3/4\pi$ A/m

16. Za svjetlosne veličine

za jakost svjetla	1 hefnerova svijeća		= 0,917 cd
	1 međunarodna svijeća		= 1,02 cd
za luminanciju	stilb	= 1 sb	= 10^4 cd/m ²
	nit	= 1 nt	= 1 cd/m ²
za rasvijetljenost	phot	= 1 ph	= 10^4 lx

17. Za veličine zračenja

za aktivnost radioaktivnoga izvora	curie	= 1 Ci	= $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
za apsorbiranu dozu ionizirajućeg zračenja	rad	= 1 rd	= 0,01 Gy
za ekvivalentnu dozu ionizirajućeg zračenja	rem	= 1 rem	= 0,01 Sv
za ekspozicijsku dozu ioniziranoga zračenja	röntgen	= 1 R	= $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg

POSEBNE MJERE

1. »Standardni (normni) kubni metar« je masa plina koja pri standardnom stanju (pri temperaturi 0 °C i tlaku 1,013 25 bar) zaprema volumen od 1 m³. To je masa plina (kg) koja je brojčano jednaka njegovoj gustoći (kg/m³) pa ima stoga za svaki plin drugu vrijednost, npr.:

1,2505 kg dušika 1,4290 kg kisika 1,9768 kg ugljičnog dioksida

Volumen »standardnoga kubnog metra« je za različite temperature veoma različit pa iznosi za idealni plin

pri temperaturi °C	-100	0	100	1000
volumen m ³	0,634	1	1,366	4,663

(Pritom nije uzeto u obzir odstupanje realnih plinova od ponašanja idealnih, niti njihova disocijacija pri visokim temperaturama.)

»Standardni kubni metar« je nepregledna, zastarjela mjera (u jugoslavenskom zakonu o mjernim jedinicama i mjerilima uopće nije spomenuta).

2. »Baumé-ova areometarska skala« služi za određivanje gustoće kapljevine pomoću stupnjeva Baumé-a (°Bé).

a) Za kapljevine gustoće $\rho \geq 1 \text{ kg/dm}^3$ određena je Bauméova skala vrijednostima N

$$N = 0 \text{ } ^\circ\text{Bé} \quad \text{pri} \quad \rho = 1,0 \text{ kg/dm}^3$$

$$N = 66 \text{ } ^\circ\text{Bé} \quad \text{pri} \quad \rho = 1,8427 \text{ kg/dm}^3$$

Za preračunavanje vrijedi

$$\rho = 144,32 / (144,32 - N) \quad (\text{kg/dm}^3)$$

b) Za kapljevine gustoće $\rho \leq 1 \text{ kg/dm}^3$ određena je Bauméova skala vrijednostima N

$$N = 10 \text{ } ^\circ\text{Bé} \quad \text{pri} \quad \rho = 1,0 \text{ kg/dm}^3$$

$$N = 90 \text{ } ^\circ\text{Bé} \quad \text{pri} \quad \rho = 0,6434 \text{ kg/dm}^3$$

Za preračunavanje vrijedi

$$\rho = 144,32 / (134,32 + N) \quad (\text{kg/dm}^3)$$

3. »Beaufortova skala« označuje brzinu vjetra (u meteorologiji) pomoću posebne mjere »bofor« – u ovisnosti o brzini vjetra v :

bofor	v km/h	bofor	v km/h
1	1 ... 5	7	50 ... 61
2	6 ... 11 lahor	8	62 ... 74 olujni vjetar
3	12 ... 19	9	75 ... 88
4	20 ... 28 vjetrić	10	89 ... 102 vihor
5	29 ... 38	11	103 ... 117
6	39 ... 49 jači vjetar	12	> 117 orkan

TVARI

SASTAV TVARI

Tvar (materija) se sastoji od kemijskih *elemenata* ili njihovih *spojeva*. Sve spojeve možemo rastaviti na elemente koje dalje ne možemo rastavljati nikakvim kemijskim sredstvima.

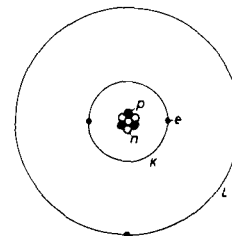
Dio elementa koji dalje ne možemo više dijeliti nazivamo *atom*. (Promjer atoma iznosi po redu veličine približno 0,1 nm = 10⁻¹⁰ m.)

Nuklearna je fizika po svojim otkrićima razvila (Bohrov) model o zgradi atoma, prema kojem se sastoji atom svakoga elementa od jezgre, gdje su sabrani *nukleoni*, tj. pozitivno nabijeni *protoni* i električki neutralni *neutroni*, a jezgru okružuju negativno nabijeni *elektroni*.

U jezgri atoma (promjera reda veličine $\approx 10^{-14}$ m) skupljena je gotovo sva masa atoma.

Mase i naboji nukleona i elektrona iznose:

	masa	naboj
proton	$1,672 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	$+0,160 \cdot 10^{-18} \text{ As}$
neutron	$1,675 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	0
elektron	$0,9108 \cdot 10^{-27} \text{ g}$	$-0,160 \cdot 10^{-18} \text{ As}$



$p = \text{protoni}$, $n = \text{neutroni}$,
 $e = \text{elektroni}$

Naboj jezgre određen je brojem protona koji je jednak »rednom broju Z « elementa. Tim su nabojem određena kemijska i fizikalna svojstva elementa.

Ukupan broj nukleona, tj. protona i neutrona, daje »maseni broj A « (relativnu atomsku masu) elementa.

Npr. uranov atom ($Z = 92$) relativne atomske mase $A = 238$ sastoji se iz 92 protona i 146 neutrona.

Pri električki neutralnim atomima je broj elektrona jednak broju protona (= rednom broju Z).

Elektroni kruže oko atomske jezgre po određenim stazama (kružnim odnosno eliptičnim) koje teku po energetski razmještenim *ljuskama* K, L, M, N, O, P i Q (kojih se polumjeri odnose kao kvadrati cijelih brojeva, tj. 1²: 2²: 3²: ...). Broj elektrona u svakoj ljusci je ograničen ($2n^2$):

ljuska	K	L	M	N	O	P	Q
najveći broj elektrona	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)

Elektronima su sasvim popunjene samo ljuske K, L, M i N.

Kemijski elementi
 Simbol, redni (atomski) broj Z (= broj protona u atomu), relativna atomska masa A (s obzirom na ugljikov izotop ^{12}C) i raspored elektrona po ljuskama (K do Q)

Element	Simbol	Z	A	K	L	M	N	O	Element	Simbol	Z	A	K	L	M	N	O	P	Q
vodik	H	1	1,008	1					srebro	Ag	47	107,9	2	8	18	18	1		
helij	He	2	4,003	2					kadmij	Cd	48	112,4	2	8	18	18	2		
litij	Li	3	6,939	2	1				indij	In	49	114,8	2	8	18	18	3		
berilij	Be	4	9,012	2	2				kositar	Sn	50	118,7	2	8	18	18	4		
bor	B	5	10,81	2	3				antimon	Sb	51	121,8	2	8	18	18	5		
ugljik	C	6	12,01	2	4				telur	Te	52	127,6	2	8	18	18	6		
dušik	N	7	14,01	2	5				jod	J	53	126,9	2	8	18	18	7		
kisik	O	8	16,00	2	6				ksenon	Xe	54	131,3	2	8	18	18	8		
fluor	F	9	19,00	2	7				cesij	Cs	55	132,9	2	8	18	18	8	1	
neon	Ne	10	20,18	2	8				barij	Ba	56	137,3	2	8	18	18	8	2	
natrij	Na	11	22,99	2	8	1			lantan	La	57	138,9	2	8	18	18	9	2	
magnezij	Mg	12	24,31	2	8	2			cer	Ce	58	140,1	2	8	18	20	8	2	
aluminij	Al	13	26,98	2	8	3			praseodim	Pr	59	140,9	2	8	18	21	8	2	
silicij	Si	14	28,09	2	8	4			neodim	Nd	60	144,2	2	8	18	22	8	2	
fosfor	P	15	30,97	2	8	5			prometij	Pm	61	(145)	2	8	18	23	8	2	
sumpor	S	16	32,06	2	8	6			samarij	Sm	62	150,4	2	8	18	24	8	2	
klor	Cl	17	35,45	2	8	7			europij	Eu	63	152,0	2	8	18	25	8	2	
argon	Ar	18	39,95	2	8	8			gadolinij	Gd	64	157,3	2	8	18	25	9	2	
kalij	K	19	39,10	2	8	8	1		terbij	Tb	65	158,9	2	8	18	27	8	2	
kalcij	Ca	20	40,08	2	8	8	2		disprozij	Dy	66	162,5	2	8	18	28	8	2	
skandij	Sc	21	44,96	2	8	9	2		holmij	Ho	67	164,9	2	8	18	29	8	2	
titan	Ti	22	47,90	2	8	10	2		erbij	Er	68	167,3	2	8	18	30	8	2	
vanadij	V	23	50,94	2	8	11	2		tulij	Tm	69	168,9	2	8	18	31	8	2	
krom	Cr	24	52,00	2	8	13	1		iterbij	Yb	70	173,0	2	8	18	32	8	2	
mangan	Mn	25	54,94	2	8	13	2		lutecij	Lu	71	175,0	2	8	18	32	9	2	
željezo	Fe	26	55,85	2	8	14	2		hafnij	Hf	72	178,5	2	8	18	32	10	2	
kobalt	Co	27	58,93	2	8	15	2		tantal	Ta	73	180,9	2	8	18	32	11	2	
nikal	Ni	28	58,71	2	8	16	2		volfram	W	74	183,9	2	8	18	32	12	2	
bakar	Cu	29	63,54	2	8	18	1		renij	Re	75	186,2	2	8	18	32	13	2	
cink	Zn	30	65,37	2	8	18	2		osmij	Os	76	190,2	2	8	18	32	14	2	
galij	Ga	31	69,72	2	8	18	3		iridij	Ir	77	192,2	2	8	18	32	15	2	
germanij	Ge	32	72,59	2	8	18	4		platina	Pt	78	195,1	2	8	18	32	16	2	
arsen	As	33	74,92	2	8	18	5		zlato	Au	79	197,0	2	8	18	32	18	1	
selen	Se	34	78,96	2	8	18	6		živa	Hg	80	200,6	2	8	18	32	18	2	
brom	Br	35	79,91	2	8	18	7		talij	Tl	81	204,4	2	8	18	32	18	3	
kripton	Kr	36	83,80	2	8	18	8		olovo	Pb	82	207,2	2	8	18	32	18	4	
rubidij	Rb	37	85,47	2	8	18	8	1	bizmut	Bi	83	209,0	2	8	18	32	18	5	
stroncij	Sr	38	87,62	2	8	18	8	2	polonij	Po	84	(210)	2	8	18	32	18	6	
itrij	Y	39	88,91	2	8	18	9	2	astat	At	85	(210)	2	8	18	32	18	7	
cirkonij	Zr	40	91,22	2	8	18	10	2	radon	Rn	86	(222)	2	8	18	32	18	8	
niobij	Nb	41	92,91	2	8	18	12	1	francij	Fr	87	(223)	2	8	18	32	18	8	1
molibden	Mo	42	95,94	2	8	18	13	1	radij	Ra	88	(226)	2	8	18	32	18	8	2
tehnecij	Tc	43	(99)	2	8	18	14	1	aktinij	Ac	89	(227)	2	8	18	32	18	9	2
rutenij	Ru	44	101,1	2	8	18	15	1	torij	Th	90	232,0	2	8	18	32	18	10	2
rodij	Rh	45	102,9	2	8	18	16	1	protaktinij	Pa	91	(231)	2	8	18	32	20	9	2
paladij	Pd	46	106,4	2	8	18	18		uran	U	92	238,0	2	8	18	32	21	9	2

Transurani su umjetno dobiveni (radioaktivni) elementi, kojih u prirodi nema:

Element	Simbol	Z	A* ≈
neptunij	Np	93	(237)
plutonij	Pu	94	(242)
americij	Am	95	(243)
kirij (curij)	Cm	96	(247)
berkelij	Bk	97	(247)
kalfornij	Cf	98	(249)
ajštajnij	Es	99	(254)
fermij	Fm	100	(253)
mendelevij	Md	101	(256)
nobelij	No	102	(253)
lavrencij	Lw	103	(257)
kurčatovij	Ku	104	(261)
hanij (borij)	Ha (Bo)	105	(262)

* Podaci se iz raznih izvora znatno razlikuju, a vrijede za najstabilniji izotop.

Pri jednakom rednom broju Z (tj. pri jednakom broju protona) moguće su različite atomske mase A (zbog različitog broja neutrona). Elemente s jednakim rednim brojem (s jednakim nabojem jezgre), ali s različitim relativnim atomskim masama (masenim brojevima), nazivamo *izotopima*. Izotopi se vladaju kemijski potpuno jednako; razlikuju se samo po fizikalnim svojstvima.

Pri vodik u npr. poznamo tri izotopa: vodik H = ^1H (s protonom i bez neutrona), deuterij D = ^2H (s protonom i jednim neutronom) i tritij T = ^3H (s protonom i dvama neutronima).

Prirodni se elementi sastoje većinom od stalne mješavine svojih izotopa, (Samo 22 prirodna elementa sastoje se od samo jednoga izotopa, npr. F, Na, Al, P, Co itd.). Na primjer: prirodni uran sadrži 99,280% izotopa ^{238}U , 0,714% izotopa ^{235}U i 0,006% izotopa ^{234}U .

Pri jednakom pozitivnom naboju jezgre (tj. pri jednakom broju protona) broj elektrona može biti veći ili manji. Takav atom, koji nije više električki neutralan, nazivamo *ion*.

Pozitivni ioni (*kationi*) nastaju od atoma, koji mogu odavati elektrone, tj. od takvih, koji imaju na vanjskoj ljusci samo jedan ili dva elektrona (pri elementima s većim brojem protona i više). To su tipične *k o v i n e* (dobro vode električnu struju). Većina kemijskih elemenata su kovine.

Negativni ioni (*anioni*) nastaju od atoma, koji mogu primiti elektrone, tj. od takvih, koji imaju na vanjskoj ljusci sedam ili šest elektrona (pri elementima s malim brojem protona i manje). To su tipične *n e k o v i n e* (ne vode električnu struju).

Među elementima, koji formiraju samo katione ili anione, postoje elementi, koji pod određenim okolnostima formiraju jedne ili druge atome. Elementi sa četiri elektrona u vanjskoj ljusci samo ponekad formiraju ione.

Periodični sistem elemenata (po Mendeljejevu)

Brojevi povrh simbola su redni brojevi Z.

Oznaka + : elementi (kovine), koji tvore samo pozitivne ione (katione).

Oznaka - : elementi (nekovine), koji tvore samo negativne ione (anione).

Period	Glavna skupina							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H							2 He
2	3 + Li	4 Be	5 - B	6 - C	7 - N	8 - O	9 - F	10 Ne
3	11 + Na	12 + Mg	13 Al	14 - Si	15 - P	16 - S	17 - Cl	18 Ar
4	19 + K	20 + Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 - Se	35 - Br	36 Kr
5	37 + Rb	38 + Sr	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 - J	54 Xe
6	55 + Cs	56 + Ba	81 Tl	82 Pb	83 + Bi	84 Po	85 - At	86 Rn
7	87 + Fr	88 + Ra						

Lijevo i pod debelom crtom — kovine; desno i iznad debele crte — nekovine.

Period	Sporedna skupina									
	1	2	3	4	5	6	7	8		
4	29 + Cu	30 Zn	21 + Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 + Ni
5	47 + Ag	48 + Cd	39 + Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 + Rh	46 + Pd
6	79 + Au	80 + Hg	57 + La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 + Ir	78 + Pt
7			89 + Ac	104 Ku	105 Ha					

Z = 58...71: lantanidi+, Z = 90...103: aktinidi+.

U sporednoj skupini su svi elementi samo kovine.

Svojstva elemenata

Element skupina	simbol	Promjer atoma nm	Valencija*	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća (20 °C) kg/m ³
<i>Alkalne kovine</i>						
I	H	0,169	1	-259,4	-252,7	0,084
	Li	0,313	1	186	1 370	530
	Na	0,383	1	97,7	892	970
	K	0,476	1	63	770	860
	Rb	0,502	1	39	680	1 530
	Cs	0,540	1	28	690	1 900
<i>Zemno-alkalne kovine</i>						
II	Be	0,225	2	1 280	2 770	1 820
	Mg	0,320	2	650	1 110	1 740
	Ca	0,393	2	850	1 440	1 550
	Sr	0,429	2	770	1 380	2 600
	Ba	0,448	2	704	1 640	3 500
<i>Borova skupina</i>						
III	B	0,282	3	2 300	2 550	2 300
	Al	0,270	3	660,1	2 060	2 699
	Ga	0,314	3	29,8	2 071	5 910
	In	0,342	3	156,4	1 450	7 310
	Tl		1, 3	300	1 460	11 850
<i>Ugljikova skupina</i>						
IV	C	0,154	4, 2	3 700	4 830	2 220
	Si	0,234	4	1 430	2 300	2 330
	Ge	0,279	4	958	2 700	5 360
	Sn	0,316	4, 2	231,9	2 270	7 298
	Pb	0,349	2, 4	327,3	1 740	11 340
<i>Dušikova skupina</i>						
V	N	0,106	3, 5, 2	-210,0	-195,8	1,165
	P	0,216	5, 3	44,1	280	1 820
	As	0,250	3, 5	610	5 730	5 730
	Sb	0,323	3, 5	630,5	1 440	6 620
	Bi	0,364	3, 5	271,3	1 420	9 800
<i>Halogeni</i>						
VI	O	0,212	2	-218,8	-183,0	1,332
	S	0,232	6, 4, 2	119,0	444,6	2 070
	Se	0,290	4, 6, 2	220	680	4 810
	Te		2, 4, 6	450	1 390	6 240

* Valencija je broj vodikovih atoma koje atom elementa može vezati u molekulu ili ih u njoj može nadomjestiti.

Element skupina	simbol	Promjer atoma nm	Valencija	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća (20 °C) kg/m ³
<i>Halogeni</i>						
VII	F	0,136	1	-223	-188,2	1,578
	Cl	0,194	1, 7, 5	-101	-34,7	3,000
	Br	0,226	1, 5	-7,2	58	3 120
	J	0,270	1, 5, 7	114	183	4 930
<i>Plemeniti plinovi</i>						
VIII	He	0,320	0	-271,4	-268,9	0,166
	Ne	0,382	0	-248,6	-246,0	0,839
	Ar	0,400	0	-189,4	-185,8	1,663
	Kr	0,440	0	-157	-152	3,488
	Xe		0	-112	-108	5,495
<i>Kovine sporednih skupina</i>						
4. period	Ti	0,293	4, 3	1 820	5 100	4 540
	V	0,271	5, 4, 2	1 735	3 400	6 000
	Cr	0,257	3, 6, 2	1 930	2 500	7 190
	Mn	0,250	2, 3, 4	1 245	2 150	7 430
	Fe	0,252	3, 2	1 539	2 740	7 870
	Co	0,250	2, 3	1 492	2 900	8 900
	Ni	0,249	2, 3	1 453	2 730	8 900
	Cu	0,255	2, 1	1 083	2 600	8 960
	Zn	0,275	2	419,5	906	7 133
5. period	Zr	0,319	4	1 750	5 050	6 500
	Nb	0,294	5, 3	2 415	3 300	8 570
	Mo	0,280	6, 3, 5	2 625	4 800	10 200
	Tc		7			11 460
	Ru	0,267	3, 4, 6	2 500	4 900	12 200
	Rh	0,270	3, 4	1 960	4 500	12 440
	Pd	0,275	2, 4	1 552	4 000	12 000
	Ag	0,288	1	960,8	2 210	10 490
	Cd	0,304	2	320,9	765	8 650
6. period	Hf	0,317	4		3 700	11 400
	Ta	0,294	5	2 996	6 100	16 600
	W	0,282	6, 4	3 380	5 930	19 300
	Re	0,275	7, 4, 1	3 170	5 900	20 000
	Os	0,270	4, 6	2 700	5 500	22 500
	Ir	0,271	4, 3, 6	2 443	5 300	22 500
	Pt	0,277	4, 2	1 769	4 410	21 450
	Au	0,288	1, 3	1 063	2 970	19 320
	Hg	0,310	2, 1	-38,9	356,6	13 550

KEMIJSKI SPOJEVI

Kemijske veze

1. Atomske veze (homeopolarne, kovalentne)

Atomske veze su veze među nekovinskim atomima. Zajednički elektroni više atoma tvore molekule, i to od priprostih dvoatomnih do vrlo velikih molekula s više stotina ili više tisuća atoma.

Spojevi s atomskim vezama (molekularnu zgradu) obuhvaćaju razmjerno manji broj anorganskih spojeva; posebno su značajni organski spojevi.

Anorganski spojevi s atomskim vezama su:

— pretežno plinovite tvari (s niskim talištima i vrelištima), npr. nekovinski elementi (H_2 , O_2 , N_2), nekovinski oksidi i hidridi (CO_2 , SO_2 , NH_3 , H_2S) i spojevi nekovina (SCl_2 , PCl_3);

— tvari dijamantnog tipa (s visokim talištima i vrelištima) s vrlo jakim atomskim vezama (tvrdoća!), npr. dijamant (C) i nekovinski karbidi (SiC , B_4C). Tima su slični također nekovinski nitridi (BN , Si_3N_4).

Organski spojevi sežu od malih molekula, npr. priprostih ugljikovodika (CH_4 , C_2H_6), do veoma velikih molekula, npr. polivinilklorida ($(C_2H_3Cl)_n$). S porastom broja atoma u molekuli prelaze te tvari iz plinovitih u tekuće i potom u krute. Ne vode električne struje.

2. Ionske veze (heteropolarne, elektrovalentne)

Ionske veze nastaju među kovinskim i nekovinskim atomima na taj način, da kovinski atomi odaju vanjske (valentne) elektrone (jednoga ili više) te postaju pozitivnim ionima — kationima, nekovinski atomi pak primaju vanjske elektrone i postaju negativnim ionima — anionima. U plinovitom ili tekućem stanju (ili u otopini) su pozitivni i negativni ioni slobodno gibljivi, dok u krutom stanju formiraju skupnu kristalnu rešetku.

Ionske su veze karakteristične za kovinske okside (npr. Na_2O) i hidrokside (npr. $NaOH$) a naročito za soli, koje su spojevi pozitivnih (kovinskih) i negativnih (nekovinskih) iona ($NaCl = Na^+ + Cl^-$).

Soli imaju visoka tališta i vrelišta te su pravi elektroliti; u taljevini ili otopini vode električnu struju, pri čemu su ioni nosioci naboja.

3. Kovinske veze

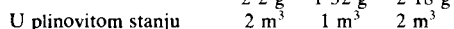
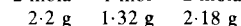
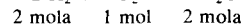
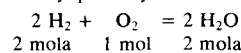
Kovinske veze su veze među kovinskim atomima.

U kristalnim rešetkama, koje tvore sve kovine, su atomi — odavanjem valentnih elektrona — pozitivno nabijeni, valentni elektroni pa se kreću među njima u rešetki razmjerno slobodno.

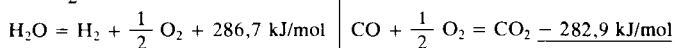
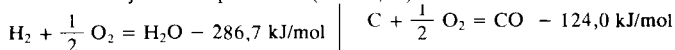
Kovinske su veze karakteristične za sve kovine i njihove slitine, a odlikuju se naročito dobrom električnom i toplinskom vodljivošću te tvrdoćom i gnetljivošću (mogućnost preoblikovanja, kovkost).

Kemijske reakcije

Jednadžbe kemijskih reakcija prikazuju količinske odnose sudjelujućih tvari



Pri eksotermičkim reakcijama se toplina oslobađa (odvodi, -), pri endotermičkim reakcijama se toplina troši (dovodi, +):



Pri kemijskoj reakciji odvedena ili dovedena toplina nije ovisna o toku reakcije — po međustupnjevima ili neposredno (Hessov zakon).

Reakcije redukcija — oksidacija (»red-oks«) nastaju iz djelomičnih reakcija redukcije (oduzimanje kisika spoju) i oksidacije (spajanje s kisikom).

Hidridi

Hidridi su binarni spojevi vodika s nekovinama ili nekim kovinama. Hidridi su plinoviti, tekući ili kruti (nekovinski su hidridi plinoviti ili tekući).

Svojstva vodika i nekovinskih hidrida

Tvar	Relativna molekularna masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m^3 (0 °C)	Opaska
Vodik					
H_2	2,016	-259,4	-252,7	0,090	
Hidridi					
H_2O ¹⁾	18,02	0,00	100,0	1000,0 (4 °C)	voda (H oksid)
H_2O_2 ¹⁾	34,01	-89	152,1	1465	H peroksid
NH_3 ²⁾	17,03	-77,7	-33,35	0,771	amonijak
HF	20,01	-92,3	19,4	987	fluorovodik
HCl	36,46	-112	-83,7	1,64	klorovodik
HBr	80,92	-88,5	-67,0	3,50	bromovodik
HJ	127,91	-50,8	-35,4 (4 bar)	5,66	jodovodik
H_2S	34,08	-82,9	-61,8	1,54	sumporovodik
H_3P	34,00	-133,5	-87,4	1,53	fosforovodik
HCN ³⁾	27,03	-14	26	688	cijanovodik

¹⁾ Voda i vodikov peroksid su istodobno hidrid i oksid.

²⁾ Pozitivno nabijena jednovalentna skupina NH_4^+ = »amonij«.

³⁾ Negativno nabijena jednovalentna skupina CN^- = »cijan«.

Oksidi

Oksidi su binarni spojevi kisika s elementima te su plinoviti, tekući ili kruti. Elementi s više valencija mogu imati i više različitih oksida.

Svojstva kisika i oksida (pri $p_a = 1,01325$ bar)

Tvar	Relat. molekul. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska
Kisik					
O ₂	32,00	-218,8	-183,0	1,429	
Nekovinski oksidi					
CO	28,01	-207	-191,5	1,250	C monoksid
CO ₂	44,01	-78,5 s	—	1,977	C dioksid
N ₂ O	44,01	-102,3	-91,7	1,978	N(I) oksid
NO	30,01	-161	-151	1,340	N(II) oksid, N monoksid
NO ₂	46,01	-9,3	21,3	1,447	N dioksid
N ₂ O ₃	76,01	-103	3,5	1,447	N(III) oksid, N trioksid
N ₂ O ₅	108,01	30 s	—	2,050	N pentoksid
SO ₂	64,06	-75,5	-10,0	2,926	S dioksid
SO ₃	80,06	16,8	44,5	1,923	S trioksid
P ₂ O ₃	109,95	23,8	173,1	1,943	P trioksid
P ₂ O ₅	141,94	250 s	—	2,387	P pentoksid
SiO ₂	60,08	1710	2630	2,320	Si dioksid, kremen
Kovinski oksidi					
Na ₂ O	61,98	1275 s	—	2,270	
K ₂ O	94,20	350	—	2,320	
MgO	40,31	2500	—	3,550	magnezija
CaO	56,08	2572 s	—	3,400	pečeno (živo) vapno
BaO	153,34	1923	2000	5,720	
Al ₂ O ₃	101,96	2050	2250	4,000	glinica, korund
CrO	68,00	—	—	—	Cr(II) oksid
Cr ₂ O ₃	151,99	2200	—	5,210	Cr(III) oksid
CrO ₃	99,99	196	—	2,800	Cr(IV) oksid
Cu ₂ O	143,08	1235	—	6,000	Cu(I) oksid
CuO	79,54	—	—	6,400	Cu(II) oksid
FeO	71,85	1420	—	5,990	Fe(II) oksid
Fe ₂ O ₃	159,69	1595	—	5,240	Fe(III) oksid
Fe ₃ O ₄	231,54	1538	—	5,180	Fe(II), Fe(III) oksid
MnO	70,94	1650	—	5,090	Mn(II) oksid
Mn ₂ O ₃	157,87	1080	—	4,500	Mn(III) oksid
Mn ₃ O ₄	228,81	1705	—	4,856	Mn(II), Mn(III) oksid
MnO ₂	86,94	535	—	5,026	Mn(IV) oksid
PbO	223,19	—	—	9,500	Pb(II) oksid
PbO ₂	239,19	—	—	9,365	Pb(IV) oksid
TiO	63,90	1750	—	5,500	
WO ₂	215,90	—	—	12,110	W(IV) oksid
WO ₃	231,90	1373	—	7,160	W(VI) oksid
ZnO	81,37	1700 s	—	5,606	cinkovo bjelilo

Karbidi

Karbidi su binarni spojevi ugljika s kovinama, te s nekovinama B i Si. Karbidi su tvrde (i vrlo tvrde) tvari visokog tališta.

Svojstva ugljika i karbida

Tvar	Relativna molekul. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska
Ugljik					
grafit	12,01	3700	4830	2,220	gustoća amorfno C: 1970 kg/m ³
dijamant	12,01	> 3500	—	3,510	
Karbidi					
B ₄ C	55,25	2350	3500	2,515	brusni materijal
SiC	40,10	2700 s	—	3,170		karborund
CaC ₂	64,10	2300	—	2,220	s vodom: C ₂ H ₂
Cr ₃ C ₂	180,01	1890	—	6,680	cementit u čelicima
Cr ₇ C ₃	284,00	1665	—	6,950	
Fe ₃ C	179,55	1837	—	7,680	
Mn ₃ C	176,83	—	—	6,890	
MoC	107,95	2570	—	8,400	
NbC	104,92	3500	—	8,200	
TaC	192,96	3877	5500	13,960	
TiC	59,91	3140	4300	4,250	
VC	62,95	2830	3900	5,380	
WC	195,86	2777	—	15,700	
W ₂ C	379,71	2857	—	16,600	karbidni tvrdi metali

Nitridi

Nitridi su binarni spojevi dušika s kovinama, među nekovinama pak naročito s B.

Svojstva dušika i nitrida

Tvar	Relativna molekul. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska
Dušik					
N ₂	28,01	-209,86	-195,8	1,251	
Nitridi					
BN	24,82	2730 s	—	2,255	u čelicima za nitriranje
AlN	40,99	2200 (4 bar)	—	3,050	
CrN	66,00	1500	—	—	
Fe ₂ N	125,70	200	—	6,350	
Fe ₄ N	237,39	—	—	6,570	
NbN	106,91	2050	—	8,260	
TaN	194,95	3360	—	14,100	
TiN	61,91	3220	—	5,190	
VN	64,95	2320	—	5,630	

Sulfidi

Sulfidi su binarni spojevi sumpora s kovinama, a među nekovinama naročito sa C (i H – vidi: hidridi, str. 83).

Svojstva sumpora i sulfida

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C	Vrelište °C (s = subl.)	Gustoća kg/m ³	Opaska
<i>Sumpor</i>					
amorfian	32,06	120	444,6	2046	monoklin ortoromban
kristaličan	256,48	{ 119,0 112,8	{ 444,6 –	{ 1960 2070	
<i>Sulfidi</i>					
CS ₂	76,13	–111,6	46,3	1261	ortoromban kubičan
Al ₂ S ₃	150,12	1110	1550 s	2020	
CrS	84,07	1350	–	4100	pirit
Cu ₂ S	159,20	{ 1100 1130	–	{ 5600 5780	
CuS	95,63	–	220	4600	
FeS	87,90	1193	–	5010	
FeS ₂	119,96	1171	–	5000	
MnS	86,99	–	1375 s	4000	
MoS ₂	160,07	1185	–	4800	
PbS	239,27	1114	–	7500	
SnS	150,76	882	1240	5080	
WS ₂	248,04	–	–	7500	
ZnS	97,44	1850 (150 bar)	1200 s	4087	

Fosfidi

Fosfidi su birani spojevi fosfora s kovinama.

Svojstva fosfora i fosfida

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³	Opaska
<i>Fosfor</i>					
crni	123,92	–	–	2690	plamište 400 °C plamište 725 °C
crveni	123,92	610 (43 bar)	–	2200	
bijeli	123,92	44,1	280	1820	
<i>Fosfidi</i>					
CrP	83,03	–	–	5700	
Cu ₃ P	221,73	–	–	6700	
Cu ₃ P ₂	252,75	–	–	6350	
SnP ₃	211,76	415	–	4100	
Fe ₂ P	142,70	1290	–	6560	
Fe ₃ P	198,54	1100	–	6740	
MnP	85,95	1190	–	5390	

Kiseline i baze

Kiseline su tvari, kojih molekule ili ioni lako odavaju protone (vodikove jezgre H⁺).

Kiseline su vodene otopine spojeva vodika s halogenima ili drugim nekovinama (»kiseline bez kisika«), ili pak nastaju pri reakciji nekovinskih oksida s vodom (»kiseline s kisikom«), npr.:

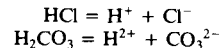
– *kiseline bez kisika*

fluorovodična	= vodena otopina HF
klorovodična (solna)	= vodena otopina HCl
bromovodična	= vodena otopina HBr
jodovodična	= vodena otopina HI
sumporovodična	= vodena otopina H ₂ S
fosforovodična	= vodena otopina H ₃ P
cijanovodična	= vodena otopina HCN

– *kiseline s kisikom*

uglična	H ₂ CO ₃	(CO ₂ + H ₂ O → H ₂ CO ₃)
sumporasta	H ₂ SO ₃	(SO ₂ + H ₂ O → H ₂ SO ₃)
sumporna	H ₂ SO ₄	(SO ₃ + H ₂ O → H ₂ SO ₄)
dušična	HNO ₃	(N ₂ O ₅ + H ₂ O → 2 HNO ₃)
fosforna	H ₃ PO ₄	(P ₂ O ₅ + 3 H ₂ O → 2 H ₃ PO ₄)

Karakteristični sastojak svih kiselina je vodik, koji je u vodenoj otopini pozitivno nabijen ion H⁺, dok je drugi dio kiseline negativno nabijena nekovina ili atomska skupina:



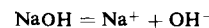
Baze (lužine) su spojevi, kojih molekule ili ioni lako primaju protone.

Baze su hidroksidi, koji nastaju pri reakciji određenih kovina, kovinskih oksida ili amonijaka s vodom, npr.

natrijev hidroksid	NaOH	2 Na + 2 H ₂ O → 2 NaOH + H ₂ ↑
		Na ₂ O + H ₂ O → 2 NaOH
kalijev hidroksid	KOH	2 K + 2 H ₂ O → 2 KOH + H ₂ ↑
		K ₂ O + H ₂ O → 2 KOH
kalcijev hidroksid	Ca(OH) ₂	Ca + 2 H ₂ O → Ca(OH) ₂ + H ₂ ↑
(gašeno vapno)		CaO + H ₂ O → Ca(OH) ₂
amonijev hidroksid	NH ₄ OH	NH ₃ + H ₂ O → NH ₄ OH

Karakteristična sastavina baza je negativno nabijena jednovalentna skupina OH⁻ — »hidroksik«.

Vodne otopine baza sadrže pozitivne kovinske ione i negativne hidroksilne skupine (te su dobri vodiči električne struje), što vrijedi i za taljevine baza:



Svojstva kiselina i baza

Kiselina = vodena otopina	Topivost (0°C)		Kiselina = vodena otopina	Topivost (0°C)	
	g/kg vode	koncen- tracija max. %		g/kg vode	koncen- tracija max. %
HF	∞	100	H ₂ S	6,7	0,67
HCl	823	45	H ₃ P	0,4	0,04
HBr	2210	69	CO ₂	3,4	0,34
HJ	2,4	0,24	SO ₂	228	18,6
H ₂ CO ₃	∞	100			

Tvar	Relativna molek. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska
<i>Kiseline</i>					
H ₂ SO ₄	98,08	10,5	—	1834	sumporna kiselina
HNO ₃	63,02	-42	86	1508	dušična kiselina
H ₃ PO ₄	98,00	42,35	213	1834	fosforna kiselina
HClO ₄	100,47	-112	(39)	1764	klorna kiselina (eksplozivna)
<i>Baze</i>					
NaOH	40,00	318,4	1388	2130	— natrijeva lužina
KOH	56,11	360,4	1320	2044	— kalijeve lužina
Ca(OH) ₂	74,10	580	—	2239	— gašeno vapno
NH ₄ OH	35,05	-77	—	—	— amonijačna vodica

Vrijednost pH

Mjera za stupanj kiselosti vodenih otopina je »vrijednost pH« (= *potentia hydrogenii*), koja je definirana negativnim dekadskim logaritmom koncentracije vodikovih iona *a* (mol · l⁻¹):

$$pH = -\lg a$$

Otuda proizlaze vrijednosti:

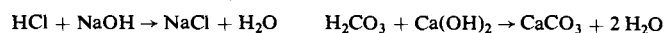
- za kisele otopine $a > 10^{-7}$ pH < 7
- za neutralne otopine (čista voda) $a = 10^{-7}$ pH = 7
- za bazične otopine $a < 10^{-7}$ pH > 7 (... 14)

Vrijednost pH mjerimo pomoću elektrokemijskih mjerila, a možemo je očitovati raznobojnim indikatorima koji pri određenoj vrijednosti pH promijene boju, npr.:

Indikator	pH
metiloranž	crven 3 — 4,4 žut
metilno crvenilo	crveno 4,4 — 6,2 žuto
lakmus	crven 5 — 8 modar
bromtimol (modri)	žut 6 — 7,5 modar
fenolftalein	bezbojan 8 — 10 crven

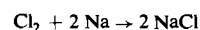
Soli

Soli nastaju pri reakciji kiseline s bazom:

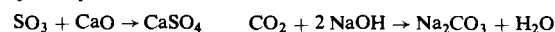


Soli nastaju i pri:

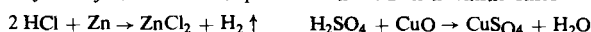
— djelovanju halogena na kovine



— djelovanju nekovinskih oksida na kovinske okside ili baze



— djelovanju kiselina na neplemenitu kovinu ili kovinski oksid



Nazivi za soli

Imena soli iz kiselina bez kisika svršavaju na -id:

CaF ₂ — Ca fluorid	Cu ₃ P — Cu fosfid
NaCl — Na klorid	KCN — K cijanid
AgBr — Ag bromid	K ₄ Fe(CN) ₆ — K Fe(II) cijanid
KJ — K jodid	K ₃ Fe(CN) ₆ — K Fe(III) cijanid
PbS — Pb sulfid	

Imena soli iz kiselina s kisikom svršavaju na -at (it):

Na ₂ CO ₃ — Na karbonat	KClO ₄ — K klorat
NaHCO ₃ — Na hidrokarbonat	K ₂ SiO ₃ — K silikat
Na ₂ SO ₃ — Na sulfid	K ₂ CrO ₄ — K kromat
Na ₂ SO ₄ — Na sulfat	K ₂ Cr ₂ O ₇ — K bikromat
Na ₂ S ₂ O ₃ — Na tiosulfat	KMnO ₄ — K manganat
NaNO ₃ — Na nitrat	KAl(SO ₄) ₂ — K Al sulfat
Na ₃ PO ₄ — Na fosfat	
Na ₂ HPO ₄ — Na hidrofosfat	
NaH ₂ PO ₄ — Na bihidrofosfat	

Posebno značajne alkalne soli

Sol	Na	K	Ca	Ba	NH ₄ ⁺
klorid	NaCl	KCl	CaCl ₂	BaCl ₂	NH ₄ Cl salmijak
karbonat	kuhinjska sol	K ₂ CO ₃	CaCO ₃ vapnenac	BaCO ₃	(NH ₄) ₂ CO ₃
sulfat	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	CaSO ₄ sadra	BaSO ₄ barit	(NH ₄) ₂ SO ₄
nitrat	NaNO ₃	KNO ₃			NH ₄ NO ₃
	čilska salitra	indijska salitra			

Svojstva

soli

Sol	Relat. molekul. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0 °C)	Opaska	Sol	Relat. molekul. masa	Talište °C (s = subl.)	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0 °C)	Opaska
BaCl ₂	208,25	962	1560	3856		KAl(SO ₄) ₂ · 12 H ₂ O	474,39	92	—	1750	stipsa (alaun)
BaCO ₃	197,35	1380	—	4430		K ₃ Fe(CN) ₆	329,26	—	—	1894	crvena krvna sol
BaSO ₄	233,40	1453	—	4500	baritno bjelilo	K ₄ Fe(CN) ₆ · 3 H ₂ O	422,41	70	—	1850	žuta krvna sol
Ba(NO ₃) ₂	261,35	595	—	3245		MgCl ₂	95,22	712	1412	2316	
BaCrO ₄	253,33	—	—	4600		MgCO ₃	84,32	350	900	3010	magnezit
CaCl ₂	110,99	782	1600	2152		MgSO ₄	120,37	1124	—	2660	
CaCO ₃	100,09	898,6 s	—	2711	vapnenac, kreda	MgSO ₄ · 7 H ₂ O	246,48	150	200	1636	gorka sol
CaCO ₃ · MgCO ₃	184,41	—	—	—	dolomit	NaF	41,99	993	1702	2790	
CaSO ₄	136,14	1450	—	2960	sadra (gips)	NaCl	58,44	801	1449	2165	kuhinska sol
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	172,16	128	163	2320		NaBr	102,90	756	1393	3203	
Ca ₃ (PO ₄) ₂	310,14	1670	—	3080		NaJ	149,89	665	1300	3665	
CaHPO ₄ · 2 H ₂ O	172,09	25	100	2316		NaCN	49,01	563,7	1500	—	
CaCrO ₄ · 2 H ₂ O	192,10	200	—	—		NaHCO ₃	84,01	270	—	2221	soda bikarbona
CaSiO ₃	116,16	1540	—	2905		Na ₂ CO ₃	105,99	860	—	2533	kalcinirana soda
CuCl ₂	134,45	498	993	3054		Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	286,14	—	—	1446	kristalna soda
CuS	95,60	103	220	4600		Na ₂ SO ₄	142,04	884	—	2698	
CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	221,08	200	—	4000		Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O	322,19	—	—	1465	Glauberova sol
CuSO ₄	159,60	200	650	3600		NaNO ₃	84,99	306,8	380	2267	čilska salitra
CuSO ₄ · 5 H ₂ O	249,68	110	150	2284	modra galica	Na ₃ PO ₄ · 10 H ₂ O	344,09	100	—	2536	
FeCl ₂	126,75	672	1023	2988	Fe(II) klorid	Na ₂ HPO ₄ · 2 H ₂ O	177,99	95	—	2066	
FeCl ₃	162,21	282	315	2894	Fe(III) klorid	NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O	137,99	100	200	1910	
FeSO ₄ · H ₂ O	169,92	—	—	3040		Na ₂ SiO ₃	122,06	1088	—	2400	
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	278,02	64	300	1898	zelena galica	Na ₂ S ₂ O ₃ · 5 H ₂ O	248,18	48	70	1750	fiksirna sol
KCl	74,56	776	1417	1989		NH ₄ Cl	53,49	—	—	1527	salmijak (nišador)
KCN	65,12	634,5	—	1560	cijankalij	NH ₄ Br	97,95	542 s	—	2429	bijela sol (fot.)
KHCO ₃	100,12	150	—	2180	K. bikarbonat	NH ₄ HCO ₃	79,06	107,5	—	1573	
K ₂ CO ₃	138,21	896	—	2267	pepeljika (potaša)	(NH ₄) ₂ CO ₃ · H ₂ O	114,10	60	—	—	
K ₂ SO ₄	174,27	588	1069	2664		(NH ₄) ₂ SO ₄	132,14	100	—	1770	
KNO ₃	101,11	337	400	2100	indijska salitra	NH ₄ NO ₃	80,04	169,6	210	1725	umjetno gnojivo
K ₃ PO ₄	212,28	1340	—	2564		(NH ₄) ₂ HPO ₄	132,06	—	—	1619	
K ₂ HPO ₄	174,18	—	—	—		NH ₄ H ₂ PO ₄	115,03	—	—	1794	
KH ₂ PO ₄	136,09	252,6	300	2338		PbS	239,25	1114	—	7500	
KClO ₄	138,55	610	—	2525		PbSO ₄	303,25	1000	—	6380	
K ₂ SiO ₃	154,29	976	—	—		PbCrO ₄	323,18	844	—	6300	
KMnO ₄	158,04	240	—	2703	permanganat	ZnCl ₂	136,28	283	730	2910	
K ₂ CrO ₄	194,20	968	—	2732		ZnS	97,43	1020	—	4102	
K ₂ Cr ₂ O ₇	294,19	236	500	2690		ZnCO ₃	125,38	300	—	4440	

Organski spojevi

U svim organskim spojevima sadržan je ugljik. Međutim, u organske spojeve ne ubrajamo slijedeće anorganske spojeve sa C:

uglične okside	CO, CO ₂	uglični disulfid	CS ₂
ugličnu kiselinu	H ₂ CO ₃	cijanovodik	CN
karbonate	npr. CaCO ₃	cijanide	npr. KCN
karbide	npr. CaC ₂	i sl.	

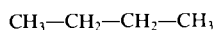
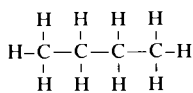
Organski su spojevi najčešće sastavljeni od ugljika i vodika (ugljkovodici), često još i s N i S. U principu su u organskim spojevima mogući svi elementi. U organskim spojevima prevladavaju u prvom redu atomske veze.

Nazivi organskih spojeva po broju atoma C u molekuli:

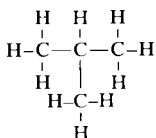
1 atom: met-	5 atoma: pent-	9 atoma: non-
2 atoma: et-	6 atoma: heks-	10 atoma: dek-
3 atoma: prop-	7 atoma: hept-	
4 atoma: but-	8 atoma: okt-	

Za molekule organskih spojeva karakteristična je atomska struktura ugljika, koji se veže u lance (lančani = aciklički, alifatski spojevi) ili u kolute (kolutni = ciklični spojevi). Molekule jednakog sastava mogu imati različite strukture (izomeri).

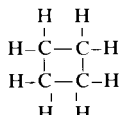
butan C₄H₁₀



izobutan C₄H₁₀



ciklobutan C₄H₈



Ugljkovodici mogu biti:

- zasićeni
- nezasićeni: s dvojnim vezama
- s trojnim vezama
- alkani, npr. etan CH₃-CH₃
- alkeni, npr. eten CH₂=CH₂
- alkini, npr. etin CH≡CH

Nezasićeni ugljkovodici teže pretvorbi u spojeve sa stabilnijom vezom (u zasićene). Stoga su nezasićeni ugljkovodici kemijski vrlo aktivni pa se takođe spajaju u velike molekule (polimeri).

Alikili (opća oznaka -R) su atomske skupine koje imaju jedan vodikov atom manje nego li odgovarajući alkani, npr.

metil	-CH ₃	propil	-C ₃ H ₇	pentil (amil)	-C ₅ H ₁₁
etil	-C ₂ H ₅	butil	-C ₄ H ₉		

Organske spojeve koji, osim C i H, sadrže i druge elemente, možemo razvrstati s obzirom na karakteristične skupine atoma (prema kojima imaju i slična kemijska svojstva).

Sistemske skupine organskih spojeva

ime	Skupina karakteristični sastav	Broj atoma C u molekuli		
		1	2	3
alkani (parafini)	C _n H _{2n+2}	CH ₄ metan	C ₂ H ₆ etan	C ₃ H ₈ propan
alkeni (olefini)	C _n H _{2n}	—	C ₂ H ₄ eten	C ₃ H ₆ propen
alkini (acetileni)	C _n H _{2n-2}	—	C ₂ H ₂ etin (acetilen)	C ₃ H ₄ propin
alkanoli (alkoholi)	-OH (hidroksil)	CH ₃ OH metanol (metilalkohol)	C ₂ H ₅ OH etanol (etilalkohol)	C ₃ H ₇ OH propanol (propilalkohol)
alkanali (aldehidi)	-CHO (aldehidna skupina)	HCHO metanal (formaldehid)	CH ₃ CHO etanal (acetaldehid)	C ₃ H ₇ CHO propanal
alkanske kisline (karbonske k.)	-COOH (karboksil)	HCOOH metanska k. (mravlja k.)	CH ₃ COOH etanska k. (octena k.)	C ₃ H ₇ COOH propanska k.
alkanoni (ketoni)	-CO- (karbonil)			(CH ₃) ₂ CO propanon (aceton)

Primjeri značajnih organskih skupina

Spoj	Karakteristična atomska skupina	Primjer
eteri	-O-	C ₂ H ₅ -O-C ₂ H ₅
estri	-COO-	CH ₃ -COO-CH ₃
epoksidi	$\begin{array}{c} \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array}$	CH ₂ Cl- $\begin{array}{c} \text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{O} \end{array}$ -CH ₂
amini	-NH ₂	C ₂ H ₅ -NH ₂
amidi	-CONH ₂	C ₂ H ₅ -CONH ₂
nitrili	-CN	CH ₂ =CH-CN vinil
		dietileter metiletanat klorepoksi- propan etilamin propanamid propennitril (vinilcianid)

Aromatični ugljkovodici (benzenskog tipa)

benzen (benzol)	C ₆ H ₆	$\begin{array}{c} \text{CH} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{CH} \end{array}$ - $\begin{array}{c} \text{CH} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH} \end{array}$ - $\begin{array}{c} \text{CH} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{CH} \end{array}$	(fenil -C ₆ H ₅)
C ₆ H ₅ OH	fenol	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	ksilol
C ₆ H ₅ CH ₃	toluol	C ₆ H ₄ (COOH) ₂	tereftalna kiselina
C ₆ H ₅ C ₂ H ₃	stirol		
C ₆ H ₅ SO ₃ H	sulfonska kislina		

Svojstva nekih

organskih spojeva

Spoj		Relat. molekul. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska	Spoj		Relat. molekul. masa	Talište °C	Vrelište °C	Gustoća kg/m ³ (0°C)	Opaska
metan	CH ₄	16,04	-182,5	-161,7	0,717		monoklor-	CH ₃ Cl	50,49	-97,7	-24	1,785	metil-
etan	C ₂ H ₆	30,07	-172	-88,6	1,356		metan						klorid
propan	C ₃ H ₈	44,10	-187,7	-42,1	2,019		diklor-	CH ₂ Cl ₂	84,93	-96,7	-40	1,336	metilen-
n-butan	C ₄ H ₁₀	58,12	-138,3	-0,5	2,703		metan						klorid
izobutan	C ₄ H ₁₀	58,12	-159,6	-11,7	2,668		triklor-	CHCl ₃	119,38	-63,5	61,2	1489	kloro-
ciklobutan	C ₄ H ₈	56,11	-50	10*	703		metan						form
n-oktan	C ₈ H ₁₈	114,23	-57,0	125,8	764		tetraklor-	CCl ₄	153,82	-22,6	76,8	1595	
izooktan	C ₈ H ₁₈	114,23	-107,4	99,3	691		metan						
eten	C ₂ H ₄	28,05	-169	-103,5	1,260	»etilen« ¹⁾	monofluor-	CFCl ₃	137,37	-111	24,9	1494	R 11
propen	C ₃ H ₆	42,08	-185,3	-47,7	1,915	»propilen« ¹⁾	triklor-						freon 11
buten	C ₄ H ₈	56,05	-130	-6,5	2,500	»butilen« ¹⁾	metan						
ciklobuten	C ₄ H ₆	54,09	-1	2**	733		difluor-	CF ₂ Cl ₂	120,91	-155	-29,2	—	R 12
etin	C ₂ H ₂	26,04	-81,5	-83,6	1,171	acetilen	klormetan						freon 12
propin	C ₃ H ₄	40,07	-102,7	-23,2	—		monofluor-	CHFC1 ₂	102,92	-127	14,5	1426	R 21
butin	C ₄ H ₆	54,09	-32,2	27	693		diklor-						
metanol	CH ₃ OH	32,04	-97,8	64,7	792	metilalkohol	etan						
etanol	C ₂ H ₅ OH	46,07	-112	78,4	789	etilalkohol	monoklor-	C ₂ H ₅ Cl	64,52	-139	13	917	etilklorid
propanol	C ₃ H ₇ OH	60,10	-127	97,8	804	propilalkohol	eten						
butanol	C ₄ H ₉ OH	74,12	-79,9	117	810	butilalkohol	naftalen	C ₁₀ H ₈	128,18	80,2	217,9	1145	vinil-
metanal	HCHO	30,03	-92	-21	—	formaldehid ²⁾	benzen	C ₆ H ₆	78,11	5,5	80,1	879	klorid
etanal	CH ₃ CHO	44,05	-123,5	20,2	783		hidroksi-	C ₆ H ₅ OH	94,11	42	182	1071	naftalin
propanal	C ₂ H ₅ CHO	58,08	-81	49,5	807		benzen						»benzol«
butanal	C ₃ H ₇ CHO	72,11	-99	75,7	817		amino-	C ₆ H ₅ NH ₂	93,13	-6,2	184,4	1022	fenol
metanska kiselina	HCOOH	46,03	8,6	100,8	1220	mravlja kiselina	benzen						anilin
etanska kiselina	CH ₃ COOH	60,05	16	118,1	1049	octena kiselina	eter	(C ₂ H ₅) ₂ O	74,12	-116,3	34,6	708	
propanska kiselina	C ₂ H ₅ COOH	74,08	-22	141,1	992		etandiol	C ₂ H ₄ (OH) ₂	62,07	-15,6	197,4	1113	glikol
butanska kiselina	C ₃ H ₇ COOH	88,11	-4,7	164	964	maslačna kiselina	fenol-						
propanon	(CH ₃) ₂ CO	58,08	-94,6	56,5	792	aceton	ftalein	C ₂₀ H ₁₄ O ₄	318,33	261	—	1299	
propantriol	(CH ₂ OH) ₂ CHOH	92,09	17,9	290	1260	glicerin	celuloza	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	(162,14) _n	—	—	1350	
							glukoza	C ₆ H ₁₂ O ₆	180,16	146	—	1544	dekstroza
							saharin	C ₇ H ₅ O ₃ NS	183,19	226 s	—	—	
							salicilna kis.	HOC ₆ H ₄ COOH	138,12	159	—	1443	salicil
							fosgen	COCl ₂	98,92	-104	8,2	1,392	
							iperit	(C ₂ H ₄ Cl) ₂ S	159,08	14	216	1279	
							gliceril-				160	1601	nitro-
							nitrat	(O ₂ NO) ₃ C ₃ H ₅	227,09	13,3	(20 mbar)	280	glicerin
							trinitro-						trotil
							toluen	(NO ₂) ₃ C ₆ H ₂ CH ₃	227,13	81	ekspl.	1654	(TNT)

¹⁾ Zastarjela imena! ²⁾ Rastopina formaldehida u vodi = formalin.

* 968 mbar. ** 972 mbar.

Polimeri

Polimeri (umjetni organski spojevi) su makromolekularni organski spojevi koji nastaju nizanjem molekula osnovnih tvari – monomera – u makromolekule s vrlo velikim brojem atoma (do 1000 i više). Relativna molekularna masa polimera iznosi prosječno oko 10^4 do 10^7 .

Brojem molekula – monomera, od kojih se sastoji molekula polimera, je određen stupanj polimerizacije. S porastom stupnja polimerizacije mijenjaju se i svojstva polimera (viskoznost, mogućnost preoblikovanja, čvrstoća, topivost itd.).

Pojedine molekule polimera nisu jednake veličine. Stoga se stupanj polimerizacije može smatrati samo prosječnim. Budući da je broj kemijski vezanih molekula (monomera) u molekuli polimera vrlo velik, to manje razlike u veličini makromolekula neće bitno utjecati na promjenu njihovih svojstava.

Najobičniji oblik makromolekule proizlazi iz lančanog nizanja monomera.

Polimere dobivamo iz monomera sintetički ili pretvorbom prirodnih tvari. Glavni postupci za dobivanje polimera su:

a) *Polimerizacija* je organska kemijska reakcija spajanja jednakih ili različitih nezasićenih spojeva s malenim molekulama u makromolekularne tvari, i to bez nastajanja nusprođukata.

b) *Polikondenzacija* je kemijska reakcija pri kojoj se osnovne tvari s malenim molekulama vežu u makromolekule uz izlučivanje nusprođukata (naročito vode, alkanola, halogenida).

c) *Poliadacija* je organska kemijska reakcija spajanja različitih spojeva s malenim molekulama u makromolekularne tvari, bez nastajanja nusprođukata.

Kopolimerizacija je polimerizacija barem dvaju različitih monomera, pri čem nastaju makromolekule koje sadrže međusobno povezane monomerne molekule kao osnovne skupine.

Kopolimerizacijom nastaju polimerne tvari čija svojstva mogu biti u širokim granicama prilagođena potrebama za njihovu primjenu.

Primjeri najznačajnijih polimera:

celuloza	$(C_6H_{10}O_5)_n$	polietilen	$(C_2H_4)_n$
naravni kaučuk	$(C_5H_8)_n$	polipropilen	$(C_3H_6)_n$
sintetički kaučuk:		polistirol	$(C_8H_8)_n$
– buna S	$(C_{12}H_{14})_n$	polivinilklorid	$(C_2H_3Cl)_n$
– buna N	$(C_7H_9N)_n$	poliakrilonitril	$(C_3H_3N)_n$
silikon	$(RSiO_2)_n$	poliamid	$(C_6H_{11}ON)_n$

Pregled tvari

Čiste tvari	elementi	čisti elementi (samo jedan red atoma)	jedna faza
	spojevi	miješani elementi (najmanje dva izotopa)	
anorganski spojevi		jedna faza	
organski spojevi			
Smjese (disperzni sistemi)	homogene smjese (molekularna disperzija) veličina čestica < 1 nm	plinovite smjese (zrak)	jedna faza
	heterogene smjese (razni fazama (voda i led) ili više tvari (voda i ulje) veličina čestica > 1 nm)	(prave) otopine		tekuće otopine – plinova (CO_{2} u vodi) – tekućina (alkohol u vodi) – krutina (sol u vodi)
		koloidne otopine veličina čestica 1... 100 nm	plinoviti dispergenti (aerosoli) – tekućina (magla) – krutina (dim, prah)	više faza
	tekući dispergenti – plinova: koloidna pjena (sapunica) – tekućina: koloidna emulzija (mlijeko) – krutina: koloidna otopina		
suspenzije veličina čestica > 100 nm		kruti dispergenti – plinova | krute pjene – tekućina | (plovuđac) – krutina: koloidni eutektik	više faza

Taloženje (sedimentacija) (čestice se talože zbog težine ili pomoću centrifuge):

- grubodisperzne suspenzije lako se talože,
- koloidne otopine talože se pomoću (ultra)centrifuge,
- prave se otopine ne talože.

Filtriranje:

- suspenzije se filtriraju kroz obične filtre (otvori očica 100 nm),
- koloidi se filtriraju kroz specijalne filtre (otvori očica 1 nm),
- prave se otopine ne mogu filtrirati.

MEHANIKA

Masa i težina

Masa m (kg) je svojstvo tijela koje se očituje u ustrajnosti protiv promjena gibanja i u uzajamnom privlačenju drugih tijela. Masu određujemo uspoređivanjem s drugim tijelima poznate mase (tj. vaganjem pomoću utega). Masa se ne mijenja s promjenom položaja.

Masa je također vaganjem određena količina tvari.

Gustoća ρ (kg/m^3) je odnos mase m i volumena V : $\rho = m/V$.

Gustoćom izražena masa: $m = \rho V$.

Težina G (N) je sila, kojom Zemlja privlači tijela. Određena je masom m tijela i ubrzanjem zemaljske sile teže $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$; $G = mg$.

Težina nije konstantna, već se mijenja s promjenom ubrzanja g sile teže (koja se mijenja od ekvatora do polova od 9,78 do 9,83 m/s^2).

U svakidašnjem životu označuje »težina« i vaganjem ustanovljenu masu (g, kg, t). (Vidi upozorenje na str. 64!)

Gustoća tehničkih materijala (kg/m^3)

Čisti elementi i spojevi

Gustoća čistih elemenata i spojeva sabrana je u podacima o tvarima:

čisti elementi	str. 80, 81	kiseline, baze	str. 88
hidridi, oksidi	str. 84, 85	sol	str. 90, 91
karbidi, nitridi	str. 86	organski spojevi	str. 94, 95

Tehničke kovine i spojevi

aluminij – lijevani	2560	delta kovina	8600
– kovani	2750	duralumin	2800
aluminijeve slitine	2600 ... 2900	elektron	1800
bakar – tekući	8220	konstantan	8800
– elektrolitski	8900 ... 8950	kositar – tekući	7025
– lijevani	8300 ... 8920	– lijevani	7200
– kovani, valjani	8800 ... 9000	manganin	8400
bijela kovina	7500 ... 10100	mjed (mesing)	8400 ... 8800
bronca – kositrena	8730 ... 8800	monel kovina	8580
– aluminijska	7400 ... 8200	olovo – tekuće	10640
čink – tekući	6480	– lijevano	11340
– lijevani	6900	silumin	2500 ... 2650
– kovani	7000 ... 7200	sivi lijev	7250
čelik – lijevani	7850	srebro – lijevano	10400 ... 10500
– valjani	7850	– kovano	10500 ... 10600
– brzorezni	8100 ... 9000	zlato, lijevano	19250

Nekovinske krutine

asfalt	1050 ... 1380	pepeo	1800 ... 2400
azbest	2100 ... 2800	pluto	200 ... 350
azbestna ljepenka	1200	porculan	2150 ... 2450
boksit	2400 ... 2600	smirak	4000
celofan	1420	smola, prirodna	1250 ... 1330
celuloid	1380	staklo	2400 ... 3000
cement	2200 ... 3250	svila, umjetna	1250 ... 1600
grafit	2000 ... 2500	šamot	1800 ... 2600
guma, tvrda	1150 ... 1700	šećer	1610
gumeni proizvodi	1000 ... 2000	škrob	1530
kaučuk, sirovi	910 ... 930	tinjac	2600 ... 3200
keramički proizvodi	1600 ... 3900	treset, posušen	800 ... 1600
koks	1600 ... 1900	troska	2500 ... 3000
kolofonij	1070 ... 1090	ugljen	1200 ... 1500
korund	3750 ... 4000	ugljen, drveni	1400 ... 1500
kreda	1800 ... 2600	ugljeni briketi	1250
kremen (kvarc)	2100 ... 2650	vapnenac	1500 ... 1700
kremeno staklo	2200	vapno – živo	900 ... 1300
kriolit	2950	– gašeno	1150 ... 1250
led (H_2O)	880 ... 920	vosak	980 ... 1040
mast	910 ... 960	vuna	1300 ... 1400
pamuk	1480	zemlja	1300 ... 2000
papir	700 ... 1200	Zemlja (planet)*	5530

* Ukupna masa Zemlje iznosi $5960 \cdot 10^{18} \text{ t}$.

Kapljevine (pri 15°C)

benzin – laki	680 ... 720	plinsko ulje iz	
– teški	< 760	– katrana	880 ... 900
cilindarsko ulje	930	– kamenog ugljena	1020 ... 1080
katran iz		– nafte	860 ... 890
– kamenog ugljena	1100 ... 1200	– smeđeg ugljena	880 ... 900
– smeđeg ugljena	850 ... 910	repičino ulje	911 ... 918
katransko ulje iz		ricinusovo ulje	959 ... 974
– kamenog ugljena	1080	solna otopina	
– smeđeg ugljena	780 ... 1040	(NaCl) – 10%	1071
laneno ulje	940	terpentinsko ulje	860
morska voda	1020 ... 1030	ulje za loženje	
nafta	700 ... 1040	– lako	890 ... 980
parafinsko ulje	900 ... 1020	– teško	1020 ... 1080
petrolej	760 ... 860	voda	999,13

		Gradiva	
zid od prirodnog kamena:		vapno	1700
granit, porfir	2600	vapno-cement	1900
mramor	2700	beton (od šljunka)	2200
pješčanjak	2400	drvo (prosušeno)	
vapnenac – gust	2600	borovina	600 . . . 700
– porozan	2200	brezovina	700 . . . 800
zid od umjetnog gradiva:		bukovina	700 . . . 800
obična opeka	1800	hrastovina	800 . . . 900
porozna puna opeka	1100	javorovina	650 . . . 750
porozna šuplja opeka	1000	jelovina	550 . . . 600
šuplja opeka	1450	lipovina	500 . . . 600
žbuka:		smrekovina	550 . . . 600
cement	2100	topolovina	450 . . . 500
sadra	1200		

		Sipke tvari	
briketi, ugljeni	750 . . . 1250	sol	1250
cement – rastresen	1200 . . . 1400	treset	300 . . . 900
– nabijen	1900 . . . 2000	ugljen drveni	
drvo u cjepanicama	330 . . . 520	– od meka drveta	150
koks	320 . . . 450	– od tvrda drveta	200
materijal		ugljen, kameni	800 . . . 900
za nasipavanje:		– smeđi	700 . . . 800
šljunak – suh	1700	vapnenac	1400
– vlažan	2000	vapno, gašeno	1150 . . . 1250
troska (šljaka)	1000	– živo	1060
zemlja, pijesak, ilovača		zemlja	1600 . . . 2000
– mokra	2100	žito, krumpir, voće	
– prirodno vlažna	1800	brašno, rastreseno	500
– suha	1600	ječam	650
pijesak, ljevaonički		krumpir	750
– rastresen	1200	pšenica	760
– nabijen	1650	raž	680
slama	45	voće	360
snijeg – svježe zapao	80 . . . 190	zob	550
– mokr	200 . . . 800		

		Kutovi prirodnog pokosa	
cement	40°	pšenica, raž	25 . . . 35°
grah, grašak	35°	ugljen, kameni	45°
ječam, zob	40 . . . 45°	– smeđi	35 . . . 50°
koks	35 . . . 50°	zemlja	27 . . . 35°

STATIKA

Sila

Sila F (N) je uzrok promjeni gibanja i oblika tijela. Sila je vektor određen veličinom, smjerom i hvatištem.

Sila u ravnini

F – sila s hvatištem (x_0, y_0)

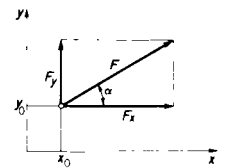
F_x, F_y – komponente

α – kut što ga zatvara smjer sile F s osi x

$$\mathbf{F} = F_x + F_y$$

$$F_x = F \cos \alpha \quad F_y = F \sin \alpha$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad \tan \alpha = F_y / F_x$$



Sila u prostoru

F – sila s hvatištem (x_0, y_0, z_0)

F_x, F_y, F_z – komponente

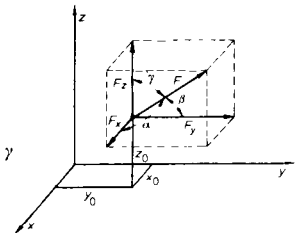
α, β, γ – kutovi što ih zatvara sila F s osima x, y, z

$$\mathbf{F} = F_x + F_y + F_z$$

$$F_x = F \cos \alpha \quad F_y = F \cos \beta \quad F_z = F \cos \gamma$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$



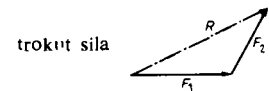
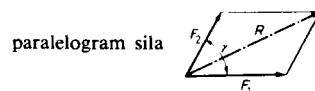
Sastavljanje dviju sila u ravnini

Sile koje sastavljamo F_1, F_2 – komponente

Kut među silama γ

Ukupna sila R – rezultanta

Grafičko rješenje:



Analitičko rješenje:

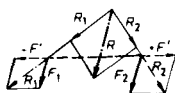
$$\mathbf{R} = F_1 + F_2 = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \gamma}$$

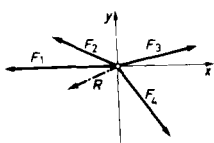
R_x i R_y su projekcije rezultante R na osi x i y

$$R_x = F_1 + F_2 \cos \gamma \quad R_y = F_2 \sin \gamma$$

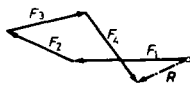
Pri sastavljanju dviju paralelnih sila F_1 i F_2 dajemo dvije jednake, ali suprotne sile $+F'$ i $-F'$.



Sastavljanje više sila sa zajedničkim hvatištem



Grafičko rješenje: poligon sila



Analitičko rješenje

$$R = \sum_{i=1}^n F_i$$

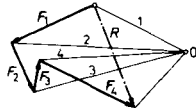
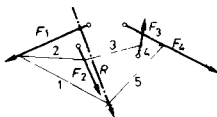
Projekcija rezultante na os $x(y)$ jednaka je zbroju projekcija svih komponenta na os $x(y)$:

$$R_x = \sum_{i=1}^n F_{ix} \quad R_y = \sum_{i=1}^n F_{iy} \quad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$$

Hvatište rezultante je u hvatištu sila.

Sastavljanje više sila s različitim hvatištima

Grafičko rješenje: verižni poligon



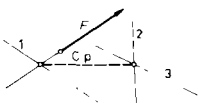
(0 – po volji odabrani pol)

Analitičko rješenje

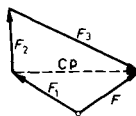
$$R = \sum_{i=1}^n F_i$$

Daljnje rješavanje — pomoću projekcija kao u prijašnjem primjeru.

Rastavljanje sile F u više komponenta (1, 2 i 3), koje se ne sijeku sve u istoj točki



Grafičko rješenje:



C.p. = Culmannov pravac spaja sjecište pravca djelovanja sile F i jednog od zadanih pravaca sa sjecištem ostalih dvaju pravaca.

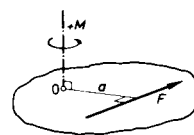
Statički moment sile

Statički moment sile M (Nm) s obzirom na neku točku (pol 0) je umnožak sile F i njena kraka a (tj. okomite udaljenosti te točke od smjera sile F)

$$M = Fa$$

Po dogovoru moment je pozitivan ako njegovo djelovanje ima smisao suprotan smislu kazaljke na satu.

Moment sile je vektor kojemu je smjer okomit na ravninu određenu smjerom sile i kraka. Vektor momenta sile ima takav smisao da je moment, gledan u suprotnom smislu, pozitivan.



Moment sile u ravnini

Momenti komponenta sile F

$$-M_x = F_x y_o$$

$$M_y = F_y x_o$$

Moment sile F

$$M = (-M_x) + M_y = M_y - M_x$$

Zbrajanje momenata s obzirom na istu točku (os)

$$M_R = \sum_{i=1}^n M_i$$

Moment sile u prostoru

Momenti s obzirom na pojedine koordinatne osi x , y i z (vidi sliku: sile u prostoru – na str. 101):

$$M_x = F_z y_o - F_y z_o$$

$$M_y = F_x z_o - F_z x_o$$

$$M_z = F_y x_o - F_x y_o$$

ukupni moment

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$$

Spreg sila (par sila) su dvije jednako velike, usporedne i suprotno usmjerene sile F i $-F$ s međusobnim razmakom a . Te se dvije sile ne mogu sastaviti u rezultantu. Moment sprega sila iznosi

$$M = Fa$$



Spreg sila može se u istoj ili paralelnoj ravnini po volji premještati ili zamijeniti drugim spregom sila koji ima isti moment.

Ravnoteža sila

Sile su u ravnoteži ako kruto tijelo, na kojeg djeluju, ostaje u mirovanju (odn. ne mijenja stanje gibanja).

Uvjeti ravnoteže

a) Rezultanta svih sila mora biti jednaka nuli

$$R = \sum_{i=1}^n F_i = 0$$

Stoga moraju biti i rezultante komponentata jednake nuli

$$R_x = \sum_{i=1}^n F_{ix} = 0 \quad R_y = \sum_{i=1}^n F_{iy} = 0 \quad R_z = \sum_{i=1}^n F_{iz} = 0$$

Pri grafičkom rješavanju poligon sila mora biti zatvoren ($R = 0$).

b) Zbroj svih momenata mora biti jednak nuli

$$M_R = \sum_{i=1}^n M_i = 0$$

Zato moraju zbrojevi momenata s obzirom na pojedine koordinatne osi također biti jednaki nuli

$$M_{Rx} = \sum_{i=1}^n M_{ix} = 0 \quad M_{Ry} = \sum_{i=1}^n M_{iy} = 0 \quad M_{Rz} = \sum_{i=1}^n M_{iz} = 0$$

U sila koje imaju isto hvatište nije potreban uvjet za momente.

Stabilnost

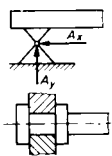
Tijelo je stabilno s obzirom na prevrtanje ako je

$$\sum \text{momenata stabilnosti} > \sum \text{momenata prevrtanja}$$

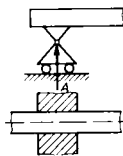
Pri tome računamo sve momente s obzirom na brid prevrtanja.

Reakcije u osloncima (smjer)

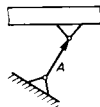
Nepomični oslonac



Pomični oslonac



Njihajni oslonac



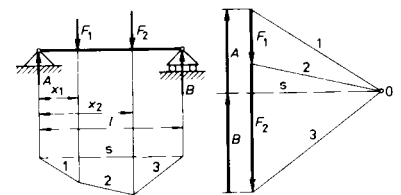
Nosači

Nosač na dva oslonca

Reakcije u osloncima

$$A = F_1 \frac{l - x_1}{l} + F_2 \frac{l - x_2}{l}$$

$$B = F_1 \frac{x_1}{l} + F_2 \frac{x_2}{l}$$



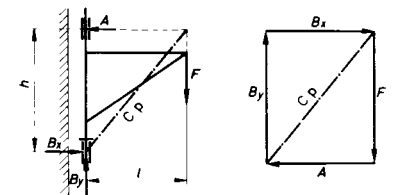
Zidni (okretni) nosač

Reakcije u osloncima

$$A_x = B_x = F \frac{l}{h}$$

$$A_y = F$$

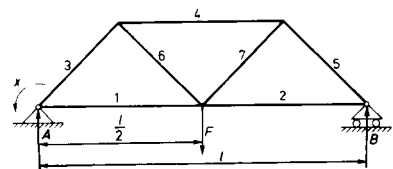
(C. p. = Culmannov pravac)



Rešetkasti nosač (rešetka)

Reakcije u osloncima

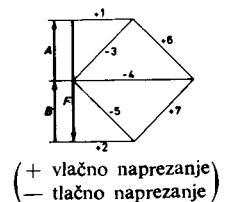
$$A = B = \frac{F}{2}$$



Cremonin plan

sastavljen je od (zatvorenih) poligona sila koje djeluju u svakom čvoru, a nalaze se u ravnoteži.

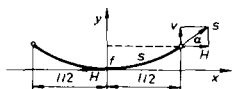
Najprije određujemo reakcije u osloncima A i B. Zatim crtamo plan tako da kod svih čvorova uzimamo u obzir redosljed sila kakav je na slici, pri čemu treba usvojiti isti smisao promatranja (npr. x).



(+ vlačno naprezanje)
(- tlačno naprezanje)

Statika užeta

Uže upeto na razmaku l s progibom f . Težina jedinice duljine



$$p = A \rho g \quad (\text{N/m})$$

A — (ukupni) presjek užeta
 ρ — gustoća materijala užeta
 g — ubrzanje teže ($= 9,81 \text{ m/s}^2$).

1. Maleni progib

Uže će poprimiti (dovoljnom točnošću) oblik parabole

$$y \approx 4f/l^2 \cdot x^2$$

Duljina užeta $2s \approx l$ Težina užeta $G \approx pl$
 Progib $f \approx pl^2/8H$ Prikloni kut $\tan \alpha \approx 4f/l$
 Sile u užetu: komponente $V \approx pl/2$ $H \approx pl^2/8f$
 rezultanta $S \approx pl/8 \cdot \sqrt{(l/f)^2 + 16}$

2. Proizvoljni progib

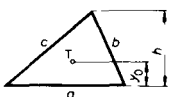
Uže će poprimiti oblik lančanice

$$y = h/2 \cdot (e^{x/h} + e^{-x/h}) - h \quad h = H/p \approx l^2/8f$$

Duljina užeta $2s = 2\sqrt{f^2 + 2fh}$ Težina užeta $G = 2ps$
 Progib $f = h/2 \cdot (e^{l/2h} + e^{-l/2h}) - h$ Prikloni kut $\tan \alpha = s/h$
 Sile u užetu: komponente $V = ps$ $H = ph$
 rezultanta $S = p(f + h)$

TEŽIŠTA

Težišta linija



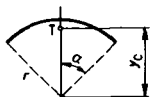
1. Dužina. Težište je na polovici dužine.

2. Obod trokuta

$$y_o = \frac{h}{2} \cdot \frac{b+c}{a+b+c}$$

3. Kružni luk s polumjerom r i kutom α

$$y_o = r \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad \hat{\alpha} (\text{rad})$$

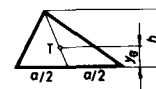


$\alpha = \pi/2 = 90^\circ$ $y_o = 2r/\pi \approx 0,6366 r$
 $\alpha = \pi/4 = 45^\circ$ $y_o = 2r/\pi \cdot \sqrt{2} \approx 0,9003 r$
 $\alpha = \pi/6 = 30^\circ$ $y_o = 3r/\pi \approx 0,9549 r$

Težišta likova

1. Trokut

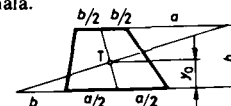
$$y_o = \frac{h}{3}$$



2. Paralelogram. Težište je u sjecištu dijagonala.

3. Trapez

$$y_o = \frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}$$



4. Pravilni višekut i krug. Težište je u središtu.

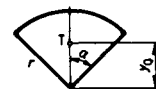
5. Kružni isječak

$$y_o = \frac{2}{3} r \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad \hat{\alpha} (\text{rad})$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad y_o = \frac{4r}{3\pi} \approx 0,4244 r$$

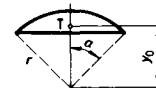
$$\alpha = \frac{\pi}{4} = 45^\circ \quad y_o = \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} r \approx 0,6002 r$$

$$\alpha = \frac{\pi}{6} = 30^\circ \quad y_o = \frac{2r}{\pi} \approx 0,6366 r$$



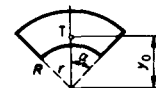
6. Kružni odsječak

$$y_o = \frac{2}{3} r \frac{\sin^3 \alpha}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} \quad \hat{\alpha} (\text{rad})$$



7. Isječak kružnog vijenca

$$y_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad \hat{\alpha} (\text{rad})$$

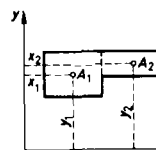


8. Sastavljeni lik

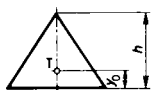
Pojedine površine A_i
 koordinate težišta

$$x_o = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i x_i)}{A} \quad A = \sum_{i=1}^n A_i$$

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i y_i)}{A}$$



Težišta tijela



1. Kocka i prizma. Težište je u središtu.

2. Piramida i stožac

$$y_0 = \frac{h}{4}$$

3. Kugla. Težište je u središtu.

4. Polukugla

$$y_0 = \frac{3}{8}r$$

5. Kuglin odsječak (kalota)

$$y_0 = \frac{3}{4} \cdot \frac{(2r-h)^2}{(3r-h)}$$

6. Kuglin isječak

$$y_0 = \frac{3}{8}(2r-h)$$

7. Kuglina zona

$$y_0 = \frac{-3(a^4 - b^4)}{6h(a^2 + b^2) + 2h^3}$$

$$a = \sqrt{h_a(2r - h_a)} \quad b = \sqrt{h_b(2r - h_b)}$$

8. Sastavljeno tijelo

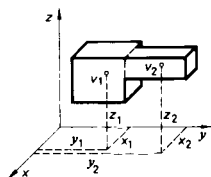
Pojedini volumeni V_i
koordinate težišta

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i x_i)}{V}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i y_i)}{V}$$

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i z_i)}{V}$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i$$



TRENJE

Trenje je otpor pri klizanju dvaju tijela koja se dodiruju plohami. Sila trenja F_t ovisi o hrapavosti i materijalu kliznih ploha, sredstvu za podmazivanje i o okomitoj (normalnoj) sili F_n , kojom jedna ploha tlači drugu.

1. Trenje mirovanja

$$\text{Sila trenja} \quad F_t = \mu_0 F_n \quad \mu_0 \text{ — koeficijent trenja mirovanja}$$

2. Trenje gibanja

$$\text{Sila trenja} \quad F_t = \mu F_n \quad \mu \text{ — koeficijent trenja gibanja}$$

3. Koeficijenti trenja

Parovi materijala	μ_0		μ	
	suho	podmazano	suho	podmazano
čelik na čelik	0,12 ... 0,30	0,10	0,10	0,01 ... 0,05
čelik na lijev. željezo ili broncu	0,19 ... 0,20	0,10	0,18	0,01 ... 0,05
kovina na drvo	0,50 ... 0,65	0,10	0,20 ... 0,50	0,02 ... 0,10
drvo na drvo	0,40 ... 0,65	0,16 ... 0,20	0,20 ... 0,40	0,04 ... 0,16
koža na kovinu	0,60	0,20	0,22	0,12
koža na lijevano željezo	0,56	—	0,28	0,12

Koeficijent trenja μ za gumeni kotač na dobroj cesti (asfalt, beton):
suho: 0,5 ... 0,65; vlažno: 0,2 ... 0,35; snijeg: 0,1 ... 0,5; led: 0,05 ... 0,15

4. Trenje tijela na kosini

Sila okomita na podlogu

$$F_n = G \cos \alpha \quad G \text{ — težina}$$

Sila u smjeru podloge (niz kosinu)

$$F_0 = G \sin \alpha$$

Tijelo miruje — zbog trenja — u svakom položaju kosine ako je

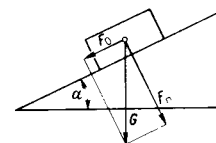
$$F_t \geq F_0 \quad \mu_0 \geq \tan \alpha \quad \varrho_0 \geq \alpha \quad F_t = \mu_0 F_n = \mu_0 G \cos \alpha$$

Kut trenja $\tan \varrho_0 = \mu_0$

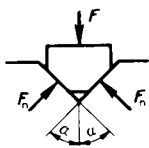
ϱ_0 — kut trenja mirovanja

$$\tan \varrho = \mu$$

ϱ — kut trenja gibanja



5. Trenje u klinastom utoru pri djelovanju sile F na klin



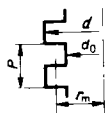
$$F = 2 F_n \sin \alpha$$

Trenje mirovanja

$$F_t = \mu_0 2 F_n = \frac{\mu_0}{\sin \alpha} F = \mu_0' F$$

Koeficijent trenja klina $\mu_0' = \mu_0 / \sin \alpha$

6. Trenje vijka



a) Vijak s plosnatim navojem

Srednji polumjer $r_m = \frac{d + d_0}{4}$

Kut uspona $\alpha \quad \tan \alpha = \frac{P}{2r_m \pi}$

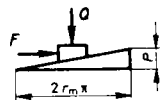
Koeficijent trenja $\tan \varrho = \mu$

Djelovanje vijka nasuprot sili opterećenja Q :
Sila gibanja bez trenja

$$F_0 = Q \tan \alpha$$

Sila gibanja s trenjem

$$F = Q \tan (\alpha + \varrho) = Q \frac{P + 2r_m \pi \mu}{2r_m \pi - \mu P}$$

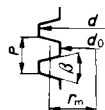


Korisnost

$$\eta = F_0 / F = \tan \alpha / \tan (\alpha + \varrho)$$

Sila samokočnosti $F' = Q \tan (\alpha - \varrho_0)$

Uvjet samokočnosti vijka $\alpha \leq \varrho_0$.



b) Vijak s trapeznim navojem

Koeficijent trenja $\mu' = \mu / \cos (\beta / 2)$

Sav ostali proračun trenja isti je kao i za vijak s plosnim navojem.

7. Trenje u kliznom ležaju u kojem djeluje sila F na površinu A

Specifični pritisak $p = F / A$

Moment trenja: za radijalni ležaj promjera d (polumjera r) i duljine l

$$M = \mu r F \quad p = F / l d$$

za aksijalni ležaj s polumjerom rukavca r i polumjerom otvora u ležaju r_0

$$M = 2/3 \cdot \mu p \pi (r^3 - r_0^3) \quad p = F / \pi (r^2 - r_0^2)$$

8. Trenje kotrljanja

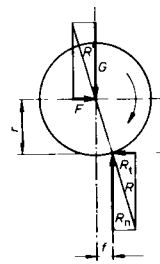
Kotač (kolut, kugla, valjak), opterećen silom (npr. težinom G), kotrlja se po ravnoj podlozi zbog sile kotrljanja F koja na nj djeluje odnosno zbog momenta kotrljanja M .

Hvatište (prema središtu kola uperene) sile otpora R pomaknuto je za krak f pred kotačem.

Komponente sile otpora R : $R_n = G \quad R_t = F$

Trenje kotrljanja: $f / r = R_t / R_n = F / G$

Sila kotrljanja i moment: $F = f / r \cdot G \quad M = f G$



Kotrljanje počinje samo pri nagibu podloge $\tan \alpha > f / r$.
Pri kotrljanju zbog momenta kotrljanja M mora biti koeficijent trenja između kotača i podloge (tračnice, ceste) $\mu > f / r$.

Krak momenta kotrljanja f :

kaljena čelična tijela (kugle, valjci)

na čeličnoj podlozi (kotrljajući ležaji) $f \approx 0,01$ mm

čelik, čelični lijev ili sivi lijev

na čeliku (vozila na tračnicama) $f \approx 0,5$ mm

drvo na drvetu $f \approx 5,0$ mm

Trenje kotrljanja f / r za gumene kotače na cesti (automobili):

asfalt $\approx 0,01$; beton $\approx 0,015$; makadam $\approx 0,03$; pijesak do 0,3.

9. Kolutno obodno trenje

Trenje užeta ili trake na obodu koluta

Obuhvatni kut $\tilde{\alpha}$ (rad) = $180 / \pi \cdot \alpha^\circ$

a) Trenje na užnici $F > F_0$

Najveća obodna tarni sila

$$F_{t \max} = F - F_0 = F(e^{\mu \tilde{\alpha}} - 1) / e^{\mu \tilde{\alpha}}$$

Najveći obodni tarni moment

$$M_{t \max} = F_{t \max} r = Fr(e^{\mu \tilde{\alpha}} - 1) / e^{\mu \tilde{\alpha}}$$

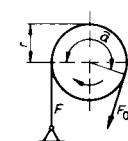
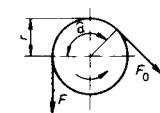
b) Trenje na zavornom kolutu $F > F_0$

Tarni sila

$$F_t = F - F_0 = F_0(e^{\mu \tilde{\alpha}} - 1)$$

Tarni moment

$$M_t = F_t r = F_0 r(e^{\mu \tilde{\alpha}} - 1)$$



ČVRSTOĆA

Naprezanja

Pri deformacijama nastaju u materijalu naprezanja koja djeluju suprotno uzroku deformacija:

– normalne sile F_n djeluju okomito na promatrani presjek S , i uzrokuju *normalna naprezanja* σ

$$\sigma = F_n/S$$

– tangencijalne sile F_t djeluju u presjeku S samom i uzrokuju *tangencijalna naprezanja* τ

$$\tau = F_t/S$$



a) Normalna naprezanja σ uzrokuju produljenje ili skraćenje materijala (npr. kod vlakna ili tlaka). Pri tom se pojavljuje

$$\begin{array}{ll} \text{aps. produljenje} & \Delta l = l - l_0 \quad \text{rel. produljenje} \quad \varepsilon = \Delta l/l_0 \\ \text{aps. suženje} & \Delta d = d_0 - d \quad \text{rel. suženje} \quad \varepsilon_q = \Delta d/d_0 \end{array}$$

l_0, d_0 – prvobitna duljina odnosno promjer epruvete (bez naprezanja),
 l, d – duljina i promjer epruvete pri naprezanju σ .

$$\varepsilon/\varepsilon_q = m \quad \text{Poissonov broj} \quad \mu = 1/m$$

za kovine $m = 3 \dots 4$ (za čelik: 10/3)

za sivi lijev $m = 5 \dots 9$

Hookeov zakon vrijedi ako je rastezanje linearno proporcionalno naprezanju

$$\begin{array}{ll} \varepsilon = \alpha \sigma & \alpha \text{ — koeficijent rastezanja} \\ \sigma = \varepsilon E & E = 1/\alpha \text{ — modul elastičnosti} \end{array}$$



Hookeov zakon vrijedi (do granice linearne proporcionalnosti) za čelik, a praktično i za bakar, aluminij i drvo.

$$\text{Deformacijski rad} \quad W = \sigma \varepsilon / 2.$$

Potencijalni zakon (ustanovljen na temelju preciznih mjerenja) $\varepsilon = \alpha_0 \sigma^n$ vrijedi osobito za sivi lijev, gdje je $\alpha_0 \approx 1/E$, dok je $n = 1,08$ za vlak a $n = 1,04$ za tlak. Za neke druge materijale je npr.

$n > 1$ — za lijevani cink, granit, beton ($n = 1,14 \dots 1,16$)

$n < 1$ — za kožu ($n = 0,7$), užad od konoplje itd.

Modul elastičnosti E (N/mm²)

čelik	210000	Al i Al-slitine	≈ 70000
čelični lijev	200000	Mg i Mg-slitine	≈ 39000
nodularni lijev	≈ 180000	bakar	125000
sivi lijev	≈ 100000	mjed	≈ 90000
karbidni tvrdi metali	≈ 580000	drvo	≈ 10000

b) Tangencijalna naprezanja τ uzrok su klizanju materijala (npr. kod smicanja). Pri tom se javlja tangencijalna deformacija γ . Slično Hookeovu zakonu vrijedi za područje u kojem je tangencijalno naprezanje τ linearno proporcionalno klizanje (deformaciji γ)

$$\gamma = \beta \tau \quad \beta \text{ — koeficijent smicanja}$$

$$\tau = \gamma G \quad G = 1/\beta \text{ — modul smicanja}$$

Deformacijski rad $W = \tau \gamma / 2$.

Odnos između modula elastičnosti E i modula smicanja G

$$G = E m / 2(m + 1) = E / 2(1 + \mu)$$

(Za čelik je $m = 10/3$ pa je $G = 0,385 E$.)

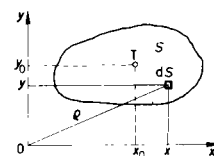
Geometrijske karakteristike presjeka

Statički moment plohe s obzirom na neku os jest suma umnožaka elementarnih površina te plohe i udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi

$$M_x = \int y dS \approx \sum y_i S_i$$

a jednak je umnošku površine S i udaljenosti y_0 njena težišta T od osi x

$$M_x = y_0 S$$



Statički moment plohe s obzirom na os kroz težište je nula.

Moment tromosti plohe

Aksijalni moment plohe je suma umnožaka elementarnih površina i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabrane osi, npr. od osi x ili y :

$$I_x = \int y^2 dS \approx \sum y_i^2 S_i \quad I_y = \int x^2 dS \approx \sum x_i^2 S_i$$

Polumjer tromosti $i = \sqrt{I/S}$

Polarni moment tromosti plohe je suma umnožaka elementarnih površina i kvadrata udaljenosti njihovih težišta od izabranog pola (0)

$$I_p = \int \rho^2 dS \approx \sum \rho_i^2 S_i$$

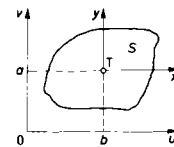
Pri tom vrijedi $\rho^2 = x^2 + y^2$ i $I_p = I_x + I_y$

Moment tromosti plohe uvijek je pozitivan.

Steinerovo pravilo

Aksijalni moment tromosti plohe s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište iznosi

$$I_u = I_x + a^2 S \quad I_v = I_y + b^2 S$$



Vlak i tlak

Opterećenje F , koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po presjeku S , uzrokuje naprezanje

$$+\sigma \quad \text{kod vlaka} \quad +\sigma = \frac{F}{S}$$

$$-\sigma \quad \text{kod tlaka} \quad -\sigma = -\frac{F}{S}$$

Deformacija kod vlaka (tlaka) – produljenje (skraćenje)

$$\Delta l = \sigma l / E$$

Temperaturna naprezanja σ_T pojavljuju se pri zagrijavanju ili ohlađivanju čvrsto upeta predmeta

$$\sigma_T = \varepsilon E = E \cdot \Delta l / l_0$$

Δl je linearno temperaturno produljenje (skraćenje) (v. str. 157)

$$\Delta l = \alpha_T l_0 \cdot \Delta T$$

gdje su: l_0 – prvobitna duljina, ΔT – temperaturna razlika, α_T – linearni koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}) (v. str. 158 i 159).

$$\sigma_T = E \alpha_T \cdot \Delta T$$

Temperaturna naprezanja ne zavise od dimenzija predmeta i mogu biti katkada vrlo velika.

Savijanje

Moment savijanja M uzrokuje naprezanje σ , koje zamišljamo raspodijeljeno po presjeku razmjerno prema udaljenosti od neutralne osi n .

Neutralna os prolazi kroz težište promatranog presjeka (na sl.: kroz točku 0).

Maksimalno naprezanje na savijanje σ_{\max} pojavljuje se u točki koja je najudaljenija od neutralne osi (za e_1, e_2), i iznosi

$$+\sigma_{\max} = M e_1 / I \quad -\sigma_{\max} = M e_2 / I$$

Ako je presjek simetričan s obzirom na n ($e_1 = e_2 = e$), vrijedi

$$\sigma_{\max} = M e / I = M / W$$

I – moment tromosti presjeka S s obzirom na n

W – moment otpora presjeka $W = I / e$

Progib nosača f slijedi iz diferencijalne jednadžbe elastične linije

$$y'' = -M / EI$$

M_{\max}, f, I, W za najčešće slučajeve dani su na str. 115 i 116.

Momenti i progibi nosača

Slika opterećenja	Moment savijanja M_{\max}	Opasni presjek	Progib	
			f	na mjestu
	$F l$	B	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3}$	A ($x = 0$)
	$\frac{F l}{4}$	C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{48}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{F a b}{l}$	C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{a^2 b^2}{3 l}$ $\frac{l+b}{3 b} \sqrt{\frac{l+b}{3 a}}$	$x = a \sqrt{\frac{l+b}{3 a}}$ za $a > b$
	$\frac{3 F l}{16}$	B	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{48 \sqrt{5}}$	$x = \frac{l}{\sqrt{5}}$
	$\frac{F l}{8}$	A B C	$\frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{192}$	C ($x = l/2$)
	$\frac{Q l}{2}$	B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{8}$	A ($x = 0$)
	$\frac{Q l}{8}$	C	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{5 l^3}{384}$	C ($x = l/2$)
	$(-)\frac{Q l}{8}$	B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{185}$	$x = 0,4215 l$
	$(-)\frac{Q l}{12}$	A B	$\frac{Q}{EI} \cdot \frac{l^3}{384}$	C ($x = l/2$)

Momenti inercije I_x i momenti otpora W_x

Presjek	I_x	W_x
	$\frac{a h^3}{12}$	$\frac{a h^2}{6}$
	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^3}{6}$
	$\frac{b h^3}{36}$	$\frac{b h^2}{24}$
	$\frac{5}{16} \sqrt{3} \cdot r^4 = 0,5413 r^4$	$\frac{5}{8} r^3$
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1 d^3$
	$\frac{\pi - 8}{9\pi} \frac{d^4}{16} = 0,00686 d^4$	$0,0238 d^3$
	$\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$	$\frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} \approx 0,1 \frac{D^4 - d^4}{D}$
Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\approx \pi s r^3$	$\approx \pi s r^2$
	$\frac{\pi a b^3}{4}$	$\frac{\pi a b^2}{4}$

Momente tromosti i momente otpora za standardne čelične profile vidi u poglavlju: Oblici kovinskih poluproizvoda (str. 426 do 430).

Smik (Odrez)

Poprečna sila F , koja djeluje u samom presjeku, a zamišljamo je jednoliko raspodijeljenom po presjeku S , uzrokuje naprezanja na smik

$$\tau_s = F/S$$

Naprezanja na smik uvijek su vezana s naprezanjem na savijanje. U kratkih svornjaka i zakovica možemo naprezanje na savijanje zanemariti i izvršiti proračun samo na smik.

Međutim, čim se smicanju pridruži i moment savijanja, naprezanja na smik se raspodijele po presjeku nejednoliko. Zbog toga se pojavljuje najveće naprezanje na smik:

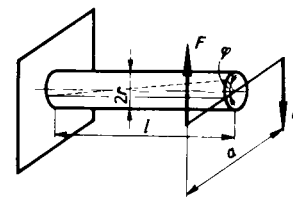
kod pravokutnog presjeka $\tau_{s \max} = (3/2) \cdot F/S$
 kod okruglog presjeka $\tau_{s \max} = (4/3) \cdot F/S$
 kod okruglog prstena s tankom stijenkom $\tau_{s \max} \approx 2F/S$

Torzija (Uvijanje)

Moment torzije T

$$T = Fa$$

uzrokuje torziono naprezanje koje zamišljamo jednoliko razdijeljeno po presjeku i razmjerno prema udaljenosti od težišta. Najveće torziono naprezanje pojavljuje se u točki najudaljenijoj od težišta (r)



$$\tau_{t \max} = (T/I_p)r = T/W_p$$

I_p – polarni moment tromosti presjeka

W_p – polarni moment otpora presjeka

$$W_p = I_p/r$$

Za kružni presjek je npr. $I_p = \pi d^4/32 \approx 0,1 d^4$ $W_p = \pi d^3/16 \approx 0,2 d^3$

Kut torzije $\hat{\varphi}$

$$\hat{\varphi} = T/lGI_p \quad \hat{\varphi}(\text{rad})$$

Kut torzije svedeni na jedinicu duljine

$$\hat{\vartheta} = T/GI_p \quad \hat{\vartheta}(\text{rad/m})$$

Polarni momenti otpora W_p i kutovi torzije svedeni na jedinicu duljine sabrani su za najvažnije presjeke na str. 118.

Polarni momenti otpora i kutovi torzije

Presjek	Polarni moment otpora W_p	Kut torzije na jedinicu duljine $\hat{\varphi}$ (rad/m)
	$\frac{\pi}{16} \cdot d^3$	$\frac{32}{\pi d^4} \cdot \frac{T}{G}$
 Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$ $\approx 2 \pi s r^2$	$\frac{32}{\pi(D^4 - d^4)} \cdot \frac{T}{G}$ $\approx \frac{1}{2 \pi s r^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$\frac{\pi}{2} \cdot a b^2$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^3 b^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$0,208 a^3$	$\frac{7,11}{a^4} \cdot \frac{T}{G}$
	$c_1 \cdot a b^2$	$\frac{1}{c_1 a b^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$c_2 \cdot a b^2$	$\frac{1}{c_2 a b^3} \cdot \frac{T}{G}$
	$c_1 = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{0,630}{n} + \frac{0,052}{n^5} \right)$ $c_2 = 1 - \frac{0,65}{1 + n^3}$ $n = \frac{a}{b}$	

Opterećenje i progib opruga

σ – normalno naprezanje τ – tangencijalno naprezanje	F – opterećenje f – progib																
	$F = \frac{b h^2}{6} \cdot \frac{\sigma}{l}$ $f = \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \frac{4 l^3}{b h^3} \cdot \frac{F}{E} = \frac{2 l^2}{3 h} \cdot \frac{\sigma}{E}$																
	$F = \frac{n b h^2}{6 l} \sigma$ $f = \psi \frac{F}{EI} \cdot \frac{l^3}{3} = \psi \frac{4 l^3}{n b h^3} \cdot \frac{F}{E} = \psi \cdot \frac{2 l^2}{3 h} \cdot \frac{\sigma}{E}$ n – broj lamela <table border="1"> <tr> <td>n</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>ψ</td> <td>1,000</td> <td>1,160</td> <td>1,234</td> <td>1,283</td> <td>1,315</td> <td>1,390</td> <td>1,500</td> </tr> </table>	n	1	2	3	4	5	10	∞	ψ	1,000	1,160	1,234	1,283	1,315	1,390	1,500
n	1	2	3	4	5	10	∞										
ψ	1,000	1,160	1,234	1,283	1,315	1,390	1,500										
	$F = \frac{b h^2}{6 r} \sigma$ $f = r \hat{\varphi} = \frac{F}{EI} \cdot l r^2 =$ $= 12 \frac{F}{E} \cdot \frac{l r^2}{b h^3} = 2 \frac{l r}{h} \cdot \frac{\sigma}{E}$ $\hat{\varphi}$ (rad)																
	$F \approx \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d^3}{r} \cdot \tau$ $f \approx \frac{64 n r^3}{d^4} \cdot \frac{F}{G} = \frac{32 l r^2}{\pi d^4} \cdot \frac{F}{G} =$ $= \frac{4 \pi n r^2}{d} \cdot \frac{\tau}{G} = \frac{2 l r}{d} \cdot \frac{\tau}{G}$ n – broj zavoja opruge l – duljina žice opruge (Te jednačbe vrijede samo ako je promjer žice vrlo malen prema promjeru opruge!)																

Izvijanje

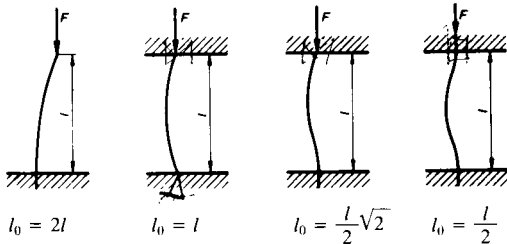
Najmanja sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje je sila izvijanja F_k . Djelovanje te sile na nosač presjeka S uzrokuje u njemu naprezanje izvijanja σ_k

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S}$$

Sila izvijanja F_k i naprezanje izvijanja σ_k ovise o vitkosti λ

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

gdje znače: l_0 – slobodnu duljinu izvijanja, i – polumjer tromosti
Slobodna duljina izvijanja l_0 za različite slučajeve opterećenja na izvijanje iznosi:



Polumjer tromosti i

$$i = \sqrt{I_{\min} / S}$$

gdje je S presjek nosača, a I_{\min} njegov najmanji aksijalni moment tromosti.
Eulerova jednačba za elastično izvijanje

$$F_k = \pi^2 \frac{EI_{\min}}{l_0^2}$$

Odatle slijedi naprezanje σ_k za elastično izvijanje

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S} = \pi^2 \frac{EI_{\min}}{l_0^2 S} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (\sigma_k = \sigma \cdot \omega)$$

Te dvije jednačbe vrijede samo za elastično tlačno područje, tj. kod čelika za vitkost $\lambda > 105$.

Stvarnu silu F kojom možemo opteretiti nosač određujemo pomoću faktora sigurnosti v

$$F = \frac{F_k}{v}$$

Faktor sigurnosti v iznosi: za sivi lijev $v = 8$, za čelik $v = 5$, za drvo $v = 6 \dots 12$.

Tetmajerove jednačbe za naprezanje σ_k pri neelastičnom izvijanju kojima se služimo pri gradnji strojeva:

Materijal	E N/mm ²	σ_k N/mm ²	Vitkost λ
sivi lijev	100000	$776 - 12,0 \lambda + 0,053 \lambda^2$	$\lambda < 80$
čelični lijev	200000	$303 - 1,29 \lambda$	$\lambda < 112$
čelik:			
- mekan	210000	$310 - 1,14 \lambda$	$\lambda < 105$
- tvrd	210000	$335 - 0,62 \lambda$	$\lambda < 89$
- Cr Ni	210000	$470 - 2,30 \lambda$	$\lambda < 86$
drvo	10000	$29,3 - 0,194 \lambda$	$\lambda < 100$

Dopušteno opterećenje

$$F = \frac{F_k}{v} = \frac{\sigma_k S}{v}$$

Faktor sigurnosti v iznosi: za manje strojeve $v = 8 \dots 10$,
za veće strojeve $v = 6 \dots 8$.

*

» Postupak ω « upotrebljavamo za čelične i drvene konstrukcije.
Naprezanje u nosaču određujemo izrazom

$$\frac{F}{S} \omega = \sigma$$

gdje su: S – presjek nosača, F – tlačna sila kojom je opterećen, σ – naprezanje (normalno), ω – koeficijent izvijanja ovisan o vitkosti λ i materijalu nosača.

Koeficijenti izvijanja ω

za čelik čvrstoće 360 N/mm ² (ω_{360}) i 510 N/mm ² (ω_{510}):										
λ	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω_{360}	1,00	1,04	1,08	1,14	1,21	1,30	1,41	1,55	1,71	1,90
ω_{510}	1,00	1,06	1,11	1,19	1,28	1,41	1,58	1,79	2,05	2,53
λ	110	120	130	140	160	180	200	220	240	250
ω_{360}	2,11	2,43	2,85	3,31	4,32	5,47	6,75	8,17	9,73	10,55
ω_{510}	3,06	3,65	4,28	4,96	6,48	8,21	10,13	12,26	14,59	15,83

za sivi lijev

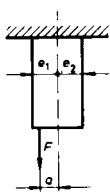
λ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω	1,00	1,01	1,05	1,11	1,22	1,39	1,67	2,21	3,50	4,43	5,45

za drvo

λ	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
ω	1,00	1,01	1,03	1,08	1,14	1,42	2,07	3,22	4,64	6,31	7,25

Složena opterećenja

a) Vlak i savijanje



Nosač opterećen na vlak silom F koja djeluje na nj ekscentrično na udaljenosti a od osi nosača dodatno je opterećen momentom $M = Fa$.

Naprezanje zbog vlaka $\sigma = F/S$

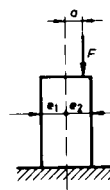
Najveće naprezanje zbog savijanja

$$+\sigma_1 = Me_1/I = Fa e_1/I$$

$$-\sigma_2 = -Me_2/I = -Fa e_2/I$$

Najveća ukupna naprezanja $\sigma_{r1} = \sigma + \sigma_1 = F/S + Fa e_1/I$
 $\sigma_{r2} = \sigma - \sigma_2 = F/S - Fa e_2/I$

b) Tlak i savijanje



Tlačna sila F koja djeluje na nosač u udaljenosti a od osi nosača uzrokuje opterećenje na tlak i dodatno opterećenje momentom $M = Fa$.

Naprezanja zbog tlaka $-\sigma = -F/S$

Naprezanje zbog savijanja

$$+\sigma_1 = Me_1/I = Fa e_1/I$$

$$-\sigma_2 = -Me_2/I = -Fa e_2/I$$

Najveća ukupna naprezanja

$$\sigma_{r1} = -\sigma + \sigma_1 = -F/S + Fa e_1/I$$

$$\sigma_{r2} = -\sigma - \sigma_2 = -F/S - Fa e_2/I$$

Nosače koji su razmjerno vitki (velike duljine s obzirom na presjek) treba proračunati i na izvijanje.

*

Što se hvatište sile F više udaljuje od osi nosača, dakle što se udaljenost a povećava, to se više smanjuju tlačna naprezanja u rubu nosača koji je nasuprot hvatištu sile F . Ta tlačna naprezanja poprimaju konačnu vrijednost jednaku nuli kad a naraste do vrijednosti $a = I/Se_1$. Poveća li se udaljenost a iznad te vrijednosti, u suprotnom rubu nosača pojaviti će se vlačna naprezanja. Sama tlačna naprezanja (npr. kod materijala koji ne podnose vlačna naprezanja) dobivamo ako sila djeluje na površini je zgre presjeka koja je omeđena »polumjerom jezgre r «

$$r = I/Se_1$$

Polumjer jezgre r iznosi za različite nosače:

za kvadratni (sa stranicom h) – u smjeru stranice $r = h/6$
 – u smjeru dijagonale $r = 0,1179 h$

za okrugli (s promjerom d) $r = d/8$

za prstenasti (s promjerima d i D) $r = D/8 \cdot [1 + (d/D)^2]$

c) Smik i torzija

Silu F koja djeluje na obodu čepa promjera d možemo zamijeniti silom koja djeluje u središtu čepa i momentom para sila $T = Fr = Fd/2$.

Sila kroz središte uzrokuje naprezanje na smik τ_s

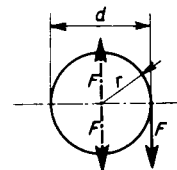
$$\tau_s = (4/3) \cdot F/S = (16/3) \cdot F/\pi d^2$$

Okretni moment dviju sila uzrokuje tangencijalno naprezanje τ_t

$$\tau_t = 16 T/\pi d^3 = 8 F/\pi d^2$$

Najveće ukupno naprezanje iznosi

$$\tau_{\max} = \tau_s + \tau_t = (16/3) \cdot F/\pi d^2 + 8 F/\pi d^2 = 40 F/3 \pi d^2$$



d) Savijanje i torzija

Presjek nosača je opterećen istovremeno momentom savijanja M i okretnim momentom T .

U okruglog presjeka (ili kružnog vijenca) pojavljuju se najveće vrijednosti normalnog naprezanja σ i tangencijalnog naprezanja τ na rubu na istom mjestu.

Okrugli presjek ima

moment otpora $W = \pi d^3/32$

polarni moment otpora $W_p = \pi d^3/16 = 2W$

Kružni vijenac ima

moment otpora $W = (\pi/32) \cdot (D^4 - d^4)/D$

polarni moment otpora $W_p = (\pi/16) \cdot (D^4 - d^4)/D = 2W$

Pojedinačna naprezanja iznose

normalna naprezanja zbog savijanja $\sigma = M/W$

tangencijalna naprezanja zbog torzije $\tau = T/W_p = T/2W$

Ukupna su naprezanja

$$\sigma_{\max} = \xi M/W$$

gdje vrijedi

– po Bachu $\xi = 0,35 + 0,65 \sqrt{1 + (\alpha_0 T/M)^2}$ $\alpha_0 = \sigma_{\text{dop}}/1,3 \tau_{\text{dop}}$

– po Huberu (i dr.) $\xi = \sqrt{1 + 0,75 (\alpha_0 T/M)^2}$ $\alpha_0 = \sigma_{\text{dop}}/1,73 \tau_{\text{dop}}$

– po Mohru $\xi = \sqrt{1 + (\alpha_0 T/M)^2}$ $\alpha_0 = \sigma_{\text{dop}}/2 \tau_{\text{dop}}$

U svim je slučajevima σ_{dop} dopušteno normalno naprezanje, a τ_{dop} je dopušteno tangencijalno naprezanje (vidi str. 532).

DINAMIKA

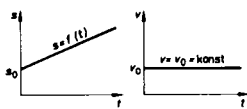
Dinamika je nauka o gibanju tijela. S obzirom na sile koje se javljaju pri gibanju, razlikujemo *kinematiku*, koja proučava gibanje tijela bez obzira na sile koje na nj djeluju, i *kinetiku*, koja proučava utjecaj djelovanja sila na gibanje tijela.

Kinematika

a) Pravocrtno gibanje materijalne točke

Oznake:	put	s	brzina	$v = \frac{ds}{dt}$
	početni put	s_0	početna brzina	v_0
	vrijeme	t	ubrzanje	$a = \frac{dv}{dt}$

Jednoliko gibanje $v = v_0 = \frac{ds}{dt} = \text{konst}$ ($a = 0$)



Za $s_0 = 0$:

$$s = s_0 + vt \quad s = vt$$

$$t = (s - s_0)/v \quad t = s/v$$

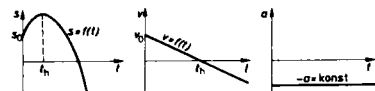
$$v = (s - s_0)/t \quad v = s/t$$

Jednoliko ubrzano gibanje $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \text{konst}$

Ubrzanje $+a$



Usporenje $-a$



Za $s_0 = 0, v_0 = 0$:

$$s = s_0 + (v + v_0)t/2 \quad s = vt/2$$

$$s = s_0 + (v^2 - v_0^2)/2a \quad s = v^2/2a$$

$$s = s_0 + v_0t + at^2/2 \quad s = at^2/2$$

$$v = v_0 + at \quad v = at$$

Primjer — slobodni pad ubrzanje $a = g = 9,81 \text{ m/s}^2$
dubina $s = h$

$$v = gt = \sqrt{2gh} \quad t = v/g = \sqrt{2h/g}$$

b) Krivocrtno gibanje materijalne točke

Svako je krivocrtno gibanje ubrzano, jer se mijenja smjer brzine. Ubrzanje je uvijek usmjereno prema konkavnoj strani putanje. (Smjer ubrzanja ne podudara se sa smjerom brzine.)

Kosi hitac (u zrakopraznom prostoru)

Početna brzina v_0 pod kutom α

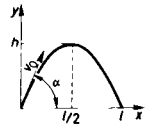
$$x = v_0 t \cos \alpha \quad y = v_0 t \sin \alpha - gt^2/2$$

$$v_x = v_0 \cos \alpha \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt$$

Trajanje uspona ($v_y = 0$) $t_h = v_0 \sin \alpha / g$

Visina hica $h = v_0^2 / 2g \cdot \sin^2 \alpha$ $h_{\text{max}} = v_0^2 / 2g$ pri $\alpha = 90^\circ$

Domet hica $l = v_0^2 / g \cdot \sin 2\alpha$ $l_{\text{max}} = v_0^2 / g$ pri $\alpha = 45^\circ$



c) Kružno gibanje

Oznake: kut $\hat{\varphi}$ (rad) kutna brzina $\omega = \frac{d\hat{\varphi}}{dt}$

vrijeme t kutno ubrzanje $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$

Jednoliko kružno gibanje $\omega = \frac{d\hat{\varphi}}{dt} = \text{konst}$ $\hat{\varphi} = \omega t$

Trajanje 1 okretaja (period vrtnje) $T = 2\pi/\omega$

Kružna frekvencija $f = 1/T$ (s^{-1})

Brzina vrtnje $n = \omega/2\pi$ (okt./s)

Obodna brzina (na polumjeru r) $u = r\omega = 2r\pi n$

d) Harmonijsko titranje

Harmonijsko titranje je pravocrtno gibanje amo-tamo pri kojem je ubrzanje razmjerno putu.

Otklon $x = r \sin \varphi$ r — amplituda

$\hat{\varphi}$ (rad) $= \omega t$ ($\omega = \text{konst}$)

$x = r \sin \omega t$

Period (trajanje titraja) $T = 2\pi/\omega$

Frekvencija $f = 1/T = \omega/2\pi$

Brzina $v = r\omega \cos \omega t$

Ubrzanje $a = -r\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x$

Kinetika

a) Newtonov zakon (osnovni zakon dinamike)

»Sila F je jednaka umnošku mase m i ubrzanja a « $F = ma$

Ako su vektori sile i ubrzanja istog smjera, vrijedi $F = ma$.

Suma komponenta (F_{ix} , F_{iy} , F_{iz}) sile F_i koja djeluje na masu m proporcionalna je s komponentama ubrzanja (a_x , a_y , a_z)

$$\sum F_{ix} = ma_x \quad \sum F_{iy} = ma_y \quad \sum F_{iz} = ma_z$$

Izraz ($-ma$) nazivamo »silom tromosti«.

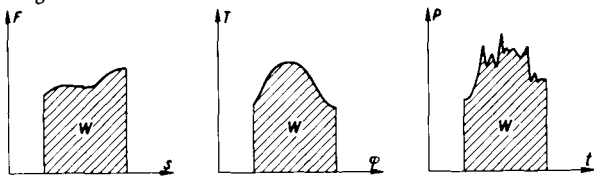
Mehanički je sustav u dinamičkoj ravnoteži ako je suma svih vanjskih sila koje na nj djeluju i svih sila tromosti sustava jednaka nuli (D'Alembertov princip)

$$\sum F_i - \sum m_i a_i = 0$$

b) Zakretni moment T sile F na kraku r $T = Fr$

Obodna sila $F = T/r$

c) Rad W sile F na putu s ili zakretnog momenta T pri zakretu za kut $\hat{\varphi}$ (rad) ili snage P u vremenu t iznosi



$$W = \int F ds = \int F v dt$$

$$W = \int T d\hat{\varphi} = \int T \omega dt$$

$$W = \int P dt$$

Kad su vektori F , v i s istog smjera vrijedi:

$$F = \text{konst} \quad W = Fs$$

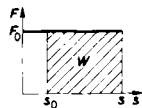
$$T = \text{konst} \quad W = T\hat{\varphi}$$

$$P = \text{konst} \quad W = Pt$$

Rad pomaka

$$F = F_0 = \text{konst}$$

$$W = \int_{s_0}^s F ds = F(s - s_0)$$

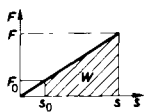


Elastični deformacijski rad

$$F = ks$$

k – konstanta elastičnosti opruge

$$W = \int_{s_0}^s F ds = k \frac{s^2 - s_0^2}{2} = \frac{F + F_0}{2} (s - s_0)$$



d) Snaga P je rad obavljen u jedinici vremena t

$$P = \frac{dW}{dt} = Fv = F \frac{ds}{dt} \quad P = T \frac{d\hat{\varphi}}{dt}$$

U isto usmjerenih vektora F , v i s i pri konstantnoj snazi P vrijedi

$$P = W/t \quad P = Fv \quad P = T\omega = T2\pi n$$

e) Korisnost

Korisnost nekog procesa, stroja ili uređaja jest omjer između korisno dobivene energije W (snage P) i utrošene energije W_0 (snage P_0)

$$\eta = W/W_0 = P/P_0 < 1$$

f) Kinetička energija W_k je energija mase u gibanju.

Pri pravocrtnom gibanju izražavamo kinetičku energiju masom m i brzinom v

$$W_k = mv^2/2$$

Pri kružnom gibanju izražavamo kinetičku energiju momentom tromosti mase J (vidi str. 129) i kutnom brzinom ω

$$W_k = J\omega^2/2$$

Za promjenu kinetičke energije

$$\text{od } W_0 = mv_0^2/2 + J\omega_0^2/2 \text{ na } W_k = mv^2/2 + J\omega^2/2$$

potreban je rad

$$W = m(v^2 - v_0^2)/2 + J(\omega^2 - \omega_0^2)/2$$

Zamašnjak

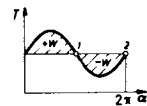
Nejednoliki zakretni moment T pogonskog stroja, koji se mijenja za vrijeme jednog okretaja (2π), povećava kutnu brzinu zamašnjaka do ω_{\max} (u točki 1) i smanjuje je do ω_{\min} (u točki 2).

Prosječna kutna brzina $\omega_{\text{med}} = (\omega_{\max} + \omega_{\min})/2$

Stupanj nejednolikosti $\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/\omega_{\text{med}}$

Primljeni odnosno predani rad zamašnjaka, koji ima moment tromosti mase J i prosječnu brzinu vrtnje n , iznosi

$$W = J(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)/2 = J\omega_{\text{med}}^2 \delta = J \cdot 4\pi^2 n_{\text{med}} \delta$$



g) Potencijalna energija W_p je energija položaja (stanja). Tijelo mase m , tj. težine $G = mg$, ima, s obzirom na neku ravninu, iznad koje se nalazi na visini h , potencijalnu energiju (energiju položaja)

$$W_p = mgh = Gh$$

Osim toga primjera, potencijalna se energija pojavljuje i kao energija napete opruge ili komprimiranog plina, kao toplinska ili kemijska energija itd.

h) Impuls sile Fdt izražava djelovanje sile F u vremenu t , a jednak je promjeni količine gibanja mv

$$Fdt = mdv$$

$$\int Fdt = m(v - v_0)$$

gdje je v_0 — početna brzina.

Za $F = \text{konst}$ vrijedi $Ft = m(v - v_0)$

Ako su vektori F i v istoga smjera, bit će

$$Ft = m(v - v_0)$$

*

Za sustav materijalnih točaka vrijedi $\sum F_i = a_0 \sum m_i$

gdje je a_0 ubrzanje težišta.

Težište sustava materijalnih točaka giba se kao da je u njemu združena sva masa sustava sa svim vanjskim silama koje na nj djeluju.

Nema li vanjskih sila (odnosno ako su u međusobnoj ravnoteži pa je njihova rezultanta jednaka nuli), vrijedi

$$\sum m_i a_i = 0$$

$$\sum m_i v_i = \text{konst}$$

i) Moment impulsa Tdt je moment količine gibanja mv s obzirom na neku točku (pol) ili os

$$Tdt = rmdv = Jd\omega$$

$$\int Tdt = rm(v - v_0) = J(\omega - \omega_0)$$

gdje su: r — okomita udaljenost točke (osi) od smjera vektora brzine v , J — moment tromosti mase s obzirom na točku (os), ω — kutna brzina.

Moment impulsa je vektor koji je okomit na ravninu vektora v i r .

Pri rotaciji sustava materijalnih točaka oko neke osi vrijedi

$$\int Tdt = \int Frdt = \sum (r_i m_i v_i) - \sum (r_i m_i v_{i0}) = J(\omega - \omega_0)$$

Moment tromosti mase

— aksijalni (s obzirom na os x)

$$J_x = \int r_x^2 dm \quad r_x^2 = y^2 + z^2$$

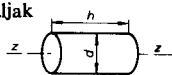
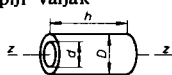
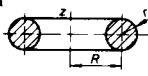
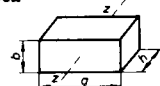
— polarni (s obzirom na pol)

$$J = \int r^2 dm \quad r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Polumjer tromosti $i \quad i = \sqrt{J/m} \quad J = mi^2$

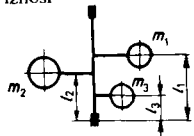
Zamašni moment $mD^2 \quad i = D/2 \quad J = mD^2/4 \quad mD^2 = 4J$

Momenti tromosti mase tijela (gustoće ρ)

<p>Valjak</p> 	$J_z = \frac{1}{2} mr^2 = \frac{\pi}{32} d^4 h \rho$ $m = d^2 \pi / 4 \cdot h \rho$
<p>Šuplji valjak</p> 	$J_z = \frac{1}{2} m(R^2 + r^2) = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4) h \rho$ $m = (D^2 - d^2) \pi / 4 \cdot h \rho$
<p>tankih stijena</p> $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx mr_m^2 = \frac{\pi}{4} d_m^3 s h \rho$ $m \approx d_m \pi s h \rho$
<p>Kugla</p> $d = 2r$ <p>(os z kroz središte)</p>	$J_z = \frac{2}{5} mr^2 = \frac{\pi}{60} d^5 \rho$ $m = \pi / 6 \cdot d^3 \rho$
<p>Šuplja kugla</p> $D = 2R$ $d = 2r$	$J_z = \frac{2}{5} m \frac{R^5 - r^5}{R^3 - r^3} = \frac{\pi}{60} (D^5 - d^5) \rho$ $m = \pi / 6 \cdot (D^3 - d^3) \rho$
<p>tankih stijena</p> $d_m = (D + d)/2$ $s = (D - d)/2$	$J_z \approx \frac{2}{3} mr_m^2 = \frac{\pi}{6} d_m^4 s \rho$ $m \approx \pi d_m^2 s \rho$
<p>Prsten</p> 	$J_z \approx m \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2 \right) = 2\pi^2 R r^2 \left(R^2 + \frac{3}{4} r^2 \right) \rho$ $m \approx 2\pi^2 R r^2 \rho$
<p>Ploča</p> 	$J_z = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2) = \frac{1}{12} abh(a^2 + b^2) \rho$ $m = abh \rho$
<p>Steinerovo pravilo</p>	$J_a = J_i + me^2$ <p>J_i — moment tromosti tijela s obzirom na os kroz težište tijela</p> <p>J_a — moment tromosti tijela s obzirom na os koja je paralelna s osi kroz težište i od nje udaljena za e</p>

Centrifugalna sila F_c mase m , koja rotira obodnom brzinom u odnosno kutnom brzinom ω na polumjeru r_0 (udaljenost težišta tijela od osi rotacije) iznosi

$$F_c = m u^2 / r_0 = m r_0 \omega^2$$



Dinamička ravnoteža

Osovina je u dinamičkoj ravnoteži ako na nju ne djeluju nikakve centrifugalne sile ili se utjecaji tih sila međusobno poništavaju («slobodna osovina»).

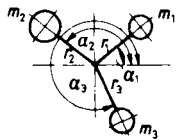
Uvjeti dinamičke ravnoteže su:

$$\sum m r \sin \alpha = 0$$

$$\sum m r \cos \alpha = 0$$

$$\sum m r l \sin \alpha = 0$$

$$\sum m r l \cos \alpha = 0$$

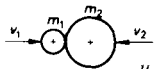


Sudar je dodir dvaju tijela koji se zbiva u vrlo kratkom vremenu razmjerno velikim silama.

Centralni sudar

Mase m_1 i m_2 koje se giblju po istom pravcu sudaraju se brzinama (prije sudara) v_1 odn. v_2 .

Brzine masa m_1 i m_2 nakon sudara



$$u_1 = v_1 - (1 + \epsilon)(v_1 - v_2) \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = v_2 + (1 + \epsilon)(v_1 - v_2) \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

Koeficijent sudara

$$\epsilon = (u_2 - u_1) / (v_1 - v_2)$$

Zbog gubitaka je (zvuk, deformacija, toplina) $0 < \epsilon < 1$:

materijal obaju tijela	staklo	čelik	slonovača	pluto	drvo
ϵ	0,95	0,6...0,95	0,9	0,55	0,5

(ϵ u čeliku raste s tvrdoćom)

$\epsilon = 0$ potpuno plastičan sudar

$$u_1 = u_2 = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2)$$

$\epsilon = 1$ potpuno elastičan sudar

$$u_1 = v_1 - 2(v_1 - v_2)m_2 / (m_1 + m_2)$$

$$u_2 = v_2 + 2(v_1 - v_2)m_1 / (m_1 + m_2)$$

Gubitak energije pri sudaru

$$W = (1 - \epsilon^2)(v_1 - v_2)^2 m_1 m_2 / 2(m_1 + m_2)$$

Titranje

1. Slobodno neprigušeno titranje

Giba li se materijalna točka periodično s frekvencijom f tako, da je sila F koja na nju djeluje razmjerna razmaku y od središnjeg položaja, a suprotna po smjeru, bit će gibanje harmonijsko

$$F = -cy \quad c - \text{konstanta opruge}$$

Vlastita frekvencija f neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$f = 1/2\pi \cdot \sqrt{c/m}$$

Iz diferencijalne jednadžbe neprigušenoga harmonijskoga titranja

$$m(d^2y/dr^2) + cy = 0$$

proizlazi rješenje:

- put $y = y_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ y_m - amplituda

- brzina $v = v_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ $|v_m| = \omega y_m$

- ubrzanje $a = -a_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ $|a_m| = \omega^2 y_m$

gdje znače:

t - vrijeme φ - faznu konstantu

$\omega_0 = 2\pi f$ - »kružna frekvencija« vlastitog titranja

$$\omega_0 = \sqrt{c/m} \quad \text{- pri običnom titranju}$$

$$\omega_0 = \sqrt{c/J} \quad \text{- pri kružnom titranju}$$

$$\text{Period (vrijeme njihaja)} \quad T = 1/f = 2\pi/\omega_0$$

2. Prigušeno slobodno titranje

Djeluje li na materijalnu točku što titra otpor R koji je razmjern brzini, ali suprotan po smjeru, bit će titranje prigušeno

$$R = -k(dy/dr) \quad k = \text{konstanta prigušivanja}$$

Za prigušeno titranje vrijedi diferencijalna jednadžba

$$m(d^2y/dr^2) + k(dy/dr) + cy = 0$$

Uvođenjem izraza

$$\lambda = k/2m = v\omega_0 \quad v = k/2\sqrt{cm}$$

dobivamo rješenje diferencijalne jednadžbe

$$y = y_0 e^{-\lambda t} \sin(\omega t + \varphi)$$

gdje je kružna frekvencija prigušenoga titranja

$$\omega = \sqrt{(c/m) - \lambda^2} = \omega_0 \sqrt{1 - v^2}$$

$v = 0$ - neprigušeno njihanje $v < 1$ - periodičko prigušeno titranje

Pri aperiodičnom gibanju ($v > 1$) nema titranja pa se put y postupno približava nuli.

3. Prisilno titranje

Na materijalnu točku koja titra djeluje — osim otpora R — još i vanjska sila F , npr.

$$F = F_0 \sin \omega t$$

Za takvo titranje vrijedi jednačba

$$m(d^2y/dt^2) + k(dy/dt) + cy = F_0 \sin \omega t$$

Približava li se kružna frekvencija ω prisilnog titranja kružnoj frekvenciji ω_0 vlastitog titranja, amplituda titranja se povećava i dostiže maksimum (rezonancija) pri kružnoj frekvenciji

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - 2\gamma^2}$$

odnosno, uz neznatno prigušivanje pri kritičnoj kružnoj frekvenciji ω_k

$$\omega_k = \omega_0 = \sqrt{c/m}$$

Pri prisilnom titranju bez prigušivanja postala bi amplituda kritične kružne frekvencije beskonačno velikom.

4. Kritična brzina vrtnje osovine

Karakteristika je elastičnog progiba osovine omjer c između sile F i deformacije y

$$c = F/y$$

Pri ekscentričnosti e težišta osovine mase m djeluje na nju pri rotaciji sila F_c , koja dodatno opterećuje osovinu za vrijednost y . Centrifugalna sila, koja zahvaća u težištu, udaljenom za $e + y$ od središnjice osovine u mirovanju, iznosi pri rotaciji kutnom brzinom ω

$$F_c = m\omega^2(e + y) = cy$$

Progib osovine pri rotaciji iznosi

$$y = (me\omega^2)/(c - m\omega^2)$$

Za kutnu brzinu kod koje bi bilo $c = m\omega^2$ (ne uzimajući u obzir prigušivanje) bilo bi $y = \infty$. Tome odgovaraju

$$\begin{aligned} \text{kritična kutna brzina} & \quad \omega_k = \sqrt{c/m} \\ \text{kritična brzina vrtnje} & \quad n_k = \omega_k/2\pi \end{aligned}$$

Za određivanje omjera c elastičnog progiba može se uzeti progib y_0 osovine u mirovanju što ga izaziva težina osovine $G = mg$:

$$c = G/y_0 = mg/y_0 \quad \omega_k = \sqrt{g/y_0}$$

Naraste li kutna brzina ω iznad kritične ω_k

$$\omega > \omega_k$$

smanjit će se progib y osovine pri rotaciji (osovina će se sama centrirati).

HIDROMEHANIKA

Zakone hidromehanike primjenjujemo za fluide (tekućine u širem smislu), tj. na sve kapljevine (tekućine u užem smislu) i na plinove do granice do koje ih još možemo smatrati praktički nestlačivima (inkompresibilnima), tj. do brzine strujanja oko 100 m/s. Isključene su tzv. nepravne tekućine, kao npr. katran, asfalt, med i sl.

Kod nestlačivog fluida mase m jesu volumen V i gustoća ρ konstantni

$$V = \text{konst} \quad \rho = m/V = \text{konst}$$

U idealnom fluidu nema sila trenja. Takav fluid ne postoji, ali njime često pojednostavljujemo računske probleme. U realnom fluidu postoji trenje između čestica – fluid je viskozan.

Viskoznost je otpor fluida protiv tangencijalnih sila ili kutnih deformacija čestica.

Dinamička viskoznost η definirana je Newtonovim zakonom.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

τ je naprezanje na smik, dv je razlika u brzini slojeva na razmaku dy , η je apsolutna (dinamička) viskoznost.

Kinematička viskoznost ν je omjer dinamičke viskoznosti η i gustoće ρ

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Mjere za viskoznost – vidi str. 65 i 72. Brojčane vrijednosti za kinematičku viskoznost – vidi u tablicama na str. 212 do 214.

HIDROSTATIKA

Hidrostatički tlak p je tlak u tekućini, što ga uzrokuje težina. Ovisi samo o visini h razine (nivoa) tekućine iznad mjesta mjerenja i gustoći tekućine ρ

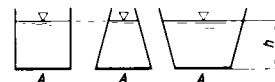
$$p = h \rho g$$

gdje je g zemaljsko ubrzanje ($= 9,81 \text{ m/s}^2$).

Sila tlaka F na horizontalno dno posude ovisi samo o hidrostatičkom tlaku p i o površini dna A

$$F = pA = h \rho g A$$

Ta sila tlaka, međutim, ne ovisi o obliku posude (»hidrostatički paradoks«).



Uzgon F_v je sila kojom tekućina djeluje okomito prema gore na tijelo uronjeno u tekućinu. Po veličini je jednak težini istisnute tekućine, a hvatište mu je u njezinu težištu (Arhimedov zakon)

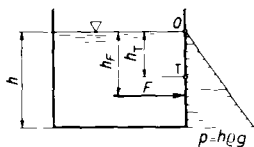
$$F_v = mg = \rho g V$$

m je masa, V volumen istisnute tekućine (istisnine), a ρ njena gustoća.

Sila tlaka na stijenke

Sila tlaka F tekućine gustoće ρ na ravnu stijenku posude kojoj je omeđena ploha površine A iznosi

$$F = h_T \rho g A$$



h_T je vertikalna udaljenost težišta (T) omeđene plohe od razine tekućine. Hvatište sile F je, međutim, ispod težišta plohe, na dubini

$$h_T = \frac{I}{h_T A}$$

gdje je I geometrijski moment tromosti omeđene plohe s obzirom na njezin rub u visini razine tekućine (0).

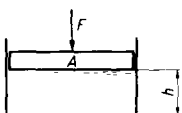
Pascalov zakon



Nariniti tlak širi se po tekućini nesmanjeno i jednako u svim smjerovima.

Tlak p na dno posude u kojoj je iznad površine tekućine (visine h i gustoće ρ) tlak p_0

$$p = p_0 + h \rho g$$



Tlak p na dno posude, uzrokovan u tekućini silom F na stap površine A iznosi

$$p = \frac{F}{A} + h \rho g$$

Atmosferski tlak p_a na površini tekućine prouzrokuje u tekućini stvarni tlak koji je veći od hidrostatičkog i iznosi

$$p = p_a + h \rho g$$

Pri proračunavanju posuda s obzirom na tlak tekućine, atmosferski tlak u tekućini ne uzimamo u obzir jer on djeluje i s druge strane stijenke posude, pa se djelovanja, u odnosu na stijenke, međusobno poništavaju.

Atmosfersko stanje

Zračni tlak p_a , temperatura t i gustoća ρ
Višegodišnji prosjek (po: Mende/Simon)

Godišnje doba	Tlak p_a mbar		Temperatura t °C		Gustoća ρ kg/m ³	
	0	2000	na visini h (m)		0	2000
siječanj	1 019	791	0	-3	1,28	1,026
srpanj	1 015	799	16	7	1,23	0,996
godišnji prosjek	1 016	795	8	0	1,25	1,008

Zbog vremenskih upliva mijenjaju se: zračni tlak za $\pm 5\%$, gustoća zraka za $\pm 20\%$, a relativna vlaga (vidi str. 193) među 60 i 100%.

Pri potpunosti zasićenosti zraka ($\varphi = 100\%$) zavisi apsolutna vlaga x o temperaturi t :

t	°C	-20	-10	0	10	20	30
x	g/m ³	0,883	2,14	4,86	9,46	17,5	31,1

Standardne (normne) vrijednosti zračnoga tlaka p_a , temperature t i gustoće ρ pri različitim nadmorskim visinama h (po ICAO – International Civil Aviation Organization)

h	p_a	t	ρ	h	p_a	t	ρ
m	mbar	°C	kg/m ³	m	mbar	°C	kg/m ³
0	1 013	15	1,225	2 500	737	-12,5	0,945
100	1 001	14,35	1,214	3 000	701	-4,5	0,910
200	989	13,7	1,202	4 000	616	-11	0,819
300	978	13,05	1,191	5 000	540	-17,5	0,736
400	966	12,4	1,179	6 000	472	-24	0,660
500	954	11,75	1,167	8 000	356	-37	0,526
600	943	11,1	1,157	10 000	265	-50	0,413
800	921	9,8	1,135	12 000	195	-56,5	0,314
1 000	898	8,5	1,111	15 000	121	-56,5	0,195
1 200	877	7,2	1,091	20 000	55	-56,5	0,0889
1 500	845	5,25	1,060	25 000	25	-56,5	0,0406
2 000	795	2,0	1,007	30 000	12	-42,8	0,0179

Kinematika viskoznost ν pri različitim nadmorskim visinama h :

h	km	0	5	10	15	20	25	30
ν	mm ² /s	14,61	22,10	35,23	73,03	160,0	350,0	835,7

HIDRODINAMIKA

Promatramo stacionarno strujanje, tj. ono, pri kojem brzina u određenoj točki ne mijenja s vremenom ni veličinu ni smjer.

Laminarno strujanje je ono, pri kojem se čestice gibaju u beskonačno tankim slojevima, što se klišu jedan po drugome bez miješanja. *Turbulento strujanje* je ono, pri kojem se čestice gibaju nepravilno u svim smjerovima. U obzir uzimamo samo njihovo prosječno gibanje u smjeru strujanja.

Jednadžba kontinuiteta glasi da je protok mase $q_m = \text{konst.}$ što možemo izraziti presjekom A , brzinom v i gustoćom ρ

$$q_m = A v \rho = \text{konst}$$

Za nestlačive fluide, za koje vrijedi $\rho = \text{konst.}$, i volumenski je protok $q_v = \text{konst}$

$$q_v = A v = \text{konst}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje nestlačivog fluida (bez trenja) glasi, da je suma svih energija (položajne + tlačne + brzinske) u svakom presjeku (na svakoj strujnici) konstantna. Bernoullijevu jednadžbu možemo izraziti (za dva promatrana presjeka 1 i 2)

– specifičnom energijom s obzirom na jedinicu mase

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = e = \text{konst}$$

– tlakom (energijom za jedinicu volumena)

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} = p = \text{konst}$$

– tlačnom visinom (energijom za jedinicu težine)

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{konst}$$

Bernoullijeva jednadžba za stacionarno strujanje realnog fluida uzima u obzir gubitke (od presjeka 1 do 2), koje izražavamo gubitkom tlaka Δp_t

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = z_2 \rho g + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta p_t$$

ili gubitkom tlačne visine Δh_t

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_t$$

U tim su jednadžbama: z_i – geodetska visina nad po volji odabranim horizontom, $p_i = h_i \rho g$ statički tlak u fluidu (gdje je h_i tlačna visina), ρ – gustoća i v_i – brzina strujanja.

Gubitak tlaka Δp_t ili tlačne visine Δh_t računamo s pomoću Darcyjeve formule (str. 141).

Bernoullijeva jednadžba za sustav koji jednoliko rotira (s gubicima)

$$z_1 \rho g + p_1 + \rho w_1^2/2 - \rho u_1^2/2 = z_2 \rho g + p_2 + \rho w_2^2/2 - \rho u_2^2/2 + \Delta p_t$$

Osim oznaka navedenih na kraju str. 136, u ovoj jednadžbi znače: w_i – relativnu brzinu fluida (s obzirom na rotirajući kanal), u_i – obodnu brzinu rotacije sustava.

Impulsni stavak

Struja fluida protoka mase q_m promijenit će pod utjecajem vanjskih sila (kojih je suma F) brzinu za Δv

$$F = q_m \cdot \Delta v = q_m(v_2 - v_1) = -R$$

$q_m v$ – sekundni impuls.

Budući da su sile i brzine vektorske naravi, treba istaknuti da je smjer sile F (odn. $-R$) identičan sa smjerom promjene brzine Δv .

Sila F kojom okoliš djeluje na fluid, jest aktivna sila, dok je sila R kojom fluid djeluje na okoliš – reaktivna sila. (Npr. u turbinama fluid djeluje na lopatice silom R , dok u pumpama lopatice djeluju na fluid silom F .)

Pritisak mlaza na plohu

Protok mase mlaza je $q_m v$, brzina mlaza je v .

Ravna ploča smještena okomito na smjer mlaza izvrgnuta je pritisku mlaza $R = q_m v$



Ravna ploča o koju udara mlaz pod kutom β izvrgnuta je pritisku mlaza

$$R = q_m v \cos \beta$$



Konveksna ploča o koju udara mlaz u sredini i otklanja se od prvobitnog smjera pod kutom β izvrgnuta je pritisku mlaza

$$R = q_m v (1 - \cos \beta)$$



Konkavna ploča o koju udara mlaz u sredini i skreće unatrag pod kutom β izvrgnuta je pritisku

$$R = q_m v (1 + \cos \beta)$$



Za kut $\beta = 0^\circ$ pritisak mlaza iznosi $R = 2 q_m v$

Konkavna ploča o koju udara mlaz pod kutom β_1 i skreće unatrag pod kutom β_2 izvrgnuta je pritisku mlaza

$$R = q_m v (\cos \beta_1 + \cos \beta_2)$$



Za kutove $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$ pritisak mlaza iznosi $R = 2 q_m v$

Reakcija mlaza koji izlazi s protokom mase q_m i brzinom v kroz izlazni otvor presjeka A iz posude gdje vlada tlak p iznosi

$$R = q_m v = 2 A p$$

Brzina istjecanja

Teoretska brzina istjecanja kroz maleni otvor iz otvorene posude u kojoj je stalna razina tekućine visine h iznad izlaza (Torricellijeva formula)

$$v_0 = \sqrt{2gh}$$

gdje je g ubrzanje sile teže.

Teoretska brzina istjecanja iz posude u kojoj je iznad tekućine gustoće ρ pretlak Δp

$$v_0 = \sqrt{2(g h + \Delta p / \rho)}$$

Ako visinu h ne treba uzeti u obzir (kod plinova i para), teoretska brzina istjecanja pri pretlaku Δp

$$v_0 = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Zbog trenja u mlazu i o sapnicu bit će stvarna brzina manja

$$v = \varphi v_0$$

U dobro zaobljene sapnice koeficijent je brzine $\varphi = 0,95 \dots 0,99$.

Količina istjecanja

a) Količina istjecanja kroz otvor presjeka A izražena protokom mase q_m iznosi

$$q_m = A v \rho$$

gdje je v izlazna brzina i ρ gustoća fluida.

Zbog kontrakcije mlaza μ i uzimajući u obzir koeficijent brzine φ dobivamo

$$q_m = \alpha A v_0 \rho$$

α je koeficijent istjecanja koji združuje koeficijente kontrakcije i brzine: $\alpha = \mu \varphi$.

Pri istjecanju tekućine iz otvorene posude je

$$q_m = \alpha A \rho \sqrt{2gh}$$

Za istjecanje iz zatvorene posude u kojoj je iznad površine tekućine pretlak Δp vrijedi

$$q_m = \alpha A \rho \sqrt{2(g h + \Delta p / \rho)}$$

Za $h = 0$ (što vrijedi za plinove i pare) dobiva se

$$q_m = \alpha A \sqrt{2 \rho \cdot \Delta p}$$

b) Količina istjecanja kroz otvor presjeka A izražena volumenskim protokom fluida q_V iznosi

$$q_V = q_m / \rho = \alpha A v_0$$

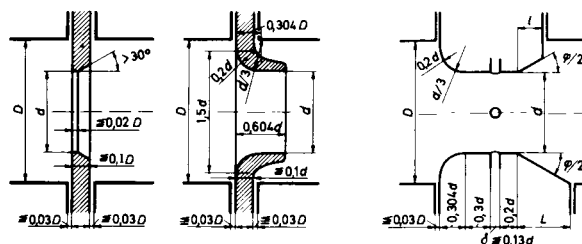
Protok

1. Za određivanje protoka kroz cijevod služe:

prigušnice

sapnice

Venturijeve sapnice
(gore - kraći, dolje - dulji oblik)



Protječe li najužim otvorom presjeka A fluid gustoće ρ , nastat će pad tlaka Δp . Protok izražavamo:

– protokom mase q_m

$$q_m = \alpha A \sqrt{2 \rho \cdot \Delta p}$$

– volumenskim protokom q_V

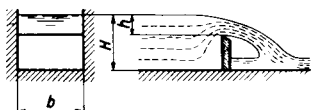
$$q_V = \alpha A \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}$$

Koeficijent protjecanja α određen je za svaku vrstu mjernog uređaja u ovisnosti o omjeru $m = (d/D)^2$, gdje je D promjer cijevi, a d promjer otvora protjecanja kojemu je presjek $A (= d^2 \pi / 4)$.

Gubitak tlaka u prigušnici odnosno sapnici Δp_t ovisan je o omjeru m :

$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$	Koeficijent α za		
	prigušnice	sapnice	venturijeve sapnice
0,05	0,598	–	–
0,10	0,602	0,989	0,989
0,15	0,608	0,993	0,994
0,20	0,615	0,999	1,001
0,25	0,624	1,005	1,010
0,30	0,634	1,015	1,020
0,35	0,645	1,029	1,032
0,40	0,660	1,043	1,048
0,45	0,676	1,060	1,067
0,50	0,695	1,081	1,091
0,55	0,716	1,108	1,120
0,60	0,740	1,142	1,155
0,65	0,768	1,183	–
Δp_t	$(1 - m) \cdot \Delta p$	$(1 - m)/(1 + m) \cdot \Delta p$	$\approx 0,1 \cdot \Delta p$

2. Protok u otvorenim kanalima mjerimo s pomoću preljeva. Za pravokutni preljev visine h i širine b vrijedi



$$q_v = \frac{2}{3} \mu h b \sqrt{2gh}$$

Koeficijent μ ovisan je o visinama H i h te iznosi

	h (m)					
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,400	0,800
$H = 0,6$ m	0,639	0,629	0,630	0,652	—	—
$H = 1,0$ m	0,638	0,628	0,624	0,630	0,666	—
$H = 1,6$ m	0,638	0,627	0,622	0,623	0,636	0,693
$H = 2,4$ m	0,638	0,627	0,622	0,620	0,626	0,650

Zakoni sličnosti strujanja

Promjene pri strujanju ne možemo obuhvatiti samo teoretskim sredstvima, već ih treba i mjeriti. Strujanja, međutim, ne moramo mjeriti na predmetima u naravnoj veličini, već to možemo načiniti i na geometrijski sličnim modelima (manjima ili većima). U tu svrhu se mora — osim geometrijske — postići još kinematička i dinamička sličnost strujanja.

Reynoldsova značajka Re je najviše upotrebljavani kriterij za sličnost strujanja nestlačivih tekućina u potpuno ispunjenim cijevima gdje težina ne utječe na profil brzine.

Reynoldsova značajka (bezdimenzijska) jest omjer sila tromosti i sila trenja i iznosi

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

gdje su: v — brzina strujanja, l — karakteristična linearna dimenzija, ν — kinematička viskoznost.

Kinematička viskoznost ν iznosi (pri 20 °C) za vodu 1,01 mm²/s, za zrak pa 15,7 mm²/s. Kinematička viskoznost za vodu, zrak i druge fluide pri različitim temperaturama sabrana je na str. 212 do 214.

Kod okruglih je cijevi promjera d : $Re = vd/\nu$

Općenito vrijedi: $Re = vd'/\nu$

d' je tzv. »hidraulički promjer«

$$d' = 4A/O$$

gdje su: A — presjek voda, O — fluidom omočeni opseg.

Reynoldsovom značajkom razgraničujemo laminarno i turbulentno strujanje. Za strujanje u cijevima vrijedi $Re < 2320$ — laminarno strujanje
 $Re > 2320$ — turbulentno strujanje

Otpori strujanja u cijevima i armaturama

Gubitak tlaka zbog otpora pri strujanju fluida gustoće ρ brzinom v daje Darcyjeva formula

$$\Delta p = \zeta \rho v^2 / 2$$

ζ je koeficijent gubitaka, koji za ravne cijevi kružnog presjeka iznosi

$$\zeta = \lambda l / d$$

λ je koeficijent trenja, l je duljina cijevi, d je promjer cijevi.

1. Koeficijent trenja λ

Koeficijent trenja λ ovisi o Reynoldsovoj značajki Re i relativnoj hrapavosti cijevi k/d , gdje je k apsolutna hrapavost (prosječna visina izbočina) stijenke.

U laminarnom području (do $Re < 2320$) λ ovisi o obliku cijevi i o Re , te iznosi

$$\lambda = \varphi 64 / Re$$

φ je faktor oblika cijevi. Za okrugle je cijevi $\varphi = 1$ pa je

$$\lambda = 64 / Re = 64 \nu / vd$$

Pri turbulentnom strujanju ($Re > 2320$) razlikujemo:

a) *Hidraulički glatke cijevi.* Cijevi smatramo hidraulički glatkima do

$$Re \approx d/k \cdot \lg(0,1 d/k) \approx 2 d/k$$

Za proračun λ_g služi Prandtl-Karmanova formula

$$1/\sqrt{\lambda_g} = 2 \lg(0,398 Re \sqrt{\lambda_g})$$

Vrijednosti λ_g za različite Re :

Re	2320	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸
λ_g	0,04725	0,03089	0,018	0,01165	0,00811	0,005945

Za praktičko računanje služimo se eksplicitnom, aproksimativnom Colebrookovom formulom $\lambda_g = 0,31 / (\lg(0,143 Re))^2$

U cijelom praktički uporabivom području $Re = 5 \cdot 10^3 \dots 10^8$ iznosi odstupanje $\approx \pm 1\%$.

b) *Prelazno područje,* u kojem vrijedi Colebrookova formula

$$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg(0,269 k/d + 2,51/Re \sqrt{\lambda})$$

praktički završava kod $Re \approx 400 d/k \cdot \lg(3,715 d/k) \approx 10^3 d/k$.

Za praktičko proračunavanje služi eksplicitna, aproksimativna Pečornikova formula

$$\lambda = 0,25 / [\lg(15/Re + 0,269 k/d)]^2$$

koja vrijedi s maksimalnom pogreškom od $\approx 6\%$ za $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 10^8$ i relativne hrapavosti $k/d = 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-6}$.

c) Područje potpune hrapavosti (koje obuhvaća vrijednosti $Re > 400 d/k \cdot \lg(3,715 d/k)$, u kojemu određujemo λ_h po Nikuradseovoj formuli

$$\lambda_h = 0,25 / [\lg(3,715 d/k)]^2$$

Vrijednosti λ_h za različite d/k :

d/k	10	40	60	100	200	500	1000
λ_h	0,1014	0,0529	0,0453	0,0378	0,0303	0,0234	0,0196

*

Sa stanovitim ograničenjima ($k/d < 0,01$ in $\lambda < 0,05$) i s nešto manjom točnošću ($\pm 5\%$) vrijedi u području $Re = 4 \cdot 10^3 \dots 10^7$ (dakle u svim područjima) Moodyjeva formula

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-3} \left(1 + \sqrt[3]{2 \cdot 10^4 k/d + 10^6 / Re} \right)$$

U glatkom području je $k/d = 0$, dok je u potpuno hrapavom području $Re \approx \infty$ pa formula prelazi u oblik

$$\lambda_h = 5,5 \cdot 10^{-3} + 0,15 \sqrt[3]{k/d}$$

Apsolutne prosječne visine hrapavosti k (po Richter)

Materijal i stanje cijevi	k mm
Vučene cijevi od bakra, mjedi, bronce, aluminijska, stakla, umjetnih tvari itd.	... 0,002
Vučene čelične cijevi — nove	0,02 ... 0,10
— malo zardale	... 0,40
— jako inkrustirane	... 3
Zavarene čelične cijevi — nove	0,04 ... 0,10
— nove, prevučene bitumenom	$\approx 0,05$
— rabljene, jednoliko zardale	$\approx 0,15$
— nakon višegodišnje uporabe	$\approx 0,5$
— malo inkrustirane	$\approx 1,5$
— jako inkrustirane	2 ... 4
Zakovane čelične cijevi (prema načinu izvedbe)	0,5 ... 10
Pocinčane čelične cijevi — nove	0,07 ... 0,15
Cijevi od lijevanog željeza — nove	0,25 ... 1
— nove, prevučene bitumenom	0,1 ... 0,15
— rabljene, malo zardale	1 ... 1,5
— inkrustirane	1,5 ... 4
Drvene cijevi, nove (uporabom postaju glade)	0,2 ... 1
Betonske cijevi — sirove	1 ... 3
— zagladene	0,3 ... 0,8

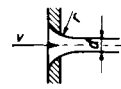
2. Koeficijenti gubitaka ζ

Ulazna ušća

zaobljena

$r > 0,5 d$

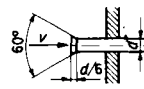
$\zeta = 0,05$



konična

(konfuzor)

$\zeta = 0,20$



oštra

sa stijenkom

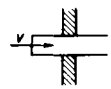
$\zeta = 0,50$



oštra

bez stijenke

$\zeta = 1,00$



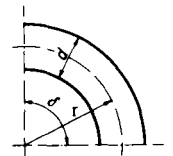
Kružni lukovi polumjera zakrivljenosti r , s kružnim ili kvadratnim presjekom i kutom skretanja $\delta = 90^\circ$:

r/d	1,0	1,5	2	3	4	5	6	10
ζ	0,27	0,20	0,15	0,13	0,10	0,10	0,10	0,11

Navedeni ζ vrijede za tehnički glatke cijevi (npr. lim), dok za tehnički hrapave cijevi (npr. sivi lijev, zide i sl.) uzimamo dvostruke vrijednosti.

Za kutove $\delta = 0 \dots 180^\circ$ treba vrijednosti za ζ množiti s faktorom n :

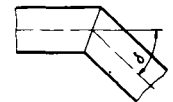
δ	30°	60°	90°	120°	150°	180°
n	0,4	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7



Koljena

δ	15°	30°	45°	60°	90°	105°	120°
ζ_g	0,04	0,13	0,24	0,47	1,13	1,80	2,26
ζ_h	0,06	0,17	0,32	0,68	1,27	2,00	2,54

Vrijednosti ζ_g vrijede za glatke, a vrijednosti ζ_h za hrapave stijenke cijevi.



Izlazni otvori (otvori u stijenama)



provrt u stijenki (oštri rubovi)

$\zeta = 1,8$



cilindrični nastavak

$\zeta = 0,5$



konični nastavak

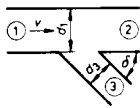
$\zeta = 0,25$



zaobljenje s nastavkom

$\zeta = 0,1$

Odvojeci



Volumenski protoci:

$$q_{v1} = q_{v2} + q_{v3} - \text{u dovodu 1,}$$

$$q_{v2} - \text{u dovodu 2, } q_{v3} - \text{u odvojkju 3}$$

Gubici – u odvodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2 \rho v^2 / 2$
 – u odvojkju 3: $\Delta p_3 = \zeta_3 \rho v^2 / 2$
 v – brzina u dovodu 1

Odvojeci jednakog kruznog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{v3}/q_{v1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90^\circ$	ζ_2	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ_3	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
$\delta = 45^\circ$	ζ_2	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ_3	0,90	0,66	0,47	0,33	0,29	0,35

Odvojeci jednakog kvadratnog presjeka

q_{v3}/q_{v1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90^\circ$	ζ_2	0,04	0,00	0,05	0,15	0,28	0,42
	ζ_3	0,91	0,75	0,70	0,74	0,79	0,84
$\delta = 45^\circ$	ζ_2	0,10	0,03	0,05	0,14	0,29	0,49
	ζ_3	0,88	0,65	0,47	0,32	0,20	0,18

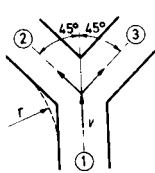
Račve (Y – komadi) s kružnim ili kvadratnim presjekom površine A

Volumenski protok:

$$\text{u dovodu 1: } q_v$$

Gubici:

$$\Delta p = \zeta \rho v^2 / 2$$



Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0,5 A_1$

od 1 prema 2 i 3	0,55	0,75
od 1 prema 2; dok je 3 zatvoren	0,50	1,35

smanjenje ζ pri zaobljenju (r) za $\approx 40\%$ $\approx 40\%$

ζ se odnosi na brzinu v u dovodu 1.

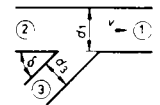
Sastavci

Volumenski protoci:

$$q_{v1} = q_{v2} + q_{v3} - \text{u odvodu 1,}$$

$$q_{v2} - \text{u dovodu 2, } q_{v3} - \text{u priključku 3}$$

Gubici – u dovodu 2: $\Delta p_2 = \zeta_2 \rho v^2 / 2$
 – u priključku 3: $\Delta p_3 = \zeta_3 \rho v^2 / 2$
 v – brzina u odvodu 1

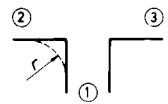


Sastavci jednakog kruznog presjeka ($d_1 = d_2 = d_3$)

q_{v3}/q_{v1}		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\delta = 90^\circ$	ζ_2	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ_3	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
$\delta = 45^\circ$	ζ_2	0,05	0,17	0,18	0,05	-0,20	-0,57
	ζ_3	-0,90	-0,37	0,00	0,22	0,37	0,38

O komiti sastavci (T – komadi) kruznog ili kvadratnog presjeka A

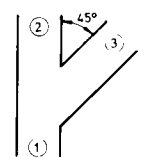
Protok	ζ za oštre rubove	
	$A_1 = A_2 = A_3$	$A_2 = A_3 = 0,5 A_1$
od 2 prema 3; 1 zatv.	0,50	0,50
od 1 prema 2 i 3*	1,00	1,90
od 1 prema 2; 3 zatv.*	1,40	3,70
smanjenje ζ pri zaobljenju (r) za	$\approx 20\%$	$\approx 60\%$



* ζ vrijedi za brzinu v u dovodu 1.

Kosi cijevni priključci (45°) kruznog presjeka, površine A pri sastavljanju odnosno razdvajanju tokova (približne vrijednosti):

Protok	ζ
	$A_1 = A_2 = A_3$
od 1 prema 2; 3 zatv.	0,15
od 2 prema 1; 3 zatv.	0,05
od 1 prema 3; 2 zatv.	0,50
od 3 prema 1; 2 zatv.	0,50
od 2 prema 3; 1 zatv.	3,0
od 3 prema 2; 1 zatv.	3,0



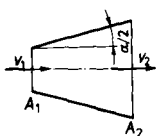
Promjene presjeka od površine A_1 na površinu A_2

Prijelaz okruglog presjeka u kvadratni (ili obrnuto) jednake površine
 $\zeta = 0,1 \dots 0,2$.

Postupno proširenje (difuzor) za kut proširenja $\alpha = 8 \dots 14^\circ$

$$\zeta_1 = (0,2 \dots 0,4) [1 - (A_1/A_2)^2]$$

Gubitak se odnosi na brzinu v_1 .

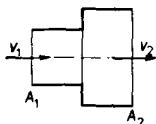


A_2/A_1	$\alpha = 10 \dots 15^\circ$	$20 \dots 30^\circ$
1,25 ... 1,75	$\zeta_1 = 0,05$	0,15
2,00 ... 2,50	0,10	0,30

Naglo proširenje $\zeta_1 = (1 - A_1/A_2)^2$

A_1/A_2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ζ_1	1,00	0,64	0,36	0,16	0,04	0,00

Gubitak se odnosi na brzinu v_1 .



Postupno suženje (konfuzor)

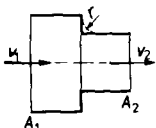
za kutove suženja α do 45° : $\zeta = 0$

Naglo suženje za oštre rubove

A_2/A_1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ζ_1	9,4	1,8	0,9	0,34	0,25	0,16	0,10

Gubitak se odnosi na brzinu v_1 .

Za pravilna zaobljenja (r) je: $\zeta \approx 0,05$.



Prigušnice i sapnice (vidi str. 155)

Gubici u prigušnici ili sapnici ovise o omjeru površine njezina otvora A_1 i površine cijevi A_2 , a odnose se na brzinu u cijevi v

Prigušnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
		ζ	249	102	53	31	19	9	4

Sapnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
		ζ	81	16	5,4	2,25	1,0	0,44	0,18	0,06

Venturijeve sapnice	$m = A_1/A_2$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
		ζ	17	7	3	2	1	0,5	0,3

Armature

Armature	ζ
Normalni ventili	3,9
Poboljšani ventili	2,5 ... 3,4
Ventili s nesmetanim prolazom (eliptični presjek)	0,6
Zaklopke (leptiraste) — otvorene	0,2
Zasuni (pravilno izvedeni) — otvoreni	0,05

Otpori gibanja u fluidu

Otpor gibanja tijela u fluidu (aerodinamički otpor) iznosi

$$F_r = C_r A p_k$$

gdje znače: C_r — koeficijent otpora (bezdimenzijski broj), A — površinu projekcije tijela na ravninu okomitu na smjer gibanja, p_k — kinetički tlak.

Kinetički tlak pri gibanju tijela relativnom brzinom v u fluidu gustoće ρ iznosi

$$p_k = \rho v^2 / 2$$

Koeficijenti otpora C_r

Predmet*	C_r
kružna ploča	1,11
2 kružne ploče	$l/d = 1$: 0,93 1,5: 0,78 2: 1,04 3: 1,52
kugla	$Re > (1,5 \dots 4) 10^5$: 0,09 ... 0,18 $Re < (1,5 \dots 4) 10^5$: 0,47
polukugla-konveksna	bez dna s dnom: 0,34 0,4
polukugla-konkavna	bez dna s dnom: 1,33 1,17
valjak	$Re < 9 \cdot 10^4$; $l/d = 1$: 0,63 2: 0,68 5: 0,74 10: 0,82 40: 0,98 ∞ : 1,20 $Re > 5 \cdot 10^5$; $l/d = \infty$: 0,35
aerodinamički profil	$Re > 10^5$ $l/d = 2$: 0,2 3: 0,1 5: 0,06 10: 0,083 20: 0,094

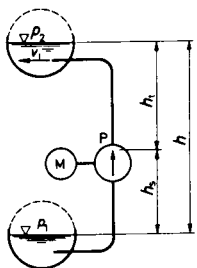
* Strelica na skici pokazuje smjer djelovanja otpora — suprotno smjeru relativne brzine tijela u fluidu.

HIDRAULIČKI STROJEVI

SISALJKE (PUMPE, CRPKE)

Sisaljke služe za prenos kapljevine s nižega na viši položaj ili s nižega na viši tlak ili za oboje. Kadšto služe i tome da – posebnim uređajem (mlaznicom) – postignemo znatniju izlaznu brzinu iz cijevi (npr. štrcaljke).

Dobavna visina (napor)



Sisaljke povećavaju specifičnu energiju e (J/kg) kapljevine gustoće ρ , od ulaza u sisaljku do izlaza iz nje. To povećanje energije redovno izražavamo visinom stupca crpljene kapljevine, a nazivamo je dobavnom visinom H

$$H = \frac{e}{g}$$

(g – zemljino ubrzanje)

Potrebnu dobavnu visinu H određujemo karakteristikom priključenoga cijevnoga sistema H_c

$$H = H_c = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h + h_r + \frac{v_1^2}{2g}$$

gdje su: p_1 i p_2 – tlakovi u usisnoj i tlačnoj posudi; $h = h_s + h_t$ – ukupna geodetska (usisna i tlačna) visina, h_r – gubici u cijevnom sistemu; v_1 – izlazna brzina. (Ulazna je brzina zanemarena, dok je izlazna brzina katkad znatna, npr. pri štrcaljkama.)

Karakteristika cijevnoga sistema mijenja se s protokom.

Povećanje specifične energije u sisaljci iznosi

$$e = gH = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(h + h_r) + \frac{v_1^2}{2}$$

Ako su tlakovi p_1 i p_2 jednaki zračnome p_a ($p_1 = p_2 = p_a$) – kao npr. pri štrcaljkama – vrijedi

$$e = g(h + h_r) + \frac{v_1^2}{2}$$

Kad je izlazna brzina malena, zanemarujemo zadnji član.

Dopuštena usisna visina (geodetska) $h_{s,dop}$ za kapljevine gustoće ρ ovisi o tlaku p_1 (apsolutnom) u donjoj (usisnoj) posudi, tlaku p_T zasićene pare pri temperaturi tekućine T , gubicima u usisnoj cijevi h_{rs} i o posebnim gubicima h_p sisaljke (ovisnim o vrsti sisaljke)

$$h_{s,dop} \leq \frac{p_1 - p_T}{\rho g} - h_{rs} - h_p$$

Ako je donja posuda otvorena ($p_1 = p_a$), dopuštena geodetska usisna visina ovisi o zračnom tlaku p_a , koji se mijenja s nadmorskom visinom.

Za vodu su tlačne visine zraka $h_a (= p_a / \rho g)$ – u ovisnosti o nadmorskoj visini:

nadmorska visina	0	100	300	500	1000	2500 m
h_a	10,3	10,2	9,9	9,7	9,2	7,7 m

Tlak zasićene pare p_T ovisi o vrsti kapljevine i njoj temperaturi T .

Kod vode je tlačna visina zasićene pare $h_T (= p_T / \rho g)$ – u ovisnosti o temperaturi T :

T	5	10	20	50	80	100 °C
h_T	0,09	0,12	0,24	1,26	4,83	10,33 m

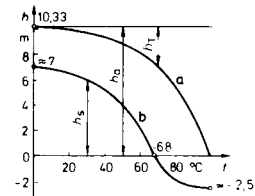
Gubitak tlaka u usisnoj cijevi računamo prema Darcyju (str. 141).

Posebni gubici u sisaljci su ovisni:

- pri stapnim sisaljka od otvaranja usisnog ventila i utjecaja usisnog vjetrenika,
- pri turbopumpama od pojave kavitacije.

U dijagramu (desno) prikazana je usisna visina vode na površini mora u ovisnosti od temperature vode.

Zbog navedenih utjecaja ne može geodetska usisna visina h_s u vode s temperaturom od 15 °C biti veća od 7 m, dok pri temperaturi od 70 °C voda mora sisaljki pritjecati. Lako hlapive kapljevine moraju uvijek pritjecati sisaljki. (Kod benzina, npr. time spriječavamo nastajanje lako upaljivih para!)



a – teoretska krivulja
b – stvarna krivulja

Snagu, potrebnu za pogon sisaljke proračunavamo na temelju prirasta specifične energije e odn. dobavne visine H . Za kapljevину gustoće ρ pri masenom protoku q_m odnosno volumenskom protoku q_v iznosi:

$$\begin{aligned} \text{teoretska snaga} \quad P_0 &= q_m e = q_m g H = q_v \rho g H \\ \text{unutarnja snaga} \quad P_1 &= \frac{P_0}{\eta_i} \\ \text{efektivna snaga} \quad P &= \frac{P_1}{\eta_m} = \frac{P_0}{\eta_i \eta_m} \\ p &= \frac{P_0}{\eta} = \frac{q_m e}{\eta} = \frac{q_m g H}{\eta} = \frac{q_v \rho g H}{\eta}, \end{aligned}$$

gdje su: η_i – unutarnja korisnost, η_m – mehanička korisnost, η – efektivna korisnost, koja iznosi

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m$$

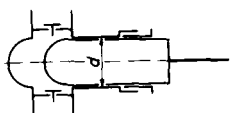
Korisnosti za različite vrste sisaljki i ventilatora iznose:

	η_i	η_m	η
stapne sisaljke	0,90 ... 0,95	0,88 ... 0,95	0,80 ... 0,90
turbopumpe	0,55 ... 0,90	0,95	0,60 ... 0,85
ventilatori	–	–	0,50 ... 0,90

Te korisnosti vrijede za najpovoljnije pogonske uvjete. Pri promjenljivim uvjetima djelovanja (promjenljiv protok, promjenljiva dobavna visina ili brzina vrtnje) korisnosti se mijenjaju, i to osobito znatno kod turbopumpi (vidi str. 152).

Stapne sisaljke

Stapne su sisaljke izgubile svoj nekadašnji značaj (male brzine), ali se upotrebljavaju i nadalje za male dobave ili veoma visoke tlakove.



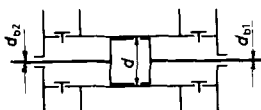
Volumenski protok iznosi teoretski:

– kod jednoradnih stapnih sisaljki promjera cilindra d , stapaja s i brzine vrtnje n

$$q_{v0} = \frac{\pi d^2}{4} s n$$

– kod dvoradnih sisaljki s promjerima stapajice d_{b1} i d_{b2}

$$q_{v0} = \frac{\pi}{4} (2d^2 - d_{b1}^2 - d_{b2}^2) s n$$



Dobava sisaljke, tj. stvarni volumenski protok q_v , iznosi zbog volumetrijskih gubitaka (kod stapa, ventila itd.) samo

$$q_v = \lambda q_{v0},$$

gdje je stupanj dobave $\lambda = 0,93 \dots 0,98$.

Dobava q_v je kod stapnih sisaljki nejednolika. Ona se mijenja već prema položaju (kutu α) osnaca stapnog mehanizma.

Dobava q_v odgovara, prema sl. a, jednoradnoj stapnoj sisaljci; prema sl. b dvoradnoj, odnosno jednoradnoj, ali sa 2 cilindra (s osnacima pod kutom od 180°).

Nejednolikost stapnih sisaljki ublažava se vjetrenicima (zračnim komorama) ili većim brojem cilindara (npr. kod triju cilindara su osnaci međusobno razmaknuti za 120° , sl. c).

Vjetrenici na usisnoj strani povećavaju usisnu visinu, a na tlačnoj strani su zaštita protiv hidrauličkog udara.

Brzina vrtnje stapnih pumpi iznosi

$$0,75 \dots 4,7 \text{ okr./s } (= 45 \dots 280 \text{ okr./min}).$$

Pri konstantnoj brzini vrtnje (i nepromijenjenom stapaju) bit će dobava konstantna.

Usisna visina h_s računa se pri stapnim pumpama do tlačnog ventila i iznosi:

– pri pumpama s usisnim vjetrenikom

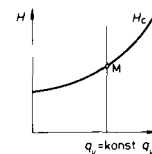
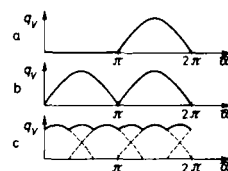
$$h_{s \text{ dop}} \leq \frac{p_1 - p_T}{\rho g} - h_{rs} - h_v$$

gdje su: h_{rs} – gubitak visine u usisnoj cijevi; h_v – gubitak visine pri otvaranju usisnog ventila ($\approx 2 \text{ m}$);

– pri pumpama bez usisnog vjetrenika

$$h_{s \text{ dop}} \leq \frac{p_1 - p_T}{\rho g} - \left(h_v + a n^2 r l_s \frac{A}{A_s} \right)$$

gdje su: $a = 4,82 \text{ s}^2/\text{m}$, n – brzina vrtnje (okr./s), r – radij osnaca, l_s – duljina usisne cijevi, A – korisni presjek cilindra pumpe, A_s – presjek usisne cijevi.



M – radna točka

Turbopumpe

Turbopumpe su skupno ime za radijalne i aksijalne (rotacijske) pumpe koje djeluju po Eulerovim zakonima za turbostrojeve.

U praksi se često sve turbopumpe (radijalne i aksijalne) nepravilno nazivaju »centrifugalnim« pumpama, iako su zapravo samo radijalne pumpe centrifugalne.

Brzohodnost (specifična brzina vrtnje) n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_v}{H}}$$

pokazuje koju bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična pumpa, izvedena za dobavnu visinu H (m), protok (dobavu) q_v (m^3/s) i brzinu vrtnje n , da bi pri dobavnoj visini $H_1 = 1$ m dobavljala $q_{v1} = 1$ m^3/s . (Prividna nekoherentnost veličina u toj jednadžbi otpada, ako pod simbolima H i q_v razumijevamo bezdimenzijske omjere H/H_1 i q_v/q_{v1} .)

Sve geometrijski slične turbopumpe koje imaju slične protočne uvjete (geometrijski slične trokute brzina) imaju i jednaku brzohodnost. Ona iznosi za različite turbopumpe:

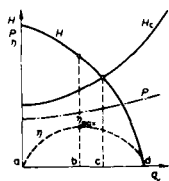
radijalne	$n_q = 0,23 \dots 1,7$ okr/s = 14 ... 100 okr/min
aksijalne (propelerne)	$n_q = 1,7 \dots 10$ okr/s = 100 ... 600 okr/min

Manjoj brzohodnosti n_q odgovara manja brzina vrtnje, manji protok i veća dobavna visina.

Za visokotlačne sisaljke kojima je brzohodnost $n_q < 0,23$ okr/s (odn. < 14 okr/min), izabiremo sisaljke s više stupnjeva.

Karakteristike turbopumpi (i ventilatora)

Pri konstantnoj brzini vrtnje n dobavna visina H , korisnost η i snaga P potrebna za pogon sisaljke ovise o dobavi q_v (koju možemo mijenjati prigušivanjem).



U dijagramu radijalne sisaljke $H = f(q_v)$ odgovaraju točke:

- radu pri potpuno zatvorenom izlaznom otvoru ($q_v = 0$); sva se snaga pretvara u toplinu (porast temperature kapljavine!);
- radu pri optimalnim uvjetima (η_{max});
- stvarnom radu pri priključku pumpe na cjevovod ($H = H_c$);
- radu na prazno ($H = 0$; samo teoretski!).

Pri promjeni brzine vrtnje od n_1 na n_2 mijenjaju se za jednu te istu sisaljku protok q_v , dobavna visina H i snaga P po zakonu afiniteta

$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Usisna visina h_s je vertikalna udaljenost osi pumpe (pri ulaznoj površini rotora) od površine kapljavine u usisnoj posudi (crpilištu).

Dopuštena usisna visina iznosi

$$h_{s,dop} \leq \frac{p_1 - p_T}{\rho g} - h_{rs} - \sigma H$$

gdje je kavitacijski koeficijent σ za pumpe (po Stepanovu) ovisan o brzohodnosti n_q (okr./s)

$$\sigma \approx 0,287 n_q^{4/3}$$

(Prividna nesuvislost u toj jednadžbi ne postoji, ako pod n_q razumijevamo bezdimenzijski omjer n_q/n_1 , pri čemu je $n_1 = 1$ okr./s)

Turbopumpne redovno ne mogu same usisati tekućinu, već se mora usisna cijev napuniti tekućinom. Da bi usisna cijev i za vrijeme pogonskog prekida ostala napunjena tekućinom, ugrađuje se na njezinu dnu odbojni (»nožni«) ventil ili zaklopka. – Ima, međutim, i tzv. samousisnih sisaljki u kojih je prigrađen poseban uređaj da mogu usisati tekućinu i kad je usisna cijev napunjena zrakom.

Ventilatori

Ventilatori služe za transport plinova i para pa su zapravo sisaljke za plinove i pare u području njihove nestlačivosti.

Kao turbostrojevi, oni se pokoravaju istim zakonima kojima i turbopumpe, samo što prirast specifične energije e , odnosno dobavnu visinu H izraženu u stupcu fluida, obično izražavamo prirastom (»skokom«) tlaka (»naporom«) Δp

$$\Delta p = e \rho = H \rho g$$

gdje je ρ – gustoća dobavnog fluida.

Karakteristika cjevovoda $\Delta p_c (= H_c \rho g)$ načelno je jednaka onoj za pumpe s razlikom što – zbog male gustoće plinova – ne uzimamo u obzir geodetsku visinu h

$$\Delta p_c = p_2 - p_1 + \Delta p_T + \rho \frac{v_1^2}{2}$$

Ventilatore dijelimo također prema brzohodnosti na:

radijalne	$n_q = 0,1 \dots 1,67$ okr./s = 6 ... 100 okr./min
aksijalne (propelerne)	$n_q = 1,17 \dots 10$ okr./s = 70 ... 600 okr./min

Karakteristike ventilatora u načelu su slične karakteristikama turbopumpi (vidi str. 152).

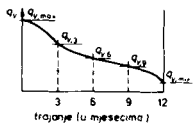
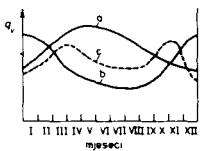
VODNE TURBINE

Vodna snaga P_0 dana je raspoloživim protokom vodne mase q_m ili volumenskim protokom q_v i korisnim padom H

$$P_0 = q_m g H = q_v \rho g H$$

gde je ρ gustoća vode.

Protok je ovisan o karakteristikama rijeke kojoj pripada određeno oborinsko područje. Visokogorske rijeke (»a« — npr. Drava) imaju najveći protok u kasno proljeće i rano ljeto, kad se u visokim planinama tope ledenjaci. Primorske rijeke (»b« — npr. Neretva) imaju najveći protok u doba zimskih kiša. Srednjogorske rijeke (»c« — npr. Sava) imaju po dva maksimuma — u proljeće i u jesen.



Protok je, osim toga, ovisan o vlažnosti godine (sušne i vlažne godine). Pri ocjenjivanju protoka uzimamo u obzir njegov prosjek kroz duži niz godina (npr. 35 godina).

Radi prosuđivanja rentabilnosti postrojenja i izbora turbine ustanovljujemo osim najvećeg i najmanjeg protoka ($q_{v, \max}$ i $q_{v, \min}$) još i protoke koji godišnje traju (ukupno) 3 mjeseca ($q_{v, 3}$), 6 mjeseci ($q_{v, 6}$) ili 9 mjeseci ($q_{v, 9}$).

Nejednolikost protoka izravnavamo akumulacijom vode u vrijeme većeg protoka odnosno manjeg potroška. Akumulacija može biti dnevna ili tjedna (brane) ili godišnja (dolinske brane). U posebnim slučajevima viškom energije u vrijeme malog opterećenja crpimo vodu u visoko smještene akumulacijske bazene, da je odatle u vrijeme vršnog opterećenja iskorištavamo.

Korisni pad H ovisi o geodetskom padu h (tj. o razlici vodenih razina na najvišem mjestu i na izlazu iz turbinskog postrojenja) te o gubicima h_t u dovodu (cjevovod, armature itd.)

$$H \approx h - h_t$$

Točno određivanje raspoloživog pada H je — za razne vrste turbinskih postrojenja — definirano u međunarodnim propisima za primopredaju vodenih turbina.

Geodetski pad h mijenja se s promjenom protoka. Povećani protok izaziva porast vodenih razina, a osobito razine na izlazu, zbog čega se smanjuje geodetski pad. Pri razmjerno malom padu njegovo je smanjenje vrlo osjetljivo i može unatoč povećanom protoku prouzročiti smanjenje vodne snage P_0 .

Suaga turbine

Teoretska snaga P_0 turbine jednaka je raspoloživoj vodnoj snazi

$$P_0 = q_m e = q_m g H = q_v \rho g H$$

gdje q_m , odnosno q_v znači maseni odnosno volumenski protok kroz turbinu.

Unutarnja snaga P_i smanjena je za unutarnje gubitke koje uzimamo u obzir unutarnjom korisnošću η_i

$$P_i = \eta_i P_0$$

Unutarnja korisnost turbina (umnožak hidrauličke korisnosti η_h i volumetrijske korisnosti η_v ; $\eta_i = \eta_h \eta_v$) jako ovisi o njoj brzini vrtnje pa je dobra samo pri određenim brzinama vrtnje (n'), za koje su izvedene turbinske lopatice.

Efektivna snaga P smanjena je još za mehaničke gubitke (uključivši gubitke za pogon pomoćnih uređaja, regulatora itd.), što uzimamo u obzir mehaničkom korisnošću η_m odnosno efektivnom korisnošću $\eta = \eta_i \eta_m$

$$P = \eta_m P_i = \eta P_0 \quad P = \eta q_m e = \eta q_m g H = \eta q_v \rho g H$$

Efektivna korisnost turbina iznosi:

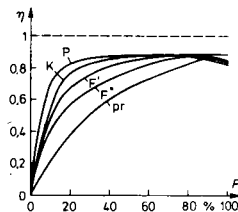
$$\begin{aligned} \text{za manje turbine} & \quad \eta = 0,75 \dots 0,85 \\ \text{za veće turbine} & \quad \eta = 0,85 \dots 0,95 \end{aligned}$$

Efektivna korisnost ovisi o promjeni opterećenja P , i to različito za različite turbine s raznovrsnim sistemima regulacije. Ovisnost $\eta = f(P)$ pri konstantnoj brzini vrtnje n prikazana je dijagramom u kojem krivulje znače:

- P — peltonove turbine
- F' — sporohodne francisove turbine
- F'' — brzohodne francisove turbine
- pr — propelerne turbine
- K — kaplanove turbine

Brzohodnost turbina (specifična brzina vrtnje) n_q

$$n_q = \frac{n}{\sqrt{H}} \sqrt{\frac{q_v}{H}}$$



pokazuje kakvu bi brzinu vrtnje morala imati geometrijski slična turbina, građena za korisni pad H (m), protok q_v (m^3/s) i brzinu vrtnje n , da bi pri korisnom padu $H_1 = 1$ m gutala količinu vode $q_{v1} = 1$ m^3/s .

(Koherentnost veličina nije narušena ni ovdje ako pod simbolima H i q_v razumijevamo bezdimenzijske omjere H_1/H i q_{v1}/q_v .)

Ima li turbina više (i) sapnica (kod peltonovih turbina) ili više rotora na istoj osovini (kod peltonovih i francisovih turbina), bit će brzohodnost

$$n_{qi} = n_q \sqrt{i}$$

Geometrijski slične vodne turbine imaju, uz slične protočne uvjete (slične »trokute brzina«), istu brzohodnost n_q .

Vodne turbine za velike padove imaju manju brzohodnost, a one za manje padove veću brzohodnost.

Područja upotrebljivosti pojedinih vrsta vodnih turbina:

Vrste turbina	H m	n_q	
		okr./s	okr./min
Peltonove – s jednom sap. } – s više sapnica }	2000 ... 100	0,02 ... 0,16 0,08 ... 0,37	1,2 ... 9,5 5 ... 22
Francisove – sporohodne	500 ... 105	0,33 ... 0,75	20 ... 45
– normalne	105 ... 55	0,75 ... 1,17	45 ... 70
– brzohodne	55 ... 35	1,17 ... 1,67	70 ... 100
Propelerne } Kaplanove }	35 ... 5	1,67 ... 5,80	100 ... 350

Izbor turbine ograničen je kavitacijom. Brzohodnost n_q određuje se (na temelju dijagrama ispitivanja) u ovisnosti o minimalnom dopuštenom koeficijentu kavitacije σ_{\min} (Thominog broja)

$$n_q = f(\sigma_{\min}) \quad \sigma_{\min} \approx (p_a/\rho g - h_d)/H$$

gdje su: p_a – zračni tlak, h_d – visina difuzora.

Brzina vrtnje vodnih turbina prilagođuje se traženoj brzini vrtnje gonjenih strojeva. Redovno su to električni generatori koji imaju određenu brzinu vrtnje (vidi str. 266). Turbinu odabiremo tako da ima pri traženoj brzini vrtnje najbolju korisnost η .

Najveća brzina vrtnje n_{\max} , koju turbina može postići u slučaju potpunog rasterećenja i potpuno otvorenih privodnih lopatica (»pobjegnuće«) mnogo je veća od normalne brzine vrtnje n i iznosi:

$$\begin{aligned} \text{kod peltonovih turbina} & n_{\max} = (1,8 \dots 1,9)n \\ \text{kod francisovih turbina} & n_{\max} = (1,8 \dots 2,1)n \\ \text{kod kaplanovih turbina} & n_{\max} = (2,3 \dots 3,0)n \end{aligned}$$

Pri normalnom se radu brzina vrtnje turbine po pravilu ne smije povećati više od 10%. Regulator koji pravilno djeluje mora spriječiti da se pri normalnom radu vrtnje turbine poveća iznad dopuštene vrijednosti. Međutim, svi rotirajući dijelovi turbine i priključenih strojeva moraju – radi sigurnosti u slučaju greške na regulatoru – izdržati i najveću brzinu vrtnje n_{\max} .

TOPLINA

Specifični toplinski kapacitet

Toplina dQ mijenja tijelu mase m temperaturu za dT

$$dQ = cm dT$$

c je specifični toplinski kapacitet tijela (J/kg K). U idealnih je plinova – u najpriprostijem slučaju – konstantna, inače općenito ovisi o temperaturi i o tlaku.

Smatramo li c konstantnim, pišemo

$$Q = cm(T_2 - T_1)$$

Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta pojedinih tvari razabiru se iz tablica na str. 163 i 212 do 217.

Pri promjenljivom specifičnom kapacitetu računamo katkada s »prosječnim specifičnim kapacitetom« između temperatura T_1 i T_2

$$c_{\text{med}} = \int c dT / (T_2 - T_1)$$

S prosječnim specifičnim kapacitetom računamo kao da je konstantan.

Entalpija je određena izrazom $H = U + pV$

U tom je izrazu U – unutarnja energija, a pV – vanjska energija (energija prostora, p – tlak, V – volumen).

»Specifična entalpija h « je entalpija jedinice mase s obzirom na – po volji odabrano – ishodište (npr. 0°C), gdje je $h = 0$. Mjerimo je u J/kg. Vrijednosti specifične entalpije za pare složene su u tablicama na str. 169 do 191, a za vlažni zrak na str. 194 do 197.

Temperaturna razteznost (dilatacija)

Linearno temperaturno rastezanje zbog povišenja temperature za dT iznosi

$$dl = \alpha l_0 dT$$

gdje su: α – linearni koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), l_0 – prvobitna duljina.

Smatramo li da je koeficijent α konstantan, vrijedi

$$l = l_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Koeficijent rastezanja α pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosti za čvrste tvari dane na str. 158 i 159.

Kubično temperaturno rastezanje zbog povećanja temperature za dT iznosi

$$dV = \beta V_0 dT$$

gdje su: β – kubični koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), V_0 – prvobitni volumen.

Smatramo li koeficijent β konstantnim, bit će

$$V = V_0[1 + \beta(T - T_0)]$$

I kubični koeficijent rastezanja β pri višim temperaturama raste. Njegove su vrijednosti za tekućine i plinove dane na str. 159.

Linearni koeficijenti temperaturnog rastezanja α (K⁻¹)

Temperaturno područje:	0... 100 °C	0... 500 °C	0... 1000 °C
Kovine:			
aluminij	0,000 0238	0,000 0274	—
bakar	0,000 0165	0,000 0181	—
cink	0,000 0165	—	—
iridij	0,000 0065	—	—
kadmij	0,000 0360	—	—
kobalt	0,000 0130	—	—
kositar	0,000 0267	—	—
krom	0,000 0084	—	—
magnezij	0,000 0260	0,000 0298	—
mangan	0,000 0228	—	—
molibden	0,000 0052	—	—
nikal	0,000 0130	0,000 0152	0,000 0168
olovo	0,000 0292	—	—
platina	0,000 0090	0,000 0095	0,000 0102
srebro	0,000 0197	0,000 0209	—
volfram	0,000 0045	0,000 0045	0,000 0046
zlato	0,000 0142	0,000 0152	—
željezo (čisto)	0,000 0123	—	—
Slitine:			
bronca (kositrena)	0,000 0180	—	—
crveni lijev	0,000 0190	—	—
čelik — neleg. 0,1% C	0,000 0120	0,000 0141	—
0,6% C	0,000 0117	0,000 0138	—
— legir. CrNi	0,000 0115	—	—
18 Cr 8 Ni	0,000 0160	—	—
13% Cr	0,000 0105	—	—
— invar (36% Ni)	0,000 0015	0,000 0034	—
duralumin	0,000 0235	0,000 0273	—
konstantan	0,000 0152	0,000 0168	—
manganin	0,000 0175	0,000 0194	—
mjed (mesing)	0,000 0184	—	—
novo srebro	0,000 0180	—	—
platina-iridij (10% Ir)	0,000 0090	0,000 0095	0,000 0102
silumin	0,000 0220	—	—
sivi lijev	0,000 0104	0,000 0129	—
tvrdi metali	0,000 0055	—	—

Linearni koeficijenti temperaturnog rastezanja α (K⁻¹)

Temperaturno područje:	0... 100 °C	0... 500 °C	0... 1000 °C
Nekovine:			
beton	0,000 012	—	—
celuloid	0,000 101	—	—
dijamant	0,000 0013	—	—
grafit	0,000 002	—	—
granit	0,000 006	—	—
korund	0,000 0064	0,000 0072	0,000 0082
magnezija (MgO)	0,000 0123	0,000 0126	0,000 0139
opeka	0,000 008	—	—
poliamidi	0,000 110	—	—
polivinilklorid	0,000 080	—	—
porculan	0,000 0030	0,000 0036	0,000 0043
staklo — jensko	0,000 0035	0,000 0040	—
— kremenno	0,000 0081	0,000 0093	—
— kremenno	0,000 0005	0,000 0006	0,000 0005
šumpor	0,000 090	—	—

Kubični koeficijenti temperaturnog rastezanja β (K⁻¹)

Kapljevina	β	Kapljevina	β
voda 0 °C	—0,000 060	benzin	0,001 200
10 °C	0,000 200	benzen (benzol)	0,000 106
20 °C	0,000 380	etanol (alkohol)	0,001 150
60 °C	0,000 540	ulje za mazanje	0,000 740
100 °C	0,000 780	pentan	0,000 160
200 °C	0,000 550	propantriol (glicerin)	0,000 520
		terpentinsko ulje	0,000 097
		transformatorsko ulje	0,000 690
		živa	0,000 180

Plin	β	Plin	β
amonijak	0,003 802	ugljični dioksid	0,003 726
argon	0,003 676	ugljični monoksid	0,003 670
dušik	0,003 674	vodik	0,003 662
helij	0,003 660	šumporni dioksid	0,003 850
kisik	0,003 674	idealni plin	0,003 661 =
neon	0,003 661		= 1/273,15

OSNOVNI ZAKONI TERMODINAMIKE

Prvi glavni zakon termodinamike

»Toplina je ekvivalentna mehaničkom radu.« (Mayer, 1842; Joule, 1843.)

Dovođenje ili odvođenje topline Q uzrokuje promjenu unutarnje energije U i apsolutnog rada A (dobivenoga ili utrošenoga), odnosno promjenu entalpije H i tehničkog rada W (dobivenoga ili utrošenoga):

$$\begin{aligned} dQ &= dU + dA & +dQ &= \text{dovedena toplina} \\ dQ &= dH + dW & -dQ &= \text{odvedena toplina} \end{aligned}$$

Za slučaj mehaničke ravnoteže možemo rad izraziti tlakom p i volumenom V

$$\begin{aligned} dA &= p dV & +dA, +dW &= \text{dobiveni rad} \\ dW &= -V dp & -dA, -dW &= \text{utrošeni rad} \end{aligned}$$

Entalpijski teorem: $H_2 - H_1 = Q - W$

Drugi glavni zakon termodinamike

»Toplina ne prelazi nikada sama od sebe s hladnijega na toplije tijelo.« (Clausius, 1850; Thomson, 1851.)

Po tome razlikujemo:

a) povratne procese, tj. one koji su mogući u jednom ili drugom smislu, a da pri povratku ne ostane u prirodi nikakav trag (npr. isparivanje i kondenzacija, kompresija i ekspanzija itd.), i

b) nepovratne procese, koji su mogući samo u jednom smislu (npr. prijelaz topline, trenje, prigušivanje, miješanje itd.).

Entropija je za sve povratne procese određena izrazom $dS = dQ/T$. U tom je izrazu dQ — promjena topline pri apsolutnoj temperaturi T .

»Specifična entropija s « je entropija jedinice mase računana s obzirom na — po volji odabrano — ishodište (npr. kod 0°C), gdje je $s = 0$. Mjerimo je u J/kgK . Njene vrijednosti za pare dane su na str. 169 do 191.

Entropija se zatvorenog sustava pri svim nepovrativim procesima povećava ($dS > 0$).

Eksergija * E je maksimalni tehnički rad što ga s obzirom na stanje okoline (pri temperaturi T_0 i tlaku p_0) možemo dobiti iz unutarnje energije tvari kojoj je entalpija H i entropija S : $E = H - H_0 - T_0(S - S_0)$.

H_0 je entalpija, a S_0 entropija tvari pri stanju okoline (T_0, p_0).

Anergija * $T_0(S - S_0)$ je dio unutarnje energije iz kojega ne možemo dobiti tehnički rad.

»Specifična eksergija e « je eksergija jedinice mase: $e = h - h_0 - T_0(s - s_0)$, gdje su: h — specifična entalpija i s — specifična entropija tvari u promatranom stanju, h_0 i s_0 su specifična entalpija i entropija tvari pri tlaku i temperaturi okoline, »specifična anergija« $b = T_0(s - s_0)$.

* Te je nazive uveo prof. Z. Rant, Ljubljana (SV 1955/1 i SV 1962/1-2).

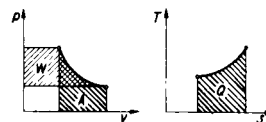
Promjene stanja tvari

Pri promjeni stanja određujemo uglavnom: volumen V , tlak p , temperaturu T , apsolutni rad A , odn. tehnički rad W i toplinu Q .

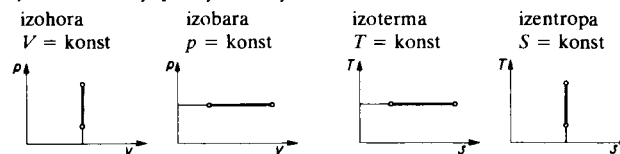
U pV -dijagramu predočeni su: apsolutni rad A površinom ispod krivulje promjene stanja, a tehnički rad W površinom lijevo od te krivulje

$$A = \int p dV \quad W = -\int V dp$$

U TS -dijagramu predočena je toplina Q površinom ispod krivulje povratne promjene stanja $Q = \int T dS$



Najkarakterističnije promjene stanja:



»Adijabata« znači promjenu stanja pri kojoj toplinu niti (izvana) dovodimo niti je odvodimo, ali ona može biti proizvedena u samom sistemu zbog izentalpa: $H = \text{konst}$. U idealnom su slučaju (bez gubitaka) adijabata i izentropa identične.

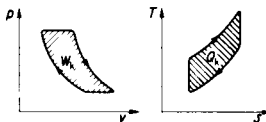
Kružni procesi

U idealnom (bez gubitaka i sl.) desnokretnom kružnom procesu (tj. u smislu kazaljke na satu, vidi sliku!), koji odgovara procesu pogonskih strojeva, površine omeđene zatvorenom krivuljom povratne promjene stanja predstavljaju: u pV -dijagramu dobiveni rad W_k , u TS -dijagramu razliku toplina Q_k :

$$W_k = Q_k = Q - Q_0$$

gdje je Q dovedena, a Q_0 odvedena toplina ($Q > Q_0$).

Energetska korisnost kružnog procesa je $\eta_k = W_k/Q = 1 - Q_0/Q$



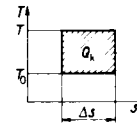
U lijevakretnom kružnom procesu (protivnom smislu u slici), koji odgovara procesu toplinskih pumpi, negativni su i rad $-W_k$ (utrošeni) i razlika toplina $-Q_k$ (dobivena) ($Q < Q_0$).

Carnotov kružni proces teče između dviju izentropa i dviju izoterm. Za nj vrijedi

$$Q_k = (T - T_0) \Delta S$$

a energetska korisnost iznosi

$$\eta = 1 - T_0/T \quad (\text{Thomsonova jednačnja})$$



IDEALNI PLINOVI

Pod »idealnim plinovima« razumijevamo tako visoko pregrijane pare da se pokoravaju zakonu Boyleovu i Mariotteovu ($pV = \text{konst}$ pri $T = \text{konst}$) te Gay-Lussacovu ($V/T = \text{konst}$ pri $p = \text{konst}$). U prirodi nema idealnih plinova, no mnogi se realni plinovi po svojim svojstvima tako približuju idealnim plinovima da za njih vrijede s dovoljnom točnošću navedeni zakoni.

Tehnički osobito važni realni plinovi jesu:

jednoatomni He, Ar
dvoatomni H₂, N₂, O₂, CO, zrak
višeatomni CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆.

Pri malom tlaku i pogotovu još pri visokoj temperaturi možemo zakone idealnih plinova primijeniti i na H₂O, CO₂, SO₂, NH₃ itd.

Jednadžba stanja plina povezuje tlak p , gustoću ρ , odnosno specifični volumen v ili volumen V te masu m i temperaturu T :

$$p/\rho = RT \quad pv = RT \quad pV = mRT$$

R = plinska konstanta, koja ovisi samo o sastavu plina. Mjerimo je u J/kgK. Vrijednosti za R – vidi str. 163.

Opća plinska konstanta (umnožak molne mase m_m i plinske konstante R) jednaka je za sve plinove i iznosi

$$R_m = m_m R = 8314,34 \text{ J/kmol K}$$

Avogadrov zakon

1 kmol bilo kojeg (idealnog) plina zauzima pri jednakom stanju uvijek isti volumen V_m , koji pri 0°C i tlaku 1,01325 bar iznosi

$$V_m = R_m T/p = 22,4136 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Prema tome vrijedi za sve plinove (molne mase m_m i gustoće ρ) $V_m = m_m/\rho$, a za plinove među sobom $m_{m1}/m_{m2} = \rho_1/\rho_2$.

Specifični toplinski kapacitet plinova

izobarski – pri konstantnom tlaku $c_p = dh/dT$
izovolumetrički – pri konstantnom volumenu $c_v = du/dT$

gdje su: dh – promjena specifične entalpije, du – promjena specifične unutarnje energije ($u = U/m$), dT – promjena temperature.

Omjer specifičnih toplinskih kapaciteta $\kappa = c_p/c_v$

Razlika specifičnih toplinskih kapaciteta $c_p - c_v = R$
 $c_p = \kappa R/(\kappa - 1)$ $c_v = R/(\kappa - 1)$

Entalpija plinova

specifična entalpija $h = \int c_p dT + C$

molna entalpija $h_m = m_m \int c_p dT + C$

Podaci o molnoj entalpiji h_m najpoznatijih plinova nalaze se na str. 164. Iz molne se entalpije vrlo lako može izračunati specifična entalpija $h = h_m/m_m$.

Toplinska svojstva plinova

Vrelište i kritično stanje plinova

Plin	Kem. simbol	Vrelište (pri 1,01325 bar)		Veličine kritičnog stanja			
		t_v	T_v	temperatura		tlak	gust.
		°C	K	t_k	T_k	p_k	ρ
				°C	K	bar	kg/m ³
helij	He	-268,9	4,3	-267,9	5,3	2,28	69
argon	Ar	-185,9	87,3	-122,4	150,8	48,7	531
vodik	H ₂	-252,8	20,4	-239,3	33,3	13,0	31
dušik	N ₂	-195,8	77,4	-147,1	126,1	33,9	311
kisik	O ₂	-183,0	90,2	-118,8	154,4	50,4	430
zrak	-	-194,0	79,2	-140,7	132,5	37,7	310
uglj. monoks.	CO	-191,5	81,7	-140,2	133,0	34,9	301
uglj. dioksid	CO ₂	-78,5	194,7	+31,0	304,2	73,6	460
sump. dioksid	SO ₂	-10,0	263,2	+157,3	430,5	78,9	524
amonijak	NH ₃	-33,4	289,8	+132,4	405,6	113,0	235
etin (acetilen)	C ₂ H ₂	-83,6	189,6	+35,7	308,9	63,5	231
metan	CH ₄	-161,7	111,5	-83,0	190,7	46,3	162
monoklor- metan	CH ₃ Cl	-24,0	249,2	+143,1	416,3	66,8	370
difluordiklor- metan	CF ₂ Cl ₂	-30,0	243,2	+111,5	384,7	40,1	555
eten (etilen)	C ₂ H ₄	-103,5	169,7	+9,3	282,5	51,4	216
etan	C ₂ H ₆	-88,6	184,6	+35,0	308,2	49,6	210

Plinska konstanta, specifični toplinski kapacitet, gustoća

Plin	Broj atoma u molekuli	Molna masa m_m kg/kmol	Plinska konstanta	Specifična topl. kap.	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$	Gustoća** ρ_0 kg/m ³
			R J/kg K	c_p J/kg K		
He	1	4,003	2078	5237	1,66	0,1785
Ar	1	39,94	208,2	523	1,66	1,7834
H ₂	2	2,016	4122	14245	1,41	0,0899
N ₂	2	28,02	296,7	1038	1,40	1,2505
O ₂	2	32,00	259,8	913	1,40	1,4290
zrak	-	28,96	287,0	1005	1,40	1,2928
CO	2	28,01	296,9	1042	1,40	1,2500
CO ₂	3	44,01	188,8	820	1,30	1,9768
SO ₂	3	64,06	129,8	607	1,27	2,9265
NH ₃	4	17,03	488,2	2055	1,31	0,7713
C ₂ H ₂	4	26,04	319,6	1511	1,26	1,1709
CH ₄	5	16,04	518,7	2156	1,32	0,7168
CH ₃ Cl	5	50,49	164,7	737	1,29	2,3084
CF ₂ Cl ₂	5	120,9	68,8	561	1,14	5,0830
C ₂ H ₄	6	28,05	296,7	1612	1,25	1,2604
C ₂ H ₆	8	30,07	276,7	1729	1,20	1,3560

* Pri 0°C. – ** Pri 0°C i 1,01325 bar.

Molna entalpija h_m plinova
pri konstantnom tlaku $p = 0$ (bez obzira na disocijaciju)

Temperatura		h_m kJ/kmol			
t °C	T K	H ₂	N ₂	O ₂	Zrak
0	273	0	0	0	0
100	373	2 897	2 918	2 951	2 913
200	473	5 819	5 860	5 982	5 865
300	573	8 765	8 845	9 113	8 858
400	673	11 690	11 880	12 360	11 920
500	773	14 630	14 970	15 680	15 040
600	873	17 610	18 110	19 070	18 260
700	973	20 620	21 320	22 520	21 480
800	1073	23 630	24 610	26 030	24 830
900	1173	26 690	27 960	29 570	28 210
1000	1273	29 790	31 360	33 150	31 620
1100	1373	32 970	34 790	36 750	35 080
1200	1473	36 140	38 260	40 390	38 570
1300	1573	39 380	41 760	44 040	42 070
1400	1673	42 660	45 290	47 720	45 630
1500	1773	45 960	48 810	51 450	49 190
1750	2023	54 380	57 770	60 860	58 190
2000	2273	63 040	66 810	70 410	67 330
2500	2773	80 960	85 190	89 890	85 330
3000	3273	99 500	103 730	109 900	104 600

Temperatura		h_m kJ/kmol			
t °C	T K	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ O
0	273	0	0	0	0
100	373	2 918	3 839	4 077	3 361
200	473	5 860	8 079	8 498	6 798
300	573	8 866	12 630	13 210	10 320
400	673	11 920	17 410	18 150	13 960
500	773	15 050	22 500	23 250	17 730
600	873	18 260	27 700	28 510	21 600
700	973	21 520	33 060	33 840	25 610
800	1073	24 870	38 490	39 250	29 770
900	1173	28 250	44 080	44 750	34 060
1000	1273	31 690	49 690	50 270	38 340
1100	1373	35 170	55 460	55 840	42 900
1200	1473	38 690	61 240	61 450	47 470
1300	1573	42 240	67 060	67 100	52 130
1400	1673	45 750	72 920	72 710	56 970
1500	1773	49 310	78 860	78 360	61 790
1750	2023	58 310	93 720	94 810	74 340
2000	2273	67 440	100 400	106 900	87 150
2500	2773	85 940	139 100	139 000	113 800
3000	3273	104 500	169 700	164 500	141 000

Povratne promjene stanja plinova

Oznake veličina – na str. 157 do 162

- a) **Izohora** $V = \text{konst}$ $p/T = \text{konst} (= mR/V)$ $p_1/p_2 = T_1/T_2$
 Apsolutni rad $A = 0$
 Tehnički rad $W = V(p_1 - p_2)$
 Toplina $Q = m c_v (T_2 - T_1) = m \frac{R}{\kappa - 1} (T_2 - T_1) \frac{V}{\kappa - 1} (p_2 - p_1)$
- b) **Izobara** $p = \text{konst}$ $V/T = \text{konst} (= mR/p)$ (Gay-Lussacov zakon)
 $V_1/V_2 = e_2/e_1 = T_1/T_2$
 Apsolutni rad $A = p(V_2 - V_1) = mR(T_2 - T_1)$
 Tehnički rad $W = 0$
 Toplina $Q = m c_p (T_2 - T_1) = m \frac{\kappa R}{\kappa - 1} (T_2 - T_1) = \frac{\kappa p}{\kappa - 1} (V_2 - V_1) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} A$
- c) **Izoterma** $T = \text{konst}$
 $pV = \text{konst} (= mRT)$ (Boyleov i Mariotteov zakon)
 $p_1 V_1 = p_2 V_2$
 Apsolutni rad $A = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$
 $= mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT \ln \frac{p_1}{p_2}$
 Tehnički rad $W = A$
 Toplina $Q = A = W = T(S_2 - S_1)$
- d) **Izentropa** $S = \text{konst}$
 $pV^\kappa = \text{konst}$ $TV^{\kappa-1} = \text{konst}$ $T \left(\frac{1}{p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \text{konst}$
 Apsolutni rad $A = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \right]$
 $= \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{1}{\kappa - 1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$
 $= \frac{mR}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) = m c_v (T_1 - T_2)$
 Tehnički rad pri izentropskoj promjeni stanja (= teoretski rad toplinskih strojeva)
 $W = \kappa A = m c_p (T_1 - T_2) = H_1 - H_2 = m(h_1 - h_2)$
 Toplina $Q = 0$

e) Politropa

predstavlja općenitu promjenu stanja pri kojoj je promjena temperature upravo razmjerna dovedenoj ili odvedenoj toplini $dQ = mc dT$

$$pV^n = \text{konst} \quad n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad c = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$$

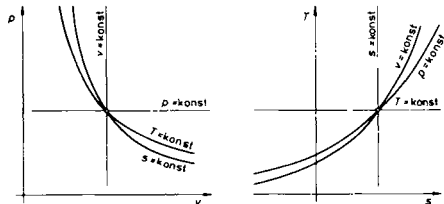
$$\begin{aligned} \text{Apsolutni rad} \quad A &= \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] \\ &= \frac{p_1 V_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) \\ &= \frac{mR}{n-1} (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

$$\text{Tehnički rad} \quad W = nA$$

$$\text{Toplina} \quad Q = \frac{\kappa - n}{\kappa - 1} A$$

*

Promjena stanja po politropi — kao općenita — obuhvaća sve prije navedene povratne promjene stanja koje su samo njezini posebni slučajevi.



Usporedba politropa

politropa	n	c
izohora $V = \text{konst}$	$\pm \infty$	c_v
izobara $p = \text{konst}$	0	c_p
izoterma $T = \text{konst}$	1	$\pm \infty$
izentropa $S = \text{konst}$	$\kappa = c_p/c_v$	0

Prigušivanje

je nepovratna promjena stanja za koju kod idealnih plinova vrijedi:

$$\text{izentalpa} \quad h = \text{konst} \quad T = \text{konst}$$

Smjese idealnih plinova

(Indeksima 1, 2...n označujemo veličine koje pripadaju pojedinim sastavnim u smjesi)

$$\text{Masa smjese} \quad m = m_1 + m_2 + \dots$$

$$\text{Volumen smjese} \quad V = V_1 + V_2 + \dots$$

$$\text{Tlak smjese} \quad p = p_1 + p_2 + \dots$$

p_1, p_2, \dots su parcijalni tlakovi pojedinih plinova u smjesi (Daltonov zakon)

$$p_1 = pV_1/V \quad p_2 = pV_2/V$$

Za smjesu plinova vrijedi ista jednadžba stanja kao i za homogene plinove

$$pV = mRT$$

Plinska konstanta R i prividna molna masa smjese m_m

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} R_i \quad m_m = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} m_{mi}$$

Gustoća smjese

$$\rho = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V} \rho_i$$

Specifični toplinski kapaciteti i specifična entalpija smjese:

$$c_p = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} c_{pi} \quad c_v = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} c_{vi} \quad h = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} h_i$$

Zraka

Sastav potpuno suhog zraka

Sastavina	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	H ₂	He + Ne + Kr + Xe
volumni %	78,03	20,99	0,93	0,03	0,01	0,01
maseni %	75,47	23,20	1,28	0,046	0,001	0,003

Miješanje plinova (nepovrativi proces)

a) Miješanje pri $V = \text{konst}$

$$\text{parcijalni tlak} \quad p' = (p_1 V_1 / T_1) \cdot T / V$$

temperatura smjese

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_{vi} T_i}{\sum_{i=1}^n m_i c_{vi}}$$

$$\text{tlak smjese} \quad p = p' + p'' + \dots$$

b) Miješanje pri $p = \text{konst}$

$$\text{parcijalni volumen} \quad V' = (p_1 V_1 / T_1) \cdot T / p$$

temperatura smjese

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_{pi} T_i}{\sum_{i=1}^n m_i c_{pi}}$$

$$\text{volumen smjese} \quad V = V' + V'' + \dots$$

PARE

Zasićena para

je smjesa dviju faza: tekuće i plinovite. Para ima u zasićenom stanju za svaku temperaturu točno određenu vrijednost tlaka.

Omjer mase plinovite faze (suhe pare) i mase cjelokupne smjese (suhe pare i tekućine) nazivamo »suhoća para x«. S obzirom na x je zasićena para:

- $x = 0$ – (vrela) tekućina (bez pare),
- $0 < x < 1$ – mokra para, koja u jedinici mase sadrži x dijelova suhe pare i (1 – x) dijelova tekućine,
- $x = 1$ – suha para (samo para, bez tekućine).

Različite veličine stanja pare, napose gustoću ρ , specifični volumen v , specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s označujemo:

pri stanju $x = 0$ oznakom pri stanju $x = 1$ oznakom "

Temperatura i odgovarajući tlak te ostale veličine zasićene pare pri stanju $x = 0$ i $x = 1$ nalaze se za najvažnije pare u tablicama na str. 172 do 174 i 188 do 191.

Za mokru paru ($0 < x < 1$) vrijedi:

$$\begin{aligned} \text{specifični volumen} \quad v_x &= v' + x(v'' - v') \\ \text{specifična entalpija} \quad h_x &= h' + x(h'' - h') \\ \text{specifična entropija} \quad s_x &= s' + x(s'' - s') \end{aligned}$$

Clapeyronova jednadžba prikazuje toplinu isparivanja r kao funkciju temperature zasićenja T_s , povećanja volumena pri isparivanju $v'' - v'$ i diferencijalnog kvocijenta dp/dT : $r = T_s (v'' - v') \cdot (dp/dT) \quad r = h'' - h'$

Pregrijana para

je realni plin koji je pregrijan iznad temperature zasićenja i ne sadrži više nikakve tekućine.

Obično smatramo pregrijanom onu paru koja nije pregrijana mnogo iznad temperature zasićenja i nju moramo računati po posebnim zakonima za pregrijanu paru, dok se visoko pregrijane pare postupno približuju svojstvima idealnih plinova.

Veličine stanja pregrijane pare (p, v, h, s) funkcije su tlaka i temperature:

$$\begin{aligned} p v &= RT + f_1(p, T) & h &= h'' + \int c_p dT & s &= s'' + \int c_p (dT/T) \\ & & c_p &= f_2(p, T) \end{aligned}$$

Za pregrijanu paru sastavljene su razne tablice o parama, npr.:

- za zrak (ako uzimamo u obzir odstupanje od idealnih plinova) na str. 169.
- za pregrijanu vodenu paru na str. 175 do 187.

Pregled šireg područja (zasićene i pregrijane) vodene pare prikazuje posebno zorno Mollierov h, s -dijagram (str. 170 i 171).

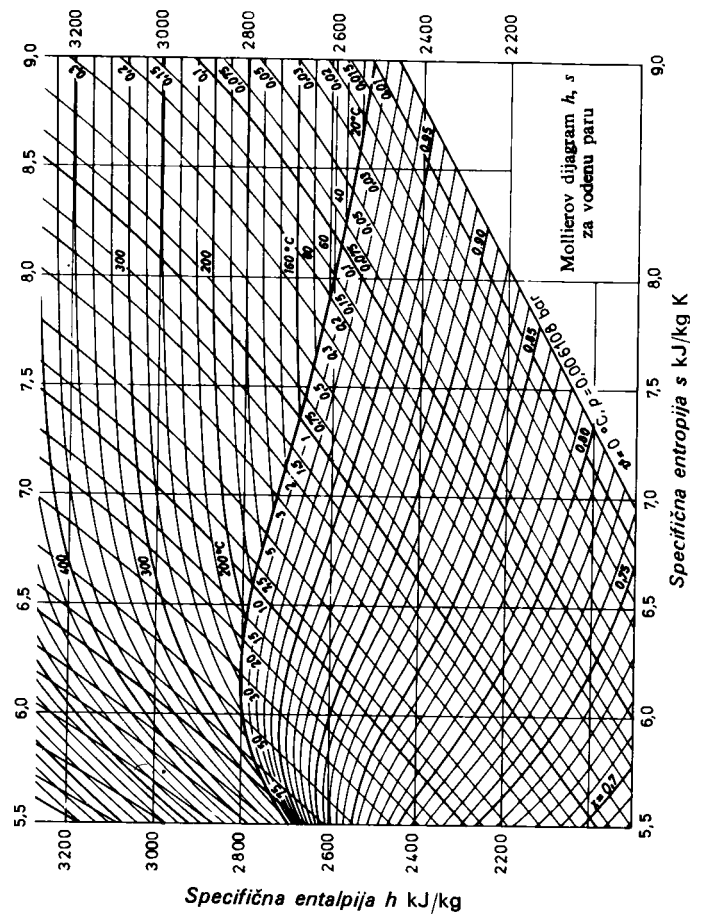
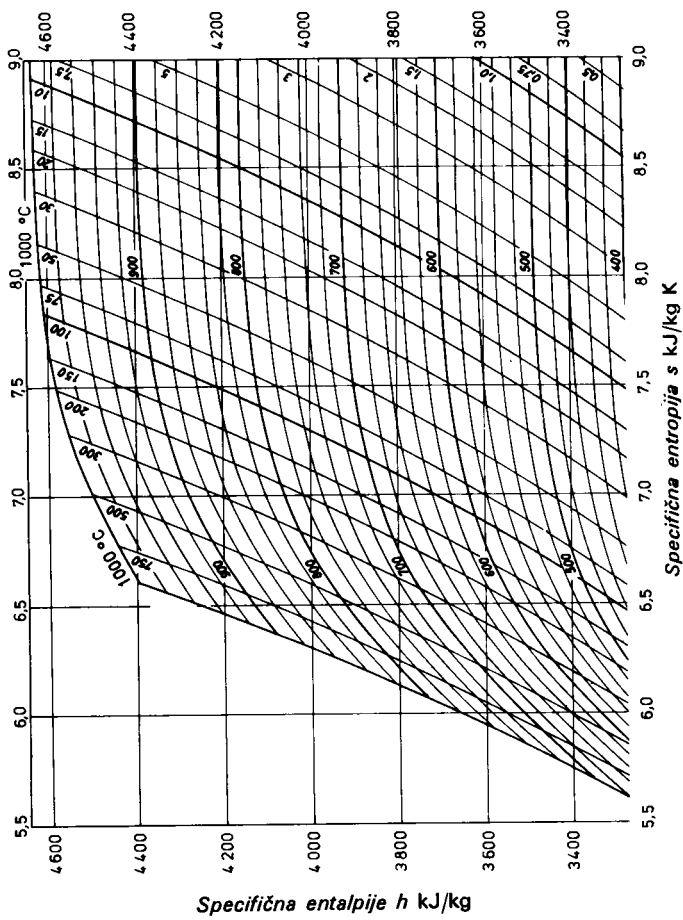
Zrak

kao pregrijana para (koji pri točnijem računanju odstupa od zakona idealnih plinova)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t
specifični volumen v , specifična entalpija h^* , specifična entropija s^*

t °C	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m³/kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 1$ bar						
–100	0,495 1	172,8	6,359	0,097 66	170,0	5,843
– 50	0,639 3	223,1	6,656	0,127 3	221,3	6,106
0	0,783 8	273,3	6,859	0,156 6	272,1	6,311
50	0,926 5	323,6	7,026	0,185 4	322,8	6,479
100	1,071	374,1	7,172	0,214 4	373,5	6,584
200	1,356	476,1	7,415	0,271 6	475,7	6,868
400	1,930	686,1	7,775	0,386 7	686,1	7,229
$p = 5$ bar						
$p = 10$ bar						
–100	0,047 98	166,7	5,632	0,023 14	159,7	5,403
– 50	0,063 29	219,3	5,899	0,031 29	215,3	5,687
0	0,078 17	270,9	6,121	0,038 97	268,0	5,900
50	0,092 71	321,9	6,277	0,046 39	319,9	6,072
100	0,107 3	372,8	6,424	0,053 80	371,5	6,221
200	0,136 1	475,2	6,668	0,068 33	474,4	6,467
400	0,193 8	686,1	7,030	0,097 31	686,1	6,830
$p = 20$ bar						
$p = 40$ bar						
–100	0,010 72	144,4	5,137	0,006 582	118,0	4,944
– 50	0,015 29	207,1	5,460	0,009 955	195,0	5,315
0	0,019 36	262,8	5,685	0,012 83	255,2	5,552
50	0,023 22	316,2	5,862	0,015 50	311,0	5,734
100	0,027 03	368,9	6,015	0,018 11	365,2	5,890
200	0,034 44	473,2	6,263	0,023 15	471,8	6,142
400	0,049 08	686,2	6,629	0,033 00	686,4	6,510
$p = 60$ bar						
$p = 80$ bar						
–100	0,004 512	109,2	4,938	0,003 270	94,6	4,652
– 50	0,007 288	191,2	5,204	0,005 688	183,7	5,114
0	0,009 564	252,8	5,454	0,007 604	248,1	5,420
50	0,011 64	309,3	5,641	0,009 328	306,1	5,567
100	0,013 65	364,0	5,800	0,010 97	361,9	5,729
200	0,017 50	471,2	6,056	0,014 11	470,2	5,987
400	0,024 96	686,6	6,425	0,020 14	686,8	6,359
$p = 100$ bar						

* Ishodište za specifičnu entalpiju h i specifičnu entropiju s izabrano je pri (idealiziranoj) apsolutnoj nuli.



Zasičena vodena para

Toplinska svojstva pri temperaturama od 0 do 374,15 °C

Temperatura t_s , tlak p , specifični volumen v' , v'' ;

specifična entalpija h' , h'' ; specifična entropija s' , s''

t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K	t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,04	0,006 112	0,001 000 2	206,2	0,00	2 502	0,000 0	9,158	190	12,55	0,001 142	0,156 3	807,5	2 784	2,236	6,504
5	0,008 718	0,001 000 0	147,2	21,01	2 511	0,076 2	9,027	195	13,99	0,001 149	0,140 8	829,9	2 788	2,283	6,465
10	0,012 27	0,001 000 3	106,4	41,99	2 520	0,151 0	8,902	200	15,55	0,001 157	0,127 2	852,4	2 791	2,331	6,428
15	0,017 04	0,001 001	77,98	62,94	2 529	0,224 3	8,783	205	17,24	0,001 164	0,115 0	875,0	2 794	2,378	6,391
20	0,023 37	0,001 002	57,84	83,86	2 538	0,296 3	8,668	210	19,08	0,001 173	0,104 2	897,7	2 796	2,425	6,354
25	0,031 66	0,001 003	43,40	104,8	2 547	0,367 0	8,559	215	21,06	0,001 181	0,094 63	920,6	2 798	2,471	6,318
30	0,042 41	0,001 004	32,93	125,7	2 556	0,436 5	8,455	220	23,20	0,001 190	0,086 04	943,7	2 800	2,518	6,282
35	0,056 22	0,001 006	25,24	146,6	2 565	0,504 9	8,354	225	25,50	0,001 199	0,078 35	966,9	2 801	2,564	6,246
40	0,073 75	0,001 008	19,55	167,5	2 574	0,572 1	8,258	230	27,98	0,001 209	0,071 45	990,3	2 802	2,610	6,211
45	0,095 82	0,001 010	15,28	188,4	2 583	0,638 3	8,166	235	30,63	0,001 219	0,065 25	1 014	2 802	2,656	6,176
50	0,123 4	0,001 012	12,05	209,3	2 592	0,703 5	8,078	240	33,48	0,001 229	0,059 65	1 038	2 802	2,702	6,141
55	0,157 4	0,001 015	9,579	230,2	2 601	0,767 7	7,993	245	36,52	0,001 240	0,054 61	1 062	2 802	2,748	6,106
60	0,199 2	0,001 017	7,679	251,1	2 610	0,831 0	7,911	250	39,78	0,001 251	0,050 04	1 086	2 800	2,794	6,071
65	0,250 1	0,001 020	6,202	272,0	2 618	0,893 3	7,832	255	43,25	0,001 263	0,045 90	1 110	2 799	2,839	6,036
70	0,311 6	0,001 023	5,046	293,0	2 627	0,954 8	7,757	260	46,94	0,001 276	0,042 13	1 135	2 796	2,885	6,001
75	0,385 5	0,001 026	4,134	313,9	2 635	1,015	7,684	265	50,88	0,001 289	0,038 71	1 160	2 794	2,931	5,966
80	0,473 6	0,001 029	3,409	334,9	2 644	1,075	7,613	270	55,06	0,001 303	0,035 59	1 185	2 790	2,976	5,930
85	0,578 0	0,001 033	2,829	355,9	2 652	1,134	7,545	275	59,50	0,001 317	0,032 74	1 211	2 786	3,022	5,895
90	0,701 1	0,001 036	2,361	376,9	2 660	1,193	7,480	280	64,20	0,001 332	0,030 13	1 237	2 780	3,068	5,859
95	0,845 3	0,001 040	1,982	398,0	2 668	1,250	7,417	285	69,19	0,001 349	0,027 73	1 263	2 774	3,115	5,822
100	1,013 3	0,001 044	1,673	419,1	2 676	1,307	7,355	290	74,46	0,001 366	0,025 54	1 290	2 768	3,161	5,785
105	1,208	0,001 048	1,419	440,2	2 684	1,363	7,296	295	80,04	0,001 384	0,023 51	1 317	2 760	3,208	5,747
110	1,433	0,001 052	1,210	461,3	2 691	1,419	7,239	300	85,93	0,001 404	0,021 65	1 345	2 751	3,255	5,708
115	1,691	0,001 056	1,036	482,5	2 699	1,473	7,183	305	92,14	0,001 425	0,019 93	1 373	2 741	3,303	5,669
120	1,985	0,001 061	0,891 5	503,7	2 706	1,528	7,129	310	98,70	0,001 448	0,018 33	1 402	2 730	3,351	5,628
125	2,321	0,001 065	0,770 2	525,0	2 713	1,581	7,077	315	105,6	0,001 473	0,016 86	1 432	2 718	3,400	5,586
130	2,701	0,001 070	0,668 1	546,3	2 720	1,634	7,026	320	112,9	0,001 500	0,015 48	1 463	2 704	3,450	5,542
135	3,131	0,001 075	0,581 8	567,7	2 727	1,687	6,977	325	120,6	0,001 529	0,014 19	1 494	2 688	3,501	5,497
140	3,614	0,001 080	0,508 5	589,1	2 733	1,739	6,928	330	128,6	0,001 562	0,012 99	1 527	2 670	3,553	5,449
145	4,155	0,001 085	0,446 0	610,6	2 739	1,791	6,882	335	137,1	0,001 598	0,011 85	1 560	2 650	3,606	5,398
150	4,760	0,001 091	0,392 4	632,2	2 745	1,842	6,836	340	146,1	0,001 639	0,010 78	1 596	2 626	3,662	5,343
155	5,433	0,001 096	0,346 4	653,8	2 751	1,892	6,791	345	155,5	0,001 686	0,009 763	1 633	2 599	3,719	5,283
160	6,181	0,001 102	0,306 8	675,5	2 757	1,943	6,748	350	165,4	0,001 741	0,008 799	1 672	2 568	3,780	5,218
165	7,008	0,001 108	0,272 4	697,3	2 762	1,992	6,705	355	175,8	0,001 809	0,007 859	1 717	2 530	3,849	5,144
170	7,920	0,001 115	0,242 6	719,1	2 767	2,042	6,663	360	186,8	0,001 896	0,006 940	1 764	2 485	3,921	5,060
175	8,924	0,001 121	0,216 5	741,1	2 772	2,091	6,622	365	198,3	0,002 016	0,006 012	1 818	2 428	4,002	4,958
180	10,03	0,001 128	0,193 8	763,1	2 776	2,139	6,582	370	210,5	0,002 214	0,004 973	1 890	2 343	4,111	4,814
185	11,23	0,001 134	0,173 9	785,3	2 780	2,188	6,542	374,15	221,20	0,003 17		2 107,4		4,442 9	

Zasićena vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku od 0,01 do 200 bar

Tlak p , temper. t_s , spec. vol. v', v'' ; spec. entalp. h', h'' ; spec. entrop. s', s''

p bar	t_s °C	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,01	6,983	0,001 000	129,2	29,34	2 514	0,106 0	8,977
0,02	17,51	0,001 001	67,01	73,46	2 534	0,260 7	8,725
0,04	28,98	0,001 004	34,80	121,4	2 555	0,422 5	8,476
0,06	36,18	0,001 006	23,74	151,5	2 568	0,520 9	8,331
0,08	41,53	0,001 008	18,10	173,9	2 577	0,592 5	8,230
0,1	45,83	0,001 010	14,67	191,8	2 585	0,649 3	8,151
0,12	49,45	0,001 012	12,36	206,9	2 591	0,696 3	8,087
0,16	55,34	0,001 015	9,433	231,6	2 602	0,772 1	7,987
0,2	60,09	0,001 017	7,650	251,5	2 610	0,832 1	7,909
0,25	64,99	0,001 020	6,204	272,0	2 618	0,893 2	7,832
0,3	69,12	0,001 022	5,229	289,3	2 625	0,944 1	7,770
0,4	75,89	0,001 027	3,993	317,7	2 637	1,026	7,671
0,5	81,35	0,001 030	3,240	340,6	2 646	1,091	7,595
0,6	85,95	0,001 033	2,732	359,9	2 654	1,145	7,533
0,8	93,51	0,001 039	2,087	391,7	2 666	1,233	7,435
1,0	99,63	0,001 043	1,694	417,5	2 675	1,303	7,360
1,2	104,8	0,001 048	1,428	439,4	2 683	1,361	7,298
1,6	113,3	0,001 055	1,091	475,4	2 696	1,455	7,202
2,0	120,2	0,001 061	0,885 4	504,7	2 706	1,530	7,127
2,5	127,4	0,001 068	0,718 4	535,3	2 716	1,607	7,052
3	133,5	0,001 074	0,605 6	561,4	2 725	1,672	6,991
4	143,6	0,001 084	0,462 2	604,7	2 738	1,776	6,894
5	151,8	0,001 093	0,374 7	640,1	2 748	1,860	6,819
6	158,8	0,001 101	0,315 5	670,4	2 756	1,931	6,758
8	170,4	0,001 115	0,240 3	720,9	2 768	2,046	6,660
10	179,9	0,001 127	0,194 3	762,6	2 776	2,138	6,583
12	188,0	0,001 139	0,163 2	798,4	2 783	2,216	6,519
16	201,4	0,001 159	0,123 7	858,6	2 792	2,344	6,418
20	212,4	0,001 177	0,099 54	908,6	2 797	2,447	6,337
25	223,9	0,001 197	0,079 91	962,0	2 801	2,554	6,254
30	233,8	0,001 216	0,066 63	1 008	2 802	2,646	6,184
40	250,3	0,001 252	0,049 75	1 087	2 800	2,797	6,069
50	263,9	0,001 286	0,039 43	1 155	2 794	2,921	5,974
60	275,6	0,001 319	0,032 44	1 214	2 785	3,027	5,891
80	295,0	0,001 384	0,023 53	1 317	2 760	3,208	5,747
100	311,0	0,001 453	0,018 04	1 408	2 728	3,361	5,620
120	324,7	0,001 527	0,014 28	1 492	2 689	3,497	5,500
160	347,3	0,001 710	0,009 308	1 651	2 585	3,747	5,253
200	365,7	0,002 037	0,005 877	1 827	2 418	4,015	4,941

Voda i pregrijana vodena para

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t

specifični volumen v , specifična entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
0	$p = 0,01$ bar			$p = 0,02$ bar		
	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2
20	135,2	2 539	9,061	67,58	2 538	8,740
40	144,5	2 576	9,184	72,21	2 576	8,864
60	153,7	2 613	9,300	76,84	2 613	8,980
80	163,0	2 651	9,410	81,46	2 651	9,089
100	172,2	2 689	9,514	86,08	2 689	9,193
0	$p = 0,04$ bar			$p = 0,06$ bar		
	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	36,08	2 575	8,543	24,04	2 575	8,354
60	38,40	2 613	8,659	25,59	2 612	8,471
80	40,71	2 650	8,769	27,13	2 650	8,581
100	43,03	2 688	8,873	28,68	2 688	8,685
120	45,34	2 726	8,972	30,22	2 726	8,785
0	$p = 0,08$ bar			$p = 0,10$ bar		
	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	19,18	2 612	8,337	15,34	2 612	8,233
80	20,34	2 650	8,448	16,27	2 650	8,344
100	21,50	2 688	8,552	17,20	2 688	8,449
120	22,66	2 726	8,652	18,12	2 726	8,548
0	$p = 0,12$ bar			$p = 0,16$ bar		
	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	12,77	2 611	8,148	9,570	2 611	8,014
80	13,55	2 649	8,259	10,16	2 649	8,125
100	14,33	2 687	8,364	10,74	2 687	8,230
120	15,10	2 725	8,464	11,32	2 725	8,330
140	15,87	2 764	8,559	11,90	2 763	8,425

Voda i pregrijana

Toplinska svojstva pri
specifični volumen v , specifična

vodena para (nastavak)

tlaku p i temperaturi t
entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 0,2$ bar			0,25 bar			
0	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	8,117	2 648	8,021	6,488	2 647	7,916
100	8,585	2 686	8,126	6,864	2 686	8,022
120	9,051	2 725	8,226	7,237	2 724	8,123
140	9,516	2 763	8,322	7,611	2 763	8,219
160	9,980	2 802	8,413	7,982	2 801	8,310

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 0,3$ bar			0,4 bar			
0	0,001 000 2	-0,0	-0,000 2	0,001 000 2	0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	5,401	2 647	7,830	4,042	2 645	7,694
100	5,714	2 685	7,936	4,279	2 684	7,801
120	6,027	2 724	8,037	4,515	2 723	7,902
140	6,338	2 762	8,133	4,749	2 761	7,999
160	6,648	2 801	8,224	4,983	2 800	8,090
180	6,958	2 840	8,312	5,215	2 839	8,178

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 0,5$ bar			0,6 bar			
0	0,001 000 2	0,0	-0,000 2	0,001 000 2	0,0	-0,000 2
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	83,9	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,1	0,831 0
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	334,9	1,075
100	3,418	2 683	7,695	2,844	2 681	7,609
120	3,607	2 722	7,797	3,002	2 721	7,711
140	3,796	2 761	7,894	3,160	2 760	7,808
160	3,983	2 800	7,986	3,317	2 799	7,901
180	4,170	2 839	8,074	3,473	2 838	7,989
200	4,356	2 878	8,159	3,628	2 877	8,074

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 0,8$ bar			1,0 bar			
0	0,001 000 2	0,0	-0,000 1	0,001 000 2	0,1	-0,000 1
20	0,001 002	83,9	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,5	0,572 1	0,001 008	167,5	0,572 1
60	0,001 017	251,1	0,831 0	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	334,9	1,075	0,001 029	335,0	1,075

100	2,126	2 679	7,470	1,696	2 676	7,362
120	2,246	2 719	7,574	1,793	2 717	7,467
140	2,365	2 758	7,672	1,889	2 756	7,566
160	2,484	2 798	7,766	1,984	2 796	7,660
180	2,601	2 837	7,854	2,078	2 836	7,750
200	2,718	2 876	7,940	2,172	2 875	7,835
220	2,835	2 916	8,021	2,266	2 915	7,917
240	2,952	2 955	8,100	2,359	2 955	7,996
260	3,068	2 995	8,176	2,453	2 994	8,072
280	3,184	3 035	8,249	2,546	3 034	8,145
300	3,300	3 075	8,320	2,639	3 075	8,217

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
$p = 1,2$ bar			1,6 bar			
0	0,001 000 2	0,1	-0,000 1	0,001 000 1	0,1	-0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,0	0,296 3
40	0,001 008	167,6	0,572 1	0,001 008	167,6	0,572 1
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,2	0,830 9
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,0	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,1	1,307
120	1,490	2 714	7,379	1,112	2 710	7,237
140	1,571	2 755	7,479	1,173	2 751	7,340
160	1,651	2 795	7,573	1,234	2 792	7,436
180	1,730	2 835	7,663	1,294	2 832	7,527
200	1,808	2 874	7,749	1,353	2 873	7,613
220	1,887	2 914	7,832	1,413	2 913	7,696
240	1,965	2 954	7,911	1,471	2 953	7,776
260	2,043	2 994	7,987	1,530	2 993	7,852
280	2,120	3 034	8,061	1,588	3 033	7,926
300	2,198	3 074	8,132	1,647	3 073	7,998

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t
specifični volumen v , specifična entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p = 2,0$ bar			$p = 2,5$ bar				$p = 5$ bar			$p = 6$ bar		
0	0,001 000 1	0,2	-0,000 1	0,001 000 1	0,2	-0,000 1	0	0,001 000	0,5	-0,000 1	0,001 000	0,6	-0,000 1
20	0,001 002	84,0	0,296 3	0,001 002	84,1	0,296 2	20	0,001 002	84,3	0,296 2	0,001 002	84,4	0,296 2
40	0,001 008	167,6	0,572 0	0,001 008	167,7	0,572 0	40	0,001 008	167,9	0,571 9	0,001 008	168,0	0,571 9
60	0,001 017	251,2	0,830 9	0,001 017	251,3	0,830 9	60	0,001 017	251,5	0,830 7	0,001 017	251,6	0,830 7
80	0,001 029	335,0	1,075	0,001 029	335,1	1,075	80	0,001 029	335,3	1,075	0,001 029	335,4	1,075
100	0,001 044	419,1	1,307	0,001 044	419,2	1,307	100	0,001 044	419,4	1,307	0,001 043	419,4	1,307
120	0,001 061	503,7	1,528	0,001 061	503,8	1,528	120	0,001 061	503,9	1,527	0,001 060	504,0	1,527
140	0,934 9	2 748	7,230	0,744 0	2 743	7,118	140	0,001 080	589,2	1,739	0,001 080	589,3	1,739
160	0,984 0	2 789	7,328	0,784 0	2 786	7,218	160	0,383 5	2 766	6,863	0,316 5	2 758	6,764
180	1,033	2 830	7,420	0,823 2	2 827	7,312	180	0,404 5	2 811	6,965	0,334 6	2 805	6,869
200	1,080	2 871	7,507	0,862 0	2 868	7,400	200	0,425 0	2 855	7,059	0,352 0	2 850	6,966
220	1,128	2 911	7,591	0,900 4	2 909	7,485	220	0,445 0	2 898	7,148	0,369 0	2 894	7,057
240	1,175	2 951	7,671	0,938 5	2 949	7,565	240	0,464 7	2 940	7,232	0,385 7	2 936	7,142
260	1,222	2 991	7,748	0,976 3	2 990	7,643	260	0,484 1	2 982	7,312	0,402 1	2 979	7,223
280	1,269	3 032	7,822	1,014	3 030	7,717	280	0,503 4	3 023	7,388	0,418 3	3 021	7,300
300	1,316	3 072	7,894	1,052	3 071	7,789	300	0,522 6	3 065	7,461	0,434 4	3 062	7,374
	$p = 3$ bar			$p = 4$ bar			320	0,541 6	3 106	7,532	0,450 4	3 104	7,445
0	0,001 000 1	0,3	-0,000 1	0,001 000	0,4	-0,000 1	340	0,560 6	3 147	7,601	0,466 3	3 145	7,514
20	0,001 002	84,1	0,296 2	0,001 002	84,2	0,296 2	360	0,579 5	3 189	7,667	0,482 1	3 187	7,581
40	0,001 008	167,7	0,572 0	0,001 008	167,8	0,572 0	380	0,598 4	3 230	7,732	0,497 9	3 229	7,646
60	0,001 017	251,3	0,830 8	0,001 017	251,4	0,830 8	400	0,617 2	3 272	7,795	0,513 6	3 271	7,709
80	0,001 029	335,1	1,075	0,001 029	335,2	1,075	420	0,635 9	3 314	7,856	0,529 3	3 313	7,771
100	0,001 044	419,2	1,307	0,001 044	419,3	1,307	440	0,654 7	3 356	7,916	0,545 0	3 355	7,831
120	0,001 061	503,8	1,528	0,001 061	503,9	1,527	460	0,673 4	3 398	7,975	0,560 6	3 397	7,889
140	0,616 7	2 739	7,025	0,001 080	589,1	1,739	480	0,692 1	3 441	8,032	0,576 2	3 440	7,947
160	0,650 6	2 782	7,127	0,483 7	2 774	6,981	500	0,710 8	3 484	8,088	0,591 8	3 483	8,003
180	0,683 7	2 824	7,222	0,509 3	2 818	7,079	520	0,729 4	3 527	8,143	0,607 4	3 526	8,058
200	0,716 4	2 866	7,312	0,534 3	2 860	7,171	540	0,748 1	3 570	8,197	0,623 0	3 569	8,112
220	0,748 6	2 907	7,397	0,558 9	2 902	7,258	560	0,766 7	3 614	8,250	0,638 6	3 613	8,165
240	0,780 5	2 948	7,478	0,583 1	2 944	7,340	580	0,785 3	3 657	8,302	0,654 1	3 657	8,217
260	0,812 3	2 988	7,556	0,607 2	2 985	7,419	600	0,803 9	3 702	8,353	0,669 6	3 701	8,268
280	0,843 8	3 029	7,631	0,631 1	3 026	7,495	620	0,822 5	3 746	8,403	0,685 1	3 745	8,318
300	0,875 3	3 070	7,703	0,654 9	3 067	7,568	640	0,841 1	3 790	8,452	0,700 7	3 790	8,367

Voda i pregrijana

vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri

tlaku *p* i temperaturi *t*

specifični volumen *v*, specifična

entalpija *h*, specifična entropija *s*

<i>t</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K	<i>t</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg K
<i>p</i> = 8 bar							<i>p</i> = 10 bar						
0	0,001 000	0,8	−0,000 1	0,001 000	1,0	−0,000 1	0	0,001 000	1,2	−0,000 1	0,000 999 4	1,6	−0,000 0
20	0,001 001	84,6	0,296 1	0,001 001	84,8	0,296 1	20	0,001 001	85,0	0,296 1	0,001 001	85,4	0,296 0
40	0,001 008	168,2	0,571 8	0,001 007	168,3	0,571 7	40	0,001 007	168,5	0,571 7	0,001 007	168,9	0,571 5
60	0,001 017	251,7	0,830 6	0,001 017	251,9	0,830 5	60	0,001 017	252,1	0,830 4	0,001 016	252,4	0,830 1
80	0,001 029	335,5	1,075	0,001 029	335,7	1,075	80	0,001 029	335,8	1,075	0,001 028	336,1	1,074
100	0,001 043	419,6	1,306	0,001 043	419,7	1,306	100	0,001 043	419,9	1,306	0,001 043	420,2	1,306
120	0,001 060	504,1	1,527	0,001 060	504,3	1,527	120	0,001 060	504,4	1,527	0,001 060	504,7	1,526
140	0,001 080	589,4	1,739	0,001 080	589,5	1,738	140	0,001 080	589,6	1,738	0,001 079	589,9	1,738
160	0,001 102	675,6	1,942	0,001 102	675,7	1,942	160	0,001 102	675,8	1,942	0,001 102	676,0	1,941
180	0,247 1	2 791	6,712	0,194 4	2 777	6,584	180	0,001 127	763,2	2,139	0,001 127	763,4	2,139
200	0,260 8	2 839	6,815	0,205 9	2 827	6,692	200	0,169 2	2 814	6,587	0,001 156	852,4	2,331
220	0,274 0	2 884	6,909	0,216 9	2 875	6,791	220	0,178 8	2 865	6,691	0,131 0	2 843	6,524
240	0,286 9	2 929	6,998	0,227 6	2 921	6,883	240	0,187 9	2 912	6,786	0,138 3	2 895	6,626
260	0,299 5	2 972	7,081	0,237 9	2 965	6,968	260	0,196 8	2 958	6,874	0,145 3	2 944	6 720
280	0,311 9	3 015	7,160	0,248 0	3 009	7,049	280	0,205 4	3 003	6,956	0,152 1	2 991	6,806
300	0,324 1	3 057	7,235	0,258 0	3 052	7,125	300	0,213 9	3 047	7,034	0,158 7	3 036	6,887
320	0,336 3	3 099	7,307	0,267 8	3 095	7,198	320	0,222 2	3 090	7,109	0,165 1	3 081	6,964
340	0,348 3	3 141	7,377	0,277 6	3 137	7,269	340	0,230 4	3 133	7,180	0,171 4	3 125	7,037
360	0,360 3	3 183	7,444	0,287 3	3 180	7,337	360	0,238 6	3 176	7,248	0,177 7	3 169	7,107
380	0,372 3	3 225	7,509	0,296 9	3 222	7,403	380	0,246 7	3 219	7,315	0,183 8	3 212	7,174
400	0,384 2	3 268	7,573	0,306 5	3 264	7,467	400	0,254 7	3 261	7,379	0,190 0	3 255	7,239
420	0,396 0	3 310	7,635	0,316 0	3 307	7,529	420	0,262 7	3 304	7,442	0,196 1	3 298	7,303
440	0,407 8	3 352	7,695	0,325 6	3 350	7,589	440	0,270 7	3 347	7,502	0,202 1	3 341	7,364
460	0,419 6	3 395	7,754	0,335 0	3 392	7,648	460	0,278 7	3 390	7,562	0,208 2	3 385	7,424
480	0,431 4	3 438	7,812	0,344 5	3 435	7,706	480	0,286 6	3 433	7,620	0,214 2	3 428	7,482
500	0,443 2	3 481	7,868	0,354 0	3 478	7,763	500	0,294 5	3 476	7,677	0,220 2	3 472	7,540
520	0,454 9	3 524	7,923	0,363 4	3 522	7,818	520	0,302 4	3 520	7,732	0,226 1	3 515	7,595
540	0,466 6	3 567	7,977	0,372 8	3 565	7,872	540	0,310 3	3 563	7,786	0,232 1	3 559	7,650
560	0,478 3	3 611	8,030	0,382 2	3 609	7,926	560	0,318 1	3 607	7,840	0,238 0	3 604	7,704
580	0,490 0	3 655	8,082	0,391 6	3 653	7,978	580	0,326 0	3 651	7,892	0,244 0	3 648	7,756
600	0,501 7	3 699	8,134	0,401 0	3 697	8,029	600	0,333 8	3 696	7,944	0,249 9	3 693	7,808
620	0,513 4	3 744	8,184	0,410 4	3 742	8,080	620	0,341 7	3 740	7,994	0,255 8	3 737	7,859
640	0,525 1	3 788	8,233	0,419 7	3 787	8,129	640	0,349 5	3 785	8,044	0,261 7	3 782	7,909

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t
 specifični volumen v , specifična entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p = 20$ bar			25 bar				$p = 30$ bar			40 bar		
0	0,000 999 2	2,0	-0,000 0	0,000 999 0	2,5	0,000 0	0	0,000 998 7	3,0	0,000 1	0,000 998 2	4,0	0,000 2
20	0,001 001	85,7	0,295 9	0,001 001	86,2	0,295 8	20	0,001 000	86,7	0,295 7	0,000 999 9	87,6	0,295 5
40	0,001 007	169,2	0,571 3	0,001 007	169,7	0,571 1	40	0,001 007	170,1	0,571 0	0,001 006	171,0	0,570 6
60	0,001 016	252,7	0,829 9	0,001 016	253,2	0,829 7	60	0,001 016	253,6	0,829 4	0,001 015	254,4	0,828 9
80	0,001 028	336,5	1,074	0,001 028	336,9	1,074	80	0,001 028	337,3	1,073	0,001 027	338,1	1,073
100	0,001 043	420,5	1,305	0,001 043	420,9	1,305	100	0,001 042	421,2	1,305	0,001 042	422,0	1,304
120	0,001 060	505,0	1,526	0,001 059	505,3	1,526	120	0,001 059	505,7	1,525	0,001 058	506,4	1,524
140	0,001 079	590,2	1,737	0,001 079	590,5	1,737	140	0,001 078	590,8	1,736	0,001 078	591,5	1,735
160	0,001 101	676,3	1,941	0,001 101	676,6	1,940	160	0,001 101	676,9	1,940	0,001 100	677,5	1,939
180	0,001 127	763,6	2,138	0,001 126	763,9	2,137	180	0,001 126	764,1	2,137	0,001 125	764,6	2,135
200	0,001 156	852,6	2,330	0,001 156	852,8	2,329	200	0,001 155	853,0	2,328	0,001 154	853,4	2,327
220	0,102 1	2 820	6,383	0,001 190	943,7	2,518	220	0,001 189	943,9	2,517	0,001 188	944,1	2,515
240	0,108 4	2 876	6,494	0,084 36	2 851	6,352	240	0,068 16	2 823	6,224	0,001 228	1 038	2,701
260	0,114 4	2 928	6,594	0,089 51	2 907	6,461	260	0,072 83	2 885	6,343	0,051 72	2 836	6,135
280	0,120 0	2 978	6,685	0,094 33	2 960	6,558	280	0,077 12	2 942	6,448	0,055 44	2 902	6,258
300	0,125 5	3 025	6,770	0,098 93	3 010	6,647	300	0,081 16	2 995	6,542	0,058 83	2 962	6,364
320	0,130 8	3 071	6,849	0,103 4	3 059	6,730	320	0,085 00	3 045	6,629	0,062 00	3 018	6,459
340	0,136 0	3 116	6,924	0,107 6	3 105	6,807	340	0,088 71	3 094	6,709	0,064 99	3 070	6,546
360	0,141 1	3 161	6,995	0,111 8	3 151	6,880	360	0,092 32	3 141	6,784	0,067 87	3 120	6,627
380	0,146 1	3 205	7,064	0,116 0	3 196	6,951	380	0,095 84	3 187	6,856	0,070 66	3 168	6,702
400	0,151 1	3 249	7,130	0,120 0	3 241	7,018	400	0,099 31	3 233	6,925	0,073 38	3 216	6,773
420	0,156 1	3 292	7,194	0,124 1	3 285	7,083	420	0,102 7	3 278	6,991	0,076 04	3 262	6,841
440	0,161 0	3 336	7,256	0,128 1	3 329	7,146	440	0,106 1	3 322	7,054	0,078 66	3 308	6,907
460	0,165 9	3 380	7,316	0,132 0	3 373	7,207	460	0,109 5	3 367	7,116	0,081 25	3 354	6,970
480	0,170 7	3 423	7,375	0,136 0	3 418	7,266	480	0,112 8	3 412	7,176	0,083 81	3 400	7,031
500	0,175 6	3 467	7,432	0,139 9	3 462	7,324	500	0,116 1	3 456	7,235	0,086 34	3 445	7,091
520	0,180 4	3 511	7,489	0,143 8	3 506	7,381	520	0,119 4	3 501	7,292	0,088 86	3 490	7,149
540	0,185 2	3 556	7,544	0,147 7	3 551	7,436	540	0,122 6	3 546	7,347	0,091 35	3 536	7,206
560	0,190 0	3 600	7,597	0,151 5	3 595	7,490	560	0,125 9	3 591	7,402	0,093 84	3 581	7,261
580	0,194 7	3 644	7,650	0,155 4	3 640	7,543	580	0,129 1	3 636	7,455	0,096 31	3 627	7,315
600	0,199 5	3 689	7,702	0,159 2	3 685	7,596	600	0,132 3	3 681	7,508	0,098 76	3 673	7,368
620	0,204 3	3 734	7,753	0,163 0	3 730	7,647	620	0,135 6	3 727	7,559	0,101 2	3 719	7,420
640	0,209 0	3 779	7,803	0,166 9	3 776	7,697	640	0,138 8	3 772	7,610	0,103 6	3 765	7,471

Voda i pregrijana vodena para (nastavak)

Toplinska svojstva pri tlaku p i temperaturi t
specifični volumen v , specifična entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K
	$p = 50$ bar			60 bar				$p = 80$ bar			100 bar		
0	0,000 997 7	5,1	0,000 2	0,000 997 2	6,1	0,000 3	0	0,000 996 2	8,1	0,000 4	0,000 995 3	10,1	0,000 5
20	0,000 999 5	88,6	0,295 2	0,000 999 0	89,5	0,295 0	20	0,000 998 1	91,4	0,294 6	0,000 997 2	93,2	0,294 2
40	0,001 006	171,9	0,570 2	0,001 005	172,7	0,569 8	40	0,001 004	174,5	0,569 0	0,001 003	176,3	0,568 2
60	0,001 015	255,3	0,828 3	0,001 014	256,1	0,827 8	60	0,001 014	257,8	0,826 7	0,001 013	259,4	0,825 7
80	0,001 027	338,8	1,072	0,001 026	339,6	1,071	80	0,001 025	341,2	1,070	0,001 025	342,8	1,069
100	0,001 041	422,7	1,303	0,001 041	423,5	1,302	100	0,001 040	425,0	1,301	0,001 039	426,5	1,299
120	0,001 058	507,1	1,523	0,001 057	507,8	1,522	120	0,001 056	509,2	1,521	0,001 055	510,6	1,519
140	0,001 077	592,1	1,734	0,001 076	592,8	1,733	140	0,001 075	594,1	1,731	0,001 074	595,4	1,729
160	0,001 099	678,1	1,937	0,001 098	678,6	1,936	160	0,001 097	679,8	1,934	0,001 095	681,0	1,932
180	0,001 124	765,2	2,134	0,001 123	765,7	2,133	180	0,001 122	766,7	2,130	0,001 120	767,8	2,127
200	0,001 153	853,8	2,325	0,001 152	854,2	2,324	200	0,001 150	855,1	2,321	0,001 148	855,9	2,318
220	0,001 187	944,4	2,513	0,001 185	944,7	2,511	220	0,001 183	945,3	2,508	0,001 181	945,9	2,504
240	0,001 226	1 038	2,698	0,001 225	1 038	2,696	240	0,001 222	1 038	2,692	0,001 219	1 038	2,688
260	0,001 275	1 135	2,884	0,001 273	1 135	2,881	260	0,001 269	1 135	2,876	0,001 265	1 134	2,871
280	0,042 22	2 857	6,089	0,033 17	2 805	5,927	280	0,001 328	1 236	3,063	0,001 322	1 235	3,056
300	0,045 30	2 926	6,211	0,036 14	2 885	6,069	300	0,024 26	2 787	5,794	0,001 398	1 343	3,249
320	0,048 10	2 987	6,316	0,038 74	2 954	6,188	320	0,026 81	2 879	5,952	0,019 26	2 784	5,715
340	0,050 70	3 044	6,411	0,041 11	3 017	6,291	340	0,028 96	2 955	6,079	0,021 47	2 883	5,880
360	0,053 16	3 098	6,497	0,043 30	3 074	6,384	360	0,030 88	3 023	6,187	0,023 31	2 965	6,011
380	0,055 51	3 149	6,576	0,045 39	3 128	6,468	380	0,032 65	3 084	6,283	0,024 93	3 036	6,121
400	0,057 79	3 198	6,651	0,047 38	3 180	6,546	400	0,034 31	3 142	6,369	0,026 41	3 100	6,218
420	0,060 01	3 247	6,722	0,049 31	3 230	6,620	420	0,035 89	3 196	6,449	0,027 79	3 150	6,306
440	0,062 18	3 294	6,789	0,051 18	3 279	6,689	440	0,037 40	3 249	6,524	0,029 11	3 216	6,386
460	0,064 31	3 341	6,854	0,053 02	3 327	6,756	460	0,038 87	3 300	6,595	0,030 36	3 271	6,461
480	0,066 42	3 387	6,916	0,054 82	3 375	6,820	480	0,040 30	3 350	6,662	0,031 58	3 323	6,532
500	0,068 49	3 434	6,977	0,056 59	3 422	6,882	500	0,041 70	3 399	6,726	0,032 76	3 375	6,599
520	0,070 55	3 480	7,036	0,058 34	3 469	6,942	520	0,043 08	3 447	6,788	0,033 91	3 425	6,664
540	0,072 59	3 526	7,093	0,060 08	3 516	7,000	540	0,044 43	3 496	6,848	0,035 04	3 475	6,726
560	0,074 61	3 572	7,149	0,061 79	3 563	7,057	560	0,045 77	3 544	6,907	0,036 15	3 525	6,786
580	0,076 62	3 618	7,204	0,063 49	3 609	7,112	580	0,047 09	3 592	6,964	0,037 24	3 574	6,845
600	0,078 62	3 665	7,258	0,065 18	3 656	7,166	600	0,048 39	3 640	7,019	0,038 32	3 623	6,901
620	0,080 60	3 711	7,310	0,066 86	3 703	7,220	620	0,049 69	3 687	7,073	0,039 39	3 672	6,957
640	0,082 58	3 757	7,362	0,068 53	3 750	7,272	640	0,050 97	3 735	7,126	0,040 44	3 720	7,011

Voda i pregrijana

Toplinska svojstva pri
specifični volumen v , specifična

vodena para (nastavak)

tlaku p i temperaturi t

entalpija h , specifična entropija s

t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	120 bar			160 bar			t °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kg K	200 bar			250 bar																																																				
				v	h	s	v	h	s					v	h	s	v	h	s																																																		
0	0,000 994 3	12,1	0,000 6	0,000 992 3	16,1	0,000 8	0	0,000 990 4	20,1	0,000 8	0,000 988 1	25,1	0,000 9	20	0,000 992 9	102,5	0,291 9	0,000 990 7	107,1	0,290 7	40	0,001 003	178,0	0,567 4	0,001 001	181,6	0,565 9	40	0,000 999 2	185,1	0,564 3	0,000 997 1	189,4	0,562 3	60	0,001 012	261,1	0,824 6	0,001 010	264,5	0,822 5	60	0,001 008	267,8	0,820 4	0,001 006	272,0	0,817 8	80	0,001 024	344,4	1,067	0,001 022	347,6	1,065	80	0,001 020	350,8	1,062	0,001 018	354,8	1,059							
100	0,001 038	428,0	1,298	0,001 036	431,0	1,295	100	0,001 034	434,0	1,292	0,001 031	437,8	1,288	120	0,001 054	512,1	1,517	0,001 052	514,9	1,514	120	0,001 050	517,7	1,510	0,001 047	521,3	1,506	140	0,001 073	596,7	1,727	0,001 070	599,4	1,723	140	0,001 068	602,0	1,719	0,001 065	605,4	1,714	160	0,001 094	682,2	1,929	0,001 091	684,6	1,925	160	0,001 089	687,1	1,920	0,001 085	690,2	1,915	180	0,001 118	768,8	2,125	0,001 115	771,0	2,120	180	0,001 112	773,1	2,115	0,001 108	775,9	2,108
200	0,001 146	856,8	2,315	0,001 142	858,6	2,309	200	0,001 139	860,4	2,303	0,001 134	862,8	2,296	220	0,001 178	946,6	2,500	0,001 174	947,9	2,494	220	0,001 169	949,3	2,487	0,001 164	951,2	2,479	240	0,001 216	1 039	2,684	0,001 210	1 039	2,676	240	0,001 205	1 040	2,668	0,001 198	1 042	2,658	260	0,001 261	1 134	2,866	0,001 254	1 134	2,856	260	0,001 247	1 134	2,847	0,001 238	1 134	2,836	280	0,001 317	1 234	3,050	0,001 307	1 233	3,038	280	0,001 297	1 231	3,026	0,001 286	1 230	3,013
300	0,001 390	1 341	3,240	0,001 374	1 337	3,224	300	0,001 361	1 334	3,209	0,001 345	1 331	3,192	320	0,001 494	1 461	3,445	0,001 467	1 452	3,421	320	0,001 445	1 446	3,400	0,001 421	1 439	3,376	340	0,016 19	2 795	5,675	0,001 618	1 588	3,646	340	0,001 570	1 573	3,610	0,001 527	1 558	3,574	360	0,018 11	2 898	5,841	0,011 04	2 717	5,463	360	0,001 827	1 743	3,884	0,001 698	1 701	3,804	380	0,019 69	2 982	5,971	0,012 87	2 851	5,673	380	0,008 246	2 660	5,317	0,002 240	1 941	4,176
400	0,021 08	3 055	6,081	0,014 27	2 951	5,824	400	0,009 947	2 821	5,559	0,006 014	2 582	5,146	420	0,022 36	3 121	6,178	0,015 46	3 034	5,946	420	0,011 20	2 933	5,723	0,007 580	2 774	5,427	440	0,023 55	3 182	6,265	0,016 53	3 108	6,050	440	0,012 24	3 024	5,852	0,008 696	2 902	5,609	460	0,024 67	3 240	6,345	0,017 51	3 175	6,143	460	0,013 15	3 103	5,962	0,009 609	3 002	5,748	480	0,025 75	3 296	6,420	0,018 42	3 237	6,227	480	0,013 99	3 174	6,058	0,010 41	3 089	5,864
500	0,026 79	3 350	6,491	0,019 29	3 297	6,305	500	0,014 77	3 241	6,146	0,011 13	3 166	5,966	520	0,027 79	3 402	6,558	0,020 13	3 355	6,379	520	0,015 51	3 304	6,226	0,011 80	3 238	6,057	540	0,028 77	3 454	6,622	0,020 93	3 410	6,448	540	0,016 21	3 365	6,302	0,012 42	3 305	6,141	560	0,029 73	3 505	6,684	0,021 71	3 465	6,514	560	0,016 88	3 423	6,372	0,013 01	3 369	6,218	580	0,030 68	3 556	6,744	0,022 46	3 518	6,578	580	0,017 53	3 480	6,440	0,013 58	3 430	6,291
600	0,031 60	3 606	6,802	0,023 20	3 571	6,639	600	0,018 16	3 536	6,504	0,014 13	3 490	6,360	620	0,032 52	3 656	6,859	0,023 93	3 623	6,698	620	0,018 78	3 590	6,566	0,014 65	3 548	6,426	640	0,033 42	3 705	6,914	0,024 64	3 675	6,755	640	0,019 38	3 644	6,626	0,015 17	3 605	6,490																												

Zasićena para
Toplinska svojstva
tlak p ; specifični volumen v', v'' ;

t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
-------------	------------	----------------------------	-----------------------------	---------------	----------------	-----------------	------------------

Ugljični dioksid CO₂

Krutina — para

-100	0,139	0,000 627	2,336	-373	212	-1,676	1,704
-80	0,896	0,000 639	0,398	-350	224	-1,549	1,422
-60	4,10	0,000 657	0,091 2	-319	231	-1,400	1,180
-56,6	5,18	0,000 661	0,072 2	-313	231	-1,371	1,140

Kapljevina — para

-56,6	5,18	0,000 849	0,072 2	-117	231	-0,467	1,140
-50	6,84	0,000 867	0,055 4	-105	233	-0,410	1,101
-40	10,05	0,000 897	0,038 2	-85,4	235	-0,327	1,048
-30	14,27	0,000 931	0,027 0	-66,1	237	-0,248	0,998
-25	16,81	0,000 950	0,022 9	-56,5	237	-0,209	0,975
-20	19,67	0,000 971	0,019 5	-46,5	237	-0,170	0,951
-15	22,89	0,000 994	0,016 6	-36,0	237	-0,130	0,928
-10	26,47	0,001 019	0,014 2	-24,7	237	-0,089 2	0,905
-5	30,45	0,001 048	0,012 1	-13,0	236	-0,046 0	0,883
0	34,85	0,001 081	0,010 4	0	235	0	0,860
5	39,72	0,001 120	0,008 85	13,0	232	0,043 1	0,831
10	45,06	0,001 166	0,007 52	27,2	229	0,091 3	0,802
15	50,93	0,001 223	0,006 32	42,3	223	0,142	0,768
20	57,33	0,001 298	0,005 26	58,6	214	0,196	0,726
25	64,32	0,001 417	0,004 17	78,7	198	0,263	0,663
30	71,92	0,001 677	0,002 99	108	172	0,357	0,566
31	73,51	0,002 156	0,002 16	140	140	0,460	0,460

Sumporni dioksid SO₂

-50	0,119	0,000 642	2,429	-61,5	353	-0,252	1,607
-40	0,218	0,000 652	1,378	-50,2	359	-0,198	1,557
-30	0,380	0,000 663	0,819	-37,7	365	-0,146	1,509
-20	0,635	0,000 674	0,507	-25,5	370	-0,097 1	1,465
-10	1,014	0,000 686	0,328	-13,0	375	-0,049 8	1,423
0	1,554	0,000 697	0,220	0	379	0	1,388
10	2,296	0,000 710	0,154	13,4	383	0,050 7	1,357
20	3,284	0,000 723	0,108	27,2	387	0,101	1,328
30	4,566	0,000 738	0,079	41,0	391	0,150	1,302
40	6,186	0,000 754	0,059	55,7	393	0,197	1,277
50	8,189	0,000 772	0,045	69,9	396	0,245	1,254

rashladnih tvari

pri temperaturi t_s
specifična entalpija h', h'' ; specifična entropija s', s''

t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
-------------	------------	----------------------------	-----------------------------	---------------	----------------	-----------------	------------------

Amonijak NH₃

-70	0,108	0,001 379	9,01	-310,2	1 154	-1,307	5,903
-60	0,219	0,001 401	4,70	-267,5	1 172	-1,103	5,653
-50	0,409	0,001 425	2,62	-225,2	1 189	-0,907 5	5,433
-40	0,718	0,001 449	1,55	-180,8	1 206	-0,713 7	5,237
-30	1,195	0,001 476	0,963	-136,5	1 222	-0,526 6	5,061
-25	1,516	0,001 490	0,772	-114,3	1 229	-0,435 3	4,980
-20	1,903	0,001 504	0,624	-91,3	1 237	-0,345 8	4,902
-15	2,363	0,001 519	0,509	-68,7	1 244	-0,257 4	4,827
-10	2,909	0,001 534	0,419	-46,0	1 250	-0,170 4	4,756
-5	3,549	0,001 550	0,347	-23,0	1 256	-0,084 6	4,688
0	4,294	0,001 566	0,290	0	1 262	0	4,622
5	5,157	0,001 583	0,244	23,0	1 268	0,083 7	4,558
10	6,150	0,001 601	0,206	46,5	1 272	0,166 2	4,496
15	7,283	0,001 619	0,175	69,9	1 277	0,247 8	4,436
20	8,572	0,001 639	0,149	93,8	1 280	0,328 6	4,378
25	10,03	0,001 659	0,128	117,6	1 284	0,408 6	4,322
30	11,67	0,001 680	0,111	141,5	1 287	0,487 7	4,266
40	15,54	0,001 726	0,083 3	190,5	1 291	0,643 8	4,158
50	20,33	0,001 777	0,063 5	240,3	1 292	0,797 0	4,052

Monoklormetan (metilklorid) CH₃Cl

-30	0,772	0,000 986	0,528	-46,0	388	-0,178 3	1,610
-20	1,177	0,001 004	0,354	-31,0	394	-0,118 0	1,563
-10	1,750	0,001 022	0,241	-15,5	400	-0,057 8	1,523
0	2,521	0,001 042	0,168	0	406	0	1,486
10	3,552	0,001 063	0,120	15,9	411	0,056 5	1,453
20	4,889	0,001 085	0,087 3	31,8	416	0,111 8	1,423
30	6,586	0,001 109	0,065 1	47,7	420	0,165 8	1,395
40	8,702	0,001 134	0,051 1	64,0	424	0,218 5	1,371

Diklormetan (metilenklorid) CH₂Cl₂

-20	0,0559	—	4,14	-28,5	353	-0,112	1,399
-10	0,109	—	2,35	-14,2	358	-0,053 2	1,363
0	0,188	—	1,42	0	363	0	1,331
10	0,299	—	0,92	14,2	368	0,047 7	1,297
20	0,469	0,000 749	0,61	28,5	372	0,091 3	1,263
30	0,693	—	0,417	44,0	377	0,131	1,232

Zasićena para

Toplinska svojstva
tlak p ; specifični volumen v' , v'' ;

rashladnih tvari (nastavak)

pri temperaturi t_s
specifična entalpija h' , h''

t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
R 11 — monofluortriklorometan CFCl₃					
-40	0,051	0,000 616 7	2,760	- 33,20	170,3
-30	0,092	0,000 625 0	1,533	- 25,00	175,3
-20	0,157	0,000 633 5	0,963	- 16,71	180,3
-10	0,256	0,000 642 5	0,616	- 8,374	185,3
0	0,402 1	0,000 651 9	0,405	0,000	190,4
10	0,605 6	0,000 661 9	0,277	8,457	195,5
20	0,886 5	0,000 672 2	0,194	17,04	200,5
30	1,261	0,000 683 3	0,140	25,71	205,5
40	1,748	0,000 695 0	0,103	34,50	210,5
50	2,357	0,000 707 5	0,077	43,46	215,3
R 12 — difluordiklorometan CF₂Cl₂					
-70	0,123 4	0,000 623 4	1,126	- 59,29	120,9
-60	0,227 0	0,000 634 9	0,639 4	- 51,58	125,6
-50	0,392 2	0,000 646 8	0,385 4	- 43,58	130,5
-40	0,642 4	0,000 659 2	0,244 1	- 35,38	135,5
-30	1,005	0,000 672 5	0,161 3	- 26,92	140,4
-20	1,510	0,000 686 8	0,110 7	- 18,21	145,3
-10	2,191	0,000 701 8	0,078 13	- 9,211	150,2
0	3,086	0,000 717 3	0,056 67	0,000	154,9
10	4,230	0,000 734 2	0,042 04	9,462	159,4
20	5,667	0,000 752 4	0,031 75	19,22	163,8
30	7,434	0,000 773 4	0,024 33	29,18	167,8
40	9,582	0,000 796 8	0,018 82	39,40	171,4
R 13 — trifluoromonoklorometan CF₃Cl					
-100	0,332 6	0,000 626	0,407 0	-100,5	57,99
-80	1,098	0,000 658	0,134 2	- 82,86	66,40
-60	2,817	0,000 695	0,055 42	- 64,18	74,44
-50	4,204	0,000 717	0,037 74	- 54,30	78,13
-40	6,051	0,000 741	0,026 42	- 44,00	81,56
-30	8,394	0,000 769	0,018 89	- 33,45	84,53
-20	11,43	0,000 802	0,013 73	- 22,57	86,96
-10	15,15	0,000 842	0,010 10	- 11,43	88,84
0	19,70	0,000 894	0,007 47	0,000	89,93
10	25,19	0,000 962	0,005 49	12,52	89,68
20	31,78	0,001 079	0,003 829	28,26	86,21

t_s °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
R 13 B 1 — trifluoromonobrommetan CF₃Br					
-100	0,077 18	0,000 462 0	1,246	- 66,57	61,96
-80	0,305 0	0,000 479 5	0,347 7	- 54,85	69,50
-60	0,908 1	0,000 499 6	0,126 2	- 42,71	76,20
-50	1,445	0,000 510 8	0,081 8	- 36,01	79,55
-40	2,200	0,000 523 1	0,055 11	- 29,31	82,90
-30	3,222	0,000 536 6	0,038 35	- 22,19	86,25
-20	4,568	0,000 551 5	0,027 42	- 15,07	88,76
-10	6,292	0,000 568 2	0,020 04	- 7,536	91,69
0	8,454	0,000 587 2	0,014 91	0,000	94,20
10	11,12	0,000 609 2	0,011 25	7,955	96,30
20	14,35	0,000 635 2	0,008 559	16,33	98,39
30	18,22	0,000 667 1	0,006 536	24,70	99,65
40	22,83	0,000 708 4	0,004 969	33,49	100,5
R 21 — monofluordiklorometan CHFCl₂					
-20	0,283 5	0,000 679 8	0,716 9	- 20,56	236,6
-10	0,457 6	0,000 690 3	0,458 7	- 10,30	241,7
0	0,708 6	0,000 701 4	0,305 3	0,000	246,7
10	1,059	0,000 713 1	0,210 3	10,47	252,2
20	1,532	0,000 725 5	0,149 1	20,89	257,2
30	2,156	0,000 738 6	0,108 4	31,48	262,4
40	2,959	0,000 752 5	0,080 4	42,20	267,4
50	3,970	0,000 767 2	0,060 7	53,00	271,2
R 22 — difluoromonoklorometan CHF₂Cl					
-100	-0,020 6	0,000 640 9	8,340	-108,4	158,8
-80	0,103 0	0,000 661 2	1,775	- 87,34	168,7
-60	0,374 6	0,000 682 4	0,535	- 66,36	178,9
-50	0,647 2	0,000 695 0	0,323	- 55,68	183,8
-40	1,055	0,000 708 6	0,205	- 44,92	188,9
-30	1,647	0,000 723 5	0,135	- 33,91	193,6
-20	2,461	0,000 740 5	0,092 9	- 22,69	198,2
-10	3,560	0,000 758 2	0,065 4	- 11,51	202,9
0	5,001	0,000 778 5	0,047 1	0,000	207,0
10	6,855	0,000 800 4	0,034 6	12,64	210,8
20	9,169	0,000 824 4	0,025 8	25,67	214,1
30	12,02	0,000 850 1	0,019 4	39,52	216,8
40	15,48	0,000 883 0	0,014 8	53,47	218,2

Promjene stanja pare

računamo pomoću tablica odnosno dijagrama za vodenu paru (Oznake veličine – v. str. 157 do 160 i 168).

a) **Izohora** $V = \text{konst}$ $v = 1/\rho = V/m = \text{konst}$

Za određeni tlak p uz odgovarajuće vrijednosti v' i v'' vrijedi:

$v < v'$ – tekućina
 $v' < v < v''$ – mokra para
 $v'' < v$ – pregrijana para

Odgovarajuće temperature i ostale veličine određujemo iz tablica ili dijagrama.

Apsolutni rad	$A = 0$
Toplina	$Q = m(h_2 - h_1) - V(p_2 - p_1)$

b) **Izobara i izoterma**

U području mokre pare svakom tlaku p odgovara točno određena temperatura T_s . Izobara je, dakle, ovdje identična s izotermom, dok se izvan područja mokre pare od nje bitno razlikuje.

$p = \text{konst}$	Apsolutni rad	$A = p(V_2 - V_1)$
	Toplina	$Q = H_2 - H_1 = m(h_2 - h_1)$
$T = \text{konst}$	Apsolutni rad	$A = \int p dV$
	Toplina	$Q = T(S_2 - S_1) = mT(s_2 - s_1)$

c) **Izotropia**

Kao kod plinova, upotrebljavamo i kod para za izotropiju jednadžbu

$$pV^\kappa = \text{konst}$$

gdje je κ samo empirijski određena vrijednost i nije ni u kojoj vezi sa specifičnim toplinskim kapacitetima c_p i c_v (u zasićenom je području $c_p = \infty$).

Vrijednost κ iznosi za vodenu paru:

u pregrijanom području ($p < 25$ bar) $\kappa = 1,30$
 u zasićenom području
 – za suho zasićenu paru ($x = 1$) $\kappa = 1,135$
 – za mokru paru ($x > 0,75$) $\kappa = 1,035 + 0,1x$

d) **Prigušivanje pare** $h = \text{konst}$

Za razliku od plinova, za koje pri prigušivanju vrijedi $T = \text{konst}$, temperatura se pare pri prigušivanju mijenja («Joule-Thomsonov efekt»)

$$T \neq \text{konst}$$

Ispod određene temperature («temperatura inverzije») temperatura pare pri prigušivanju pada, a iznad nje raste. Temperatura inverzije iznosi šestostruku do sedmerostruku vrijednost kritične temperature (K).

SMJESE PLINOVA I PARA

Ukupni tlak smjese jednak je zbroju parcijalnih tlakova sastavina smjese (kao kod smjese plinova – vidi str. 167).

Po Daltonovu je zakonu smjesa pare i plina u ravnoteži s tekućinom koja ishlapljuje kada parcijalni tlak pare p' dosegne tlak zasićene pare p_s pri odgovarajućoj temperaturi. To je stanje zasićenosti smjese.

Stanje zasićenosti se narušava promjenom temperature. Pri povećanju temperature raste tlak zasićene pare ($p_s > p'$), smjesa postaje nezasićenom (a para u njoj pregrijanom), te je sposobna primiti nove količine pare koje počinje ishlapljivati iz tekućine (sušenje). Pri padu temperature pada i tlak zasićene pare ($p_s < p'$), smjesa više ne može zadržati sve količine pare pa se iz smjese počinje izlučivati suvišak tekućine (rošenje).

Smjesa zraka i vodene pare (vlažan zrak)

Vlažnost x (apsolutna vlaga) je omjer vodene pare m_v i mase suhog zraka m_z u vlažnom zraku

$$x = m_v/m_z = (R_z/R_v)p'/(p - p') = 0,622 p'/(p - p')$$

Plinske konstante za zrak i vodenu paru

$$R_z = 0,287 \text{ kJ/kgK} \quad R_v = R_m/m_m = 8,314/18 = 0,462 \text{ kJ/kgK}$$

p' je parcijalni tlak vodene pare, p je ukupni tlak smjese, $p - p' = p_z$ je parcijalni tlak suhog zraka.

$$\text{Vlažnost pri zasićenju } (p' = p_s): \quad x_s = 0,622 p_s/(p - p_s)$$

$$\text{Stupanj zasićenosti} \quad \psi = x/x_s$$

Relativna vlažnost φ jest omjer parcijalnog tlaka vodene pare p' i tlaka zasićenja p_s

$$\varphi = p'/p_s \quad (\approx \psi)$$

Specifična entalpija smjese (kJ/kg*) u nezasićenom području s obzirom na izhodište pri ledištu vode, (gdje je $h = 0$) bit će

$$h = c_{pz}t + x(c_{pv}t + r)$$

gdje znače:– specifični toplinski kapacitet zraka $c_{pz} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$
 – specifični toplinski kapacitet vodne pare $c_{pv} = 1,926 \text{ kJ/kgK}$
 – toplina isparivanja vode (pri 0°C) $r = 2500 \text{ kJ/kg}$

t je temperatura u °C pa je

$$h = 1,005 t + x(1,926 t + 2500)$$

Pri potpunom zasićenju ($p' = p_s$, $x = x_s$) je $h = h_s$.

Toplinska svojstva suhoga i zasićenoga zraka pri raznim temperaturama su sabrana na str. 194, za vlažni zrak (nezasićen) na str. 195 do 197. Sve se promjene stanja vlažnog zraka najbolje mogu pratiti u Mollierovu h, x – dijagramu za vlažni zrak (str. 198).

* Specifična vrijednost odnosi se na 1 kg suhog zraka u vlažnoj smjesi, odn. na $(1 + x)$ kg vlažne smjese.

Suhi i zasićeni vlažni zrak
 Toplinska svojstva pri temperaturi t
 parcijalni tlak pare p_s , vlažnost x , spec. entalpija h , spec. volumen v

t °C	Zasićeni vlažni zrak				Suhi zrak	
	p_s mbar	x kg/kg	h kJ/kg	v m ³ /kg	h kJ/kg	v m ³ /kg
-20	1,031	0,000 642	-18,53	0,727	-20,11	0,727
-18	1,248	0,000 777	-16,18	0,733	-18,10	0,733
-16	1,505	0,000 938	-13,77	0,739	-16,09	0,738
-14	1,810	0,001 128	-11,29	0,745	-14,08	0,744
-12	2,171	0,001 353	- 8,71	0,750	-12,07	0,750
-10	2,596	0,001 619	- 6,04	0,756	-10,06	0,756
- 8	3,097	0,001 932	- 3,24	0,762	- 8,04	0,761
- 6	3,684	0,002 300	- 0,31	0,768	- 6,03	0,767
- 4	4,371	0,002 731	+ 2,78	0,774	- 4,02	0,773
- 2	5,172	0,003 234	6,06	0,780	- 2,01	0,778
0	6,106	0,003 821	9,55	0,786	0	0,784
2	7,055	0,004 419	13,08	0,792	2,01	0,790
4	8,129	0,005 098	16,80	0,798	4,02	0,796
6	9,345	0,005 868	20,77	0,804	6,03	0,801
8	10,72	0,006 740	24,99	0,810	8,04	0,807
10	12,27	0,007 727	29,52	0,817	10,06	0,813
12	14,01	0,008 841	34,36	0,823	12,07	0,819
14	15,97	0,010 10	39,58	0,829	14,08	0,824
16	18,17	0,011 51	45,20	0,836	16,09	0,830
18	20,62	0,013 10	51,28	0,842	18,10	0,836
20	23,37	0,014 88	57,87	0,849	20,11	0,842
22	26,42	0,016 88	65,01	0,856	22,12	0,847
24	29,82	0,019 12	72,78	0,863	24,13	0,853
26	33,60	0,021 62	81,25	0,870	26,14	0,859
28	37,78	0,024 42	90,49	0,877	28,15	0,865
30	42,42	0,027 55	100,6	0,885	30,17	0,870
32	47,53	0,031 04	111,6	0,892	32,18	0,876
34	53,18	0,034 94	123,7	0,900	34,19	0,882
36	59,40	0,039 28	137,0	0,908	36,20	0,888
38	66,24	0,044 12	151,6	0,916	38,21	0,893
40	73,75	0,049 53	167,7	0,925	40,22	0,899
42	81,99	0,055 55	185,5	0,934	42,23	0,905
44	91,00	0,062 27	205,0	0,943	44,24	0,911
46	100,9	0,069 77	226,7	0,953	46,25	0,916
48	111,6	0,078 15	250,6	0,963	48,26	0,922
50	123,4	0,087 52	277,2	0,973	50,28	0,928
55	157,4	0,116 2	357,7	1,002	55,30	0,942
60	199,2	0,154 7	464,5	1,034	60,33	0,957
65	250,1	0,207 4	609,1	1,072	65,36	0,971
70	311,6	0,281 6	811,1	1,117	70,39	0,985
75	385,5	0,390 2	1 106	1,170	75,41	1,000
80	473,6	0,559 6	1 563	1,235	80,44	1,014
85	578,0	0,852 1	2 351	1,316	85,47	1,028
90	701,1	1,459	3 983	1,418	90,50	1,043
95	845,3	3,398	9 193	1,553	95,52	1,057

Vlažni zrak

Toplinska svojstva pri temperaturi t
 Parcijalni tlak pare p' (mbar), vlažnost x (g/kg suhoga zraka), specifična entalpija vlažnoga zraka h (kJ/(1 + x) kg vlažnoga zraka)

t °C		Relativna vlažnost φ									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	p'	0,61	1,22	1,83	2,44	3,06	3,67	4,28	4,89	5,50	6,11
	x	0,38	0,76	1,14	1,52	1,91	2,29	2,67	3,06	3,44	3,82
	h	0,95	1,90	2,85	3,80	4,75	5,70	6,65	7,60	8,55	9,55
2	p'	0,71	1,41	2,12	2,82	3,53	4,23	4,94	5,64	6,35	7,05
	x	0,44	0,88	1,32	1,76	2,20	2,64	3,09	3,53	3,97	4,42
	h	3,10	4,20	5,30	6,40	7,50	8,60	9,73	10,8	11,9	13,1
4	p'	0,81	1,63	2,44	3,25	4,07	4,88	5,69	6,50	7,32	8,13
	x	0,50	1,02	1,52	2,03	2,54	3,05	3,56	4,07	4,59	5,10
	h	5,25	6,55	7,81	9,09	10,4	11,6	12,9	14,2	15,5	16,8
6	p'	0,93	1,87	2,81	3,74	4,68	5,61	6,55	7,48	8,42	9,35
	x	0,58	1,17	1,75	2,34	2,92	3,51	4,10	4,69	5,28	5,87
	h	7,45	8,93	10,4	11,9	13,3	14,8	16,3	17,8	19,3	20,7
8	p'	1,07	2,14	3,22	4,29	5,36	6,43	7,50	8,58	9,65	10,72
	x	0,67	1,33	2,01	2,68	3,35	4,03	4,70	5,38	6,06	6,74
	h	9,68	11,3	13,1	14,7	16,4	18,1	19,8	21,5	23,2	25,0
10	p'	1,23	2,45	3,68	4,91	6,14	7,36	8,59	9,82	11,04	12,27
	x	0,77	1,53	2,30	3,07	3,84	4,61	5,39	6,17	6,94	7,73
	h	11,9	13,9	15,8	17,7	19,7	21,6	23,6	25,5	27,5	29,5
12	p'	1,40	2,80	4,20	5,60	7,01	8,41	9,81	11,2	12,6	14,0
	x	0,87	1,75	2,62	3,50	4,39	5,28	6,16	7,05	7,94	8,84
	h	14,2	16,4	18,6	20,8	23,1	25,3	27,5	29,8	32,0	34,3
14	p'	1,60	3,20	4,80	6,40	8,00	9,60	11,2	12,8	14,4	16,0
	x	1,00	2,00	3,00	4,01	5,02	6,03	7,05	8,06	9,09	10,1
	h	16,5	19,1	21,6	24,1	26,7	29,2	31,8	34,4	37,0	39,5

Vlažni zrak

Toplinska svojstva

Parcijalni tlak pare p' (mbar), vlažnost x (g/kg suhoga zraka), specifična

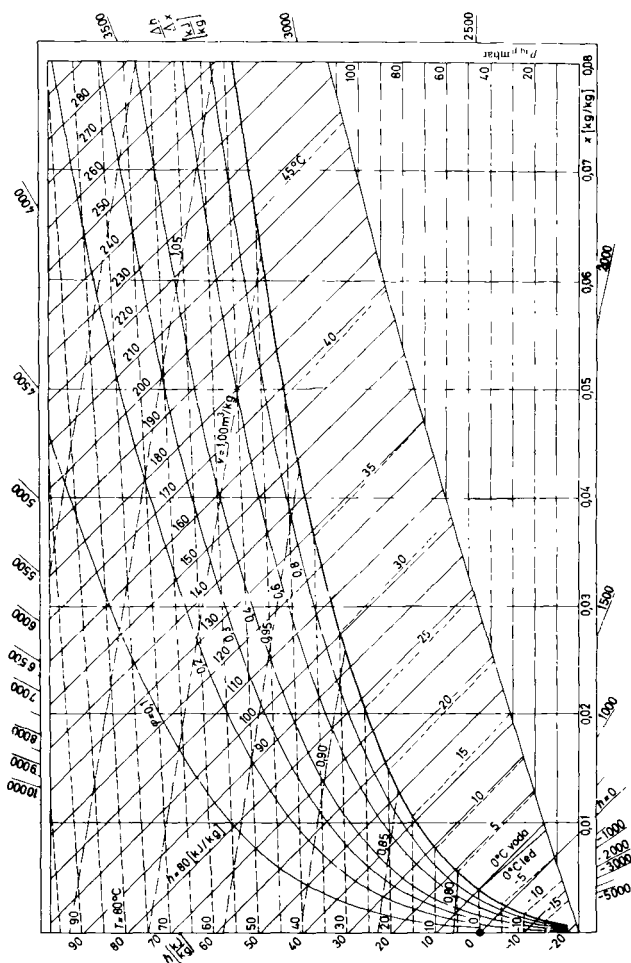
t °C	Relativna vlažnost φ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
16	p'	1,81	3,63	5,45	7,27	9,09	10,9	12,7	14,5	16,4	18,2
	x	1,13	2,27	3,41	4,56	5,71	6,85	8,00	9,15	10,3	11,5
	h	18,9	21,7	24,6	27,5	30,4	33,3	36,2	39,1	42,1	45,1
18	p'	2,06	4,12	6,19	8,25	10,3	12,4	14,4	16,5	18,6	20,6
	x	1,28	2,57	3,87	5,17	6,47	7,81	9,09	10,4	11,8	13,1
	h	21,2	24,5	27,8	31,1	34,4	37,8	41,0	44,3	47,9	51,2
20	p'	2,34	4,67	7,01	9,35	11,7	14,0	16,4	18,7	21,0	23,4
	x	1,46	2,92	4,39	5,87	7,36	8,83	10,4	11,9	13,3	14,9
	h	23,7	27,4	31,1	34,9	38,7	42,4	46,4	50,2	53,7	57,8
22	p'	2,64	5,28	7,93	10,6	13,2	15,9	18,5	21,1	23,8	26,4
	x	1,65	3,30	4,97	6,66	8,32	10,1	11,7	13,4	15,2	16,9
	h	26,2	30,4	34,6	38,9	43,1	47,7	51,7	56,0	60,6	64,9
24	p'	2,98	5,96	8,95	11,9	14,9	17,9	20,9	23,9	26,8	29,8
	x	1,86	3,73	5,62	7,49	9,41	11,3	13,3	15,2	17,1	19,1
	h	28,7	33,5	38,3	43,1	47,9	52,8	57,8	62,7	67,5	72,6
26	p'	3,36	6,72	10,1	13,4	16,8	20,2	23,5	26,9	30,2	33,6
	x	2,10	4,21	6,35	8,45	10,6	12,8	15,0	17,2	19,4	21,6
	h	31,3	36,7	42,2	47,5	53,0	58,6	64,2	69,8	75,4	81,1
28	p'	3,78	7,56	11,3	15,1	18,9	22,7	26,4	30,2	34,0	37,8
	x	2,36	4,74	7,11	9,54	12,0	14,5	16,9	19,4	21,9	24,4
	h	34,0	40,1	46,1	52,3	58,6	65,0	71,1	77,5	83,9	90,3
30	p'	4,24	8,48	12,7	17,0	21,2	25,4	29,7	33,9	38,2	42,4
	x	2,65	5,32	8,00	10,8	13,5	16,2	19,0	21,8	24,7	27,5
	h	36,8	43,6	50,4	57,6	64,5	71,4	78,6	85,7	93,1	100,3
32	p'	4,75	9,51	14,3	19,0	23,8	28,5	33,3	38,0	42,8	47,5
	x	2,97	5,97	9,02	12,1	15,2	18,3	21,4	24,6	27,8	31,1
	h	39,6	47,3	55,1	63,0	70,9	78,8	86,8	95,0	103,2	111,3

zrak (nastavak)

pri temperaturi t

entalpija h (kJ/(1 + x) kg vlažnoga zraka)

t °C	Relativna vlažnost φ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
34	p'	5,32	10,6	16,0	21,3	26,6	31,9	37,2	42,5	47,9	53,2
	x	3,33	6,66	10,1	13,5	17,0	20,5	24,0	27,6	31,3	34,9
	h	42,5	51,1	59,9	68,6	77,6	86,5	95,5	104,7	114,2	123,7
36	p'	5,94	11,9	17,8	23,8	29,7	35,6	41,6	47,8	53,5	59,4
	x	3,72	7,49	11,3	15,2	19,0	23,0	27,0	31,2	35,2	39,3
	h	45,5	55,2	65,0	75,0	84,8	95,0	105,3	116,1	126,4	136,9
38	p'	6,62	13,2	19,9	26,5	33,1	39,7	46,4	53,0	59,6	66,2
	x	4,15	8,32	12,6	16,9	21,3	25,7	30,3	34,8	39,4	44,1
	h	48,7	59,4	70,4	81,4	92,8	104,1	115,9	127,5	139,3	151,4
40	p'	7,38	14,8	22,1	29,5	36,9	44,3	51,6	59,0	66,4	73,8
	x	4,62	9,34	14,1	18,9	23,8	28,8	33,8	39,0	44,2	49,5
	h	51,9	64,0	76,3	88,7	101,3	114,1	127,0	140,4	153,8	167,7
42	p'	8,20	16,4	24,6	32,8	41,0	49,2	57,4	65,6	73,8	82,0
	x	5,14	10,4	15,7	21,1	26,6	32,2	37,9	43,7	49,6	55,5
	h	55,3	68,8	82,5	96,4	110,6	125,0	139,7	154,7	169,9	185,3
44	p'	9,10	18,2	27,3	36,4	45,5	54,6	63,7	72,8	81,9	91,0
	x	5,71	11,5	17,5	23,5	29,7	35,9	42,3	48,8	55,5	62,3
	h	58,7	73,7	89,2	104,7	120,7	136,8	153,2	170,0	187,3	204,9
46	p'	10,1	20,2	30,3	40,3	50,4	60,5	70,6	80,7	90,8	100,8
	x	6,35	12,8	19,4	26,1	33,0	40,1	47,3	54,6	62,1	69,8
	h	62,4	79,1	96,2	113,5	131,3	149,7	168,3	187,2	206,6	226,2
48	p'	11,2	22,3	33,5	44,6	55,8	67,0	78,1	89,3	100,4	111,6
	x	7,05	14,2	21,6	29,0	36,8	44,7	52,7	61,0	69,4	78,1
	h	66,3	84,8	103,9	123,1	143,3	163,7	184,5	206,0	227,7	250,2
50	p'	12,3	24,7	37,0	49,3	61,7	74,0	86,3	98,7	111,0	123,3
	x	7,75	15,8	23,9	32,3	40,9	49,7	58,8	68,1	77,7	87,5
	h	70,1	91,0	112,0	133,8	156,1	178,9	202,5	226,6	251,5	276,9



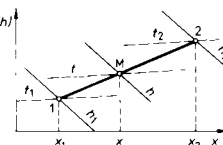
Mollierov dijagram h, x za vlažni zrak

Promjene stanja vlažnoga zraka

1. Miješanje vlažnoga zraka s vlažnim zrakom drugačije vlažnosti

Miješa li se vlažni zrak, mase suhoga zraka m_1 , temperature t_1 i vlažnosti x_1 (stanje u točki 1) s vlažnim zrakom, mase suhoga zraka m_2 , temperature t_2 i vlažnosti x_2 (stanje u točki 2), to će se za smjesu proračunati:

- vlažnost $x = (m_1 x_1 + m_2 x_2) / (m_1 + m_2)$
- specifična entalpija $h = (m_1 h_1 + m_2 h_2) / (m_1 + m_2)$
- temperatura u °C $t = (h - x r) / (c_{pz} + x c_{pv}) = (h - 2500 x) / (1,005 + 1,926 x)$



Sve se te veličine mogu direktno očitati iz dijagrama h, x za stanje smjese u točki M, koja je određena omjerom $M2/M1 = m_1/m_2$.

2. Promjena stanja pri $x = konst$ (izohigra)

Pri zagrijavanju (od stanja 1 do 2) ugrije se vlažni zrak za temperaturnu razliku $t_2 - t_1$ a specifična se entalpija povećava od h_1 do h_2 , pa je stoga potrebno dovoditi toplinu

$$Q = m_z (h_2 - h_1)$$

m_z je masa suhoga zraka.

Pri hlađenju među istim stanjima vlažnoga zraka (od 2 do 1) valja istu količinu topline Q odvesti.

3. Hlađenje do temperature pod rosištem

Pri hlađenju rashladnom površinom, koja ima temperaturu t_0 nižu od temperature rosišta (R), može se smatrati da je nastalo miješanje vlažnoga zraka stanja 2 i graničnog sloja na rashladnoj površini stanja R₀, pri čemu se vlažni zrak ohladi do temperature t' ($< t_1$), a time i osuši. Vlažnost se smanjila od x do x' , jer se izlučila masa vode $m_z(x - x')$. Odvesti treba toplinu

$$Q = m_z [h_2 - h' - (x - x') r]$$

t je konačna temperatura u °C.

4. Vlaženje vodom ili vodenom parom

Dodavanjem mase m_v vode ili vodene pare, specifične entalpije h_v , vlažnom zraku, mase suhoga zraka m_z , vlažnosti x_1 i specifične entalpije h_1 , dobivamo:

- vlažnost smjese $x_2 = x_1 + m_v/m_z$
- specifičnu entalpiju smjese $h_2 = h_1 + h_v m_v/m_z$

STRUJANJE PLINOVA I PARA

Pri stacionarnom strujanju (pri kojem se na bilo kojem mjestu brzina ne mijenja s vremenom ni po veličini ni po smjeru) protok mase je q_m konstantan, dok su druge veličine promjenljive od mjesta do mjesta.

Jednadžba kontinuiteta stacionarnog strujanja povezuje presjek A , brzinu v i gustoću ρ

$$q_m = A v \rho = \text{konst}$$

Pretvorba energije pri strujanju

Ako u prvom glavnom zakonu termodinamike (vidi str. 160) uzmemo u obzir i promjenu kinetičke energije W_k , vrijedi

$$dQ - dW = dH + dW_k$$

gdje je: Q – dovedena ili odvedena toplina, W – dobiveni ili utrošeni tehnički rad, H – entalpija.

Pri procesima strujanja, gdje ne dobivamo niti trošimo rad ($dW = 0$), vrijedi $dQ - dH = dW_k$, a pri izentropskom procesu ($dQ = 0$) još i $-dH = dW_k$, odnosno izraženo specifičnom entalpijom h i brzinama v

$$-dh = v dv \quad h_1 - h_2 = (v_2^2 - v_1^2)/2$$

Bernoullijeva jednažba za plinove i pare vrijedi za male razlike tlakova $\Delta p = p_1 - p_2$, u kojoj možemo računati sa zanemarljivo malom promjenom gustoće, tj. s prosječnom gustoćom $\rho_{med} \approx \text{konst}$ (sličnost s nestlačivim fluidom)

$$p_1 + \rho_{med}(v_1^2/2) = p_2 + \rho_{med}(v_2^2/2)$$

Brzina istjecanja

Teoretska brzina istjecanja v_0 (bez trenja) iznosi (za $v_1 = 0$ i $v_2 = v_0$):

$$a) \text{ pri svim razlikama tlakova} \quad v_0 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

$$b) \text{ pri malim razlikama tlakova} (\rho \approx \text{konst}) \quad v_0 = \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho}$$

Stvarna brzina istjecanja v je zbog trenja o stijenke i čestica fluida među sobom nešto manja

$$v = \varphi v_0$$

gdje je φ – koeficijent brzine (= 0,95 . . . 0,98 u dobro zaobljenih sapnica).

Korisnost pri istjecanju s koeficijentom φ je $\eta = \varphi^2$.

Količina istjecanja

Količina istjecanja (protok) mase $q_m = \alpha A_0 v_0 \rho$ iznosi:

$$a) \text{ pri svim razlikama tlakova} \quad q_m = \alpha A_0 \rho \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

$$b) \text{ pri malim razlikama tlakova} (\rho \approx \text{konst}) \quad q_m = \alpha A_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$

A_0 je čisti presjek otvora sapnice, α je produkt koeficijenta smanjenja presjeka (kontrakcije) mlaza μ i koeficijenta brzine φ .

Istjecanje iz sapnica

Brzina istjecanja v_0 se povećava ako se povećava razlika tlakova $p_1 - p_2$ i postiže najveću vrijednost v_z («Lavalova brzina») pri kritičkom omjeru tlakova

$$p_z/p_1 = [2/(\kappa + 1)]^{\kappa/(\kappa - 1)}$$

Taj kritični omjer tlakova ovisi samo o fluidu (κ) i iznosi za različite fluide:

	κ	p_z/p_1
dvoatomni plinovi	1,40	0,530
pregrijana vodena para	1,30	0,546
zasićeni vodena para	1,135	0,577

Pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 postignuta brzina v_z jednaka je brzini zvuka i najveća je brzina koja se može pojaviti u najužem presjeku sapnice

$$v_z = \sqrt{\kappa p_z / \rho_z}$$

S pomoću jednažbe stanja plina možemo pisati još i

$$\rho_z / \rho_1 = [2/(\kappa + 1)]^{1/(\kappa - 1)} \quad T_z / T_1 = 2/(\kappa + 1)$$

$$v_z = \sqrt{2[\kappa/(\kappa + 1)] \cdot (p_1 / \rho_1)} = \sqrt{2[\kappa/(\kappa + 1)] RT_1}$$

gdje su temperatura, tlak i gustoća ispred sapnice T_1 , p_1 , ρ_1 , a u najužem presjeku sapnice T_z , p_z , ρ_z .

Najveći protok mase q_{max} koji protječe najužim presjekom A_{min} pri kritičnom omjeru tlakova p_z/p_1 iznosi

$$q_{max} = \alpha A_{min} \sqrt{p_1 \rho_1 \kappa [2/(\kappa + 1)]^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)}}$$

gdje je α koeficijent istjecanja i iznosi:

kod dobro izvedenih sapnica	$\alpha = 0,95 \dots 0,98$
pri oštrim rubovima	$\alpha = 0,64 \dots 0,65$

Proširena sapnica (De Laval)

Stanje u najužem presjeku je određeno kritičnim omjerom tlakova p_z/p_1 i Lavalovom brzinom $v_z = \sqrt{2(h_1 - h_z)}$, a u konačnom presjeku tlakom p_2 i brzinom $v_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$.

Prigušivanje

Pri prigušivanju se suma energija ne mijenja

$$h_1 + v_1^2/2 = h_2 + v_2^2/2$$

Ako je brzina strujanja malena te je možemo zanemariti (pri običnom strujanju u cijevima, armaturama, stapnim strojevima itd.), možemo pisati $h = \text{konst}$. U (idealnim) plinovima je tada $T = \text{konst}$, a u para $T \neq \text{konst}$ (str. 192).

IZGARANJE

Izgaranje je ekzotermni proces oksidacije goriva pri kojem se razvija ogrjevna toplina H_s .

Goriva su većinom organski spojevi sastavljeni uglavnom od ugljika C, vodika H, sumpora S, kisika O, dušika N te pepela (p) i vlage (v).

Sastav goriva određujemo s obzirom na jedinicu količine

— za kruta i tekuća goriva s obzirom na jedinicu mase

$$C' + H' + S' + O' + N' + p' + v' = 1 \text{ (kg/kg goriva)}$$

— za plinovita goriva obično s obzirom na jedinicu volumena

$$H_2' + CO' + CO_2' + O_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + H_2O' = 1 \text{ (m}^3/\text{m}^3 \text{ goriva)}$$

Procesi izgaranja osnovnih sastavina krutih i tekućih goriva

ugljika — potpuno izgaranje $C + O_2 = CO_2$

— nepotpuno izgaranje $2C + O_2 = 2CO$

vodika $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

sumpora $S + O_2 = SO_2$

Potreba kisika odnosno zraka

a) U krutih i tekućih goriva iznosi najmanja potrebna količina kisika

$$O_{\min} = C'/12 \cdot \sigma \text{ kmol/kg goriva}$$

σ = »karakteristika goriva«: $\sigma = 1 + 3[H' - (O' - S')/8]/C'$

U krutih je goriva $0 < \sigma < 1,2$ (u čistog ugljika: $\sigma = 1$; u ugljena: $\sigma = 1,1 \dots 1,2$); u tekućih goriva je $\sigma > 1,2$ (u teških: $\sigma = 1,2 \dots 1,3$; u lakih: $\sigma < 1,6$).

b) U plinovitim goriva iznosi najmanja potrebna količina kisika

$$O_{\min} = H_2'/2 + CO'/2 + 2CH_4' + 3C_2H_4' - O_2' \text{ kmol/kmol goriva}$$

Najmanja količina zraka $Z_{\min} = O_{\min}/0,21$

Stvarna količina zraka $Z = \lambda Z_{\min}$

gdje »faktor pretička zraka λ « iznosi:

za ručna ložišta $\lambda = 1,6 \dots 2,0$

za mehanička ložišta $\lambda = 1,3 \dots 1,6$

za ložišta na ulje i ugljenu prašinu $\lambda = 1,2 \dots 1,4$

za plinska ložišta $\lambda = 1,05 \dots 1,2$

Količina dimnih plinova

a) U krutih i tekućih goriva nastaje dimnih plinova (kmol/kg goriva)

$$D = \lambda/0,21 \cdot C'/12 \cdot \sigma + (H'/4 + O'/32 + N'/28 + v'/18)$$

b) U plinovitim goriva nastaje dimnih plinova (kmol/kmol goriva)

$$D = \lambda/0,21 \cdot O_{\min} + (H_2'/2 + CO'/2 + CO_2' + N_2' + CH_4' + C_2H_4' + O_2')$$

Ogrjevne moći

a) Gornja ogrjevna moć H_s (gornja kalorična vrijednost) je sva toplina razvijena pri izgaranju.

b) Donja ogrjevna moć H_i (donja kalorična vrijednost) je onaj dio gornje ogrjevne moći koji dobivamo kad dimne plinove ohladimo samo do temperature iznad rosišta vodene pare (i para sumporne kiseline, ukoliko gorivo sadrži sumpor). Razlikuje se od gornje ogrjevne moći time što dimni plinovi sadrže i vodu (H_2O'' - v. str. 204).

Ogrjevu moć (kaloričnu vrijednost) mjerimo s obzirom na jedinicu količine goriva:

za kruta i tekuća goriva kJ/kg
za plinovita goriva kJ/m^3 (0 °C; 1,01325 bar)

Donja je ogrjevna moć manja od gornje za toplinu isparivanja r vodene pare (pri 0 °C):

$$r = 45000 \text{ kJ/kmol} = 2500 \text{ kJ/kg} = 2000 \text{ kJ/m}^3 \text{ (0 °C; 1,01325 bar)}$$

Donje ogrjevne moći sastavina goriva

Sastavina goriva	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/m ³ 0 °C, 1,01325 bar
ugljik C potpuno izgaranje	406 900	33 910	—
nepotpuno izgaranje	124 000	10 330	—
sumpor S	296 600	9 260	—
vodik	H_s	286 700	12 800
	H_i	241 700	10 790
benzen C ₆ H ₆ (benzol)	H_s	3 273 900	41 900
	H_i	3 138 900	40 200
naftalen C ₁₀ H ₈ (naftalin)	H_s	5 160 500	40 300
	H_i	4 980 500	38 900
etanol C ₂ H ₅ OH (alkohol)	H_s	1 365 100	29 600
	H_i	1 230 100	26 700
ugljični monoksid CO	282 900	—	12 600
metan CH ₄	H_s	889 100	39 700
	H_i	799 100	35 700
eten C ₂ H ₄ (etilen)	H_s	1 449 200	64 700
	H_i	1 359 200	60 700
etin C ₂ H ₂ (acetilen)	H_s	1 302 300	58 100
	H_i	1 257 300	56 100

Donja ogrjevna moć fizikalnih smjesa gorivih spojeva (plinovitih goriva) (u kJ/m³)

$$H_i = 12600 CO' + 10800 H_2' + 35700 CH_4' + 60700 C_2H_4' - 2000 H_2O'$$

Donja ogrjevna moć složenih spojeva (npr. ugljena) može se točno odrediti samo pokusom. Za kruta i tekuća goriva služi približna formula (u kJ/kg)

$$H_i = 34000 C' + 101700 H' + 6300 N' + 19100 S' - 9800 O' - 2500 v'$$

Sastav dimnih plinova

Sastav je dimnih plinova pri potpunom izgaranju s obzirom na jedinicu volumena

$$CO_2'' + H_2O'' + N_2'' + O_2'' = 1 \text{ (m}^3/\text{m}^3 \text{ dimnih plinova)}$$

Udjeli pojedinih sastavina (kmol/kmol dimnih plinova) iznose:

– kod čvrstih i tekućih goriva

$$\begin{aligned} CO_2'' &= C'/12 : D \\ H_2O'' &= (H'/2 + v'/18) : D \\ N_2'' &= (N'/28 + 79/21 \cdot \lambda O_{\min}) : D \\ O_2'' &= (\lambda - 1) O_{\min} : D \end{aligned}$$

– kod plinovitih goriva

$$\begin{aligned} CO_2'' &= (CO' + CO_2' + CH_4' + 2C_2H_4') : D \\ H_2O'' &= (H_2' + 2CH_4' + 2C_2H_4') : D \\ N_2'' &= (N_2' + 79/21 \cdot \lambda O_{\min}) : D \\ O_2'' &= (\lambda - 1) O_{\min} : D \end{aligned}$$

Pri nepotpunom izgaranju sadrže dimni plinovi još: CO, CH₄ itd. Njihov sastav određujemo kemijskom analizom (npr. Orsatovim aparatom).

Entalpija dimnih plinova

Molna se entalpija dimnih plinova h_{mD} (kJ/kmol) pri raznim temperaturama može proračunati uz poznavanje sastava dimnih plinova i molne entalpije njihovih sastavina pri tim temperaturama (vidi str. 164):

$$h_{mD} = CO_2'' \cdot h_{mCO_2} + H_2O'' \cdot h_{mH_2O} + N_2'' \cdot h_{mN_2} + O_2'' \cdot h_{mO_2}$$

*

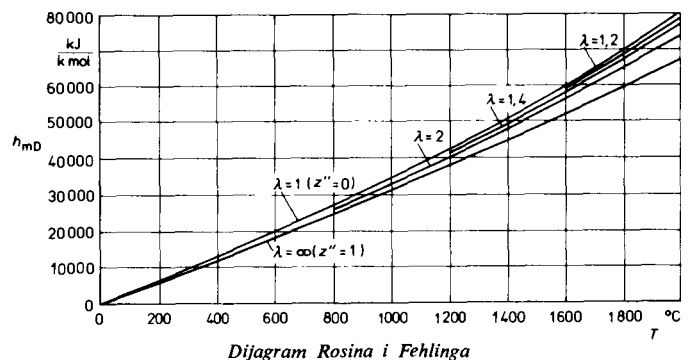
Molnu entalpiju dimnih plinova za tehnička goriva možemo odrediti također pomoću Rosinova i Fehlingova h_{mD} , T -dijagrama (vidi str. 205), koji uzima u obzir i disocijaciju iznad 1500 °C. Iz tog dijagrama možemo za svaku izabranu temperaturu odrediti molnu entalpiju h_{mD1} za $\lambda = 1$ i molnu entalpiju $h_{mD\infty}$ pri $\lambda = \infty$ (čisti zrak).

Iz minimalne potrebne količine zraka Z_{\min} , količine dimnih plinova D i poznatog faktora pretička zraka λ izračunavamo relativni udio zraka u dimnim plinovima Z''

$$Z'' = (\lambda - 1) Z_{\min} : D$$

Otuda proizlazi molna entalpija dimnih plinova (kJ/kmol)

$$h_{mD} = h_{mD1} - Z'' (h_{mD1} - h_{mD\infty})$$



Teoretska temperatura izgaranja

Molnu entalpiju dimnih plinova h_{mD} određujemo iz donje ogrjevne moći goriva H_i , specifične entalpije goriva h_g i molne entalpije zraka h_{mZ} prije izgaranja te količine zraka Z i dimnih plinova D

$$h_{mD} = (H_i + h_g + Z h_{mZ})/D$$

Veličine H_i , h_g , Z i D odnose se kod čvrstih i tekućih goriva na jedinicu mase 1 kg goriva, a kod plinovitih goriva na jedinicu tvari 1 kmol goriva.

Iz dobivene molne entalpije h_{mD} dimnih plinova određuje se za odgovarajući faktor pretička zraka λ teoretska temperatura izgaranja T pomoću Rosin-Fehlingova h_{mD} , T -dijagrama. Stvarna temperatura izgaranja je niža zbog odvođenja topline.

Kontrola izgaranja

1. Ni pepeo, ni dimni plinovi ne smiju sadržavati gorivih ostataka (neizgorjelog goriva, čađe, CO, CH₄ itd.).

2. Pretičak zraka λ (> 1) mora biti što manji, ali ipak tolik da se osigura potpuno izgaranje. Pretičak zraka kontroliramo sadržajem CO_2'' u dimnim plinovima. Što je veći faktor pretička zraka λ , to je manji udio CO_2'' . Za čvrsta i tekuća goriva s karakteristikom σ pri potpunom izgaranju vrijedi

$$(CO_2'')_s = 1/[1 + \sigma(\lambda/0,21 - 1)]$$

gdje je (CO_2'') sadržaj CO₂ u suhim dimnim plinovima (bez H₂O).

Goriva

Prirodna goriva jesu: kruta — drvo, treset i ugljen; tekuća — nafta (zemno ulje) i plinovita — zemni plin.

Umjetna goriva dobivaju se preradom iz prirodnih goriva ili drugih tvari. Generatorski plin dobiva se iz krutih goriva (drveta, ugljena ili koks) *rasplinjavanjem*, tj. nepotpunim izgaranjem u plinskim generatorima. (Dovođenjem zraka dobiva se »zračni plin«, a dodavanjem vodene pare »vodeni plin«. Smjesu obaju plinova nazivamo »miješanim plinom«.)

Retortni plin (rasvjetni i koksni plin) dobiva se iz prirodnih krutih goriva (ugljena, drveta) *suhom destilacijom*, tj. zagrijavanjem (pri 900...1100 °C) u retortama bez pristupa zraka.

Pri suhoj destilaciji dobiva se još i tekući proizvod — katran.

Koks i drveni ugljen su kruti ostaci pri suhoj destilaciji ugljena odn. drveta. Kao gorivo su praktički čisti ugljik, a sadrže još i sav pepeo goriva, iz kojega su proizvedeni.

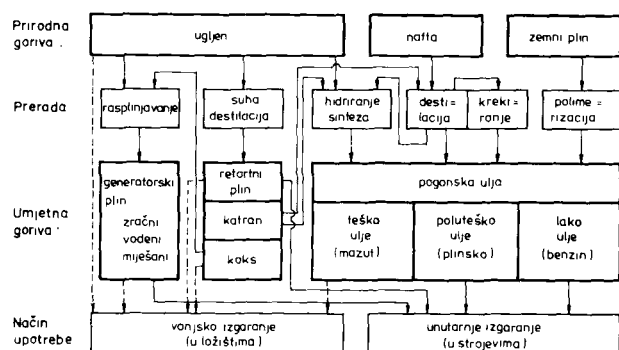
Pogonska ulja: laka (benzin, benzen), poluteška (plinsko ulje) i teška (loživo ulje, mazut) dobivaju se *frakcioniranom destilacijom* nafte i katrana. Udio lakih goriva povećava se *krekiranjem* (cijepanjem velikih molekula).

Laka pogonska ulja dobivaju se još i *hidriranjem* (spajanjem s vodikom) i *intezom* (rasplinjavanjem i združivanjem molekula H₂, CO itd.) iz ugljena, katrana ili ostataka nafte, odnosno *polimerizacijom* (spajanjem malih molekula u veće) iz zemnog plina (sintetski benzin).

Etanol C₂H₅OH (etilalkohol, žesta, špirit) dobiva se alkoholnim vrenjem iz škroba.

Etin C₂H₂ (acetylen) razvija se djelovanjem vode na kalcijev karbid CaC₂.

Pregled glavnih metoda prerade prirodnih goriva u umjetna i načina njihove upotrebe



Pregled goriva

Kruta goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg)							Donja ogrjevna moć H ₁ kJ/kg
	čista tvar*					pepeo	vlaga	
	C	H	S	O	N			
drvo, prosuš.	50	6	0	43,9	0,1	< 0,5	10...20	14 700...16 700
smeđi ugljen	70	7	2,0	20	1,0	2...10	12...60	8 400...20 100
kameni ugljen	85	5	1,0	8	1,0	3...12	0...10	27 200...34 100
koks	97	0,5	0,8	0,7	1,0	8...10	1...7	27 800...30 300

* Prosječne vrijednosti.

Tekuća goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 kg)		Gustoća kg/m ³	Vrelište °C	Donja ogr. moć H ₁ kJ/kg
	C	H			
benzin	85	15	720	< 120	42 700
plinsko ulje	86	11	875	< 350	41 900
loživo ulje	87	11	940	> 350	41 200
naftalen C ₁₀ H ₈ * (naftalin)	93,7	6,3	977	218	38 850
benzen C ₆ H ₆ (benzol)	92,2	7,8	884	80,5	40 270
etanol C ₂ H ₅ OH (alkohol)	52	13	794	78,3	26 750

* Talište 80 °C.

Plinovita goriva

Gorivo	Sastav % (u 1 m ³)						Gustoća kg/m ³	Donja ogr. moć H ₁ kJ/m ³ 0 °C, 1,013 25 bar
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	CO ₂	N ₂		
vodik			H ₂				0,089 87	10 790
uglj. monoksid			CO				1,250	12 620
metan			CH ₄				0,716 8	36 080
etan			C ₂ H ₆				1,356	63 500
propan			C ₃ H ₈				2,019	92 970
butan			C ₄ H ₁₀				2,668	121 800
eten (etilen)			C ₂ H ₄				1,260	60 570
etin (acetylen)			C ₂ H ₂				1,171	56 340
koksni plin	50	8	29	4	2	7	0,53	19 300
rasvjetni plin	51	8	32	4	2	3	0,50	20 500
vodeni plin	49	42	0,5	—	5	3	0,71	10 800
miješani plin	12	28	3	0,2	3	54	1,12	6 000
zračni plin	6	23	3	0,2	5	62	1,19	4 800
grotleni plin	4	28	—	—	8	60	1,25	4 000

Domaći

ugljeni

Rudnik	Vrsta	Veličina zrna mm	Sastav u %			Količina sum-pora %	Donja ogrjevna moć H_1 kJ/kg
			vlaga	pepeo	gori-va tvar		
Velenje	komad	> 120	43	8	49	0,6	11 300
	kocka	65...120	43	8	49	0,6	11 300
	orah	35...65	43	9	48	0,6	11 100
	grah	10...35	43	9	48	0,6	11 100
	sitni	0...1	43	12	45	0,6	10 300
	prah	65	43	5	52	0,6	12 000
Trbovlje	komad	> 60	20	12	68	1,9	18 000
	kocka	40...60	22	14	64	2,0	17 000
	orah	18...40	22	15	63	2,0	16 700
	grah	10...18	22	16	62	2,1	16 700
	sitni	3...10	24	17	59	2,1	15 700
	prah	0...3	34	19	47	1,8	12 500
Zagorje	komad	> 60	21	9	70	1,0	18 600
	kocka	35...60	22	10	68	1,0	18 000
	orah	16...35	22	12	66	1,0	17 500
	grah	10...16	24	13	63	1,0	16 700
	sitni	3...10	24	17	59	2,1	15 700
	prah	0...3	32	18	50	0,9	13 300
Laško	komad	> 60	19	7	74	0,3	19 800
	kocka	30...60	20	8	72	0,3	19 300
	orah	15...30	21	9	70	0,3	18 800
	grah	10...15	22	11	67	0,3	18 500
	sitni	5...10	26	13	61	0,3	16 400
	ksilit	0...5	36	25	39	0,3	10 500
Senovo	komad	> 60	19	13	68	2,3	18 000
	kocka	33...60	19	15	66	2,2	17 500
	orah	17...33	19	17	64	2,1	17 000
	grah	10...17	19	18	63	2,0	16 700
	sitni	3...10	20	21	59	2,4	15 700
	prah	0...3	20	21	59	2,4	15 700

Rudnik	Vrsta	Sastav u %			Količina sum-pora %	Donja ogrjevna moć H_1 kJ/kg
		vlaga	pepeo	gori-va tvar		
Raša	— komad	2	12	86	9	28 100
	— kocka	2	13	85	8	27 800
	— orah	2	11	87	8	28 400
	— grah	3	10	87	8	28 400
	— sitni	3	15	82	8	26 800
Banovići	— komad	17	16	67	1,1	18 700
	— kocka	17	20	63	1,3	17 600
	— orah	18	21	61	0,6	16 600
Kakanj	— komad	20	22	58	0,4	16 200
	— kocka	8	21	71	1,3	21 100
	— orah	8	22	70	1,4	20 800
Zenica	— komad	9	23	68	1,5	20 200
	— kocka	9	27	64	1,2	19 000
	— orah	9	28	63	0,5	18 700
Kreka	— komad	14	16	70	2,4	19 000
	— kocka	14	17	69	2,3	18 800
	— orah	15	18	67	2,8	18 200
	— sitni	16	20	64	2,2	17 400
	— prah	18	25	57	2,1	15 500
Senjsko-Resavski	— komad	33	9	58	0,5	14 100
	— kocka	32	15	53	0,4	15 100
	— orah	30	20	50	0,2	12 100
	— sitni	30	25	45	0,2	10 900
Kolubara	— komad	20	16	64	0,8	17 400
	— sitni	19	23	58	0,9	15 800
Kostolac	— komad	48	10	42	0,4	9 600
	— sitni	49	12	39	0,4	9 300
Kosovo	— komad	43	14,5	42,5	0,7	9 700
	— sitni	36	34	30	0,6	6 800
Kosovo	— komad	45	10	45	0,7	9 800
	— sitni	41	21	38	0,6	8 200

PRIJENOS TOPLINE

Toplinska vodljivost

Toplinski tok Φ (tj. prolaz topline Q u vremenu t) kroz tvar je po iskustvenim zakonima upravo razmjernan temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A , a obrnuto razmjernan debljini ravne stijenke δ

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) A$$

λ je koeficijent toplinske vodljivosti, a mjerimo ga jedinicom $W/(m \cdot K)$.

Toplinska se vodljivost mijenja s temperaturom, a kod plinova i para još i s tlakom. Brojčane vrijednosti λ za različite tvari sabrane su u tablicama na str. 212 do 217.

Prijelaz topline

Toplinski tok Φ koji prelazi s plinovite ili tekuće tvari na krutu stijenku, ili obratno, po iskustvu je upravo razmjernan temperaturnoj razlici $\Delta T = T_1 - T_2$ i površini A

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \alpha (T_1 - T_2) A$$

α je koeficijent prijelaza izražen jedinicom $W/m^2 \cdot K$.

Prijelaz topline na složen način ovisi o vrsti, temperaturi, tlaku i brzini plina, pare ili tekućine, koji toplinu predaju krutoj stijenci ili je od nje primaju. Nadalje, prijelaz topline ovisi o obliku i kvaliteti površine stijenke. Unatoč veoma opsežnom istraživačkom radu, toplinski je prijelaz općenito još i danas sasvim iskustvena vrijednost koja se može izračunati samo u nekim posebno jednostavnim slučajevima. *Nusseltova teorija sličnosti* omogućila je određivanje prijelaza topline pomoću bezdimenzijskih značajki (brojeva):

Reynoldsova značajka	$Re = v d / \nu$
Prandtl-ova značajka	$Pr = \rho c v / \lambda$
Péclet-ova značajka	$Pe = v d \rho c / \lambda = Re \cdot Pr$
Grasshof-ova značajka	$Gr = d^3 g (T_1 - T_2) \beta / \nu^2$
Nusselt-ova značajka	$Nu = \alpha d / \lambda$

gdje su: d – promjer (m), v – brzina (m/s), g – ubrzanje sile teže ($= 9,81 \text{ m/s}^2$), $(T_1 - T_2)$ – temperaturna razlika (K), β – volumenski koeficijent temperaturnog rastezanja (K^{-1}), ρ – gustoća (kg/m^3), c – specifični toplinski kapacitet (u plinova je $c = c_p$) [$J/(kg \cdot K)$], λ – koeficijent toplinske vodljivosti [$W/(m \cdot K)$], α – koeficijent prijelaza topline ($W/m^2 \cdot K$), ν – kinematička viskoznost (m^2/s).

Ako cijev nije okrugla, treba za d uvrstiti odgovarajući hidraulički promjer $d' = 4 A/O$ (A = površina, O = opseg). Za pravokutni je presjek cijevi $d' = 2 ab/(a + b)$.

Vrijednosti za β navedene su na str. 159, a vrijednosti za ρ , c , λ i ν tekućina i plinova na str. 212 do 214.

*

Najjednostavniji primjeri proračuna prijelaza topline pomoću Nusseltove značajke $Nu = \alpha d / \lambda$:

a) Slobodno strujanje plinova i tekućina

Prijelaz topline s vodoravne cijevi promjera d na miran zrak ili viskoznu tekućinu vodljivosti λ :

- na zrak $\alpha d / \lambda = 0,37 \cdot Gr^{0,25}$
- na tekućinu $\alpha d / \lambda = 0,40 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$

b) Prisilno strujanje plinova

Strujanje duž ravne ploče duljine l

- pri $v > 5 \text{ m/s}$ vrijedi $\alpha l / \lambda = 0,075 \cdot Pe^{0,75}$

Strujanje okomito na os cijevi:

- za osamljenu cijev $\alpha d / \lambda = 0,092 \cdot Pe^{0,75}$
- za snop cijevi $\alpha d / \lambda = \zeta \cdot 0,075 \cdot Pe^{0,75}$

gdje za cijevi u poretku šahovskog polja, koje su jedna iza druge, vrijedi:

broj redova cijevi	2	4	6	8	10
vrijednost za ζ	1,00	1,23	1,36	1,43	1,47

Brzinu v treba uzeti na najužem mjestu između dviju cijevi!

Strujanje kroz ravnu cijev $\alpha d / \lambda = 0,040 \cdot Pe^{0,75}$

c) Prisilno strujanje tekućina

Laminarno strujanje (koje se javlja u tekućina u uskim cijevima ako je $Re < 2300$) kroz duge ravne cijevi

$$\alpha d / \lambda \approx 3,65$$

Turbulentno strujanje

$$\alpha d / \lambda = 0,0396 Pr \cdot Re^{0,75} [1 + 0,35 (Pr - 1)]$$

*

Koeficijent prijelaza topline α iznosi:

za plinove	14 ... 40 $W/m^2 \cdot K$
za tekućine	2000 ... 4000 $W/m^2 \cdot K$

Pri promjeni agregatnog stanja ima prijelaz topline općenito mnogo veće vrijednosti. Za vodu iznosi:

pri vrenju	3000 ... 16000 $W/m^2 \cdot K$
pri kondenzaciji	6000 ... 12000 $W/m^2 \cdot K$
– kapljičastoj	30000 ... 46000 $W/m^2 \cdot K$

Toplinska svojstva tvari

Toplinska svojstva plinova i para (pri tlaku 0,980 665 bar \approx 1 bar)

Plin (para)	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznost ν mm ² /s
zrak	- 50	1,534	1,004	0,020 5	9,65
	- 20	1,365	1,004	0,022 6	12,0
	0	1,252	1,009	0,023 7	13,9
	20	1,164	1,013	0,025 1	15,7
	40	1,092	1,013	0,026 5	17,6
	60	1,025	1,017	0,027 9	19,4
	80	0,968	1,021	0,029 3	21,5
	100	0,916	1,021	0,030 7	23,6
	120	0,870	1,026	0,032 0	25,9
	160	0,789	1,030	0,034 4	30,6
	200	0,723	1,034	0,037 0	35,5
	250	0,653	1,042	0,040 0	42,2
	300	0,596	1,047	0,042 9	49,2
	400	0,508	1,059	0,048 5	64,6
	600	0,391	1,088	0,058 1	98,8
	800	0,318	1,113	0,066 9	137
	1 000	0,268	1,139	0,076 1	181
	1 200	0,232	1,164	0,084 5	227
	1 400	0,204	1,189	0,093 0	278
1 600	0,182	1,218	0,101 2	332	
vodik H ₂	- 50	0,106 4	—	0,147	69,1
	0	0,086 9	14,232	0,176	97,1
	50	0,073 4	14,358	0,202	128
	100	0,063 6	14,442	0,229	162
	200	0,050 2	14,525	0,276	240
ugljični dioksid CO ₂	- 50	2,373	—	0,010 9	4,76
	0	1,912	0,828	0,014 3	7,23
	50	1,616	0,875	0,017 8	10,0
	100	1,400	0,925	0,021 3	13,2
	sumporni dioksid SO ₂	0	2,83	0,624	0,008 4	4,09
50		—	0,649	—	—
100		—	0,674	—	—
200		—	0,720	—	—
amonijak NH ₃	0	0,746	2,168	0,022 0	12,5
	50	0,626	2,198	—	17,7
	100	0,540	2,231	0,030 0	24,2
	200	0,425	2,394	—	39,0

Toplinska svojstva vodene pare

Tlak p bar	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznost ν mm ² /s
1	100	0,598	2,032	0,023 7	21,4
	120	0,557	1,999	0,025 1	23,9
	140	0,529	1,981	0,026 5	26,5
	160	0,504	1,973	0,028 0	29,4
	180	0,481	1,964	0,029 4	32,2
	200	0,460	1,964	0,030 9	35,3
2	140	1,070	2,050	0,027 7	13,4
	160	1,016	2,024	0,029 0	14,8
	180	0,968	2,007	0,030 2	16,2
	200	0,926	1,999	0,031 6	17,8
	220	0,887	1,998	0,033 0	19,3
	240	0,851	1,998	0,034 5	21,3
4	160	2,067	2,149	0,030 9	7,43
	180	1,963	2,106	0,031 8	8,13
	200	1,872	2,075	0,033 1	8,93
	220	1,789	2,058	0,034 3	9,70
	240	1,715	2,045	0,035 6	10,7
	260	1,647	2,041	0,037 0	11,5
	280	1,585	2,041	0,038 4	12,5
	6	160	3,160	2,315	0,033 0	4,98
180		2,989	2,226	0,033 7	5,48
200		2,841	2,162	0,034 5	6,02
220		2,710	2,123	0,035 6	6,58
240		2,593	2,101	0,036 7	7,15
260		2,487	2,088	0,038 0	7,72
8	280	2,391	2,078	0,039 4	8,38
	180	4,047	2,364	0,036 2	4,14
	200	3,834	2,265	0,036 8	4,58
	220	3,650	2,199	0,037 5	5,01
	240	3,486	2,161	0,038 5	5,44
	260	3,339	2,135	0,039 6	5,89
	280	3,206	2,118	0,040 8	6,35
	300	3,085	2,110	0,042 2	6,84
10	320	2,974	2,105	0,043 7	7,33
	180	5,144	2,569	0,040 9	3,43
	200	4,857	2,371	0,040 2	3,78
	220	4,610	2,268	0,040 3	4,13
	240	4,394	2,216	0,041 0	4,48
	260	4,203	2,186	0,042 0	4,88
	280	4,032	2,164	0,043 1	5,26
	300	3,876	2,156	0,044 6	5,65
	320	3,734	2,147	0,046 0	6,03

Toplinska svojstva tekućina

Tekućina	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c_p kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)	Kinemat. viskoznosti ν mm ² /s
voda	0	1 000	4,219	0,555	1,79
	20	998	4,182	0,598	1,01
	40	992	4,178	0,627	0,658
	60	983	4,190	0,651	0,478
	80	972	4,199	0,669	0,364
	100	958	4,215	0,681	0,295
	120	944	4,232	0,685	0,249
	140	926	4,257	0,684	0,217
	160	908	4,282	0,680	0,189
	180	887	4,395	0,673	0,172
	200	863	4,500	0,665	0,162
250	794	4,855	0,644	0,137	
300	700	5,693	0,564	0,131	
mazivo ulje	20	871	1,850	0,144	15,0
	40	858	1,934	0,143	7,93
	60	845	2,018	0,142	4,94
	80	832	2,101	0,141	3,40
	100	820	2,185	0,140	2,44
	120	807	2,269	0,138	1,91
transformatorsko ulje	20	866	1,892	0,124	36,5
	40	852	1,993	0,123	16,7
	60	842	2,093	0,122	8,69
	80	830	2,198	0,120	5,20
	100	818	2,294	0,119	3,79
ugljični dioksid CO ₂	20	771	3,642	0,087	0,062 4
	30	596	—	0,071	0,054 3
sumporni dioksid SO ₂	-20	1 485	—	0,223	0,321
	0	1 435	1,356	0,212	0,256
	20	1 383	1,390	0,199	0,220
amonijak NH ₃	-20	665	4,562	0,585	0,383
	0	639	4,646	0,540	0,376
	20	610	4,772	0,494	0,360
monoklor-metan CH ₃ Cl	-20	997	1,507	0,195	0,310
	0	960	1,570	0,179	0,304
	20	921	1,591	0,163	0,293
živa Hg	0	13 595	0,140	10,5	0,125
	20	13 546	0,139	9,3	0,115

Toplinska svojstva kovina i kovinskih slitina

Kovina	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. toplin. vodljivosti λ W/(m · K)
aluminij	20	2 700	0,896	229
bakar, čisti	20	8 930	0,383	395
trgovački	20	8 300	0,419	372
bronca, alumin. kositrena	20	7 800	0,419	—
20	8 750	0,352	55	
cink	20	7 130	0,385	113
crveni lijev	20	8 600	0,377	60
čelik, 0,1% C	0	7 850	0,465	59
400	—	0,628	44	
600	—	—	37	
— 0,2% C	20	7 850	0,460	50
— 0,6% C	20	7 840	0,460	47
— 13% Cr	20	7 750	0,460	29
— Cr-Ni	20	7 900	0,477	14
500	—	0,607	21	
— 18Cr 8 Ni	20	7 880	0,502	20
— 36% Ni	20	8 130	0,502	16
duralumin	20	2 700	0,912	165
100	—	—	181	
elektron	20	1 800	—	116
kositar (kalaj)	20	7 280	0,226	65
magnezij, čisti	20	1 740	1,017	143
mjed (mesing)	20	≈ 8 600	0,381	≈ 93
monel	20	8 580	0,500	26
nikal, čisti	20	8 800	0,446	58
ново srebro	20	—	0,393	24
olovo, čisto	0	11 340	0,128	35
100	—	0,134	34	
platina	20	21 400	0,133	70
silumin	20	2 600	0,900	159
sivi lijev	20	≈ 7 250	0,540	≈ 58
srebro	20	10 500	0,234	417
volfram	20	19 300	0,134	—
zlato	20	19 250	0,129	310
željezo, čisto	20	7 850	0,465	67

Toplinska svojstva anorganskih krutina

Materijal	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. topl. vodljivosti λ W/(m · K)
azbestne ploče	20	2000	–	0,7
azbestna vuna	20	300	–	0,09
	20	600	–	0,20
beton, suhi	20	≈ 2100	0,880	≈ 1,10
granit	20	2900	0,750	2,9
kotlovac				
– karbonatni	300	1000 . . . 2500	–	0,15 . . . 2,30
– silikatni	300	300 . . . 1200	–	0,08 . . . 0,23
– sulfatni	300	2000 . . . 2700	0,840	0,7 . . . 2,30
kremen	50	≈ 400	0,840	≈ 0,08
kremeno staklo	20	2210	0,710	1,36
led (H ₂ O)	0	917	1,930	2,2
	–50	924	–	2,8
mramor	20	≈ 2600	0,800	2,8
opeka, suha	20	≈ 1700	0,840	≈ 0,46
pijesak, suhi	20	1520	–	0,33
pješčenjak	20	≈ 2220	0,710	≈ 1,9
porculan	20	≈ 2360	0,800	≈ 1,2
silikatna opeka	100	≈ 1850	–	≈ 1,10
(silika)	1000	–	–	≈ 1,60
snijeg	0	200	–	0,15
staklena vuna	20	50	0,670	0,036
	20	300	–	0,043
staklo	20	2700	0,840	0,76
šamotna opeka	100	≈ 1850	0,840	≈ 0,8
	1000	–	1,130	≈ 1,0
tlo, ilovačasto	20	1450	0,880	1,28
vapnenac	20	2650	0,840	2,2
vuna od troske	20	200	0,750	0,04
	20	500	–	0,06
zid od opeke	20	–	–	≈ 0,75
žbuka, zidna	20	1690	0,840	0,80

Toplinska svojstva organskih krutina

Materijal	Temperatura t °C	Gustoća ρ kg/m ³	Spec. topl. kapacitet c kJ/kg K	Koef. toplinske vodljivosti λ W/(m · K)
asfalt	20	2120	0,920	0,74
bakelit	20	1270	1,590	0,23
pamuk				
– češljani	20	81	–	0,059
– pleteni	–	245	1,300	0,077
– tkani	–	330	–	0,070
celuloid	20	1400	–	0,215
ebonit	20	1190	1,420	0,16
guma	20	1200	1,420	≈ 0,16
gumena spužva	20	224	–	0,055
koks	20	1400	0,920	–
drvo (prosušeno)				
– bor	⊥	≈ 550	2,790	0,14
	=	–	–	0,28
– bukva	=	≈ 700	–	0,35
– hrast	⊥	≈ 850	2,390	≈ 0,10
	=	–	–	0,37
drveni ugljen	20	200	0,840	0,06
papir	20	1000	1,340	0,14
pluto	20	200	1,380	0,05
ugljen	20	≈ 1200	1,300	≈ 0,21
ugljena prašina	30	730	1,300	0,12
šećer	0	1600	1,260	0,6
svila, tkana	0	147	–	0,045
	50	–	1,260	0,055
	100	–	–	0,060
koža	20	1000	1,510	≈ 0,16
vuna				
– češljana	20	9	–	0,036
– pletena	–	176	1,670	0,04
– tkana	–	380	–	0,050
piljevina (sitna)	20	190	–	0,06

Toplinsko zračenje (isijavanje)

Zračenje topline jest odavanje energije elektromagnetskim valovima dužine $0,8 \dots 300 \mu\text{m}$ (toplinske — infracrvene zrake).

Apsorpcijski koeficijent a jest omjer energije W_a koju tijelo apsorbira (upija) i sve energije W koja dopijeva na površinu tijela

$$a = W_a / W < 1$$

$$W_a = W \quad a = 1 \quad \text{— toplinski »crno« tijelo}$$

$$W_a = 0 \quad a = 0 \quad \text{— toplinski »bijelo« tijelo}$$

Stvarna tijela nisu ni toplinski »bijela« ni »crna«, već toplinski »siva«:

$$0 < W_a < W \quad 0 < a < 1$$

Emisijski koeficijent ϵ jest omjer energije W_s koju odaje površina »sivog« tijela i energije W_c koju odaje površina »apsolutno crnog« tijela:

$$\epsilon = W_s / W_c < 1$$

Po Kirchhoffovu zakonu vrijedi (pri jednakoj temperaturi): $\epsilon = a$.

Emisijski koeficijenti tehnički važnih tvari sabrani su na str. 219.

Stefan-Boltzmannov zakon

Toplinski tok Φ koji pri zračenju odašilje apsolutno crno tijelo upravno je razmjernan površini A i 4. potenciji apsolutne temperature T

$$\Phi = \sigma_0 T^4 A$$

gdje je $\sigma_0 = 5,66961 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

U tehnici se ta jednadžba upotrebljava u obliku

$$\Phi = \sigma (T/100)^4 A$$

gdje je σ »konstanta zračenja apsolutno crnog tijela«

$$\sigma = 5,67 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Za »siva« tijela vrijedi

$$\Phi_s = \epsilon \sigma (T/100)^4 A$$

gdje je ϵ emisijski koeficijent sivog tijela.

Izmjena topline zračenjem između dvaju tijela apsolutnih temperatura T_1 i T_2 ($T_1 > T_2$) i emisijskih koeficijenata ϵ_1 i ϵ_2

$$\Phi = \sigma' [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] A$$

gdje je σ' :

a) u veoma velikih, blizu smještenih, paralelnih i ravnih ploha

($A = A_1 = A_2$)

$$\sigma' = \sigma / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)$$

b) ako drugo tijelo (2) potpuno okružuje prvo tijelo (1)

$$\sigma' = \sigma / [1/\epsilon_1 + \omega(1/\epsilon_2 - 1)]$$

Ako je ploha A_1 znatno manja od plohe A_2 ($\omega \approx 0$), vrijedi: $\sigma' = \epsilon_1 \sigma$.

c) za proizvoljno smještene plohe A_1 i A_2 je $\sigma' = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma$.

Emisijski koeficijent ϵ površinskog zračenja

Površina		Temperatura t °C	Emisijski koeficijent ϵ
materijal	stanje		
kovine:			
aluminij	oksidiran	25	0,07
	poliran	230	0,05
	namaz	100	0,30
alum. za bronzir.			
bakar	tamno oksidiran	20	0,78
	oksidiran	130	0,76
	poliran	20	0,030
cink	oksidiran	20	0,25
	poliran	230	0,045
čelik	tamno zardao	20	0,85
	lijevana površina	100	0,80
	valjana površina	20	0,77
	crveno zardao	20	0,61
	brušen	20	0,24
	sjajan, jetkan	150	0,128
kositar	sjajan	20	0,07
krom	poliran	150	0,058
mjed	oksidirana	338	0,22
	polirana	300	0,05
nikal	poliran	100	0,045
olovo	oksidirano	20	0,28
	polirano	130	0,06
sivi lijev	tokaren	20	0,43
srebro	polirano	20	0,025
zlato	polirano	20	0,025
nekovine:			
drvo	blanjano	20	0,90
krovnja ljepenka		20	0,93
lak, emajl		20	0,90
lak za radijatore		100	0,925
led	gladak	0	0,966
mramor	poliran	20	0,93
opeka	gruba, crvena	20	0,93
papir		95	0,85
porculan		20	0,93
staklo		90	0,94
svilena tkanina		20	0,77
šamot		1200	0,60

Prolaz topline

a) Prolaz topline kroz stijenke pri dovođenju toplinskog toka dodirom

Toplinski tok koji prelazi s neke tvari (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza α_1) na stijenku, kroz tu stijenku (debljine δ i koeficijenta toplinske vodljivosti λ) te sa stijenke na drugu tvar (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza α_2) iznosi za površinu stijenke A

$$\Phi = Q/t = k(T_1 - T_2)A$$

k je koeficijent prolaza topline koji se dobiva iz jednadžbe

$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$$

Koeficijent prolaza topline k mjerimo istim jedinicama kao i koeficijent prijelaza topline α , tj. u $W/m^2 K$.

Za višeslojne stijenke (npr. za stijenke od dva sloja, od kojih jedan ima debljinu δ_1 i vodljivost λ_1 , a drugi debljinu δ_2 i vodljivost λ_2) koeficijent prolaza topline k računamo po jednadžbi

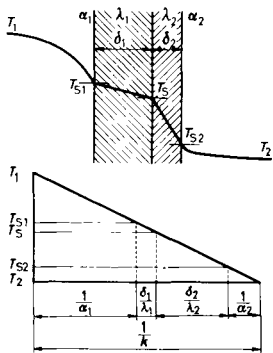
$$1/k = 1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_2$$

Temperature na pojedinim mjestima stijenke možemo odrediti trokutnim dijagramom (lijevo) ili jednadžbama

$$T_{s1} = T_1 - k(1/\alpha_1)(T_1 - T_2)$$

$$T_s = T_1 - k(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1)(T_1 - T_2)$$

$$T_{s2} = T_1 - k(1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2) \cdot (T_1 - T_2)$$



b) Prolaz topline kroz stijenku pri dovođenju toplinskog toka zračenjem i dodirom

Toplinski tok koji prelazi *dodirom* s neke tvari (temperature T_1 i koeficijenta prijelaza α_1) i istodobno *zračenjem* s neke stijenke (temperature T i emisijskog koeficijenta ϵ) na drugu stijenku (emisijskog koeficijenta ϵ_s), te prolazi kroz tu stijenku (debljine δ i vodljivosti λ) i s nje prelazi na drugu tvar (temperature T_2 i koeficijenta prijelaza α_2) iznosi

$$\Phi = k(T_1 - T_2)A$$

Koeficijent k računamo iz jednadžbe

$$1/k = 1/(\alpha + \alpha_1) + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$$

gdje je

$$\alpha = \sigma'[(T/100)^4 - (T_{s1}/100)^4]/(T_1 - T_{s1})$$

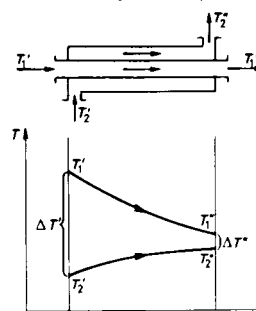
Vrijednost σ' izračunavamo iz poznatih koeficijenata ϵ i ϵ_s (vidi str. 219), a temperaturu T_{s1} iz jednadžbe $T_{s1} = T_1 - k/\alpha + \alpha_1(T_1 - T_2)$.

Tehnički izmjenjivači topline

Toplinski tok Φ prelazi s tvari početne temperature T_1' i konačne niže temperature T_1'' na tvar početne temperature T_2' i konačne više temperature T_2'' . Temperaturna razlika između obiju tvari na svakom je mjestu izmjenjivača drukčija.

S obzirom na međusobni smjer strujanja obiju tvari u izmjenjivaču, razlikujemo istosmjerno, protusmjerno i unakrsno strujanje.

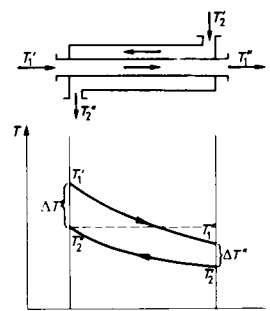
Istosmjerno strujanje



$$\Delta T' = T_1' - T_2'$$

$$\Delta T'' = T_1'' - T_2''$$

Protusmjerno strujanje



$$\Delta T' = T_1' - T_2''$$

$$\Delta T'' = T_1'' - T_2'$$

Toplinski tok u izmjenjivaču topline računamo pomoću prosječne temperaturne razlike ΔT_{med}

$$\Phi = k \cdot \Delta T_{med} \cdot A$$

gdje su: k – koeficijent prolaza topline (vidi str. 220), A – površina izmjenjivača.

Prosječna (»logaritamska«) temperaturna razlika iznosi

$$\Delta T_{med} = (\Delta T' - \Delta T'')/\ln(\Delta T'/\Delta T'')$$

Prosječna (logaritamska) temperaturna razlika ΔT_{med} pri protusmjernom strujanju veća je nego pri istosmjernom.

Pri protusmjernom strujanju može biti konačna temperatura tvari koji toplinu prima (grijući se) viša od konačne temperature tvari koji toplinu predaje (hladeći se). Pri istosmjernom je strujanju, međutim, konačna temperatura tvari koji toplinu prima uvijek niža od konačne temperature tvari koji toplinu predaje.

Zato u izmjenjivačima topline protusmjerno strujanje ima uvijek prednost pred istosmjernim. Unakrsno se strujanje po svom efektu približuje protusmjernome.

TOPLINSKI UREĐAJI I STROJEVI

Simboli

	čista voda		kemijska priprema vode		turbina
	sirova voda		parni kotao		stapni pogonski stroj
	dimni plinovi		parni kotao s pregrjačem		elektromotor
	gorivi plin		isparivač (transformator pare)		gonjeni stroj (općenito)
	ulje		pliniski generator		turbopumpa
	ventil		gorionik (za ulje)		stapna pumpa
	redukциони ventil		potrošač topline		turbo-kompresor ventilator
	otvoreni rezervoar		ispuh		stapni kompresor
	tlačni rezervoar		kondenzator na miješanje		transportni stroj
	izmjenjivač topline miješanjem		površinski kondenzator		električni generator
	površinski izmjenjivač topline		površinski kondenzator		mjerač
	odvajač pare		površinski kondenzator (s povratnim hlađenjem)		regulator
	odvajač prašine (ciklon)		rashladni toranj		
	ejektor				

PARNI KOTLOVI

Parni su kotlovi toplinski uređaji koji se sastoje od:

a) *uređaja za loženje*, tj. ložišta (prostora za izgaranje), u kojem se izgaranjem oslobađa kemijski vezana energija goriva da bi prešla na dimne plinove, i pomoćnih uređaja za loženje (roštilj, gorionik itd.),

b) *izmjenjivača topline* (parnog kotla u užem smislu), u kojem toplina prelazi s dimnih plinova na vodu odnosno paru.

Toplinski tok Φ koji s gorivom dolazi u ložište izražavamo potroškom goriva B (kg/s) i njegovom donjom ogrjevnom moći H_i

$$\Phi = B H_i$$

Dovodimo li u ložište zagrijan zrak za izgaranje, dolazi s njime još i toplinski tok

$$\Phi_z = B Z h_{mZ}$$

gdje su: Z – količina zraka za izgaranje na jedinicu količine goriva (kmol/kg) (str. 202), h_{mZ} – molna entalpija zraka (kJ/kmol) (str. 164).

Ložišta su građena za:

– izgaranje u sloju, tj. roštilju (ravnom ručnom ili mehaničkom, stepeničastom i sl. za komadno gorivo),

– izgaranje u lebdenju, tj. u komori za izgaranje (za ugljenu prašinu, ulje ili plin).

Površinu roštilja R (m²) određujemo na temelju »površinskog toplinskog opterećenja ložišta«

$$\Phi/R = B H_i / R$$

koje iznosi za: ravni ručni roštilj 600 ... 1000 kW/m²
 mehanički roštilj 900 ... 1600 kW/m²
 stepenasti roštilj 700 ... 800 kW/m²

Volumen ložišnog prostora V (m³) ocjenjujemo na temelju »prostornog toplinskog opterećenja ložišta«

$$(\Phi + \Phi_z) V = B(H_i + Z h_{mZ}) V$$

koji iznosi: za mehanički roštilj 250 ... 400 kW/m³
 pri loženju

– ugljenom prašinom 170 ... 330 kW/m³
 – uljem 900 ... 2500 kW/m³
 – plinom 1600 ... 2500 kW/m³

Pri izgaranju pod tlakom (ulja ili plina) dostiže specifično opterećenje ložišta i do 8000 kW/m³.

Presjek ložišta S_k (m²) ocjenjujemo na osnovu »površinskog toplinskog opterećenja presjeka ložišta«

$$(\Phi + \Phi_z) / S_k = B(H_i + Z h_{mZ}) / S_k$$

koji iznosi za ložišta na ugljenu prašinu 2300 ... 2800 kW/m².

Izmjenjivač topline s dimnih plinova na vodu odnosno paru izveden je kao sistem cijevi.

Vodu odn. paru zagrijavamo pri konstantnom tlaku p koji održavamo regulacijom loženja, pri čemu napojne pumpe napajaju kotao protokom vode q (kg/s).

S obzirom na različite uvjete prijenosa topline na vodu odn. paru, razlikujemo slijedeće dijelove izmjenjivača topline:

a) **Zagrijač vode** (ekonomajzer) u kojem se napojna voda temperature T_v i specifične entalpije h_v zagrijava do temperature T_a , pri čemu joj naraste specifična entalpija na h_a . Da se voda ne bi isparavala već u zagrijaču, mora temperatura T_a biti niža od temperature zasićenja T_s (koja odgovara tlaku p u parnom kotlu), $T_a < T_s$. Zato je također $h_a < h'$. (Specifična entalpija h' određena je tlakom p .)

U zagrijaču vode dovodimo vodi toplinski tok Φ_a

$$\Phi_a = q(h_a - h_v)$$

b) **Isparivač** je namijenjen daljnjem zagrijavanju vode do temperature zasićenja T_s i njenom isparivanju. U isparivaču dobivamo mokru paru suhoće $x = 0,95 \dots 0,96$ i entalpije $h_b = h' + x(h'' - h')$. (Specifične entalpije h' i h'' određene su tlakom p .)

U isparivaču dovodimo vodi-pari toplinski tok Φ_b

$$\Phi_b = q(h_b - h_a)$$

c) **Pregrijač pare** služi za sušenje pare do potpune suhoće $x = 1$ (suho zasićena para) i njenom pregrijavanju do temperature pregrijanja T , pri čemu se pari povećava specifična entalpija na vrijednost h (koja je određena tlakom p i temperaturom T).

V pregrijaču dovodimo pari toplinski tok Φ_c

$$\Phi_c = q(h - h_b)$$

Suprotno načelu protustrujnog izmjenjivača topline dimni plinovi predaju toplinu najprije isparivaču (budući da voda koja se isparava dovoljno hladi cijevne stijenke pa ih možemo smjestiti u područje najviših temperatura), zatim pregrijaču (u kojemu pregrijana para — plin slabo hladi cijevne stijenke pa ih stoga ne možemo smjestiti u područje najviših temperatura) i konačno zagrijaču vode. U parnih kotlova koji upotrebljavaju zagrijan zrak za izgaranje (ložišta na ugljenu prašinu, ulje ili plin) smješten je na kraju puta dimnih plinova **zagrijač zraka** (koji vraća toplinski tok Φ_z u ložište).

Zbog odvođenja toplinskih tokova iz dimnih plinova na isparivač i pregrijač pare te na zagrijač vode i zraka, dimni se plinovi postupno ohlađuju. Konačna temperatura dimnih plinova, osobito ako sadrže mnogo vlage, ne smije biti manja od 140°C (jer bi se kondenzacijom vlage na hladnim cijevnim stijenkama stvarale kiseline koje bi ih najedale).

Proračun veličine ogrjevnih površina pojedinih dijelova izmjenjivača topline — vidi str. 221.

Kapacitet (snaga) parnog kotla određen je toplinskim tokom koji u svim dijelovima izmjenjivača topline dovodimo vodi-pari

$$\Phi_k = \Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = q(h - h_v)$$

Osim toplinskog toka Φ_k upotrebljava se za oznaku kapaciteta parnih kotlova također:

a) proizvodnja pare q (što nije točno jer uz istu proizvodnju pare q toplinski tok Φ_k ovisi još i o razlici entalpija $h - h_v$);

b) ogrjevna površina izmjenjivača A (što je netočno jer toplinski tok Φ_k uz inače jednake ogrjevne površine ovisi i o koeficijentu prolaza topline k i o prosječnoj temperaturnoj razlici ΔT , vidi str. 221).

Korisnost parnoga kotla

Toplinski tok Φ_k , koji prelazi na vodu-paru bit će manji od toplinskog toka Φ koji dolazi u ložište s gorivom ($\Phi_k < \Phi$), i to zbog gubitaka u parnom kotlu (ložištu i izmjenjivaču topline), tj. zbog

neizgorjelih ostataka goriva u pepelu	do 5%,
letećeg koksa i čađe	do 8%,
neizgorjelih plinova — CO, CH ₄ itd.	do 1%,
toplina dimnih plinova	8...11%,
zračenja i prijenosa topline na okolinu	do 12%.

Korisnost parnog kotla η_k je omjer toplinskih tokova Φ_k i Φ

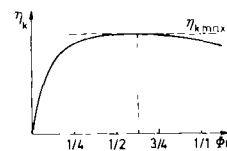
$$\eta_k = \Phi_k / \Phi = q(h - h_v) / BH_1$$

a iznosi za razne kotlove:

za manje (s ravnim roštiljem)	$\eta_k = 0,72 \dots 0,78$
za veće (s mehaničkim roštiljem)	$\eta_k = 0,77 \dots 0,84$
za najveće (pri loženju ugljenom prašinom, uljem ili plinom)	$\eta_k = 0,83 \dots 0,91$

Krivulja ovisnosti korisnosti o opterećenju teče u širokom pojasu opterećenja vrlo položito. (Ovdje nisu uračunati dodatni gubici zbog pogonskih prekida djelovanja kotla.)

Najveću korisnost $\eta_{k \max}$ postiže pri najčešćem opterećenju, tj. pri $2/3 \dots 3/4$ nazivnog kapaciteta kotla.



Energija pare s obzirom na temperaturu okoline T_0 proistječe — osim iz toplinskog toka Φ_k — još i iz toplinskog toka Φ_0 što ga je napojna voda primila prije ulaza u parni kotao iz drugih izvora koji su joj povećali specifičnu entalpiju od h_0 pri temperaturi T_0 na h_v pri temperaturi T_v

$$\Phi_0 = q(h_v - h_0)$$

Ukupna energija pare na izlazu iz kotla izražena je dakle toplinskim tokom

$$\Phi_0 + \Phi_k = q(h - h_0)$$

Napojne pumpe

Svaki parni kotao mora imati najmanje dva uređaja za napajanje koji dobivaju pogonsku energiju iz međusobno nezavisnih izvora (npr. elektromotor i parni stroj, benzinski ili dizelski motor i sl.).

Za napajanje služe ponajviše stapne pumpe i turbopumpe.

Kapacitet napojnih pumpi odabire se tako da bi pri kvaru na najvećoj pumpi sve preostale dobavljale protok q_p koji je veći od najvećeg protoka q vode-pare kroz parni kotao, i to:

$q_p = 1,6q$ – ako je parni kotao bez automatske regulacije, a protok je $q \leq 30$ t/h,

$q_p = 1,25q$ – ako parni kotao ima automatsku regulaciju, a protok je $q > 30$ t/h ili je pogon neposredno s glavnog parnog stroja.

Potrebna snaga za pogon napojnih pumpi iznosi:

$$\begin{aligned} \text{– teoretska} \quad P_0 &= q_p \left[\frac{(p - p_n) + \Delta p}{\rho} + gh_g \right] \\ \text{– efektivna} \quad P &= \frac{P_0}{\eta_p} \end{aligned}$$

gdje znači: p – tlak u kotlu, p_n – tlak u napojnom spremniku, Δp – protočne gubitke, ρ – gustoću vode pri temperaturi napajanja T_v , h_g – geodetsku visinu razine vode u kotlu nad razinom u napojnom rezervoaru, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, η_p – korisnost pumpe.

Pretočne gubitke Δp ocjenjujemo s:

0,5 ... 1 bar – za zagrijač vode (ekonomajzer),

2,5 bar – za napojni regulator,

2 ... 3 bar – za otpore u cjevovodima

Korisnost napojnih pumpi η_p iznosi:

$\eta_p = 0,9 \dots 0,97$ – kod stapnih pumpi s neposrednim djelovanjem pogonskog stroja na stapjicu pumpe,

$\eta_p = 0,8 \dots 0,9$ – kod normalnih stapnih pumpi,

$\eta_p = 0,6 \dots 0,9$ – kod turbopumpi.

*

Za visokotlačne parne kotlove, kod kojih moramo uzeti u obzir povećanje gustoće vode pri napajanju, računamo teoretsku snagu pumpe pomoću entalpijske razlike vode

$$P_0 = q_p (h_v - h_t)$$

gdje znače: h_t – specifičnu entalpiju vode pri atmosferskom tlaku p_a i temperaturi ispred napojne pumpe, h_v – specifičnu entalpiju vode nakon izentropske kompresije u pumpi.

RADNA SPOSOBNOST PARE

Energija pare je upotrebljiva u cijelosti samo kao toplina koju možemo prenositi s jednog tijela na drugo (grijanje). Međutim, čitava energija pare nije na raspolaganju za pretvorbu u mehanički rad.

Eksergija pare je radna sposobnost pare (sposobnost za pretvorbu njezine unutarnje energije u mehanički rad) s obzirom na temperaturu okoline T_0 .

Specifična eksergija pare na izlazu iz parnog kotla iznosi

$$e = (h - h_0) - b \quad b = T_0(s - s_0)$$

gdje su: b – specifična anergija pare; h, s – specifična entalpija odn. specifična entropija pregrijane pare; h_0, s_0 – specifična entalpija odn. specifična entropija vode pri stanju okoline.

Specifična eksergija pare e pokazuje koji bi se dio energije pare mogao teoretski pretvoriti u mehanički rad s obzirom na temperaturu okoline T_0 .

Raspoloživi pad entalpije Δh_d

Eksergija pare međutim nije u cijelosti raspoloživa za pretvorbu u mehanički rad iz slijedećih razloga:

1. U cjevovodu od parnog kotla do parnog stroja para se ohlađuje s temperature T na T_1 ($T - T_1 = 5 \dots 10 \text{ K}$) i prigušuje s tlaka p na p_1 (uz brzinu protjecanja 30 ... 50 m/s iznosi $p - p_1$; pri srednjim tlakovima 2 ... 3 bar, pri najvišim tlakovima 10 ... 15 bar). Temperatura T_1 i tlak p_1 određuju specifičnu entalpiju h_1 pare ispred parnog stroja; $h_1 < h$.

2. Na kraju izentropske ekspanzije pare ne postizemo temperaturu okoline T_0 , nego temperaturu T_2 koja je viša $T_2 > T_0$, i to:

a) kod kondenzacionih je naprava temperaturna razlika $T_2 - T_0$ malena ($t_2 \approx 28 \dots 42 \text{ }^\circ\text{C}$) i služi samo za prijenos topline s pare na rashladnu vodu (temperaturi T_2 odgovara u kondenzatoru tlak p_2 od 0,04 ... 0,08 bar),

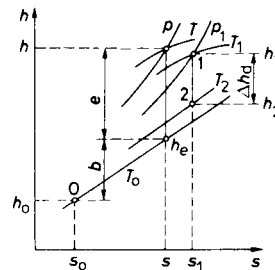
b) kod ispušnih je strojeva temperatura T_2 znatno viša ($t_2 = 102 \dots 104 \text{ }^\circ\text{C}$) i odgovara konačnom tlaku p_2 koji je viši od atmosferskoga za otpore trenja u ispušnim vodovima ($p_2 = 1,1 \dots 1,2$ bar),

c) kod protutlačnih je strojeva temperatura T_2 još viša ($t_2 = 120 \dots 180 \text{ }^\circ\text{C}$) te joj odgovaraju i viši konačni tlakovi ($p_2 = 2 \dots 10$ bar).

Konačna je specifična entalpija pare h_2 stoga viša.

Raspoloživi pad entalpije Δh_d dan je razlikom specifične entalpije h_1 , koja je određena početnim stanjem (p_1, T_1), i konačne specifične entalpije h_2 , koja je određena izentropom i temperaturom T_2 (tlakom p_2):

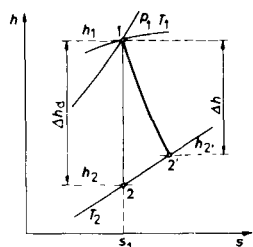
$$\Delta h_d = h_1 - h_2 < e$$



PARNI STROJEVI

Parni strojevi su pogonski strojevi koji upotrebljavaju vodenu paru kao neposredno pogonsko sredstvo; to su stapni strojevi i parne turbine. (Iznimno su parni strojevi građeni i za pogon drugim parama, npr. živinim.)

Snaga parnih strojeva proizlazi iz protoka pare q i raspoloživog entalpijskog pada Δh_d (vidi str. 227).



Teoretska snaga P_0 iznosi

$$P_0 = q \Delta h_d = q(h_1 - h_2)$$

Stvarni entalpijski pad Δh manji je od raspoloživoga zbog unutarnjih gubitaka u stroju (prigušivanje pare, toplinska razmjena između pare i stijenki stroja, nepotpuna ekspanzija itd.)

$$\Delta h = h_1 - h_2' < \Delta h_d$$

gdje je h_2' stvarna specifična entalpija pare na izlazu iz stroja.

Unutarnja korisnost stroja

$$\eta_i = \Delta h / \Delta h_d$$

pokazuje koji dio raspoloživoga entalpijskog pada parni stroj stvarno iskorištava i time označuje stupanj valjanosti stroja.

Unutarnja snaga stroja P_i iznosi

$$P_i = q \Delta h = \eta_i q \Delta h_d = \eta_i P_0$$

Efektivna snaga stroja P (na pogonskoj osovini) manja je zbog vanjskih gubitaka stroja (mehaničkih gubitaka zbog trenja u ležajima i zglobovima stroja, pogona regulatora itd.) i iznosi

$$P = \eta_m P_i = \eta P_0 = \eta q \Delta h_d$$

gdje su: η_m — mehanička korisnost stroja η — cjelokupna korisnost stroja

$$\eta = \eta_i \eta_m$$

*

Valjanost se stroja još gdjekada u praksi izražava — umjesto pravilno korisnošću — »jediničnim potroškom pare«, i to s obzirom na unutarnju snagu

$$q/P_i = 1/(\eta_i \cdot \Delta h_d)$$

ili s obzirom na efektivnu snagu

$$q/P = 1/(\eta \cdot \Delta h_d)$$

što međutim ne pokazuje stvarne valjanosti stroja. Jedinični potrošak pare nije naime ovisan samo o korisnosti η_i odnosno η , već i o raspoloživom entalpijskom padu Δh_d , a on ne ovisi o stroju.

Stapni parni strojevi

Stapni parni strojevi bili su prvi i stoga posebno značajni pogonski toplinski strojevi. Danas su stabilne parne strojeve potisnule parne turbine, dok su brodske i lokomotivske parne strojeve zamijenili naročito dizelovi motori, a na željeznici još i električna vuča. Iznimka su neke novije izvedbe brzih »parnih motora«.

Indicirana snaga P_{ind} stroja iznosi

$$P_{ind} = (d^2 - d_b^2) \frac{\pi}{4} p_{med} s 2 i n$$

gdje znače: d — promjer parnog cilindra, d_b — promjer stapajice (u radnom prostoru cilindra), p_{med} — prosječni indicirani tlak u cilindru, s — stapaj, i — broj cilindara (dvoradnih), n — brzinu vrtnje.

Zanemarimo li gubitak topline cilindra na okolinu i gubitke pare zbog propustnosti stapa i razvodnika, indicirana snaga P_{ind} približno je jednaka unutarnjoj snazi P_i

$$P_{ind} \approx P_i$$

Prosječni indicirani tlak u cilindru p_{med} određujemo iz indikatorskog dijagrama koji dobivamo indiciranjem. On ovisi u prvom redu o ulaznom tlaku pare p_1 , punjenju ϵ (dijelu stapaja za vrijeme kojega ulazi para u cilindar) i brzini vrtnje n .

Prosječni tlak u cilindru izražavamo kao dio ulaznog tlaka

$$p_{med} = \alpha p_1 \quad \alpha < 1$$

Koeficijent α ovisi o punjenju ϵ i brzini vrtnje n te raste s većim punjenjem ($\epsilon = 0,1 \dots 0,8$) i manjom brzinom vrtnje n , a iznosi:

$$\alpha \approx 0,25 \dots 0,75$$

Trošenje stapnih prstenova smanjujemo ograničavanjem »prosječne stapne brzine $v_{med} = 2 s n$.

Brzina vrtnje n ograničena je inercijom masa mehanizama u translatornom gibanju, tj. stapa, stapajice, križne glave i dijela ojnice (oko $2/5$).

Korisnosti

Indicirana korisnost $\eta_{ind} = P_{ind}/P_0$ ovisi u prvom redu o punjenju ϵ i brzini n , a približno je jednaka unutarnjoj korisnosti: $\eta_{ind} \approx \eta_i$.

Mehanička korisnost η_m također ovisi o brzini vrtnje n . Najbolje vrijednosti ukupne korisnosti $\eta = \eta_i \eta_m$ ispušnih stapnih strojeva na pregrijanu paru iznose

$$\eta = 0,55 \dots 0,75$$

Manje se vrijednosti odnose na male, a veće na velike strojeve.

Parne turbine

Parne su turbine brzi rotacijski strojevi koji rade povoljno pri konstantnoj brzini vrtnje. Stoga su idealni strojevi za pogon električnih generatora.

U usporedbi sa stapnim parnim strojevima parne turbine imaju stanovite prednosti, u prvom redu jednoličniji pogon i veću mogućnost izvedbe od najmanjih do najvećih jedinica (0,5 . . . 200 000 kW i više). Izpušna je para u njih praktički bez ulja. Kod manjih izvedbi, npr. kao pomoćni strojevi, parne turbine imaju doduše manju korisnost nego stapni strojevi, ali su zato jednostavnije i lakše te i u tom slučaju dolaze u obzir. Parne turbine nisu prikladne za rad pri veoma promjenljivim brzinama vrtnje. Osim toga turbina se može okretati samo u jednom smislu.

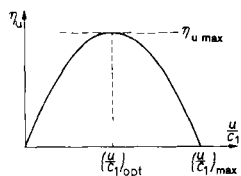
U parnim se turbinama toplinska energija pare (raspoloživi entalpijski pad Δh_d) pretvara u kinetičku energiju parnog mlaza koji se – djelovanjem na pokretne lopatice rotora – pretvara u mehanički rad.

Apsolutne brzine mlaza – c_1 na ulazu u rotorske lopatice i c_2 na izlazu iz njih – ovisne su od raspoloživog entalpijskog pada u statoru samom (stalnotlačno djelovanje – akcijsko) ili u statoru i rotoru (pretlačno djelovanje – reakcijsko).

Snaga turbine na obodu lopatičnog kola P_u je

$$P_u = q u (c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)$$

gdje znače: q – protok parne mase, u – obodnu brzinu kola (lopatica), α_1 – kut između apsolutne ulazne brzine i obodne brzine, α_2 – kut između apsolutne izlazne brzine i obodne brzine.



Obodna brzina u određena je promjerom lopatičnog kola d i brzinom vrtnje n

$$u = d \pi n$$

Korisnost na obodu lopatičnoga kola η_u jest omjer snage na obodu P_u i teoretske snage P_0 (vidi str. 228); ona ovisi o omjeru obodne brzine i apsolutne ulazne brzine u/c_1

$$\eta_u = P_u/P_0 = f(u/c_1)$$

Najveću korisnost $\eta_{u \max}$ dobivamo pri optimalnom omjeru $(u/c_1)_{\text{opt}}$ koji iznosi:

kod akcijskih stupnjeva 0,4 . . . 0,5
kod reakcijskih stupnjeva 0,6 . . . 0,7

Turbina radi dakle s dobrom korisnošću samo u uskom području obodnih brzina u odnosno brzina vrtnje n . Pri naglom rasterećenju mogla bi da pobegne do brzine koja odgovara omjeru $(u/c_1)_{\text{max}} \approx 2(u/c_1)_{\text{opt}}$ (što regulator mora spriječiti).

S obzirom na čvrstoću turbinskog rotora brzine vrtnje n ograničene su maksimalnim obodnim brzinama u koje iznose 120 . . . 400 m/s, no veće se vrijednosti mogu postići samo najboljim izvedbama (oblik kola, materijal!).

Obodnu brzinu smanjujemo stupnjevanjem brzine u više rotorskih vijenaca lopatica (Curtisovo kolo) ili izvedbom s više akcijskih ili reakcijskih stupnjeva. Izvedene turbine većinom su kombinacije osnovnih tipova.

Unutarnja snaga turbine P_i iznosi

$$P_i = q \Delta h$$

gdje je Δh – stvarni entalpijski pad (vidi str. 228).

Unutarnja snaga P_i manja je od obodne P_u za unutarnje gubitke trenja i ventilacije: $P_i < P_u$. Budući da su ti gubici neznatni, uzimamo da je unutarnja snaga P_i približno jednaka obodnoj snazi P_u : $P_i \approx P_u$.

Unutarnja korisnost η_i iznosi

$$\eta_i = P_i/P_0 \approx \eta_u$$

Najveće vrijednosti unutarnje korisnosti η_i , mehaničke korisnosti η_m i cjelokupne korisnosti $\eta = \eta_i \eta_m$ parnih turbina iznose:

Vrsta turbine	η_i	η_m	η
velike, mnogo stupnjeva	0,80 . . . 0,86	0,985	0,79 . . . 0,85
srednje	0,72 . . . 0,78	0,98	0,70 . . . 0,76
male, nekoliko stupnjeva	0,60 . . . 0,70	0,97	0,58 . . . 0,68
osobito male	–	–	< 0,50

Najuobičajenije vrijednosti tlaka p i temperature T pare ispred turbine:

snaga	mala	srednja	velika
p (bar)	15 . . . 30	40 . . . 70	100 . . . 200
T (°C)	320 . . . 450	450 . . . 500	500 . . . 600

Vrste turbina:

Kondenzacijske parne turbine iskorištavaju sav entalpijski pad (od tlaka svježe pare do kondenzacijskog tlaka). Imaju velik broj stupnjeva (visokotlačnih, srednjetačnih i niskotlačnih) koji mogu biti raspoređeni u nekoliko kućišta pa i na više osovina. Upotrebljavaju se u parnim termoelektranama.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode (str. 236) upotrebljavaju se kondenzacijske parne turbine s odvojcima za paru.

Industrijske parne turbine su turbine prilagođene posebnim potrebama, npr.:

– protutlačne turbine koje iskorištavaju samo gornji dio entalpijskog pada, imaju manji broj stupnjeva (visokotlačnih i srednjetačnih) pa su razmjerno manje. (Upotrebljavaju se također za toplane.);

– turbine na otpadnu paru (iz drugih izvora) imaju samo niskotlačne stupnjeve.

KONDEZACIJA

Iz parnog stroja otječe protok q većinom već mokre pare ($x > 0,9$) tlaka p_2 i odgovarajuće temperature T_2 te specifične entalpije h_2 . U kondenzatoru predaje para pri konstantnom tlaku p_2 toplinski tok Φ , zbog čega se potpuno pretvara u kapljevinu (kondenzira) i obično još nešto pothladi do temperature kondenzata T_k ($< T_2$) i entalpije h_k . ($T_2 - T_k = 0 \dots 5$ K).

Zanemarimo li neznatan neposredni prijelaz topline s kondenzatora na okolinu, prelazi toplinski tok Φ na rashladnu vodu, koja se pri protoku q_v ugrijava od temperature T_{v1} na T_{v2} . Ako je c specifični toplinski kapacitet vode, onda je

$$\Phi = q(h_2 - h_k) = q_v c(T_{v2} - T_{v1})$$

U površinskih kondenzatora toplina mora prolaziti kroz stijenke, zbog čega rashladna voda mora uvijek biti hladnija od pare: $T_{v2} < T_k$; u kondenzatora na miješanje para i rashladna voda su u neposrednom dodiru pa se konačne temperature izjednačuju: $T_{v2} = T_k$.

Ulazna temperatura rashladne vode T_{v1} iznosi:

- | | |
|---|--------------|
| a) pri dovođenju vode neposredno iz okoline | T_{v1} |
| – iz rijeke, jezera ili mora | 0 ... 25 °C |
| – iz bunara | 5 ... 15 °C |
| b) pri dovođenju vode iz rashladnog tornja | 20 ... 35 °C |

Da bismo postigli što veći podtlak u kondenzatoru, dopuštamo samo neznatno zagrijavanje rashladne vode u kondenzatoru:

$$\Delta T = T_{v2} - T_{v1} = 5 \dots 10 \text{ K}$$

Zbog toga je potrebna vrlo velika količina rashladne vode, a njezin protok q_v zavisi od protoka pare q i iznosi

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| u površinskih kondenzatora | $q_v = (50 \dots 60)q$ |
| u kondenzatora na miješanje | $q_v = (25 \dots 30)q$ |

Ovisno o temperaturi rashladne vode postignemo u kondenzatoru tlak s vodom iz okoline 0,04 ... 0,05 bar s vodom iz rashladnog tornja 0,07 ... 0,08 bar

U površinskom kondenzatoru, iako je rashladna voda obične prirodne čistoće, dobivamo potpuno čist kondenzat (destilacija!) koji je vrlo prikladan za napajanje parnih kotlova. U kondenzatoru na miješanje kondenzat se miješa s rashladnom vodom pa čistoća takve mješavine zavisi od čistoće rashladne vode. Upotrebljavamo li tu mješavinu za napajanje parnih kotlova, mora rashladna voda biti u odgovarajućoj mjeri očišćena (kemijski omeškšana).

Zrak u pari (koji se u kondenzatoru ne kondenzira) isisavamo iz kondenzatora posebnim zračnim pumpama ili ejektorima (vodenim ili parnim mlazom).

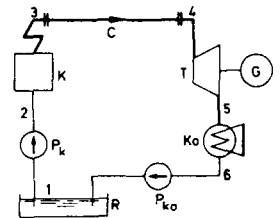
Proračun prolazne površine kondenzatora vidi na str. 221. Pri brzini rashladne vode u cijevima $v = 1,5 \dots 2,5$ m/s iznosi koeficijent prolaza topline $k = 2900 \dots 4100$ W/m² K. (Prosječno možemo za protok pare $q = 1$ kg/s računati s površinom od 75 ... 100 m².)

PARNA POSTROJENJA

Kondenzacijska parna postrojenja namijenjena su isključivo za proizvodnju mehaničke energije, većinom za pogon električnih generatora u parnim termoelekttranama.

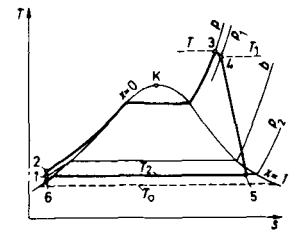
Jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje s kružnim protokom vode- pare q prikazano je u sljedećoj shemi:

- R — spremnik napojne vode
- P_k — napojna pumpa
- K — parni kotao
- C — parni cjevovod
- T — parni stroj (turbina)
- G — električni generator
- Ko — kondenzator
- P_{ko} — kondenzatna pumpa



Voda-para na kružnom putu mijenja svoje toplinsko stanje. Karakteristična mjesta različitih toplinskih stanja označena su u shemi brojevima od 1 do 6, a tako i u Ts -dijagramu:

Stanje na mjestu	Temperatura	Tlak	Specifična entalpija
1	T_r	p_a	h_r
2	T_v	p	h_v
3	T	p	h
4	T_1	p_1	h_1
5	T_2	p_2	h_2
6	T_k	p_2	h_k



Promjene specifične entalpije vode- pare zbog promjene stanja:

1—2	u napojnoj pumpi	za + ($h_v - h_r$)
2—3	u parnom kotlu	za + ($h - h_v$)
3—4	u parnom vodu	za - ($h - h_1$)
4—5	u parnom stroju (turbini)	za - ($h_1 - h_2$)
5—6	u kondenzatoru	za - ($h_2 - h_k$)
6—1	u kondenzatnoj pumpi	za + ($h_r - h_k$)

Za jednostavno kondenzacijsko parno postrojenje možemo obično uzeti da je

$$T_k \approx T_r \approx T_v \quad \text{i} \quad h_k \approx h_r \approx h_v$$

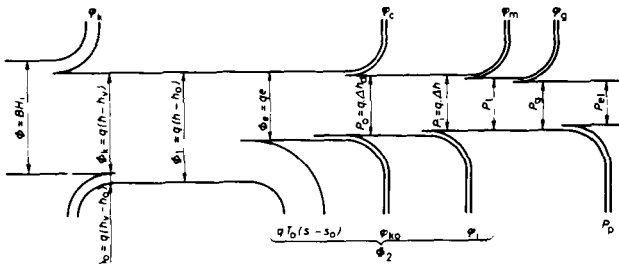
pa su u tom slučaju točke 6, 1 i 2 u Ts -dijagramu gotovo identične.

Kod kratkih parnih vodova između parnog kotla i parnog stroja (turbine) također je

$$T \approx T_1 \quad \text{i} \quad p \approx p_1 \quad \text{i} \quad \text{zato} \quad h \approx h_1$$

pa su točke 3 i 4 također gotovo identične.

Shema energetskog toka kroz parno postrojenje u termoelektrani



S ugljenom dovodimo u parni kotao toplinski tok Φ . Zbog gubitaka u kotlu φ_k na napojnu vodu prelazi samo toplinski tok Φ_k . Tome se pridružuje toplinski tok Φ_0 što ga dovodimo s toplom napojnom vodom, jer je njezina temperatura T_v obično viša od temperature okoline T_0 ($T_v > T_0$), i to stoga što je temperatura kondenzata koji pritječe u spremnik napojne vode viša od temperature okoline (pogotovu pri hlađenju kondenzatora vodom iz rashladnog tornja). Osim toga često se iskorištava još i otpadna toplina ispušne pare iz pomoćnih parnih strojeva itd. za zagrijavanje napojne vode.

Para donosi iz parnog kotla toplinski tok

$$\Phi_1 = \Phi_k + \Phi_0 = q(h - h_0)$$

Od toga toplinskog toka za pretvorbu u rad sposoban je samo eksergijski tok

$$\Phi_e = qe = q(h - h_e) = \Phi_1 - qT_0(s - s_0)$$

Za pretvorbu u rad ostaje neiskorišten još i eksergijski gubitak zbog gubitaka u parnom vodu

$$\varphi_c = q(h - h_1)$$

i gubitak zbog kondenzacije pare pri temperaturi T_2 , koja je viša od temperature okoline T_0 ($T_2 > T_0$)

$$\varphi_{k0} = q(h_2 - h_e)$$

Preostalom raspoloživom padu entalpije $\Delta h_d = h_1 - h_2$ odgovarajući toplinski tok određuje teoretsku snagu stroja

$$\Phi_d = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0}) = q\Delta h_d = P_0$$

Unutarnji gubici u stroju

$$\varphi_i = q(h_2' - h_2)$$

smanjuju toplinski tok na Φ_i i određuje unutarnju snagu stroja P_i

$$\Phi_i = \Phi_d - \varphi_i = \Phi_e - (\varphi_c + \varphi_{k0} + \varphi_i) = q\Delta h = P_i$$

Zbog dodatnih mehaničkih gubitaka u parnom stroju φ_m smanjuje se unutarnja snaga parnog stroja P_i na efektivnu (stvarnu) snagu na osovini stroja (turbine) P_t , a zbog gubitaka u električnom generatoru φ_g snaga generatora P_g još je manja ($P_g < P_t$).

Vlastiti potrošak električne energije u centrali P_p služi za pogon elektromotora za dizalice i transportne naprave (transport ugljena i pepela), za ventilatore, pumpe itd., dalje za rasvjetu i grijanje te napajanje različitih električnih uređaja u centrali. Za taj potrošak, koji iznosi prosječno približno 8...10% snage generatora P_g , smanjuje se snaga P_{ei} što je centrala predaje mreži.

Korisnost

parnog kotla	$\eta_k = \Phi_k/\Phi = q(h - h_v)/BH_i$
termička	
— eksergije	$\eta_e = e/(h - h_0)$
— raspoloživog pada entalpije	$\eta_d = \Delta h_d/e$
— ukupna	$\eta_{th} = \eta_e \eta_d = \Delta h_d/(h - h_0)$
parnog stroja	
— unutarnja	$\eta_i = P_i/P_0 = \Delta h/\Delta h_d$
— mehanička	$\eta_m = P_t/P_i$
— ukupna (turbine)	$\eta_t = \eta_i \eta_m = P_t/q \Delta h_d$
električnoga generatora	$\eta_g = P_g/P_t$

Cjelokupna korisnost parne centrale

$$\eta_{tot} = \left(\eta_k + \frac{\Phi_0}{\Phi} \right) \eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{ei}}{P_g} = \frac{P_{ei}}{BH_i}$$

Kad je temperatura napojne vode T_v približno jednaka temperaturi okoline T_0 , tako da njihovu razliku možemo zanemariti ($T_v \approx T_0$), onda vrijedi

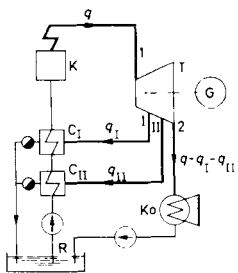
$$h_v \approx h_0 \quad \text{i} \quad \Phi_0 = 0$$

pa je

$$\eta_{tot} = \eta_k \cdot \eta_{th} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{P_{ei}}{P_g} = \frac{P_{ei}}{BH_i}$$

Najlošija je korisnost eksergije η_e . Da bi je popravili, težimo što većoj eksergiji pare, koju postizemo što višom temperaturom pare i odgovarajućim visokim tlakom. Temperature su vrlo ograničene (otpornošću stijenki pregrijača) i iznose 360...560 (...650) °C, dok su tlakovi gotovo neograničeni i iznose 12...160 (...300 i više) bara.

Regenerativno grijanje napojne vode



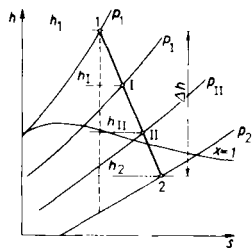
Iz parnog kotla dovodimo parni protok q u kondenzacijsku parnu turbinu s oduzimanjem, iz koje odvodimo kod prvog odvojka I (pri tlaku p_1) protok q_1 , kod drugog odvojka II (pri tlaku p_{11}) protok q_{11} dok preostali protok $q - q_1 - q_{11}$ prelazi nakon potpune ekspanzije u kondenzator. Oduzetim protocima zagrijavamo napojnu vodu u zagrijačima C_1 in C_{11} .

U površinskim zagrijačima ogrjevna se para kondenzira, a kondenzat vodimo u spremnik napojne vode – vidi sliku; u zagrijačima s miješanjem ogrjevna se para miješa s napojnom vodom.

Unutarnja snaga turbine smanjila se zbog oduzimanja ogrjevnice pare protoka q_1 i q_{11} te iznosi

$$P_i = q\Delta h - [q_1(h_1 - h_2) + q_{11}(h_{11} - h_2)]$$

gdje su specifične entalpije pare: h_1 – na odvojkju I, h_{11} – na odvojkju II, h_2 – na izlazu iz turbine u kondenzator.



U zagrijačima C_1 in C_{11} (te s kondenzatom što ga uvodimo u rezervoar napojne vode) prenosi ogrjevna para na napojnu vodu toplinski tok

$$\Phi_g = q_1(h_1 - h_r) + q_{11}(h_{11} - h_r)$$

gdje je h_r – specifična entalpija napojne vode u spremniku R.

Toplinskom toku Φ_0 , što ga s već zagrijanom napojnom vodom dovodimo u parni kotao (vidi shemu energijskog toga na str. 234), prndružuje se još toplinski tok Φ_g .

Budući da je $h_r \ll h_2$, bit će smanjenje unutarnje snage turbine znatno manje od povećanja topline koju regenerativno dovodimo napojnoj vodi. Zato se cjelokupna korisnost povećava i to prosječno za 6 do 12%.

Pri regenerativnom zagrijavanju napojne vode, voda se u jednom stupnju zagrijava za približno 40 K, za što se potroši oko 5...10% pare, koja prilazi

turbini. (Pri peterostepenom regenerativnom zagrijavanju dolazi do kondenzatora samo još 75...50% pare koja prilazi turbini.) Za jednaku snagu turbine je stoga potreban osjetno veći dotok svježe pare (q) nego pri turbini bez regenerativnog zagrijavanja.

Medupregijavanje

Pri velikoj ekspanziji s visokoga početnog tlaka i temperature do vrlo niskog tlaka u kondenzatoru prešla bi para pri kraju ekspanzije u veoma vlažno područje ($x < 0,9$), što bi u niskotlačnim stupnjevima parnih turbina izazvalo nedopuštenu eroziju lopatica. Da to spriječimo, pregrijavamo paru u međupregijaču (dimnim plinovima parnog kotla ili svježom vrućom parom), tako da u svakom slučaju ostane njeņa suhoća $x \geq 0,9$.

Za međupregijavanje treba nam dodatni toplinski tok

$$\Phi_{2,3} = q(h_3 - h_2)$$

pri čemu je q – protok pare pri ulazu u međupregijač.

U obim turbina T_1 in T_2 dobivamo pri jednakom protoku pare q (tj. bez odcijepa) unutarnju snagu

$$P_i = q[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)]$$

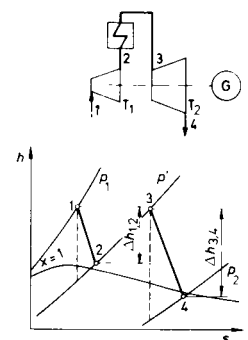
Medupregijavanje pare je uvijek združeno i s regenerativnim zagrijavanjem napojne vode. U tom je slučaju prvi odvod pare u točki stanja 2, a slijedeći se odvodi smještaju na drugu turbinu (T_2).

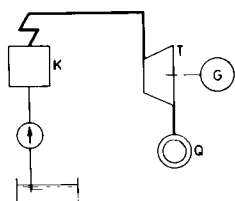
Proizvodnja električne i toplinske energije (toplane)

U kondenzacijskom parnom postrojenju odvodimo s rashladnom vodom znatan toplinski tok

$$\Phi_2 = q(h_2 - h_0)$$

koji se sastoji od dijela toplinskog toka $qT_0(s - s_0)$ koji se ne da pretvoriti u rad, od eksergijskih gubitaka $q(e - \Delta h_d)$ i od unutarnjih gubitaka parnog stroja $q(\Delta h_d - \Delta h)$; vidi str. 234. Taj se toplinski tok Φ_2 odvodi pri temperaturi T_2 , koja je u kondenzacijskom parnom postrojenju samo nešto viša od temperature okoline T_0 , pa zato, općenito, nije upotrebljiva za grijanje (osim za grijanje kupališnih bazena itd., gdje je dovoljna i mala temperaturna razlika $T_2 - T_0$).





Povišenjem protutlaka p_2 povisujemo i temperaturu T_2 pare iza parnog stroja, zbog čega para postaje prikladnom za grijanje. Zato takvu paru vodimo iz parnog stroja — umjesto u kondenzator — k potrošačima topline Q .

Ukoliko se sav čisti kondenzat ne vraća od potrošača topline u spremnik napojne vode, moramo manjak nadomjestiti očišćenom (umekšanom) vodom iz okoline.

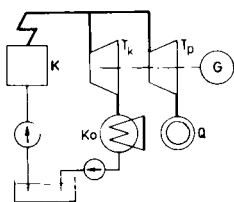
Pri različitim protutlakovima p_2 postiže se slijedeće temperature T_2 koje su prikladne za grijanje zgrada ili industrijskih naprava (osobito u papirnoj, tekstilnoj, kemijskoj i srodnoj industriji itd.):

p_2 (bar)	1	2	4	6	8	10	12	16
T_2 (°C)	100	120	144	159	170	180	188	201

Povišenjem protutlaka p_2 smanjuje se doduše entalpijski pad Δh , a time i unutarnja snaga stroja $P_1 = q \Delta h$, ali zato ostaje za grijanje upotrebljiv sav toplinski tok $\Phi_2 = q(h_2 - h_0)$. Stoga se znatno povećava ekonomičnost pri skupnoj proizvodnji mehaničkog rada za pogon generatora i topline za grijanje.

Zbog povišenja protutlaka p_2 postaje suvišan niskotlačni dio parnog stroja (turbine). Budući da se, osim toga, para iz stroja odvodi neposredno potrošačima topline, nije više potreban ni kondenzator sa svim uređajima za rashladnu vodu. Cjelokupno se postrojenje veoma pojednostavnjuje.

Tamo gdje se ne može vremenski potpuno uskladiti potrošak električne energije i topline za grijanje, prikladna je kombinacija dviju turbina — kondenzacijske T_k i protutlačne T_p . Protutlačna turbina daje toliko mehaničke energije koliko to odgovara potrošku topline, dok kondenzacijska turbina dobavlja ostatak potrebne mehaničke energije. Dovod svježe pare objema turbinama izveden je automatskim regulatorima tako da protutlačnom turbinom upravlja tlačni regulator, a kondenzacijskom regulator brzine vrtnje.



MOTORI S NUTARNJIM IZGARANJEM

Motori s nutarnjim izgaranjem su klipni strojevi kojima dovodimo prikladna goriva (koja ne ostavljaju pepela, smolastih ostataka itd.) zajedno sa zrakom za izgaranje neposredno u unutrašnjost cilindra, gdje izgaraju i oslobađajući toplinu povisuju tlak koji djeluje na klip i obavlja mehanički rad.

Sistemi Otto i Diesel

— Sistem Otto. Smjesu goriva i zraka za izgaranje, pripremljenu izvan cilindra, uvodimo u cilindar u kojem je klip komprimira (do 7...11 bar). Pri svršetku kompresije smjesa se pali električnom iskrom, našto u cilindru poraste tlak (25...40 bar) koji pri slijedećem — radnom — stapaju služi za vršenje rada.

U motorima sistema Otto upotrebljavamo:

a) plinovita goriva (rasvjetni, koksni, generatorski, grotleni ili sličan plin), koja se miješaju sa zrakom u ventilu za miješanje prije usisavanja ili u posebno konstruiranom usisnom ventilu;

b) kapljevita goriva (benzin, benzen, alkohol itd.), koja se u rasplinjaču (karburatoru) raspršuju (ne rasplinjuju!) u zraku za izgaranje kao fina maglica, a zatim se gorivo tek u cilindru pretvara u paru (plin) zbog kompresije i dovođenja topline sa stijenki.

Izgaranje u sistemu Otto zbiva se priližno po izohori (V_k — vidi na str. 240).

— Sistem Diesel. Čisti zrak za izgaranje uvodimo u unutrašnjost cilindra u kojem ga klip tako snažno komprimira (do 25...40 bar) da se pri kraju kompresije postiže temperatura paljenja goriva (550...700 °C), koje u tom trenutku ubrizgavamo u cilindar. Povećani tlak (60...100 bar), prouzročen izgaranjem, služi pri slijedećem — radnom — stapaju za vršenje rada.

U dizelskim motorima upotrebljavamo jeftinija, poluteška i teška ulja (plinska i dizelska ulja). Posebnom visokotlačnom pumpom (350...500 bar) štrcemo gorivo kroz fine sapnice za raspršivanje u cilindar, tako da nastane uljna maglica koja u vrućem komprimiranom zraku odmah plane. Izgaranje se zbiva najprije približno po izohori (V_k), a zatim po izobari (p_{max} — slika na str. 240).

Za motore s užarenom glavom («semidizelske motore») upotrebljavamo isto gorivo kao i za dizelske motore. Gorivo se za vrijeme kompresije zraka (koja nije tako velika kao u dizelskim motorima) ubrizgava u posebnu komoru za izgaranje, koja se — radi lakšeg paljenja — ne hladi pa je zato užarena.

4-taktni i 2-taktni motori

4-taktni motori imaju na svakom cilindru po dva ventila — usisni i ispušni.

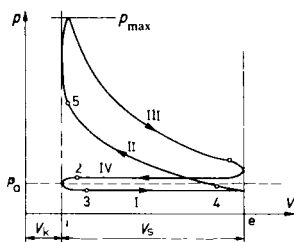
U prvom taktu (I) klip se giba od unutarnjeg (i — vidi sliku indikatorskog dijagrama na str. 240 lijevo) prema vanjskom mrtvom položaju (e) pri otvorenom usisnom i zatvorenom ispušnom ventilu. U cilindru se stvara podtlak, zbog čega u cilindar ulazi smjesa goriva i zraka (Otto), odnosno čisti zrak (Diesel). U drugom se taktu (II) — uz oba zatvorena ventila — smjesa odnosno čisti zrak

komprimira (od e do i). Slijedi paljenje smjese iskrom (Otto), odnosno paljenje goriva ubrzanoga u vrući zrak (Diesel), a zatim izgorjeli plinovi – uz još uvijek zatvorene ventile – potiskuju klip (od i do e) i vrše rad (treći takt – III). Konačno se otvara ispušni ventil, a pri ponovnom stapaju (od e do i) istiskuje klip izgorjele plinove iz cilindra (četvrti takt – IV).

2-taktni motori su većinom bez ventila. U njih se smjesa goriva sa zrakom (Otto) odnosno čist zrak (Diesel) tlači (pod malim pretlakom) u cilindar kroz raspore (za ispiranje), a izgorjeli plinovi se istiskuju kroz ispušne raspore. Svi se raspori otvaraju u odgovarajućem položaju klipa. 2-taktni motori imaju samo kompresijski i radni takt; ulazjenje smjese odnosno zraka i ispiranje cilindra te istiskivanje plinova zbiva se za kratko vrijeme dok su raspori između oba takta otvoreni.

U usporedbi sa 4-taktnim motorima imaju 2-taktni sljedeće prednosti: veću snagu uz iste dimenzije, ventile nadomještene rasporama i jednoličniji zakretni moment; nedostaci su pak: veće toplinsko opterećenje uz iste dimenzije, potrebna je posebna pumpa za ispiranje (u malih su motora pumpe nadomještene pumpnim djelovanjem kartera), a u sistemu Otto još su i gubici zbog ispiranja izgorjelih plinova gorivom smjesom. Stoga su laki motori sistema Otto većinom 4-taktni, a teški motori sistema Diesel obično 2-taktni.

Indikatorski dijagram



4-taktni motori sistema Otto

- 1 – otvaranje ispušnog ventila
- 2 – zatvaranje ispušnog ventila
- 3 – otvaranje usisnog ventila
- 4 – zatvaranje usisnog ventila
- 5 – paljenje električnom iskrom

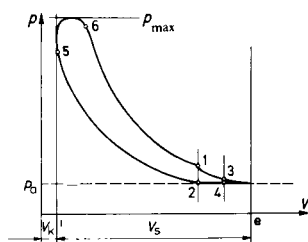
Barometarski tlak

Kompresijski omjer

Volumen kompresijskog prostora

Stapajni volumen

gdje znače: A – površinu klipa, d – promjer klipa, s – stapaj.



2-taktni motori sistema Diesel

- 1 – otvaranje ispušnog raspora
- 2 – zatvaranje ispušnog raspora
- 3 – otvaranje raspora za ispiranje
- 4 – zatvaranje raspora za ispiranje
- 5 – početak ubrizgavanja goriva
- 6 – svršetak ubrizgavanja goriva

p_a

$$\epsilon = V_e/V_i = (V_k + V_s)/V_k$$

V_k

$$V_s = A s = \pi d^2/4 \cdot s$$

Ekonomičnost motora s unutarnjim izgaranjem

S gorivom dovodimo u motor toplinski tok $\Phi_1 = B H_1$,

gdje su: B – potrošak goriva u jedinici vremena (kg/s), H_1 – donja ogrjevna moć goriva.

Zbog gubitaka pri izgaranju (nepotpuno izgaranje) samo dio te topline prelazi na izgorjele plinove.

Budući da se u unutrašnjosti cilindra stvaraju veoma visoke temperature (maksimalno do 2000 °C, a prosječno znatno niže), moramo motor hladiti, pa se zbog toga temperatura stijenki cilindra ustali na 250...350 °C. Hlađenje je u manjih motora obično zračno, a u većih vodeno. Upotreba zračnog hlađenja ograničena je zbog malog koeficijenta prijelaza topline α sa stijenki motora na zrak. Pri brzini rashladnog zraka v možemo računati s koeficijentom prijelaza α :

v (m/s)	1...2	5...10	20...30	40...50	60...100	100...200
α (W/m ² K)	6...12	30...70	80...150	160...210	230...350	350...640

Pri hlađenju vodom najdjelotvornija je svježa rashladna voda okoline, koja se može ugrijati za 40...70 K do konačne temperature 70...80 °C. Pri hlađenju morskom vodom računamo s ugrijavanjem za 20...40 K i konačnom temperaturom do 50 °C (iznimno i do 60 °C). Pri cirkulacijskom (optočnom) hlađenju vodom (vozila!) ugrijavanje je 7...10 K, do konačne temperature 80...90 °C.

Mnogo topline odlazi iz stroja još uvijek s vrlo vrućim ispušnim plinovima. Daljnji gubici nastaju zbog prigušivanja i propusnosti klipova i ventila.

Zbog nepotpunog izgaranja, hlađenja stroja, topline ispušnih plinova i ostalih gubitaka odvodimo iz stroja toplinski tok Φ_2 . On se sastoji od eksergijskog dijela (neiskorištene topline koja bi se teoretski još mogla pretvoriti u mehanički rad) i dijela koji nije iskoristiv za pretvorbu u rad.

Unutarnja snaga motora P_i proizlazi iz razlike među dovedenim i odvedenim toplinskim tokom $P_i = \Phi_1 - \Phi_2$

Unutarnju snagu P_i određujemo neposredno pomoću prosječnog indiciranog tlaka p_{med} u cilindru

$$P_i = p_{med} d^2 \pi / 4 \cdot 2 s n / z \cdot i = p_{med} V_i \cdot 2 n / z$$

gdje su: d – promjer klipa, s – stapaj, n – brzina vrtnje, z – broj taktova (4 ili 2), i – broj cilindara (dvoradni cilindar vrijedi za dva), V_i – stapajni volumen svih cilindara.

Prosječni indicirani tlak p_{med} brzih motora ne možemo odrediti jednostavnim sredstvima. No možemo ga izračunati iz efektivne snage motora P

$$p_{med} = P / (V_i \cdot 2 n / z \cdot \eta_m)$$

pri čemu efektivnu snagu motora P odredimo kočenjem, a mehaničku korisnost η_m pogonom motora iz stranog izvora. Prosječni indicirani tlak p_{med} kreće se između 5...9 bar.

Brzine vrtnje plinskih i dizelskih motora iznose 2...40 okr./s (120...2400 okr./min), lakih motora za vozila 50...100 okr./s (3000...6000 okr./min).

Prosječna brzina klipa $v = 2sn$ stabilnih motora ne premašuje vrijednost od 6 m/s, a motora za vozila doseže do 12 m/s (iznimno i do 18 m/s).

Unutarnja korisnost η_i je omjer između unutarnje snage P_i i dovedenog toplinskog toka $\Phi_1 = BH_i$; ovisi u prvom redu o kompresijskom omjeru ϵ (vidi str. 240):

$$\eta_i = P_i / BH_i = f(1 - k/\epsilon^{\kappa-1})$$

gdje znače: k – faktor, ovisan o načinu izgaranja (Otto: $k \approx 1$, Diesel: $k > 1$), κ – omjer specifičnih toplinskih kapaciteta ($= c_p/c_v$).

Unutarnja korisnost je dakle to veća što je veći kompresijski omjer ϵ . On je u motora sistema Otto vrlo ograničen zbog opasnosti od detonacije (kompresija gorive smjese!), dok u dizelskih motora taj omjer može biti znatno veći (kompresija zraka!):

motori sistema Otto — benzinski	$\epsilon \approx 5 \dots 8$ (... 9)
— plinski	$\epsilon = 6 \dots 10$
motori s užarenom glavom	$\epsilon = 8 \dots 12$
dizelski motori	$\epsilon = 12 \dots 25$ (... 35)

Efektivna snaga motora P iznosi

$$P = P_i \eta_m = BH_i \eta$$

gdje znače: η_m — mehaničku korisnost, η — cjelokupnu korisnost.

Mehanička korisnost η_m uzima u obzir gubitke zbog trenja u mehanizmu motora i pogon pomoćnih uređaja — električnog generatora za sistem paljenja (Otto) ili pumpe za ulje (Diesel), ventilatora za zračno hlađenje ili ventilatora i pumpe za vodu pri hlađenju vodom itd.

Cjelokupna korisnost η $\eta = \eta_i \eta_m \approx P/BH_i$

uzima u obzir sve gubitke u motoru koji su, u prosjeku, raspodijeljeni približno ovako:

gubici hlađenjem	28%	gubici zbog trenja itd.	10%
toplina ispušnih plinova	30%	(efektivna snaga stroja	30%)
ostali unutarnji gubici	2%		

Cjelokupna korisnost zavisi od opterećenja motora P i brzine vrtnje n , a iznosi u najpovoljnijem području rada:

kod lakih benzinskih motora	$\eta = 0,22 \dots 0,25$
kod plinskih motora	$\eta = 0,27 \dots 0,35$
kod motora s užarenom glavom	$\eta = 0,22 \dots 0,26$
kod malih dizelskih motora	$\eta = 0,31 \dots 0,34$
kod velikih dizelskih motora	$\eta = 0,35 \dots 0,41$

KOMPRESORI

Kompresori su strojevi koji komprimiraju plinove ili pare na određeni tlak. Pomoću njih dobivamo komprimirani zrak koji služi za pogon pneumatskog alata (6...7 bar) ili metalurških peći itd. Daljnja upotreba kompresora su: daljinski transport plinova (36 bar), rashladni uređaji (12 bar), ukapljivanje zraka (200 bar), kemijski procesi (do 1000 bar i više).

Promjene stanja plina pri kompresiji

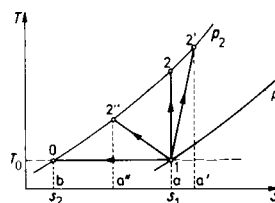
1. *Izotermna kompresija* (1—0)

Potrebiti rad (a 1 0 b a)

$$W_{1,0} = m R T_0 \ln \frac{p_1}{p_2} = m T_0 (s_2 - s_1)$$

Konačna je temperatura $T_0 = T_1 = \text{konst.}$ Za vrijeme kompresije treba odvoditi toplinu (a 1 0 b a)

$$Q_0 = m T_0 (s_2 - s_1)$$



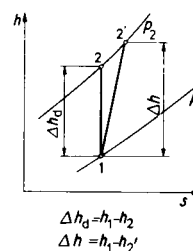
2. *Izotropska kompresija* (1—2) pri $s = \text{konst}$ (tj. bez izmjene topline s okolišem i bez unutarnjeg trenja).

Potrebiti rad (a 2 0 b a)

$$W_{1,2} = m \Delta h_d = m c_p (T_1 - T_2) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]$$

Konačna temperatura

$$T_2 = T_1 - \frac{\Delta h_d}{c_p} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa}$$



3. *Adijabatska kompresija* (1—2') — politropska kompresija s eksponentom politrope $n > \kappa$ (postizje se približno kod brzohodnih kompresora bez hlađenja).

Potrebiti rad (a' 2' 0 b a')

$$W_{1,2'} = m \Delta h = m c_p (T_1 - T_{2'}) = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

Konačna temperatura

$$T_{2'} = T_1 - \frac{\Delta h}{c_p} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

4. Politropska kompresija s eksponentom politrope $n < \kappa$ ($1 - 2''$) (postiže se približno kod hlađenih stapnih kompresora).

Potrebni rad (a l 2'' 0 b a)

$$W_{1,2''} = n/n - 1 \cdot p_1 V_1 [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}]$$

Odvedena toplina (a l 2'' a'' a)

Konačna temperatura

$$Q = (\kappa - n)/(\kappa - 1) \cdot W_{1,2''}/n$$

$$T_{2''} = T_1 (p_2/p_1)^{(n-1)/n}$$

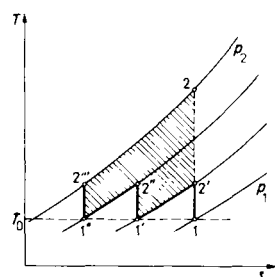
Uspoređivanjem različitih promjena stanja dobivamo:

$$W_{1,2''} > W_{1,2} > W_{1,2'} > W_{1,0} \quad T_{2''} > T_2 > T_{2'} > T_0$$

Najmanji je rad potreban za izotermnu kompresiju ($W_{1,0}$), a najbliže smo joj pri obilnom hlađenju ($W_{1,2''}$). Najveći je rad potreban kod nehladenih strojeva ($W_{1,2}$).

Višestepena kompresija

Višestepena kompresija omogućuje da se, bez obzira na vrstu kompresora (hlađenoga ili nehladenoga) vrlo približno izotermnoj kompresiji.



Iza svakog stupnja kompresije hladimo ugrijani komprimirani plin po mogućnosti do početne temperature T_0 . Time štedimo rad koji je predočen u Ts dijagramu (desno) šrafiranom površinom $2' 1' 2'' 1'' 2''' 2 2'$.

Višestepena kompresija s međuhladeanjem poskupljuje uređaj to više što je veći broj stupnjeva. Stoga se obično ograničujemo na 2 do 4 stupnja. Tlačni omjer svakog stupnja pri ukupno i stupnjeva je

$$x = \sqrt[i]{p_2/p_1}$$

Kompresija do visokih tlakova

Pri kompresiji na manje tlakove (do 30 bar) računamo s realnim plinovima kao da su idealni. Pri višim tlakovima moramo jednadžbu stanja korigirati faktorom k

$$pv = kRT$$

Vrijednosti faktora k iznose:

p	bar	0	100	300	600	1000
H_2	0 °C	1,0	1,07	1,20	1,42	1,71
	100 °C	1,0	1,05	1,16	1,33	1,56
zrak*	0 °C	1,0	0,97	1,09	1,46	1,98
	100 °C	1,0	1,03	1,15	1,39	1,80

* Za računanje sa zrakom kao pregrijanom parom vidi str. 169.

Stapni kompresori

Jednostepenim stapnim kompresorima postižemo tlak do 5 (... 7) bar, a višestepenim postižemo u svakom stupnju tlačni omjer 3 ... 4.

Indikatorski dijagram

Stapajni volumen iznosi

$$V_s = As = d^2 \pi / 4 \cdot s$$

gdje znače: A — presjek cilindra, d — promjer cilindra, s — stapaj.

Štetni prostor

$$V_0 = 0,04 \dots 0,08 \dots 0,15) V_s$$

Dobavni volumen (pri tlaku p_1): V'

Dobava kompresora s obzirom na volumen plina pri početnom tlaku p_1 (ispred kompresora) iznosi kod jednoradnih kompresora

$$q_v = \lambda V_{s1} n_1 i_1$$

gdje znače: λ — stupanj dobave, V_{s1} — stapajni volumen u prvom stupnju (niskotlačnom), n_1 — brzinu vrtnje u prvom stupnju, i_1 — broj paralelno djelujućih cilindara u prvom stupnju (dvoradni cilindri računaju se dvostruko).

Stupanj dobave

$$\lambda = \lambda_0 \eta_v$$

određen je »volumetrijskom korisnošću« $\eta_v = V'/V_s$ (koja se znatno smanjuje povećavanjem štetnog prostora) i faktorom λ_0 (< 1) koji uzima u obzir ugrijavanje plina pri usisavanju te propusnost stapa i ventila.

Stupanj dobave iznosi:

kod malih kompresora	$\lambda > 0,70$
kod puhača (npr. za visoke peći)	$\lambda = 0,82 \dots 0,90$
kod kompresora za tlak do 7 bar	$\lambda = 0,86 \dots 0,92$

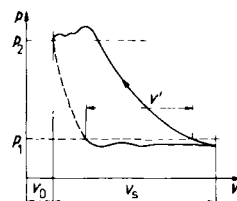
Pogonska snaga za kompresor

Unutarnja snaga P_i stapnih kompresora s hlađenim cilindrima približno je određena radom $W_{1,2''}$, potrebnim za politropsku kompresiju (vidi str. 244 pod 4), i to pri brzini vrtnje n

$$P_i = W_{1,2''} \cdot n$$

Pri tom zanemarujemo neznatni rad ekspanzije zaostaloga plina iz štetnog prostora. (Rad $W_{1,2''}$ računamo s eksponentom politrope $n = 1,32 \dots 1,38$.)

Zapravo se kompresija ne zbiva po politropi s konstantnim eksponentom n , već najprije približno po izentropi ($n \approx \kappa$), a zatim uz znatno odvođenje topline ($1 < n < \kappa$).



Unutarnju snagu za svaki cilindar određujemo također pomoću prosječnog indiciranog tlaka p_{med} u cilindru presjeka A i stapaja s pri brzini vrtnje n

$$P_i' = p_{med} A s n$$

Prosječni indicirani tlak p_{med} možemo izračunati iz rada $W_{1,2}''$ (ako uzmemo u obzir da je $V_1 = V_0 + V_2$)

$$p_{med} = W_{1,2}'' / V_s$$

Ukupna unutarnja snaga za više cilindara iznosi

$$P_i = \sum P_i'$$

Stvarno potrebna snaga za pogon kompresora iznosi

$$P = P_i / \eta_m$$

gdje je mehanička korisnost stapnih kompresora $\eta_m = 0,78 \dots 0,95$.

Turbokompresori

Turbokompresori su *radijalni* (po konstrukciji su slični turbopumpama) ili *aksijalni* (slični parnim turbinama).

U jednom se stupnju postižu samo manji kompresijski omjeri do 1,7 (... 4). Za više su tlakove potrebni višestepeni kompresori.

Kompresija se u turbokompresorima zbiva po adijabati (slučaj 3 na str. 243). Pri kompresijskim omjenima preko 2,5 porast je temperature tolik da je potrebno međuhlađenje.

Snaga za pogon turbokompresora

Teoretsku snagu određuju izentropski rad $W_{1,2}$ i brzina vrtnje n

$$P_0 = W_{1,2} \cdot n = q \Delta h_d$$

Unutarnja snaga je veća zbog unutarnjih gubitaka

$$P_i = W_{1,2}' \cdot n = q \Delta h = P_0 / \eta_i$$

gdje je unutarnja korisnost

$$\eta_i = P_0 / P_i = \Delta h_d / \Delta h$$

Stvarna snaga još je veća zbog vanjskih mehaničkih gubitaka (trenja)

$$P = P_i / \eta_m = P_0 / \eta = q \Delta h_d / \eta$$

pri čemu je mehanička korisnost turbokompresora $\eta_m = 0,95 \dots 0,98$, a cjelokupna korisnost $\eta = \eta_i \eta_m$.

Dobavna količina (protok mase) turbokompresora dobiva se iz stvarne snage P , cjelokupne korisnosti η i izentropske razlike entalpija Δh_d

$$q = \eta P / \Delta h_d$$

Dobavnu količinu možemo također izraziti početnim volumenskim protokom q_V i početnom gustoćom plina ρ

$$q = q_V \rho$$

PLINSKE TURBINE

Plinske turbine u širem smislu su pogonska postrojenja koja se sastoje – pri otvorenom procesu – od kompresora, komore za izgaranje i turbine.

Kompresor K tlačí zrak iz atmosfere u komoru za izgaranje C , u kojoj izgara gorivo ubrizgano neposredno u komprimirani zrak (pri konstantnom tlaku). Izgorjeli (dimni) plinovi struje nato kroz turbinu T koja dijelom svoje snage goni kompresor, a preostalom snagom generator G .

Kao gorivo možemo upotrijebiti jeftinija tekuća goriva, obično petrolej ili slično. Omjer potroška goriva B i protoka zraka q iznosi

$$B/q = 0,008 \dots 0,012 \quad (\text{kg/kg})$$

U komorama za izgaranje postižu se konačne temperature:

$$\begin{aligned} &\text{u stacionarnim strojevima} && 650 \dots 700 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &\text{u mlaznim strojevima} && 700 \dots 850 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Pri otvorenom procesu je q protok zraka kroz kompresor do komore za izgaranje, dok protok dimnih plinova koji nastaju u komori za izgaranje i struje kroz turbinu iznosi

$$q' = q + B \approx q$$

a ujedno se neznatno mijenja specifični toplinski kapacitet c_p' dimnih plinova, pomoću kojeg računamo toplinski tok u komori za izgaranje i snagu turbine.

Kružni proces plinske turbine možemo prikazati pojednostavljeno (bez veće greške) pomoću kružnog procesa zraka (vidi dijagram T, s).

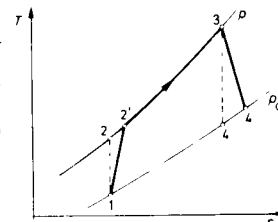
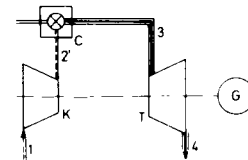
Promjene stanja zraka

- 1–2': adijabatska kompresija od tlaka p_a na tlak p ,
- 2'–3: dovođenje topline u komori za izgaranje pri tlaku p ,
- 3–4': adijabatska ekspanzija (s trenjem) u turbini od tlaka p na tlak p_a ,
- 4'–1: odvođenje topline u okoliš pri tlaku p_a .

Za adijabatsku kompresiju treba kompresoru snaga

$$P_{ik} = q c_p (T_2 - T_1) / \eta_{ik} = q c_p (T_2' - T_1)$$

gdje su: q – protok zraka, c_p – specifični toplinski kapacitet zraka, η_{ik} – unutarnja korisnost kompresora, T_1 – početna temperatura zraka, T_2 – konačna temperatura pri izentropskoj kompresiji, T_2' – stvarno postignuta konačna temperatura zraka (vidi str. 243).



Unutarnja korisnost kompresora iznosi

$$\eta_{ik} = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_2) = 0,80 \dots 0,87$$

Komori za izgaranje dovodimo toplinski tok

$$\Phi = B H_i \approx q c_p (T_3 - T_2)/\eta_c$$

gdje znače: B – potrošak goriva u jedinici vremena (kg/s), H_i – donju ogrjevnu moć goriva, T_3 – najvišu temperaturu u procesu (pri završetku dovođenja topline), η_c – korisnost gorionika.

Pri adijabatskoj ekspanziji dobivamo u turbini unutarnju snagu

$$P_{it} = q' c_p' (T_3 - T_4)/\eta_{it} = q' c_p' (T_3 - T_4)$$

gdje znače: q' – protok dimnih plinova ($\approx q$), c_p' – specifični toplinski kapacitet dimnih plinova ($\approx c_p$), T_4 – konačnu temperaturu pri izentropskoj ekspanziji, T_4 – temperatura zraka kod izlaza iz turbine, η_{it} – unutarnju korisnost turbine.

Unutarnja korisnost turbine iznosi

$$\eta_{it} = (T_3 - T_4)/(T_3 - T_4) = 0,85 \dots 0,88 (\dots 0,90)$$

Unutarnja korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine iznosi

$$P_i = P_{it} + P_{ik}$$

(pri čemu upotrijebljena snaga u kompresuru P_{ik} ima negativnu vrijednost).

Stvarna korisna snaga cjelokupnog postrojenja plinske turbine je zbog vanjskih gubitaka (trenja u ležajima, pogon regulatora itd.) manja

$$P = P_i \eta_m$$

gdje je η_m mehanička korisnost postrojenja.

Cjelokupna korisnost postrojenja iznosi

$$\eta = P/BH_i = (P_{it} + P_{ik})/BH_i \cdot \eta_m$$

Cjelokupna korisnost η ovisi u prvom redu o omjeru obiju krajnjih temperatura T_3/T_1 (i to tako da raste s porastom tog omjera) i o tlačnom omjeru p/p_a . Svakom omjeru temperatura pripada određeni optimalni tlačni omjer pri kojem je η maksimalan, npr.

T_3/T_1	2,5	3	3,5
$(p/p_a)_{opt}$	3,6	5,8	8,3
η_{max}	0,18	0,22	0,24

Da bi se postigao što veći omjer temperatura, mora biti:

- temperatura T_3 što viša, a ona je ograničena otpornošću materijala komore za izgaranje i turbine;
- temperatura T_1 što niža, a ona ovisi o temperaturi okoline (stoga je korisnost veća zimi, u sjevernim zemljama ili na velikim visinama).

Poboljšanje cjelokupne korisnosti

Cjelokupnu korisnost poboljšavaju:

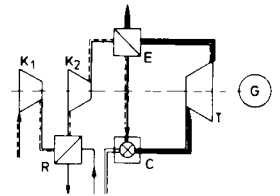
a) višestupna kompresija s međuhlađenjem, čime smanjujemo potrebnu ukupnu snagu za pogon kompresora P_{ik} ;

b) višestupna ekspanzija s međuzagrijavanjem, što povećava ukupnu snagu turbine P_{it} ;

c) regeneracija topline, tj. upotreba vrućih izlaznih plinova iz posljednje turbine, za zagrijavanje zraka iza kompresora, što smanjuje toplinski tok Φ koji moramo dovoditi.

Da bi postrojenje plinske turbine (s otvorenim procesom) postalo što jednostavnije (a uređaji što manji i jeftiniji) zadovoljavamo se često samo s dva stupnja kompresije i jednim stupnjem ekspanzije.

Na slici su: K_1, K_2 – kompresori, R – hladnjak, E – izmjenjivač topline, C – komora za izgaranje, T – turbina.



Mlazni (reaktivni) motori koji služe za pogon aviona imaju postrojenje s plinskom turbinom otvorenog procesa, a njen učin ne upotrebljava se samo za obavljanje vanjskoga mehaničkog rada na osovini turbine, već plinovi izgaranja stvaraju potisnu (reaktivnu) silu svojim mlazom na izlazu iz stroja kroz naročitu sapnicu.

Turbina mlaznog motora goni samo kompresor i troši

$$P_{it} = P_{ik}/\eta_m$$

gdje je η_m mehanička korisnost stroja u cjelini, a snage turbine i kompresora su:

$$P_{ik} = q c_p (T_1 - T_2)$$

$$P_{it} = q' c_p' (T_3 - T_4)$$

Zbog toga iz turbine istječu plinovi koji imaju još znatan pretlak spram okoline, $\Delta p = p_0 - p_a$ i zato imaju za ekspanziju do okolnog tlaka još uvijek na raspolaganju toplinski (izentropski) pad

$$\Delta h_d = h_4 - h_5 = c_p (T_4 - T_5)$$

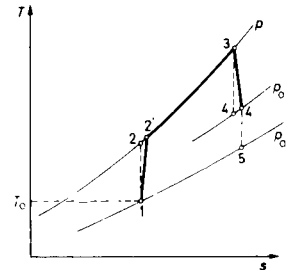
zbog kojega plinovi istječu kroz izlaznu sapnicu velikom brzinom v

$$v = \varphi \sqrt{2 \Delta h_d}$$

(φ = koeficijent brzine, vidi str. 200), što daje potisnu silu

$$F = q' v = q' \varphi \sqrt{2 \Delta h_d}$$

Za vrijeme leta ulazi u mlazni motor zrak pod velikim dinamičkim pritiskom što smanjuje potrebnu snagu kompresora i povećava potisnu silu mlaza.

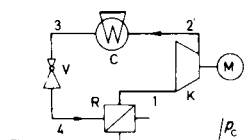


TOPLINSKE PUMPE

Toplinske su pumpe uređaji kojima crpimo – uz dodavanje energije – toplinu s niže temperature na višu.

Kompresijske toplinske pumpe su strojevi za hlađenje i grijanje. Kružni proces u kompresijskim toplinskim pumpama obavljaju posebno odabrane pare, osobito razni freoni (npr. R 12 = difluordiklormetan CF_2Cl_2 , R 22 = difluoromonoklormetan CHF_2Cl itd.), nadalje monoklormetan (metilklorid) CH_3Cl , diklormetan (metilenklorid) CH_2Cl_2 , sumporni dioksid SO_2 , ugljični dioksid CO_2 , amonijak NH_3 i sl.

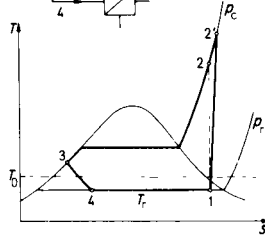
Jednostavna kompresijska toplinska pumpa:



K – kompresor, C – kondenzator (za okolinu: zagrijač), V – regulacijski (prigušni) ventil, R – isparivač, refrigerator (za okolinu: hladnjak), M – pogonski motor (električni ili drugi).

Promjene stanja pare:

- 1–2': adijabatska kompresija (s trenjem) od tlaka p_r na tlak p_c
- 2'–3: kondenzacija pri $p_c = \text{konst}$ (odvođenje topline pri višoj temperaturi u okolinu)
- 3–4: prigušivanje u regulacijskom ventilu od tlaka p_c na tlak p_r ($h_3 = h_4$)
- 4–1: isparivanje pri $p_r = \text{konst}$ (dovođenje topline pri niskoj temperaturi iz okoline).



Snaga za pogon kompresora (stvarna)

$$P = q(h_2 - h_1)/\eta = q(h_{2'} - h_1)/\eta_m$$

gdje znače: q – protok pare, h_1 – specifičnu entalpiju prije kompresije, h_2 – specifičnu entalpiju na kraju izentropske kompresije, $h_{2'}$ – stvarnu specifičnu entalpiju iza kompresora, η_m – mehaničku korisnost, η – cjelokupnu korisnost.

Odvedeni toplinski tok $\Phi_c = q(h_2 - h_3)$

Taj toplinski tok može poslužiti za grijanje okoline (»ogrjevni stroj«).

Faktor grijanja $\epsilon_c = \Phi_c/P$

pokazuje koliko »ogrjevnog toka« Φ_c dobivamo upotrebljavajući snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama taj je faktor znatno veći od 1, npr. $\epsilon_c = 5 \dots 15$ (i više).

Dovedeni toplinski tok $\Phi_r = q(h_1 - h_4)$

Taj toplinski tok služi za hlađenje okoline (»rashladni stroj«).

Rashladni faktor $\epsilon_r = \Phi_r/P$

pokazuje koliko »rashladnog toka« Φ_r dobivamo upotrebljavajući snagu P za pogon kompresora. Pri malim tlačnim (i temperaturnim) razlikama i taj je faktor znatno veći od 1, npr. $\epsilon_r = 3$ (i manje) do 12 (i više).

*

Apsorpcijske toplinske pumpe služe za apsorpcijske rashladne uređaje. U tu se svrhu iskorištava promjenljiva topivost nekoga rashladnog sredstva u određenom apsorpcijskom sredstvu. Najčešće se upotrebljava amonijak (NH_3) kao rashladno sredstvo, a voda (H_2O) kao apsorpcijsko sredstvo.

Jakost otopine izražavamo omjerom količine amonijaka i cjelokupne otopine

$$\xi = \text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O})$$

Najveću topivost (zasićenje) prikazuje maksimalni omjer ξ_{max} , koji ovisi o tlaku i temperaturi, a iznosi:

ξ_{max} pri tlaku bar	pri temperaturi (°C)								
	-20	-10	0	+10	+20	+40	+60	+80	+100
0,2	0,364	0,306	0,253	0,202	0,155	0,068	–	–	–
0,5	0,475	0,406	0,347	0,294	0,244	0,152	0,071	–	–
1,0	0,615	0,512	0,438	0,378	0,325	0,228	0,140	0,062	–
2,0	–	0,701	0,566	0,483	0,418	0,314	0,225	0,141	0,067

Za otapanje je potrebna toplina otapanja r_a , koja je gotovo neovisna o tlaku i temperaturi, ali je ovisna o omjeru ξ :

ξ	0,00	0,25	0,50	0,75
r_a kJ/kg	837	641	209	42

Toplina isparivanja NH_3 (pri +20 °C) iznosi $r = 1189$ kJ/kg.

Za otapanje (apsorpciju) amonijaka u vodi odnosno u blagoj (nezasićenoj) otopini (malo ξ) potrebna je znatna toplina $r + r_a$ koju otopina oduzima okolini (te je »hladi«). Apsorpcijom nastaje jaka otopina (veliko ξ) iz koje opet izlučujemo amonijak grijanjem (višoj temperaturi odgovara manje ξ_{max}). Prije ponovnog otapanja moramo amonijak i preostalu blagu otopinu – svaku posebno – ohladiti najprije na temperaturu okoline, da bi nakon apsorpcije postigli temperaturu nižu od okoline.

Za grijanje u apsorpcijskom rashladnom uređaju trošimo znatno više energije nego – pri istom rashladnom učinku – za pogon kompresora u kompresijskoj toplinskoj pumpi.

Sastavine	Sastavni dijelovi (težinski)	Temperatura	
		početna °C	konačna °C
voda	H ₂ O	16	
amonijev klorid (salmijak)	NH ₄ Cl	5	+ 10
kalijev nitrat (salitra)	KNO ₃	5	- 12
voda	H ₂ O	1	
amonijev nitrat	NH ₄ NO ₃	1	+ 10
dušična kiselina (razr.)	HNO ₃	2	- 15
natrijev nitrat (čilska sal.)	NaNO ₃	3	+ 10
sumporna kiselina	H ₂ SO ₄	4	- 20
natrijev sulfat	Na ₂ SO ₄	5	+ 10
voda	H ₂ O	1	
natrijev karbonat (soda)	Na ₂ CO ₃	1	+ 10
amonijev nitrat	NH ₄ NO ₃	1	- 22
dušična kiselina (razr.)	HNO ₃	4	- 40
amonijev nitrat	NH ₄ NO ₃	5	+ 10
natrijev sulfat	Na ₂ SO ₄	6	- 20
snijeg	H ₂ O	2	0
natrijev klorid (kuh. sol)	NaCl	1	- 20
snijeg	H ₂ O	5	0
kuhinska sol	NaCl	2	- 25
salmijak	NH ₄ Cl	1	- 25
snijeg	H ₂ O	3	0
sumporna kiselina (razr.)	H ₂ SO ₄	2	- 30
snijeg	H ₂ O	8	0
solna kiselina (razr.)	HCl	5	- 32
snijeg	H ₂ O	7	0
dušična kiselina (razr.)	HNO ₃	4	- 35
snijeg	H ₂ O	4	0
kalcijev klorid	CaCl ₂	5	- 40

Najniža leđišta vodenih otopina (eutektičnih)

5,9% Na ₂ CO ₃	— 2,1 °C	36,9% NaNO ₃	— 18,5 °C
10,9% KNO ₃	— 2,9 °C	22,4% NaCl*	— 21,2 °C
19,7% KCl	— 11,1 °C	20,6% MgCl ₂	— 33,6 °C
18,7% NH ₄ Cl	— 15,8 °C	35,5% K ₂ CO ₃	— 37,1 °C
41,2% NH ₄ NO ₃	— 17,4 °C	29,9% CaCl ₂	— 55,0 °C

* Eutektična vodena otopina NaCl ima (pri 15 °C) gustoću ρ = 1170 kg/m³ i specifični toplinski kapacitet c_p (pri temperaturi t):

t	°C	-20	0	+20
c _p	J/kg K	3320	3341	3362

KLIMATIZACIJA I SUŠENJE

Klimatizacija

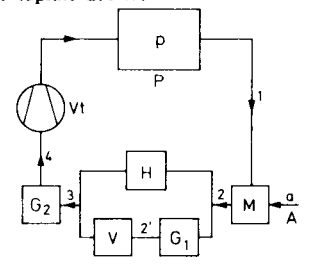
Svrha klimatizacije je održavanje temperature i vlage zraka u zatvorenoj prostoriji u granicama željenih vrijednosti.

Čovjek odaje toplinu i izlučuje vlagu koje (po VDI 2078 — 1977) iznose — pri mirovanju i bez fizičkog rada:

Temperatura zraka °C	Odavanje topline W	Izlučivanje vlage g/h
18	125	35
20	120	35
22	120	40
24	115	60
26	115	65

— pri poluteškom radu iznosi odavanje topline 270 W.

Klimatizacija obuhvaća niz postupaka pri kojima se iz klimatizirane prostorije P izlazeći vlažni zrak (stanja 1) miješa u mješalu M sa svježim zrakom iz atmosfere A (stanja a) u smjesu stanja 2 (koja je ovisna o omjeru miješanja 3:1...6:1); nakon čega će ta smjesa u hladnjaku H (ljetni rad) ili u zagrijaču G₁ i ovlaživaču V (zimski rad) promijeniti svoje stanje do stanja 3, da bi se u dogrijaču G₂ zagrijala do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

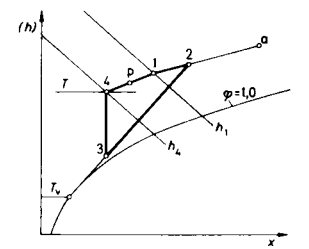


Stanje zraka u prostoriji P uzimamo kao točku miješanja p, dobivenu iz stanja ulaznog (4) i stanja izlaznog (1) zraka.

a) Ljetni pogon

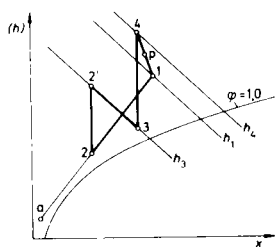
Vanjski zrak treba hladiti i sušiti. Stoga je uključen hladnjak H, dok su zagrijač G₁ i ovlaživač V isključeni.

U hladnjaku H prelazi toplina sa smjese (stanja 2) na rashladnu vodu (temperature pod rosištem smjese), pri čemu se smjesa hladi i suši (od stanja 2 do stanja 3), a rashladna se voda zagrijava. Konačno stanje smjese na izlazu iz hladnjaka (stanje 3) ovisno je o njegovoj korisnosti. U dogrijaču G₂ osušena se smjesa zagrije do odgovarajuće temperature T (stanje 4), našto je ventilator Vt tlači u prostoriju P.



Pri prijelazu m (kg) smjese iz stanja 4 u stanje 1 smjesa preuzima iz prostorije toplinu $Q = m \cdot \Delta h = m(h_1 - h_4)$ vlagu $m_v = m \cdot \Delta x = m(x_1 - x_4)$

b) Zimski pogon



Vanjski zrak valja zagrijavati i vlažiti. Stoga su uključeni zagrijač G_1 i ovlaživač V, dok je hladnjak H isključen.

U zagrijaču G_1 zagrijava se smjesa stanja 2 do stanja 2', u ovlaživaču V se vlaži i hladi do stanja 3. Nakon toga se smjesa dogrijava u dogrijaču G_2 do stanja 4, a tada je ventilator Vt tlači u prostoriju P.

Pri prijelazu m (kg) smjese sa stanja 4 u stanje 1 smjesa predaje prostoriji toplinu

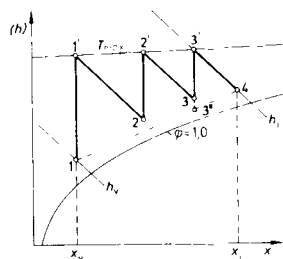
$$Q = m \cdot \Delta h = m(h_4 - h_1)$$

a preuzima od nje vlagu

$$m_v = m \cdot \Delta x = m(x_1 - x_4)$$

Sušenje vlažne tvari zagrijanim zrakom

Vlažnoj tvari, koja sadrži stanovitu količinu vode, treba smanjiti tu količinu vode do željene vrijednosti.



Zrak za sušenje (vanjski) neka ima ulaznu vlažnost x_v i ulaznu specifičnu entalpiju h_v (stanje 1). Zagrijavajući ga po izohigri ($x = \text{konst}$) do najviše dopuštene temperature T_{max} on prelazi u stanje 1'. Tako zagrijan zrak nato u sušionoj komori prima vlagu koja ishlapljuje iz vlažne tvari te se hladi po izentalpi ($h = \text{konst}$) do stanja 2.

Taj se postupak više puta ponavlja (2 - 2' i 2' - 3 i 3' - 4) do izlazne specifične entalpije h_i i izlazne vlažnosti x_i koja treba biti što većom.

Za zagrijavanje m_z (kg) zraka potrebna je toplina

$$Q = m_z(h_i - h_v)$$

a iz vlažne tvari je zrak preuzeo vlagu

$$m_v = m_z(x_i - x_v)$$

Pri optočnom postupku miješamo izlazni zrak (stanje 4) s ulaznim zrakom (stanje 1) u omjeru koji daje smjesu stanja npr. 3". Ta se smjesa zagrijava do stanja 3' i može u sušari preuzeti vlagu do stanja 4. Optok treba ponavljati do zatražene suhoće tvari.

ELEKTROTEHNIKA

Simboli

	istosmjerna struja		vodič		tri paralelna vodiča
	izmjenična struja		križanje vodiča		trokutni spoj
	istosmjerna i izmjenična struja		čvrsti spoj vodiča		zvjezdasti spoj
	trofazni sistem		rastavljivi spoj vodiča		ispravljač, elekt. ventil
	voltmetar		sklopka		galvanski izvor struje
	ampermetar		otpor		istosmjerni generator
	vatmetar		promjenljivi otpor		izmjenični generator
	ommetar		osigurač		istosmjerni motor
	mjerač frekvencije		namot		izmjenični motor
	$\cos \varphi$ - mjerač		namot s odvojcima		trošilo struje, rasvjetno tijelo
	registrirajući vatmetar		kondenzator		uzemljenje
	brojilo		polarizirani kondenzator		spoj s masom

ISTOSMJERNA STRUJA

Ohmov zakon

definira otpor R kao omjer napona U i struje I

$$R = U/I \quad U = I R \quad I = U/R$$

Djelatni (ohmski) otpor R upravno je razmjern s duljinom l i obrnuto razmjern s presjekom A vodiča

$$R = \rho l/A \quad \rho = R/l \cdot A$$

ρ = specifični otpor koji je karakterističan za svaki materijal.

Specifični otpor ρ i presjek vodiča A mjerimo koherentnim jedinicama međunarodnog sustava jedinica (SI): $\Omega \text{ m}$ ($= \Omega/\text{m} \cdot \text{m}^2$) ili izvedenom jedinicom $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (A u mm^2).

Specifični otpor ρ ovisi o temperaturi T . Specifični otpor ρ_1 pri temperaturi T_1 povećava se pri temperaturi T_2 na ρ_2 po formuli

$$\rho_2 = \rho_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

α = je temperaturni koeficijent električnog otpora mjereno u K^{-1} .

Koeficijent α također se mijenja s temperaturom, no te su promjene pri praktički važnim temperaturama tako neznatne da ga često možemo smatrati konstantnim. Specifični otpori ρ_1 i temperaturni koeficijenti α određuju se obično pri temperaturi $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$, a sabrani su za najvažnije materijale na str. 257.

Djelatna (omska) vodljivost G je recipročna veličina omskom otporu R

$$G = 1/R = A/\rho l$$

Specifična vodljivost je $\gamma = 1/\rho$.

Kirchhoffovi zakoni

I Zbroj struja koje dolaze u neku točku električne mreže jednak je zbroju struja koje iz te točke odlaze, tj. zbroj svih struja jednak je nuli

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

II U svakom je zatvorenom krugu zbroj narinutih napona jednak zbroju umnožaka struja i pripadnih otpora (tj. zbroju padova napona)

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n (I R)_i$$

Snaga i rad istosmjerne struje

Snaga P istosmjerne struje jednaka je umnošku napona U i struje I

$$P = U I = I^2 R = U^2/R$$

Rad W istosmjerne struje jednak je umnošku snage P i vremena t

$$W = P t = U I t = I^2 R t$$

Specifični otpori ρ , specifične vodljivosti γ i temperaturni koeficijenti električnog otpora α različitih materijala (pri 20°C)

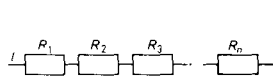
Materijal	Specifični otpor ρ $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$	Specifična vodljivost γ $\frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$	Temperaturni koeficijent otpora α K^{-1}
aluminij – lijevani	0,040	25	0,003 6
– meki	0,028	36	0,004 0
– tvrdo vučeni	0,029	34,5	0,004 1
bakar – meki	0,017 5	57	0,003 93
– tvrdo vučeni	0,017 8	56	0,003 92
bronca – aluminijska	0,13 ... 0,29	7,7 ... 3,4	0,000 6 ... 0,001
– kositrena	0,027 8	36	0,004 0
cekas	1,12	0,894	0,000 14
cekas I	0,97	1,03	0,000 52
cekas II	1,08	0,925	0,000 08
cink	0,060	16,8	0,004 1
čelik	0,1 ... 0,25	10 ... 4	0,004 5 ... 0,005 5
– lijevani	0,142	7	–
– lim	0,13	7,7	0,004 5
– »dinamo« lim	0,27 ... 0,67	3,7 ... 1,5	–
– žica	0,17	5,9	0,005 2
kantal	1,45	0,69	0,000 06
konstantan	0,5	2,0	–0,000 05
kositar	0,12	8,3	0,004 5
magnezij	0,043	23	0,004 1
manganin	0,43	2,32	0,000 01
mjed – lijevana	0,071	14	–
– vučena	0,07 ... 0,08	14 ... 12,5	0,001 3 ... 0,001 9
nikal	0,42	2,38	0,000 2
nikelin	0,09	11	0,005 5
ново srebro	0,38	2,63	0,000 07
olovo	0,21	4,8	0,004 1
platina	0,10	10	0,003 92
silumin – lijevani	0,059	17	0,004
sivi ljev	0,6 ... 1,6	1,7 ... 6,3	–
srebro	0,016 5	61	0,004 0
volfra	0,055	18,1	0,004 8
zlato	0,023	43,5	0,004 0
željezo (čisto)	0,10	10	0,006
živa	0,958	1,04	0,000 99

Za destiliranu vodu iznosi $\rho \approx 10^{10} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$,

a za morsku je vodu $\rho = 3 \cdot 10^5 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.

Spajanje djelatnih (omskih) otpora

- a) Serijski spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R jednak sumi pojedinačnih otpora (koji je veći od najvećeg otpora)

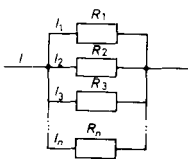


$$R = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

te propuštaju struju I_i koja je u svim otpornicima jednaka

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

- b) Paralelno spojeni otpornici pojedinačnih otpora R_i imaju ukupan otpor R koji je recipročna vrijednost zbroja recipročnih vrijednosti svih otpora (te je manji od najmanjega otpora), a dobiva se iz jednadžbe



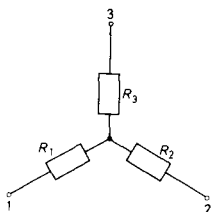
$$1/R = \sum_{i=1}^n 1/R_i = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

Ukupna struja I koju propuštaju jednaka je sumi struja I_i kroz pojedine otpornike

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

- c) Električni spoj triju otpora

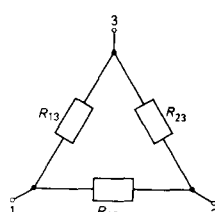
Spoj u zvijezdi (T-spoj)



Otpor među stezaljkama 1 i 2

$$R = R_1 + R_2$$

Spoj u trokutu (Π -spoj)

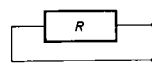


Otpor među stezaljkama 1 i 2

$$R = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

Mjerenje temperature otporom

Termometri na otpor iskorišćuju ovisnost djelatnog otpora ϱ_T o temperaturi T (vidi str. 256)



$$\varrho_T = \varrho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

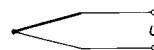
gdje su: ϱ_0 – specifični otpor pri temperaturi $T_0 = 273 \text{ K}$, $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $(T - T_0)$ je dakle temperatura t u $^\circ\text{C}$.

Naročito je pogodna za termometre na otpor platina, čiji je temperaturni koeficijent električnog otpora α linearno ovisan o temperaturi.

$$\alpha = (3907,841 - 0,578 t) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

t $^\circ\text{C}$	α 10^{-6} K^{-1}	t $^\circ\text{C}$	α 10^{-6} K^{-1}	t $^\circ\text{C}$	α 10^{-6} K^{-1}
-220	4035,091	150	3821,080	550	3589,716
-200	4023,523	200	3792,159	600	3560,796
-150	3994,602	250	3763,239	650	3531,876
-100	3965,682	300	3734,318	700	3502,955
- 50	3936,761	350	3705,398	750	3474,035
0	3907,841	400	3676,478	800	3445,114
50	3878,921	450	3647,557	850	3416,194
100	3850,000	500	3618,637		

Termonaponi



Termički se naponi pojavljuju na lemljenim mjestima dviju kovina ili slitina. Oni rastu s porastom temperature, što se iskorištava za mjerenje temperature.

Termoelektrični naponski niz (s obzirom na platinu) za temperaturnu razliku među lemljenim mjestima 100 K ($100 \text{ }^\circ\text{C}$ i $0 \text{ }^\circ\text{C}$) iznosi:

Kovina (zlitina)	Termonapon mV	Kovina (slitina)	Termonapon mV
Bi	-7,7	Ir	+0,67
konstantan	-3,47 ... -3,04	Ag	+0,67 ... +0,79
Ni	-1,94 ... -1,20	Cu	+0,72 ... +0,77
Pt	0	Au	+0,56 ... +0,80
platinodij (10% Rh)	+0,65	Fe	+1,88
W	+0,65 ... +0,90	kromnikal	+2,20

Termoelektrični naponi pri temperaturi T

za različite kovinske parove s obzirom na baždarne temperature 0 i 20°C

Temperatura t °C	Željezo — konstantan		Kromnikal — nikal		Platinrodij — platina	
	0°C	20°C	0°C	20°C	0°C	20°C
-200	-8,15	-9,20				
-150	-6,60	-7,65				
-100	-4,75	-5,80				
-50	-2,51	-3,56				
0	0,00	-1,05	0,00	-0,80	0,000	-0,113
50	2,65	1,60	2,02	1,22	0,299	0,186
100	5,37	4,32	4,10	3,30	0,643	0,530
150	8,15	7,10	6,13	5,33	1,025	0,912
200	10,95	9,90	8,13	7,33	1,436	1,323
250	13,75	12,70	10,16	9,36	1,868	1,755
300	16,56	15,51	12,21	11,41	2,316	2,203
350	19,36	18,31	14,29	13,49	2,778	2,665
400	22,16	21,11	16,40	15,60	3,251	3,138
450	25,00	23,95	18,51	17,71	3,732	3,619
500	27,85	26,80	20,65	19,85	4,221	4,108
550	30,75	29,70	22,78	21,98	4,718	4,605
600	33,67	32,62	24,91	24,11	5,224	5,111
650	36,64	35,59	27,03	26,23	5,738	5,625
700	39,72	38,67	29,14	28,34	6,260	6,147
750	42,92	41,87	31,23	30,43	6,790	6,677
800	46,22	45,17	33,30	32,50	7,329	7,216
850	49,63	48,58	35,34	34,54	7,876	7,763
900	53,14	52,09	37,36	36,56	8,432	8,319
950			39,35	38,55	8,997	8,884
1000			41,31	40,51	9,570	9,457
1050			43,25	42,45	10,152	10,039
1100			45,16	44,36	10,741	10,628
1150			47,04	46,24	11,336	11,223
1200			48,89	48,09	11,935	11,822
1250			50,69	49,89	12,536	12,423
1300			52,46	51,66	13,138	13,025
1350					13,738	13,625
1400					14,337	14,224
1450					14,935	14,822
1500					15,054	14,941

Faradayevi zakoni

Faradayeva konstanta F je umnožak —

— Avogadrove konstante $N_A = 6,022\,05 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ i

— elementarnoga naboja $e = 0,160 \cdot 10^{-18} \text{ A s}$

$$F = N_A e = 96\,353 \text{ A s/mol}$$

Elektrokemijski ekvivalent a određen je molskom masom m_m i valenci-
jom v elementa te Faradayevom konstantom F

$$a = m_m / Fv \quad \text{kg/A s}$$

Vrijednosti elektrokemijskog ekvivalenta a (u $\text{mg/A s} = 10^{-6} \text{ kg/A s}$)
nekih materijala

Materijal*	a mg/A s	Materijal*	a mg/A s
aluminij	0,093 2	olovo	1,073 5
bakar — jednovalentni	0,658 8	platina	0,505 7
— dvovalentni	0,329 4	srebro	1,118 0
cink	0,338 7	zlatu	0,681 2
kalij	0,405 2	željezo — dvovalentno	0,289 3
kositar — dvovalentni	0,615 1	— trovalentno	0,192 9
— četverovalentni	0,307 5	živa — jednovalentna	2,078 9
magnezij	0,126 0	— dvovalentna	1,039 5
natrij	0,238 4	*	
nikal — dvovalentni	0,304 1	kisik (anion)	0,082 9
— trovalentni	0,202 7	vodik (kation)	0,010 44

* Valencija se odnosi na vezu kovine u kemijskom spoju.

Prvi Faradayev zakon

Struja I koja protječe elektrolitom izlučit će na elektrodi u vremenu t
masu m

$$m = aIt$$

gdje je a — elektrokemijski ekvivalent.

Drugi Faradayev zakon

Mase m_1 i m_2 različitih tvari, izlučene istom strujom u istom vremenu,
odnose se međusobno kao kvocijenti relativnih atomskih masa A i kemij-
skih valencija v tih tvari

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{A_1/v_1}{A_2/v_2}$$

MAGNETSKO I ELEKTRIČNO POLJE

Magnetsko polje nastaje oko polova permanentnih magneta ili oko vodiča električne struje.

Jakost magnetskog polja H (A/m), koju najlakše određujemo mjerenjem električne struje I , iznosi

- na okomitoj udaljenosti r od beskonačno dugog vodiča $H = I/2\pi r$
- u sredini kružnog vodiča (= 1 zavoja) promjera d $H = I/d$
- u sredini svitka sa w zavoja na cilindru promjera d $H = Iw/d$
- u sredini svitka sa w zavoja na zatvorenom (npr. kružnom) prstenu (obodne) duljine l $H = Iw/l$



Smjer magnetskog polja određuje se »pravilom desnog vijka«: podudara li se smjer aksijalnog pomicanja vijka sa smjerom struje u vodiču, magnetsko će polje imati smjer okretanja vijka. (Znak \otimes znači da promatrač gleda u smjeru struje, a znak \odot znači da gleda suprotno smjeru struje. Na slici struja ulazi okomito u ravninu crteža.)

Gustoća magnetskog toka (magnetska indukcija) B ($T = Vs/m^2$) je magnetski tok Φ (Vs) na jedinicu površine, što ga u različitim materijalima izaziva magnetsko polje jakosti H

$$B = \Phi/A = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

gdje su: A — presjek, μ — permeabilnost, μ_0 — permeabilnost praznog prostora (vakuuma), μ_r — relativna permeabilnost.

Permeabilnost praznog prostora μ_0 je konstanta

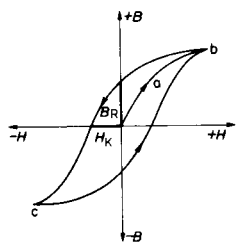
$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am.}$$

Relativna permeabilnost μ_r (bezdimenzijski broj) ovisi o materijalu i jakosti magnetskog polja H .

U vakuumu (a to vrijedi praktički i za zrak) relativna je permeabilnost $\mu_r = 1$. Za feromagnetske materijale prikazujemo ovisnost gustoće magnetskog toka o jakosti magnetskog polja »krivuljom magnetiziranja« $B = f(H)$.

Prvo magnetiziranje čelika prikazuje početna (»djevičanska«) krivulja (a). Smanjimo li zatim jakost magnetskog polja do nule, ostat će u čeliku remanentni magnetizam B_R , koji možemo poništiti samo suprotnim magnetskim poljem jakosti H_K (»koercitivna sila«).

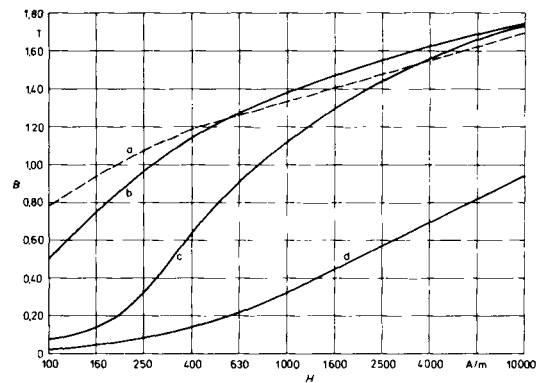
Magnetiziranjem čelika do zasićenja u jednom (b) i drugom smjeru (c) krivulja magnetiziranja opisuje petlju (»histereza«).



Čelici za permanentne magnete (magnetski tvrdi čelici) imaju vrlo široku histereznu petlju. Čelici pogodni za izmjenične magnete (magnetski meki čelici) imaju vrlo (praktički zanemarivo) usku histereznu petlju.

Krivulja magnetiziranja $B = f(H)$ za meki čelik i sivi lijev

Krivulja magnetiziranja $B = f(H)$ za meki čelik (I) i sivi lijev (II)



a — transformatorski lim
b — dinamo-lim

c — čelični lijev
d — sivi lijev

Nosivost magneta

Na nosivim polovima magneta magnetske indukcije B i površine A iznosi nosivost magneta F

$$F = B^2 A/2 \mu_0$$

Induktivitet

Induktivitet L nekog svitka sa w zavoja može se prikazati kvocijentom promjene magnetskog toka Φ i struje I koja ga stvara

$$L = w d\Phi/dI$$

Svitak sa w zavoja kojemu je presjek A i duljina l ima induktivitet L

$$L = \mu_0 \mu_r w^2 A/l$$

Induktivitet svitka bez željezne jezgre (za zrak: $\mu_r = 1$) je dakle konstantan. Induktivitet svitka sa željeznom jezgrom zavisi od nagiba krivulje magnetiziranja ($\mu_0 \mu_r = B/H$).

Energija svitka iznosi

$$W_L = LI^2/2$$

Električno polje nastaje između međusobno izoliranih vodiča pod naponom (i općenito: oko svakog statičkog naboja).

Jakost električnog polja E (V/m) između dviju paralelnih ploča među kojima je napon U , a njihova udaljenost a , iznosi

$$E = \frac{U}{a}$$

Na ploči koja ima naboj Q (C) na površini A (m²), iznosi **gustoća naboja** D (C/m²)

$$D = \frac{Q}{A} = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

gdje su: ϵ – dielektričnost, ϵ_0 – dielektrična konstanta (dielektričnost vakuma), ϵ_r – relativna dielektričnost izolatora.

Dielektrična konstanta praznog prostora ϵ_0 iznosi

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A s/V m}$$

Dielektričnost izolatora ϵ_r zavisi od materijala (između ploča) i iznosi za vakuum $\epsilon_r = 1$, za zrak $\epsilon_r = 1,006$. Vrijednosti za različite izolatore sabrane su u sljedećoj tablici.

Specifični električni otpori, relativna dielektričnost i probojna čvrstoća električnih izolatora

Materijal	Specifični otpor ρ $\Omega \text{ m}$	Relativna dielektričnost ϵ_r	Probojna čvrstoća kV/mm	Dopuštena maksimalna temperatura $^{\circ}\text{C}$
asfalt	—	2,7	1,8 ... 15,8	100
bakelit	10^{10}	2,8	20	55 ... 100
guma — meka	—	2,7 ... 7	10 ... 30	-30 ... +60
— tvrda	10^{16}	3 ... 3,5	10 ... 30	-40 ... +80
kremen	$5 \cdot 10^{16}$	4 ... 4,8	35 ... 40	1050
mikaniit	—	4,5 ... 5,5	20 ... 30	—
mramor	—	7 ... 9	1,4 ... 2,8	650
parašin	$10^{14} \dots 10^{16}$	2 ... 2,3	8 ... 20	—
polivinilklorid	—	—	—	—
— elastični	10^{11}	3 ... 4	50	65
— tvrdi	10^{14}	3 ... 4	50	60 ... 70
porculan	$10^9 \dots 10^{12}$	5 ... 6,3	30 ... 38	—
staklo	$5 \cdot 10^7$	4 ... 17	12 ... 20	—
šlak	10^{14}	2,9 ... 3,7	—	75
škrljavec	$10^6 \dots 10^{12}$	6 ... 10	0,2 ... 0,4	—
tinjac	$10^{13} \dots 10^{15}$	6 ... 8	20 ... 60	—
tvrdja ljepenka	$10^9 \dots 10^{10}$	5 ... 6	10 ... 30	130
ulje (transformatorsko)	10^{10}	2 ... 2,5	8 ... 12	85

Kapacitet

Kapacitetom C definiramo omjer električnog naboja Q sabranog na dvjema elektrodama kondenzatora i napona U među njima

$$C = Q/U$$

Kondenzator kojemu je površina paralelnih ploča A , a razmak među njima a ima kapacitet C

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/a$$

Kapacitet kondenzatora ovisi dakle o relativnoj dielektričnosti ϵ_r materijala među pločama (izolatora).

Spoj više kondenzatora

a) u paralelnom spoju (povećava se površina ploča); daje ukupni kapacitet C

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

b) u serijskom spoju (povećava se razmak ploča) daje ukupni kapacitet C prema jednadžbi

$$1/C = \sum_{i=1}^n 1/C_i = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n$$

Energija kondenzatora

$$W_C = C U^2/2$$

Vodič električne struje u magnetskom polju

1. Sila F (N) koja djeluje na vodič električne struje jakosti I (A), u magnetskom polju gustoće B (T), na duljini l (m), iznosi

$$F = B I l$$

Sila F je usmjerena prema manjoj gustoći magnetskog polja koje rezultira iz magnetskog polja gustoće B i magnetskog polja što nastaje oko vodiča struje jakosti I .

Ta se sila F iskorištava u elektromotorima.

2. U vodiču duljine l (m) koji se giba brzinom v (m/s) kroz magnetsko polje gustoće B (T) inducira se napon U_i (V)

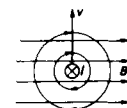
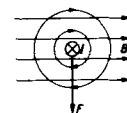
$$U_i = B v l$$

Inducirani napon U_i uzrokuje struju takvoga smjera da se vodič giba brzinom v prema većoj gustoći magnetskog polja koje rezultira iz magnetskog polja gustoće B i magnetskog polja nastalog oko vodiča struje jakosti I .

Ako se magnetski tok Φ mijenja u vremenu t , u svitku sa w zavoja koji miruje inducirat će se napon

$$U_i = -w (d\Phi/dt)$$

Na tome se induciranom naponu U_i osniva djelovanje električnih generatora.



IZMJENIČNA STRUJA

Izmjenični napon što nastaje u vodičima električnih generatora izaziva u zatvorenom strujnom krugu izmjeničnu struju određene frekvencije.

Frekvencija f izmjenične struje ovisi o broju pari polova p i brzini vrtnje n generatora

$$f = pn$$

Normalna frekvencija izmjenične struje u Evropi je $f = 50$ Hz. Njoj odgovaraju sljedeći brojevi pari polova p i brzine vrtnje n koje se najviše upotrebljavaju:

Broj pari polova p	Broj polova $2p$	Brzina vrtnje n		Broj pari polova p	Broj polova $2p$	Brzina vrtnje n	
		okr./s	okr./min			okr./s	okr./min
1	2	50	3000	8	16	6.25	375
2	4	25	1500	10	20	5	300
3	6	16 2/3	1000	12	24	4 1/3	250
4	8	12.5	750	16	32	3.125	187.5
5	10	10	600	20	40	2.5	150
6	12	8 1/3	500	24	48	2 1/3	125

Kružna frekvencija (pulzacija): $\omega = 2\pi f$

Otpor za izmjeničnu struju

Cjelokupni (prividni) otpor Z (impedancija) iznosi: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, gdje su: R – djelatni (omski) otpor, X – jalovi otpor (reaktancija).

Djelatni otpor za izmjeničnu struju – zbog potiskivanja (skin-efekta) – nije jednak djelatnom otporu za istosmjernu struju (vidi str. 256). Pri niskim frekvencijama, međutim, ta je razlika neznatna.

Jalovi je otpor $X = \omega L - 1/\omega C = X_L - X_C$

gdje su: induktivni otpor (induktancija) $X_L = \omega L$

kapacitivni otpor (kapacitancija) $X_C = 1/\omega C$

Spoj više jalovih otpora:

a) u serijskom spoju $X = \sum_{i=1}^n X_i$

$$X_L = X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln} \quad X_C = X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{Cn}$$

b) u paralelnom spoju $1/X = \sum_{i=1}^n 1/X_i$

$$1/X_L = 1/X_{L1} + 1/X_{L2} + \dots + 1/X_{Ln} \quad 1/X_C = 1/X_{C1} + 1/X_{C2} + \dots + 1/X_{Cn}$$

Kut faznog pomaka φ između struje i napona

$$\tan \varphi = X/R = (X_L - X_C)/R$$

Ako je $X_L > X_C$, struja vremenski zaostaje za naponom, ako je $X_L < X_C$, struja prethodi naponu za kut φ .

Jednofazni sistem

Struja I

Snaga P – prividna snaga

$$I = U/Z = U/\sqrt{R^2 + X^2}$$

$$P_z = UI$$

$$P = UI \cos \varphi$$

$$P_x = UI \sin \varphi$$

$$\cos \varphi = P/P_z = P/UI$$

$$W = Pt = UI t \cos \varphi$$

Rad W

Trofazni sistem

Trofazni sistem izmjenične struje ima 3 napona kojima su faze međusobno pomaknute za kut $2\pi/3$ ($= 120^\circ$).

Linjski napon U

Linjska struja I

Spoj u zvijezdi

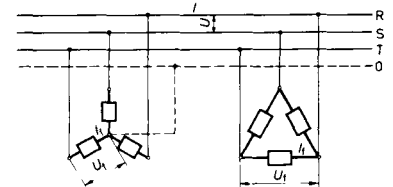
fazni napon $U_f = U/\sqrt{3}$

fazna struja $I_f = I$

Spoj u trokutu

fazni napon $U_f = U$

fazna struja $I_f = I/\sqrt{3}$



Spoj u zvijezdi

Spoj u trokutu

Snaga P – prividna snaga $P_z = 3 U_f I_f = \sqrt{3} \cdot UI$

$$P = \sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi$$

$$P_x = \sqrt{3} \cdot UI \sin \varphi$$

Rad W

$$W = Pt = \sqrt{3} \cdot UI t \cos \varphi$$

Pri računanju snage P i rada W faktor snage $\cos \varphi$ odnosi se na fazne vrijednosti U_f i I_f .

Transformacija izmjenične struje

Inducirani naponi U_i u primarnom i sekundarnom namotu transformatora odnose se kao njihovi brojevi zavoja w

$$U_{i1}/U_{i2} = w_1/w_2$$

Napon U_2 na stezaljkama sekundarnog namota je zbog gubitaka manji

$$U_2 < U_1 (w_2/w_1)$$

Korisnost transformatora η , tj. omjer snage $P_2 = U_2 I_2$ (VA) sekundarne strane i snage $P_1 = U_1 I_1$ (VA) primarne strane, razmjerno je dobra (transformatori nemaju gibljivih dijelova):

za male snage (npr. 1 kVA) $\eta = 0,92$

za velike snage (npr. 1000 kVA) $\eta = 0,985$

ELEKTRIČNO GRIJANJE

Jouleova toplina Q (J) je toplina koja se razvija u vodiču otpora R (Ω) kojim teče struja I (A) u vremenu t (s)

$$Q = I^2 R t$$

Za električno se grijanje upotrebljavaju ponajviše slijedeći materijali:

- za radne temperature 800...1100 °C
slitine željeza, nikla i kroma (cekas, nikrom itd.)
— za kuhala, peći, industrijske peći;
- za radne temperature do 1350 °C
slitine željeza, kroma, aluminija i kobalta (cekas ekstra, kantal itd.)
— za peći za žarenje, taljenje i temperovanje te peći u atmosferi sumpornih i drugih plinova;
- za radne temperature do 1450 °C
karborundni štapovi (silit, silikarbon do 1400 °C, kvarcilit do 1450 °C drugi)
— za peći keramičke industrije, peći za taljenje, laboratorijske peći itd.;
- za radne temperature do 1700 °C
rodij, molibden, volfram (Mo i W u redukcijskoj atmosferi!)
— za laboratorijske peći;
- za radne temperature do 2300 °C
elektrografit
— za elektrode električnih peći itd.

Osnovni podaci češće upotrebljivanih otporničkih materijala za grijanje

Materijal	Specifični otpor $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	Temperaturni koeficijent otpora K^{-1}	Maksimalna radna temperatura $^{\circ}\text{C}$	Talište $^{\circ}\text{C}$
cekas	1,08	0,000 25	930	1370
cekas I	0,97	0,000 52	—	—
cekas II	1,06	—	1100	1400
cekas ekstra	1,40	0,000 05	1300	1500
nikrom	1,12	0,000 17	930	1350
nikrom V	1,08	0,000 09	1100	1400
kantal A	1,35	0,000 08	1300	1530
kantal A ₁	1,45	0,000 06	1350	1530
omaks	1,66	0,000 035	—	1500

Toplina q (J/s mm²) što je otpornička žica za grijanje predaje u jedinici vremena s jedinice površine pri različitim temperaturama žice iznosi približno:

Temperatura žice $^{\circ}\text{C}$	Toplina q J/s mm ²	Temperatura žice $^{\circ}\text{C}$	Toplina q J/s mm ²
700...800	0,02	1000	0,006...0,008
900	0,01	1100	0,004...0,006

Dopuštena opterećenja okrugle žice cekas II na šamotnoj podlozi pri temperaturi žice oko 800 °C:

Struja I^* A	Promjer žice mm	Otpor R_1^* Ω/m	Dulj. masa g/m	Struja I^* A	Promjer žice mm	Otpor R_1^* Ω/m	Dulj. masa g/m
1,58	0,25	23,60	0,4	8,46	0,90	1,82	5,3
1,95	0,30	16,50	0,6	10,09	1,00	1,48	6,5
2,35	0,35	12,00	0,8	12,10	1,10	1,22	7,8
2,80	0,40	9,25	1,0	13,81	1,20	1,02	9,3
3,44	0,45	7,30	1,3	15,51	1,30	0,87	11,0
3,99	0,50	5,90	1,6	17,21	1,40	0,76	12,8
4,52	0,55	4,88	2,0	18,90	1,50	0,65	14,7
5,06	0,60	4,10	2,3	21,08	1,60	0,58	16,7
5,60	0,65	3,50	2,7	25,08	1,80	0,45	21,0
6,16	0,70	3,10	3,2	29,21	2,00	0,37	26,1
6,76	0,75	2,62	3,7				
7,29	0,80	2,31	4,2				

* Pri 800 °C.

Proračun peći

Za traženu snagu električnih grijalica P uz napon U određuje se struja

$$I = \frac{P}{U}$$

Za struju I odabere se iz tablice odgovarajući promjer žice i njezin otpor R_1 za duljinu žice 1 m (Ω/m).

Iz ukupno potrebnog otpora R (Ω)

$$R = \frac{U^2}{P}$$

proračuna se potrebna duljina odabrane žice l (m)

$$l = \frac{R}{R_1}$$

ELEKTRIČNA RASVJETA

Svjetlosni tok Φ (lm) je ukupna količina svjetlosti koju rasvjetno tijelo emitira u svim pravcima.

Svjetlosna jakost I (cd) je svjetlosni tok Φ na jedinicu prostornog kuta ω

$$I = \Phi/\omega$$

Prostorni kut ω je dio prostora koji obuhvaća plašt isječka kugle polumjera r ako je A osnovica isječka

$$\omega = A/r^2$$

Rasvjetljenost (osvijetljenost) E (lx) je gustoća svjetlosnog toka Φ kojom izvor svjetlosti osvjetljuje površinu A

$$E = \Phi/A = I/r^2$$

Rasvjetljenost opada dakle s kvadratom udaljenosti od izvora svjetlosti.

Luminancija (sjajnost) B (cd/m²) je svjetlosna jakost koju izvor svjetlosti zrači s jedinice svoje površine.

*

Potrebna rasvjetljenost E (lx) prostorija

Vrsta rada	Opća rasvjeta		Lokalna i opća rasvjeta		
	osrednja	na najnepovoljnijem mjestu	radnog mjesta	opća	
				osrednja	na najnepovoljnijem mjestu
grubi	20... 40	10	50... 100	20	10
osrednji	40... 80	20	100... 300	30	15
fini	75... 150	50	300... 1000	40	20
vrlo fini	150... 300	100	1000... 5000	50	30

Pod pojedinim se vrstama rada razumijevaju:

grubi rad lijevanje, kovanje, zemljani radovi i sl.
 osrednji rad normalni rad na alatnim strojevima, zidanje i sl.
 fini rad precizni rad na strojevima, montaža, čitanje, pisanje i sl.
 vrlo fini rad fina mehanika, graviranje, crtanje i sl.

Potrebna svjetlosna jakost Φ za osvjetljenje površine A rasvjetljenošću E

$$\Phi = EA/\eta$$

gdje korisnost rasvjete η ovisi o naravi i načinu postavljanja rasvjetnog tijela te o obliku i boji zidova i stropa (veća je pri svjetlijim zidovima):

direktna rasvjeta $\eta = 0,40 \dots 0,55$
 indirektna rasvjeta $\eta = 0,15 \dots 0,35$

Svjetlosni tok Φ žarulje s kovinskom niti snage P (kod 220 V)

P (W)	15	25	40	60	100	200	300	500	1000	1500	2000
Φ (lm)	112	194	322	555	1070	2500	4070	7550	17100	27500	42000
Φ/P (lm/W)	7,5	7,8	8,1	9,3	10,7	12,5	13,6	15,1	17,1	18,3	21,0

ELEKTROMOTORI

Motori istosmjerne struje

1. *Serijski motori* (imaju uzбудni namot vezan u seriji s rotorskim namotom).

Serijski motori imaju »meku karakteristiku«. Pri porastu opterećenja raste moment M na osovini, a brzina vrtnje n pada. Obrnuto: rasterećeni motor teži da »pobjegne«.

Pokretni je moment M_a znatno veći od nazivnoga (300% i više).

Upotreba: električna vuča (električne željeznice, tramvaj, trolejbus), dizala itd.

2. *Paralelni (poredni) motori* (imaju uzбудni namot vezan paralelno s rotorskim namotom).

Paralelni motori imaju »tvrdu karakteristiku«. Pri opterećenju — tj. pri povećanju momenta M — brzina se vrtnje n mijenja samo neznatno.

Pokretni je moment M_a također veći od nazivnoga.

3. *Kompaundni motori* su kombinacija serijskog i paralelnog motora.

Upotreba: za veće snage (npr. za pogon u valjaonicama).

*

Promjenu smjera vrtnje motora istosmjerne struje postizemo zamjenom stezaljki uzbudnog ili rotorskog namota.

Brzinu vrtnje istosmjernih motora reguliramo mijenjanjem uzbuđenja (ekonomično) ili otpornikom u seriji s rotorskim namotom (neekonomično) ili mijenjanjem priključenog napona.

Motori izmjenične struje

1. *Trofazni asinhroni motori* djeluju na principu okretnog magnetskog polja. Statorski i rotorski namoti međusobno su odvojeni: statorski je vezan na trofaznu mrežu, a rotorski je zatvoren u svom krugu, i to:

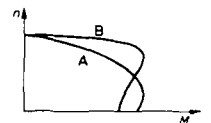
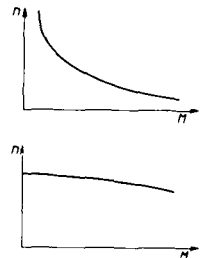
a) *kolutni asinhroni motor* ima rotorski namot spojen — preko kliznih koluta — na otpore pokretača;

b) *kavezni asinhroni motor* ima rotorski namot — u obliku kaveza — kratko spojen. To je najjednostavniji motor i zato u velikoj upotrebi.

Trofazni asinhroni motor ima tvrdi karakteristiku.

Krivulja A vrijedi za uključene otpore pokretača, B za kratko spojeni rotor (otpori isključeni).

Pokretni je moment znatan (120... 250% nazivnoga).

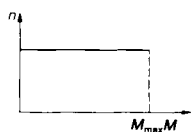


Struja pokretanja trofaznih asinhronih motora je vrlo velika. Kod kratko spojenih rotora (kavezni motori) može postići osmerostruku vrijednost nazivne struje. Zato se za iole veće jedinice upotrebljava kolutni motor, koji pokrećemo uz uključene otpore (manja struja pokretanja!), a zatim otpore postupno isključujemo. Kod kaveznih motora veće snage struju pokretanja smanjujemo posebnom preklopkom »zvijezda-trokut«.

Brzinu vrtnje možemo regulirati otporima u rotorskom krugu (samo kod kolutnih motora, redovno neekonomično). Gruba regulacija brzine vrtnje moguća je, međutim, mijenjanjem broja statorskih polova preklapanjem (kod kolutnih i kaveznih motora).

Smjer vrtnje možemo promijeniti međusobnom zamjenom bilo kojih dviju faza na stezaljkama statora.

2. *Trofazni sinhroni motor* ima stator s trofaznim namotom, priključenim na mrežu, i rotor s nizom polova – permanentnih magneta (za manje snage) ili elektromagneta napajanih preko kliznih kolata istosmjernom strujom iz posebnog izvora (za veće snage).



Brzina vrtnje n je konstantna – sinhrona, ovisna samo o frekvenciji mreže, a neovisna o opterećenju (momentu M).

Pri opterećenjima većim od graničnoga (M_{max}) sinhroni motor ispada iz koraka te se zaustavlja.

Sinhroni motor ne može sam krenuti (osim u specijalnoj izvedbi). Treba ga dovesti na sinhronu brzinu (npr. posebnim motorom).

Upotreba: tamo gdje je potrebna potpuno konstantna brzina vrtnje, pri znatnijim opterećenjima i za korekciju faznog pomaka.

3. *Jednofazni asinhroni motor* stvara okretno magnetno polje radnim i posebnim pomoćnim namotom statora. Jednofazni motor ima također tvrdi karakteristiku, a pokretni moment iznosi 30 ... 200% nazivnoga.

Upotreba: kao mali motori u industriji i kućanstvu.

4. *Kolektorski motor* ima kolektor (komutator) (poput istosmjernih motora) koji omogućuju regulaciju brzine vrtnje u širokim granicama (ali je skuplji od asinhronih motora). Brzina se vrtnje regulira:

- regulacijskim transformatorom priključeni između motora i mreže,
- odvojcima na statorskim namotima,
- pomicanjem četkica.

Karakteristike kolektorskih motora slične su karakteristikama motora istosmjerne struje: serijski kolektorski motor ima meku karakteristiku, paralelni kolektorski motor ima tvrdi karakteristiku.

Upotreba: gdje god je potrebna regulacija brzine vrtnje kod motora izmjenične struje (papirna i tekstilna industrija, dizala, električne željeznice itd.).

Snaga elektromotora

Snaga elektromotora koji iz mreže troši struju jakosti I pri naponu U (linijske vrijednosti, v. str. 267), iznosi:

$$\begin{aligned} \text{za istosmjernu struju} & P = \eta_{\text{mot}} UI \\ \text{za jednofazni sistem} & P = \eta_{\text{mot}} UI \cos \varphi \\ \text{za trofazni sistem} & P = \eta_{\text{mot}} \sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi \end{aligned}$$

Korisnosti elektromotora η_{mot} iznose:

Vrsta struje	Za snagu motora P kW			
	do 1	2...10	10...50	50...100
istosmjerna	0,65...0,78	0,78...0,86	0,86...0,90	0,90...0,93
jednofaz. sist.				
trofaz. sistem	0,80	0,85...0,88	0,88...0,91	0,91...0,92

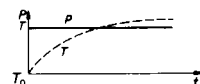
Izbor elektromotora

Pri izboru snage motora za određeni pogon odlučno je zagrijavanje motora. Zbog toga možemo motor kratkotrajno opteretiti znatno više nego je njegova nazivna snaga u trajnom pogonu.

Razlikujemo razne vrste pogona motora, od kojih su najkarakterističnije slijedeće (prikazane dijagramima u kojima su: P – snaga, T_0 – temperatura okoline, T – temperatura, t – vrijeme):

1. Trajni pogon

Motor radi bez prekida i postiže konačnu stacionarnu temperaturu koja ne smije premašiti dopuštenu maksimalnu temperaturu.



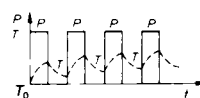
2. Kratkotrajni pogon

Motor radi kratkotrajno (npr. 10, 30 ili 60 min), tako da za vrijeme rada smije postići dopuštenu maksimalnu temperaturu, a za vrijeme mirovanja potpuno se ohladi na temperaturu okoline.



3. Prekidni pogon

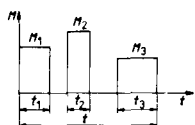
Motor radi u kraćim periodima rada i mirovanja, tako da smije za vrijeme rada postići dopuštenu maksimalnu temperaturu, ali se za vrijeme prekida ne ohladi na temperaturu okoline.



S obzirom na klasu izolacije motora može temperatura dostići vrijednosti: 90, 105, 120, 130, 155, 180 °C (ili i više).

Pri izboru snage motora za neki pogon vrijedi približno

$$M = \sqrt{\sum (M_n^2 t_n)} / t$$



gdje su: M — za izbor motora odlučan jednoliki moment vrtnje u vremenu t , M_n — pojedini momenti vrtnje u pojedinim vremenima t_n .

Uz približno iste brzine vrtnje vrijedi to i za snagu P

$$P = \sqrt{\sum (P_n^2 t_n)} / t$$

ELEKTRIČNI VODOVI NISKOG NAPONA

Pad napona u u vodu je razlika između napona U_0 na izvoru električne struje i napona U kod potrošača

$$u = U_0 - U$$

Uzmemo li presjek žice A (mm^2), duljinu voda (ne žice!) l (m), specifični otpor materijala ρ ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) te jakost struje I (A), odn. snagu el. struje P (W), napon U (V) i fazni pomak φ na mjestu potrošnje (za trofazni je sistem U linijski napon, vidi str. 267!), iznositi će pad napona u (V) u vodu niskog napona položenom u cijevi ili kابلu:

za istosmjernu struju $u = (2l/A) \rho I = (2l/A) \rho P/U$

za jednofazni sistem $u = (2l/A) \rho I \cos \varphi = (2l/A) \rho P/U$

za trofazni sistem $u = (l/A) \rho \sqrt{3} \cdot I \cos \varphi = (l/A) \rho P/U$

Iz tih jednadžbi možemo izračunati presjek žice A za određeni dopušteni pad napona u .

Kod niskonaponskih je zračnih vodova za izmjeničnu struju pad napona u nešto veći zbog dodatnog induktivnog otpora. U tom slučaju valja proračunate vrijednosti za pad napona u pomnožiti faktorom iz tablice:

$\cos \varphi$	Presjek žice mm^2						
	10	16	25	35	50	70	95
0,9	1,1	1,15	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8
0,8	1,15	1,24	1,36	1,5	1,7	1,9	2,2
0,7	1,2	1,32	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6

Dopušteni pad napona izražen u postocima nazivnog napona mreže iznosi:

- za skupni dovod od uvoda do električnog brojila $< 1\%$
- za rasvjetne instalacije od brojila do koje god svjetiljke $< 2\%$
- za motorne instalacije od brojila do motora $< 5\%$

Zaštita vodova

Vodovi moraju biti zaštićeni od preopterećenja osiguračima (ili rasklop-kama) da se ne bi prekomjerno ugrijali.

Najveća dopuštena trajna struja u vodičima (= nazivna struja osigurača)

Presjek vodiča mm^2		Nazivna struja rastalnih osigurača A			Presjek vodiča mm^2		Nazivna struja rastalnih osigurača A		
Cu	Al	I	II	III	Cu	Al	I	II	III
0,75	—	—	10	16	25	35	80	100	125
1	—	10	16	20	35	50	100	125	160
1,5	2,5	16	20	25	50	70	125	160	200
2,5	4	20	25	35	70	95	—	200	225
4	6	25	35	50	95	120	—	225	260
6	10	35	50	63	120	150	—	260	300
10	16	50	63	80	150	185	—	300	350
16	25	63	80	100	185	240	—	350	430
					240	—	—	430	500

I: izolirani vodiči istoga strujnog kruga, položeni u izolacione cijevi;

II: cijevni (oklopljeni) vodiči, kabelski ili višezilni vodiči koji nisu položeni u cijevima, višezilni savitljivi priključni vodovi;

III: jednožilni izolirani vodiči, slobodno položeni u zraku, jednožilni spojni vodovi u rasklopnim postrojenjima, goli vodovi presjeka do 50 mm^2 Cu ili 70 mm^2 Al.

Sve vrijednosti navedene u tablici vrijede za temperaturu okoliša do 25°C . Pri višim temperaturama valja ove vrijednosti pri vodovima, izoliranim gumom ili termoplastom, odgovarajuće sniziti (pri 40°C za 25 odn. 18%, pri 55°C za 62 odn. 42%).

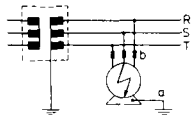
Zaštitne mjere u niskonaponskim postrojenjima

Oštećenjem električnih strojeva i naprava mogu vanjski dijelovi postrojenja doći pod napon i time u slučaju dodira dovesti u opasnost osoblje koje njima rukuje. Po propisima JUS o postrojenjima s naponom do 65 V prema zemlji nisu zaštitne mjere potrebne, izuzev kod ručnih svjetiljki i drugih električnih naprava u kotlovima i sličnim tijesnim prostorima. U postrojenjima s naponom od 65 do 250 V prema zemlji zaštitne su mjere potrebne tamo gdje je prelazni otpor čovjeka prema zemlji smanjen zbog vlage, topline i kemijskih utjecaja, u prostorijama s kamenim ili betonskim podom, kod metalnih konstrukcija itd. Za napone preko 250 V potrebne su zaštitne mjere u svakom slučaju.

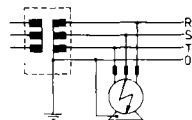
U niskonaponskim postrojenjima (do 1 kV) primjenjujemo slijedeće zaštitne mjere:

1. **Zaštitno izoliranje.** Da bi se u slučaju kvara na električnim postrojenjima izbjegla opasnost od dodira onih metalnih dijelova koji bi tom prilikom mogli doći pod napon (kućišta sklopki, ručice polužnih prekidača itd.), prevlačimo ih izolacijskim materijalom ili polažemo po tlu prostirače od gume ili plastičnih masa. Treba onemogućiti istovremeni dodir eventualno bliske vodovodne instalacije.

2. **Primjena malog napona.** U vlažnim prostorijama, kotlovnica, garažama i sl., a osobito za prenosiva trošila (ručne svjetiljke, male motore i dr.) upotrebljavamo napon najviše do 42 V, tzv. »mali napon«. Običajno ga dobivamo transformatorom (s odijeljenim namotima!), a kod istosmjerne struje akumulatorom. Važno je da strana malog napona bude galvanski potpuno odvojena od primarne strane i da ne bude uzemljena.



3. **Uzemljenje.** Uzemljenje (a) ima zadatak da se u slučaju kvara na trošilu, kad vanjski dijelovi dođu pod napon, strujni krug zatvori kroz zemlju i da ta struja izbacivanjem osigurača (b) sama prekine napajanje defektnog trošila. Da bi se to osiguralo, otpori uzemljenja moraju biti dovoljno maleni. Zato se uzemljenje većih trošila iz ekonomskih razloga izbjegava.



4. **Nulovanje.** Nulovanje je spajanje dijelova postrojenja koje želimo zaštititi na uzemljeni neutralni vodič. Time se postiže da svaki spoj sa zaštitnim dijelom ostane kratki spoj i da struja kratkog spoja izazove isklapanje defektnog trošila. Valja paziti da vodovi budu dimenzionirani tako da pri kratkom spoju između faznog vodiča i nulvoda uistinu teče

struja koja će sigurno isključiti.

5. **Primjena sistema zaštitnih vodova.** U prostorno ograničenim mrežama (tvornice, rudnici) s vlastitim generatorima ili transformatorima (s odijeljenim namotima) gdje je važno održavati pogon i u slučaju dozemnog spoja jedne faze, vežu se trošila na »sistem zaštitnih vodova« (metalne konstrukcije zgrada, vodovod, tračnice i sl.) koji je uzemljen.

6. **Zaštitne sklopke.** Kod strujne zaštitne sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno, struja defekta kroz uzemljivač prouzrokuje aktiviranje sklopke. Kod naponske sklopke, pri kojoj je trošilo uzemljeno kroz samu sklopku, dolazi do isklopa kad se na kućištu trošila zbog defekta pojavi određeni napon.

ELEKTRIČNA OPREMA MOTORNIH VOZILA

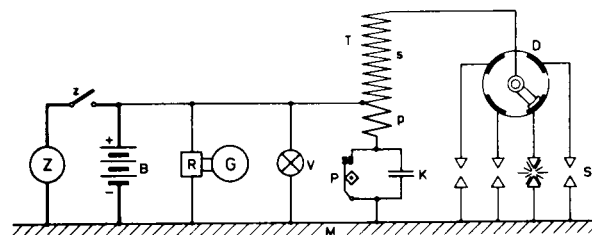
Motorna vozila gone gotovo isključivo motori s unutarnjim izgaranjem sistema Otto ili Diesel (str. 255). Za njihovo djelovanje i za dodatne svrhe vozilu je potrebna električna oprema koja se sastoji u prvom redu iz:

- akumulatorske baterije (B)
- pokretača (Z)
- generatora (G) s regulatorom (R)
- potrošača u vozilu (V),

a pri motorima sistema Otto još i iz

- uređaja za paljenje: indukcionog svitka (T), prekidača (P) s kondenzatorom (K), razvodnika (D) i svjećica (S).

Nazivni napon instalacije je 6, 12, 24 V.



Pokretač

Motori s unutarnjim izgaranjem ne mogu krenuti sami od sebe. Valja ih pokrenuti posebnim pokretačem, tj. elektromotorom ili pomoću komprimiranog zraka i sl.

Pri motornim vozilima je pokretač redovno istosmjerni serijski elektromotor kojega napaja akumulator. Uklapanje pokretačke sklopke (tzv. »brave«) (z) redovno je na elektromagnetski način.

Potrebna pokretna struja je veoma velika (nekoliko stotina A, iznimno i 1000 A). Posebno je zimi opterećenje najveće kako za akumulatorsku bateriju (u kojoj niske temperature smanjuju brzinu reakcije elektrokemijskoga procesa), tako i za motor (u kojem niske temperature povećavaju trenje u ležajima zbog viskozniijega maziva i kože rasplinjavanja i paljenje goriva). Zbog velike pokretne struje smije pokretač biti u pogonu samo kratko vrijeme.

Pokretač je u spoju s motorom vozila samo za vrijeme pokretanja. Kad motor samostalno krene, pokretač se od njega odvoji, o čem se brine posebni rasklopni uređaj.

Generator i regulator

Generator motornog vozila služi za punjenje akumulatorske baterije u kojoj se skuplja za pokretanje potrebna električna energija, a njom se napajaju i ostali potrošači u vozilu (signalne svjetiljke, zvučni signali, farovi itd.). Pri Otto-motorima generator dobavlja i struju za uređaj za paljenje.

Generator je vezan neposredno s motorom vozila. Stoga je njegova brzina vrtnje isto tako promjenljiva kao i brzina motora, što znači, da generator proizvodi vrlo promjenljivi napon. Da bi se dobio potreban jednoliki napon, generatoru je priključen *generatorski regulator* koji upravlja njegovim pravičnim djelovanjem.

Generator može biti istosmjerni (dinamo) ili izmjenični (alternator). Izmjenični generator mora imati još i ispravljač.

Uređaj za paljenje

Motori s unutarnjim izgaranjem sistema Otto trebaju još i uređaj za paljenje kojim se stvaraju iskre na svjećicama motora. U tu je svrhu potrebna struja visokog napona koju proizvodi indukcioni svitak.

Indukcioni svitak je u stvari transformator s primarnim (p) i sekundarnim (s) namotajem. Kroz primarni namotaj teče istosmjerna struja (nazivnog napona instalacije), koja sama ne može inducirati napon u sekundarnom krugu. Za to je potreban *prekidač* struje tako vezan s motorom, da prekine primarnu struju u trenutku potrebne iskre na svjećici. Trenutak nastanka iskre (pretpaljenje!) udešava se relativnim pomakom prekidnog batića s obzirom na njegov pogon s osovine. Za vrijeme pogona motora nastajanje iskre prilagođava se brzini vrtnje motora centrifugalnom regulacijom, a u ovisnosti od podtlaka u usisnoj cijevi motora. Prevećanje nastaje zbog prebrzo zatvaranja prekidača (na »platinama«, koje su od volframa ili slične kovinske slitine) smanjuje *kondenzator* koji uz to inducira viši napon.

Prekinućem primarne struje smanjuje se u svitku za paljenje magnetsko polje, što izazove u sekundarnom krugu inducirani napon koji je — zbog velikog broja sekundarnih zavoja — veoma visok (do 30 kV). Struja visokog napona vodi se nato u razvodnik koji je prenosi na svjećice. Elektrode na svjećicama su razmaknute za 0,5 . . . 0,7 mm, što je prilagođeno mogućnosti preskoka jake iskre. Razvodnik je vezan s motorom tako da iskrenje na svjećicama odgovara potrebnom rasporedu djelovanja pojedinih cilindara motora.

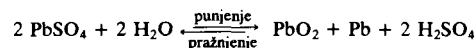
Pri savremenijim motorima s unutarnjim izgaranjem izveden je uređaj za paljenje na principu elektronike.

Akumulatori

Električni akumulatori su sabirači električne energije u kemijskom obliku. Osim posebnih izvedbi akumulatora (kao npr. alkalnih sa čeličnom odn. kadmijevom i nikalnom elektrodom i dr.) najrašireniji je olovni akumulator.

Olovni akumulator ima — u svakoj akumulatorskoj ćeliji — po dvije elektrode od olova u razrijeđenoj sumpornoj kiselini kao elektrolitu. Obje se elektrode u elektrolitu oblože olovnim sulfatom PbSO₄.

Pri punjenju akumulatora (dovođenjem istosmjerne struje) nastaju na pozitivnoj elektrodi (kao anodi) olovni dioksid PbO₂ (smeđi), na negativnoj elektrodi (kao katodi) čisto olovo Pb (sivo), dok se u elektrolitu povećava koncentracija sumporne kiseline H₂SO₄. Pri pražnjenju (kad pozitivna elektroda djeluje kao katoda, a negativna elektroda kao anoda) proces je suprotan.



Za vrijeme punjenja i pražnjenja mijenja se gustoća ρ elektrolita:

stanje akumulatora	prazan	normalan	pun
gustoća ρ kg/dm ³	1,12 . . . 1,14	1,20 . . . 1,24	1,26 . . . 1,285
⁰ Bé	15,5 . . . 17,7	24,1 . . . 27,9	29,8 . . . 32,0

Priključni napon akumulatorske ćelije je 2,4 V. Pri kraju punjenja dostiže napon do 2,4 V, ali pri početku pražnjenja mjesta padne na ≈ 2,15 V, da bi se potom ustalio za napon od 2,0 V. Pri pražnjenju napon padne do 1,8 V, valja pražnjenje prekinuti.

Kapacitet akumulatora je određen količinom elektriciteta (A h) koju akumulator može dati pri pražnjenju. On je ovisan o veličini i kakvoći aktivnih površina olovnih ploča i njihovom broju u svakoj akumulatorskoj ćeliji.

Kapacitet akumulatora se smanjuje s porastom struje tokom pražnjenja. Nazivni je kapacitet određen strujom pri kojoj se napunjeni akumulator prazni 20 sati.

Nikal-kadmijski akumulator djeluje po elektrokemijskom sistemu Ni-hidroksid-Cd te može biti hermetски zatvoren. Nazivni je napon 1,2 V, a pražnjenje valja prekinuti pri napon 1 V. Kao elektrolit služi kalijeva lužina (KOH).

ELEKTRONIKA

Električni ventili

Električni ventili posjeduju svojstvo da provode struju u jednom smjeru (pri malom otporu), dok je u suprotnom smjeru sprečavaju (pri velikom otporu). Prema izradi možemo ih podijeliti na glavne skupine: elektronke, živine ventile i poluvodičke ventile.

Elektronke su zrakoprazne (evakuirane) cijevi u kojima su ugrađene anoda A i katoda K, a pri upravljanim elektronkama još i mrežica za upravljanje M.

Iz užarene katode giblju se u praznom prostoru elektroni prema anodi, što znači da elektronka propušta struju u smjeru od anode (+) prema katodi (-), dok je u suprotnom smjeru ne propušta.

Napon na mrežici za upravljanje vrlo jako utječe na tok elektrona. Već i mala promjena napona U_M na mrežici izaziva veliku promjenu struje I kroz elektronku.

S obzirom na razne izvedbe elektronki može teći među anodom i katodom struja $I = 10^{-2} \dots 10^2$ A pri znatnom naponu $U = 10 \dots 0,5 \cdot 10^6$ V.

Živini ventili su zrakoprazne cijevi u kojima je katoda živa, dok su u prostoru cijevi ioni živinih para. »Paljenje« (električni spoj među katodom i anodom) treba izvesti posebnom napravom.

I u živinim ventilima teče struja samo u smjeru od anode ka katodi.

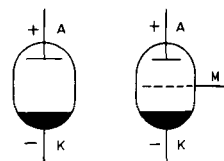
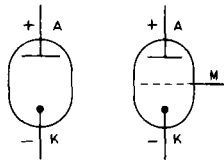
Struja u živinim ventilima znatno je veća nego u elektronkama: $I = 10 \dots 10^5$ A, i to pri naponu U do 10^6 V.

Poluvodički ventili

Poluvodiči su tvari koje se po vodljivosti nalaze među vodičima (kovinama) i izolatorima.

Primjeri specifičnog otpora ρ u $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$:

Vodiči	srebro Ag	$\approx 10^{-2}$	} Poluvodiči	silicij Si	$10^2 \dots 10^{10}$
	željezo Fe	$\approx 10^{-1}$			germanij Ge	$10^2 \dots 10^6$
Izolatori	porculan	$\approx 10^{18}$	} Pod različitim utjecajima imaju poluvodički svojstva vodiča ili su bliže izolatorima.		
	tinjac	$\approx 10^{20}$			



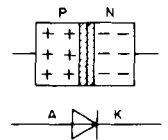
Poluprovodički ventili (diode, tranzistori, tiristori) su zbog svojih dobrih fizikalnih svojstava i razmjerno niske cijene nadomjestili druge vrste ventila na praktično svim područjima.

Diode

Diode su neupravljeni ventili, sastavljeni od dvaju slojeva poluvodiča – zone P i zone N:

– zona P nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča (npr. Ge) prisutan 3-valentni element (npr. In). Time nastaju u kristalnoj rešetki elektronske praznine, koje daju kristalu pozitivan naboj;

– zona N nastaje, ako je u monokristalu 4-valentnoga poluvodiča prisutan 5-valentni element (npr. Sb). Tada uzrokuju slobodni elektroni u kristalnoj rešetki negativan naboj.



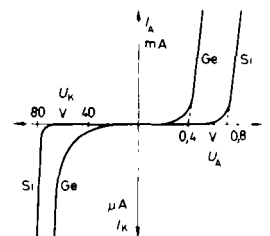
Pri neposrednom dodiru zona P i N u jednostrukom kristalu nastaje na granici obiju zona »zaporni sloj«.

Na strani zone P ima dioda anodu A, a na strani zone N katodu K.

Smjer provodnosti

Priključi li se na anodu prema katodi pozitivni napon U_A , smanjit će se zaporni sloj.

Pri difuzijskom naponu (pri Ge diodi: 0,2 ... 0,4 V, pri Si diodi: 0,6 ... 0,8 V) pojavit će se struja I_A , koja s daljnjim povišenjem napona U_A raste vrlo brzo. (Plosnata izvedba dioda omogućuje struju: pri Ge diodi do 100 A, pri Si diodi do 500 A i više.)



Zaporni smjer

Priključi li se na anodu prema katodi negativni napon U_K , zaporni sloj će se raširiti i propustiti samo malenu struju (pri Ge u μA , pri Si u nA). Pri visokom (»probojnom«) naponu poraste struja I_K skokomice (te može uništiti diodu).

Porast temperature zapornog sloja smanjuje napon U_A i povećava struju I_K .

Zbog karakterističnog svojstva dioda, da izrazito provode struju samo u jednom smjeru, upotrebljavaju se u prvom redu za ispravljače.

Ispravljači

Izmjeničnu struju ispravljamo u istosmjernu pomoću motor-generatora, kontaktnih ili elektroničkih ispravljača.

Kontaktni ispravljači su elektroničke sklopke, koje su sklopljene samo za vrijeme jedne polovine perioda izmjenične struje. Sklopka upravlja bregasta osovinom koja se vrti sinhrono s frekvencijom ulaznog napona. Brzo istrošenje dijelova smanjuje ekonomičnost tih ispravljača koja ograničuje njihovu upotrebu jedino na područje jačih struja ($I = 10^3 \dots 10^5$ A pri naponu od $U = 50 \dots 10^3$ V).

Za elektronske ispravljače se upotrebljavaju pretežno poluvodički ventili, napose diode (za struje do 2000 A pri naponu do 4000 V).

Spojevi ispravljača

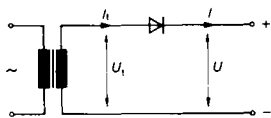
Ispred ispravljača gotovo redovno je najprije transformator koji transformira struju i napon na vrijednost, prikladnu za ispravljač i ujedno izolira izlaz ispravljača od mreže.

Nepoželjne vremenske oscilacije ispravljene struje smanjuju se ispravljačkim filterima koji se sastoje iz otpora, kondenzatora i prigušnice (induktiviteta). Još veća stabilnost struje postiže se pomoću dodatnih elektroničkih stabilizatora napona ili struje.

U sljedećim shemama znače:

- U_t — izlazni napon transformatora (V)
- I_t — izlaznu struju transformatora (A)
- P_t — snagu transformatora (VA)
- U — istosmjerni napon (V)
- I — istosmjernu struju (A)
- R, L — otporno i induktivno opterećenje
- U_c — opterećenje suprotnim naponom (kondenzatorima, akumulatorima i istosmjernim motorima).

1. Jednosmjerni spoj



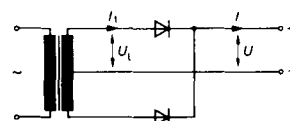
R, L	U_c
$U_t \approx 2,22 U$	$0,85 U$
$I_t \approx 1,57 I$	$2,1 I$
$P_t > 3,1 U I$	$1,73 U I$

(Poluvalno ispravljanje)

2. Središnji spoj

R, L	U_c
$U_t \approx 1,11 U$	$0,8 U$
$I_t \approx 0,78 I$	$1,11 I$
$P_t > 1,48 U I$	$1,48 U I$

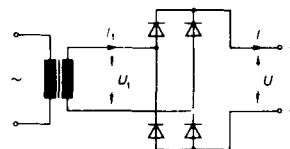
(Punovalno ispravljanje)



3. Mosni spoj

R, L	U_c
$U_t \approx 1,11 U$	$0,8 U$
$I_t \approx 1,11 I$	$1,57 I$
$P_t > 1,24 U I$	$1,24 U I$

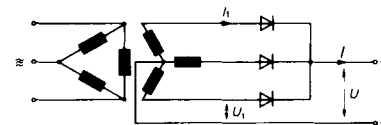
(Punovalno ispravljanje)



4. Središnji zvjezdasti spoj

R, L	U_c
$U_t \approx 0,86 U$	$0,77 U$
$I_t \approx 0,58 I$	$0,75 I$
$P_t > 1,35 U I$	$1,57 U I$

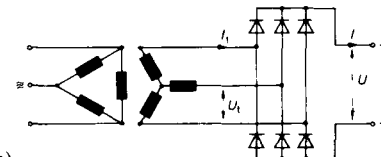
(Trofazno poluvalno ispravljanje)



5. Mosni zvjezdasti spoj

R, L	U_c
$U_t \approx 0,74 U$	$0,74 U$
$I_t \approx 0,82 I$	$0,82 I$
$P_t > 1,05 U I$	$1,05 U I$

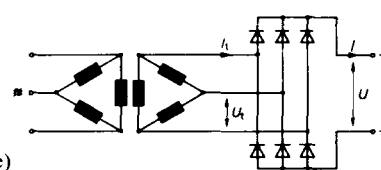
(Trofazno punovalno ispravljanje)



6. Mosni trokutni spoj

R, L	U_c
$U_t \approx 0,74 U$	$0,74 U$
$I_t \approx 0,82 I$	$0,82 I$
$P_t > 1,05 U I$	$1,05 U I$

(Trofazno punovalno ispravljanje)



Tranzistori

Bipolarni tranzistor (ukratko: tranzistor) je monokristalni germani ili silicijev poluprovodni element s tri zone, različitog tipa vodljivosti, k slijede jedna drugu. Razlikujemo dva tipa tranzistora:



Poluprovodne elektrode

- središnja zona: baza (B)
- vanjske zone: emiter (E)
kolektor (C)

Baza je elektroda koja služi za upravljanje. Njenom strujom I_B upravljamo kolektorsku struju I_C . (Pri tom može struja I_B biti 100 ili više puta manja od struje I_C .)

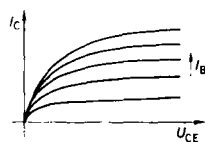
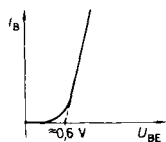
Emiterska je struja I_E zbroj bazne i kolektorske struje

$$I_E = I_B + I_C$$

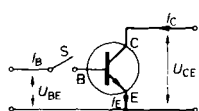
Bazna struja I_B ovisna je od napona između baze i emitera U_{BE} , kolektorska struja I_C je ovisna od bazne struje I_B i napona između kolektora i emitera U_{CE}

$$I_B = f_1(U_{BE})$$

$$I_C = f_2(I_B, U_{CE})$$



Tranzistori se upotrebljavaju za pojačala i kao sklopke.



Tranzistor kao pojačalo (sklopka S uključena): $I_C = f(I_B)$.
Tranzistor kao sklopka (sklopka S isključena): $I_C = 0$, $I_E = 0$.
(Lijeva shema je pojednostavljena i samo načelna.)

Niskofrekventni tranzistori pojačavaju niskofrekventne (kao i istosmjerne) struje ($U < 100$ V, $I < 500$ mA) uz faktore pojačanja $\beta (= \Delta I_C / \Delta I_B) = 30 \dots 300$.

Tranzistori snage pojačavaju (ili preklapaju) struje do 100 A pri naponu od više stotina V.

Osnovni tranzistorski spoji

U_1 – ulazni izmjenični signal
 U_2 – izlazni izmjenični signal
 R_E – otpor emitera

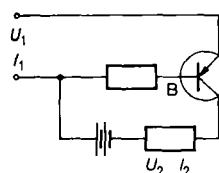
R_C – otpor kolektora

U_B – istosmjerni napojni napon

	Emiterski spoj	Kolektorski spoj	Bazni spoj
Pojačanje			
- napona	100 ... 10000	< 1	100 ... 10000
- struje	10 ... 500	10 ... 500	< 1
- snage	1000 ... 100000	10 ... 500	100 ... 10000
Otpor			
- ulazni	10 Ω ... 5 k Ω	500 Ω ... 5 M Ω	< 1 Ω ... 1 k Ω
- izlazni	10 Ω ... 500 k Ω	10 Ω ... 1 k Ω	100 k Ω ... 10 M Ω
Fazni pomak	180°	0°	0°

Jednostavni stupanj pojačanja

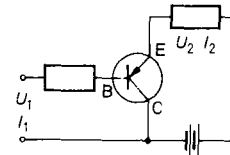
Pojačanje napona



$$U_2 > U_1$$

$$I_2 \approx I_1$$

Pojačanje struje



$$U_2 \approx U_1$$

$$I_2 > I_1$$

Tiristori

Tiristori (upravljane diode) su četveroslojni poluprovodni elementi, opremljeni elektrodom za upravljanje, a po djelovanju slični sklopkama (sa stanjem »isključeno« i »uključeno«). Upotrebljavaju se za regulaciju pri upravljanim ispravljačima i za isklapanje velikih snaga (svaka jedinica po više desetina kW).

MJERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA

S obzirom na vremenski promjenljive pojave pri mjerenju električnih veličina valja razlikovati pojmove:

Trenutna vrijednost u_t je vrijednost izmjenične veličine u bilo kojem promatranom trenutku.

Prosječna vrijednost u_{sr} je aritmetička prosječna vrijednost apsolutnih iznosa trenutnih vrijednosti.

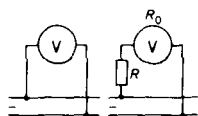
Efektivna vrijednost u je kvadratni korijen iz sume kvadrata trenutnih vrijednosti

$$u_t = f(t) \quad u_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt \quad u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

Električna mjerila

1. **Mjerilo s okretim svitkom** mjeri linearnu prosječnu vrijednost istosmjerne struje. Kod njega je otklon kazaljke α upravo razmjernom strujom I kroz mjerilo: $\alpha = cI$ ($c = \text{konst}$). Upotrebljava se kao mjerilo napona i struje.

Mjerilo istosmjernog napona (voltmetar)

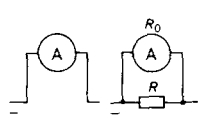


Mjerno područje mjerila napona (45 mV... 1500 V) može se povećati n -puta dodavanjem predotpora R

$$R = R_0(n - 1)$$

R_0 – unutarnji otpor mjerila.

Mjerilo istosmjerne struje (ampermetar)

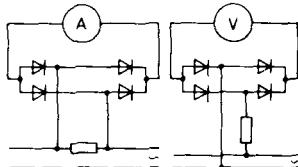


Mjerno se područje mjerila struje (1 mA ... 1000 A) može povećati n -puta uključivanjem porednog otpora (shunt) R

$$R = R_0/(n - 1)$$

R_0 – unutarnji otpor mjerila.

Mjerilo izmjeničnog napona ili struje mora biti opremljeno ispravljačem.



Mjerilo pokazuje prosječnu vrijednost koja je jednaka efektivnoj samo u slučaju čistih sinusnih veličina.

Pri mjerenju izmjenične struje upotrebljavaju se pri velikim strujama ili visokim naponima strujni odn. naponski reduktori (transformatori).

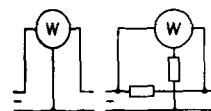
Točnost mjerila

Mjerna greška %	±0,1	±0,2	±0,5	±1,0	±1,5	±2,5	±5,0
Klasa točnosti	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	5,0

2. **Mjerilo s okretim željezom** mjeri kvadratnu prosječnu vrijednost odnosno efektivnu vrijednost mjerene veličine. Otklon kazaljke α upravo je razmjernom s kvadratom struje I kroz mjerilo: $\alpha = cI^2$ ($c = \text{konst}$). Skala za efektivnu vrijednost je kvadratna.

Mjerilo s okretim željezom upotrebljivo je za istosmjernu i izmjeničnu struju. Pri mjerenju napona (voltmetar) može se mjerno područje povećati predotporima, dok se pri mjerenju struje (ampermetar) ne upotrebljavaju poredni otpori već se umjesto toga podijeli magnetski namotaj na više odsjeka za više mjernih područja.

3. Elektrodinamička mjerila

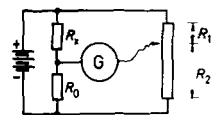


a) Elektrodinamičko mjerilo mjeri umnožak dviju veličina. Otklon kazaljke $\alpha = c I_1 I_2$ ($c = \text{konst}$). Upotrebljava se za mjerenje snage (vatmetar).

b) Ferrarisovo mjerilo koristi se vrtložnim strujama za mjerenje energije izmjenične struje (električna brojila).

4. Mjerenje električnog otpora

Električni otpor R određuje se mjerenjem struje I i pada napona ΔU kroz otpor: $R = \Delta U/I$.



Električni otpor R može se mjeriti pomoću Wheatstoneovog mosta

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}$$

R_0 – poznati otpor, R_1/R_2 se izmjeri, G – galvanometar (mora pokazivati 0).

5. Elektronska mjerila

Najpoznatija elektronska mjerila su:

a) Oscilograf je brzo pisalo linija za registriranje trenutnih vrijednosti veličina pri frekvencijama do nekoliko kHz.

b) Osciloskop (katodni osciloskop) je katodna cijev u kojoj se otklanjanjem elektronske zrake dobiva na zaslonu s fluorescentnim slojem dvodimenzionalni prikaz trenutnih vrijednosti mjerenih veličina. Kod prikazivanja periodičkih pojava uz vremenski pomak, usklađen s frekvencijom pojave, dobiva se njegova mirujuća slika.

c) Brojila impulsa su uređaji pomoću kojih se može prebrojiti broj periodičkih pojava (ako ih je moguće prikazati električnim impulsima). Upotrebljavaju se u prvom redu za mjerenje frekvencije. Točnost brojenja iznosi $10^{-7} \dots 10^{-8}$.

OPTIKA I AKUSTIKA

Svjetlost

Vidljiva svjetlost je dio *elektromagnetskih valova* koji se – prema valnim dužinama λ – dijeli na:

kozmičke zrake	$\lambda = 0,1 \dots 10$ fm
gama zrake	$\lambda = 10 \dots 1000$ fm
rendgenske zrake	$\lambda = 1 \dots 1000$ pm
ultravioletno zračenje	$\lambda = 1 \dots 390$ nm
vidnu svjetlost	$\lambda = 390 \dots 770$ nm
infracrveno zračenje	$\lambda = 0,77 \dots 1000$ μ m
mikrovalove (televizija)	$\lambda = 1 \dots 1000$ mm
radiovalove	$\lambda = 1 \dots 10000$ m

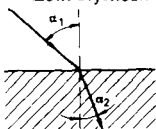
Osjetljivost na svjetlo oka (najveća = 1 pri $\lambda = 555$ nm) i raspoznavanje boja (koje se prelijevaju jedna u drugu):

λ nm	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost	λ nm	Boja	Relativna osjetljivost na svjetlost
400	violetna	0,0004	560	žuta	0,995
450	modra	0,035	580	narandžasta	0,870
480		0,139	600	narandžasto-crvena	0,631
500	modro-zelena	0,323	620	crvena	0,381
520		0,710	640		0,175
540	zelena	0,954	660		0,061
550	zeleno-žuta	0,995	700	tamno crvena	0,0041
555		1,000	750		0,00012

Brzina svjetlosti:

- u praznom prostoru (vakuumu) $c_0 = 299\,792\,458$ m/s
- u vodi $c = 224 \cdot 10^6$ m/s
- u staklu $c \approx (176 \dots 195) \cdot 10^6$ m/s
- u dijamantu $c = 122 \cdot 10^6$ m/s

Lom svjetlosti



Indeks loma n je omjer sinusa upadnog kuta α_1 i kuta loma α_2 te je jednak omjeru brzina svjetlosti

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

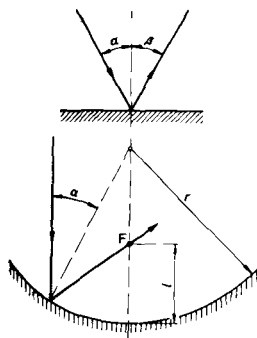
S obzirom na zrak iznosi indeks loma:

- za vodu $n = 1,333$
- za staklo $n \approx 1,520 \dots 1,740$
- za dijamant $n = 2,417$

Brzina valovnog gibanja c je umnožak frekvencije f i dužine vala λ

$$c = f\lambda$$

Refleksija



Pri refleksiji valova od ravne plohe je kut refleksije β jednak upadnom kutu α

$$\beta = \alpha$$

Na konkavnoj kugloj plohi s polumjerom r upadni se valovi reflektiraju kroz žarište (fokus) F , koje je udaljeno od tjemena plohe za razmak l

$$l = \frac{r}{2} \left(2 - \frac{1}{\cos \alpha} \right)$$

Pri malim upadnim kutovima α je

$$\cos \alpha \approx 1 \quad l \approx r/2$$

Zvuk

Zvučni valovi dijele se po frekvenciji f na:

- infrazvuk $f < 16$ Hz
- čujni (fiziološki) zvuk $f = 16$ Hz \dots 20 kHz
- ultrazvuk $f > 20$ kHz

Brzina zvuka

Brzina zvuka u plinovima iznosi $c = \sqrt{\kappa RT}$ (vidi str. 201).

Brzina zvuka u zraku iznosi 332 m/s pri 0 °C; 341 m/s pri 15 °C.

Brzina zvuka u kapljevinama i kruinama (pri 20 °C):

Tvar	c m/s	Tvar	c m/s
voda	1485	Al	5100
led (-4 °C)	3200	Cu	3800
drvo – meko	4500	Fe	5200
– tvrdo	3400	Hg	1430
pluto	500	Ni	4900
guma	50	Pb	1300
opeka	3600	Sn	2600
staklo	5000	Zn	3700

Osnovna frekvencija f titrajuće strune od materijala gustoće ρ , prereza A , dužine l , a napete silom F , iznosi

$$f = 1/2l \cdot \sqrt{F/A\rho}$$

Zvučni tlak

Efektivna vrijednost zvučnoga tlaka (pri $f = 1$ kHz):

	granica čujnosti 0,00002 Pa	
šapat	0,0002 Pa	klavir 0,2 Pa
razgovor	0,002 Pa	orgulje 2 Pa
glasan razgovor	0,02 Pa	sirena > 20 Pa

Jakost zvuka L određena je izrazom

$$L = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

gdje je p zvučni tlak, a p_0 zvučni tlak na granici čujnosti ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa). Je za jakost zvuka je 1 decibel (dB).

Jakost zvuka L u raznim okolnostima:

Šum, buka	L dB	Dozvoljena granica buke u prostorijama	L dB
šapat	10 ... 30	koncertna dvorana	30
razgovor	40 ... 50	bolesnička soba	30 ... 35
glasan govor	70	čitaonica	35
vika	80	učionica	40
automobilska sirena	90	studijaska soba	40
pneumatski bat	100	soba za sjednice	50 ... 60
zakivanje kotlova	110	kongresna dvorana	55
reaktivni avion	120	ured (sa strojevima)	70 ... 75
granica bola	130		

Tonska skala

O k t a v a je područje tonova od početne frekvencije f do konačne frekvencije $2f$. Stupnjevanje frekvencije tonova u oktavi po 12-stupanjskoj skali (stupnjem $2^{1/12} = 1,059463$):

Ton	c	cis des	d	dis es	e	f	fis ges	g	gis as	a	ais b	b	c
Stupanj	1,00	1,06	1,12	1,19	1,26	1,33	1,41	1,50	1,59	1,68	1,78	1,89	2,00

Ishodište tonske skale je oktava na granici čujnoga zvuka frekvencije tonova: $f_c = 16,35$ Hz. Frekvencije f_a tonova a u n -toj oktavi su $2^n f$:

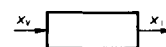
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
f_a	27,5	55	110	220	440	880	1760	3520	7040

UPRAVLJANJE – REGULACIJA – AUTOMATIZACIJA

Regulacijska tehnika obrađuje odnose među uzrokom i posljedicom u tehničkim sistemima. Njen je zadatak utjecanje na ulazne veličine na taj način, da se dobiju željene izlazne veličine.

REGULACIJSKI ČLANOVI

Regulacijski članovi su prelazni članovi regulacijskog sistema u kojima se dobivaju iz danih ulaznih veličina x_v određene izlazne veličine x_i .

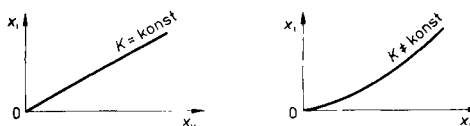


Statička karakteristika regulacijskog člana

U svakom su regulacijskom članu ulazna i izlazna veličina međusobno ovisne:

$$x_i = f(x_v) \quad x_i = K x_v$$

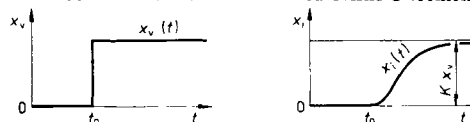
Koeficijent (statičkog) pojačanja $K = x_i/x_v$ je odnos izlazne i ulazne veličine u stacionarnom stanju, a može biti linearan ($K = \text{konst}$) ili nelinearan ($K \neq \text{konst}$):



U regulacijskoj tehnici obrađuju se linearni odnosi. Nelinearni odnosi traže posebne postupke, a u užim se područjima često uzimaju približno linearnima.

Dinamička karakteristika regulacijskog člana

Promjene ulaznih i izlaznih veličina vazda su ovisne o vremenu t .



Ovisnost izlazne veličine od ulazne nazivamo vremenski odziv

$$x_i(t) = f[x_v(t)]$$

Vremenski je odziv za pojedinu vrstu regulacijskog člana karakterističan. U većini slučajeva izražen je diferencijalnom jednačbom koju jednostavnije rješavamo u obliku prenosne funkcije P .

Prenosna funkcija P je odnos među vremenski promjenljivom izlaznom i ulaznom veličinom. Proračunava se pomoću Laplaceove transformacije

$$P(s) = \frac{X_i(s)}{X_v(s)} = \int_0^{\infty} e^{-st} x_i(t) dt \Big/ \int_0^{\infty} e^{-st} x_v(t) dt$$

gdje je s Laplaceova varijabla. Laplaceovom transformacijom prikazane veličine označuju se velikim slovima.

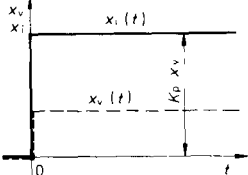
Prenosna se funkcija P postupno približava koeficijentu pojačanja K .

Vremenski odzivi

Vremenski odzivi prikazuju vremenski tok izlazne veličine u ovisnosti o nekom vremenskom toku ulazne veličine.

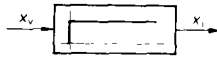
Vremenske odzive kod kojih je vremenski tok ulazne veličine udama funkcija (»step«-funkcija) (kao funkcija $x_v(t)$ na str. 201) nazivamo *prelaznim funkcijama*. Njihovi su najznačajniji primjeri:

1. Proporcionalni član (P)

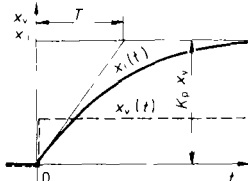


$$x_i = K_p x_v$$

Primjeri: poluga, tlak i protok kapljevine u cijevima



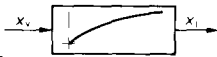
2. Proporcionalni član s usporenjem – 1. stupnja (PT₁)



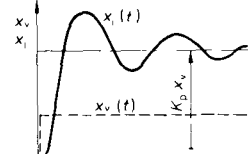
$$T \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p x_v$$

$$x_i = K_p x_v (1 - e^{-t/T})$$

Primjeri: temperaturno rastezanje, tlak i protok plina u plinskim cijevnim sistemima

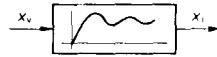


3. Proporcionalni član s usporenjem – 2. stupnja (PT₂)

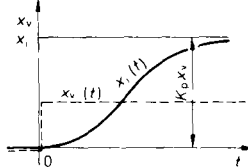


$$T_p^2 \frac{d^2 x_i}{dt^2} + 2dT_p \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p x_v$$

T_p – neprigušeno titrajno vrijeme
 d – faktor prigušivanja (npr. $d_{opt} \approx 0,7$)
Primjer: pneumatski bat s povratnom oprugom



4. Proporcionalni član s usporenjem – višeg stupnja (PT_n)

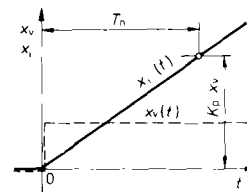


$$T_n^n x_i^{(n)} + \dots + T_1 \dot{x}_i + x_i = K_p x_v$$

Primjer: regulacija temperature



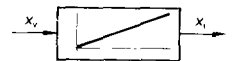
5. Integralni član (I)



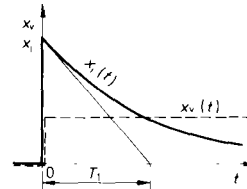
$$x_i = K_I \int x_v dt$$

$$K_I = K_p / T_n$$

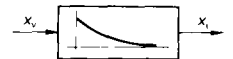
Primjer: razina kapljevine u posudi



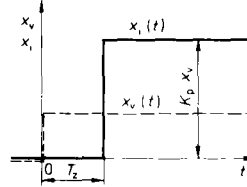
6. Derivabilni član s usporenjem (DT₁)



$$T_1 \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_p T_D \frac{dx_v}{dt}$$



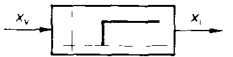
7. Član s mrtvim vremenom bez usporenja



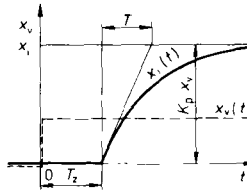
$$t < T_z \quad x_i = 0$$

$$t > T_z \quad x_i = K_p x_v$$

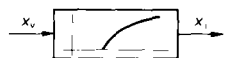
T_z – mrtvo vrijeme
Primjer: transportna traka



8. Član s mrtvim vremenom i usporenjem



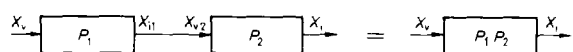
Primjer: miješanje u posudi, zagrijavanje



Spajanje regulacijskih članova

Spoj članova u regulacijskim sistemima najlakše se prikazuju prenosnim funkcijama regulacijskih članova (P), koje su omjer, po Laplaceu transformiranih, izlaznih signala $x_i(s)$ i ulaznih signala $x_v(s)$.

1. Serijski spoj

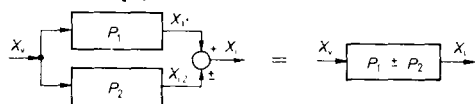


$$X_{v1} = X_v$$

$$X_{i1} = P_1 X_v \quad X_i = P_2 X_{v1} \quad X_i = P_2 X_{v1}$$

$$X_i = P_1 P_2 X_v \quad P = P_1 P_2$$

2. Paralelni spoj

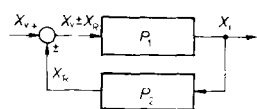


$$X_{i1} = P_1 X_v \quad X_{i2} = P_2 X_v$$

$$X_i = X_{i1} \pm X_{i2} \quad X_i = (P_1 \pm P_2) X_v$$

$$P = P_1 \pm P_2$$

3. Povratna veza – osnovni spoj regulacijskih petlji



Na slici: + faznost
- protufaznost

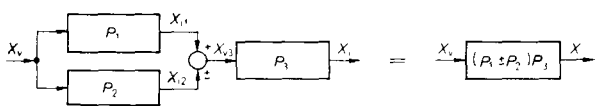
$$X_i = \frac{P_1}{1 \mp P_1 P_2} X_v$$

$$X_i = P_1 (X_v \pm X_R)$$

$$X_R = P_2 X_i$$

U jednadžbi: - faznost
+ protufaznost

4. Sastavljeni paralelno-serijski spoj



$$X_{v3} = X_{i1} \pm X_{i2}$$

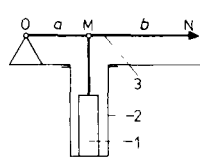
$$X_{i1} = P_1 X_v \quad X_{i2} = P_2 X_v$$

$$X_{v3} = (P_1 \pm P_2) X_v$$

$$X_i = P_3 X_{v3}$$

$$X_i = (P_1 \pm P_2) P_3 X_v$$

Primjer: mjerni davač temperature



- 1 – rastezni štap
duljina l_1
temperaturna rastezljivost α_1
- 2 – plašt
duljina l_2
temperaturna rastezljivost α_2
- 3 – poluga
krakovi a, b

Promjena temperature $\Delta T = X_v$

Temperaturno rastezanje – rasteznog štapa $\Delta l_1 = X_{i1}$

– plašta (2) $\Delta l_2 = X_{i2}$

Pomak poluge (3) – u točki M $\Delta l_1 - \Delta l_2 = X_{i1} - X_{i2} = X_{v3}$

– u točki N $\Delta s = X_i$

Prenosne funkcije

$$P_1 = X_{i1}/X_v = \Delta l_1/\Delta T = l_1 \alpha_1$$

$$P_2 = X_{i2}/X_v = \Delta l_2/\Delta T = l_2 \alpha_2$$

$$P_3 = X_i/X_{v3} = \Delta s/(\Delta l_1 - \Delta l_2) = (a + b)/a$$

Pomak poluge u točki N – prikaz promjene temperature

$$\Delta s = X_i = (P_1 - P_2) P_3 X_v = (l_1 \alpha_1 - l_2 \alpha_2) \frac{a + b}{a} \cdot \Delta T$$

Zamjećivanje veličina

Veličine i njihove vrijednosti zamjećujemo *osjetnicima* (senzorima) koji djeluju neposredno, a to su:

- *ticala* (za duljine i neke druge veličine)
- *mjerni davači* (za većinu veličina).

Regulacione veličine su većinom samo posredno mjerljive (npr. temperatura iz temperaturnog rastezanja; brzina vrtnje iz centrifugalne sile itd.). Odgovarajući mjerni davači djeluju na raznim principima: mehaničkom, toplinskom, kontaktnom, kapacitivnom, induktivnom itd.

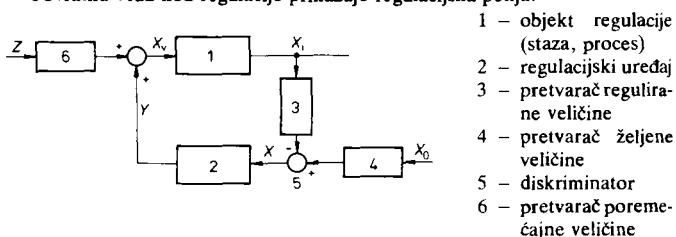
Podaci se dobivaju posredno preračunavanjem iz odgovarajućih izmjerenih veličina (npr. duljinu puta određujemo iz izmjerenog vremena i brzine; učin iz izmjerenog izvršenog rada i utrošenog vremena; specifični toplinski kapacitet iz izmjerene topline i temperaturne razlike itd.).

Za daljnju obradu su naročito podesni signali slijedećih veličina: puta, vremena, sile, tlaka, protoka, električnog napona, električne struje, frekvencije i sl.

Mjerenje mora biti veoma točno, jer regulatori obrađuju vrlo mala odstupanja veličina, tj. razlike između stvarne i željene (poredbene, referentne) veličine.

Regulacijska petlja

Povratnu vezu kod regulacije prikazuje regulacijska petlja.



- 1 – objekt regulacije (staza, proces)
- 2 – regulacijski uređaj
- 3 – pretvarač regulirane veličine
- 4 – pretvarač željene veličine
- 5 – diskriminator
- 6 – pretvarač poremećajne veličine

Regulirana veličina je izlazna veličina objekta regulacije X_1 .

Željena veličina je X_0 .

Regulirana i željena veličina sistema mogu biti fizikalno i dimenzijski različite. Da bi se omogućila međusobna komparacija, moraju se signali osjetnika promijeniti u jedinstveni – obično električni – oblik, a to se postiže pretvaračima.

U diskriminatoru se mora signal regulirane veličine X_1 komparirati promijenjenom željenom veličinom X_0 . Njihova je razlika *regulacijsko odstupanje*

$$X = P_4 X_0 - P_3 X_1$$

Regulacijsko odstupanje X je ulazna veličina regulatora; on ga pretvara u izlaznu veličinu Y , a to je *izvršna naredba*

$$Y = P_R X$$

pričem je P_R prelazna funkcija regulacijskog uređaja.

Na sve članove regulacijske petlje mogu uticati vanjski uplivi, a uzimaju se u obzir kao *smetnja (poremećajne veličina) Z*.

Izvršna naredba Y i smetnje Z daju ulaznu veličinu objekta regulacije X_v

$$X_v = Y + P_6 Z$$

U objektu regulacije se ulazna veličina X_v pretvara u izlaznu veličinu X_1

$$X_1 = P_0 X_v$$

gdje je P_0 prelazna funkcija objekta regulacije. Karakteristične veličine objekta regulacije mogu se u većini slučajeva odrediti jedino ispitivanjem.

Regulirana veličina X_1 mora postići ili održavati određenu vrijednost željene veličine X_0 , a ta može biti:

- konstantna,
- da se nakon određenog vremena promijeni,
- da slijedi određenu promjenu. (npr. puta ili kuta i sl.)

Pri upravljanju i regulaciji, koje su (općenito) postupak kojim utičemo na ulaznu veličinu X_v na taj način, da imaju izlazne veličine X_1 željene vrijednosti, razlikujemo – s obzirom na povratnu vezu:

1. upravljanje nema povratne veze (npr. upravljanje stroja za pranje koje je programom unapred obrađeno);

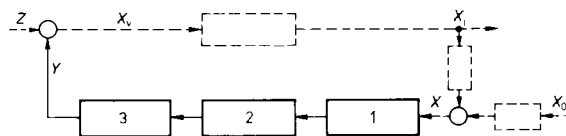
2. regulaciju koja ima povratnu vezu, pričem izlazna veličina može biti:
- vremenski nepromjenljiva (npr. alatni stroj koji radi po modelu – šablioni),
- vremenski ustaljena (npr. regulacija stalne brzine vrtnje turbine).

Automatizacija je združivanje niza regulacijskih postupaka s automatskim djelovanjem, tako da pri određenoj ulaznoj veličini dobivamo željenu izlaznu veličinu nekog postupka, koja je opet ulazna veličina slijedećeg postupka.

Regulacijski uređaj

Osim zamjećivanja i mjerenja stvarne vrijednosti regulirane veličine (tj. izlazne veličine iz regulacijskog objekta) X_1 , određivanja vrijednosti željene veličine X_0 , pretvaranje regulirane i željene veličine u fizikalno i dimenzijski jednaku veličinu, određivanje regulacijskog odstupanja X s komparacijom regulirane i željene veličine, regulacijski uređaj mora obavljati, u najmanju ruku, još i slijedeće funkcije:

1. popravak regulacijskog odstupanja X odgovarajućim *regulatorom*,
2. pojačanje signala – posebno pri regulaciji koja traži velike sile i brzine – *pojačalom*, pričem je pomoćna energija električna, hidraulička ili pneumatska,
3. namještanje vrijednosti izvršne naredbe Y *postavnim članom*.



1 – regulator, 2 – pojačalo, 3 – postavni član

Granične regulacijske naprave sprečavaju – kao sigurnosni uređaj – premašivanje donje i gornje granične vrijednosti regulirane veličine.

Oznake za način djelovanja regulacijske naprave su (po DIN 2481):

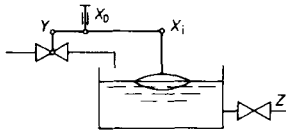
- ⊕ – otvaranje pri porastu regulirane veličine
- ⊖ – otvaranje pri padu regulirane veličine
- ⊕ – otvaranje pri doseg gornje granične vrijednosti
- ⊖ – otvaranje pri doseg donje granične vrijednosti
- ⊕ – zatvaranje pri doseg gornje granične vrijednosti
- ⊖ – zatvaranje pri doseg donje granične vrijednosti

Regulatori

Regulatori su dijelovi regulacijskih naprava koji prerađuju signale regulacijskih odstupanja X kao svoje ulazne veličine.

Regulatori bez pomoćne energije su jeftine naprave, prikladne pri malim izvršnim silama i brzinama. Kod njih utječe regulacijsko odstupanje neposredno na izvršnu naredbu.

Primjer: regulacija razine kapljevine



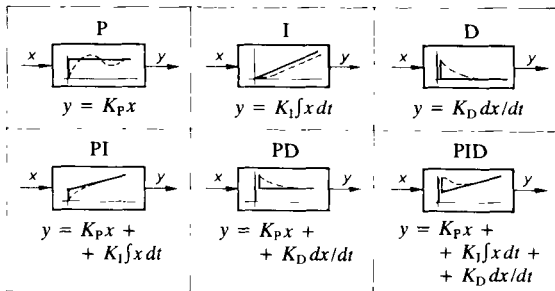
X_0 – udešavanje razine (željena veličina)
 X – pad razine (regulacijsko odstupanje)
 Y – zaporni ventil (izvršna naredba)
 Z – otjecanje (poremećajna veličina)

Regulatori s pomoćnom energijom (električnom, hidrauličkom, pneumatikom) djeluju kontinuirano ili diskontinuirano.

Regulatori s kontinuiranim djelovanjem

Kod njih je izlazna veličina Y ovisna o ulaznoj veličini X . Za takve regulatore vrijede zakonitosti regulacijskih članova.

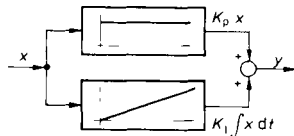
Vrste kontinuirano djelujućih regulatora:



Prelazna funkcija: idealnih regulatora —
 realnih regulatora - - -

Navedene diferencijalne jednačbe vrijede za idealne regulatore.

Primjer spoja – regulator PI:

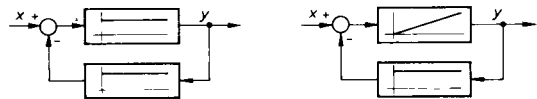


Povratne vezi regulatora

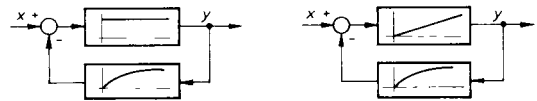
Proizvoljno vremensko ponašanje gotovo svih vrsta regulatora postizava se prikladnom povratnom vezom. Na rad regulatora utječe vrsta regulacijskog člana u povratnoj vezi, a to su:

- čvrsta povratna veza: s regulacijskim članom P,
- povratna veza s pojačanjem: s regulacijskim članom PT_1 ,
- povratna veza sa slabljenjem (derivaciona): s regulacijskim članom D,
- povratna veza s pojačanjem i slabljenjem: s regulacijskim članovima PT_1 i D u serijskom spoju.

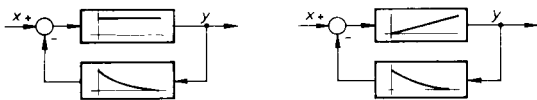
Čvrsta povratna veza



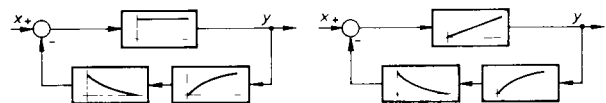
Povratna veza s pojačanjem



Povratna veza sa slabljenjem



Povratna veza s pojačanjem i slabljenjem



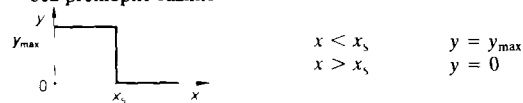
Na sličan se način mogu stvarati najrazličitije kombinacije regulacijskih članova u regulatorima.

Diskontinuirano djelujući regulatori

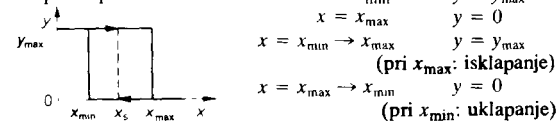
Kod tih regulatora nema kontinuirane ovisnosti među izlaznom i ulaznom veličinom, već je moguć samo ograničen broj izlaznih veličina koje odgovaraju ulaznim veličinama.

Primjer: relejni regulator (npr. bimetalni)

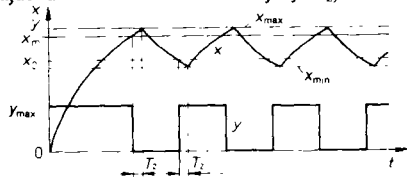
– bez preklopne razlike



– s preklopnom razlikom



Vremensko ponašanje diskontinuirano djelujućih regulatora s preklopnom razlikom (uzimajući u obzir vremensko zaostajanje T_z)



Izvršna naredba y izaziva pri vrijednosti y_{max} porast regulirane veličine x . Čim ona dosegne vrijednost x_m , izvršna se naredba isključuje do vrijednosti x_0 ; regulirana veličina x raste – uz vremensko zaostajanje T_z – dalje do vrijednosti x_{max} , a tek tada počinje opadati. Pri vrijednosti x_0 izvršna se naredba ponovno uklapa do vrijednosti y_{max} , regulirana veličina x i dalje opada te počinje rasti tek nakon vremenskog zaostajanja T_z .

Područja primjene nekih regulacijskih naprava

Veličina	Vrsta regulatora			
	P	I	PI	PID
temperatura	+	-	+	+
tlak	-	+		
protok	-		+	
razina kapljevine	-	-	+	
brzina vrtnje	+	+	++	++
električni napon	+			

* Znakom »+« označeno je prikladno, a znakom »-« neprikladno područje primjene.

ELEKTRONIČKA OBRADA PODATAKA

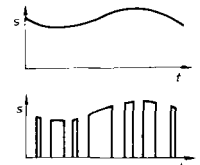
Informacija je vijest o zbivanjima u okolišu promatranog sustava i u sustavu samom. Vijesti primamo u obliku *podataka* o mjerenjima pojedinih veličina, vezanih na zbivanja, dakle o mjerenjima njihovih vrijednosti i promjena, a u obliku prikladnom za obradu. Stoga podaci sadrže u prvom redu broječne vrijednosti zbivanja, procesa i tokova. U tu su svrhu označeni znakovima (brojkama, slovima ili posebnim znakovima) ili funkcijama kao matematičkim propisima o vrijednostima.

Informatika je grana znanosti i tehnike koja obuhvaća metode i postupke obrade podataka (dobivenih u prvom redu automatski).

Prenos podataka označujemo kao *signal*, koji je nosilac informacija. Signali su kontinuirani ili diskretni:

– *kontinuirani signali* teku vremenski neprekidno – u skladu s vremenskim tokom veličine o kojoj donose podatke;

– *diskretni signali* nižu se vremenski prekidno (pojedinačno) i množinom impulsa daju podatke o opažanoj veličini.



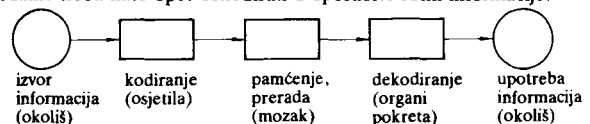
Za signale se većinom upotrebljava električna struja i napon (ali i put, tlak, toplina, svjetlost itd.).

Podaci se prikazuju u ovisnosti o njihovim vremenskim promjenama $I(t)$ i $U(t)$. Prerada podataka je proces pri kojem se iz ulaznih podataka po određenom preradbenom propisu dobivaju izlazni podaci.

Prosti oblik signala je harmonijsko titranje (opisano kružnom frekvencijom i amplitudom).

Podatke obrađujemo elektroničkim računarima koji mogu biti analogni, digitalni ili hibridni. Potonji se sastoje od analognih i digitalnih sastavnih dijelova.

Elektronički računari mogu preradivati samo one signale podataka koji su izraženi u prikladnom obliku, tj. u prikladnom *kodu*. Stoga valja signale najprije kodirati. Kodirane podatke možemo spremirati (u memorijama). Obradene podatke treba nato opet dekodirati u uporabivi oblik informacije.



Tehnika automatizacije bavi se oblikovanjem automatski reguliranih procesa u fizikalno-tehničkim sistemima. To postiže u prvom redu računarskom tehnikom. U velikom opsegu upotrebljava također opće priznate metode i način opažnja, karakterističan za kibernetiku (koju je – po općem priznanju – započeo i utemeljio N. Wiener, 1894–1964).

Princip analogne tehnike

Analognim računarima, nazvanim po analognom načelu djelovanja, prikazuju se kontinuirano dva različita fizikalna sustava veličina jednakim matematskim odnosima. Takva je npr. sličnost među mehaničkim i električnim titrajnim sistemom:

$$\begin{aligned} \text{mehaničko titranje} & \quad m\ddot{y} + D\dot{y} + ky = F(t) \\ \text{električno titranje} & \quad L\ddot{q} + R\dot{q} + 1/C \cdot q = U(t) \end{aligned}$$

Primjeri analognih veličina:

Količine		Protoci	
put	s	brzina	$v = ds/dt$
kut (analit.)	$\hat{\alpha}$	kutna brzina	$\omega = d\hat{\alpha}/dt$
volumen	V	volumenski protok	$q_v = dV/dt$
masa	m	maseni protok	$q_m = dm/dt$
toplina	Q	toplinski tok	$\Phi = dQ/dt$
el. naboj	Q_{el}	el. struja	$I = dQ_{el}/dt$
Potencijalne razlike		Otpori	
sila	F	konstanta prigušivanja	$d = F/v$
okret. moment	T, M		$d_r = M/\omega$
tlačna razlika	Δp	protočni otpor	$\eta_v = \Delta p/q_v$
temper. razlika	ΔT	toplinski otpor	$1/K = \Delta T/\Phi$
el. napon	U	el. otpor	$R = U/I$
Kapaciteti		Tromosti	
konstanta opruge	$c = F/s$	masa	$m = \frac{F}{d\omega/dt}$
	$c_r = M/\hat{\alpha}$	moment tromosti	$J = \frac{M}{d\omega/dt}$
el. kapacitet	$1/C = U/Q_{el}$	el. induktivitet	$L = \frac{U}{dI/dt}$

Analogni računari služe u prvom redu za simulaciju tehničkih problema.

Bit programiranja analognog računara sastoji se u postavljanju analognog fizikalnog modela kojega treba preoblikovati u matematički model te ga pretvoriti u radni sistem računara.

Za rješavanje posebnih i zapletenih zadataka moraju biti pojedini sastavni dijelovi analognog računara međusobno vezani odgovarajućim redom – analogno fizikalnom procesu.

Analogni računari djeluju kontinuirano (pa se i računane veličine mogu kontinuirano mijenjati). Njihovo je djelovanje brzo pa se stoga mnogo upotrebljavaju u tehnici regulacije.

*

Najjednostavniji analogni računar je opće poznati logaritamski računar pri kojem brojeve množimo i dijelimo zbrajanjem i odbijanjem njihovih logaritama (predočenih dužinama).

Princip digitalne tehnike

U digitalnom su računar informacije prikazane konačnim nizom brojki (*digitus*) kojima zapisujemo brojeve.

U broju ima svaka brojka svoju vlastitu i svoju mjesnu vrijednost s obzirom na izabrani brojčani sustav. Općenito vrijedi za svaki broj X :

$$X = \sum_{i=m}^n N_i B^i$$

gdje je B – osnova brojčanog sustava, N – brojka u sustavu.

Primjeri:

– *Decimalni sustav*

$$B = 10, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$$

$$X = 1987_{10} = 1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$$

– *Binarni (dualni) sustav*

$$B = 2, \quad N = 0, 1$$

$$X = 101110_{12} = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} = 22,5_{10}$$

– *Oktalni sustav*

$$B = 8, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$

$$X = 120,4_8 = 1 \cdot 8^2 + 2 \cdot 8^1 + 0 \cdot 8^0 + 4 \cdot 8^{-1} = 80,5_{10}$$

– *Heksadecimalni sustav*

$$B = 16, \quad N = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A (10), B (11), C (12), D (13), E (14), F (15)$$

$$X = 20C4_{16} = 2 \cdot 16^3 + 0 \cdot 16^2 + C \cdot 16^1 + 4 \cdot 16^0 = 8388_{10}$$

U općoj je upotrebi decimalni sustav. Kod digitalnih računara je naročito prikladan binarni sustav, jer tehnički potpuno odgovara dvjema stanjima s oznakama:

$$\begin{aligned} 0 & \text{ – »prolaz otvoren«} \\ 1 & \text{ – »prolaz zatvoren«} \end{aligned}$$

Svako od tih dvaju stanja znači 1 *bit* (*binary digit*).

Oktalni i heksadecimalni sustav su namijenjeni lakšoj predodžbi brojeva.

4-bitni binarni zapis (kod) decimalnih brojki 0...9:

Brojka	Zapis	Brojka	Zapis	Brojka	Zapis
0	0000	4	0100	8	1000
1	0001	5	0101	9	1001
2	0010	6	0110		
3	0011	7	0111		

Primjer zapisa broja 1988: 0001 1001 1000 2000

Matematske operacije tako zapisanih brojeva uređuje program računara.

Sadanj digitalni računari mogu obaviti više od 10^7 operacija u sekundi.

Prerađivanje prvenstveno brojčanih podataka upotrebljavamo pri regulaciji računarom (*NC – numeric control*).

Kodiranje digitalnih podataka

Digitalni računari prerađuju digitalne podatke, tj. takve podatke koje možemo označiti samim znakovima. Znakovi proizlaze iz dogovorne skupine znakova, a raspoređeni su u znakovnim nizovima, npr.:

- niz decimalnih brojk (cifara) 0, 1, 2, ...
- niz velikih latiničnih slova A, B, C, ...
- niz malih latiničnih slova a, b, c, ...
- niz posebnih znakova !, ", #, ...

Tako razlikujemo:

- brojčane (numeričke) podatke koji se sastoje iz brojki;
- slovno-brojčane (alfanumeričke) podatke koji se sastoje iz slova, brojki i posebnih znakova.

Osim ovih znakova postoje i regulacijski znakovi (NUL, ... DEL).

Znakovi za (ISO-) 7-bitne kode (JUS I.B1.002 - 1982) sastavljeni su iz bitova $b_7 \dots b_1$:

							0	0	0	0	1	1	1	1	
							0	0	1	1	0	0	1	1	
							0	1	0	1	0	1	0	1	
b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	stupac X								
redak Y							0	1							
0	0	0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	Ž	P	ž	p	
0	0	0	1	1	0	0	SOH	DC ₁	!	1	A	Q	a	q	
0	0	1	0	0	0	2	STX	DC ₂	"	2	B	R	b	r	
0	0	1	1	0	0	3	ETX	DC ₃	#	3	C	S	c	s	
0	1	0	0	0	0	4	EOT	DC ₄	\$	4	D	T	d	t	
0	1	0	1	0	0	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u	
0	1	1	0	0	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v	
0	1	1	1	0	0	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w	
1	0	0	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1	0	0	1	0	0	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	0	0	10	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z	
1	0	1	1	0	0	11	VT	ESC	+	;	K	Š	k	š	
1	1	0	0	0	0	12	FF	FS	,	<	L	Đ	l	đ	
1	1	0	1	0	0	13	CR	GS	-	=	M	Č	m	č	
1	1	1	0	0	0	14	SO	RS	>	>	N	Č	n	č	
1	1	1	1	0	0	15	SI	US	/	?	O	-	o	DEL	

U 7-bitnom binarnom zapisu je znak »K« određen nizom bitova: 100 1011, podatak »Srijeda 19.30« zapisom: 101 0011 111 0010 110 0101 110 0100 110 0001 010 0000 011 0001 011 1001 010 1110 011 0011 011 0000

Znakovi upravljanja u 7-bitnom kodu znače:

- | | |
|---------------------------------|--|
| ACK - ACKNOWLEDGE | - potvrda ispravnog primitka |
| BEL - BELL | - znak alarma |
| BS - BACKSPACE | - pomakni natrag |
| CAN - CANCEL | - poništiti |
| CR - CARRIAGE RETURN | - pomak nosača natrag |
| DC - DEVICE CONTROL | - znaci za kontrolu uređaja |
| DEL - DELETE | - izostaviti |
| DLE - DATA LINK ESCAPE | - slijedi znak posebnog značenja |
| EM - END OF MEDIUM | - kraj medija |
| ENQ - ENQUIRY | - upit |
| EOT - END OF TRANSMISSION | - svršetak prenosa |
| ESC - ESCAPE | - prelaz |
| ETB - END OF TRANSMISSION BLOCK | - svršetak prenosa bloka |
| ETX - END OF TEXT | - svršetak teksta |
| FF - FORMAT FEED | - određivanje pozicije |
| FS - FILE SEPARATOR | - znak za odvajanje datoteka |
| GS - GROUP SEPARATOR | - znak za odvajanje blokova |
| HT - HORIZONTAL TABULATION | - horizontalno tabuliranje |
| LF - LINE FEED | - određivanje pozicije na slijedeću liniju |
| NAK - NEGATIVE ACKNOWLEDGE | - potvrda neispravnog primitka |
| NUL - NULL | - prazan znak |
| RS - RECORD SEPARATOR | - znak za odvajanje slogova |
| SI - SHIFT-IN | - povratak na standardno značenje |
| SO - SHIFT-OUT | - nailazak znakova s promijenjenim značenjem |
| SOH - START OF HEADING | - početak zaglavlja |
| SP - SPACE | - razmak |
| STX - START OF TEXT | - početak teksta |
| SUB - SUBSTITUTE CHARACTER | - zamijeniti |
| SYN - SYNCHRONOUS IDLE | - znak za sinkronizaciju |
| US - UNIT SEPARATOR | - znak za odvajanje polja |
| VT - VERTICAL TABULATION | - vertikalno tabuliranje |

Logičko zaključivanje

Booleova logička algebra služi se skupom od dva elementa: 0 (krivo) i 1 (pravilno).

Elementarne funkcije Booleove algebre

Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol	Funkcija	Simbol
NE (NO)	-	NE-ILI (NOR)	∇	implikacija	\supset
ILI (OR)	\vee	NE-I (NAND)	$\bar{\wedge}$	ekvivalencija	\equiv
I (AND)	\wedge			antivalencija	\neq

Pomoću elementarnih funkcija Booleove algebre možemo u načelu prikazati svaku logičku kombinaciju.

Booleove funkcije

a	b	\bar{a}	\bar{b}	$a \vee b$	$a \wedge b$	$a \nabla b$	$a \bar{\wedge} b$	$a \supset b$	$a \equiv b$	$a \neq b$
0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0

Pohranjivauje podataka

Kodirane podatke možemo pohraniti u memorijama i to za stalno (za što su prikladne bušene kartice i trake) ili s mogućnošću mijenjenja (što omogućuju magnetske memorije).

Bušene kartice i trake upotrebljavaju se za jednokratnu snimku podataka. Na nje bušenjem zapisujemo dva stanja: 0 – nebušeno i 1 – bušeno.

Bušena kartica (od kartona bez električki vodljivih dijelova, veličine 187,32 × 82,55 mm) obično je podijeljena: po visini na 10 normalnih redaka (0...9) i na dva dodatna retka; po duljini pa npr. na 45, 80 ili 90 stupaca. Svaki stupac pripada jednom kodiranom znaku, a svaki redak u stupcu jednom bitu (0 ili 1).

Bušene trake su na veliku duljinu razvučene kartice sa stupcima u razmaku po 2,5 mm i recima, razvučenima u nizove, a njihov broj mora odgovarati upotrebljenom kodu. Na presjecištima stupaca i redaka su mjesta za rupice. Između redaka je niz manjih rupica za transport trake.

Magnetske memorije iskorišćuju magnetska svojstva vrlo tankih ($\approx 11\mu\text{m}$) feromagnetskih slojeva (NiFe, NiCo itd.), nanesenih na nosivu podlogu. Te slojeve možemo lokalno (točkasto) magnetizirati i to u dva suprotna magnetska stanja, što odgovara – nalik na bušenje – stanjima 0 i 1.

Magnetske memorije razlikujemo po nosivoj podlozi:

– Magnetske kartice su od plastične umjetne tvari, veličine npr. 80 × 350 mm.

– Magnetske trake su također od plastičnih umjetnih tvari (debljine $\approx 50\mu\text{m}$), mnogo su uže od kartica (npr. 3...12 mm), ali znatno dulje (npr. 750 m). Brzina odvijanja je npr. 1,7 m/s.

– Magnetski bubnjevi su od slitina lakih kovina (promjera 500...1000 mm), sadrže i do 10^7 znakova. Njihova prenosna brzina iznosi 10^6 bit/s.

– Magnetski koluti (diskovi) (promjera 500...1500 mm) iskorištavaju za smještaj znakova obje strane i stoga zauzimaju – uz isti kapacitet – znatno manji prostor od bubnjeva. Obično je 6...12 koluta skupljeno u izmjenjivi kolutni slog. Mali magnetski koluti (diskete) (promjera 80...250 mm) imaju kapacitet do $1,6 \cdot 10^6$ bit/s.

Druge izvedbe magnetskih memorija su:

– Keramičke ploče s magnetskim slojem (NiFe) koji je u vakuumu parom nanesen u debljini od samo $(2...20) \cdot 10^{-2}\mu\text{m}$.

– Magnetske obručne jezgre, prešane od feromagnetskog materijala (u obruče pravokutnog presjeka). Strujnim udarom preklapaju se iz jednog u drugi magnetski smjer.

U magnetskim mamorijama spremjeni podaci mogu se – po potrebi – brisati odnosno zamjenjivati.

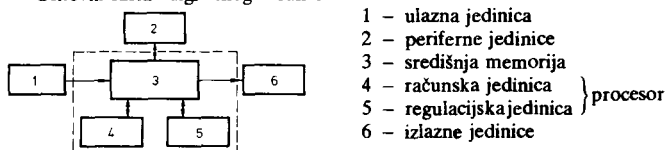
Aparaturna oprema

Aparaturnu opremu čine električni (elektronički) i mehanički sklopovi. Pri obradi podataka u njima se redaju određene operacije serijski.

Podatke i naredbe predstavljaju u digitalnim računarima binarni znakovi koji su obično združeni u riječima stalne duljine (4, 6, 8 = 1 bajt (byte), 12, 16, 32, 48, 60, 64 i više bitova). Podaci i naredbe prerađuju se u pojedinim jedinicama računara u elektroničkim spojevima koji su sastavljeni od logičkih (poluprovodničkih) elemenata, funkcionalno vezanih (u velikoj gustoći) na malim pločicama – čipovima (chip). Broj u čipu združenih elemenata označuje se »integracijskim brojem«.

Broj elemenata	Vezivanje		
10...100	SSI	(Small Scale Integration)	rijetka
50...500	MSI	(Medium Scale Integration)	osrednja
> 1000	LSI	(Large Scale Integration)	velika
> 10000	VLSI	(Very Large Scale Integration)	vrlo velika

Osnovni sastav digitalnog računara



Ulazna jedinica prima podatke i naredbe korisnika (čitač, tastatura...).

Periferne jedinice obuhvataju procesne jedinice (procesnu periferiju, periferne memorijske jedinice: memorijske kartice, trake, kolute, bubnjeve).

Središnja memorija sprema informacije-podatke i naredbe. Karakterističan je za nju kapacitet za spremanje informacija (jedinica kapaciteta središnje memorije je 1 kilobajt = 2^{10} = 1024 riječi) te brzina za njihovo unošenje i crpljenje.

Računska jedinica obavlja sve zahtijevane operacije:

- aritmetičke operacije (zbrajanje, odbijanje, množenje, dijeljenje),
- logične operacije – uspoređivanje (>, \geq , =, \leq , <, \neq) i odlučivanje,
- organizacijske operacije (prenos podataka i naredbi među funkcijskim jedinicama računara).

Regulacijska jedinica dirigira izvođenje naredbi po programu. Računska i regulacijska jedinica zajedno sačinjavaju procesor.

Izlazne jedinice (štampač, »plotter«, ekran...) predavaju korisniku rezultate računara.

Digitalni računari upotrebljavaju se za rješavanje svih zadataka koji se mogu oblikovati u programima.

Programska oprema

Digitalni računar je automat u kojem teku informacijski procesi po točno određenim uputama.

Program je potpuni niz uputa za rješavanje danog zadatka. Te upute sadrže računске naredbe za aritmetičke operacije, usporedbene naredbe za logičke operacije itd.

Programi za korijene i eksponente, trigonometrijske i druge funkcije koje se javljaju u praksi veoma često, mogu se – posebno izrađeni – spremati i po potrebi uključiti u drugi program kao potprogram.

Izrada programa ovisna je o strukturi i izvedbi elektroničke naprave za preradu podataka (računala).

Algoritam je temelj programa te je takav popis svih uputa kojima se omogućuje rješenje određenog zadatka po koracima. U njemu su pojedini koraci određeni tako, da ih računar može »razumjeti« i izvesti, tj.:

- svaki algoritam sastoji se iz više pojedinih koraka, a svaki korak iz računskih propisa koji predstavljaju neku funkciju; svaki korak sadrži usto upute za sljedeći korak;
- svaki je korak algoritma izvedljiv jednoznačno, a isto tako jednoznačan je i nastavak;
- funkcija svakoga koraka mora biti izvodljiva, čime je osigurano, da je s konačnim brojem elementarnih operacija ostvarljiva svaka funkcija.

Programski jezik oblikuje skup svih uputa za opis algoritama.

Programski su jezici:

- strojno orijentirani, tj. sastoje se iz uputa koje imaju jednaki ili slični sastav kao i naredbe određenog računala;
- problemsko orijentirani, tj. po svom su sastavu prikrojeni problemima koje treba rješavati, a nisu ovisni o uređaju računara;

Nalik na materijalne proizvode, nastaje i programski izradak u više faza od kojih su najznačajnije:

- specifikacija, tj. određivanje uporabnih funkcija ulaznih i izlaznih podataka;
- planiranje: program se dijeli na programske module (pojedine komponente većih programa);
- izvedba: moduli se dalje detaljiraju i kodiraju (zapisuju u određenom programskom jeziku).

S porastom kompliciranosti zadataka rastu i troškovi za programsku opremu.










Naprave za elektroničku obradu podataka mogu obaviti samo osnovne računске operacije i određene usporedbe po kojima moraju biti izgrađeni algoritmi.

Jednostavni zadaci rješavaju se jednostavnom jednačbom. Za zadatke iz prirodoslovlja i tehnike često su potrebni sistemi diferencijalnih jednačbi. Za

























algoritme je karakteristično stoga, da se komplicirani zadaci rješavaju korakom, putem jednostavnih operacija.

Dijagram toka programa je računská shema kojom je dan cjelokupan tok algoritma (programskog niza). Pojedine korake upisujemo u odgovarajuće okvire (blokove), međusobno ih povežemo i ucrtamo smjer toka. Dijagram toka račva se samo pri odluci da – ne

Simboli za dijagrame odvijanja operacija programa (JUS A.F0.004 – 1971)

	Operacija općenito		Modifikacija programa		Linija odvijanja programa
	Odluka		Ručna operacija		Priključna točka
	Potprogram		Ulaz/izlaz		Granično mjesto

Simboli za dijagrame protoka podataka i dokumenata

	Obrada općenito		Ulaz/izlaz		Magnetni disk
	Pomoćna funkcija		Memorija ovisna od postrojenja		Matrična memorija
	Ručna operacija		Memorija odvojena od sistema		Ilustrirani izlaz
	Ručno unošenje		Dokument		Linija protoka podataka
	Združivanje		Bušena kartica		Transport nosača podataka
	Razlučivanje		Bušena traka		Telekomunikacijska veza
	Združivanje/razlučivanje		Magnetna traka		Povezivanje
	Sortiranje		Magnetni bubanj		Napomena

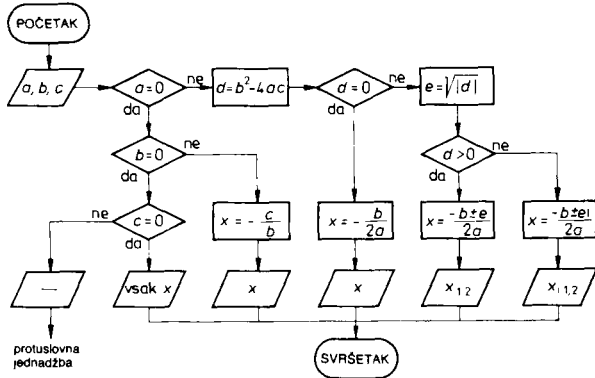
Primjer: kvadratna jednadžba $ax^2 + bx + c = 0$

$$\text{Analitičko rješenje: } x_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{1}{2a} \sqrt{b^2 - 4ac}$$

Algoritam:

- Korak 1 $\{a = 0?\}$ da: prelaz na korak 2
ne: prelaz na korak 5
- Korak 2 $\{b = 0?\}$ da: prelaz na korak 3
ne: prelaz na korak 4
- Korak 3 $\{c = 0?\}$ da: jednadžbu zadovoljava svaki x
ne: jednadžba je protuslovna
- Korak 4: Izračunati $x = -c/b$; svršetak računa.
- Korak 5 Izračunati $d = b^2 - 4ac$; prelaz na korak 6
- Korak 6 $\{d = 0?\}$ da: prelaz na korak 7
ne: prelaz na korak 8
- Korak 7 Izračunati $x = -b/2a$; svršetak računa
- Korak 8 Izračunati $e = \sqrt{|d|}$; prelaz na korak 9
- Korak 9 $\{d > 0?\}$ da: prelaz na korak 10
ne: prelaz na korak 11
- Korak 10 Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm e)/2a$; svršetak računa
- Korak 11 Izračunati $x_{1,2} = (-b \pm ei)/2a$; svršetak računa.

Dijagram toka programa:



Programski jezici

Svaki je programski jezik (tj. skup uputa za opis algoritma) jednoznačno sastavljen po određenoj »gramatici«. Znakovi – kao elementi jezika – određeni su odabranim nizovima (brojkama, slovima, posebnim znakovima, simbolima za riječi).

Programskih jezika ima vrlo mnogo. Posebno važni su naredni:

ADA (nazvan po »prvoj programerki« Augusti Adi Byron) je jezik za programiranje u prirodoslovlju i tehnici. (Standardiziran u SAD g. 1983.)

ALGOL (ALGOritmic Language) upotrebljava se za prikaz računskih propisa, a naročito za rješavanje numeričko-matematičkih, prirodoslovnih i tehničkih problema

(Početak razvoj: 1958 – ALGOL 58; nato ALGOL 60–68. Standardiziran je u: ISO/R 1538 i DIN 66026.)

APL (A Programming Language) služi za opis algoritama.

(Početak razvoja: 1957. Prvi puta upotrebljen za računare IBM 360.)

APT (Automatically Programed Tools) namijenjen tehnologiji obrade. Iz njega su se razvili specijalni jezici: EXAPT 1 – za obradu bušenjem, EXAPT 2 – za obradu tokarenjem, EXAPT 3 – za obradu glodanjem.

(Nastao je 1957. Standardiziran je po DIN 66025 – za sastavljanje programa za računarom regulirane alatne strojeve za odvajanje čestica.)

BASIC (Beginner's All purpose Symbolic Instruction Code) prirođen je u prvom redu za probleme prirodoslovlja i tehnike. Veoma je rasprostranjen pri malim osobnim računarima. (Standardiziran u SAD 1978.)

COBOL (COmmon Business Oriented Language) služi za potrebe trgovine i računovodstva. (Standardiziran po ISO/R 1989 i DIN 66028.)

FORTAN (FORmular TRANslating system) upotrebljava se u prvom redu za programiranje problema iz prirodoslovlja i tehnike, a upotrebljiv je i na komercijalnom području.

(Početak: 1954., daljnji razvoj: FORTRAN 77. Standardiziran po ISO/R 1539, DIN 66027.)

PASCAL (imenovan po francuskom matematičaru) služi za rješavanje numeričkih i nenumeričkih problema. (Postanak: g. 1969. na ETH, Zürich.)

PL 1 (Programming Language 1) upotrebljiv za višenamjensku primjenu.

(Standardiziran po ISO/R 6160 i DIN 66225.)

PROLOG (PROgramming in LOGic) razvijen je za potrebe umjetne inteligencije.

(Početak: 1972, Marseille.)

Ostali su programski jezici:

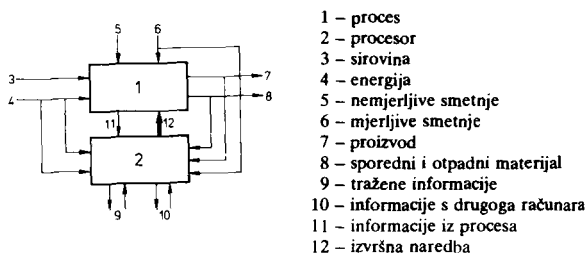
CORAL, FORMAC, GPSS, LISP, LTR, PEARL, REDUCE, RPG, RTL, SNOBOL, SYMAP itd.

Procesni računari

Procesni računari (procesori) su naprave za elektroničku obradu podataka pri raznim tehničkim procesima.

Razvoj tehnologije poluvodiča omogućio je izradu računara znatno manjeg volumena (i cijene) – miniračunar i mikroročunar. U njima je na vrlo maloj površini skupljeno mnogo tisuća sastavnih elemenata (npr. 20 000 jednodopolnih tranzistora na čipu površine od 35 mm²).

Mikroprocesori – procesni mikroročunari – većim su dijelom sastavljeni i programirani za određenu svrhu.



- 1 – proces
- 2 – procesor
- 3 – sirovina
- 4 – energija
- 5 – nemjerljive smetnje
- 6 – mjerljive smetnje
- 7 – proizvod
- 8 – sporedni i otpadni materijal
- 9 – tražene informacije
- 10 – informacije s drugoga računara
- 11 – informacije iz procesa
- 12 – izvršna naredba

Procesor dobiva (stalno ili u određenim vremenskim razmacima) informacije o ulaznim veličinama (sirovinama i energiji), o toku proizvodnoga procesa (i mjerljivim smetnjama) te o izlaznim veličinama (proizvodu te o sporednom i otpadnom materijalu). To su analogni signali koji se u pretvaračima pretvaraju u digitalne signale. U procesoru se uspoređuju mjerni podaci sa željama. U skladu s ustanovljenim odstupanjima procesor nato utiče neposredno na proces.

Pomoć računara

Brzina, točnost i preglednost rada s računarom su uzroci za sve opsežniji rad u tehnici pomoću računara. Tako su se razvili značajni radni sistemi, vođeni računarom:

- CAD (*Computer Aided Design*) za konstruiranje (planiranje)
- CAM (*Computer Aided Manufacturing*) za izradu (produkciju)
- CAE (*Computer Aided Engineering*) za optimiranje izradaka (produkta)
- CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) za sastavljenu (integriranu) izradu
- CAP (*Computer Aided Programming*) za programiranje (planiranje rada)
- CAQ (*Computer Aided Quality Ensurance*) za osiguranje kvaliteta itd.

DRUGI DIO

ISPITIVANJE MATERIJALA

DIJAGRAM σ, ϵ

U ispitnom uzorku (pokusnom štapu) materijala, opterećenom silom F , nastupaju naprezanja σ koja izazivaju rastezanje.

Naprezanje σ je odnos sile F i presjeka ispitnog uzorka S (okomito na smjer sile)

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Zbog djelovanja sile F (i time nastalim naprežanjem σ) ispitni će se uzorak s prvotne duljine L_0 rastegnuti na duljinu L .

Produljenje epruvete iznosi

$$\Delta L = L - L_0$$

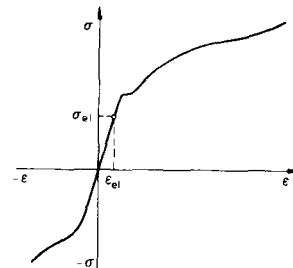
Postotno produljenje epruvete je produljenje s obzirom na prvotnu duljinu L_0

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Dijagram σ, ϵ pokazuje međusobnu ovisnost naprežanja i postotnog produljenja.

Početo je rastezanje linearno (tj. postotno je produljenje upravo razmjerno naprežanju). U području linearnoga rastezanja materijal je *elastičan* (tj. nakon prestanka djelovanja sile odn. naprežanja vraća se na prvotnu dimenziju).

Modul elastičnosti E je odnos naprežanja i postotnog produljenja (u području elastičnosti) $E = \frac{\sigma_{el}}{\epsilon_{el}}$



»Granica elastičnosti« je naprežanje pri kojem osjetljiva mjerila osjete prvo primjetno, trajno, postotno produljenje materijala (pri još nepromijenjenom presjeku $S = S_0$)^{*}. Povrh te granice (obično na koncu linearnoga rastezanja) materijal se rasteže *plastično* (tj. nakon prestanka djelovanja sile ne vraća se više na prvotnu dimenziju, već ostaje stanovito, trajno, postotno produljenje, a presjek se suzuje: $S < S_0$).

Dijagram σ, ϵ nastavlja se u smislu tlačnih naprežanja, kad tlačno naprežanje $-\sigma$ izaziva relativno skraćenje $-\epsilon$.

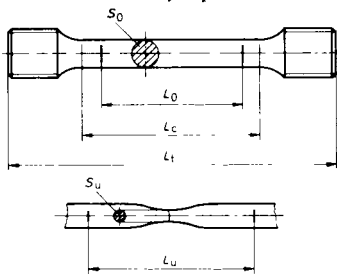
* Tj. naprežanje tečenja $R_{p, 0.01}$ – vidi str. 316.

MEHANIČKO ISPITIVANJE METALA
(JUS C.A4.001-1986)

Vlačno ispitivanje (JUS C.A4.002-1985)

Za vlačno ispitivanje služe ispitni uzorci koji imaju razne oblike s obzirom na veličinu i oblik raspoloživog materijala i s obzirom na zahvatne čeljusti stroja za kidanje.

1. Oznake dimenzija ispitnih uzoraka



- L_t - ukupna duljina ispitnog uzorka
- L_c - duljina ispitnog dijela ispit. uzorka
- L - mjerna duljina*
- L_0 - početna mjerna duljina*
- L_u - konačna mjerna duljina (nakon kidanja)*
- S - površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka
- S_0 - početna površina presjeka
- S_u - najmanja površina presjeka (nakon kidanja)

- * Pri upotrebi ekstenzometra:
- L_c - mjerna duljina mjerača produljenja (ekstenzora)
- L_{e0} - početna mjerna duljina mjerača
- L_{eu} - mjerna duljina mjerača nakon kidanja

2. Dimenzije ispitnih uzoraka

Pri proporcionalnom ispitnom uzorku je početna mjerna duljina L_0 razmjerna s korijenom početnog presjeka S_0 : $L_0 = k\sqrt{S_0}$ pa je kod ispitnih uzoraka kružnog presjeka proporcionalna promjeru:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} = k\sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot d_0$$

Uobičajene početne duljine L_0 su:
za proporcionalni ispitni uzorak

	za proporcionalni ispitni uzorak		za presjek ispit. uzorka proizvoljni		kružni	
	k	$k\sqrt{\pi}/4$				
kratki (normalni)	5,65	5	$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$		$L_0 = 5 d_0$	
dugi	11,3	10	$L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$		$L_0 = 10 d_0$	

Primjeri kratkih ispitnih uzoraka:

d_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	L_c mm
$20 \pm 0,150$	314	$100 \pm 1,0$	110
$10 \pm 0,075$	78,5	$50 \pm 0,5$	55
$5 \pm 0,040$	19,6	$25 \pm 0,25$	28

Pri neproporcionalnim uzorcima početna mjerna duljina L_0 nije ovisna od presjeka S_0 (odn. promjera d_0).

Ispitni uzorci za žice i štapove, promjera do 4 mm moraju imati početnu mjernu duljinu $L_0 = 200 \pm 2$ mm ili $L_0 = 100 \pm 1$ mm.

Ispitni uzorci za limove i trake, debljine 0,1... 3 mm izrezuju se na širine b (12,5 odn. 20 mm), s početnom mjernom duljinom L_0 (50... 80 mm) i ispitnim duljinama L_c (75 odn. 120 mm).

3. Oznake veličina pri rastezanju i suživanju

Pri rastezanju vrijede oznake:

- $\Delta L = L - L_0$ mm - produljenje
- $\Delta L_u = L_u - L_0$ mm - produljenje nakon kidanja
- $\epsilon = (\Delta L/L_0) \cdot 100$ % - postotno produljenje
- $A = (\Delta L_u/L_0) \cdot 100$ % - postotno produljenje nakon kidanja

Oznaka A vrijedi za postotno produljenje nakon kidanja u slučaju upotrebe proporcionalnog ispitnog uzorka s vrijednošću koeficijenta $k = 5,65$. Pri upotrebi proporcionalnih uzoraka s drugim koeficijentom k (npr. 11,3), valja oznaki A dodati tu vrijednost kao indeks (npr. $A_{11,3}$). Pri proporcionalnim uzorcima kružnog presjeka označujemo postotno produljenje nakon kidanja:

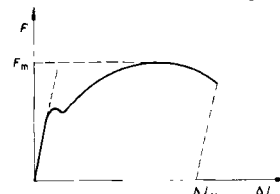
- pri kratkim ispitnim uzorcima A_5
- pri dugim ispitnim uzorcima A_{10} .

Pri upotrebi neproporcionalnog ispitnog uzorka, početne mjerne duljine L_0 (npr. $L_0 = 80$ mm), treba oznaki A dodati kao indeks vrijednost početne mjerne vrijednosti (npr. A_{80}).

Pri suživanju presjeka vrijede oznake:

- $\Delta S = S_0 - S$ mm² - suženje poprečnog presjeka
- $\Delta S_u = S_0 - S_u$ mm² - najveće suženje (nakon kidanja)
- $\psi = (\Delta S/S_0) \cdot 100$ % - postotno suženje
- $Z = (\Delta S_u/S_0) \cdot 100$ % - postotno suženje nakon kidanja (kontrakcija)

4. Oznake sila i nazivnih naprezanja



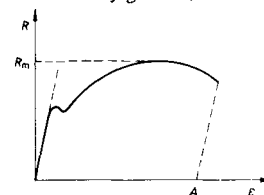
Dijagram $F, \Delta L$

Dijagram sile F u ovisnosti od produljenja ΔL snimamo neposredno na stroju za kidanje

- F - (vlačna) sila
- F_m - najveća sila

Pri određivanju najveće sile F_m mora brzina razmicanja čeljusti stroja za kidanje iznositi $\leq L_c$ mm/min (L_c v mm).

*



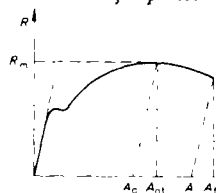
Dijagram R, ϵ

Nazivna naprezanja R izražena su silom F , dijeljenom s početnim presjekom S_0 .

V dijagramu R, ϵ dana su nazivna naprezanja R u ovisnosti o postotnom produljenju ϵ , sukladno s dijagramom sile F u ovisnosti od produljenja ΔL .

- $R = F/S_0$ - (vlačno) nazivno naprezanje
- $R_m = F_m/S_0$ - (vlačna) čvrstoća

5. Značajna postotna produljenja

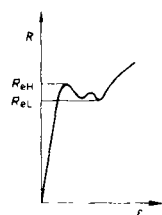


- A_{Rt} - ukupno postotno produljenje pri najvećoj sili
- A_g - neproporcionalno postotno produljenje pri najvećoj sili
- A_t - ukupno postotno produljenje u trenutku kidanja
- A - postotno produljenje nakon kidanja

6. Naprezanja tečenja

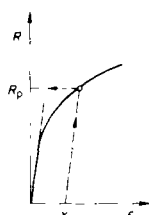
Naprezanja prirod-
nog tečenja R_e

gornje - R_{eH}
donje - R_{eL}
(npr. kod mekih
čelika)



Konvencionalno naprezanje tečenja R_p
(za materijale s kontinuiranim rastezanjem)

U dijagramu R, ϵ povučemo iz (odabrane) točke x na apscisi paralelu s početnim (linearnim) dijelom krivulje rastezanja. Presjek paralele s krivuljom rastezanja određuje konvencionalno naprezanje tečenja pri postotnom produljenju $\epsilon = x\%$, npr.:

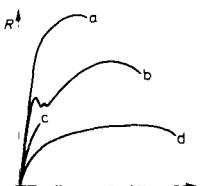


- $R_{p0.01}$ pri $\epsilon = 0.01\%$ ¹⁾,
- $R_{p0.2}$ pri $\epsilon = 0.2\%$ ²⁾,
- R_{p1} pri $\epsilon = 1\%$.

- 1 To je »tehnička granica elastičnosti«.
- 2 Dosada zvana »granica plastičnosti«.

*

Tok rastezanja u ovisnosti od naprezanja je za razne materijale različit i za njih karakterističan. Tako po obliku dijagrama R, ϵ možemo razlikovati materijale:



- a - tvrdi čelik
- b - mekhi čelik
- c - sivi lijev
- d - bakar

Žilavi materijali se nakon početnog elastičnog (linearnog) rastezanja rastežu do prekida vrlo plastično, i to kontinuirano (npr. bakar) ili u diskontinuitetu s pojavom tečenja pri stalnom naprezanju (npr. meki čelik).

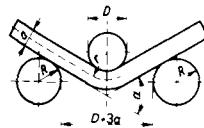
Krčki materijali se po početnom elastičnom rastezanju kidaju bez (značajnijeg) plastičnog rastezanja (npr. sivi lijev).

Plastični materijali se rastežu samo neznatno elastično (npr. olovo) ili su gotovo neelastični (npr. asfalt).

Ispitivanje savijanjem (JUS C.A4.005 - 1985)

Ispitni uzorci imaju pravokutni, kvadratni ili okrugli presjek, a ispituju se i čitavi profili. Debljina a neka bude veća od 30 mm. Širina pravokutnih uzoraka iznosi 25 do 50 mm. Preporučuje se da duljina l ispitnog uzorka bude

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2}$$



Za savijanje služe dva oslonca s polumjerima R :

- za $a \leq 12$ mm $R = 25$ mm
- za $a > 12$ mm $R = 50$ mm

Promjer D valjka kojim savijamo uzorak uzima se prema posebnim propisima za materijal koji se ispituje.

Savijanje mora biti polagano i neprekidno do određenog kuta savijanja α , odnosno do pojave prvih pukotina na vanjskoj strani uzorka.

*

Sivi lijev ispituje se u pogledu čvrstoće na savijanje sirovim ili obrađenim uzorcima u obliku posebno odlivenih ravnih okruglih štapova promjera d_0 , koje oslanjamo o dva valjkasta oslonca s razmakom l (između osi oslonaca promjera D), a u sredini ih opterećujemo silom F do prekida. Čvrstoća sivog lijeva na savijanje σ_{sm} slijedi iz najveće sile F_{sm} pri lomu

$$\sigma_{sm} = F_{sm}/4W \quad W = \pi d_0^3/32 \approx 0.1 d_0^3$$

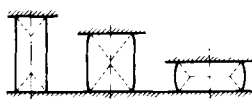
Mjere uzoraka i uredaja (prema JUS C.A4.014 - 1973) u mm

Promjer ispit. uzorka d_0	Duljina ispit. uzorka	Oslonci		Polumjer pritiskivača r
		promjer D	razmak l	
13	300	20 ... 30	260	10 ... 15
20	450	50 ... 60	400	
30	650		600	
45	1000		900	

Tlačno ispitivanje (JUS C.A4.006 - 1954)

Za tlačni pokus služi ispitni uzorak koji je za kovine redovito okruglog presjeka, promjera d_0 i visine $h_0 = 2d_0$ (izuzetno je $h_0 = d_0 \dots 3d_0$). Za nekovine uzorak je obično kocka.

Uzorak se tlačni lakim i čestim udarcima čekićem ili prešom. Pri tome se pojavljuje (tlačni stožac« po kojem se materijal širi u stranu. Uzorak se tlačni do određene visine (u hladnom stanju do $h_0/2$, u vrućem stanju do $h_0/3$), odnosno dok se na boku ne pojave pukotine.



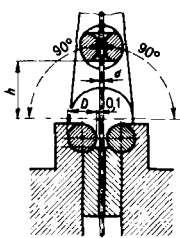
Ispitivanje žica torzijom (JUS C.A4.016 – 1986)

U posebnom uređaju sučemo žicu oko vlastite osi do loma. Da bi žica pri tom ostala ravna, opterećujemo je vlačnom silom koja u žici ne smije izazvati naprezanja većeg od 2% čvrstoće čelične žice, odn. 5% čvrstoće žice od neželjeznih kovina. Slobodna duljina žice l i najveća brzina sukanja n iznose:

premjor žice d (mm)	0,3 ... (1	1 ... (1,5	1,5 ... (3	3 ... (5	5 ... (7
slobodna duljina l	$200 d$	$100 d$	$100 d$	$100 d$	$50 d$
brzina sukanja n (okr./s)					
- pri čeliku	3	1	1	1	0,5
- pri Cu i Cu-legurama	5	2	1,5	1	0,5

Broj okretaja žice do loma mjera je njene sposobnosti pri ispitivanju torzijom.

Ispitivanje žica izmjeničnim pregibanjem (JUS C.A4.018 – 1986)



Ispitivani komad žice stegnemo u pokusnu napravu u kojoj pregibamo žicu naizmjenice u jednu i drugu stranu do njezina loma.

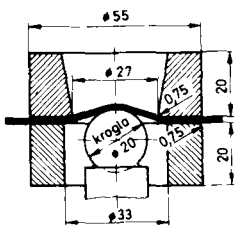
Karakteristične su mjere pokusne naprave (u mm)

d	D	h	d	D	h
0,3 ... 0,5	2,5	15	2,0 ... 3,0	15,0	25
0,5 ... 0,7	3,5	15	3,0 ... 4,0	20,0	35
0,7 ... 1,0	5,0	15	4,0 ... 6,0	30,0	50
1,0 ... 1,5	7,5	20	6,0 ... 8,0	40,0	75
1,5 ... 2,0	10,0	20	8,0 ... 10,0	50,0	100

Žicu pregibamo preko valjaka od kaljenog čelika. Jednim pregibom smatramo savijanje iz početnog (srednjeg) položaja za 90° u jednu stranu i natrag do početnog položaja (a obavljamo ga u 1 s). Broj pregiba do prekida žice mjera je sposobnosti žice za izmjenično pregibanje.

Ispitivanje žica navijanjem (JUS C.A4.019 – 1986).

Ispitivanje sposobnosti za izvlačenje (JUS C.A4.021 – 1962).



Sposobnost materijala za izvlačenje ispituje se utiskivanjem čelične kuglice u limeni ispitni uzorak.

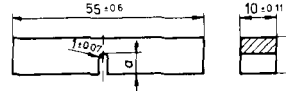
Za limove i trake debljine do 2 mm služi naprava po Erichsensu, koja se sastoji od kaljene čelične kuglice za utiskivanje, matrice i držača limenog uzorka.

Kuglica se polagano i jednoliko (brzinom oko 0,1 mm/s) utiskuje u uzorak do pojave prvih pukotina. Kao mjera sposobnosti materijala za izvlačenje navodi se postignuta dubina.

Ispitivanjem udarom po Charpyju

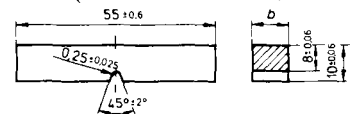
Za ispitivanjem udarom na savijanje po metodi Charpyja upotrebljavaju se ispitni uzorci sa zarezom. Tim se postupkom određuje žilavost materijala pri udaru (s obzirom na utjecaj zarez).

Ispitni uzorak s U-zarezom (JUS C.A4.004 – 1984)



$a = 5$ mm – standardno
 $a = 3$ (2) mm – plitki zarez } $\pm 0,09$ mm

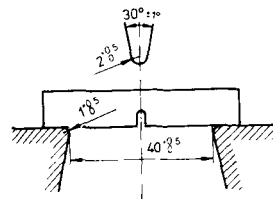
Ispitni uzorak s V-zarezom (JUS C.A4.025 – 1984)



$b = 10$ mm – standardno
 $b = 7,5$ (5) mm – uski uzorak } $\pm 0,11$ mm

Ispitni se uzorak prelama batom (njihalom) koji pri padu udari u sredinu uzorka, poduprtoga na oslonce.

Udarna energija bata $Gh_1 = 300$ (150, 100) J.



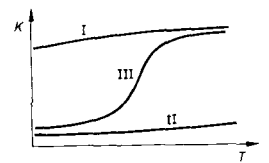
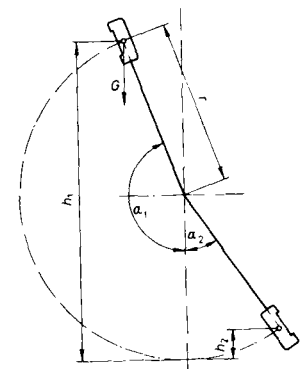
Udarni rad njihajnog bata težine G , koji pada s visine h_1 te dospije pri lomu na visinu h_2 iznosi

$$K = G(h_1 - h_2)$$

Oznaka udarnog rada pri nazivnoj energiji 300 J i pri standardnom ispitnom uzorku je:

- pri uzorku s U-zarezom: KU
- pri uzorku s V-zarezom: KV

Udarna žilavost u općem slučaju raste s temperaturom. U širokom su temperaturnom području udarno vrlo žilave kovine koje možemo gnječiti: Al, Cu, Ni, austenitni čelik (I); neznatno žilave su krhke materije: staklo, keramika, vrlo tvrdi čelici (II). Za obične čelike – nelegirane i malo legirane (III) značajna je velika ovisnost udarne žilavosti od temp.: pri višoj su vrlo žilavi, pri niskoj veoma krhki.



ISPITIVANJE TRAJNE ČVRSTOĆE

Ispitivanje trajne statičke čvrstoće

Konstantnom (statičkom) silom dugotrajno opterećeni materijal počeo će se pod određenim opterećenjem, u ovisnosti od temperature, postupno rastezati. Ova se pojava, koju nazivamo *puženje*, zaustavlja, ako se materijal pri rastezanju učvrsti, dok se u protivnom nastavlja do loma.

Temperatura pri kojoj se pojavljuje puženje ovisna je o materijalu (npr. pri čeliku od 200 °C naviše; pri olovu ili plastici već kod okolišne temperature).

Najveće naprezanje kod kojega se pri određenoj temperaturi konstantnom silom opterećeni materijal više trajno ne rasteže (ne puže) nazivamo *trajnom statičkom čvrstoćom materijala*.

Dugotrajnim je pokusima (100 000 h) ustanovljeno, da stvarnu trajnu statičku čvrstoću ni nakon tako dugog vremena ne možemo odrediti. Odrediti možemo u svakom slučaju samo vremenska statička svojstva čvrstoće koja vrijede za određeno ograničeno trajanje opterećenja.

Rezultati kratkotrajnih ispitivanja ne mogu se jednostavno upotrebiti pri dugotrajnim opterećenjima. Stoga je preporučljivo trajanje statičkog ispitivanja

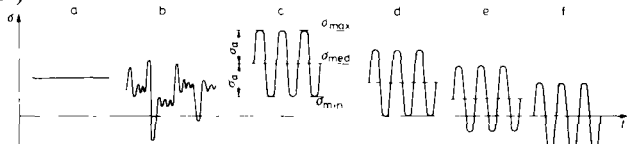
za kovine $t = 100\ 000\ \text{h}$
za plastične materijale $t = 10\ 000\ \text{h}$.

Vremensko naprezanje tečenja $R_p^{e/H/T}$ je naprezanje pri kojem se materijal rastege do određenog postotnog produljenja ϵ (npr. 1%) za određeno vrijeme t (npr. 100 000 h) pri određenoj temperaturi T (npr. 400 °C), što bi se za navedeni slučaj napisalo $R_p^{1/(100000)/400}$.

Vremenska statična čvrstoća $R_m^{e/H/T}$ je najveće naprezanje koje materijal podnosi određeno vrijeme t (npr. 100 000 h) pri određenoj temperaturi T (npr. 600 °C). U navedenom slučaju označujemo to $R_m^{100\ 000/600}$.

Ispitivanje dinamičke čvrstoće (JUS C.A4.035 – 1966)

Čvrstoća je materijala znatno manja ako materijal u toku vremena t nije jednoliko opterećen (primjer »a« na donjoj slici), već nejednoliko (primjer »b«).



Potpuno nejednolika opterećenja nisu prikladna za uspoređivanje ispitnih rezultata. Zato određujemo dinamička svojstva čvrstoće materijala za sinusoidna opterećenja, kod kojih naprezanje koleba za otklon (amplitudu) σ_a (τ_a) od srednjeg naprežanja σ_{med} (τ_{med}) (primjer »c«). Ta naprežanja mogu biti:

- a) istosmjerna (primjeri »c« i »d«) b) izmjenična (primjeri »e« i »f«).

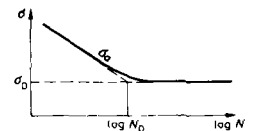
Od raznih sinusoidnih opterećenja posebno su značajna:

1. *pulzirajuće ili trajno dinamičko opterećenje* (primjer »d« na slici na str. 320), pri kojem naprezanje σ titra (pulzira) za amplitudu σ_a između vrijednosti 0 i σ_{max} oko srednjeg naprežanja σ_{med} ; $\sigma_a = \sigma_{med} = \sigma_{max}/2$;

2. *njihajuće ili kolebljivo dinamičko opterećenje* (primjer »f«), pri kojem naprezanje σ koleba za amplitudu σ_a između vrijednosti $-\sigma_{max}$ i $+\sigma_{max}$; $\sigma_a = \sigma_{max}$, pri čemu je srednje naprežanje $\sigma_{med} = 0$.

Trajnost materijala ovisi o broju titraja opterećenja. Smanjivanjem amplitude naprežanja σ_a pri dinamičkom opterećenju povećava se broj titraja N , koje materijal podnosi bez loma.

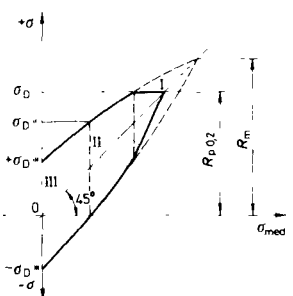
Ovisnost $\sigma_a = f(N)$ prikazuje »Wöhlerova krivulja« (na slici desno). Wöhlerova se krivulja pri određenom broju titraja N_D (10^7 za čelik, 10^8 za lake kovine) približava stalnoj vrijednosti σ_D , kojom definiramo »dinamičku čvrstoću«.



Dinamička čvrstoća σ_D je najveće naprežanje σ_{max} pri kojem se materijal ni pri bilo kakvom povećanju broja titraja opterećenja ne bi više slomio.

Dijagram dinamičke čvrstoće (Smithov dijagram) prikazuje dinamičku čvrstoću σ_D u ovisnosti o srednjem naprežanju σ_{med} za razna dinamička opterećenja:

- I $\sigma_D' = R_p^{0.2}$ – za mirno opterećenje
II $0 \dots \sigma_D''$ – za pulzirajuće opterećenje
III $-\sigma_D''' \dots + \sigma_D''''$ – za njihajuće opterećenje.



Crta koja u dijagramu ide iz ishodišta pod kutom od 45° prikazuje srednje opterećenje. Udaljenosti od nje prema gore ili dolje do gornjega odnosno donjega graničnog naprežanja jesu otkloni naprežanja.

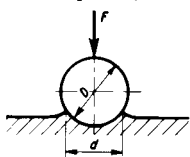
Budući da materijal u konstrukcijama po pravilu ne smijemo opterećivati iznad naprežanja tečenja $R_p^{0.2}$ je tom granicom u dijagramu dinamičke čvrstoće ograničeno područje dopuštenog opterećenja.

Na dinamičku čvrstoću veoma jako utječe djelovanje zarez (nejednolika razdioba naprežanja), što može čvrstoću znatno sniziti ispod vrijednosti koju materijal ima bez zarez. Zato je dinamička čvrstoća zavarenih spojeva (zbog zavarnog »zarez«) ili predmeta s grubo obrađenom površinom (koja se zapravo sastoji od mnogih sitnih »zarez«) mnogo manja.

ISPITIVANJE TVRDOĆE

Mjera za tvrdoću ovisi o postupku ispitivanja.

1. Ispitivanje tvrdoće po Brinell HB (JUS C.A4.003 – 1985 i 032 – 1986)



U čistu se i ravnu površinu pokusnog materijala (kovine) utiskuje određenom silom $F(N)$ kuglica promjera $D(mm)$. Mjeri se promjer otiska $d(mm)$. Mjera Brinellove tvrdoće iznosi

$$HB = \frac{0,102 F}{A} = 0,102 F \frac{2}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

gdje je A površina otiska (kalote).

Vrijednosti Brinellove tvrdoće HB za pojedine promjere otiska d sabrane su u tablicama na str. 324 i 325. Odlučujuća je prosječna vrijednost koja je rezultat barem dvaju mjerenja.

Kuglica je: do tvrdoće 450 HB od zakaljenog čelika, do tvrdoće 650 HB od tvrdog metala. (Tvrdoća iznad 650 HB ispituje se po Vickersu – str. 326).

Sila pritiska F mora rasti do nazivne 2...8 s, a djelovanje nazivne sile mora trajati 10...15 s.

Upotrebljavaju se slijedeće sile pritiska $F(N)$ odn. odgovarajuće vrijednosti $0,102 F$ (u zagradi) i promjeri kuglica $D(mm)$ – raspoređene u skupine po vrijednostima $0,102 F/D^2$:

$\frac{0,102 F}{D^2}$	$F(N)$ ($0,102 F$)				
	10	5	za D mm: 2,5	2	1
30	29420 (3000)	7355 (750)	1839 (187,5)	1177 (120)	294,2 (30)
15	14710 (1500)	–	–	–	–
10	9807 (1000)	2452 (250)	612,9 (62,5)	392,2 (40)	98,07 (10)
5	4903 (500)	1226 (125)	306,5 (31,25)	196,1 (20)	49,03 (5)
2,5	2452 (250)	612,9 (62,5)	153,2 (15,625)	98,07 (10)	24,52 (2,5)
1,25	1226 (125)	306,5 (31,25)	76,61 (7,8125)	49,03 (5)	12,26 (1,25)
1	980,7 (100)	245,2 (25)	61,29 (6,25)	39,23 (4)	9,807 (1)

Primjeri oznaka tvrdoće po Brinellu:

350 HBS 5/750 – znači tvrdoću 350 HB pri upotrebi čelične kuglice promjera $D = 5$ mm i pri vrijednosti $0,102 F = 750$ (tj. pri sili pritiska $F = 7355$ N).

Vrijednosti $0,102 F/D^2$ odabiremo s obzirom na vrstu materijala ispitnog uzorka i njegovoj tvrdoći:

Materijal	Tvrdoća HB	$0,102 F/D^2$
čelik		30
lijevano željezo	< 140	10
	> 140	30
bakar i bakrene slitine	< 35	5
	35...200	10
	> 200	30
lake kovine i slitine	< 35	1,25 2,5
	35...80	5 10 15
	> 80	10 15
olovo i kositar		1 1,25

Najmanja debljina uzorka (u mm) u ovisnosti od promjera kuglice D i promjera otiska d :

d mm	D mm				d mm	D mm	
	1	2	2,5	5		5	10
0,2	0,08				2,4	2,46	1,17
0,3	0,18				2,6	2,92	1,38
0,4	0,33				2,8	3,43	1,60
0,5	0,54	0,25			3,0	4,00	1,84
0,6	0,80	0,37	0,29		3,2		2,10
0,7		0,51	0,40		3,4		2,38
0,8		0,67	0,53		3,6		2,68
0,9		0,86	0,67		3,8		3,00
1,0		1,07	0,83		4,0		3,34
1,1		1,32	1,02		4,2		3,70
1,2		1,60	1,23	0,58	4,4		4,08
1,3			1,46	0,69	4,6		4,48
1,4			1,72	0,80	4,8		4,91
1,5			2,00	0,92	5,0		5,36
1,6				1,05	5,2		5,83
1,7				1,19	5,4		6,33
1,8				1,34	5,6		6,86
1,9				1,50	5,8		7,42
2,0				1,67	6,0		8,00
2,2				2,04			

Za čelik možemo iz poznate Brinellove tvrdoće HB približno odrediti njegovu čvrstoću $R_m(N/mm^2)$

za ugljični čelik $R_m \approx 3,6$ HB
za legirani čelik – Cr $R_m \approx 3,5$ HB
– Cr–Ni $R_m \approx 3,4$ HB

Usporedbena tablica (približna) između čvrstoće i tvrdoće čelika nalazi se na str. 322 i 323.

Tvrdoća po

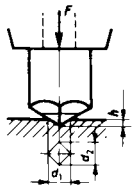
Brinellu HB

Promjer otiska d mm					Tvrdoća po Brinellu HB						
pri promjeru kuglice D mm:					za vrijednost $0,102F/D^2$:						
10	5	2,5	2	1	30	15	10	5	2,5	1,25	1
2,40	1,20	0,60	0,48	0,24	653	327	218	109	54,5	27,2	21,8
2,45			0,49		627	313	209	104	52,2	26,1	20,9
2,50	1,25		0,50	0,25	601	301	200	100	50,1	25,1	20,0
2,55			0,51		578	289	193	96,3	48,1	24,1	19,3
2,60	1,30	0,65	0,52	0,26	555	278	185	92,6	46,3	23,1	18,5
2,65			0,53		534	267	178	89,0	44,5	22,3	17,8
2,70	1,35		0,54	0,27	514	257	171	85,7	42,9	21,4	17,1
2,75			0,55		495	248	165	82,6	41,3	20,6	16,5
2,80	1,40	0,70	0,56	0,28	477	239	159	79,6	39,8	19,9	15,9
2,85			0,57		461	230	154	76,8	38,4	19,2	15,4
2,90	1,45		0,58	0,29	444	222	148	74,1	37,0	18,5	14,8
2,95			0,59		429	215	143	71,5	35,8	17,9	14,3
3,00	1,50	0,75	0,60	0,30	415	207	138	69,1	34,6	17,3	13,8
3,05			0,61		401	200	134	66,8	33,4	16,7	13,4
3,10	1,55		0,62	0,31	388	194	129	64,6	32,3	16,2	12,9
3,15			0,63		375	188	125	62,5	31,3	15,6	12,5
3,20	1,60	0,80	0,64	0,32	363	182	121	60,5	30,3	15,1	12,1
3,25			0,65		352	176	117	58,6	29,3	14,7	11,7
3,30	1,65		0,66	0,33	341	170	114	56,8	28,4	14,2	11,4
3,35			0,67		331	165	110	55,1	27,5	13,8	11,0
3,40	1,70	0,85	0,68	0,34	321	160	107	53,4	26,7	13,4	10,7
3,45			0,69		311	156	104	51,8	25,9	13,0	10,4
3,50	1,75		0,70	0,35	302	151	101	50,3	25,2	12,6	10,1
3,55			0,71		293	147	97,7	48,9	24,4	12,2	9,77
3,60	1,80	0,90	0,72	0,36	285	142	95,0	47,5	23,7	11,9	9,50
3,65			0,73		277	138	92,3	46,1	23,1	11,5	9,23
3,70	1,85		0,74	0,37	269	135	89,7	44,9	22,4	11,2	8,97
3,75			0,75		262	131	87,2	43,6	21,8	10,9	8,72
3,80	1,90	0,95	0,76	0,38	255	127	84,9	42,4	21,2	10,6	8,49
3,85			0,77		248	124	82,6	41,3	20,6	10,3	8,26
3,90	1,95		0,78	0,39	241	121	80,4	40,2	20,1	10,0	8,04
3,95			0,79		235	117	78,3	39,1	19,6	9,79	7,83
4,00	2,00	1,00	0,80	0,40	229	114	76,3	38,1	19,1	9,53	7,63
4,05			0,81		223	111	74,3	37,1	18,6	9,29	7,43
4,10	2,05		0,82	0,41	217	109	72,4	36,2	18,1	9,05	7,24
4,15			0,83		212	106	70,6	35,3	17,6	8,82	7,06
4,20	2,10	1,05	0,84	0,42	207	103	68,8	34,4	17,2	8,61	6,88
4,25			0,85		201	101	67,1	33,6	16,8	8,39	6,71

Promjer otiska d mm					Tvrdoća po Brinellu HB						
pri promjeru kuglice D mm:					za vrijednost $0,102 F/D^2$:						
10	5	2,5	2	1	30	15	10	5	2,5	1,25	1
4,30	2,15		0,86	0,43	197	98,3	65,5	32,8	16,4	8,19	6,55
4,35			0,87		192	95,9	63,9	32,0	16,0	7,99	6,39
4,40	2,20	1,10	0,88	0,44	187	93,6	62,4	31,2	15,6	7,80	6,24
4,45			0,89		183	91,4	60,9	30,5	15,2	7,62	6,09
4,50	2,25		0,90	0,45	179	89,3	59,5	29,8	14,9	7,44	5,95
4,55			0,91		174	87,2	58,1	29,1	14,5	7,27	5,81
4,60	2,30	1,15	0,92	0,46	170	85,2	56,8	28,4	14,2	7,10	5,68
4,65			0,93		167	83,3	55,5	27,8	13,9	6,94	5,55
4,70	2,35		0,94	0,47	163	81,4	54,3	27,1	13,6	6,78	5,43
4,75			0,95		159	79,6	53,0	26,5	13,3	6,63	5,30
4,80	2,40	1,20	0,96	0,48	156	77,8	51,9	25,9	13,0	6,48	5,19
4,85			0,97		152	76,1	50,7	25,4	12,7	6,34	5,07
4,90	2,45		0,98	0,49	149	74,4	49,6	24,8	12,4	6,20	4,96
4,95			0,99		146	72,8	48,6	24,3	12,1	6,07	4,86
5,00	2,50	1,25	1,00	0,50	143	71,3	47,5	23,8	11,9	5,94	4,75
5,05			1,01		140	69,8	46,5	23,3	11,6	5,81	4,65
5,10	2,55		1,02	0,51	137	68,3	45,5	22,8	11,4	5,69	4,55
5,15			1,03		134	66,9	44,6	22,3	11,1	5,57	4,46
5,20	2,60	1,30	1,04	0,52	131	65,5	43,7	21,8	10,9	5,46	4,37
5,25			1,05		128	64,1	42,8	21,4	10,7	5,34	4,28
5,30	2,65		1,06	0,53	126	62,8	41,9	20,9	10,5	5,24	4,19
5,35			1,07		123	61,5	41,0	20,5	10,3	5,13	4,10
5,40	2,70	1,35	1,08	0,54	121	60,3	40,2	20,1	10,1	5,03	4,02
5,45			1,09		118	59,1	39,4	19,7	9,85	4,93	3,94
5,50	2,75		1,10	0,55	116	57,9	38,6	19,3	9,66	4,83	3,86
5,55			1,11		114	56,8	37,9	18,9	9,47	4,73	3,79
5,60	2,80	1,40	1,12	0,56	111	55,7	37,1	18,6	9,28	4,64	3,71
5,65			1,13		109	54,6	36,4	18,2	9,10	4,55	3,64
5,70	2,85		1,14	0,57	107	53,5	35,7	17,8	8,92	4,46	3,57
5,75			1,15		105	52,5	35,0	17,5	8,75	4,38	3,50
5,80	2,90	1,45	1,16	0,58	103	51,5	34,3	17,2	8,59	4,29	3,43
5,85			1,17		101	50,5	33,7	16,8	8,42	4,21	3,37
5,90	2,95		1,18	0,59	99,2	49,6	33,1	16,5	8,26	4,13	3,31
5,95			1,19		97,3	48,7	32,4	16,2	8,11	4,05	3,24
6,00	3,00	1,50	1,20	0,60	95,5	47,7	31,8	15,9	7,96	3,98	3,18

2. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu HV (JUS C.A4.033 – 1984)

U površinu ispitivanog materijala utisnemo dijamantni šiljak u obliku piramide (s kutom 136°) proizvoljnom silom F .



Vickersova tvrdoća HV se računa iz sile pritiska F (N) i površine utisnutog plašta piramide A (mm²), koju određujemo mjerenjem dijagonala d_1 i d_2 (mm)

$$HV = 0,102 \frac{F}{A} \quad A = \frac{d^2}{2 \sin(136/2)} \quad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

Dijagonale d_1 i d_2 mjerimo točnošću od $\pm 0,001$ mm.

Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje 1,5 d .

Po pravilu upotrebljavamo slijedeće sile pritiska F , koje su raspoređene po zaokruženim vrijednostima 0,102 F dodajući ih (za prikaz upotrebjene sile pritiska) oznaci tvrdoće po Vickersu HV:

F N	49,03	98,07	196,1	294,2	490,3	980,7
0,102 F	5	10	20	30	50	100
HV	HV 5	HV 10	HV 20	HV 30	HV 50	HV 100

Pri mjerenju tvrdoće veoma tankih slojeva upotrebljavamo sile pritiska od 2...50 N; pri mjerenju mikrotvrdoće (tvrdoće sastavina zrnatih materijala) i manje sile od 2 F .

Vrijednosti Vickersove tvrdoće HV (HV 5, HV 10, HV 100) sabrane su u tablicama na str. 326 do 329.

Za jednake otiske nekon drugom silom F' iznosi Vickersova tvrdoća

$$HV' = HV \cdot \frac{F'}{F}$$

Tvrdoća po Vickersu HV je do vrijednosti 250 HV brojčano jednaka tvrdoći po Brinellu HB

$$250 HV = 250 HB$$

povrh ove vrijednosti raste Vickersova tvrdoća brže nego Brinellova, tako da je

$$420 HV \approx 400 HB$$

Tvrdoća po Vickersu HV 5

pri sili pritiska $F = 49,03$ N (0,102 $F = 5$)

za promjere otisaka $d = 0,056 \dots 0,099$ mm

d mm	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
0,05						2 957	2 854	2 756	2 664	
0,06	2 576	2 492	2 412	2 336	2 264	2 195	2 129	2 066	2 005	2 948
0,07	1 892	1 839	1 789	1 740	1 693	1 648	1 605	1 564	1 524	1 486
0,08	1 449	1 413	1 379	1 346	1 314	1 283	1 254	1 225	1 197	1 171
0,09	1 145	1 120	1 096	1 072	1 049	1 027	1 006	985	965	946

Tvrdoća po Vickersu HV 10

pri sili pritiska $F = 98,07$ N (0,102 $F = 10$)
za promjere otisaka $d = 0,100 \dots 0,549$ mm

d mm	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
0,10	1 855	1 818	1 782	1 748	1 715	1 682	1 651	1 620	1 590	1 561
0,11	1 533	1 505	1 478	1 452	1 427	1 402	1 378	1 355	1 332	1 310
0,12	1 288	1 267	1 246	1 226	1 206	1 187	1 168	1 150	1 132	1 114
0,13	1 097	1 081	1 064	1 048	1 033	1 018	1 003	988	974	960
0,14	946	933	920	907	894	882	870	858	847	835
0,15	824	813	803	792	782	772	762	752	743	734
0,16	724	715	707	698	690	681	673	665	657	649
0,17	642	634	627	620	613	606	599	592	585	579
0,18	572	566	560	554	548	542	536	530	525	519
0,19	514	508	503	498	493	488	483	478	473	468
0,20	464	459	454	450	446	441	437	433	429	425
0,21	421	417	413	409	405	401	397	394	390	387
0,22	383	380	376	373	370	366	363	360	357	354
0,23	351	348	345	342	339	336	333	330	327	325
0,24	322	319	317	314	311	309	306	304	302	299
0,25	297	294	292	290	287	285	283	281	279	276
0,26	274	272	270	268	266	264	262	260	258	256
0,27	254	253	251	249	247	245	243	242	240	238
0,28	237	235	233	232	230	228	227	225	224	222
0,29	221	219	218	216	215	213	212	210	209	207
0,30	206	205	203	202	201	199	198	197	195	194
0,31	193	192	191	189	188	187	186	185	183	182
0,32	181	180	179	178	177	176	174	173	172	171
0,33	170	169	168	167	166	165	164	163	162	161
0,34	160	159	159	158	157	156	155	154	153	152
0,35	151	151	150	149	148	147	146	146	145	144
0,36	143	142	142	141	140	139	138	138	137	136
0,37	135	135	134	133	133	132	131	130	130	129
0,38	128	128	127	126	126	125	124	124	123	123
0,39	122	121	121	120	119	119	118	118	117	116
0,40	116	115	115	114	114	113	113	112	111	111
0,41	110	110	109	109	108	108	107	107	106	106
0,42	105	105	104	104	103	103	102	102	101	101
0,43	100	99,8	99,4	98,9	98,5	98,0	97,6	97,1	96,7	96,2
0,44	95,8	95,4	94,9	94,5	94,1	93,6	93,2	92,8	92,4	92,0
0,45	91,6	91,2	90,8	90,4	90,0	89,6	89,2	88,8	88,4	88,0
0,46	87,6	87,3	86,9	86,5	86,1	85,8	85,4	85,0	84,7	84,3
0,47	84,0	83,6	83,2	82,9	82,5	82,2	81,8	81,5	81,2	80,8
0,48	80,5	80,2	79,8	79,5	79,2	78,8	78,5	78,2	77,9	77,6
0,49	77,2	76,9	76,6	76,3	76,0	75,7	75,4	75,1	74,8	74,5
0,50	74,2	73,9	73,6	73,3	73,0	72,7	72,4	72,1	71,9	71,6
0,51	71,3	71,0	70,7	70,5	70,2	69,9	69,7	69,4	69,1	68,8
0,52	68,6	68,3	68,1	67,8	67,5	67,3	67,0	66,8	66,5	66,3
0,53	66,0	65,8	65,5	65,3	65,0	64,8	64,6	64,3	64,1	63,8
0,54	63,6	63,4	63,1	62,9	62,7	62,4	62,2	62,0	61,8	61,5

Tvrdoća po Vickersu HV 10
pri sili pritiska $F = 98,07 \text{ N}$ ($0,102 F = 100$)
za promjere otisaka $d = 0,550 \dots 0,999 \text{ mm}$

$d \text{ mm}$	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
0.55.	61,3	61,1	60,9	60,6	60,4	60,2	60,0	59,8	59,6	59,3
0.56.	59,1	58,9	58,7	58,5	58,3	58,1	57,9	57,7	57,5	57,3
0.57.	57,1	56,9	56,7	56,5	56,3	56,1	55,9	55,7	55,5	55,3
0.58.	55,1	54,9	54,7	54,6	54,4	54,2	54,0	53,8	53,6	53,5
0.59.	53,3	53,1	52,9	52,7	52,6	52,4	52,2	52,0	51,9	51,7
0.60.	51,5	51,3	51,2	51,0	50,8	50,7	50,5	50,3	50,2	50,0
0.61.	49,8	49,7	49,5	49,4	49,2	49,0	48,9	48,7	48,6	48,4
0.62.	48,2	48,1	47,9	47,8	47,6	47,5	47,3	47,2	47,0	46,9
0.63.	46,7	46,6	46,4	46,3	46,1	46,0	45,8	45,7	45,6	45,4
0.64.	45,3	45,1	45,0	44,9	44,7	44,6	44,4	44,3	44,2	44,0
0.65.	43,9	43,8	43,6	43,5	43,4	43,2	43,1	43,0	42,8	42,7
0.66.	42,6	42,4	42,3	42,2	42,1	41,9	41,8	41,7	41,6	41,4
0.67.	41,3	41,2	41,1	40,9	40,8	40,7	40,6	40,5	40,3	40,2
0.68.	40,1	40,0	39,9	39,8	39,6	39,5	39,4	39,3	39,2	39,1
0.69.	39,0	38,8	38,7	38,6	38,5	38,4	38,3	38,2	38,1	38,0
0.70.	37,8	37,7	37,6	37,5	37,4	37,3	37,2	37,1	37,0	36,9
0.71.	36,8	36,7	36,6	36,5	36,4	36,3	36,2	36,1	36,0	35,9
0.72.	35,8	35,7	35,6	35,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35,0	34,9
0.73.	34,8	34,7	34,6	34,5	34,4	34,3	34,2	34,1	34,0	34,0
0.74.	33,9	33,8	33,7	33,6	33,5	33,4	33,3	33,2	33,1	33,1
0.75.	33,0	32,9	32,8	32,7	32,6	32,5	32,4	32,4	32,3	32,2
0.76.	32,1	32,0	31,9	31,9	31,8	31,7	31,6	31,5	31,4	31,4
0.77.	31,3	31,2	31,1	31,0	31,0	30,9	30,8	30,7	30,6	30,6
0.78.	30,5	30,4	30,3	30,2	30,2	30,1	30,0	29,9	29,9	29,8
0.79.	29,7	29,6	29,6	29,5	29,4	29,3	29,3	29,2	29,1	29,0
0.80.	29,0	28,9	28,8	28,8	28,7	28,6	28,5	28,5	28,4	28,3
0.81.	28,3	28,2	28,1	28,1	28,0	27,9	27,9	27,8	27,7	27,6
0.82.	27,6	27,5	27,4	27,4	27,3	27,2	27,2	27,1	27,0	27,0
0.83.	26,9	26,9	26,8	26,7	26,7	26,6	26,5	26,5	26,4	26,3
0.84.	26,3	26,2	26,2	26,1	26,0	26,0	25,9	25,9	25,8	25,7
0.85.	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	25,4	25,3	25,3	25,2	25,1
0.86.	25,1	25,0	25,0	24,9	24,8	24,8	24,7	24,7	24,6	24,6
0.87.	24,5	24,4	24,4	24,3	24,3	24,2	24,2	24,1	24,1	24,0
0.88.	23,9	23,9	23,8	23,8	23,7	23,7	23,6	23,6	23,5	23,5
0.89.	23,4	23,4	23,3	23,3	23,2	23,2	23,1	23,0	23,0	22,9
0.90.	22,9	22,8	22,8	22,7	22,7	22,6	22,6	22,5	22,5	22,4
0.91.	22,4	22,3	22,3	22,2	22,2	22,2	22,1	22,1	22,0	22,0
0.92.	21,9	21,9	21,8	21,8	21,7	21,7	21,6	21,6	21,5	21,5
0.93.	21,4	21,4	21,3	21,3	21,3	21,2	21,2	21,1	21,1	21,0
0.94.	21,0	20,9	20,9	20,9	20,8	20,8	20,7	20,7	20,6	20,6
0.95.	20,5	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,2
0.96.	20,1	20,1	20,0	20,0	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,8
0.97.	19,7	19,7	19,6	19,6	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,3
0.98.	19,3	19,3	19,2	19,2	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0	19,0
0.99.	18,9	18,9	18,8	18,8	18,8	18,7	18,7	18,6	18,6	18,6

Tvrdoća po Vickersu HV 100
pri sili pritiska $F = 980,7 \text{ N}$ ($0,102 F = 100$)
za promjere otisaka $d = 1,00 \dots 1,99 \text{ mm}$

$d \text{ mm}$	...0	...1	...2	...3	...4	...5	...6	...7	...8	...9
1.0.	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
1.1.	153	151	148	145	143	140	138	135	133	131
1.2.	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
1.3.	110	108	106	105	103	102	100	98,8	97,4	96,0
1.4.	94,6	93,3	92,0	90,7	89,4	88,2	87,0	85,8	84,7	83,5
1.5.	82,4	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,2	74,3	73,4
1.6.	72,4	71,5	70,7	69,8	69,0	68,1	67,3	66,5	65,7	64,9
1.7.	64,2	63,4	62,7	62,0	61,3	60,6	59,9	59,2	58,5	57,9
1.8.	57,2	56,6	56,0	55,4	54,8	54,2	53,6	53,0	52,5	51,9
1.9.	51,4	50,8	50,3	49,8	49,3	48,8	48,3	47,8	47,3	46,8

Korekturni faktori

d – srednja dijagonala otiska, D – promjer ispitnog uzorka

d/D	Kuglasta površina		Vajkasta površina*			
	konveksna	konkavna	konveksna × konkavna	konveksna + konkavna	konveksna	konkavna
0,005	0,994	1,006	–	–	–	–
0,01	0,989	1,013	0,994	1,006	0,995	1,006
0,015	0,983	1,019	0,991	1,009	0,992	1,009
0,02	0,978	1,025	0,988	1,012	0,990	1,013
0,025	0,973	1,031	0,986	1,015	0,987	1,016
0,03	0,968	1,038	0,983	1,018	0,985	1,020
0,035	0,963	1,045	0,980	1,021	0,982	1,024
0,04	0,958	1,053	0,977	1,024	0,980	1,028
0,045	0,953	1,060	0,974	1,027	0,978	1,032
0,05	0,949	1,068	0,972	1,030	0,977	1,037
0,06	0,941	1,085	0,966	1,036	0,973	1,047
0,07	0,932	1,103	0,961	1,043	0,969	1,059
0,08	0,924	1,122	0,956	1,049	0,966	1,071
0,09	0,917	1,143	0,950	1,056	0,964	1,085
0,10	0,910	–	0,945	1,062	0,961	1,100
0,11	0,903	–	0,940	1,069	0,959	1,118
0,12	0,896	–	0,935	1,076	0,956	1,140
0,13	0,890	–	0,930	1,082	0,954	–
0,14	0,884	–	0,925	1,089	0,952	–
0,15	0,878	–	0,920	1,096	0,951	–
0,16	0,873	–	0,915	1,104	0,949	–
0,17	0,868	–	0,910	1,111	0,948	–
0,18	0,863	–	0,905	1,118	0,946	–
0,19	0,858	–	0,900	1,126	0,945	–
0,20	0,853	–	0,895	1,133	0,944	–
0,21	–	–	–	1,141	0,943	–
0,22	–	–	–	1,148	0,942	–

* × dijagonale otiska pod 45° s osi uzorka

+ jedna dijagonala otiska paralelna s osi uzorka

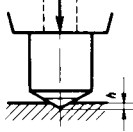
3. Ispitivanje tvrdoće kovina po Rockwellu (ISO, JUS C.A4.031-1980)

Pri Rockwellovoj metodi utiskuje se određenom silom u površinu ispitivanoga materijala posebnim utiskivač, pri čemu se ne mjeri površina otiska, već njegova dubina. Utiskivač je dijamantni stožac vršnoga kuta 120° (i polumjera zaokruženja 0,2 mm) ili čelična kuglica promjera 1,5875 mm.

Utiskivač se prisloni na površinu ispitivanoga materijala početnom silom F_0 , pri čemu se dobiva otisak dubine h_0 . To je ishodišni položaj za koji valja mjerilo za dubinu namjestiti na ishodišnu vrijednost »0«. Nato se poveća pritisak utiskivača (u vremenu od 4 do 8 s) dodatnom silom F_1 na ukupnu silu F . Vrijeme opterećenja ukupnom silom F ovisno je o naklonosti ispitivanoga materijala puženju i traje od 2 s (za materijal bez pojave puženja) do više od 30 s (za materijal s pojavama puženja). Potom se ukloni dodatna sila F_1 te se pri opterećenju početnom silom F_0 očita na mjerilu dubinu otiska e (mm).

Debljina ispitnog uzorka mora iznositi najmanje 8 e .

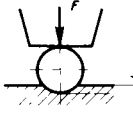
a) Određivanje tvrdoće stošcem



Najviše se upotrebljava postupak HRC (za kaljeni čelik i slitine), u posebnim slučajevima još i postupci HRA (za tvrde metale) i HR15N, HR30N i HR45N (za tanke uzorke ili male ispitne plohe). Pritisna sila i odgovarajuća tvrdoća su:

Postupak:	HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N
F_0 N	98,07	98,07	29,42	29,42	29,42
Sila F_1 N	1373	490,3	117,7	264,8	411,9
F N	1471	588,4	147,1	294,2	441,3
HR... =	100-500 e		100-1000 e		

b) Određivanje tvrdoće kuglicom



Najviše se upotrebljava postupak HRB (za nekaljeni čelik, mjed, broncu), za posebne svrhe još i postupci HRF (za hladno valjani tanki lim, bakar), HRG (za slitine bakra s fosforom) te HR15T, HR30T i HR45T (za vrlo tanke uzorke ili male ispitne plohe). Pritisna sila i tvrdoća su:

Postupak:	HRB	HRF	HRG	HR15T	HR30T	HR45T
F_0 N	98,07	98,07	98,7	29,42	29,42	29,42
Sila F_1 N	882,6	490,3	1373	117,7	264,8	411,9
F N	980,7	588,4	1471	147,1	294,2	441,3
HR... =	130-500 e			100-1000 e		

Područja upotrebljivosti postupka za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu pri različitim dubinama otiska e

e mm	HRC	HRA	HR 15N	HR 30N	HR 45N	HRB	HRF	HRG	HR 15T	HR 30T	HR 45T
0,010			90						90		
0,020		90	80	80					80	80	
0,030		85	70	70	70				70	70	70
0,040		80		60	60				60	60	60
0,050		75		50	50				50	50	50
0,060	70	70		40	40	100	100	100		40	40
0,070	65	65			30	95	95	95		30	30
0,080	60	60			20	90	90	90		20	20
0,090	55					85	85	85		10	10
0,100	50					80	80	80			
0,110	45					75	75	75			
0,120	40					70	70	70			
0,130	35					65	65				
0,140	30					60	60				
0,150	25					55					
0,160	20					50					
0,170						45					
0,180						40					
0,190						35					

Isprialjene vrijednosti tvrdoće po Rockwellu pri ispitivanju tvrdoće na valjkastim (konveksnim) ploham promjera d

HR...	d (mm)			HR...	d (mm)		
	10	16	25		10	16	25
HRC				HRB			
HRA				HRF			
				HRG			
20	-	22,5	21,5	30	-	34,5	32,5
30	-	32,0	31,0	40	-	44,0	42,5
40	42,5	41,5	41,0	50	-	53,5	52,0
50	52,0	51,0	50,5	60	65,0	63,0	62,0
60	61,0	60,5	60,5	70	74,0	72,5	71,5
70	71,0	70,5	70,5	80	83,5	82,0	81,5
80	80,5	80,5	80,0	90	93,0	91,5	91,0
90	90,0	90,0	90,0	100	102,5	101,5	100,5
HRN				HRT			
20	22,0	21,5	21,5	20	-	-	22,0
30	32,0	31,5	31,0	30	-	-	32,0
40	41,5	41,0	41,0	40	-	-	43,0
50	51,5	51,0	50,5	50	-	-	52,5
60	61,0	61,0	60,5	60	63,0	62,0	61,5
70	71,0	70,5	70,5	70	72,5	71,5	71,0
80	80,5	80,5	80,0	80	81,5	81,0	80,5
90	90,0	90,0	90,0	90	91,0	90,5	90,5

Približan odnos različitih mjera

Tvrdoća po				Čvrstoća čelika u N/mm ²		
Brinellu HB	Vickersu HV	Rockwellu		C	Cr	Cr-Ni
		HRB	HRC			
	1175		70	2720	2640	2560
	1085		68	2680	2610	2530
	1000		66	2560	2490	2420
	930		64	2460	2390	2320
	845		62	2350	2290	2220
	790		60	2260	2200	2130
	735		58	2160	2100	2040
	692		57	2080	2020	1970
	645		55	2000	1940	1880
	608		53	1920	1870	1820
	575		52	1850	1800	1750
	546		50	1780	1730	1680
	520		49	1720	1670	1620
	496		47	1660	1610	1570
	473		46	1600	1550	1510
	454		45	1550	1510	1460
	437	115	44	1490	1450	1410
400	420	114	42	1440	1400	1360
388	404	114	41	1400	1360	1320
375	389	113	40	1350	1310	1280
363	375	113	38	1310	1270	1240
352	363	112	37	1270	1220	1200
341	350	111	36	1220	1190	1160
330	339	111	35	1190	1160	1130
321	327	110	34	1160	1120	1090
311	316	109	33	1120	1090	1060
302	305	108	32	1090	1060	1030
293	296	107	31	1040	1020	990
285	287	107	30	1030	1000	970
277	279	106	29	1000	970	940
269	270	105	28	970	940	920
262	263	104	26	940	920	890
255	256	103	25	920	890	870
248	248	102	24	890	870	840
241	241	101	23	870	840	820
235	235	100	22	850	820	800
229	229	99	21	820	800	780
223	223	98	20	800	780	760
217	217	97	19	780	760	740
212	212	96	18	760	740	720

tvrdoće i čvrstoće čelika

Tvrdoća po				Čvrstoća čelika u N/mm ²		
Brinellu HB	Vickersu HV	Rockwellu		C	Cr	Cr-Ni
		HRB	HRC			
207	207	95	17	750	730	700
201	201	94	16	720	700	680
197	197	93	15	710	690	670
192	192	92	14	690	670	650
187	187	91		670	660	640
183	183	90		660	640	620
179	179	89		640	630	610
174	174	88		630	610	590
170	170	87		610	600	580
167	167	86		600	580	560
163	163	85		590	570	550
159	159	84		570	560	540
156	156	83		560	550	530
152	152	82		550	530	520
149	149	81		540	520	510
146	146	80		530	510	500
143	143	79		520	500	490
140	140	78		500	490	480
137	137	77		490	480	470
133	133	76		480	470	460
131	131	75		470	460	450
128	128	74		460	450	440
126	126	73		450	440	430
123	123	72		440	430	420
121	121	71		440	420	410
118	118	69		430	410	400
116	116	68		420	410	390
114	114	67		410	400	390
111	111	65		400	390	380
109	109	64		390	380	370
107	107	62		390	380	360
105	105	61		380	370	360
103	103	59		370		
101	101	58		360		
99	99	56		360		
97	97	54		350		
95	95	52		340		
92				330		
89				320		
86				310		

4. Ispitivanje tvrdoće plastičnih tvari

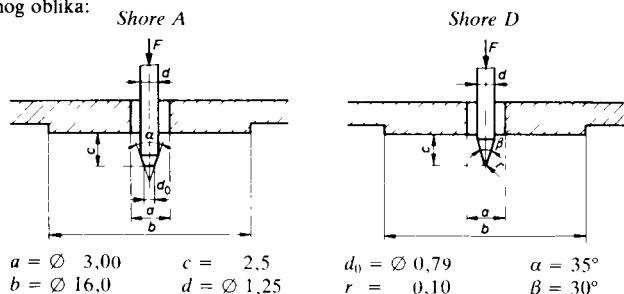
Za ispitivanje tvrdoće termoplasta i gume upotrebljavaju se postupci:

- za meke ispitne uzorke – postupak Shore A
- za tvrde ispitne uzorke – postupak Shore D.

Za točnija ispitivanja upotrebljava se postupak IRHD.

a) Postupci Shore A i Shore B (JUS G.S2.125 – 1986 i G.S2.525 – 1984)

Ispitni uzorak (debljine > 6 mm, promjera > 30 mm) pritisnemo na podlogu pritisnom pločom s rupom, kroz koja utiskujemo utisnu iglu određenog oblika:



$a = \varnothing 3,00$ $c = 2,5$ $d_0 = \varnothing 0,79$ $\alpha = 35^\circ$
 $b = \varnothing 16,0$ $d = \varnothing 1,25$ $r = 0,10$ $\beta = 30^\circ$

Pritisnom pločom pritisnemo epruvetu na podlogu silom 12,5 N (Shore A) odnosno 50 N (Shore D).

Utisnu iglu utiskujemo u uzorke oprugom, čija se opružna sila F (N) mijenja s dubinom otiska h (mm) prema jednadžbama:

za postupak Shore A: $F = 8,065 - 3,006 h$
 za postupak Shore D: $F = 44,50 - 17,8 h$

Tvrdoća H po postupcima Shore A i D određena je dubinom otiska h :

$H = 100 - 40 h$

tako da je:

$H = 0 \text{ Sh}$ pri $h = 2,5 \text{ mm}$
 $H = 100 \text{ Sh}$ pri $h = 0 \text{ mm}$

Primjer oznake tvrdoće po postupku Shore A pri nastaloj dubini otiska $h = 0,8 \text{ mm}$: $H = 68 \text{ Sh A}$.

Temperatura ispitivanja je $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Jedinice tvrdoće po Shoru	Dubina otiska F (N)	Opružna sila F (N)	
		Shore A	Shore D
0	2,5	0,55	0
10	2,25	1,30	4,45
20	2,0	2,05	8,90
30	1,75	2,805	13,35
40	1,5	3,555	17,80
50	1,25	4,305	22,25
60	1,0	5,06	26,70
70	0,75	5,81	31,15
80	0,5	6,56	35,60
90	0,25	7,31	40,05
100	0	8,065	44,50

b) Postupak po međunarodnoj skali za tvrdoću za gumu IRHD (International Rubber Hardness Degree) (JUS G.S2.143 – 1986)

Po tom se postupku ispituje u prvom redu tvrdoća (meke) gume i to utisnom dubinom h (mm) čelične kuglice, određenog promjera D , pri određenoj sili pritiska.

Ispitne uzorke pritišćemo na podlogu pritisnom pločom silom 8,3 N.

Početna sila pritiska na kuglicu iznosi 0,3 N, dodatna 5,4 N, a ukupna 5,7 N. Mjeri se dubina otiska h koji određuje tvrdoću IRHD po slijedećoj tablici, a za ispitivanje kuglicom promjera D :

- za manju tvrdoću $D = 5 \text{ mm}$
- za osrednju tvrdoću $D = 2,5 \text{ mm}$
- za veliku tvrdoću $D = 1 \text{ mm}$

$D = 5 \text{ mm}$		$D = 2,5 \text{ mm}$		$D = 1 \text{ mm}$		
h mm	IRHD	h mm	IRHD	h mm	IRHD	
1,10	34,9	2,10	17,8	0,00	100	
1,15	33,6	2,15	17,3	0,05	99,3	
1,20	32,4	2,20	16,8	0,10	97,1	
1,25	31,2	2,25	16,3	0,15	94,0	
1,30	30,0	2,30	15,8	0,20	90,6	
1,35	29,0	2,35	15,3	0,25	87,1	
1,40	28,0	2,40	14,9	0,30	83,6	
1,45	27,0	2,45	14,5	0,35	80,2	
1,50	26,1	2,50	14,1	0,40	77,0	
1,55	25,2	2,55	13,7	0,45	73,9	
1,60	24,4	2,60	13,4	0,50	71,0	
1,65	23,6	2,65	13,0	0,55	68,2	
1,70	22,8	2,70	12,7	0,60	65,5	
1,75	22,0	2,75	12,4	0,65	63,0	
1,80	21,3	2,80	12,1	0,70	60,6	
1,85	20,7	2,85	11,8	0,75	58,3	
1,90	20,1	2,90	11,5	0,80	56,2	
1,95	19,5	2,95	11,2	0,85	54,2	
2,00	18,9	3,00	11,0	0,90	52,3	
2,05	18,4	3,05	10,7	0,95	50,5	
				1,00	48,8	
				1,05	47,1	
				1,10	45,6	
				1,15	44,1	
				1,20	42,7	
				1,25	41,4	
				1,30	40,1	
				1,35	38,9	
				1,40	37,8	
				1,45	36,7	
				1,50	35,6	
				1,55	34,6	
				1,60	33,6	
				1,65	32,6	
				1,70	31,7	
				1,75	30,9	
				1,80	30,0	
					0,28	92,0
					0,30	91,1
					0,32	90,2
					0,34	89,3
					0,36	88,4
					0,38	87,5
					0,40	86,6
					0,42	85,7
					0,44	84,8

Primjer oznake tvrdoće po postupku IRHD: $H = 70 \text{ IRHD}$

Određivanje temperature smekšavanja termoplasta – po Vicatu (JUS G.S2.641 – 1970)

Upotrebljavamo ispitni uzorak oblika kvadratne pločice, bridova 10 mm i debljine 3...6,4 mm.

Određujemo temperaturu pri kojoj se utisna igla, promjera kružnog presjeka $1,000 \pm 0,015 \text{ mm}$ utisne 1 mm duboko u uzorak pri opterećenju koje iznosi 9,81 N po metodi A ili 49,03 N po metodi B.

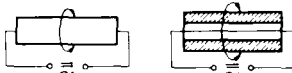
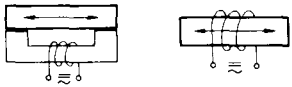
Ispitni uzorak zagrijavamo u tekućini (npr. u parafinu, glicerinu, transformatorskom ili silikonskom ulju i sl.).

ISPITIVANJA BEZ OŠTEĆIVANJA MATERIJALA

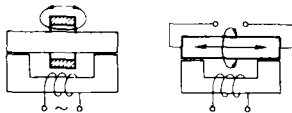
Magnetsko ispitivanje

Predmete koji se mogu magnetizirati (sivi lijev, čelik) premažemo slojem rijetkog ulja (petroleja) kojemu smo dodali železnog praha te ih magnetiziramo. U homogenom materijalu nastaje jednoliko magnetsko polje, pri čemu se i željezni prah raspodijeli jednoliko. Svaka nehomogenost u materijalu (šupljine, strana tijela) ili sitne, za oko nevidljive pukotine, uzrokuju odklon magnetskog polja, što se očituje u nejednolikoj raspodjeli železnog praha na površini i time se otkrivaju pogreške. One će se pokazati iako su pod površinom.

Otklon magnetskog polja osobito je jak ako su pogreške okomite na smjer magnetskog polja, dok pogreške u smjeru polja na nj bitno ne utječu. Zato predmet treba ispitivati u magnetskim poljima koja su međusobno okomita, kako bismo mogli otkriti sve pogreške.



okomito na svoj smjer (tj. poprečno) magnetsko polje, koje otkriva uzdužne pogreške. Ako je predmet šupalj, provlačimo električni vodič kroz šupljinu.



a) Za poprečno smještene pogreške magnetiziramo predmet pomoću magneta ili električnog svitka. Magnetsko je polje usmjereno uzduž predmeta te otkriva poprečne pogreške.

b) Za uzdužne pogreške uključujemo predmet kao otpornik u električni vod kojim teče jaka struja (200...1500 A). Ta struja izaziva

Šuplji predmet možemo upotrijebiti i kao sekundarni namot transformatora pa time u njemu otkrivamo poprečne pogreške (lijeva slika).

Kombinirani uređaji omogućuju pregled na oba načina (desna slika).

Ispitivanje ultrazvukom

Ultrazvuk je mehaničko titranje frekvencijom $f > 20$ kHz. U biti on ima ista svojstva kao i čujni zvuk ($f = 16...20000$ Hz), ali se ultrazvukom može prenositi mnogo veća energija, koju iskorištavamo za ispitivanje materijala.

Ultrazvuk dobivamo na različite načine. Za ispitivanje materijala najčešće upotrebljavamo piezoelektrični efekt kremenog kristala, tj. njegovu deformaciju zbog djelovanja električnog polja. Izložimo li takav kristal djelovanju izmjeničnog električnog napona, on će se rastezati i stezati s frekvencijom napona. Nastat će mehaničko titranje – ultrazvuk.

Ultrazvuk prenosimo na okolinu prisnim dodiranjem kremenog kristala s površinom predmeta. Kroz homogeni materijal prodire ultrazvuk veoma dobro. Dubina prodiranja ultrazvuka ovisna je o njegovoj frekvenciji i o materijalu. Ako je dovoljno jak, prodire do suprotne plohe predmeta (stijenke) i od nje se odbija. Na taj način možemo – pomoću reflektiranog zvuka – odrediti debljinu predmeta. Najmanji prekidi u materijalu (već i zračni raspor širine od samo 10^{-3} mm) za ultrazvuk su skoro nepremostiva zapreka, to veća, što je frekvencija zvuka viša. Na tim se zaprekama ultrazvuk odbija, a reflektirani ultrazvuk ih otkriva.

Ispitivanje sivog lijeva ultrazvukom gotovo da ne dolazi u obzir zbog prevelike apsorpcije zvuka u njemu.

Ispitivanja rendgenskim zrakama

Rendgenske su zrake elektromagnetski titraji valne duljine 0,2 do 0,002 nm. Zrake veće valne duljine (oko 0,1 nm) nazivamo »mekim«, a one manje valne duljine »tvrdim«. Što su rendgenske zrake tvrđe, to lakše prodiru kroz tvar – ona ih manje apsorbira. Energija rendgenskih zraka mora biti to veća, što je deblji materijal kroz koji treba da prodru.

Rendgenske zrake, koje dobivamo rendgenskim cijevima, upotrebljavamo za ispitivanje materijala, i to za:

a) finostrukturno ispitivanje, koje se zasniva na svojstvu rendgenskih zraka, da se u kristalima ogibaju i odbijaju. Time nam otkrivaju razmještaj atoma u kristalima i smjer osi kristala;

b) grubostrukturno ispitivanje, koje se zasniva na svojstvu rendgenskih zraka, da ih tvari manje gustoće slabije apsorbiraju nego gušće tvari. Rendgenske zrake, koje izviru gotovo iz točke i šire se pravocrtno, bacaju na fluorescentni zaslon ili na fotografsku ploču sjene različite jakosti, prema tome je li tvar gušća ili rjeđa, i tako otkrivaju njihove oblike. Na taj način opažamo – bez oštećivanja materijala – pogreške u nutri materijala (šupljine, pukotine, trosku itd.). Najfinije pak pukotine (koje ustanovljujemo ultrazvukom) ne možemo zapaziti rendgenskim zrakama.

Pri ispitivanju rendgenskim zrakama služimo se uređajem u kojemu je rendgenska cijev pod naponom od 80...300 kV (iznimno i do 600 kV). Probojna moć iznosi:

pri 80 kV — 40 mm Al	pri 200 kV — 60 mm Fe
pri 110 kV — 100 mm Al	pri 230 kV — 60 mm Cu

Ispitivanje γ -zrakama

γ -zrake su elektromagnetski valovi duljine oko 0,0005 nm (= 0,5 pm). Te su zrake tvrđe od rendgenskih i stoga dublje prodiru u materijal. γ -zrake dobivamo iz radija ili mezotorija, te – u novije vrijeme – osobito iz izotopa kobalta 60. Pomoću tih zraka možemo ispitivati materijal do debljine 250 mm. Sliku što je daju γ -zrake dobivamo na fotografskoj ploči, a osvetljavanje traje i po nekoliko dana.

ISPITIVANJE SASTAVA MATERIJALA

Kemijska analiza

Kemijskom analizom određujemo kvalitativni i kvantitativni sastav materijala. Za određivanje glavnih sastavina dovoljno je nekoliko grama materijala; za određivanje primjesa i nečistoća potrebno je 10 do 50 grama, u iznimnim slučajevima pri analizi male količine nečistoća i do 1 kg.

Za brzo ustanovljivanje pojedinih elemenata u materijalu služimo se različitim postupcima karakterističnih površinskih reakcija, koje međutim otkrivaju samo sastav površinskog sloja.

Spektralna analiza

U užarenom stanju atomi emitiraju svjetlosne zrake koje imaju za svaki element karakteristične valne duljine. Odgovarajuće spektralne crte ovise samo o kemijskom sastavu, dok njihov intenzitet ovisi o udjelu pojedinih elemenata u ispitivanoj tvari. Osjetljivost je toga postupka veoma velika i na taj se način mogu ustanoviti elementi kojih količina iznosi 0,01 % i manje. Zato je taj postupak osobito prikladan kod manjih koncentracija.

Spektralna je analiza ograničena na veoma usko područje užarenog mjesta na površini materijala. To, međutim, omogućuje i analizu sitnih stranih primjesa u materijalu.

Spektralnom analizom možemo nadomjestiti kvalitativnu, a u ograničenom opsegu i kvantitativnu kemijsku analizu. Za nju dostaju veoma mali djelići materijala; možemo je primijeniti i na gotovim predmetima, a da ih time ne oštetimo. Ako pak za spektralnu analizu izrađujemo posebne ispitne uzorke, njihove su prikladne dimenzije $30 \times 5 \times 1$ mm.

Ispitivanje iskrenjem pri brušenju

Za brzo, a grubo, razlikovanje pojedinih vrsta čelika, sivoga i temperovanog lijeva te tvrdih metala služe nam slike i boje pri brušenju, koje su karakteristične za pojedini materijal (vidi str. 339).

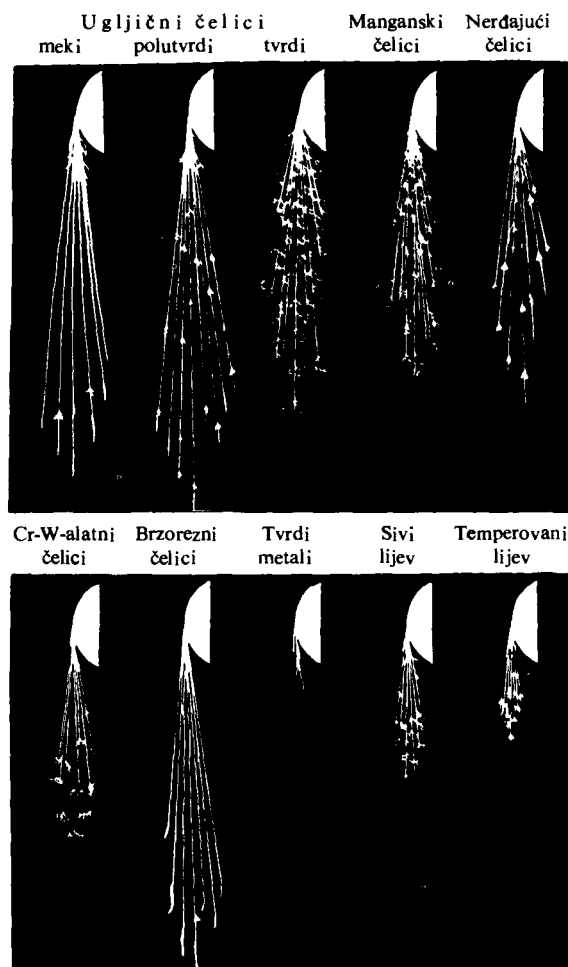
Ugljični konstrukcijski čelici se mogu po iskrama razlikovati za svakih 0,1 % C. Meki čelici daju snop iskara u obliku buzdovana s rijetkim zvjezdicama. S porastom količine C množe se i za nj karakteristične zvjezdice. Cr, Ni i W u čeliku smanjuju broj zvjezdica unatoč prisutnosti C. Cr se u čeliku razaznaje po žutocrvenim iskrama, W po njihovoj tamnocrvenoj boji (brzorezni čelici!). Tvrdi metali imaju vrlo kratke iskre tamnocrvene boje, bez zvjezdica.

Raspoznavanje čelika i srodnih kovina po brusnim iskrama zahtijeva veliko iskustvo. Za olakšanje raspoznavanja služe komadi za uspoređivanje točno poznate vrste čelika.

Ispitivanje iskrenjem ne možemo primijeniti na neželjezne kovine i slitine.

Za ispitivanje iskrenjem upotrebljavamo polutvrdu brusnu ploču veličine zrna 60...80 pri brzini brušenja 20...35 m/s.

Slike iskara pri brušenju



Metalografski pregledi

Makroskopski pregled (pri povećanju do npr. 20 puta) otkriva šupljine, mjehure, pukotine, trosku, pogreške u valjanju itd.

Mikroskopski pregled (pri povećanju do 1000 puta i više) otkriva strukturu (raspored, oblik i veličinu kristalnih zrna), koja je ovisna o kemijskom sastavu i uvjetima skrućivanja te o naknadnoj obradi materijala (toploj i hladnoj).

Da bi struktura postala vidljivom, moramo površinu pokusnog predmeta izbrusiti smirkom, i to uvijek finijim, te konačno najfinije polirati. Za otkrivanje pojedinih sastavina strukture mora se polirana površina jetkati. Sredstva za jetkanje ovise o vrsti materijala i svrsi pregleda.

Najuobičajenija sredstva za jetkanje pri metalografskim ispitivanjima su: za čelik

— za nelegirane i legirane čelike: 2%-tna (za posebne slučajeve 4%-tna) alkoholna dušična kiselina;

— za nerđajuće kromne čelike: alkoholna solna kiselina;

— za austenitne čelike: alkoholna zlatotopka (carska vodica) sastava: 8 cm³ dušične kiseline (1,40), 12 cm³ solne kiseline (1,19) i 1000 cm³ alkohola ili pak američko sredstvo: 7...8 cm³ koncentrirane dušične kiseline, 2...3 cm³ koncentrirane solne kiseline i 0,5 g bakrenog klorida CuCl₂ (to se sredstvo može samo kratkotrajno održati);

— za otkrivanje fosfornih segregata: Oberhofferovo sredstvo — 0,5 g kositrenog klorida SnCl₂, 1,0 g bakrenog klorida CuCl₂, 30 g željeznog klorida FeCl₃, 30 cm³ solne kiseline (1,19), 500 cm³ destilirane vode i 500 cm³ alkohola;

— za otkrivanje sumpornih segregata — Baumannov postupak: fotografski se papir (srebrni bromid) stavi kratko vrijeme u 5%-tnu sumpornu kiselinu, a zatim na staklenu ploču sa slojem prema gore. Na sloj pritiskujemo pomno očišćenu brušenu plohu ispitivanog dijela 1 do 10 min, a potom papir kratko isperemo vodom i konačno fiksiramo u normalnoj fiksirnoj kupelji (Na₂S₂O₃);

za bakar i bakrene slitine

— za bakar i α-mjed: 10 g amonijeva persulfata otopljenog u 100 cm³ vode (otopina mora biti uvijek svježe pripravljena);

— za bakar, α-β-mjed i broncu: amonijačna otopina bakrenog klorida (10 g bakrenog amonijeva klorida otopi se u 120 cm³ destilirane vode i doda toliko otopine amonijaka da se prije nastali talog upravo otopi);

za olovo i olovne slitine

— otopina od 16 (ili 8) cm³ dušične kiseline (1,40), 16 (ili 8) cm³ octene kiseline i 68 (ili 84) cm³ glicerina;

za aluminij i aluminijske slitine

— najprije 1 g natrijeve lužine u 100 cm³ vode, zatim 5%-tna dušična kiselina;

za magnezij i magnezijske slitine

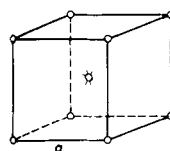
— razrijeđena alkoholna dušična kiselina.

KOVINSKI MATERIJALI

Kristalna struktura kovina

Sve kovine u krutom stanju imaju kristalnu strukturu. Njeni najčešći oblici su (mjere u nm):

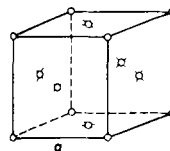
Kubna prostorno centrirana rešetka



Kovina	Dimenzija		Promjer atoma
	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
Fe _α	0,286		0,248
Cr	0,288		0,250
V	0,303		0,262
Mo	0,314		0,272
W	0,316		0,274

Takoder: Fe_δ, Ti_β, Rb, Nb, Ba, Ta

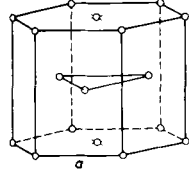
Kubna plošno centrirana rešetka



Kovina	Dimenzija		Promjer atoma
	<i>a</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
Fe _γ	0,356		0,252
Ni	0,352		0,248
Cu	0,362		0,256
Al	0,405		0,286
Pb	0,495		0,350

Takoder: Co_β, Sr, Rh, Pd, Ce, Ag, Au, Pt, Ir

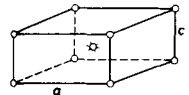
Heksagonalna rešetka



Kovina	Dimenzija		Promjer atoma
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Co _α	0,251	0,407	0,250
Ti _α	0,295	0,473	0,292
Zn	0,266	0,294	0,260
Mg	0,320	0,520	0,320

Takoder: Zr, Tc, Ru, Cd, Gd, Re, Os, Tl

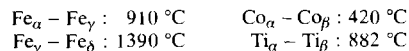
Tetragonalna rešetka



Kovina	Dimenzija		Promjer atoma
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Sn	0,583	0,318	0,302

As, Sb, Te i Bi imaju kompleksnu kristalnu strukturu.

Neke se kovine mogu pojaviti u više kristalnih oblika — modifikacija (polimorfizam). Promjena modifikacije — pretvorba — javlja se pri određenoj temperaturi, npr.



Mn i In kristaliziraju kubno i ortorombno.

Slitine (legure)

Slitine su sastavljene od najmanje dviju komponenata od kojih je barem jedna kovina, dok je druga kovina, nekovina ili spoj. Legiranjem postižemo mnoga mehanička i druga fizikalna svojstva koja čiste kovine nemaju.

Slitinama nazivamo samo takve kovinske materijale kod kojih nekoj kovini namjerno dodajemo druge (kovinske ili nekovinske) komponente.

Kovinske materijale koji sadrže nenamjerno dodane (npr. pri dobivanju) druge komponente, uglavnom u malim količinama, ubrajamo u nečistoće.

Slitine nastaju od komponenata koje se u tekućem stanju — taljevini — međusobno otapaju. Komponente koje se međusobno otapaju i u krutom stanju stvaraju *kristale mješance*, i to u slučaju potpune topivosti u svim omjerima (koncentracijama) sastavina, a u slučaju djelomične topivosti samo do određenog sastava — zasićenja. Slitine takva sastava koji prelazi granicu zasićenja (otopinska praznina) mogu se sastojati samo od smjese kristala mješanaca. Mnoge slitine tvore (pri najnižoj temperaturi skrućivanja) osobito sitnozrnatu smjesu kristala mješanaca — *eutektik*.

Binarni sistemi slitina (sistemi slitina s dvjema komponentama)

Binarne (dvojne) sisteme slitina prikazujemo faznim dijagramima temperatura—sastav. U sljedećim dijagramima osnovnih binarnih sistema znače: t — taljevinu, A i B — komponente slitine, α i β — kristale mješance (otopine B u kristalnoj rešetki A, odn. A u rešetki B), E — eutektik.

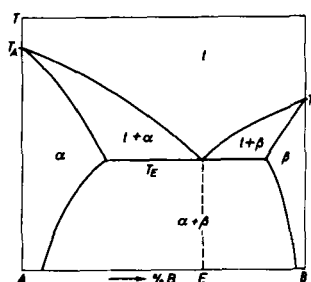
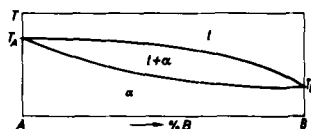
Sistem potpune topivosti

Komponente A i B otapaju se međusobno u krutom stanju u svim mogućim omjerima sastavina. Slitina je sastavljena od samih homogenih kristala mješanaca (α).

Sistem djelomične topivosti

Komponente A i B otapaju se jedna u drugoj samo do određenog sastava (zasićenja). Slitina se do tog sastava sastoji od homogenih kristala mješanaca (α in β), a inače od heterogene smjese kristala (α , β i E). Eutektik E je sitnozrnata smjesa kristala α i β u točno određenom omjeru.

Potpune netopivosti nema, ali područja kristala mješanaca (α i β) mogu biti tako neznatna (sastav kristala mješanaca pri zasićenju gotovo je jednak čistoj kovini) da djelomičnu topivost možemo u tom slučaju zanemariti.



ŽELJEZO I NJEGOVE SLITINE

Čisto željezo

Pri zagrijavanju čistog željeza primjećujemo tri temperaturne (stojne) točke, u kojima određeno vrijeme zastaje porast temperature (zbog unutarnjih kristalnih promjena):

Stojište $A_2 - 768\text{ }^\circ\text{C}$ — (»Curiejeva temperatura«) označuje temperaturnu granicu do koje je željezo magnetično. Modifikaciju željeza do te granice nazivamo α (magnetično), a iznad te granice β (nemagnetično). Kristalna je struktura za obje modifikacije ista — kubna prostorno centrirana kristalna rešetka.

Točka pretvorbe $A_3 - 910\text{ }^\circ\text{C}$ — označuje promjenu kristalne strukture β u kubnu plošno centriranu rešetku, koju nazivamo modifikacijom γ (nemagnetična).

Točka pretvorbe $A_4 - 1390\text{ }^\circ\text{C}$ — označuje promjenu kristalne strukture γ u modifikaciju δ , strukturno identičnu modifikaciji β (nemagnetična).

Talište je čistog željeza na $1534\text{ }^\circ\text{C}$.

Čisto željezo u čvrstom stanju kristalizira prema tome u dva oblika:

a) kao željezo $\alpha - \text{Fe}_\alpha$ (koje obuhvaća kristalno jednake modifikacije α , β i δ), koje je magnetično do $768\text{ }^\circ\text{C}$, nemagnetično između 768 i $910\text{ }^\circ\text{C}$ te između 1390 i $1534\text{ }^\circ\text{C}$;

b) kao γ -željezo — Fe_γ , između 910 i $1390\text{ }^\circ\text{C}$, nemagnetično.

U α -željezu otapa se samo vrlo malo ugljika, a u γ -željezu može se otopiti do $2,06\%$ (pri $1147\text{ }^\circ\text{C}$).

Čisto je željezo pri temperaturi okoline (Fe_α) razmjerno veoma otporno prema koroziji, prilično je mekano ($45 \dots 55\text{ HB}$), male je čvrstoće ($180 \dots 250\text{ N/mm}^2$) i vrlo rastezljivo ($50 \dots 40\%$). Zbog male čvrstoće i skupog dobivanja (elektroliza!) njegova je primjena u tehnici neznatna. Najviše iskorišćujemo njegovu izvanrednu sposobnost za magnetiziranje.

Tehničko željezo

Tehničko željezo sadrži uvijek ugljik C i neznatne primjese, preostale u procesu proizvodnje — stalne pratioce mangan (Mn) i silicij (Si) te nečistoće fosfor (P) i sumpor (S).

Ugljik ima najveći utjecaj na nelegirano tehničko željezo; već u dijelovima postotka snažno utječe na njegova svojstva.

Pri ugrijavanju željeza, koje sadrži ma i neznatnu količinu ugljika, opažamo još i (stojnu) točku $A_1 - 723\text{ }^\circ\text{C}$.

Prema sadržaju ugljika tehničko željezo dijelimo na:

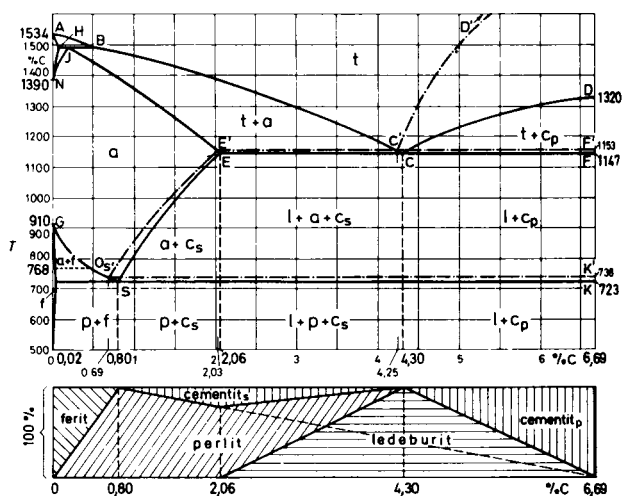
- čelik sa $C < 2,06\%$,
- lijevano željezo sa $C > 2,06\%$.

Legirane vrste tehničkog željeza sadrže još i druge elemente, koji su namjerno dodani radi postizanja određenih svojstava.

Sistem željezo-ugljik

Pune linije: metastabilni sistem Fe—Fe₃C (željezo-cementit)
 Isprekidane linije: stabilni sistem Fe—C (željezo-grafit)

Strukture čelika



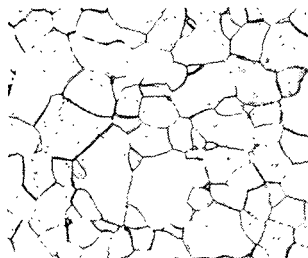
t — taljevina, a — austenit, f — ferit, c_p i c_s — primarni i sekundarni cementit,
 l — ledeburit, p — perlit

Strukturni sastojci u sistemu željezo-ugljik:

- ferit je kristalni oblik α-željeza,
- austenit je rastopinski kristal γ-željeza i ugljika (0...2,06% C)
- cementit je kristalni oblik željeznog karbida Fe₃C (6,68% C)
- ledeburit je eutektik u sistemu željezo-cementit (4,30% C)
- perlit je eutektoid željeza i cementita (0,80% C)
- grafit je kristalni oblik ugljika C.

Mehanička svojstva strukturnih sastavnica (prosječne vrijednosti)

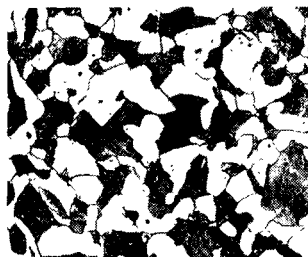
Sastavnica	Čvrstoća (N/mm ²)	Tvrdoća HV	Postot. produlj. (%)
ferit	250 ... 300	90	35
austenit	750	210	60
cementit, ledeburit	—	850	—
perlit	700 ... 900	220	10
grafit	20	—	—



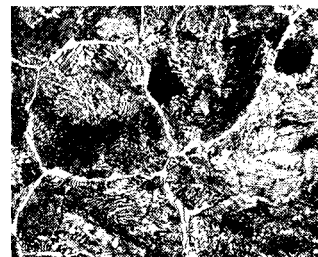
Ferit (500:1)



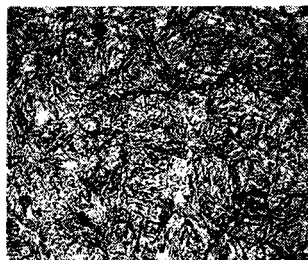
Perlit (500:1)



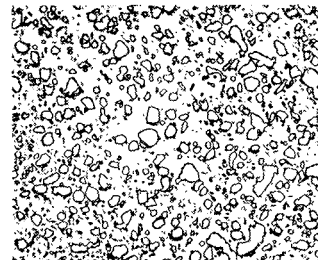
Ferit i perlit 0,35% C (500:1)



Perlit i cementit 1,1% C (500:1)



Martenzit (500:1)

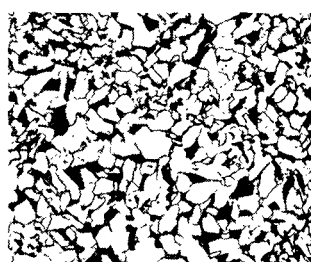


Zrnati cementit (500:1)

Strukture lijeva



Čelični lijev nakon lijevanja (100:1)



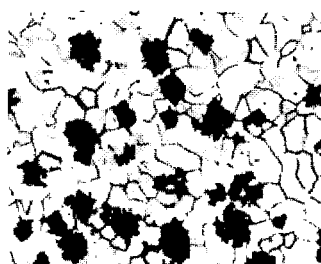
Čelični lijev normaliziran (100:1)



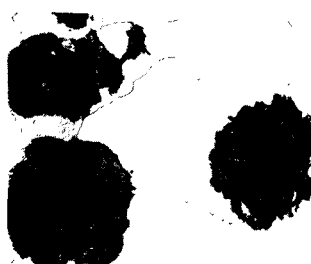
Bijeli lijev (200:1)



Sivi lijev (500:1)



Temperovani lijev — crni (100:1)



Sivi lijev — nodularni (500:1)

Skrucivanje po metastabilnom ili stabilnom sistemu željezo-ugljik

Čelici se sastoje od strukturnih sastavina metastabilnog sistema.

Lijeivano se željezo sastoji od strukturnih sastavina obaju sistema: metastabilnog i stabilnog. Željezni karbid Fe_3C (cementit) u željeznom lijevu ima metastabilan karakter. On nastaje (bijeli lijev) pri skrućivanju taljevine sirovog željeza u okolnostima koje sprječavaju njegovo raspadanje, tj. pri razmjerno brzom ohlađivanju i u prisutnosti izvjesnih elemenata, osobito Mn (te Mo, V, Cr, S). Pri polaganom ohlađivanju (ili dužem žarenju) željezni se karbid raspada, a ugljik se izlučuje u obliku kristalnih zrna (listića) grafitu. Taj raspad olakšava prisutnost nekih elemenata, osobito Si (te Al, Ni, Co, P).

Pri potpunom izlučivanju ugljika osnovna se masa sastoji od ferita, u kojem zrna grafitu sadrže sav ugljik (feritni sivi lijev). Pri djelomičnom izlučivanju ugljika osnovna se masa sastoji od perlita, koji sam sadrži dio ugljika, a samo se ostatak ugljika izlučuje kao grafit (perlitni sivi lijev).

Utjecaj brzine ohlađivanja austenita na strukturu čelika

α -željezo nema gotovo nikakvih sposobnosti za otapanje ugljika, dok ga γ -željezo može prilično dobro otapati, i to u obliku rastopinskih kristala austenita. Pri polaganom ohlađivanju raspada austenit pri perlitnoj temperaturi ($723^\circ C$) u perlit, a ugljik otprije otopljen u austenitu, izlučit će se i pojaviti u perlitnom cementitu. Sliku raspada pothlađenog austenita prikazuje Bainov dijagram (»TTT-dijagram«*)

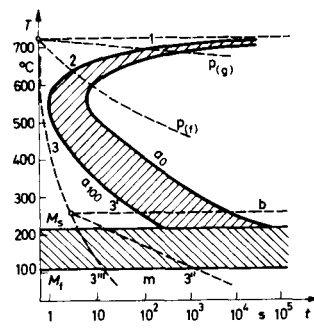
a_{100} — početak } raspada austenita
 a_0 — svršetak }
 M_s — početak } martenzitinke pretvorbe
 M_f — svršetak }

Austenit raspada pri polaganom ohlađivanju (1) u grubi perlit p_g , a pri brzem (2) u fini perlit p_f . Ohlađivanje velikom brzinom (3) sprječava u kritičnom temperaturnom području ($\approx 550^\circ C$) raspad austenita pa se pomiče područje nešto stabilnijeg pothlađenog austenita ($\approx 250^\circ C$), što omogućava izotermni raspad ($3'$) u bainit (b), a manjom ($3''$) ili prvotnom ($3'''$) brzinom ohlađivanja promjenu u martenzit (m).

Bainit je čvršći i tvrdi (50...60 HRC) od perlita.

Martenzit (prezasićeno α -željezo) je vrlo tvrd ($\approx 66 HRC$) sastojak zakačenog čelika. Martenzit pri ugrijavanju iznad $200^\circ C$ raspada i prelazi postupno preko strukturnih oblika trustita i sorbita iznad $600^\circ C$ u zrnati cementit.

* Time — Temperature — Transformation.

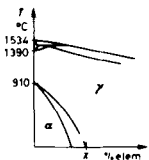


Utjecaj elemenata na strukturu čelika

1. Elementi koji proširuju austenitno područje

U tu skupinu spadaju naročito Mn, Ni in Co. (Uglik proširuje austenitno područje samo u ograničenom opsegu.)

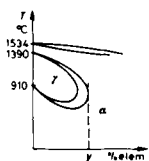
Austenitno se područje proširuje i postiže temperaturu okoline pri određenom sadržaju x (%) elementa, dodanog za legiranje. Slitine sa sadržajem dodanog elementa većim od x imaju, dakle, austenitnu strukturu postojanu i pri običnoj temperaturi. Takve čelike nazivamo »austenitnim čelicima«.



Značajna su svojstva austenitnih čelika da nisu magnetični; ne mogu se kaliti; čvrstoća i tvrdoća su im doduše razmjerno male, ali ti čelici pri većim deformacijama u hladnom neobično otvrdnu i postaju vrlo otporni prema habanju; otporni su prema koroziji.

2. Elementi koji sužuju austenitno područje

U tu skupinu spadaju Be, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Mo, W.



Austenitno je područje suženo. Iznad stanovitog sastava γ , ni pri kojoj se temperaturi više ne pojavljuje austenit, već imamo na svim temperaturama samo α -strukturu – ferit. Takve čelike nazivamo »feritnim čelicima«.

Značajna su svojstva feritnih čelika da se ne mogu kaliti; naginju gruboj kristalizaciji; istezljivost u hladnom stanju manja je nego kod austenitnih čelika pa zato pri hladnom gnječenju i manje otvrdnu; otporni su prema koroziji.

3. Elementi koji stvaraju karbide

Neki elementi stvaraju neposredno sa C karbide. Pri tome su osobito važni Mn, Cr, W, Mo, V, Ti itd.

Karbidi tih kovina su značajni zbog tvrdoće i velikog utjecaja na polaganiju promjenu strukture čelika. Ugrijani do austenitnog područja otapaju se u njemu polagano. Sprečavaju rast kristala i time podupiru nastanak finozrnate strukture. Uz brzo ohlađivanje pri kaljenju se ti karbidi ne izlučuju, već ostaju otopljeni u martenzitu. Time smanjuju kritičnu brzinu hlađenja potrebnu za nastanak martenzita (što omogućuje kaljenje u ulju ili na zraku) te povisuju temperaturu postojanosti martenzita pri napuštanju, zadržavaju dakle raspad tvrde martenzitne strukture i na višim radnim temperaturama.

Čelici jako legirani s Cr in W koji sadrže višestruke karbide (»ledeburitni čelici«), vrlo su tvrdi i veoma otporni prema habanju, i to stoga što karbidi u isti mah sprečavaju raspadanje martenzita i zadržavaju tvrdoću (kaljenog) čelika i pri radu na višim temperaturama (brzorezni čelici).

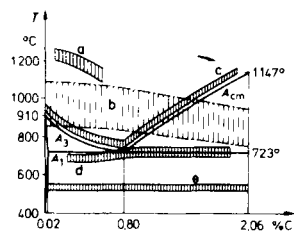
Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

Svojstva čelika	Legirni elementi												
	C	S	P	Si	Mn	Al	Ni	Cr	Mo	W	V	Ti	Co
Čvrstoća	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tvrdoća	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Postotno produljenje	—	—			+	—	+	+					—
Elastičnost	+		+	+	+		+	+	+			+	
Udarna žilavost	—	—	—	—	+	—	+		+		+	—	—
Trajna statička čvrstoća (pri višim temperaturama)	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Dinamička čvrstoća					+	—		+	+	+	+	+	+
Otpornost prema kem. utjecajima	—	—	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Otpornost prema vatri	+			+	—	+		+	—		—	—	
Sposobnost za izvlačenje	—	—	—	—	—		—	—		—	—		
Sposobnost za kovanje	—	—	+	—									
Sposobnost za zavarivanje	—	—	—	—									+
Sposobnost za obrađivanje	—	+	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sposobnost za rezanje (alat)	+			+		+		+	+	+	+	+	+
Otpornost prema popuštanju								+	+	+	+	+	+

U tablici »+« znači utjecaj u smislu povećanja odgovarajućeg svojstva čelika, a »—« znači smanjivanje tog svojstva. Dvostruki znakovi znače pojačan utjecaj.

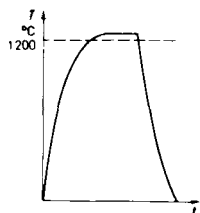
TOPLINSKA OBRADA ČELIKA

Žarenje čelika



Žarenje ugljičnog (nelegiranog) čelika

- difuzijsko žarenje
- žarenje radi kovanja
- normalizacija
- žarenje radi omekšavanja
- žarenje za odstranjivanje napetosti



2. Žarenje radi toplog gnječenja (kovanja, prešanja, valjanja itd.)

Kristali čelika nastali iz taljevine primarnom kristalizacijom ili narasli difuzijskim žarenjem su grubozmatni. Oni mogu postati mnogo finijim gnječenjem u toplom stanju.

Pri pravilnom gnječenju mora materijal biti temeljito prognječen do srži. Gnječenje dopire dublje pri valjanju i prešanju nego pri kovanju. Zato je pažljivost pri žarenju za kovanje osobito važna.

3. Normalizacija

Gruba struktura u čeličnim odljevcima, koji se zbog održanja oblika ne mogu gnječiti, i gruba struktura u velikim otkovcima, koji se kovanjem ne mogu do srži prognječiti, ostaje pri ohlađivanju ispod granice austenitnog područja A_3 u novoj, perlitno-feritnoj strukturi također grubozmatna. Tu strukturu možemo normalizacijom učiniti finijom.

Žarenje čelika je postupak kojim čelik grijemo na određenoj temperaturi određeno vrijeme i zatim ga na odgovarajući način hladimo, da bismo time postigli željene strukturne promjene. Različitim postupcima pri žarenju postizemo izjednačenje kemijskog sastava i kristalne strukture, povećanje žilavosti, smanjenje veličine kristalnih zrna, povećanje mekoće čelika ili odstranjenje unutarnjih napetosti.

Pri žarenju čelika vrlo su važne temperature strukturnih promjena: A_3 (linija G–O–S u sistemu željezo-ugljik, vidi str. 344) – kao donja granica austenitnog područja, i A_1 (723 °C za ugljične čelike) – kao granica raspada austenita u perlit. Za legirane su čelike odgovarajuće temperature navedene u tablicama za čelik.

1. **Difuzijsko žarenje** je dugotrajno žarenje čelika pri visokim temperaturama, a služi izjednačenju nejednolike strukture nastale pri lijevanju, koja otežava obradu i smanjuje vrijednost proizvoda. To se žarenje redovno izvodi već pri proizvodnji čelika.

Grubozmatna struktura nastala prilikom difuzijskog žarenja može se odstraniti gnječenjem u toplom stanju ili normalizacijom.

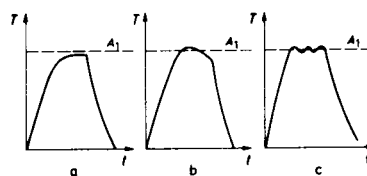
Tim se postupkom čelik zagrije za 30...50 °C iznad temperature pretvorbe A_3 , i to kratko vrijeme – tek toliko da se struktura upravo promijeni opet u austenitnu. Pri toj se pretvorbi stvaraju novi fini austenitni kristali, koji se zatim pri normalnom ohlađivanju na zraku raspadaju u kristale ferita i perlita, a oni zadržavaju finu strukturu i pri temperaturi okoline.

Pri previsokoj temperaturi ili predugom grijanju u austenitnom području kristali bi opet narasli te bi korist normalizacije propala. Pregrijani se grubozmatni čelik može ispravno provedenom normalizacijom opet popraviti.

Normalizacijom se poboljšavaju svojstva čvrstoće.

4. Žarenje radi omekšavanja

Stanovite vrste čelika žarimo da bismo dobili čelik u što mekšem stanju, prikladnom za mehaničku obradu. Ujedno je to stanje polazište za ispravno kaljenje bez opasnosti da se predmet izvitoperi ili popuca.



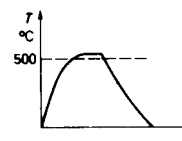
Mekše stanje postizemo:

- kod podutektoidnih čelika duljim grijanjem predmeta (2...20 h) na temperaturi tik ispod perlitne temperature A_1 , a zatim ohlađivanjem (pri čemu brzina ohlađivanja nije osobito važna, ali mora biti jednolika);
- kod čelika oko eutektoidnog sastava jednolikim ugrijavanjem predmeta do perlitne temperature A_1 , zatim polaganim ohlađivanjem na 600...650 °C (pri čemu brzina daljnjeg ohlađivanja nije osobito važna);
- kod nadeutektoidnih čelika kolebanjem temperature oko perlitne temperature A_1 .

5. Žarenje radi odstranjivanja unutarnjih napetosti

Nejednoliko ohlađivanje, obrada rezanjem, hladno gnječenje (kovanje, valjanje, izvlačenje) itd. izazivaju napetosti u predmetima. Zbog tih se napetosti predmeti vitopere pri ugrijavanju sve do temperatura na kojima se granica plastičnosti materijala snizuje ispod unutarnjeg naprezanja (oslobodena naprezanja izazivaju plastične deformacije).

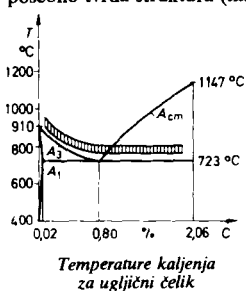
Unutarnja naprezanja u čeliku odstranjujemo žarenjem pri približno 500 (... 600) °C i zatim polaganim ohlađivanjem predmeta.



Kaljenje čelika

1. Obično kaljenje

Kaljenjem nazivamo toplinsku obradu brzog ohlađivanja kaljivih čelika s određene temperature kaljenja (s područja austenita), pri čemu se stvara posebno tvrda struktura (martenzit).



Pri brzom ohlađivanju pojavljuju se razlike u temperaturama na površini i u dubini predmeta, što – zbog različite temperaturne rastezljivosti – izaziva naprezanja i opasnost od pucanja. Zato nikada ne upotrebljavamo sredstva za hlađenje koja djeluju brže nego je to potrebno. Za izradu predmeta koje treba kaliti odabiremo po mogućnosti vrstu čelika koja ima manju kritičnu brzinu ohlađivanja pa se zato može kaliti u rashladnom sredstvu koje blaže djeluje.

Velika unutarnja naprezanja koja nastaju pri kaljenju ublažujemo popuštanjem ili napuštanjem, tj. ugrijavanjem do 180 °C (gdje čelik još ne gubi tvrdoću), i to neposredno nakon kaljenja (još prije nego se predmet potpuno ohladi do temperature okoline). U tu se svrhu preporučuju uljene ili solne kupelji (najmanje ½ h).

2. Posebni postupci pri kaljenju

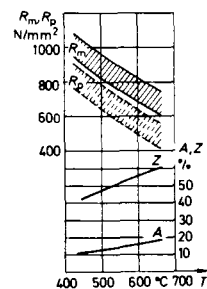
a) *Prekidno kaljenje* upotrebljavamo za komplicirane predmete. Ohlađujemo ih najprije u sredstvu koje brže hladi, a kad se dovoljno ohlade (što osigurava nastanak martenzita), hladimo ih dalje u rashladnom sredstvu koje blaže djeluje i time smanjujemo naprezanje.

b) *Stupnjevito kaljenje* (termalno kaljenje) upotrebljavamo za komplicirane dijelove od legiranog čelika. Prvo hlađenje obavimo u solnoj ili kovinskoj kupelji pri temperaturi blizu nad martenzitnom. Time osiguravamo kasnije stvaranje martenzita. On nastaje pri daljnjem ohlađivanju koje možemo izvršiti na zraku (vidi krivulju 3' u Bainovu dijagramu na str. 345).

3. Poboljšavanje

Svojstva čvrstoće čelika poboljšavamo posebnim postupkom koji se sastoji od običnog kaljenja i popuštanja pri višim temperaturama (do 680 °C), pri čemu martenzit raspada u finozrnate međustrukture (trustit, sorbit) do zrnatog cementita. Izborom temperature popuštanja možemo postići sva željena svojstva čvrstoće između zakaļjenog i meko žarenog stanja.

Posebnim postupkom poboljšavanja ohlađujemo predmet s temperature kaljenja neposredno u solnoj i kovinskoj kupelji na temperaturi poboljšavanja i zatim ga ostavljamo duže vrijeme na toj temperaturi (»izotermno poboljšavanje«, vidi krivulju 3' u Bainovu dijagramu na str. 345). Na taj način nastaje razmjerno žilava struktura (bainit).



Primjer poboljšavanja čelika
 R_m = čvrstoća
 $R_{p0.2}$ = naprezanje tečenja
 A = postotno produlj.
 Z = kontrakcija

4. Površinsko kaljenje

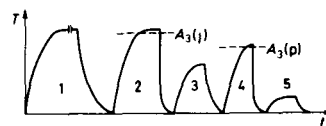
Grijanjem posebnim načinom kojim vrlo brzo ugrijavamo površinu predmeta do temperature kaljenja i neposredno zatim ohlađivanjem (dok su dublji slojevi još hladni) zakalimo samo površinski sloj. Time postizemo tvrdu površinu, a jezgra ostaje žilava. Potrebno brzo ugrijavanje površine možemo postići:

- potapanjem predmeta u solnu kupelju na temperaturi mnogo iznad temperature kaljenja,
- plamenom acetilena i kisika,
- visokofrekventnom strujom, koja zbog unutarnje indukcije ugrijava samo površinu (skin-efekt), i to sloj toliko tanji koliko je viša frekvencija.

5. Cementiranje (ugljičenje)

Da bismo dobili na žilavom (mekom) čeliku osobito tvrdu površinu, upotrebljavamo cementiranje, tj. žarenje pri 870...930 °C u sredstvu za cementiranje, koje može biti kruto (drveni ugljen s dodatkom $BaCO_3$), tekuće (specijalne solne kupelji na bazi NaCN) ili plinovito (CO). Cementiranje traje u krutom sredstvu 4...10 h za cementirani sloj dubine oko 1,2...1,6 mm koji sadrži oko 1% C. U tekućem ili plinovitom sredstvu cementiranje je znatno kraće.

Nakon cementiranja treba predmet toplinski obraditi, i to nakon cementiranja (1) ga ohladimo i zatim kalimo najprije pri temperaturi kaljenja za meki čelik (2), a onda još pri temperaturi kaljenja za pougljičeni površinski sloj (4). Između oba kaljenja može biti uključeno još i međužarenje (3). Na kraju predmet popuštamo (5) pri najviše 180 °C.



6. Nitriranje

Specijalne čelike za nitriranje zagrijavamo 10...100 h u struji amonijaka (NH_3) pri 500°C. Time dobivamo 0,3...1,0 mm debeo, prirodno tvrd površinski sloj tvrdoće 900...1100 HV (koja se naglo smanjuje prema jezgri predmeta).

Cijaniranje je nitriranje u posebnoj solnoj kupelji (na bazi NaCN), u kojoj pri 500...530°C u toku 1...3 h dobivamo nitrirani sloj dubok 0,125 mm tvrdoće 1100 HV.

Opće upute za toplinsku obradu čelika

1. Zagrijavanje

Čelik se pri zagrijavanju rasteže. Naglo je zagrijavanje uzrok nejednolike temperature različitih dijelova predmeta, koji obrađujemo (tanji se i šiljasti dijelovi i rubovi brže ugriju do viših temperatura), što može izazvati jake unutarnje napetosti. Ako je materijal razmjerno žilav, napetosti se ublažuju plastičnom deformacijom i izvijanjem odn. vitoperenjem predmeta (predmet se »bacu«), dok se kod tvrdog materijala pojavljuju pukotine. One se pojavljuju to više što je čelik više legiran, jer je toplinska vodljivost pri jačem legiranju manja.

Zato čelik treba zagrijavati to opreznije, što je više sklon pucanju. Tvrdre i legirane čelike, osobito alatne, moramo zagrijavati polako od temperature okoline do 400...500°C. Odatle dalje čelik postaje mekaniji pa ga zato možemo i brže zagrijavati.

2. Temperatura za grijavanje

Da bismo postigli što bolje rezultate toplinske obrade, potrebno je što je moguće točnije postići temperaturu, određenu za pojedini postupak.

Točno možemo temperaturu odrediti samo različitim mjerilima temperature.

a) Živini termometri se mogu upotrijebiti do 500°C (iznad 350°C u specijalnoj izvedbi — punjeni s N_2 ili CO_2 pod tlakom).

b) Termoelementi za različita temperaturna područja:

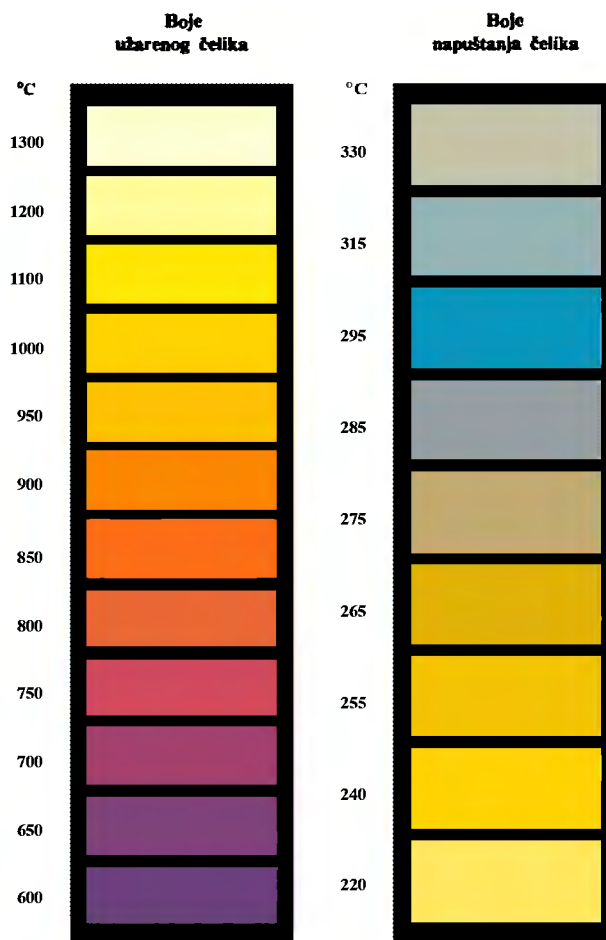
Cu — konstantan do 400°C Ni — NiCr (9% Cr) do 1000°C

Fe — konstantan do 800°C Pt — PtRh (10% Rh) do 1500°C

c) Optički termometri (pirometri) upotrebljivi su iznad 600°C do najviših temperatura.

Osim navedenih instrumenata za mjerenje temperature, koji su neophodni za predmete s većim zahtjevima, možemo za jednostavnije predmete i s manjim zahtjevima ocijeniti temperaturu po boji užarenog čelika (vidi skalu boja užarenog čelika!).

Isto se tako u praksi često ocjenjuju temperature čelika pri popuštanju odn. poslije popuštanja u temperaturnom području od 200 do 350°C po oksidacijskim bojama (vidi ljestvicu boja pri popuštanju čelika!). Boje koje odgovaraju pojedinim temperaturama popuštanja vrijede doduše za većinu čelika, no ne vrijede za nerđajuće čelike, kod kojih su temperature što pripadaju pojedinim bojama znatno više.



3. Trajanje grijanja

Za toplinsku je obradu veoma važno i trajanje grijanja predmeta na određenoj temperaturi. To ovisi o debljini stijenki predmeta, njegovoj toplinskoj vodljivosti i o sredstvu u kojem predmet grijemo.

Ako je grijanje prekratko, nutrina se debljih predmeta ne ugrije do potrebne temperature, zbog čega tada može izostati uvjet za tok određenog procesa toplinske obrade. Ako je pak grijanje predugo, može se pojaviti grubozrnata struktura i smanjivanje količine ugljika u čeliku.

4. Sredstva za zagrijavanje

Ako zagrijavamo predmete samo pri nižim temperaturama do 180 °C (npr. za popuštanje), redovito upotrebljavamo mineralna ulja.

Ako temperatura mora biti visoka, ugrijavamo predmete većinom u žarnim pećima. U njima su izvrgnuti oksidacijskom djelovanju kisika iz zraka. Otuda i gubici materijala zbog izgaranja. Oni su veći u električno grijanim komornim pećima nego u pećima na plin ili naftu.

Oksidacijskom utjecaju atmosfere pri visokim temperaturama najbolje izbjegavamo zagrijavanjem u kupeljima. Najčešće upotrebljavamo:

<i>solne kupelji:</i>		za 770...1000 °C	3 dijela BaCl ₂
za 250...600 °C	1 dio KNO ₃		2 dijela KCl
	1 dio NaNO ₃	iznad 1000 °C	BaCl ₂
za 600...770 °C	1 dio NaCl	<i>kovinske kupelji</i>	
	1 dio KCl	za 250...550 °C	2 dijela Pb
	1 dio BaCl ₂		3 dijela Sn
	2 dijela CaCl ₂	za 550...900 °C	Pb

Zagrijavanje u kupeljima je brže od zagrijavanja u žarnim pećima. Zato su temperaturne napetosti pri zagrijavanju u kupeljima veće, što pri nižim temperaturama (manja žilavost obrađivanih predmeta) povećava opasnost od vitopenjenja i pucanja.

5. Sredstva za hlađenje

Za gašenje (brzo ohlađivanje s visokih temperatura) upotrebljavamo — već prema potrebnoj brzini ohlađivanja (vrsta čelika!) — vodu, ulje ili zrak.

Pri gašenju u vodi kaljenje veoma ovisi o temperaturi i gibanju vode. Potrebno je jako miješanje ili mlaz vode da bi se odstranili nastali mjehuri pare, koji sprečavaju prijelaz topline. (Rashladno se djelovanje vode znatno povećava, ako vodi dodamo natrijeve lužine — NaOH.)

Pri gašenju u ulju (repičnom ili mineralnom) temperatura ulja u području od 40 do 70 °C nema znatnijeg utjecaja na brzinu hlađenja. Važna je viskoznost ulja, koja pri 20 °C treba da iznosi oko 16 (... 50) mm²/s.

Pri hlađenju zrakom upotrebljavamo zračni mlaz, koji mora biti potpuno suh, ili pak predmet naprosto hladimo na zraku. Pri osobito sporom hlađenju ukopamo predmet u pepeo ili ga ostavimo u peći da se zajedno s njom ohladi.

LIJEVANO ŽELJEZO

Lijeivano željezo dobivamo lijevanjem sirovog željeza ($C > 2,06\%$). Količina ugljika C iznosi obično 2,5 ... 3,5%, a razlikujemo:

a) sivi lijev, u kojemu je ugljik sav ili veći dio po cijelom presjeku izlučen kao grafit (C);

b) tvrdi (bijeli) lijev, u kojem je ugljik po cijelom presjeku ili određenom dijelu presjeka potpuno vezan kao željezni karbid (Fe_3C).

Lijeivano željezo sadrži redovno osim ugljika još i manje količine drugih primjesa: Si, Mn, P i S.

Sivi lijev

Normalne vrste sivog lijeva s ljuskastim grafitom (ISO)
(JUS C.J2.020 – 1973)

Nelegirani i malo legirani sivi lijev

Oznaka	Promjer neobrađenog ispitnog uzorka* mm	Vlačni poskus		Pokus savijanja		Gustoća kg/m ³
		promjer obrađenog ispitnog uzorka mm	vlačna čvrstoća R_m (min.) N/mm ²	razmak simetrala oslonaca (min.) mm	čvrstoća** na savijanje (min.) N/mm ²	
SL 10	30	20	100	–	–	7200
SL 15	13	8	230	260	340	
	20	12,5	180	400	320	
	45	32	110	900	270	
SL 20	13	8	280	260	410	7350
	20	12,5	230	400	390	
	30	20	200	600	360	
45	32	160	900	330		
SL 25	13	8	330	–	–	7350
	20	12,5	280	400	460	
	30	20	250	600	420	
45	32	210	900	390		
SL 30	20	12,5	330	–	–	7350
	30	20	300	600	480	
	45	32	260	900	450	
SL 35	20	12,5	380	–	–		7350
	30	20	350	600	540	
	45	32	310	900	510	
SL 40	30	20	400	600	600	7350
	45	32	360	900	570	

* Standardni je ispitni uzorak izrađen od posebno odlijevnog uzorka debljine 30 mm.

** Čvrstoća na savijanje odnose se na neobrađene ispitne uzorke.

Sivi lijev posebnih magnetskih svojstava

Oznaka	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Magnetska indukcija B u magnetskom polju H:			
		H = 1250 A/m	2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m
ESL 10	100	B = 0,40	0,60	0,80	0,95 T

Kvalitetni sivi lijev ima manje ugljika, manje grafitne ljuske i bolju osnovnu strukturu, što postižemo promjenom sastava, postupkom taljenja (višom temperaturom pregrijavanja) i cijepljenjem – modificiranjem (čjepivima: ferosilicijem, silikokalcijem Al, CaC_2 i dr., koja djeluju kao umjetne klice i pospešuju sitnozrnato izlučivanje grafita). Cijepljenjem postižemo čvrstoće od 300 ... 400 N/mm² (modificirani lijev).

Sivi lijev s kuglastim grafitom dobivamo dodatkom Mg (Ce, Ca), koji dezoksidira taljevinu, i čjepiva na bazi Si, koje unosi u taljevinu klice: izlučuje se kuglasti grafit (nodularni ili sferoidni ili duktilni sivi lijev itd.).

Nodularni lijev (JUS C.J2.022 – 1974)

Oznaka	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ² min.	Postot. produlj. A_5 % min.	Tvrdoća HB	Zrnatost
NL 38	240	380	17	140 ... 180	feritna
NL 42	280	420	12	150 ... 200	pretežno feritna
NL 50	350	500	7	170 ... 240	feritno-perlitna
NL 60	400	600	2	190 ... 290	perlitno-feritna
NL 70	450	700	2	210 ... 300	perlitna

Udarne žilavost nodularnog lijeva NL 38 iznosi: $KV = 12 J$.

Legirani sivi lijev je:

a) otporan prema habanju – s manjim dodacima (do $\approx 2,5\%$) Si, Cr, Ni, Mo;

b) austenitni – otporan prema oksidaciji na visokim temperaturama i prema koroziji – s velikim dodatkom Ni (12 ... 36%) i nešto Si, Mn, Cr, Cu.

Austenitni sivi lijev može sadržavati ljuskasti grafit ($R_m = 140 ... 180 N/mm^2$) ili kuglasti grafit ($R_m = 380 ... 420 N/mm^2$).

Tvrdi lijev

Lijeiv s tvrdom korom ima ugljik u jezgri izlučen kao grafit, a u površinskom sloju (kori) vezan kao željezni karbid. Upotrebljava se za valjke i dijelove, izvrtnute habanju.

Bijeli lijev sadrži ugljik po cijelom presjeku vezan kao željezni karbid, a upotrebljava se za mlinske kugle, mlaznice za štrcanje pijeska i sl.

Temperovani lijev (JUS C.J2.021 – 1958)

Temperovani lijev dobivamo od bijelog lijevanog željeza temperovanjem. *Bijeli temperovani lijev* ima nakon žarenja u oksidacijskoj atmosferi bijeli prijelom (zbog oksidacije ugljika).

Crni temperovani lijev ima nakon žarenja u neutralnoj atmosferi crni prijelom (zbog ugljika izlučenog u obliku grafita).

Bijeli temperovani lijev

Oznaka	Debljina mm	Promjer ispitnog uzorka mm	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_1 %	Brinellova tvrdoća HB
B Te L 00	—	—	—	—	250
B Te L 35	4 ... 9	9	340	5	200
	9) ... 13	12		3	
	13) ... 18	15		3	
	18) ... 30	18		2	
B Te L 40	4 ... 9	9	380	10	200
	9) ... 13	12		5	
	13) ... 18	15		3	
	18) ... 30	18		3	

Crni temperovani lijev

Oznaka	Debljina mm	Promjer ispitnog uzorka mm	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_1 %	Brinellova tvrdoća HB
C Te L 35*	4 ... 9	9	330	8	150
	9) ... 13	12			
	13) ... 18	15			
	18) ... 40	18			
C Te L 38*	4 ... 9	9	370	12	140
	9) ... 13	12			
	13) ... 18	15			
	18) ... 40	18			
C Te L 45**	4 ... 9	9	400	5	250
	9) ... 13	12			
	13) ... 18	15			
	18) ... 40	18			

* Feritni lijev. — ** Perlitni lijev.

Magnetska svojstva temperovanog lijeva

Temperovani ljev	Magnetska indukcija B u magnetskom polju H		
	$H = 2500$	5000	10000 A/m
bijeli	$B = 1,00$	1,10	1,20 T
crni	$B = 1,15$	1,25	1,35 T

VRSTE ČELIKA

Čelici su kovke slitine željeza s ugljikom — do 2,06% C — ili i s drugim elementima. Pri većem sadržaju dodanih elemenata za legiranje može sadržaj ugljika biti i nešto veći od 2,06%.

Sve vrste čelika sadrže — iz procesa proizvodnje — još i manje količine Mn, Si, P i S. Čelike koji sadrže Mn < 0,8% i Si < 0,6% još ne smatramo legiranim. Sadržaj P i S gotovo je uvijek nepoželjan.

Razdioba čelika

1. Prema postupku proizvodnje:

a) *obični čelici* dobivaju se većinom iz Siemens-Martinovih peći («SM čelici») ili iz konvertera (Bessemmerovih ili Thomasovih); obični čelici su nelegirani (ugljični) ili malo legirani, a upotrebljavamo ih redovno bez toplinske obrade;

b) *plemeniti čelici* dobivaju se rafinacijom ili rafinacijom i legiranjem u električnim pećima («elektročelici»). Plemeniti se čelici redovno toplinski obrađuju.

2. Prema sadržaju:

a) *ugljični čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika ima ugljik, a drugih elemenata ima samo u količinama koje nemaju bitnog utjecaja, tj.

Mn < 0,80%	Cr < 0,20%	Co < 0,05%
Si < 0,60%	W < 0,10%	Ti < 0,05%
Ni < 0,30%	Mo < 0,05%	Al < 0,05%
Cu < 0,30%	V < 0,05%	

b) *legirani čelici* su one vrste čelika u kojima odlučujući utjecaj na svojstva čelika imaju legirni elementi (tj. oni koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva); malo legirani čelici imaju do 5% dodanih elemenata, a jako legirani više od 5%.

3. Prema upotrebi:

a) *konstrukcijski čelici* su ugljični čelici (obični ili plemeniti) sa sadržajem C < 0,6% ili legirani (uglavnom sa Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V itd.). Upotrebljavamo ih za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i različitih uređaja. Razlikujemo:

— obične (ugljične ili malo legirane) čelike za opće svrhe (masovna upotreba),

— plemenite (rafinirane) ugljične ili legirane čelike za dijelove s većim zahtjevima (dijelove strojeva itd.);

b) *alatni čelici* su plemeniti ugljični čelici sa sadržajem C > 0,6% (< 2,06%) ili legirani (uglavnom sa Cr, W, V, Mo, Co itd.). Upotrebljavamo ih za izradu alata.

Označivanje vrsta čelika prema JUS (JUS C.B0.002 – 1986)*

Oznaka čelika sastoji se od tri dijela: Č. XXXX. X

- slovnog simbola Č
- osnovne oznake od četiriju ili petero brojevanih simbola
- dodatne oznake od jednoga ili više slovnih ili brojevanih simbola
- drugih dodatnih oznaka

Osnovna oznaka označuje vrstu čelika:

1. Čelici s negarantiranim sastavom

Simbol na 1. mjestu : 0

Simbol na 2. mjestu označuje grupu minimalne vlačne čvrstoće:

Simbol	Čvrstoća N/mm ²	Simbol	Čvrstoća N/mm ²
0	—	5	490...580
1	...320	6	590...680
2	330...350	7	690...780
3	360...380	8	790...880
4	390...480	9	890...

Simbol na 3. i 4. (i 5.) mjestu označuje redni broj čelika:

- 0...44 – ugljični čelici s negarantiranim čistoćom
- 45...79 – ugljični čelici s ograničenim udjelom nečistoća
- 80...99 – ugljični čelici s ograničenim udjelom S i P te propisanim udjelom C, Si i Mn.

2. Ugljični i legirani čelici s garantiranim sastavom

Simboli na 1. i 2. mjestu:

- a) kod ugljičnih čelika
 - simbol na 1. mjestu: 1
 - simbol na 2. mjestu: desetorostruka vrijednost maksimalnog postotka ugljika zaokružena na desetine; brojevanje simbol za C = 0,9% jest 9;
- b) kod legiranih čelika
 - simbol na 1. mjestu: oznaka najutjecajnijeg legirnog elementa
 - simbol na 2. mjestu: oznaka drugog (po redu) legirnog elementa; za jednostruko legirane čelike brojevanje je simbol 1.

Element: C Si Mn Cr Ni W Mo V drugi
Oznaka: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Pod najutjecajnijim legirnim elementom razumijeva se onaj kojemu pripada najveći umnožak sadržaja u čeliku (%) i faktora vrijednosti:

Element Si Mn Cr Ni W Mo V Co Ti Cu Al drugi
Faktor vrijednosti 1 1 4 4 7 14 17 20 30 1 1 30

Ako višestruko legirani čelici imaju više legirnih elemenata s istim umnožkom, smatrat će se najutjecajnijim elementom onaj kojemu oznaka ima viši broj.

* Osim ovog standarda čelici se po JUS-u označuju posebnim oznakama (npr. ČRV, ČRN, ČRO, MT, MD itd.)

Simboli na 3. i 4. (i 5.) mjestu označuju redni broj čelika:

- 0...9 (101...199) – čelici koji nisu namijenjeni toplinskoj obradi,
- 20...29 (201...299) – čelici za cementiranje,
- 30...39 (301...399) – čelici za poboljšavanje,
- 40...59 (401...599) – ugljični i malo legirani alatni čelici,
- 60...69 (601...699) – čelici s posebnim fizikalnim svojstvima,
- 70...79 (701...799) – kemijski otporni i vatrootalni čelici,
- 80...89 (801...899) – brzorezni čelici,
- 90...99 (901...999) – čelici za automate.

Dodatna oznaka označuje stanje čelika:

- 0 – bez određene toplinske obrade,
- 1 – žaren,
- 2 – žaren do najbolje obradivosti,
- 3 – normaliziran,
- 4 – poboljšan,
- 5 – hladno preoblikovan,
- 6 – ljušten,
- 7 – brušen
- 8 – kontrolirano hlađen
- 9 – obrađen po posebnim uputama.

Dodatne su oznake još: 2A, 2B, 2C, 2D, 8A, 8B, K, H, S, V, Z.

Ta se oznaka upotrebljava samo za poluproizvode, i to samo u dokumentaciji u vezi s dobavom. Ne odnosi se na gotove ugrađene dijelove i ne unosi se u crteže.

Posebne oznake mogu se dodati u pojedinačnim slučajevima

Označivanje čelika u skladištima bojom (JUS C.B0.003 – 1957)

Oznaka čelika bojom sastoji se od dva dijela, i to:

- od osnovne oznake koju čine četiri trake, a dobiva se zamjenom brojevanih simbola osnovne brojevanje oznake čelika odgovarajućom bojom,
- od dodatne oznake koju čine jedna ili dvije trake, a dobiva se zamjenom brojevanih simbola dodatne brojevanje oznake čelika odgovarajućom bojom.

Brojevanje simboli	Boja trake	Brojevanje simboli	Boja trake
0	crna	5	zeleno
1	bijela	6	modra
2	crvena	7	ljubičasta
3	narančasta	8	smeđa
4	žuta	9	siva

Širina obojene trake treba da je prilagođena veličini proizvoda, no po mogućnosti treba upotrebljavati širine 5...16 mm. Neobojeni pojas između traka iznosi polovinu širine obojene trake, a između dijelova oznake za čelik - osnovne i dodatne - iznosi dvostruku širinu obojene trake.

KONSTRUKCIJSKI ČELIK

Opći konstrukcijski čelici (JUS C.B0.500 – 1970 i 1972)

Sastav (%)

Oznaka	Stanje	C ≈	P maks.	S maks.	N maks.
Č.0000	-	-	-	-	-
Č.0261	smireno	0.15	0.06	0.05	0.007
Č.0270	nesmireno	0.17	0.06	0.06	-
Č.0271	nesmireno	0.15	0.06	0.05	0.007
Č.0361	smireno	0.17	0.05	0.05	0.007
Č.0362	spec. smireno	0.17	0.045	0.045	0.009
Č.0363	spec. smireno	0.17	0.045	0.045	0.009
Č.0370	nesmireno	0.20	0.06	0.06	-
Č.0371	nesmireno	0.17	0.05	0.05	0.007
Č.0460	smireno	0.25	0.06	0.06	-
Č.0461	smireno	0.22	0.05	0.05	0.007
Č.0462	spec. smireno	0.22	0.045	0.045	0.007
Č.0463	spec. smireno	0.22	0.045	0.045	0.007
Č.0471	nesmireno	0.25	0.05	0.05	0.007
Č.0481	smireno	0.20	0.05	0.05	0.007
Č.0482	spec. smireno	0.20	0.045	0.045	0.009
Č.0483	spec. smireno	0.20	0.045	0.045	0.009
Č.0561	smireno	0.20	0.05	0.05	0.007
Č.0562	spec. smireno	0.20	0.045	0.045	0.009
Č.0563	spec. smireno	0.20	0.045	0.045	0.009
Č.0545	smireno	0.30	0.05	0.05	-
Č.0645	smireno	0.40	0.05	0.05	-
Č.0745	smireno	0.50	0.05	0.05	-

Toplinska obrada i upotreba

Oznaka	Kovanje °C	Normali- ziranje °C	Upotreba
Č.0000	-	-	za sporedne svrhe
Č.0261, Č.0270, Č.0271 Č.0361, Č.0362, Č.0363 Č.0370, Č.0371,	1200...900	900...930	meki čelik
Č.0460, Č.0461, Č.0462 Č.0463 Č.0471 Č.0481, Č.0482, Č.0483	1150...900	850...880	polutvrđi čelik
Č.0561, Č.0562, Č.0563 Č.0545	1150...900	830...860	tvrdi čelik
Č.0645 Č.0745	1100...850	810...840 780...810	vrlo tvrdi čelik

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm ² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %	Pokus savijanja* ($\alpha = 180^\circ$)	Udarna žilavost KV	
					J	°C
Č.0000	-	330...500	-	$D = 3a$	-	-
Č.0261 Č.0270, Č.0271	210	340...420	28	$D = 0,5a$	28	+20
Č.0361 Č.0362 Č.0363 Č.0370, Č.0371	240	370...450	25	$D = 1a$	28 28 28	+20 0 -20
Č.0460, Č.0461 Č.0462, Č.0463 Č.0471	260	420...500	22	$D = 2a$	- 28	- +20
Č.0481 Č.0482 Č.0483	290	440...540	22	$D = 2a$	28 28	+20 0 -20
Č.0561 Č.0562 Č.0563	360	520...620	22	$D = 2a$	28 28	+20 0 -20
Č.0545	300	500...600	20	-	-	-
Č.0645	340	600...720	15	-	-	-
Č.0745	370	700...850	10	-	-	-

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Nelegirani čelici za vijke i zakovice: JUS C.B0.506 – 1974.

Ugljični konstrukcijski čelici s garantiranim sastavom (JUS C.B2.020 – 1958)

Oznaka	Sastav* %			Oznaka	Sastav* %		
	C	Mn	Si maks.		C	Mn	Si maks.
Č.1100	0.08...0.12	0.30...0.60	-	Č.1400	0.32...0.38	0.50...0.80	0.35
Č.1101	0.08...0.14	0.30...0.60	0.35	Č.1500	0.38...0.45	0.50...0.80	0.35
Č.1209	0.10...0.15	0.30...0.60	-	Č.1501	0.42...0.48	0.50...0.80	0.35
Č.1210	0.12...0.18	0.30...0.60	0.35	Č.1600	0.48...0.55	0.50...0.80	0.35
Č.1211	0.14...0.22	0.30...0.60	-	Č.1601	0.52...0.58	0.50...0.80	0.35
Č.1300	0.18...0.25	0.30...0.60	-	Č.1700	0.58...0.65	0.50...0.80	0.35
Č.1301	0.18...0.25	0.35...0.60	0.35	Č.1701	0.62...0.70	0.50...0.80	0.35
Č.1302	0.26...0.32	0.40...0.60	0.35				

* Svi ti čelici imaju još $P_{max} = 0,06\%$, $S_{max} = 0,06\%$, $P + S \leq 0,10\%$.

Šitnozrnati konstrukcijski čelik
(JUS C.B0.502 – 1979)

Vrste: ČRO... osnovni čelik
ČRV... čelici za visoke temperature
ČRN... čelici za niske temperature

Sastav (%)

Oznaka	C maks.	Si maks.	Mn	P maks.	S maks.
Kvalitetni čelici					
Č RO 250	0,18	0,40	0,40...1,30	0,040	0,040
Č RV 250	0,18	0,40	0,40...1,30	0,040	0,040
Č RN 250	0,16	0,40	0,50...1,30	0,030	0,030
Č RO 280	0,18	0,40	0,50...1,40	0,040	0,040
Č RV 280	0,18	0,40	0,50...1,40	0,040	0,040
Č RN 280	0,16	0,40	0,60...1,40	0,030	0,030
Č RO 310	0,18	0,45	0,60...1,50	0,040	0,040
Č RV 310	0,18	0,45	0,60...1,50	0,040	0,040
Č RN 310	0,16	0,45	0,70...1,50	0,030	0,030
Č RO 350	0,20	0,10...0,50	0,90...1,60	0,040	0,040
Č RV 350	0,20	0,10...0,50	0,90...1,60	0,040	0,040
Č RN 350	0,18	0,10...0,50	0,90...1,60	0,030	0,030
Plemeniti čelici					
Č RO 380	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RV 380	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RN 380	0,22	-	-	0,035	0,035
Č RO 420	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RV 420	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RN 420	0,22	-	-	0,035	0,035
Č RO 460	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RV 460	0,22	-	-	0,040	0,040
Č RN 460	0,22	-	-	0,035	0,035
Č RO 500	0,23	-	-	0,040	0,040
Č RV 500	0,23	-	-	0,040	0,040
Č RN 500	0,23	-	-	0,035	0,035

Mehanička svojstva (pri temperaturi okoline)

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm ² (min.)				Čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %	Pokus savijanja* $\alpha = 180^\circ$	
	pri debljini (mm)						D	
	16	16) ... 35	35	35) ... 50			uzduž.	popr.
... 250	250	250	240	360...480	25	1a	1a	
... 280	280	280	270	390...510	24	1,5a	2a	
... 310	310	310	300	440...560	23	2a	2,5a	
... 350	350	350	340	490...630	22	2a	3a	
... 380	380	370	360	500...650	20	2,5a	3,5a	
... 420	420	410	400	530...680	19	2,5a	3,5a	
... 460	460	450	440	560...730	17	3a	4a	
... 500	500	480	470	610...770	16	3a	4a	

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Naprezanje tečenja čelika za visoke temperature

Oznaka čelika	Naprezanje tečenja R_e (N/mm ²)*						
	pri temperaturi (°C)						
	100	150	200	250	300	350	400
Č RV 250	220	200	190	170	140	120	110
Č RV 280	240	230	210	190	160	140	120
Č RV 310	260	240	230	210	180	160	140
Č RV 350	290	270	250	230	220	200	170
Č RV 380	320	300	280	260	240	220	190
Č RV 420	350	330	310	280	260	230	210
Č RV 460	390	360	340	310	290	260	230
Č RV 500	410	380	360	330	310	280	250

* Pri debljini ispitnog uzorka do 50 mm. (Pri debljinama do 35 mm su pri temperaturama 100 i 150 °C naprezanja tečenja viša za 10 N/mm².)

Žilavost čelika pri niskim temperaturama

Oznaka čelika	Smjer ispitivanja	Žilavost KV (J)* min				
		pri temperaturi (°C)				
		-60	-40	-20	0	+20
Č RO 250	uzdužno poprečno			48	62	62
Č RO 310				34	41	41
Č RO 380						
Č RO 460	uzdužno poprečno			48	55	62
Č RO 500				34	38	41
Č RV 250	uzdužno poprečno			48	55	62
Č RV 310				-	41	41
Č RV 380						
Č RV 460	uzdužno poprečno			45	51	58
Č RV 500				-	41	41
Č RN 250	uzdužno poprečno	34	41	55	62	62
Č RN 310		24	31	38	45	45
Č RN 380						
Č RN 460	uzdužno poprečno	31	38	51	58	62
Č RN 500		24	27	34	41	45
Č RN 500	uzdužno poprečno	27	34	48	55	62
		24	27	31	38	41

* Pri debljini do 50 mm i u normaliziranom stanju.

Čelici za cementiranje
(JUS C.B9.020 – 1974)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav* %				Ža- reno tvrdo- ća HB	Jezgra – kaljena		
	C	Mn	Cr	drugo		napr. tečenja R _e N/mm ²	vlačna čvrstoća R _m N/mm ²	rel. prod. A ₅ %
Č. 1120 Č. 1121	0,10	0,45	–	–	131	300	500...650	16
Č. 1220 Č. 1221	0,15	0,45	–	–	146	360	600...800	14
Č. 1281	0,15	0,45	–	–	146	360	600...800	14
Č. 4120	0,15	0,50	0,55	–	147	450	700...900	11
Č. 4320 Č. 4321	0,16 0,20	1,15 1,25	0,95 1,15	–	207 217	600 700	800...1100 1000...1300	10 8
Č. 4381 Č. 4382	0,17 0,20	1,15 1,25	0,92 1,15	–	207 217	600 700	800...1100 1000...1300	10 8
Č. 4520	0,16	0,50	1,65	0,30 Mo 1,55 Ni	229	800	1100...1350	8
Č. 4721	0,20	1,05	1,25	0,25 Mo	217	800	1100...1400	7
Č. 4781	0,21	1,05	1,25	0,25 Mo	217	800	1100...1400	7
Č. 7420 Č. 7421	0,20 0,26	0,75 0,75	0,40 0,50	0,45 Mo 0,45 Mo	207 217	600 700	800...1100 1000...1300	10 8
Č. 7480 Č. 7481	0,20 0,26	0,75 0,75	0,40 0,50	0,45 Mo 0,45 Mo	207 217	600 700	800...1100 1000...1300	10 8
Č. 5420 Č. 5421	0,15 0,18	0,50 0,50	1,55 1,95	1,55 Ni 1,95 Ni	217 235	650 800	900...1200 1200...1450	9 7

* Navedene su prosječne vrijednosti. – Svi nelegirani čelici imaju još 0,15...0,35% Si, legirani 0,15...0,40% Si. – Čelici Č. 1120 i Č. 1220 imaju P_{max} = 0,045% i S_{max} = 0,045%, svi ostali čelici imaju P_{max} = 0,035% i S_{max} = 0,035%.

Toplinska obrada¹⁾²⁾

Oznaka	Kaljenje jezgre ³⁾ °C	Među- žarenje ⁴⁾ °C	Kaljenje površine ³⁾ °C	Popuštanje °C
Č. 1120 Č. 1121 Č. 1220 Č. 1221 Č. 1281	890...920 v, k	–	–	150...180
Č. 4120	870...900 v, k	–	–	150...180
Č. 4320 Č. 4321 Č. 4381 Č. 4382 Č. 4520 Č. 4721 Č. 4781	850...880 u, k	–	810...840 u	170...210
Č. 7420 Č. 7421 Č. 7480 Č. 7481	890...920	–	–	170...210
Č. 5420 Č. 5421	840...870 u, v, k	630...650 p, z	800...830 u, k	170...210

¹⁾ Kovanje pri 1100...850 °C – ²⁾ Ugljičenje pri 900...950 °C. – ³⁾ Gašenje: v – u vodi, u – u ulju, k – u solnoj kupelji 160...250 °C. – ⁴⁾ Hlađenje: p – u peći, z – na zraku.

Prokaljivost

Oznaka čelika	Tvrdoća HRC*											
	na udaljenosti od čelone plohe (mm)											
	1,5	3	5	7	9	12	15	20	25	30	35	40
Č. 4320 Č. 4381	47 39	46 35	44 31	41 28	37 24	34 21	33	31	30	29	28	27
Č. 4321 Č. 4382	49 41	49 39	48 36	46 33	44 31	41 28	40 25	37 23	35 21	34	33	31
Č. 4520	48 40	48 40	48 39	48 38	47 37	46 35	46 34	44 32	43 31	42 30	41 29	41 29
Č. 4721 Č. 4781	50 42	50 41	49 39	48 38	47 36	45 34	44 32	42 29	41 27	40 26	39 25	38 24
Č. 7420 Č. 7480	49 41	47 35	43 30	40 27	36 23	32	29	26	24	23	22	21
Č. 7421 Č. 7481	52 44	51 41	50 37	47 33	43 30	39 26	36 24	33 21	31	30	29	28
Č. 5420	47 39	47 38	46 36	45 35	43 32	41 29	39 26	37 24	35 22	34 21	34 20	33 20
Č. 5421	49 41	49 41	49 40	49 39	49 39	49 37	49 36	48 35	47 35	47 34	46 34	46 33

* Gornji i donji broj označuju granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za poboljšavanje (JUS C.B9.021 – 1974)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav* %					Žareno tvrd- ća HB max.	Poboljšano**				
	C	Mn	Cr	Mo	drugo		napr. tečenja R _{p0,2} N/mm ²	vlačna čvrst. min. N/mm ²	postot. prod. A ₅ %	Poboljšanje***	
										kaljenje u vodi °C	kaljenje u ulju °C
Č. 1330	0,22	0,45	-	-	-	156	300	500	22		
Č. 1331	0,22	0,45	-	-	-	156	300	500	22		
Č. 1430	0,35	0,65	-	-	-	183	370	590	19		
Č. 1431	0,35	0,65	-	-	-	183	370	590	19		
Č. 1480	0,35	0,65	-	-	-	183	370	590	19		
Č. 1530	0,46	0,65	-	-	-	207	420	670	16		
Č. 1531	0,46	0,65	-	-	-	207	420	670	16		
Č. 1580	0,46	0,65	-	-	-	207	420	670	16		
Č. 1630	0,56	0,75	-	-	-	229	470	750	14		
Č. 1631	0,56	0,75	-	-	-	229	470	750	14		
Č. 1680	0,56	0,75	-	-	-	229	470	750	14		
Č. 1730	0,61	0,75	-	-	-	241	500	800	14		
Č. 1731	0,61	0,75	-	-	-	241	500	800	14		
Č. 1780	0,61	0,75	-	-	-	241	500	800	13		
Č. 3130	0,40	0,95	-	-	0,38 Si	217	550	800	14		
Č. 3135	0,28	1,48	-	-	-	223	500	700	15		
Č. 4130	0,33	0,75	1,05	-	-	217	600	800	14		
Č. 4131	0,42	0,65	1,05	-	-	217	680	900	12		
Č. 4132	0,38	0,65	0,50	-	-	207	450	700	15		
Č. 4133	0,46	0,65	0,50	-	-	207	550	800	14		
Č. 4134	0,38	0,75	1,05	-	-	217	640	800	13		
Č. 4180	0,33	0,75	1,05	-	-	217	600	800	14		
Č. 4181	0,42	0,65	1,05	-	-	217	680	900	12		
Č. 4184	0,38	0,75	1,05	-	-	217	640	800	13		
Č. 4730	0,25	0,65	1,05	0,22	-	212	600	800	14		
Č. 4731	0,34	0,65	1,05	0,22	-	217	680	900	12		
Č. 4732	0,42	0,65	1,05	0,22	-	217	780	1000	11		
Č. 4733	0,50	0,65	1,05	0,22	-	235	800	1000	10		
Č. 4734	0,30	0,55	2,50	0,20	0,15 V	248	1050	1250	9		
Č. 4738	0,32	0,55	3,05	0,40	0,30 Ni	248	1050	1250	9		
Č. 4781	0,34	0,65	1,05	0,22	-	217	680	900	12		
Č. 4782	0,42	0,65	1,05	0,22	-	217	780	1000	11		
Č. 4830	0,51	0,90	1,05	-	0,15 V	235	800	1000	10		
Č. 5430	0,36	0,65	1,05	0,22	1,05 Ni	217	800	1000	11		
Č. 5431	0,34	0,55	1,55	0,22	1,55 Ni	235	900	1100	10		
Č. 5432	0,30	0,45	2,00	0,40	2,00 Ni	248	1050	1250	9		

* Navedene su prosječne vrijednosti. – Svi čelici (osim Č. 3130 i Č. 3230) imaju još oko 0,25...0,35% Si. – ** P_{max} i S_{max} su za sve čelike Č. 1330, Č. 1430, Č. 1530, Č. 1630 i Č. 1730 po 0,045%, za sve druge čelike po 0,035%.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Norma- lizacija °C	Poboljšanje***	
				kaljenje u vodi °C	kaljenje u ulju °C
Č. 1330	1100...900	650...700	880...910	860...890	870...900
Č. 1331	1100...850	650...700	860...890	840...870	850...880
Č. 1430	1100...850	650...700	840...870	820...850	830...860
Č. 1530	1100...850	650...700	840...870	820...850	830...860
Č. 1531	1100...850	650...700	840...870	820...850	830...860
Č. 1580	1100...850	650...700	840...870	820...850	830...860
Č. 1630	1050...850	650...700	830...860	805...835	815...845
Č. 1631	1050...850	650...700	830...860	805...835	815...845
Č. 1680	1050...850	650...700	830...860	805...835	815...845
Č. 1730	1050...850	650...700	820...850	800...830	810...840
Č. 1731	1050...850	650...700	820...850	800...830	810...840
Č. 1780	1050...850	650...700	820...850	800...830	810...840
Č. 3130	1100...850	650...700	850...880	820...850	830...860
Č. 3139	1100...850	650...700	850...880	820...850	830...860
Č. 4130	1050...850	680...720	850...890	830...860	840...870
Č. 4131	1050...850	680...720	840...880	820...850	830...860
Č. 4132	1100...850	650...700	850...880	830...860	840...870
Č. 4133	1100...850	650...700	840...870	820...850	830...860
Č. 4134	1050...850	680...720	845...885	825...855	835...865
Č. 4180	1050...850	680...720	850...890	830...860	840...870
Č. 4181	1050...850	680...720	840...880	820...850	830...860
Č. 4184	1050...850	680...720	845...885	825...855	835...865
Č. 4730	1050...850	680...720	860...900	840...870	850...880
Č. 4731	1050...850	680...720	850...890	830...860	840...870
Č. 4732	1050...850	680...720	840...880	820...850	830...860
Č. 4733	1050...850	680...720	840...880	820...850	830...860
Č. 4734	1050...850	680...720	860...900	840...870	850...880
Č. 4738	1100...900	680...720	880...920	-	860...900
Č. 4781	1050...850	680...720	850...890	830...860	840...870
Č. 4782	1050...850	680...720	840...880	820...850	830...860
Č. 4830	1050...850	680...720	840...880	(820...850)	830...860
Č. 5430	1050...850	650...700	850...880	820...850	830...860
Č. 5431	1050...850	650...700	850...880	-	830...860
Č. 5432	1050...850	650...700	850...880	-	830...860

** Vrijednosti za mehanička svojstva u poboljšanom stanju (str. 366) vrijede pri debljinama materijala 16...50 mm. Pri manjim (većim) debljinama vrijednosti su za naprezanje tečenja i čvrstoću veće (manje), a za produljenje manje (veće).

*** Popuštanje nakon kaljenja pri 550...660 °C.

Kaljivost čelika za poboljšanje

Oznaka čelika	Tvrdća HRC*											
	na udaljenosti od čeone plohe (mm)											
	1,5	3	5	7	9	12	15	20	25	30	40	50
Č. 3139	55	54	51	48	45	40						
	46	43	37	31	27	22	37	33	31	29	27	26
Č. 4130, Č. 4180	57	57	56	54	52	47	44	39	37	35		
	49	48	45	41	35	30	27	23	21	20	33	31
Č. 4131, Č. 4181	61	61	60	59	58	55	52	46	42	40	37	35
	53	52	50	47	44	39	35	30	27	25	22	20
Č. 4132	59	57	54	49	43	38						
	51	46	37	29	25	21	35	32	30	27	24	22
Č. 4133	63	61	57	52	46	41	38	35				
	54	49	40	32	28	24	22	20	33	31	28	26
Č. 4134, Č. 4184	59	59	58	57	55	51	48	42	39	37		
	51	50	48	44	39	34	31	26	24	22	35	33
Č. 4730	52	52	51	50	48	44	41	37	35	33		
	44	43	40	37	34	30	27	23	21	20	31	31
Č. 4731, Č. 4781	57	57	57	56	55	53	52	48	45	43	40	39
	49	49	48	45	42	38	34	30	28	27	25	24
Č. 4732, Č. 4782	61	61	61	60	60	59	58	56	53	51	47	45
	53	53	52	51	50	46	43	38	35	34	32	32
Č. 4733	64	64	64	63	63	61	60	59	57	55	53	52
	56	55	54	53	51	49	46	42	40	39	37	36
Č. 4734	56	56	56	56	56	56	55	54	53	52	50	48
	48	48	47	47	46	45	44	41	39	38	36	34
Č. 4738	57	57	57	57	57	57	56	55	55	54	53	
	49	48	48	48	47	47	46	46	46	46	45	44
Č. 4830	65	65	64	64	63	62	61	60	58	56	54	53
	57	56	56	55	53	51	48	44	41	40	38	37
Č. 5430	59	59	58	58	57	57	56	55	54	53	51	49
	51	50	49	49	48	46	45	43	41	39	36	33
Č. 5431	58	58	58	58	57	57	56	56	56	55	55	55
	50	50	49	49	48	48	47	46	45	44	43	41
Č. 5432	57	57	57	57	56	56	56	56	55	55	55	55
	49	49	49	49	48	48	47	47	46	46	45	44

* Gornji i donji broj označuju granične vrijednosti tvrdoće.

Čelici za nitriranje

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka po JUS	Sastav %					Tvrdća (bar.) HB	U poboljšanom stanju			Tvrdća nitrirane površine HV	
	C	Cr	Mo	Al	ostalo		naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm ²	vlačna čvrstoća N/mm ²			post. prod. A_5 %
								980	1180		
Č. 4531	0,34	1,7	0,2	0,1	1,0 Ni	245	590	780 ... 980	13	950	
Č. 4734	0,30	2,5	0,2	-	0,15 V	248	785	980 ... 1180	11	750	
Č. 4739	0,33	1,1	0,2	0,1	-	248	590	780 ... 980	14	900	

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Normaliziranje °C	Kaljenje °C	Popuštanje °C
Č. 4531	1050 ... 850	650 ... 700	—	850 ... 900 ulje	580 ... 660
Č. 4734	1050 ... 850	680 ... 720	860 ... 900	850 ... 880 ulje	580 ... 630
Č. 4739	1050 ... 850	680 ... 710	900 ... 930	870 ... 910 voda	580 ... 650

Magnetski lim za transformatore i električne strojeve (JUS C. K5.020 — 1955)

Oznaka	Gubici (W/kg)		Magnetska indukcija B (T)						
	za B (T)		u magnetskom polju H (A/m)						
	1,0	1,5	40	160	1000	5000	10000	50000	100000

Transformatorski lim

MT 93	0,93	2,40	0,45	1,02	1,36	1,55			
MT 100	1,00	2,60	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 110	1,10	2,80	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 125	1,25	3,10	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 135	1,35	3,40	0,20	0,87	1,34	1,55			
MT 145	1,45	3,70	0,20	0,87	1,34	1,55			

Dinamo-lim

MD 170	1,70	4,30		0,86	1,34	1,57	1,70	2,01	2,09
MD 200	2,00	5,30		0,86	1,34	1,57	1,70	2,01	2,09
MD 240	2,40	6,80		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17
MD 200	2,80	8,00		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17
MD 700	... 7,00	... 16,00		0,92	1,39	1,63	1,75	2,08	2,17

Čelici za automate
(JUS C.B0.505 – 1984)

Oznaka	Sastav %					Uпотреба za
	C	Si	Mn	S	P max.	
Č. 1190	0,07...0,12	do 0,25	0,60...0,90	0,18...0,25	0,07	cementiranje
Č. 1290	0,12...0,18	0,10...0,40	0,60...0,90	0,18...0,26	0,07	cementiranje
Č. 1490	0,32...0,39	0,10...0,40	0,60...0,90	0,15...0,25	0,07	poboljšanje
Č. 1590	0,42...0,50	0,10...0,40	0,60...0,90	0,15...0,25	0,07	poboljšanje
Č. 3190	0,14...0,20	0,10...0,40	1,10...1,40	0,20...0,25	0,07	cementiranje
Č. 3990	0,08...0,14	do 0,05	0,90...1,30	0,24...0,32	0,11	
Č. 3991	0,10...0,15	do 0,05	1,00...1,50	0,30...0,40	0,11	
Č. 3993	0,08...0,14	do 0,05	0,90...1,30	0,24...0,32	0,11	0,15...0,35 Pb

Mehanička svojstva (pri debljini 16...40 mm)

Oznaka	Stanje	Naprezanje tečenja R_e N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postotno produlj. A_5 % min.
Č. 1190	hladno vučeno	355	460...710	9
	normalizirano	215	> 350	25
Č. 1290	hladno vučeno	375	460...710	8
	normalizirano	225	> 370	23
Č. 1490	hladno vučeno	315	540...740	8
	normalizirano	285	480...600	18
	poboljšano	365	580...730	16
Č. 1590	hladno vučeno	375	640...830	7
	normalizirano	325	580...700	14
	poboljšano	410	660...800	13
Č. 3190	hladno vučeno	410	510...760	8
	normalizirano	250	> 380	20
Č. 3990	hladno vučeno	375	460...710	8
	normalizirano	225	> 370	23
Č. 3991	hladno vučeno	390	490...740	8
	normalizirano	225	> 370	23
Č. 3993	hladno vučeno	375	460...710	8
	normalizirano	225	> 370	23

Toplinska obrada čelika za automate pri cementiranju

Oznaka	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Ugljičenje °C	Toplinska obrada nakon ugljičenja*
Č. 1190	650...700 (za vučeni čelik)	890...920	u prašku 850...930	1. kaljenje 890...920/v, u međužar. 650...680
Č. 1290			u sol. kup. 780...930	2. kaljenje 770...800/v, u popuštanje 150 (1 h)
Č. 3190			u plinu 900...920	

* Gašenje: v – u vodi, u – u ulju.

Toplinska obrada čelika za automate – za poboljšanje

Oznaka	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšanje*	
			gašenje °C	popuštanje °C
Č. 1490	650...700	860...890	840...870/v ali 850...880/u	530...670
Č. 1590	650...700	840...870	830...860/u	530...670

* Gašenje: v – u vodi, u – u ulju.

Čelici za opruge
(JUS C.B0.551 – 1984)

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka	Sastav (prosječne vrijednosti) %					Žarenje tvrdoa HB maks.	Poboljšano		Post. prod. A_5 %
	C	Si	Mn	Cr	V		naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	
						Č. 2133				0,55	1,65	0,85	–	–	245	1130	1320...1570	6
Č. 2330	0,60	1,45	1,05	–	–	255	1130	1320...1570	6
Č. 2332	0,64	1,65	0,85	–	–	255	1130	1320...1570	6
Č. 2430	0,60	1,65	0,85	0,30	–	255	1130	1320...1570	6
Č. 4230	0,67	1,30	0,50	0,50	–	255	1180	1370...1620	6
Č. 4332	0,55	0,25	0,85	0,85	–	248	1180	1370...1620	6
Č. 4830	0,51	0,25	0,90	1,05	0,15	241	1180	1370...1670	6

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje °C	Normalizacija °C	Poboljšanje*	
				kaljenje °C	popuštanje °C
Č. 2133	1050...850	640...680	830...860	830...860/u	350...550
Č. 2330					
Č. 2332					
Č. 2430					
Č. 4230					
Č. 4332	1100...850	640...680	850...880	830...860/u	350...550
Č. 4830					

* Gašenje: u – u ulju.

*

Čelici za lance: JUS C.B0.507 – 1973.

Hladno valjani čelični lim od malougličnog čelika
(JUS C.B4.016 – 1978)

Oznaka*	Sastav (%)				Naprez. tečenja R_e N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %	Tvrdoća	
	C maks.	Mn maks.	P maks.	S maks.				HRB	HR30T
Č. 0145	0,15	0,60	0,050	0,050	—	200...500	—	—	—
Č. 0146	0,12	0,50	0,040	0,040	280	280...410	28	65	60
Č. 0147	0,10	0,45	0,030	0,030	250	280...380	32	57	55
Č. 0148	0,08	0,45	0,030	0,030	220	280...360	36	50	50

* Pri Č.0145 do Č.0148: dodatna oznaka N: neumireno
Pri Č.0147 i Č.0148: još i dodatna oznaka SU: specijalno umireno
Upotreba: Č.0145 – za opću upotrebu; Č.0146 – za izvlačenje;
Č.0147 – za duboko izvlačenje; Č.0148 – za veoma duboko izvlačenje

Hladno valjane čelične trake od malougličnog čelika
(JUS C.B3.521 – 1967)

Vrste čelika: Č.0146, Č.0147, Č.0148

Dopunska Oznaka	Stupanj tvrdoće	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_{10} %	Upotrebljivost
HT 28	meko	280...400	25	} izvlačenje
HT 30	ojačano	300...420	23	
HT 32	1/8 tvrdo	320...440	16	} izvlačenje štancanje
HT 40	1/4 tvrdo	400...500	10	
HT 45	1/2 tvrdo	450...550	5	} probijanje
HT 55	3/4 tvrdo	550...650	3	
HT 60	tvrd	> 600	2	

Valjana čelična žica
(JUS C.B0.501 – 1977)

Skupina	Oznaka žice*		Sastav (%)**					drugo
	C	Si	Mn	P	S			
A	Ž 8N	Ž 8U	0,08	0,30	0,48	0,040	0,040	—

	Ž 22N	Ž 22U	0,22	0,30	0,58	0,050	0,050	—
B	PŽ 12	...	0,15	0,20	0,45	0,040	0,040	} 0,025 Cu 0,015 Cr 0,015 Ni
	
	PŽ 90	...	0,95	0,20	0,50	0,040	0,040	

* N – neumireno, U – umireno.
** Prosječne vrijednosti.

*

Vučena obična čelična žica (JUS C.B6.010 – 1980)

Vučena čelična žica za posebne svrhe (JUS C.B6.011 – 1980)

Vučena čelična žica za opruge (JUS C.B6.018 – 1980)

Čelici za valjane cijevi propisanih mehaničkih svojstava
(JUS C.B5.021 – 1964)

Oznaka	Sastav* %			Naprez. tečenja R_e N/mm ² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %
	C	Mn min.	Si			
Č. 1212	do 0,17	IV 0,40	0,10...0,35	240	350...450	25
Č. 1213	do 0,22	IV 0,40	0,10...0,35	260	450...550	21
Č. 1402	do 0,36	IV 0,40	0,10...0,35	300	550...650	17
Č. 1502	≈ 0,45	IV 0,40	0,10...0,35	400	650...750	12
Č. 3100	do 0,22	IV 1,50	0,10...0,55	360	520...620	22

* Sve vrste čelika te skupine imaju $P \leq 0,05\%$ i $S \leq 0,05\%$.

Čelici za valjane cijevi za više temperature (JUS C.B5.022 – 1965)
Sastav (%)

Oznaka	C	Si	Mn	Cr	Mo	P maks.	S maks.
Č. 1214	do 0,17	0,10...0,35	do 0,40	—	—	0,05	0,05
Č. 1215	do 0,22	0,10...0,35	do 0,45	—	—	0,05	0,05
Č. 7100	0,12...0,20	0,15...0,35	0,50...0,80	—	0,25...0,35	0,04	0,04
Č. 7400	0,10...0,18	0,15...0,35	0,40...0,70	0,7...1,0	0,40...0,50	0,04	0,04
Č. 7401	do 0,15	0,15...0,50	0,40...0,60	2,0...2,5	0,9...1,1	0,04	0,04

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_e N/mm ² *								Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 % min
	pri temperaturi °C									
	20	200	250	300	350	400	450	500		
Č. 1214	235	186	167	137	118	108	88	—	340...440	25
Č. 1215	255	206	186	157	137	128	108	—	440...540	21
Č. 7100	285	255	235	206	186	177	167	147	440...570	22
Č. 7400	295	275	255	235	216	206	196	176	440...570	22
Č. 7401	265	245	235	226	216	206	196	186	440...590	20

* Vremensko naprezanje tečenja i čvrstoća razabiru se iz tablice na str. 375.

Toplinska obrada

Oznaka	Oblikovanje u vrućem °C	Žarenje nakon oblikov. u hladnom °C	Norm. lizacija °C	Poboljšanje	
				kaljenje* °C	popuštanje °C
Č. 1214	1100...850	650...700	900...930	—	—
Č. 1215	1100...850	650...700	870...900	—	—
Č. 7100	1100...850	660...700	910...940	—	—
Č. 7400	1100...850	680...720	—	910...940 z	650...720
Č. 7401	1100...850	730...780	—	900...960 z	680...780

* z – hlađenje na zraku.

Čelik za kotlovski lim (JUS C.B4.014 – 1977)

Sastav i toplinska obrada

Oznaka	Sastav (%)*					Vruća obrada °C	Norma- lizacija °C	Žarenje za popušt. napetosti °C
	C	Si	Mn	Cr	Mo			
Č. 1202	< 0,16	< 0,35	> 0,40	< 0,30		1000	910...940	600...650
Č. 1204	< 0,20	< 0,35	> 0,50	< 0,30			890...920	
Č. 1206	< 0,22	< 0,35	> 0,55	< 0,30			880...910	
Č. 3105	0,17	0,30	1,05	< 0,30		880...910	550...620	
Č. 3133	0,20	0,50	1,15	< 0,30		850		
Č. 7100	0,16	0,25	0,60		0,30	910...940	600...650	
Č. 7400	0,14	0,25	0,55	0,85	0,45	-**	650...720	

* Čelici Č. 1202 do 1206 imaju najviše po 0,050% P i S, drugi čelici pa najviše po 0,040% P i S. – ** Čelik Č. 7400 poboljšava se kaljenjem pri 910...940 °C i popuštanjem pri 650...720 °C.

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprezanje tečenja R_c N/mm ²					Vlačna čvrstoća N/mm ²	Post. prod. A_5 %	Žila- vost KU/3 J	Pokus savijanja ($\alpha = 180^\circ$) *
	pri temperaturi °C								
	20	200	300	400	450 500				
Č. 1202	215	177	137	98	78	340...440	25	56	$D = 0,5 a$
Č. 1204	245	206	157	118	98	400...490	22	49	$D = 2 a$
Č. 1206	265	226	177	137	118	430...520	21	42	$D = 2,5 a$
Č. 3105	315	265	226	176	156	510...610	18	35	$D = 3,5 a$
Č. 3133	275	245	206	157	136	460...550	19	35	$D = 3 a$
Č. 7100	285	255	206	177	167 147	440...570	21	42	$D = 3 a$
Č. 7400	295	275	235	206	196 176	440...570	20	42	$D = 3 a$

* α – kut savijanja, D – promjer pritiskivača, a – debljina ispitnog uzorka.

Temperatura °C	20	300	400	500	600
Modul elastičnosti E N/mm ²	210000	185000	175000	165000	155000

Toplinska vodljivost i temperaturni koeficijent rastezanja

Oznaka	Toplinska vodljivost λ W/mK						
	pri temperaturi °C						
	20	100	200	300	400	500	600
Č. 1202	54,7	52,9	50,0	47,1	44,2	40,7	
Č. 1204	53,5	51,7	48,8	45,9	43,0	40,1	
Č. 1206	52,3	50,6	48,3	45,3	42,4	39,5	
Č. 3105	53,5	51,2	47,7	44,2	39,5	34,9	
Č. 7100	49,4	48,3	45,9	43,6	40,7	37,8	34,9
Č. 7400	44,2	43,0	41,3	39,5	37,2	34,3	31,4

Između 20 °C i temperature °C	100	200	300	400	500	600
Temperaturni koef. rastezanja α $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$	11,1	12,1	12,9	13,5	13,9	14,1

Vremensko naprezanje tečenja i čvrstoća

Vremensko naprezanje tečenja $R_{p1/t}$ je naprezanje koje izaziva trajno postotno produljenje 1%:

$R_{p1/10000} - v 10000 \text{ h}$
 $R_{p1/100000} - v 100000 \text{ h}$

Vremenska čvrstoća $R_{m/t}$ je naprezanje koje izaziva lom:

$R_{m/10000} - v 10000 \text{ h}$
 $R_{m/100000} - v 100000 \text{ h}$
 $R_{m/200000} - v 200000 \text{ h}$

Oznaka čelika	R_{p1}, R_m N/mm ²	Temperatura °C							
		380	400	420	440	460	480	500	520
Č. 1202	$R_{p1/10000}$	164	136	113	91	72	53	38	
Č. 1204	$R_{p1/100000}$	118	95	74	57	42	30	21	
Č. 1206	$R_m/10000$	229	191	158	127	100	75	54	
Č. 1214	$R_m/100000$	165	132	103	79	59	42	29	
Č. 1215	$R_m/200000$	145	115	89	67	48	33	24	
Č. 3105	$R_{p1/10000}$		167	135	107	82	63	49	39
	$R_{p1/100000}$		118	92	69	51	38	29	22
Č. 3133	$R_m/10000$		250	200	156	121	90	69	54
	$R_m/100000$		177	136	103	75	53	39	30
	$R_m/200000$		158	119	89	65	44	32	26
Č. 7100	$R_{p1/10000}$	Temperatura °C							
		460	480	500	520	540	560	580	600
	$R_{p1/10000}$	199	166	132	99	71			
	$R_{p1/100000}$	147	107	74	46	28			
	$R_m/10000$	279	228	177	127	86			
	$R_m/100000$	211	143	93	59	38			
	$R_m/200000$	193	121	74	45	28			
Č. 7400	$R_{p1/10000}$	227	192	157	122	90	64		
		$R_{p1/100000}$	167	133	98	70	46	30	
	$R_m/10000$	338	284	230	172	125	86		
	$R_m/100000$	252	190	137	94	61	40		
	$R_m/200000$	229	167	115	76	47	31		
Č. 7401	$R_{p1/10000}$	179	147	119	94	73	57	44	
		$R_{p1/100000}$	130	103	78	58	41	30	23
	$R_m/10000$	240	196	157	123	95	74	59	
	$R_m/100000$	184	142	108	78	56	41	29	
	$R_m/200000$	170	128	95	68	47	33	24	

Čelici otporni prema kemijskim ntjecajima

Sastav i mehanička svojstva*

JUS	Oznaka	Sastav %					Naprez. teč. R _{p0.2} N/mm ²	Vlačna čvrstoća R _m N/mm ²	Post. prod. A ₅ %
		C	Cr	Ni	Si, Mo	ost.			
Č. 4170	Prokron 1	0,08	13,0	-	-	-	400	550...700	16
Č. 4171	Prokron 2	0,15	13,0	-	-	-	450	650...800	16
Č. 4172	Prokron 3	0,20	13,0	-	-	-	550	800...950	14
Č. 4570	Prokron 2 spec.	0,20	17,0	2,0	-	-	600	800...950	14
Č. 4572	Prokron 11 spec.	0,08	18,0	10,5	-	+ Ti	205	500...750	35
Č. 4573	Prokron 12	0,08	17,5	12,5	2,0 Mo	-	205	500...700	40
Č. 4574	Prokron 12 spec.	0,08	17,5	12,5	2,0 Mo	+ Ti	225	500...750	35
Č. 4580	Prokron 11 ex.	0,07	18,0	11,0	-	-	185	500...700	45
Č. 4582	Prokron 11 Nb	0,10	18,0	10,0	-	+ Nb	205	500...750	35
Č. 4583	Prokron 12 Nb	0,10	18,0	12,0	2,0 Mo	+ Nb	225	500...750	35

* Za čelike od Č. 4170 do Č. 4570 u poboljšanom stanju, za austenitne čelike od Č. 4571 do Č. 4583 u gašenom stanju.

Čvrstoća pri višim temperaturama

Oznaka	Čvrstoća N/mm ²								
	pri °C								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Č. 4171	750	700	650	600	550	500	340	240	65
Č. 4172									
Č. 4570									

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Žarenje °C	Kaljenje** °C	Popuštanje*** °C
Č. 4170	1150...750	750...800	950...1000 u, z	700...750
Č. 4171	1150...750	750...800	980...1030 u, z	700...750
Č. 4172	1150...750	750...800	950...1030 u, z	650...700
Č. 4570	1100...750	660...700	1000...1050 u	630...720

* Polagano zagrijavati i polagano ohlađivati. - ** Gašenje: u – u ulju, z – na zraku.
*** Boje popuštanja za te čelike ne vrijede (vidi str. 352).

Austenitne čelike (Č. 4571 do Č. 4583) kujemo pri 1150...750 °C, a gasimo pri 1050...1100 °C u vodi.

Čelici za ventile

Sastav i mehanička svojstva (u poboljšanom stanju)

po JUS	Oznaka	Željezna Ravne	Sastav %					Naprez. teč. R _{p0.2} N/mm ²	Vlačna čvrstoća R _m N/mm ²	Post. prod. A ₅ %
			C	Si	Cr	Ni	drugo			
Č. 2331	2Si		0,60	1,7	-	-	-	685	880...1030	12
Č. 4270	Prokron 8		0,45	3,2	9,0	-	-	700	800...1100	14
Č. 4581	Prokron 9		0,80	2,0	20,0	1,4	-	685	880...1130	5
Č. 4588	21-4-N		0,50	-	21,0	4,0	0,40 N	540	980...1180	10
Č. 4870	28-30-4-N		0,5	-	21,0	3,8	9,0 Mn*	600	950...1150	10

* Također: 1,0 Mo; 1,0 V; 1,0 Nb; 0,40 N.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje °C	Kaljenje ²⁾ °C	Popuštanje °C
Č. 2331	1050...1080	680...720	830...850 u	620...680
Č. 4270	1100...900 ¹⁾	700...820	1000...1050 u	700...820 ³⁾
Č. 4581	1100...900 ¹⁾	820...860	1050...1180 u, z	700...750
Č. 4588	1150...900 ¹⁾	-	1140...1180 v	-
Č. 4870	1100...950 ¹⁾	770...820	1140...1180 u, z	650...750

¹⁾ Ohlađivanje u pepelu. - ²⁾ Oznake: »u« i »z« znače gašenje u ulju, odn. na zraku. - ³⁾ Ohlađivanje 1...2 h na zraku.

Vatrostalni čelici

Sastav i mehanička svojstva

po JUS	Oznaka	Željezna Ravne	Sastav %					Naprez. teč. R _{p0.2} N/mm ²	Vlačna čvrstoća R _m N/mm ²	Post. prod. A ₅ %	
			C	Si	Mn	Cr	Ni				Al
Č. 4970	Prokron 10		0,12	1,3	-	24,0	-	1,5	280	520...720	10
Č. 4972	X 10 Cr Al 13		0,12	1,0	-	13,0	-	1,0	250	450...650	15
Č. 4973	X 10 Cr Al 18		0,12	1,0	-	18,0	-	1,0	270	500...700	12
Č. 4578	Prokron 19		0,20	2,0	1,5	25,0	20,0	-	230	550...800	30
Č. 4579	Prokron 20		0,15	1,7	1,5	16,0	35,0	-	230	550...800	30

Toplinska obrada i upotreba

Oznaka	Kovanje	Žarenje	Gašenje u vodi	Upotreba
Č. 4970	1100...750	750...850	-	postoj. u vatri do 1150 °C } podnosi postoj. u vatri do 850 °C } S postoj. u vatri do 1000 °C } S
Č. 4972	1100...800	800...850	-	
Č. 4973	1100...800	800...850	-	
Č. 4578	1150...850	-	1500...1100	austenitni čelik, } ne podnosi postojan do 1200 °C } S
Č. 4579	1100...850	-	1500...1100	

Čelici postojani pri višim temperaturama

Za standardirane vrste čelika Č. 7100 i Č. 7400 vidi podatke na str. 374!

Sastav i mehanička svojstva (u poboljšanom stanju)

Oznaka po JUS	Sastav %					Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %
	C	Mn	Cr	Mo	V			
Č. 7431	0,22	0,60	1,1	0,45	-	500	650...800	15
Č. 7432	0,24	0,60	1,3	0,50	0,2	550	700...850	16

Trajna čvrstoća pri višim temperaturama

Oznaka	Granica puženja N/mm ² pri °C				Upotreba (do 530 °C)
	400	450	500	550	
Č. 7431	320	240	150	(70)	dijelovi parnih turbina (osovine, diskovi)
Č. 7432	360	290	200	(100)	

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Žarenje** °C	Normalizacija °C	Kaljenje*** °C	Popuštanje °C
Č. 7431	1100...850	700...730	900...930	870...900 u	600...660
Č. 7432	1100...850	660...710	900...930	900...950 u, z	600...680

* Ohlađivanje u pepelu. - ** Ohlađivanje u peći. - *** Gašenje: z - na zraku, u - u ulju.

Čelici otporni prema habanju

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka po JUS	Želez. Ravne	Sastav %		Stanje čelika	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %
		C	Mn				
Č. 3134	2 Mn	0,5	1,8	poboljšano	1050	1200...1400	7
Č. 3160	12 Mn	1,2	12,0	gašeno	350	800...1000	30

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Žarenje °C	Normalizacija °C	Kaljenje* °C	Popuštanje °C
Č. 3134	1050...850	680...700	830...850	790...830 u	480...520
Č. 3160**	1050...850	-	-	-	-

* u - gašenje u ulju. - ** Austenitni čelik Č. 3160 gasimo pri 1050 °C u vodi.

ALATNI ČELICI

Ugljični alatni čelici

Sastav i upotreba

Oznaka		Sastav* C %	Upotreba
JUS	Železarna Ravne		
Č. 1531	CK 45	0,45	čekići, sjekire, noževi, svrdla za drvo
Č. 1731	CK 60	0,60	čekići za kamen, pile, držala za alat
Č. 1740	OC 70	0,70	meki čelik za vrlo žilav alat
Č. 1840	OC 80	0,80	žilavi čelik za alat za obradu mekog materijala
Č. 1940	OC 100	1,0**	žilavo-tvrdi čelik za alat koji treba da je prilično tvrd i odgovarajuće žilavosti
Č. 1941	OC 100 extra		
Č. 1943	OC 120	1,2	polu-tvrdi čelik za alat koji treba da je osobito tvrd uz manju žilavost
Č. 1944	OC 120 extra	1,2**	
Č. 1841	Kose	0,80	v vrlo čist čelik za kose
Č. 1948	OCP 135	1,3	osobito tvrdi čelik za najtvrdje male i srednje turpije

* Svi ti čelici imaju najviše po 0,30% Si i Mn.

** Čelici Č. 1941 i Č. 1944 sadrže još 0,1% V.

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje* °C	Meko žarenje**		Kaljenje (u vodi)***	
		°C	tvrdća HB	°C	tvrdća HRC
Č. 1531	1100...850	650...700	197	820...850 v	54
Č. 1731	1050...850	650...700	231	800...930 o	61
Č. 1740	1050...800	690...720	180	770...800 v	63
Č. 1840	1050...800	690...720	190	770...800 v	64
Č. 1940	1000...800	690...720	200	760...790 v	65
Č. 1941	1000...800	690...720	200	760...800 v	65
Č. 1943	1000...800	690...720	210	760...790 v	65
Č. 1944	1000...800	690...720	210	760...800 v	65
Č. 1841	1050...800	680...720	175	780...810 o	65
Č. 1948	1000...800	690...720	210	760...780 v	65

* Nakon kovanja ohlađivanje na zraku.

** Žarenje 3...10 h.

*** Popuštanje pri 100...200 °C.

Legirani alati čelici

Legirani alati čelici za rad u hladnom

Sastav i upotreba

Oznaka		Sastav %					Upotreba
JUS	Železarna Ravne	C	Cr	V	W	ostalo	
Č. 4141	OCR 1	1,15	0,70	0,10			) navojna svrdla, narez-nice, razvrtala
Č. 4143	OCR 3	1,4	0,70				
Č. 4145	OCR 4 extra	1,0	1,5				) kalibri, matrice, turpije, razvrtala
Č. 4149	OCR 3 extra	1,4	0,50				
Č. 4150	OCR 12	2,1	11,5				) rezni alat, alat za reza-nje navoja, ručne ma-trice, štanice
Č. 4650	OCR 12 spec.	2,1	11,5		0,70		
Č. 4750	OCR 12 extra	1,65	11,5	0,15	0,50	0,6 Mo	
Č. 4850	OCR 12 VM	1,55	12,0	1,0		0,9 Mo	rezanje, štanjanje
Č. 4172	Prokron 3	0,20	13,0				) kirurški instrumenti, matrice za tablete i sl.
Č. 41702	Prokron 4	0,32	13,0				
Č. 41704	Prokron 4 ex	0,45	13,0				
Č. 47702	Prokron 5	0,45	14,0	0,10		0,50 Mo	
Č. 5840	84 Ni V 4	0,85	-	0,15	-	0,9 Ni	udarni alat
Č. 7440	OH 49	0,60	3,3	0,15	-	1,1 Mo	rad u hlad. i vrućem
Č. 8140	145 V 33	1,45	-	3,2	-	-	ind. noževi, prešanje

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje		Kaljenje			Popuštanje °C
		°C	tvrd. HB	°C	hl.*	tvrd. HRC	
Č. 4141	1050...850	720...760	220	{ 780...820 800...840	v	{ 64...66 64...66	150...250
Č. 4143	1000...800	720...760	220	{ 770...810 780...840	v	{ 65...67 65...67	150...250
Č. 4145	1050...850	760...800	225	{ 820...860 790...820	v	{ 63...66 63...67	100...300
Č. 4149	1000...800	720...760	220	770...810	v	65...67	150...250
Č. 4150	1050...850	800...840	250	940...980	u, t	63...65	150...400
Č. 4650	1050...850	800...840	250	940...980	u, t	64...66	150...400
Č. 4750	1050...850	800...840	250	980...1020	u, t, z	63...65	150...400
Č. 4850	1050...850	840...880	250	1000...1040	u, t, z	62...64	150...550
Č. 4172	1100...850	770...800	220	950...1020	u, z	44...53	150...450
Č. 41702	1100...850	770...800	225	950...1020	u, z	52...58	150...450
Č. 41704	1050...850	760...800	225	990...1020	u, z	53...60	100...400
Č. 47702	1050...850	770...800	250	950...1020	u, z	53...60	150...450
Č. 5840	1050...850	700...740	220	780...840	v	64...66	150...250
Č. 7440	1050...850	820...850	240	950...1000	u, z	61...63	100...600
Č. 8140	1100...900	720...760	230	{ 800...880 840...950	v	{ 64...67 64...67	180...350

* hl. - hlađenje pri kaljenju: v - voda, u - ulje, t - termalna kupka, z - zrak.

Legirani alati čelici za rad u hladnom

Sastav i upotreba

Oznaka		Sastav %					Upotreba
po JUS	Železarna Ravne	C	Cr	V	W	ostalo	
Č. 4754	CRV	1,0	10,0	0,25		1,1 Mo	) udarno rezanje noževi za drvo, pile
Č. 4755	CRV 2	0,53	8,5	0,10		0,9 Si; 1,2 Mo	
Č. 4756	OA 2	1,0	5,0	0,25	1,2	1,0 Mo	rezanje plastike
Č. 4835	31 Cr V 3	0,33	0,60	0,10			ključevi za vijke
Č. 4844	OL 2 spec.	0,80	0,50	0,20			noževi za drvo i papir
Č. 6443	OSIKRO 2	0,45	1,0	0,20	2,0	1,0 Si	) pneumatski alat, za rad u hlad., vrućem
Č. 6444	OSIKRO 4	0,60	1,0	0,15	2,0	0,60 Si	
Č. 6445	OSIKRO sp.	0,80	1,0	0,30	2,0		industrijski noževi
Č. 3840	Merilo	0,90	0,30	0,10		2,0 Mn	mjerni alat
Č. 6440	Merilo extra	1,05	1,0		1,2	1,0 Mn	mjerni alat
Č. 6840	OW 1	1,2	0,20	1,10	1,0		) navojna svrdla ravrtaci, glodala
Č. 6441	OW 3	1,1	1,2	0,20	1,3		
Č. 6842	OW spec.	1,0		0,2	1,0		) noževi za drvo rezni alat
Č. 6850	OW 5	1,4	0,50	0,25	4,5		

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje		Kaljenje			Popuštanje °C
		°C	tvrd. HB	°C	hl.*	tvrd. HRC	
Č. 4754	1050...850	840...870	250	1000...1020	u	61...63	150...550
Č. 4755	1050...900	840...870	250	1000...1020	u	59...63	150...550
Č. 4756	1050...850	830...870	250	940...980	z,u,t	62...65	150...550
Č. 4835	1050...850	680...720	220	830...860	v	52...55	100...400
Č. 4844	1000...800	680...720	230	800...830	u	63...65	160...400
Č. 6443	1050...850	720...750	230	{ 890...930 860...900	v	{ 56...59 61...64	150...400
Č. 6444	1050...850	720...750	240	860...900	u	60...64	150...400
Č. 6445	1050...850	720...750	250	860...890	u	61...65	150...400
Č. 3840	1050...850	690...720	220	{ 760...800 770...810	u	{ 63...65 63...65	100...300
Č. 6440	1050...850	720...750	230	{ 790...830 800...840	u	{ 63...66 63...66	100...300
Č. 6840	1050...850	720...750	230	{ 760...820 800...840	v	{ 65...67 63...65	150...250
Č. 6441	1050...850	720...750	230	{ 800...860 780...830	u	{ 64...66 65...67	150...300
Č. 6842	1050...850	720...750	230	{ 780...820 820...860	v	{ 65...67 64...66	150...250
Č. 6850	1050...850	720...750	270	800...830	v	66...68	100...250

* hl. - rashladno sredstvo: v - voda, u - ulje, t - termalna kupelj, z - zrak.

Legirani alatni čelici za rad u vrućem

Sastav i upotreba

Oznaka po JUS	Železarna Ravne	Sastav %						Upotreba
		C	Cr	V	W	Mo	drugo	
Č. 4742	Utop N	0,40	1,9			0,2	1,5 Mn	utopi, matrice trnovi, kokile
Č. 4751	Utop Mo 1	0,40	5,0	0,40		1,3	1,0 Si	
Č. 4752	Utop 3	0,36	5,0	0,25	1,4	1,4	1,0 Si	
Č. 4753	Utop Mo 2	0,40	5,0	1,0		1,3	1,0 Si	
Č. 4757	Utop Mo 4	0,50	5,0	1,0		1,5	1,0 Si	
Č. 4758	Utop Mo 6	0,72	5,5	0,65	1,2	1,35	1,0 Si	
Č. 5741	Utop extra 1	0,55	0,70	0,10		0,30	1,7 Ni	
Č. 5742	Utop extra 2	0,55	1,1	0,10		0,50	1,7 Ni	
Č. 6450	Utop 1	0,30	1,0	0,20	4,0		1,0 Si	
Č. 6451	Utop 2	0,30	2,5	0,40	9,0			
Č. 7450	Utop 33	0,32	3,0	0,50		3,0		
Č. 9750	Utop Co 2	0,32	3,0	0,50		3,0	3,0 Co	

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Meko žarenje		Kaljenje				Popuštanje °C
		°C	tvrd. HB	°C	hl.*	tvrd. HRC		
Č. 4742	1080...850	700...740	230	{ 840...870 860...900	t, u z	{ 54...56 52...54	600...680	
Č. 4751	1100...900	800...830	250	{ 980...1030 1000...1050	u, t z	{ 52...56 50...55	570...700	
Č. 4752	1100...900	750...800	250	{ 890...1040 890...1040	u, t z	{ 54...58 52...57	400...650	
Č. 4753	1100...850	800...830	250	{ 1000...1030 1000...1030	u, t z	{ 52...56 50...55	550...700	
Č. 4757	1100...850	800...830	250	{ 1000...1040 1000...1040	u, t z	{ 54...58 52...56	450...650	
Č. 4758	1080...850	830...850	250	{ 1000...1040 1000...1040	u, t z	{ 60...63 59...62	450...600	
Č. 5741	1050...850	670...700	250	{ 830...870 830...870	u u	{ 57...61 58...62	400...700	
Č. 5742	1050...850	670...700	250	{ 860...900 860...900	z z	{ 54...58 54...58	400...700	
Č. 6450	1100...850	740...760	250	{ 960...1000 1000...1040	v u	{ 49...53 46...50	500...700	
Č. 6451	1100...900	780...810	250	{ 1080...1160 1080...1160	u, t z	{ 47...53 42...47	550...700	
Č. 7450	1050...900	780...830	250	{ 1010...1050 1010...1050	t, u z	{ 49...54 42...46	500...700	
Č. 9750	1100...850	800...840	250	{ 1020...1060 1020...1060	u, t z	{ 49...53 42...46	550...700	

* hl. – rashladno sredstvo: v – voda, u – ulje, t – termalna kupka, z – zrak.

Brzorezni čelici

Sastav i upotreba

Oznaka po JUS	Železarna Ravne	Sastav %						Upotreba
		C	W	Cr	Co	Mo	V	
Č. 6880	BRW	0,75	18,0	4,0	–	–	1,1	standardni brzorezni čelik za sve vrste brzoreznog alata
Č. 6980	BRC	0,80	18,0	4,0	5,0	0,7	1,5	Co-brzorezni čelik za rezanje tvrdih materijala velikim brzinama s debelom strugotinom
Č. 7680	BRM 2	0,90	6,5	4,0	–	5,0	1,9	Mo-brzorezni čelik za obradu kovina pri većim udarnim opterećenjima, osobito za noževe i glodala (za grubu obradu)
Č. 9682	BRC 3	0,76	18,0	4,0	9,5	0,7	1,5	jako legirani Co-brzorezni čelik za najveća opterećenja i za rezanje najtvrdijih materijala
Č. 9683	BRU	1,25	9,5	4,0	10,0	3,5	3,2	univerzalni brzorezni čelik najvećeg učinka pri finoj ili gruboj obradi
Č. 9780	BRC Mo	0,92	6,5	4,0	5,0	5,0	1,9	Co-Mo-brzorezni čelik za najtežu grubu obradu gdje se posebno zahtijeva žilavost
Č. 9880	OSV 1	1,5	6,5	4,5	5,0	3,5	5,0	vrlo opterećeni alat, probijači, glodala i noževi za obradu kovina

Toplinska obrada

Oznaka	Kovanje °C	Žarenje		Kaljenje* °C	Popuštanje	
		°C	tvrdća HB		°C	tvrdća HRC
Č. 6880	1150...900	800...830	300	1230...1290	530...560	63...65
Č. 6980	1150...900	800...830	300	1260...1300	540...580	63...66
Č. 7680	1100...900	780...810	300	1180...1230	530...560	63...66
Č. 9682	1150...900	800...830	300	1250...1310	550...590	63...67
Č. 9683	1100...900	800...860	300	1210...1250	540...570	64...67
Č. 9780	1100...900	780...810	300	1200...1240	540...570	63...66
Č. 9880	1100...900	870...900	300	1180...1260	480...520	62...65

* Gašenje u ulju, na zraku ili u termalnoj kupki (540...550 °C).

ČELIČNI LIJEV

Čelični lijev je svaki čelik dobiven postupkom u martenki, konverteru, taljici ili električnoj peći i lijevan u kalupe.

Ugljični (nelegirani) čelični lijev (JUS C.J3.011 - 1973)

Oznaka po JUS	Naprez. tečenja R_e N/mm ² min.	Vlač. čvrstoća R_m N/mm ² min.	Postot. produlj. A_5 % min.	Kontrak. Z % min.	Žilavost KU/3 J min.	Pokus savijanja ($\alpha=180^\circ$) D	Magn. indukcija T pri jakosti polja A/m		
							2500	5000	10000
ČL. 0300	185	375	25	35	34	2 a	1,45	1,60	1,75
ČL. 0301									
ČL. 0400	225	440	22	30	27	3 a	1,40	1,55	1,70
ČL. 0401									
ČL. 0500	255	510	18	25	21	4 a	1,35	1,55	1,70
ČL. 0501									
ČL. 0600	295	590	15	-	-	-	1,30	1,50	1,65
ČL. 0601									
ČL. 0602	345	610	15	-	-	-	-	-	-
ČL. 0603									
ČL. 0700	410	685	12	-	-	-	-	-	-

Svi odljevi moraju biti toplo obrađeni i to: žarenjem na meko ili normaliziranjem ili normaliziranjem i žarenjem na meko.

Legirani čelični lijev za poboljšanje

Sastav

Oznaka po JUS	Željezna Ravne	Sastav %		
		C	Cr	Mo
ČL. 1330	Lg-C 25	0,20		
ČL. 4730	CrMo 60 L	0,25	1,0	0,25
ČL. 4731	CrMo 80 L	0,33	1,0	0,25
ČL. 4732	CrMo 100 L	0,42	1,0	0,25
ČL. 7130	LgZ-45 Mo	0,21		0,40
ČL. 7431	GS17CrMo55	0,18	1,3	0,50

Mehanička svojstva (u poboljšanom stanju) i upotreba

Oznaka po JUS	Naprez. tečenja R_e N/mm ² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %	Upotreba
ČL. 1330	245	400 ... 590	22	ventili (do 450 °C)
ČL. 4730	390	590 ... 740	16	
ČL. 4731	510	740 ... 890	12	
ČL. 4732	665	880 ... 1030	9	statički i dinamički opterećeni dijelovi
ČL. 7130	245	440 ... 590	22	
ČL. 7431	315	490 ... 640	20	ventili (300 ... 540 °C) jače opterećeni dijelovi

Kemijski otporan čelični lijev

Sastav

Oznaka JUS	Željezna Ravne	Sastav %					
		C maks.	Si	Cr	Ni	Mo	ostalo
Nerdajući lijev							
ČL. 4171	Prokron 2 L	0,20		13,5			
ČL. 4571	Prokron 11 L	0,12	1,5	18,0	9,0		
ČL. 4572	Prokron 11 sp. L	0,08	1,0	18,0	10,0		+ Nb
ČL. 4573	Prokron 12 L	0,12	1,5	18,0	10,0	2,0	
ČL. 4574	Prokron 12 sp. L.	0,08	1,0	18,0	11,5	2,0	+ Nb
Vatrootalni lijev							
ČL. 4271	Prokron 10 L	0,45	1,7	29,0			
ČL. 4273	Prokron 16 L	1,3	1,7	29,0			
ČL. 4576	Prokron AS L	0,40	1,5	27,0	4,0		
ČL. 4577	Prokron 15 L	0,35	1,5	25,0	12,0		

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka JUS	Stanje	Naprez. tečenja R_e N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Upotreba
ČL. 4171	pobolj. gaš. (v)	440	590 ... 790	12	otpornost prema rđi i kiselinama
ČL. 4571	gaš. (v)	175	440 ... 640	20	
ČL. 4572	gaš. (v)	175	440 ... 640	20	
ČL. 4573	gaš. (v)	185	440 ... 640	20	
ČL. 4574	gaš. (v)	185	440 ... 640	20	
ČL. 4271	žareno	Tvrdoća	200 ... 300 HB	dijelovi industrijskih peći u vatri do 1100 °C u vatri do 1150 °C	
ČL. 4273	žareno		250 ... 330 HB		
ČL. 4576	žareno		200 ... 300 HB		
ČL. 4577	gaš. (v)		150 ... 230 HB		

Čelični lijev otporan prema habanju

Sastav i mehanička svojstva

Oznaka JUS	Željezna Ravne	Sastav %					Svojstva čvrstoće*
		C	Mn	Cr	Mo	Ni	
ČL. 3134	2 Mn L	0,45	1,8				pobolj.: $R_e = 390$, $A_5 = 7$
ČL. 3160	V 12 Mn L	1,2	13,0				
ČL. 3161	N 12 Mn L	1,0	12,0				
ČL. 3460	V 12 MnCr L	1,2	13,0	1,0			gašeno (u vodi): tvrdoća 200 HB
ČL. 3462	12 MnCr L	1,2	13,0	1,8			
ČL. 7361	12 MnMo L	1,1	12,0		2,0		kalj.: tvrd. 55 ... 60 HRC kalj.: tvrd. 60 ... 64 HRC pobolj.: $R_e = 590$, $A_5 = 4$
ČL. 7362	V 12 MnMo L	1,3	12,0		2,0		
ČL. 4758	15-3 LC-L	2,6		15,0	2,8		
ČL. 4759	15-3 HC-L	3,3		15,0	2,8		
ČL. 4771	Prokron 3 M-L	0,30		17,0	0,6	1,6	

* R_e - granica naravnog tečenja (N/mm²), A_5 - postotno produljenje (%).

OZNAKE ČELIKA

Oznake čelika prema standardima JUS i DIN

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 0000	St 00	Č. 0645	St 60-2
Č. 0145	St 10	Č. 0745	St 70-2
Č. 0146	U St 12, St 12	Č. 1100	—
Č. 0147	U St 13, R St 13	Č. 1101	—
Č. 0148	RR St 14	Č. 1120	C 10
Č. 0210	U St 35-2	Č. 1121	Ck 10
Č. 0211	R St 35-2	Č. 1190	(10 S 20)
Č. 0245	U St 36-1	Č. 1202	H I
Č. 0246	(6 P 10)	Č. 1204	H II
Č. 0247	(U 7 S 10)	Č. 1206	H III
Č. 0255	U St 36-2	Č. 1209	—
Č. 0257	U 10 S 6	Č. 1210	—
Č. 0261	R St 34-2	Č. 1211	—
Č. 0265	UQ St 36-2	Č. 1212	St 35-4
Č. 0267	U 10 S 10	Č. 1213	St 45-4
Č. 0270	U St 34-1	Č. 1214	St 35-8
Č. 0271	U St 34-2	Č. 1215	St 45-8
Č. 0275	R St 36-2	Č. 1220	C 15
Č. 0345	U St 38-1	Č. 1221	Ck 15
Č. 0355	U St 38-2	Č. 1281	Cm 15
Č. 0361	R St 37-2	Č. 1290	15 S 20
Č. 0362	St 37-3	Č. 1300	—
Č. 0363	(St 37-3)	Č. 1301	—
Č. 0365	UQ St 38-2	Č. 1302	—
Č. 0370	U St 37-1	Č. 1330	C 22
Č. 0371	U St 37-2	Č. 1331	Ck 22
Č. 0375	R St 38-2	Č. 1400	—
Č. 0411	—	Č. 1402	St 55-4
Č. 0445	R St 44-2	Č. 1430	C 35
Č. 0446	(6 P 20)	Č. 1431	Ck 35
Č. 0460	R St 42-1	Č. 1480	Cm 35
Č. 0461	R St 42-2	Č. 1490	35 S 20
Č. 0462	St 42-3	Č. 1500	—
Č. 0463	(St 42-3)	Č. 1501	—
Č. 0471	U St 42-2	Č. 1502	—
Č. 0481	R St 46-2	Č. 1530	C 45
Č. 0482	St 46-3	Č. 1531	Ck 45
Č. 0483	(St 46-3)	Č. 1540	(C 45 W 3)
Č. 0545	St 50-2	Č. 1580	Cm 45
Č. 0561	(St 52-3)	Č. 1590	45 S 20
Č. 0562	St 52-3	Č. 1600	—
Č. 0563	(St 52-3)	Č. 1601	—

Oznake čelika prema standardima JUS i DIN (nastavak)

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 1630	C 55	Č. 4141	115 CrV 3
Č. 1631	Ck 55	Č. 4143	140 Cr 3
Č. 1680	Cm 55	Č. 4145	100 Cr 6
Č. 1700	—	Č. 4149	(140 Cr 2)
Č. 1701	—	Č. 4150	X 210 Cr 12
Č. 1730	C 60	Č. 4170	X 7 Cr 13
Č. 1731	Ck 60	Č. 4171	X 15 Cr 13
Č. 1740	(C 67 W 3)	Č. 4172	X 20 Cr 13
Č. 1741	(C 67 W 3)	Č. 4173	(X 40 Cr 13)
Č. 1780	Cm 60	Č. 4175	X 42 Cr 13
Č. 1840	(C 80 W 1)	Č. 4180	34 CrS 4
Č. 1940	(C 105 W 1)	Č. 4181	41 CrS 4
Č. 1941	100 W 1	Č. 4184	37 CrS 4
Č. 1943	(C 125 W)	Č. 4230	67 SiCr 5
Č. 1944	(C 125 W)	Č. 4270	X 45 CrSi 9 3
Č. 1946	(C 110 W 2)	Č. 4320	16 MnCr 5
Č. 1948	(C 135 W 2)	Č. 4321	20 MnCr 5
Č. 2130	(38 Si 7)	Č. 4381	16 MnCrS 5
Č. 2131	46 Si 7	Č. 4382	20 MnCrS 5
Č. 2132	51 Si 7	Č. 4520	17 CrNiMo 6
Č. 2133	55 Si 7	Č. 4531	34 CrAlNi 7
Č. 2134	66 Si 7	Č. 4570	X 22 CrNi 17
Č. 2330	(60 SiMn 5)	Č. 4571	X 12 CrNi 18 8
Č. 2331	(65 Si 7)	Č. 4572	X 10 CrNiTi 18 9
Č. 3100	St 52-4	Č. 4573	X 5 CrNiMo 18 10
Č. 3105	19 Mn 5	Č. 4574	X 10 CrNiMoTi 18 10
Č. 3111	—	Č. 4578	X 15 CrNiSi 25 20
Č. 3112	—	Č. 4579	X 12 CrNiSi 36 16
Č. 3130	40 Mn 4	Č. 4580	X 5 CrNi 18 9
Č. 3133	17 Mn 4	Č. 4581	X 80 CrNiSi 20
Č. 3134	50 Mn 7	Č. 4582	X 10 CrNiNb 18 9
Č. 3139	28 Mn 6	Č. 4583	X 10 CrNiMoNb 18 10
Č. 3160	(X 120 Mn 12)	Č. 4588	(X 53 CrMnNiN 21 9)
Č. 3190	—	Č. 4650	X 210 CrW 12
Č. 3811	—	Č. 4721	20 CrMo 5
Č. 3840	90 MnV 8	Č. 4730	25 CrMo 4
Č. 3990	9 SMn 28	Č. 4731	34 CrMo 4
Č. 4120	15 Cr 3	Č. 4732	42 CrMo 4
Č. 4130	34 Cr 4	Č. 4733	50 CrMo 4
Č. 4131	41 Cr 4	Č. 4734	30 CrMoV 9
Č. 4132	38 Cr 2	Č. 4738	32 CrMo 12
Č. 4133	46 Cr 2	Č. 4739	34 CrAlMo 5
Č. 4134	37 Cr 4	Č. 4750	X 165 CrMoV 12
		Č. 4751	X 38 CrMoV 5 1

Oznake čelika prema standardima JUS i DIN (nastavak)

JUS	DIN	JUS	DIN
Č. 4753	X 40 CrMoV 5 1	Č. 7480	20 MoCrS 4
Č. 4754	—	Č. 7481	25 MoCrS 4
Č. 4755	(X 50 CrMoW 9 11)	Č. 7680	S 6-5-2
Č. 4756	X 100 CrMoV 5 1	Č. 9682	S 18-1-2-10
Č. 4757	(X 50 CrVMo 5 1)	Č. 9683	S 10-4-3-10
Č. 4770	X 55 CrMo 14	Č. 9750	—
Č. 4771	—	Č. 9780	S 6-5-2-5
Č. 4781	—	ČL. 0300	GS-38
Č. 4782	42 CrMoS 4	ČL. 0301	GS-38.3
Č. 4811	—	ČL. 0400	GS-45
Č. 4830	50 CrV 4	ČL. 0401	GS-45.3
Č. 4831	58 CrV 4	ČL. 0500	GS-52
Č. 4835	31 CrV 3	ČL. 0501	GS-52.3
Č. 4850	(X 155 CrVMo 12 1)	ČL. 0600	GS-60
Č. 4970	X 10 CrAl 24	ČL. 0601	GS-60.3
Č. 4972	X 10 CrAl 13	ČL. 0602	GS-62
Č. 5420	15 CrNi 6	ČL. 0603	GS-62.3
Č. 5421	18 CrNi 8	ČL. 0700	GS-70
Č. 5430	36 CrNiMo 4	ČL. 1330	GS-C 25
Č. 5431	34 CrNiMo 6	ČL. 3134	(GS-36 Mn 5)
Č. 5432	30 CrNiMo 8	ČL. 3160	(G-X 120 Mn 12)
Č. 5741	55 NiCrMoV 6	ČL. 3161	(G-X 120 Mn 12)
Č. 5742	56 NiCrMoV 7	ČL. 3460	(G-X 120 Mn 12)
Č. 6440	105 WCr 6	ČL. 3462	(G-X 120 Mn 12)
Č. 6441	(110 WCrV 5)	ČL. 4171	G-X 20 Cr 14
Č. 6443	45 WCrV 7	ČL. 4271	G-X 40 CrSi 29
Č. 6444	60 WCrV 7	ČL. 4273	G-X 130 CrSi 29
Č. 6445	80 WCrV 8	ČL. 4571	G-X 10 CrNi 18 8
Č. 6450	X 30 WCrV 4 1	ČL. 4572	G-X 7 CrNiNb 18 9
Č. 6451	X 30 WCrV 9 3	ČL. 4573	G-X 10 CrNiMo 18 9
Č. 6840	120 WV 4	ČL. 4574	G-X 7 CrNiMoNb 18 10
Č. 6842	100 WV 4	ČL. 4576	G-X 40 CrNiSi 27 4
Č. 6850	(142 WV 13)	ČL. 4577	G-X 35 CrNiSi 25 12
Č. 6880	S 18-0-1	ČL. 4730	(GS-25 CrMo 4)
Č. 6980	S 18-1-2-5	ČL. 4731	(GS-34 CrMo 4)
Č. 7100	15 Mo 3	ČL. 4732	(GS-42 CrMo 4)
Č. 7400	13 CrMo 4 4	ČL. 4758	(G-X 300 CrMo 15 3)
Č. 7401	10 CrMo 9 10	ČL. 4759	—
Č. 7420	20 MoCr 4	ČL. 4771	—
Č. 7421	25 MoCr 4	ČL. 7130	GS-22 Mo 4
Č. 7431	22 CrMo 4 4	ČL. 7361	(G-X 125 MnMo 12 2)
Č. 7432	24 CrMoV 5 5	ČL. 7362	(G-X 125 MnMo 12 2)

Oznake domaćih i nekih stranih alatnih čelika*

JUS	Železarna Ravne	Böhler (Austrija)	Poldi (ČSSR)	GOST (SSSR) (ruska slova!)
Č. 1540	OC 50	MS 45; EMS 45	TSW extra	—
Č. 1740	OC 70	Extra weich	6	Y 7
Č. 1840	OC 80	Extra zäh	5	Y 8
Č. 1940	OC 100	Extra zäh hart 100	EZH	Y 11
Č. 1941	OC 100 extra	Extra S	EZH spec.	—
Č. 1943	OC 120	Extra zäh hart	FS	Y 12A
Č. 1944	OC 120 extra	Extra zäh hart	FS	—
Č. 1741	OCP 65	Prima weich	T 5 P	—
Č. 1946	OCP 110	Pr. mittel hart 115	K 2	—
Č. 1948	OCP 135	Prima hart	2	Y 13
Č. 4835	VCV 130	—	—	—
Č. 4141	OCR 1	CV; SSC	—	—
Č. 4143	OCR 3	—	RCR 1	—
Č. 4145	OCR 4 extra	K 150	KLZ	—
Č. 4149	OCR 3 extra	—	RCR 1	XO 5
Č. 4150	OCR 12	Spezial K	2002	X 12
Č. 4650	OCR 12 spec.	Spezial KR	2002 spec.	—
Č. 4750	OCR 12 extra	Spezial KNL	2002 M	X 12 M
Č. 6840	OW 1	WV; SSWY	—	B 1
Č. 6841	OW 3	—	SPS	—
Č. 6443	OSIKRO 2	MY extra	Tenax N	5 XB 2C
Č. 6444	OSIKRO 4	KL	Tenax NB	6 XB C
Č. 4751	Utop Mo 1	US ultra	TLH	—
Č. 5741	Utop extra 1	GNM	TBM 1	5 XHM
Č. 5742	Utop extra 2	GNME	TBM Extra 1	45 XHM Φ
Č. 6451	Utop 2	WKZ	HPS; 212	3 X 2B8
Č. 3840	Merilo	MST	Stabil spec.	—
Č. 6440	Merilo extra	Amutit	Solar	XBΓ
Č. 4172	Prokron 3	WKW 2	AK 2 spec.	2 X 13
Č. 4173	Prokron 4	—	—	—
Č. 4770	Prokron 5	WKW 4	AK 3 spec.	4 X 13
Č. 6880	BRW	Super Rapid Extra	Max. spec.	P 18
Č. 6882	BRW 2	S.R.E. HVN	Max. sp. Gex.	—
Č. 6980	BRC	S.R.E. 500	Max. spec. 55	P 18 K 5 Φ 2
Č. 7680	BRM 2	S.R.E. Mo	—	—
Č. 9682	BRC 3	CC	MK	PK 10
Č. 9683	BRU	Mo Rapid Ex. 500	—	—
Č. 9780	BRC Mo	Mo Rapid Ex. 1200	—	—

* Usporedba sličnih čelika je po kvaliteti samo približna.

TVRDI METALI

Tvrđi metali sastavljeni su od jednog ili više karbida kao nosilaca tvrdoće i od kobalta kao veziva.

Tvrđi metali nisu čelici i njihova se struktura ne može mijenjati nikakvom toplinskom obradom. Ne mogu se kovati ni valjati; oblikuju se samo lijevanjem odn. sinterovanjem i brušenjem.

1. Lijevani tvrđi metali

Pojavili su se najprije u USA pod nazivom »stellite«. Sastavljeni su na bazi Co (33...65%), Cr (25...32%) i W (6...17%) s približno 0...5% C te lijevani. Kasnije je bio Co – zbog visoke cijene – djelomice zamijenjen sa Fe. Svoju prirodnu tvrdoću zadržavaju do visokih temperatura (pri 750 °C mogu imati još tvrdoću do 750 HV). Veoma su otporni prema habanju, ali su krhki i vrlo osjetljiv prema udarcima. Upotrebljavamo ih za navarivanje.

2. Sinterovani tvrđi metali

Nastali su u Njemačkoj (Krupp, 1926) pod nazivom »widia«. Bitno su utjecali na razvoj tehnike obrade. Sastoje se od kristala WC, TiC (TaC, MoC) te Co kao veziva. TiC je tvrdi od WC, ali smanjuje žilavost. Sinterovani tvrđi metali oblikuju se u pločice, koje se sinteruju. Njihova tvrdoća, koja iznosi 1400...1750 HV, opada do 1000 °C tek za 10%. Sinterovani tvrđi metali sa TiC još su na 700 °C znatno tvrdi od brzoreznog čelika pri temperaturi okoline. Njihova je žilavost također znatna (čvrstoća na savijanje iznosi 2500...1250 N/mm²). Tlačna čvrstoća je vrlo velika (oko 4250 N/mm²).

Tvrđi metali za alat za preoblikovanje (JUS K. A9. 025 – 1974)

Oznaka	Upotreba
G 05	velika otpornost prema habanju, manja žilavost; za matrice, mjerila
G 10	otpornost prema habanju; za matrice, vođice
G 20	otpornost prema habanju i dovoljna žilavost; matrice za izradu cijevi, profilirane matrice, matrice za duboko izvlačenje
G 30	alat za preoblikovanje i odvajanje čestica; za noževe u štancama, za pečatanje
G 40	za jednaki alat kao pri G 30, ali s povećanom žilavošću
G 50	alat za odvajanje čestica, savijanje, kovanje, prešanje (u hladnom i toplom stanju)
G 60	za jednaki alat kao pri G 50, ali s povećanom žilavošću

Tvrđi metali za alat za odvajanje čestica (JUS K. A9.020 – 1966)

Oznaka	Upotreba		
P 01	Odvajanje dugih čestica s čelika	Najfimije tokarenje i bušenje čelika velikom brzinom do 1,7 m/s (100 m/min) s posmakom od 0,1 mm/okr.	
P 10		Odvajanje čestica s čelika šesterostrukom brzinom brzoreznih čelika s najmanjim posmacima do 1 mm/okr.	
P 20		Odvajanje čestica s čelika četverostrukom brzinom brzoreznih čelika s osrednjim posmacima do 2 mm/okr.	
P 30		Odvajanje čestica s čelika dvostrukom brzinom brzoreznih čelika s većim posmacima do 3 mm/okr. Blijanje sivog lijeva.	
P 40		Tokarenje i odvajanje čestica na automatima malom brzinom, ali s velikim presjekom strugotine.	
P 50		Tokarenje i odvajanje čestica na automatima malom brzinom rezanja i velikim presjekom strugotine.	
K 01	Odvajanje kratkih čestica s čelika, neželjeznih kovina i nekovina	Odvajanje čestica s tvrdog i sivog lijeva veće tvrdoće (do 60 HRC), aluminijjskih slitina sa silicijem, kaljenog čelika, plastičnih masa, papira, keramike.	
K 10		Odvajanje čestica s tvrdog sivog lijeva (nad 220 HB), tvrdog čelika ($R_m > 1800 \text{ N/mm}^2$), slitina Al i Cu, plastičnih tvari, stakla, porculana i kamenja.	
K 20		Odvajanje čestica sa sivog lijeva (nad 220 HB), slitina Al i Cu, plastičnih tvari, keramike i kamenja. Vruće i hladno vučenje i valjanje.	
K 30		Odvajanje čestica sa sivog lijeva i čelika manje čvrstoće, ukočenih drvenih ploča i sl.	
K 40		Odvajanje čestica s drveta, vlaknastih tvari, keramike i kamenja (udarna svrdla). Matrice za vučenje tvrdog čelika.	
M 10		Odvajanje čestica s čelika, sivog lijeva i nekovina	Odvajanje čestica velikom brzinom s malim presjekom strugotine. Obrada tvrdog Mn-čelika.
M 20			Odvajanje čestica osrednjom brzinom s osrednjim presjekom strugotine. Obrada tvrdog Mn-čelika i austenitnih čelika.
M 30			Odvajanje čestica malom brzinom s većim presjecima strugotine. Obrada austenitnih čelika.
M 40	Odvajanje čestica s čelika male čvrstoće, osobito na automatima. Obrada neželjeznih kovina		

LAKE KOVINE

Aluminij (JUS C.C2.100-1986)

Osobite prednosti aluminija su mala gustoća i velika otpornost prema koroziji i kemijskim utjecajima. Aluminij ima također veliku toplinsku i električnu vodljivost.

Sastav i upotreba

Oznaka	Dopuštene nečistoće (%) maks.									
	ukupno	Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Ti	Ga	ostalo
Al 99,8.00	0,2	0,03	0,02	0,15	0,15	0,06	0,02	0,02	0,03	0,02
Al 99,7.00	0,3	0,03	0,03	0,20	0,25	0,07	0,03	0,03		0,03
Al 99,5.00	0,5	0,05	0,05	0,25	0,40	0,07	0,05	0,05		0,03
Al 99,3.00	0,7	0,05	0,05	0,7	0,7	0,10	0,05	0,05		0,05
Al 99,0.00	1,0	0,05	0,05	0,5	0,8	0,10	0,10	0,05		0,04

Gustoća aluminija iznosi od 2560 kg/m³ (lijevanog) do 2750 kg/m³ (kovanog, valjanog ili vučenog).

Mehanička svojstva aluminija (Al 99,5)

Stanje aluminija	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. produlj.		Tvrdoća HB
		A ₁₀	A ₅	
lijev	90...120	25...18	-	24...32
<i>trake i limovi</i>				
- meki (žareni)	70	22	25	20
- polutvrdo valjani	100	6	7	30
- tvrdo valjani	130	4	5	35
<i>šipke, žice, cijevi i profili</i>				
- meki (prešani ili žareni)	70	18	20	20
- polutvrdo vučeni	100	5	7	28
- tvrdo vučeni	130 (...170)	3	4	35

Najbolja svojstva u meko žarenom stanju dobivamo, ako nakon što veće plastične deformacije (70...90% smanjenja presjeka) žarimo Al pri 360...400 °C. Najveću kemijsku otpornost postižemo žarenjem pri 450...500 °C.

*

Žice za aluminijску užad moraju imati postotno produljenje > 2%. Pojedina se žica prije pletenja ispituje na pregib i torziju.

Aluminijske slitine

Aluminijske slitine imaju stanovite prednosti pred čistim aluminijem, i to u pogledu čvrstoće i sposobnosti za lijevanje i gnječenje. Neke aluminijske slitine dosežu svojom znatnom čvrstoćom svojstva čelika.

Kaljenje aluminijskih slitina

Aluminijske slitine na bazi AlCu, AlCuNi, AlCuMg i AlMgSi mogu se kaliti (očvršćivati), što im daje svojstva čvrstoće slična onima čelika.

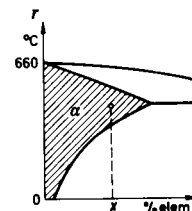
Kaljenje (očvršćivanje) aluminijskih slitina se osniva na promjenljivoj topljivosti stanovitih elemenata (npr. Cu, Si, Mg itd.) u aluminiju. Aluminij može u području oko 500 °C dobro otapati te elemente, dok mu je sposobnost za otapanje na nižim temperaturama neznatna. Ako krutu otopinu pri 500 °C brzo ohladimo, otopljeni se elementi ne mogu pravovremeno izlučiti, pa ostaju u prezasićenoj otopini. Kad se višak otopljenih elemenata s vremenom izluči u kristalnim zrnima ili među njima, slitina postaje znatno čvršća (starenje).

Kaljenje (očvršćivanje) aluminijskih slitina postižemo dakle žarenjem (4...6 h) pri temperaturi određenoj za svaku slitinu (oko 500...570 °C) i gašenjem u vodi te naknadnim starenjem. Starenje je kod nekih slitina (npr. AlCuMg) prirodno — pri okolnoj temperaturi, u drugih pak (npr. AlMgSi) umjetno — pri povišenoj temperaturi (8...15 h pri 100...200 °C). Kaljene slitine imaju mnogo bolja svojstva čvrstoće i mogu se upotrebljavati pri temperaturama do 120 °C. Kaljene se slitine omeškavaju pri 360...400 °C.

Aluminijske slitine sa Cu slabo su otporne prema koroziji.

Primjeri poznatijih trgovačkih naziva aluminijskih slitina

Naziv	Sastav (%) Al +
antikorodal	2,0 Si, 0,7 Mg, 0,6...0,8 Mn, 0,1...0,2 Ti
duralumin	3...4,5 Cu, 0,2...0,7 Si, 0...1,6 Mg, 0...1,2 Mn
duralumin K	0,5...2 Mg, 0,3...1,5 Si, 0...1,5 Mn
duralumin W	3,5...4,5 Cu, 1,8...2,2 Ni, 1...1,8 Mg
duranalij	2,5...9 Mg, 0,3...0,6 Mn
duranalij 2S	2...2,5 Mg, 1...2 Mn
hidronalij	3...12 Mg, 0,2...1 Si, 0,2...0,5 Mn
silal	1,5...4,4 Cu, 0,6...1,2 Mg, 0,6...1 Mn, 0,3...0,6 Si, ...0,1 Ti
silal K	1,5 Mn, 0...0,5 Mg
silal V	0,8...1,5 Mg, 0,5...1 Mn, 0,3...0,7 Si, 0,3 Ti
silumin	12...13,5 Si, 0,3...0,45 Mn
silumin γ	12,25...12,75 Si, 0,35...0,65 Mn, 0,25...0,35 Mg



x = dodatni element
α = kruta otopina

Aluminijske slitine za gnječenje
(JUS C.C2.100 - 1986)

Sastav (%)*

Oznaka (ISO)**	Al+							
	Cu	Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Cr	Ti + Zr
Al Mn 1	—	—	—	—	—	0,8	—	—
	0,1	0,3	0,6	0,7	0,2	1,5	0,10	0,20
Al Mn 1 Cu	0,05	—	—	—	—	1,0	—	—
	0,20	—	0,6	0,7	0,2	1,5	0,10	0,20
Al Mg 1	—	0,5	—	—	—	—	—	—
	0,20	1,1	0,4	0,7	0,2	0,2	0,1	0,2
Al Mg 2	—	1,7	—	—	—	—	—	—
	0,10	2,4	0,5	0,5	0,2	0,5	0,35	0,2
Al Mg 3	—	2,6	—	—	—	—	—	—
	0,10	3,5	0,5	0,5	0,2	0,4	0,35	0,2
Al Mg 4	—	3,5	—	—	—	—	—	—
	0,10	4,6	0,5	0,5	0,2	0,8	0,35	0,2
Al Mg 5	—	4,5	—	—	—	—	—	—
	0,10	5,6	0,5	0,5	0,2	0,5	0,35	0,2
Al Mg 3 Mn	—	2,4	—	—	—	0,3	—	—
	0,10	3,4	0,5	0,5	0,2	1,0	0,25	0,2
Al Si 1 Mg	—	0,6	0,6	—	—	0,4	—	—
	0,10	1,4	1,6	0,5	0,2	1,0	0,35	0,2
Al Mg Si 0,5	—	0,4	0,3	—	—	—	—	—
	0,10	0,9	0,7	0,5	0,2	0,3	0,10	0,2
Al Mg 1 Si Cu	0,15	0,8	0,4	—	—	—	0,15	—
	0,40	1,2	0,8	0,7	0,25	0,15	0,35	0,2
Al Cu 2 Mg	2,0	0,2	—	—	—	—	—	—
	3,0	0,5	0,8	0,7	0,2	0,2	0,1	0,2
Al Cu 4 Mg Si	3,5	0,3	0,2	—	—	0,3	—	—
	4,7	1,2	0,8	0,7	0,5	1,0	—	—
Al Cu 4 Mg 1	3,8	1,0	—	—	—	0,3	—	—
	4,9	1,8	0,5	0,5	0,2	1,2	—	—
Al Cu 4 Si Mg	3,8	0,2	0,5	—	—	0,3	—	—
	5,0	0,8	1,2	0,7	0,2	1,2	—	—

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja. — ** Uzete su u obzir samo neke značajnije slitine, dok su druge sadržane u gore navedenom standardu.

Mehanička svojstva i upotreba nekih aluminijskih slitina za gnječenje (prosječne vrijednosti)

Oznaka	Stanje*	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vl. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod.		Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
				A ₁₀ %	A ₅ %		
Al Mn 1	meko žareno polutvrdo tvrdo	40	90	18	20	22	otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
		100	120	5	6	35	
		120	150	3	4	42	
Al Mg 2	meko žareno polutvrdo tvrdo	80	180	13	15	45	otporna prema koroziji (morske vode)
		140	230	7	8	55	
		180	260	3	4	65	
Al Mg 3	meko žareno polutvrdo tvrdo	80	180	14	16	42	veća otpornost prema koroziji (i u morskoj vodi); s porastom % Mg smanjuje se spособnost zavarivanja
		140	230	8	9	65	
		180	260	3	4	75	
Al Mg 4	meko žareno polutvrdo tvrdo	100	230	14	16	52	dobro se kali, otporna prema koroziji
		160	270	7	9	72	
		220	310	3	4	85	
Al Mg 5	meko žareno polutvrdo	130	240	14	16	65	
		200	340	7	8	90	
Al Si 1 Mg	meko žareno tvrdo	50	110	14	17	35	vrlo dobro se kali, prema koroziji neotporna
		150	170	3	4	55	
		100	200	11	13	60	
		210	290	8	10	80	
Al Cu 4 Si Mg	meko žareno tvrdo	80	180	10	12	70	vrlo dobro se kali, prema koroziji neotporna
		220	280	2	3	75	
		260	400	10	12	100	
		320	450	2	3	120	
Al Cu 5 Pb Bi	kaljeno - h.	250	380	10	12	100	za automate

* h. - stareno pri temperaturi okoline (hladno), t. - stareno pri povišenoj temperaturi (toplo), g. - hladno gnječeno.

Prešane aluminijske slitine za gnječenje imaju približno jednaka mehanička svojstva kao u meko žarenom stanju.

Aluminijske slitine za lijevanje (JUS C.C2.300 – 1983)
Sastav (%)*

Oznaka	Al +					Nečistoće (maks.)		
	Si	Cu	Mg	Ti	Mn	Fe	Zn	druge
<i>Slitine za lijevanje u pijesak ili kokilu</i>								
Al Si 12 00	11,0 13,5	(0,05)	(0,05)	(0,15)	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Si 12 Cu 00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	0,5	1)
Al Si 8 Cu 3.00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	0,8	1,2	2)
Al Si 6 Cu 4 00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,01 0,6	1,0	2,0	3)
Al Si 10 Mg 00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	0,5	0,10	
Al Si 5 Mg 00	5,0 6,0	(0,05)	0,4 0,8	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 5 Si 00	0,9 1,5	(0,05)	4,5 5,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3 Si 1.00	0,9 1,3	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,50	0,10	
Al Mg 3 00	(0,5)	(0,05)	2,5 3,5	0,01 0,20	0,01 0,4	0,3	0,10	
Al Cu 4 Mg Ti 00	(0,18)	4,2 4,9	0,15 0,3	0,15 0,30	(0,05)	0,20	0,07	
<i>Slitine za tlačno lijevanje</i>								
Al Si 12 (Fe) 00	11,0 13,5	(0,10)	(0,1)	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,10	
Al Si 12 Cu (Fe) 00	11,0 13,5	0,1 1,2	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,3	0,8	1)
Al Si 8 Cu 3 (Fe) 00	7,5 9,5	2,0 3,5	(0,3)	(0,15)	0,2 0,5	1,5	2,0	2)
Al Si 6 Cu 4 (Fe) 00	5,0 7,5	3,0 5,0	0,1 0,3	(0,15)	0,3 0,6	1,3	2,0	3)
Al Si 10 Mg (Fe) 00	9,0 11,0	(0,05)	0,2 0,5	(0,15)	0,01 0,4	1,3	0,2	
Al Mg 10 00	0,1 2,5	(0,05)	8,0 10,5	(0,15)	0,2 0,5	1,0	0,10	

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti – U zagradama su najveće dozvoljene vrijednosti sastavina kao nečistoća. – 1) 0,2Ni; 0,2Pb; 0,1Sn. – 2) 0,3Ni; 0,2Pb; 0,1Sn; – 3) 0,3Ni; 0,3Pb; 0,1Sn.

Mehanička svojstva i upotreba slitina za lijevanje u pijesak ili kokilu

Oznaka*	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB	Upotreba
AlSi 12 .01 63	70 ... 100	160 ... 210	5 ... 10	45 ... 60	tanke stijenke odljevaka, dobra kemijska otpornost
02	80 ... 110	160 ... 210	6 ... 12	50 ... 60	
64	80 ... 110	180 ... 240	6 ... 12	50 ... 60	
02	80 ... 110	180 ... 240	6 ... 12	50 ... 60	
AlSi 12 Cu .01 02	80 ... 100 90 ... 120	150 ... 220 180 ... 260	1 ... 4 2 ... 4	50 ... 65 50 ... 75	tanke stijenke, kem. manje otporan
AlSi 8Cu 3.01 02	100 ... 150 100 ... 160	160 ... 200 170 ... 220	1 ... 3 1 ... 3	65 ... 90 70 ... 100	više temperature
AlSi 6 Cu 4.01 02	100 ... 150 120 ... 180	160 ... 200 180 ... 240	1 ... 3 1 ... 3	60 ... 80 70 ... 100	više temperature
AlSi 10 .Mg .01 81	80 ... 100 180 ... 260	170 ... 220 200 ... 320	2 ... 6 1 ... 4	50 ... 60 80 ... 100	veća tvrdoća, za motore, prehrambena industrija
02	90 ... 120	180 ... 240	2 ... 6	60 ... 80	
82	210 ... 280	240 ... 320	1 ... 4	85 ... 115	
AlSi 5 Mg .01 61	100 ... 130 150 ... 180	140 ... 180 180 ... 250	1 ... 3 2 ... 5	55 ... 70 70 ... 85	za motore, prehrambena industrija
81	220 ... 290	240 ... 300	0,5 ... 2	80 ... 110	
02	120 ... 160	160 ... 200	1,5 ... 4	60 ... 75	
62	160 ... 190	210 ... 270	2 ... 8	70 ... 90	
82	240 ... 290	260 ... 320	1 ... 3	90 ... 100	
AlMg 5 Si .01 02	110 ... 130 110 ... 150	160 ... 200 180 ... 240	2 ... 4 2 ... 5	60 ... 75 65 ... 85	otpornost prema morskoj vodi
AlMg 3 Si 1.01 81	80 ... 100 120 ... 160	140 ... 190 200 ... 280	3 ... 8 2 ... 8	50 ... 60 65 ... 90	više temperature, dekorat. dijelovi
02	80 ... 100	150 ... 200	4 ... 10	50 ... 65	
82	120 ... 180	220 ... 300	3 ... 10	65 ... 90	
AlMg 3.01 02	70 ... 100 70 ... 100	140 ... 190 150 ... 200	3 ... 8 5 ... 12	50 ... 60 50 ... 60	
AlCu 4 Mg Ti .61 81	220 ... 280 240 ... 350	300 ... 400 350 ... 420	5 ... 15 3 ... 10	90 ... 115 95 ... 125	za dijelove s velikom tvrdoćom
62	220 ... 300	320 ... 420	8 ... 18	95 ... 115	
82	260 ... 380	350 ... 440	3 ... 12	100 ... 130	

* Dodatne oznake znače: 63–lijevano u pijesak } i meko žareno
01–lijevano u pijesak, 02–lijevano u kokilu; } te gašeno,
61–lijevano u pijesak } i kaljeno (učvršćivano) }
62–lijevano u kokilu } s prirodnim starenjem, 81–lijevano u pijesak } i kaljeno s na-
82–lijevano u kokilu } ravnim starenjem.

Mehanička svojstva i upotreba aluminijskih slitina za tlačni ljev

Oznaka*	Naprezanje tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB	Upotreba
AlSi12.05 AlSi12(Fe).05	140...180	220...280	1...3	60...80	tanke stijenke, dobra kem. otpor.
AlSi12Cu.05 AlSi12Cu(Fe).05	140...220	220...300	—	60...80	tanke stijenke, slaba kem. otpor.
AlSi8Cu3.05 AlSi8Cu3(Fe).05	160...240	240...310	0,5...3	70...100	više temperat., šira upotreba
AlSi6Cu4.05 AlSi6Cu4(Fe).05	150...220	220...300	0,5...3	80...110	više temperat., šira upotreba
AlSi10Mg.05 AlSi10Mg(Fe).05	140...200	220...300	1...3	70...90	motori, prehram. industrija
AlMg10.05	140...220	220...300	1...5	70...100	kem. otpornost, dekor. djelovi

* Dodatna oznaka 05 znači tlačni ljev.

Magnezijske slitine

Sam magnezij je premečan za neposrednu upotrebu. Potrebnu čvrstoću dobiva tek legiranjem. Magnezijske se slitine odlikuju osobito maalom gustoćom, oko 1800 kg/m³. Prema koroziji nisu naročito otporne.

»Elektron« je zajednički naziv za više magnezijskih slitina koje osim Mg sadrže uglavnom do 10% Al, do 4,5% Zn, do 2,2% Mn i do 1,5% Si.

Magnezijske slitine za gnječenje (DIN 1729/1 - 1982)

Sastav i upotreba

Oznaka DIN	Sastav %* Mg +			Dopuštene nečistoće %, maks.	Smjernice za upotrebu
	Al	Zn	Mn		
Mg Mn 2	—	—	1,2 2,0	0,1 Si 0,05 Cu	otporna prema koroziji, dobro se zavaruje
Mg Al 6 Zn	5,5 7,0	0,5 1,5	0,15 0,4	0,1 Si 0,1 Cu	djelomice se može zavarivati
Mg Al 8 Zn	7,8 9,2	0,2 0,8	0,12 0,3	0,1 Si 0,05 Cu	može se kaliti (očvrstiti)

* Gornji i donji brojevi znače granične vrijednosti sadržaja.

Mehanička svojstva

Oznaka	Naprez. teč. $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postotno produljenje		Tvrdoća HB
			A_5	A_{10}	
Mg Mn 2	100...160	200...220	1,5...2	1,5...2	40
Mg Al 6 Zn	160...190	270...280	6...10	8...11	55

Magnezijske slitine za lijevanje (DIN 1729/2 - 1973)

Oznaka i sastav

Oznaka DIN*	Sastav %					
	Al	Zn	Mn	nečistoće (maks.)		
				Si	Cu	ostale
G - Mg Al 8 Zn 1 GK - Mg Al 8 Zn 1 GD - Mg Al 8 Zn 1	7,5...9,0	0,3...1,0	0,15...0,3	0,30	0,20	0,20
G - Mg Al 9 Zn 1 GK - Mg Al 9 Zn 1 GD - Mg Al 9 Zn 1	8,3...10,0	0,3...1,0	0,15...0,3	0,30	0,20	0,20
G - Mg Al 9 Zn 2 GK - Mg Al 9 Zn 2 GD - Mg Al 9 Zn 2	7,5...9,5	0,5...2,0	0,15...0,3	0,50	0,35	0,20

* Početni dijelovi oznaka znače: G - lijevanje u pijesak, GK - lijevanje u kokilu, GD - tlačni ljev.

Mehanička svojstva

Oznaka DIN	Način lijevanja*	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5	Tvrdoća HB	Dinam. čvrst. na savij. ** \pm N/mm ²
G - Mg Al 8 Zn 1	p	90...120	160...220	2...6	50...65	70...90
GK - Mg Al 8 Zn 1	k	90...120	160...220	2...6	50...65	70...90
GD - Mg Al 8 Zn 1	t	140...160	200...240	1...2	60...85	50...60
G - Mg Al 9 Zn 1	p ^h u	110...130 140...150	240...280 240...280	6...10 2...4	55...70 65...90	80...100 80...100
GK - Mg Al 9 Zn 1	k ^h u	110...130 140...150	240...280 240...280	6...10 2...4	55...70 65...90	80...100 80...100
GD - Mg Al 9 Zn 1	t	150...170	220...250	0,5...1,5	65...85	40...50
G - Mg Al 9 Zn 2	p	90...130	160...220	2...5	50...70	70...90
GK - Mg Al 9 Zn 2	k	90...130	160...220	2...5	50...70	70...90
GD - Mg Al 9 Zn 2	t	140...170	200...250	0,5...2	60...85	40...50

* p - lijevano u pijesak, k - lijevano u kokilu, t - tlačni ljev; h - homogenizirano, u - toplo očvrstnuto.

** Pn 50 · 10⁸ titraja.

BAKAR I BAKRENE SLITINE

Bakar

Katodni bakar je elektrolitički rafinirani (na katodi izlučeni) bakar, namijenjen u prvom redu za pretaljivanje u elektrolitski bakar.

S obzirom na način rafiniranja razlikujemo:

- *talionički bakar*, dobiven pirometalurškom rafinacijom
- *elektrolitski bakar*, dobiven pretaljivanjem katodnog bakra.

S obzirom na kisik u bakru razlikujemo:

- *bakar bez kisika*, taljen u zaštitnoj atmosferi ili vakuumu,
- *bakar s kisikom*, taljen u oksidacijskoj atmosferi,
- *dezoksidirani bakar*, dobiven upotrebom kovinskih ili nekovinskih dezoksidanata.

Standardne vrste bakra (JUS C.D1.002 – 1986)

Oznaka	Cu min.	Sastav* (%)		Napomena
		O	P	
Katodni bakar				
EK1-Cu	99,99			} za katode
EK2-Cu	99,95			
Bakar bez kisika				
EB1-Cu	99,99	0,001		} elektrolitski bakar
EB2-Cu	99,95			
Bakar s kisikom				
ET1-Cu	99,90	0,005 ... 0,04		} elektrolitski bakar talionički bakar } za lijevanje
ET2-Cu	99,90	0,005 ... 0,04		
T1-Cu	99,90	0,005 ... 0,08		
T2-Cu	99,70	... 0,01		
Dezoksidirani bakar				
ED-Cu	99,90		0,003	} elektrolitski bakar s malo P s mnogo P
DNP-Cu	99,90		0,005 ... 0,014	
DVP1-Cu	99,90		0,015 ... 0,04	
DVP2-Cu	99,70		0,015 ... 0,05	

* Za elektrotehnički bakar nije odlučan kemijski sastav (EB1-Cu, EB2-Cu, ET1-Cu, ET2-Cu in ED-Cu), već samo električna vodljivost (u mekom stanju, pri 20 °C: najmanje 58 m/Ω mm²).

Mehanička svojstva bakra

Stanje	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Post. prod. A_5 %	Tvrdoća HB
meko	210 ... 250	> 38	40 ... 60
polutvrdo	250 ... 300	> 10	60 ... 90
tvrd	> 300	> 6	> 90

Bakrene slitine za gnječenje (JUS C.D2.100 – 1982)

Slitine bakra s cinkom (*Mjedi*)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Zn	nečistoće (maks.)	
Cu Zn 5.00	94,0 ... 96,0	} ostatak	} 0,2 Ni ostale ukupno 0,3 (Al, Fe, Mn, Pb, Sn, Sb)	
Cu Zn 10.00	89,0 ... 91,0			
Cu Zn 15.00	84,0 ... 86,0			
Cu Zn 20.00	79,0 ... 81,0			
Cu Zn 28.00	69,0 ... 73,0			
Cu Zn 30.00	69,0 ... 71,0			
Cu Zn 33.00	66,0 ... 68,5			
Cu Zn 36.00	63,4 ... 65,0			
Cu Zn 37.00	62,0 ... 64,5			} 0,3 Ni, 0,1 ... 0,2 Pb ostale ukupno 0,5
Cu Zn 40.00	59,0 ... 61,5			

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za upotrebu

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm ²	% prod.		Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
			A_{10} %	A_5 %		
Cu Zn 10.00	meka	250	40	–	55	} instalacijski dijelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvrda	320	30	–	70	
	tvrd	400	15	–	90	
Cu Zn 15.00	meka	250	40	–	55	} cijevi za manometre, instalacijski dijelovi za elektrotehniku, ukrasni predmeti
	polutvrda	320	30	–	70	
	tvrd	400	15	–	90	
Cu Zn 20.00	meka	260	40	–	55	} vrlo dobra za hladno oblikovanje, može se platirati čelikom, cijevi, duboke posude
	polutvrda	330	30	–	70	
	tvrd	420	15	–	90	
Cu Zn 28.00	meka	250	40	45	50	} povećana sposobnost za hladno oblikovanje, žičane mreže, cijevne zakovice, vijci
	polutvrda	320	30	32	70	
	tvrd	380	18	20	90	
Cu Zn 30.00	meka	260	40	45	52	} najvažnija slitina za hladno oblikovanje (vučenje, valjanje, prešanje); vijci, cijevi
	polutvrda	340	24	26	80	
	tvrd	430	12	14	100	
Cu Zn 33.00	meka	280	40	45	55	} za toplo i hladno oblikovanje; dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvrda	380	15	18	90	
	tvrd	500	5	6	115	
Cu Zn 37.00	meka	290	45	48	60	} za toplo i hladno oblikovanje; dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvrda	350	25	28	75	
	tvrd	410	15	17	95	
Cu Zn 40.00	meka	340	30	33	70	} za toplo i hladno oblikovanje; dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvrda	410	15	18	95	
	tvrd	480	10	12	125	

Slitine bakra s cinkom i olovom
(»Mjedi s olovom«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Cu	Sastav %			nečistoće (maks.)	
		Pb	Zn	ostatak	Ni	ostale
Cu Zn 36 Pb 1,5.00	62,0...64,0	0,7...2,5	ostatak		0,3	0,5
Cu Zn 36 Pb 3.00	60,0...62,0	2,5...3,5			0,3	0,5
Cu Zn 38 Pb 1,5.00	59,5...61,5	1,5...2,5			0,3	0,5
Cu Zn 39 Pb 2.00	57,0...59,0	1,5...2,5			0,3	1,0
Cu Zn 39 Pb 3.00	57,0...59,0	2,5...3,5			0,5	1,0
Cu Zn 44 Pb 2.00	53,5...56,0	1,0...2,5			0,5	1,0

Mehanička svojstva (prosječne vrijednosti) i smjernice za upotrebu

Oznaka	Stanje slitine	Vlačna čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. %		Tvrdoća HB	Smjernice za upotrebu
			A ₁₀	A ₅		
Cu Zn 36 Pb 3.00	meka	340	30	33	70	za toplo i hladno oblikovanje, dijelovi za prešanje u toplom stanju
	polutvr.	410	15	18	95	
	tvrda	480	10	12	125	
Cu Zn 39 Pb 2.00	meka	370	25	28	75	najvažnija slitina za oblikovanje odvajanjem čestica (slit. za automate), razni dijel. strojeva
	polutvr.	440	10	12	105	
	tvrda	510	5	6	125	

Posebne slitine bakra s cinkom
(»Posebne mjedi«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Cu	Sastav %			ostalo
		Al	Mn		
Cu Zn 20 Al 2.00	76,0...79,0	1,8...2,3	—	—	0,02...0,035As
Cu Zn 28 Sn 1.00	70,0...73,0	—	—	—	0,9...1,3 Sn ¹⁾
Cu Zn 31 Si 1.00	66,0...70,0	—	—	—	0,7...1,3 Si
Cu Zn 35 Ni 2,5.00	58,0...61,0	0,3...1,5	1,5...2,5	—	2,0...3,0 Ni
Cu Zn 38 Sn 1.00	59,5...63,5	—	—	—	0,7...1,4 Sn
Cu Zn 40 Al 1.00	56,5...59,5	0,4...1,6	0,4...1,8	—	—
Cu Zn 40 Al 2.00	55,5...59,0	1,3...2,3	1,0...2,4	—	—
Cu Zn 40 Ni 2.00	56,0...58,0	0,5...1,0	—	—	1,0...2,0 Ni
Cu Zn 40 Mn 2.00	57,0...59,0	—	1,0...2,5	—	—
Cu Zn 38 Al 2 Mn 3 Ni.00	61,0...63,0	2,0...3,0	3,0...4,0	—	0,3...0,5 Ni ²⁾
Cu Zn 39 Al Fe Mn.00	56,0...61,0	0,2...1,5	0,2...2,0	—	0,2...1,5 Fe

¹⁾ Također 0,02...0,035 As. — ²⁾ Također 0,3...0,7 Fe.

Slitine bakra s kositrom
(»Kositrena bronca«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Sn	Sastav %		Cu	Upotreba
		P			
Cu Sn 2.00	1,0...2,5	0,01...0,4	ostatak		vijci, opruge, za elektr. vodljive opruge
Cu Sn 6.00	5,5...7,5	0,01...0,4			
Cu Sn 8.00	7,5...9,0	0,01...0,4			

Slitine bakra s kositrom i cinkom
(»Crvena kovina«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Sn	Sastav %			Cu	Upotreba
		Zn	Pb	P maks.		
Cu Sn 4 Zn 4.00	3,0...5,0	3,0...5,3	—	0,1	ostatak	za manometarske opruge
Cu Sn 4 Pb 4 Zn 4.00	3,0...5,0	3,0...5,0	3,0...5,0	0,4		za klizne ležaje

Slitine bakra s aluminijem
(»Aluminijske bronce«)

Oznaka, sastav i upotreba

Oznaka	Al	Sastav %			Cu	Upotreba
		Mn	Ni	As, Fe		
Cu Al 5.00	4,0...6,0	0,0...0,3	0,0...0,8	—	ostatak	za kočne pojase, prigušivače oscilacija
Cu Al 5 As.00	4,0...6,0	—	—	0,0...0,8		
Cu Al 8.00	7,0...9,0	0,0...0,5	0,0...0,5	—	ostatak	otpor. prema sump. i oct. kiselinama
Cu Al 8 Fe 3.00	6,5...8,5	0,0...0,8	0,0...0,8	1,5...3,5		velika čvrstoća (i na povišenoj temper.), otpornost prema kiselinama
Cu Al 10 Fe 3.00	8,5...11,0	1,5...3,5	0,0...1,0	2,0...4,0		i mor. vodi te vatri
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	8,5...11,5	0,0...1,5	4,0...6,0	2,0...8,0		
Cu Al 9 Mn 2.00	8,0...10,0	1,5...2,5	—	—		

Slitine bakra s niklom (»Niklena bronca«)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %			Upotreba
	Ni	Fe	Mn	
Cu Ni 5 Fe 1 Mn .00	4,0... 6,0	1,0... 1,5	0,3... 0,8	ostatak za cijevi i aparate osobita otp. prema eroziji, koroziji i kavit. sposobnost za duboko izvlačenje, platiniranje za kondenzator, cijevi za kovani novac i platiniranje velika otp. prema eroziji, koroziji i kavit. sposobnost oblikovanja, lako oksidira
Cu Ni 10 Fe 1 Mn .00	9,0... 11,0	1,0... 2,0	0,3... 1,0	
Cu Ni 20.00	19,0... 22,0	–	0,0... 0,5	
Cu Ni 20 Mn 1 Fe .00	19,0... 22,0	0,4... 1,0	0,5... 1,5	
Cu Ni 25.00	24,0... 26,0	–	0,0... 0,5	
Cu Ni 30 Mn 1 Fe .00	29,0... 32,0	0,4... 1,0	0,5... 1,5	
Cu Ni 44 Mn 1.00	43,0... 45,0	–	0,5... 2,0	

Slitine bakra s niklom i cinkom

(»Novo srebro«)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %				Upotreba
	Cu	Ni	Pb	Zn	
Cu Ni 10 Zn 27.00	61,0... 65,0	8,0... 11,0	–	–	ostatak dobro se lijeva i preša; za unut. arhitekturu dobro se preša i kuje, za opću upotrebu dobra spos. obl., za opruge; za pribor za jelo dobro se preša, kuje i obrađuje dobra sposobnost obl., za ukrasne predmete općenito za finu mehaniku i optiku; ključeve
Cu Ni 10 Zn 42 Pb 2.00	45,0... 48,0	9,0... 11,0	0,5... 2,0	–	
Cu Ni 12 Zn 24.00	62,0... 66,0	11,0... 13,0	–	–	
Cu Ni 15 Zn 21.00	63,0... 67,0	13,5... 16,5	–	–	
Cu Ni 18 Zn 20.00	60,0... 64,0	17,0... 19,0	–	–	
Cu Ni 18 Zn 27.00	59,0... 63,0	17,0... 19,0	–	–	
Cu Ni 18 Zn 19 Pb 1.00	59,0... 63,0	17,0... 19,0	0,3... 1,5	–	

Poznati trgovački nazivi za novo srebro: alpaka, argentan, pakfong. »Kitajsko srebro« je starije ime za posrebrano novo srebro.

*

Slitina bakra sa silicijem (»silicijska bronca«) – (2,8... 3,5% Si; 1... 1,5% Mn; ost. Cu) – služi za opruge koje su električni vodiči, kovinska sita itd.

Slitina bakra s berilijem (»berilijaska bronca«) – (1,5... 2,5% Be) – lako se kali (otvrdnjava), čime se postiže tvrdoća do 400 HB.

Bakrove slitine za lijevanje

(JUS C.D2.300 – 1980/1986)

Slitine bakra sa cinkom i olovom

(»Mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Pb	Al	Zn
• Cu Zn 33 Pb 2.00	63,0... 67,0	1,0... 3,0	–	ostatak
• Cu Zn 39 Pb .00	60,0... 63,0	0,5... 2,0	0,0... 0,5	
• Cu Zn 40 Pb .00	58,0... 63,0	0,5... 2,5	0,2... 0,8	

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja R_p 0,2 N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Zn 33 Pb 2.01	70	180	12	450	otpornost prema koroziji, armature
K. Cu Zn 39 Pb .02	80	250	25	750	armature za plin i vodu
T. Cu Zn 39 Pb .05	120	250	15	750	
P. Cu Zn 40 Pb .01	–	220	15	–	armature, okovi, precizna mehanika
K. Cu Zn 40 Pb .02	120	280	15	750	
T. Cu Zn 40 Pb .05					

Slitine bakra sa cinkom te aluminijem, željezom i manganom (»Posebne mjedi za lijevanje«)

Oznaka i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Al	Fe	Mn	Zn
• Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.00	60,0... 66,0	4,5... 7,0	2,0... 4,0	1,5... 4,0	ostatak
• Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.00	60,0... 66,0	2,5... 5,0	1,5... 4,0	1,5... 4,0	
• Cu Zn 35 Al Fe Mn .00	57,0... 65,0	0,5... 2,5	0,5... 2,0	0,1... 3,0	

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja R_p 0,2 N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.01	400	725	10	1800	statički jako opterećeni dijelovi konstrukcija
C. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.03		740	10	1900	
N. Cu Zn 25 Al 6 Fe 3 Mn 3.04		–	–	–	
P. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.01	300	600	18	1400	velika statička čvrstoća i tvrdoća
C. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.03		600	18	1500	
N. Cu Zn 26 Al 4 Fe 3 Mn 3.04		–	–	–	
P. Cu Zn 35 Al Fe Mn .01	170	450	20	1100	umjerena klizna mehanička svojstva, brodski propeleri
K. Cu Zn 35 Al Fe Mn .02					
C. Cu Zn 35 Al Fe Mn .03					
N. Cu Zn 35 Al Fe Mn .04					
T. Cu Zn 35 Al Fe Mn .05					

Slitine bakra s kositrom (»Kositrena bronca za lijevanje«)

Oznake i sastav

Oznaka	Sastav %				
	Cu	Sn	Ni	Pb	P
• Cu Sn 14.00	85,0...87,0	12,9...15,0	—	—	< 0,2
• Cu Sn 12.00	85,0...88,5	10,8...12,8	—	—	0,05...0,40
• Cu Sn 12 Ni 2.00	84,0...87,5	11,0...13,0	1,5...2,5	—	0,05...0,40
• Cu Sn 12 Pb 2.00	84,0...87,5	11,0...13,0	—	1,2...2,5	0,05...0,40
• Cu Sn 11 P.00	86,0...89,5	10,0...12,0	—	—	0,15...1,5
• Cu Sn 10.00	88,0...91,0	9,0...10,7	—	—	—
• Cu Sn 10 P.00	87,0...89,5	10,0...11,5	—	—	0,5...1,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Sn 14.01	140	200	3	850	velika otpornost na koroziju i mor. vodu
C. Cu Sn 14.03	150	220	1,5	950	
N. Cu Sn 14.04	150	220	2	950	
P. Cu Sn 12.01	130	240	6	800	velika otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
K. Cu Sn 12.02	150	270	4	—	
C. Cu Sn 12.03	150	270	4	950	
N. Cu Sn 12.04	150	270	4	900	
P. Cu Sn 12 Ni 2.01	160	280	12	900	dobra otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 12 Ni 2.03	180	300	8	1000	
N. Cu Sn 12 Ni 2.04	180	300	10	1000	
P. Cu Sn 12 Pb 2.01	130	240	4	800	dobra otpornost prema habanju, koroziji i morskoj vodi
C. Cu Sn 12 Pb 2.03	150	280	5	900	
N. Cu Sn 12 Pb 2.04	150	280	7	900	
P. Cu Sn 10.01	130	240	5	700	velika žilavost, otpornost na koroziju i morsku vodu
C. Cu Sn 10.03	150	270	7	950	
N. Cu Sn 10.04	150	270	7	900	

Slitine (P., K., C., N.). Cu Sn 11 P.00 i Cu Sn 10 P.00 (01, 02, 03, 04) su otporne prema habanju, koroziji i morskoj vodi.

Slitine bakra s olovom i kositrom (»Olovno-kositrena bronca za lijevanje«)

Sastav

Oznaka	Sastav %		
	Cu	Pb	Sn
• Cu Pb 9 Sn 5.00	80,0...87,0	8,0...10,0	4,0...6,0
• Cu Pb 10 Sn 10.00	78,0...82,0	8,0...11,0	9,0...11,0
• Cu Pb 15 Sn 8.00	75,0...79,0	13,0...17,0	7,0...9,0
• Cu Pb 20 Sn 5.00	70,0...78,0	18,0...23,0	4,0...6,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Pb 9 Sn 5.01	80	160	7	—	otpornost na koroziju (za pare sumpor. i solne kiseline), klizni ležaji
K. Cu Pb 9 Sn 5.02	80	200	5	—	
C. Cu Pb 9 Sn 5.03	80	220	6	—	
N. Cu Pb 9 Sn 5.04	130	230	9	—	
P. Cu Pb 10 Sn 10.01	80	180	7	650	dobra otpornost prema habanju i koroziji, klizni ležaji
C. Cu Pb 10 Sn 10.03	140	220	3	700	
N. Cu Pb 10 Sn 10.04	110	220	6	700	
P. Cu Pb 15 Sn 8.01	80	170	5	600	dobra klizna svojstva, otpornost na sumpor. i solnu kiselinu
C. Cu Pb 15 Sn 8.03	100	220	8	650	
N. Cu Pb 15 Sn 8.04	100	220	8	650	
P. Cu Pb 20 Sn 5.01	60	150	5	500	dobra klizna svojstva, otpor. na koroziju
N. Cu Pb 20 Sn 5.04	80	180	7	—	

Slitine bakra s kositrom, cinkom i olovom (»Crveni lijev«)

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Sn	Zn	Pb
• Cu Sn 10 Zn 2.00	86,0...89,0	9,1...11,0	1,0...3,0	—
• Cu Sn 8 Pb 2.00	82,0...91,0	6,0...9,0	—	0,5...4,0
• Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.00	81,0...85,0	6,0...8,0	2,0...5,0	5,0...8,0
• Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.00	84,0...86,0	4,0...6,0	4,0...6,0	4,0...6,0
• Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.00	78,0...82,0	2,5...3,5	7,0...10,0	6,0...8,0

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Sn 10 Zn 2.01	120	240	12	750	umjereno opterećeni klizni dijelovi, otpor. na morsku vodu
C. Cu Sn 10 Zn 2.03	149	270	7	850	
N. Cu Sn 10 Zn 2.04	140	270	7	800	
P. Cu Sn 8 Pb 2.01	130	250	16	—	otpornost na morsku vodu i koroziju, za armature i kućišta pumpi
K. Cu Sn 8 Pb 2.02	130	220	2	—	
C. Cu Sn 8 Pb 2.03	130	230	4	—	
N. Cu Sn 8 Pb 2.04	130	270	5	—	
P. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.01 ¹⁾	100	210	12	650	otpornost na koroziju i morsku vodu
C. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.03 ²⁾	120	260	12	750	
P. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.01 ³⁾	90	200	13	600	otpornost na koroziju i morsku vodu
C. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.03 ⁴⁾	100	250	13	—	
P. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.01	90	200	18	500	
C. Cu Sn 3 Zn 9 Pb 7.03	100	201	16	550	

1) Također K. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.02. – 2) Također N. Cu Sn 7 Pb 7 Zn 3.04 – 3) Također K. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.02. – 4) Također N. Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5.04.

Slitine bakra s aluminijem (»Aluminijska bronca za lijevanje«)
Sastav

Oznaka	Sastav %			
	Cu	Al	Fe	Ni
Cu Al 9.00	88,0...92,0	8,0...10,5	—	—
Cu Al 10 Fe 3.00	83,0...89,0	8,5...11,0	2,0...5,0	—
Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.00	76	8,5...11,0	3,5...5,5	3,5...6,5

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlač. čvrst. R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB 10/1000	Upotreba
P. Cu Al 9.01	120	320	15	800	otpor. na koroziju, za prehr. industriju
K. Cu Al 9.02	140	450	15	850	
P. Cu Al 10 Fe 3.01	200	180	500	13	općenito za mehanički opterećene dijelove (pri temper. -200 do +200°C)
K. Cu Al 10 Fe 3.02		500	13	1150	
C. Cu Al 10 Fe 3.03		550	15	1150	
N. Cu Al 10 Fe 3.04		550	15	1150	
P. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.01	250	600	10	1400	otpornost na koroziju i velika čvrstoća, za brodske propelere
K. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.02	300	600	12	1500	
C. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.03	280	680	12	1600	
N. Cu Al 10 Fe 5 Ni 5.04					

NIKAL I NIKLENE SLITINE
Čisti nikal

Tehnički čisti nikal sadrži:

- iznad 99,6% Ni – za kemijske aparate (osobito za platiniranje),
- iznad 98,7% Ni – za anode,
- iznad 98,0% Ni – za opću upotrebu (i za slitine).

Mehanička svojstva

Slitina	Stanje	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. prod. A_5 %	Tvrdoća HB
98,0% Ni	meko tvrd	400...450 750	30...45 1	80...90 180...200

Niklene slitine za lijevanje
(DIN 17730 – 1971)

Sastav

Oznaka po DIN	Sastav %					
	Ni	Cu	Fe	Mn	Si	ostalo
G-Ni95	> 95	—	—	—	—	—
G-Ni93 C	> 93	—	—	—	—	1,0...2,5 C ²⁾
G-Ni90 Si	> 90	—	—	—	5,5...6,5	1,0 C ³⁾
G-Ni Cu 30 Nb	62...68	26...33	1,0...2,5	0,5...1,5	0,5...1,5	1,0...1,5 Nb ⁴⁾
G-Ni Cu 30 Si 3	61...68	27...33	1,0...2,5	—	2,7...3,7	0,5...1,5 Al ⁴⁾
G-Ni Cu 30 Si 4	60...68	27...31	1,0...2,5	0,5...1,5	3,5...4,5	— ⁴⁾

Nečistoće:

- ¹⁾ 2,0 Si, 1,0 C, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo
- ²⁾ 2,0 Si, 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 1,19 ostalo
- ³⁾ 1,2 Cu, 1,0 Fe, 1,5 Mn, 0,01 S, 0,19 ostalo
- ⁴⁾ 1,0 razno

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka slitine	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ² min.	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ² min.	Postot. prod. A_5 % min.	Tvrdoća HB min.	Upotreba
G-Ni95	120	320	12	80	dobra otpornost prema koroziji, za armature, aparate i sl.
G-Ni93 C	160	340	10	85	
G-Ni90 Si	350	500	3	180	
G-Ni Cu 30 Nb	220	450	25	120	dobra otpornost prema eroziji (i kavitacijskoj), koroziji; velika postojanost u mor. vodi
G-Ni Cu 30 Si 3	350	650	10	220	
G-Ni Cu 30 Si 4	500	750	1	260	

*

Monel je slitina s približno 66% Ni, 29% Cu, 3% Mn (+ Si, Fe, C), a veoma je otporna prema koroziji. Upotrebljava se za kondenzatorske cijevi, lopatice vodnih turbina, dijelove kućanskih aparata i sl.

Niklene slitine za gnječenje

(DIN 17741, 17742, 17743, 17744 – 1983 i 17745 – 1973)

Sastav i upotreba

Oznaka po DIN	Sastav* %							Upotreba
	Ni min	Mn	Cr	Cu	Mo	Fe	Al	
Ni99,4Fe	99,4					0,4		otporni termometri kem. aparati motorske svječe
NiMn1	98	0,6						
NiMn2	97	2,0						termoelementi, mre- žice za elektronke
NiMn3Al	94	3,0					1,5 1 Si	
NiMn5	94	5,0						} otpornici žice za grijala
NiCr8020	76		20				1 Si	
NiCr7030	60	1,0	30	0,5			2 Si	} otpornici žice za grijala
NiCr6015	59		15					
NiCr20AlSi	73	0,7	20				1 3,2 2 Si	} otpornici
NiCr15Fe	72		15					
NiCr23Fe	58	1,0	23	0,5			1,4 0,5 Ti	} vatrositalni dijelovi
NiCr20Ti	72	1,0	20	0,5			1 Si; 0,4 Ti	
NiCr20TiAl	65	1,0	20				1,5 1,4 1 Si; 2,3 Ti	} trajno opter. dijelovi otpor. na koroziju
NiCu30Fe	63			31			1,5	
NiCu30Al	63			30			1 3,0 0,6 Ti	} kaljivo – kem. apar.
NiMo16Cr16Ti		1,0	16	0,5	16	3	2 Co	
NiMo28		1,0	1	0,5	28	2	1 Co	} dijelovi otporni na koroziju
NiCr22Mo6Cu		1,5	22	2	6	20	1 Si; 2 Co	
NiCr22Mo7Cu		1,0	22	2	7	20	5 Co	} dijelovi otporni na koroziju
NiMo16Cr15W		1,0	15	0,5	16	5	2 Co; 4 W	
NiCr22Mo9Nb		0,5	22	0,5	9	3	1 Co; 4 Nb	} dijelovi otporni na koroziju
NiCr21Mo6Cu	39	1,0	21	2,5	6		1 Co	
NiCr21Mo	38	1,0	21	2,0	3		1 Co; 0,9 Ti	} meke magnetske slitine
NiFe15Mo	79					4	15	
NiFe16CuCr	76		2	5			16	} meke magnetske slitine
NiFe16CuMo	76			5	4		16	
NiFe48Cr	51		1				47	} utaljivanje u mekom staklu
NiFe47Cr	47	1,0	6				47	
Ni49	48		1				49	} utaljivanje u mekom staklu
Ni48	46						51	
Ni42	41	1,0					57	} utaljivanje u mekom staklu
NiFe47	50	0,6					47	
NiFe46	51	0,6					46	} utaljivanje u mekom staklu
NiFe45	53						45	
NiFe44	53	0,5					44	} utaljivanje u mekom staklu
NiCo2918	28						54	
NiCo2823	27	0,5					23 Co	

* Prosječne i zaokružene vrijednosti.

CINK I CINČANE SLITINE

Čisti cink

Tehnički čisti cink – u pločama (JUS C.E1.020 – 1970)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %		Upotreba
	Zn min.	nečistoće maks.	
Zn 99,995	99,995	0,005	} za cinčane slitine za tlačno lijevanje, za bakrene slitine s cinkom (i niklom); za duboko izvlačenje
Zn 99,99	99,99	0,01	
Zn 99,95	99,95	0,05	} za galvansko i toplo cinčanje, za slitine
Zn 99,5	99,5	0,5	
Zn 98,5	98,5	1,5	} za galvansko i toplo cinčanje, slitine s cinkom, cinča- no bjelilo itd.
Zn 97,5	97,5	2,5	

Cinčane slitine za lijevanje

(JUS C.J6.040 – 1963 i DIN 1743/2 – 1967)

Oznaka i sastav

Oznaka JUS – DIN	Sastav %				Nečistoće % maks.
	Al	Cu	Mg	Zn	
- po JUS:					} 0,08 Fe 0,005 Cd 0,007 Pb 0,003 Sn
T. Zn Al 4	3,5...4,3	0,0...0,5	0,02...0,06	} ostatak	
T. Zn Al 4 Cn 1	3,5...4,3	0,5...1,2	0,02...0,06		
- po DIN					} 0,075 Fe 0,009 Pb + Cd 0,002 Sn
GK – Zn Al 4 Cu 3	3,5...4,3	2,5...3,2	0,03...0,06	} ostatak	
GK – Zn Al 6 Cu 1	5,6...6,0	1,2...1,6	(< 0,005)*		

* kao nečistoća.

Mehanička svojstva i upotreba

Oznaka	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ² min.	Vlačna čvrst. R_m N/mm ² min.	Postot. prod. A_5 % min.	Tvr- doća HB min.	Upotreba
T. Zn Al 4	200	250	1,5	70	tlačni odljevci točnih dimen- zija
T. Zn Al 4 Cu 1	220	270	2	80	tlačni odljevci tankih stijenki
G-Zn Al 4 Cu 3	170	220	0,5	90	odljevci u pijesku
GK-Zn Al 4 Cu 3	200	240	1	100	odljevci u kokili
G-Zn Al 6 Cu 1	150	180	1	80	} ljevački odljevci u pijesku od- nosno kokili
GK-Zn Al 6 Cu 1	170	220	1,5	80	

OLOVO I OLOVNE SLITINE

Čisto olovo

Rafinirano olovo – u bloku (JUS C.E1.030 – 1978)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %			nečistoće maks.	Upotreba
	Pb min.	Cu			
Pb 99,99	99,99	–		0,01	za optičko staklo, akumulatore za kemijske aparate za slitine, kableske plaštev za kemijske aparate pri povišenim temperaturama
Pb 99,985	99,985	–		0,015	
Pb 99,95	99,95	–		0,05	
Pb 99,9	99,90	–		0,10	
Pb H. 99,9	99,90	0,04...0,10		0,06	

Slitine olova s kositrom i antimonom

Tiskarske slitine (JUS C.E1.101 – 1966)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %			Tiskarska oznaka slitine	Upotreba
	Pb	Sn	Sb		
G Pb Sn 3 Sb 4	93	3	4	3/4	podloge galvanskih ploča za stereo-ploče za strojeve linotype za stereo-ploče za strojeve monotype
G Pb Sn 4 Sb 15	81	4	15	4/15	
G Pb Sn 5 Sb 12	83	5	12	5/12	
G Pb Sn 5 Sb 14	81	5	14	5/14	
G Pb Sn 9 Sb 17	74	9	17	9/17	
D Pb Sn 30 Sb 6*	64	30	6	30/6	za povećanje žitkosti za povećanje tvrdoće
D Pb Sn 5 Sb 28*	67	5	28	5/28	

* Dodatne slitine.

Slitine za plaštev električnih kablove (JUS C.E1.040 – 1963)

Sastav i upotreba

Oznaka	Sastav %				Upotreba
	Cu	Sn	Sb	Pb	
E Pb 99,9	–	–	–	> 99,90	vrlo meko, za posebne svrhe vrlo meko, za opću upotrebu tvrd, za telefonske kabele meko, za brodске kabele
E Pb Cu	0,04	–	–	ostatak	
E Pb Sb	–	–	0,85		
E Pb Sn Sb	–	0,40	0,20		

Slitine olova s antimonom (JUS C.E1.035 – 1963)

Sastav %		Upotreba
1...5 Sb	ost. Pb	
6 Sb		
7...10 Sb		
5,5 Sb		
8,8 Sb		

Kositrene i olovne slitine za ležaje (JUS C.E1.100 – 1963)

(»Bijela kovina«)

Oznaka	Sastav %	Tvrdoća HB pri °C			Talište °C	Temperatura lijevanja °C
		20	50	100		
L. Sn 89	88...90 Sn	24,5	19	12	241...354	424...450
	3...4 Cu					
	7...8 Sb					
L. Sn 80	79...81 Sn	27	20	10	230...400	440...460
	8...10 Cu					
	11...12 Sb					
L. Sn 80 Pb	79...81 Sn	27	20	10	182...400	440...460
	5...7 Cu					
	11...13 Sb					
	1...3 Pb					
L. Pb Sn 9 Cd	8...10 Sn	28	23	15	240...400	450...520
	0,5...1,5 Cu					
	13...15 Sb					
	0,75...1,0 Cd					
	0,75...1,0 As					
	0,4...0,6 Ni					
	ost. Pb					
L. Pb Sn 6 Cd	5...7 Sn	26	21	15	245...420	480...520
	0,5...1,5 Cu					
	14...16 Sb					
	0,75...1,0 Cd					
	0,75...1,0 As					
	0,4...0,6 Ni					
	ost. Pb					
L. Pb Sn 10	9,5...10,5 Sn	23	16	9	235...370	420...450
	0,5...1,5 Cu					
	14,5...16,5 Sb					
	ost. Pb					
L. Pb Sn 5	4,5...5,5 Sn	22	13	6	240...420	450...520
	0,5...1,5 Cu					
	14,5...16,5 Sb					
	ost. Pb					

Upotreba

- L. Sn 89 } za dinamički teško opterećene ležaje uz povišenu temperaturu
- L. Sn 80 } za dinamički teško opterećene ležaje
- L. Sn 80 Pb } za dinamički teško opterećene ležaje
- L. Pb Sn 9 Cd } za ležaje dobre klizne sposobnosti pri velikim opterećenjima
- L. Pb Sn 6 Cd } za ležaje dobre klizne sposobnosti pri velikim opterećenjima
- L. Pb Sn 10 } za ležaje dobre klizne sposobnosti pri umjerenim opterećenjima
- L. Pb Sn 5 } za ležaje dobre klizne sposobnosti pri umjerenim opterećenjima

LEMOVI

Tvrđi lemovi

Mjedeni lemovi (JUS C.D2.306 – 1957)

Oznaka	Sastav %			Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Cu	Zn min.	Si		
S. Cn 85 Zn	84...86	13	0,2...0,4	1020	za bakar, bakrene slitine, čelik i lijevano željezo
S. Cu 63 Zn	62...64	35	0,2...0,4	910	
S. Cn 60 Zn	59...61	38	0,2...0,4	900	
S. Cu 54 Zn	53...55	44	0,2...0,4	890	za bakrene i niklene slitine i lijevano željezo
S. Cu 48 Zn	47...49	50	-	870	
S. Cu 42 Zn	41...43	56	-	845	za bakrene i niklene slitine

Bakreni lemovi (DIN 8513/1 – 1979)

Oznaka po DIN	Sastav %			Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Cu	Sn	P		
L-Cu	> 99,90	-	-	1083	za nelegirani čelik } za željezne i niklene slitine
L-SF Cu	> 99,90	-	0,02...0,05	1083	
L-Cn Sn6	> 91	5...8	0...0,4	1040	
L-Cu Sn 12	> 86	11...13	0...0,4	990	

Meki lemovi (JUS C.E1.041 – 1963)

Oznaka	Sastav* %		Najniža temperatura lemljenja °C	Upotreba
	Sn	Pb		
S. Sn 20	20	80	275	za prevlake kovina } za strojno lemljenje plamenom
S. Sn 25	25	75	257	
S. Sn 30	30	70	249	za lemljenje razmazivanjem
S. Sn 33	33	67	242	
S. Sn 35	35	65	237	
S. Sn 40	40	60	223	za lemljenje olova
S. Sn 50	50	50	200	za opće svrhe
S. Sn 60	60	40	185	za fino lemljenje
S. Sn 75	75	25	185	za lemljenje zdravstvenih predmeta

* Dopustive nečistoće (maks.) %: 0,25 Bi; 0,02 Fe; 0,05 As; 0,005 Al; 0,005 Zn.

*

Slitine s ekstremno niskim talištem:

Roseova slitina: 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn – talište 94 °C.

Woodova slitina: 50% Bi, 25% Pb, 12,5% Sn, 12,5% Cd – talište 70 °C.

Srebrni lemovi (JUS C.D2.307 – 1957)

Oznaka	Sastav %				Talište °C
	Ag	Cu maks.	Cd	razno maks.	
S. Cu 55 Zn Ag 8	7...9	55	-	-	ostatak
S. Cu 52 Zn Ag 12	11...13	52	-	-	
S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd	11...13	52	5...9	-	
S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd	14...16	49	8...12	-	
S. Cu 43 Zn Ag 20 Cd	19...21	43	13...17	-	
S. Cn 43 Zn Ag 25	24...26	43	-	-	
S. Cu 42 Zn Ag 25 Cd	24...26	42	12...16	-	
S. Cu 40 Zn Ag 27 Mn	26...28	40	-	10 Mn, 6 Ni	
S. Cu 44 Zn Ag 30 Cd	29...31	44	3...7	-	
S. Cu 36 Zn Ag 30 Cd	29...31	36	10...14	-	
S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn	37...39	42	-	4 Sn	
S. Cu 32 Zn Ag 44	43...45	32	-	-	
S. Cu 19 Zn Ag 45 Cd	44...46	19	18...22	-	
S. Cu 18 Zn Ag 49 Mn	48...50	18	-	8 Mn, 5 Ni	
S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd	49...51	32	3...7	-	

Upotreba

Srebrni su lemovi namijenjeni općenito za lemljenje čelika, lijevanog željeza, bakra i bakrenih slitina, a osobito:

S. Cu 52 Zn Ag 12 Cd, S. Cu 49 Zn Ag 15 Cd, S. Cu 43 Zn Ag 20 Cd – za lemljenje čelika (i platiranih čeličnih limova) s bakrom;

S. Cu 40 Zn Ag 27 Mn za kemijski otporne čelike i tvrde metale;

S. Cu 42 Zn Ag 38 Sn – kao lem otporan prema morskoj vodi;

S. Cu 32 Zn Ag 44 – kao vatrostalni lem;

S. Cu 32 Zn Ag 50 Cd – kao lem otporan prema koroziji.

Aluminijски lemovi

Tvrđi lemovi za aluminij (DIN 8513/4 – 1981)

Oznaka po DIN	Sastav %		Temperatura lemljenja °C	Upotreba
	Si	Al		
L-Al Si 7,5	6,8...8,2	-	605...615	općenito za aluminij (naročito za slitine Al Mn)
L-Al Si 10	9,0...10,5	-	595...605	
L-Al Si 12	11,0...13,5	-	590...600	

Meki lemovi za aluminij (DIN 1707 – 1981)

Oznaka po DIN	Sastav %				Temper. lemljenja °C	Upotreba
	Sn	Zn	Cd	drugo		
L-Sn Zn 10	85...92	8...15	-	-	200...250	tarni lemovi
L-Sn Zn 40	55...70	30...45	-	-	200...340	
L-Cd Zn 20	-	17...25	75...83	-	265...280	manje osjetljiv prema koroziji lemlj. ultrazvučkom i u peći
L-Zn Al 5	-	94,0...96,0	-	4,0...6,0Al	380...390	

POSEBNE SLITINE ZA ELEKTROTEHNIKU
Slitine za električne otpornike (DIN 17471 – 1983)

Oznaka po DIN	Sastav %				Specifični električni otpor $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$				Upotreba
	Mn	Ni	Al	Cu	20 °C	100 °C	300 °C	500 °C	
Cu Mn 12 Ni*	12	2	-	-	0,43	0,43	-	-	za preciz. mjerne otpornike
Cu Ni 20 Mn 10	10	20	-	-	0,49	0,49	0,49	0,49	
Cu Ni 44**	1	44	-	-	0,49	0,49	0,49	0,49	za opće otpornike
Cu Mn 2 Al	2	-	0,8	-	0,125	0,130	-	-	
Cu Ni 30 Mn	3	30	-	-	0,40	0,405	0,417	0,432	
Cu Mn 12 Ni Al	12	5	1,2	-	0,50	0,50	0,50	0,50	

* »Manganin«. - ** »Konstantan«.

Nikelin je slitina sa (%): 55...68 Cu, 31...32 Ni, 0...13 Zn, a ima specifični električni otpor 0,40...0,44 $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.

Slitine za električne žice za visoke temperature (DIN 17470 – 1984)

Oznaka po DIN	Sastav %				Specifični električni otpor $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$				Upotreba do °C
	Cr	Ni	Al	Fe	20 °C	400 °C	800 °C	1200 °C	
Ni Cr 80 20 ¹⁾	20	ost.	-	-	1,12	1,15	1,14	1,17	1200
Ni Cr 60 15 ²⁾	15	ost.	-	22	1,13	1,20	1,22	1,28	1150
Ni Cr 30 20 ³⁾	20	30	-	ost.	1,04	1,17	1,26	-	1100
Cr Ni 25 20 ⁴⁾	25	20	-	ost.	0,95	1,11	1,22	-	1050
Cr Al 25 5	25	-	5	ost.	1,44	1,45	1,48	1,49	1300
Cr Al 20 5	20	-	5	ost.	1,37	1,39	1,44	1,45	1200

¹⁾ »Cekas II«. - ²⁾ »Cekas«. - ³⁾ »Cekas 0«. - ⁴⁾ »Cekas I«.

Kantal je slitina sa (%): 30 Cr, 5 Al, 3 Co i ost. Fe, a upotrebljava se do 1350 °C.

Slitine posebne električne permeabilnosti

Naziv	Sastav u %					
	Ni	Cu	Mo	Mn	C	Fe
slitina »1040«	72	14	3	-	< 0,1	11
permalloy A	78,5	-	-	-	-	21,5
permalloy B	48	-	-	-	< 0,1	52
permalloy C	78,5	-	3	0,5	< 0,1	18

Slitine za permanentne magnete

Naziv	Sastav u %					
	Co	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
permendur	49	-	-	-	-	49
koerzit 15 Co 70	16	9	1,6	-	-	-
koerzit 30 Co 90	31	4,7	0,4	-	-	4,8 Ti
500 koerzit 120	-	-	-	27,5	13	-
700 koerzit 160	10	-	-	24,5	11,5	4 Cu
slitine Mishima: 1)	-	-	-	26	14	+ Cu
2)	7,5	-	-	27	6	+ Cu

TITAN I TITANOVE SLITINE

Čisti titan

Titan kristalizira u dva kristalna oblika: pod temperaturom pretvorbe 882 °C je Ti_α koji kristalizira heksagonalno, nad tom temperaturom nastaje Ti_β koji kristalizira u kubnoj prostorno centraliziranoj rešetki.

Gustoća titana leži među gustoćama teških i lakih kovina:

Ti_α (20 °C) $\rho = 4505 \text{ kg/m}^3$ Ti_β (900 °C) $\rho = 4320 \text{ kg/m}^3$

Tehniki čisti titan (DIN 17850 – 1985)

Oznaka	Sastav (%)					
	Fe maks.	O ≈	N maks.	C maks.	H maks.	Ti
3.7025	0,20	0,10	0,05	0,08	0,13	ost.
3.7035	0,25	0,20	0,06	0,08	0,13	
3.7055	0,30	0,25	0,06	0,10	0,13	
3.7065	0,35	0,30	0,07	0,10	0,13	

Mehanička svojstva kovanog titana (DIN 17864 – 1973)

Oznaka	Naprez. tečenja		Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. A_5 %		Tvrdoća HB	Žilav. KU/3 J	
	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_{p1} N/mm ²		uzd.	popr.		uzd.	popr.
3.7025.10	> 180	> 200	250...410	30	25	120	85	60
3.7035.10	> 250	> 270	390...540	22	20	150	40	35
3.7055.10	> 320	> 350	460...590	28	16	170	35	25
3.7065.10	> 390	> 410	540...740	16	15	200	25	20

Tehniki čisti titan je otporan prema koroziji, postojan u morskoj vodi i morskoj klimi. Upotreba: za kemijske aparate i u zrakoplovstvu.

Titanove slitine (DIN 17851 – 1973)

Oznaka	Sastav (%)*				Gustoća kg/m ³
	Al	V	Sn	Ti	
TiAl 6 V 4	5,5...6,75	3,5...4,5	-	-	4450
TiAl 5 Sn 2	4,0...6,0	-	2,0...3,0	ost.	4500

* Dozvoljene nečistoće (%): 0,08 C, 0,30...0,50 Fe, 0,015...0,020 H, 0,05 N, 0,20 O.

Mehanička svojstva titanovih slitina (DIN 17864)

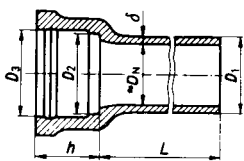
Oznaka	Modul elast. E N/mm ²	Naprez. tečenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postot. produlj. %	Žilavost KU/3 J	Upotreba
TiAl 5 Sn 2-F79	-	760	790	8	-	do 500 °C

Titanove slitine dobro se zavaruju, otporne su prema koroziji. Njihova znatna čvrstoća i razmjerno mala gustoća omogućuju konstruiranje najlakših dijelova (zrakoplovstvo, svemirska tehnika).

OBLICI KOVINSKIH POLUPROIZVODA

ODLJEVCI OD SIVOG LIJEVA
za tlačne cjevovode

Cijevi s kolčakom (JUS C.J1.030 — 1961)



Razred*	c	Nazivni tlak bar			Ispitni tlak bar	
		za D_N (mm)			za D_N (mm)	
		50, 65	80...1200	...	600	600...
LA	c	16	10	20	15	
A	c	—	12,5	25	20	
	g	12,5	10	20	15	
B	c	—	16	30	25	
	g	—	12,5	25	20	

* c — centrifugalni lijev, g — gravitacijski lijev

Nazivni promjer D_N mm	Dimenzije						Masa			
	D_1	D_2	D_3	h	δ (mm) pri razredu			kolčaka cijevi*		
	mm	mm	mm	mm	LA	A	B	kg	kg/m	
50	66	78	84	77	6,7	7,3	—	3,3	8,9	
65	82	94	100	80	6,9	7,6	—	4,4	11,6	
80	98	110	116	84	7,2	7,9	8,6	5,5	14,7	
100	118	131	137	88	7,5	8,3	9,0	7,1	18,6	
125	144	157	163	91	7,9	8,7	9,5	9,2	24,2	
150	170	183	189	94	8,3	9,2	10,0	11,5	31,1	
200	222	235	241	100	9,2	10,1	11,0	16,8	44,0	
250	274	287	294	103	10,0	11,0	12,0	22,9	59,3	
300	326	339	346	105	10,8	11,9	13,0	29,8	76,5	
350	378	391	398	107	11,7	12,8	14,0	37,5	96,3	
400	429	442	449	110	12,5	13,8	15,0	46,3	116,9	
450	480	494	501	112	13,3	14,7	16,0	56,0	141,0	
500	532	546	553	115	14,2	15,6	17,0	66,0	165,2	
600	635	650	657	120	15,8	17,4	19,0	89,3	219,8	
700	738	753	760	122	17,5	19,3	21,0	116,8	283,2	
800	842	857	865	125	19,2	21,1	23,0	147,8	354,9	
900	945	960	968	128	20,8	22,9	25,0	182,6	431,8	
1000	1048	1064	1072	130	22,5	24,8	27,0	222,3	518,3	
1100	1152	1169	1177	135	24,2	26,6	29,0	265,6	613,1	
1200	1256	1273	1281	140	25,8	28,4	31,0	313,2	712,9	

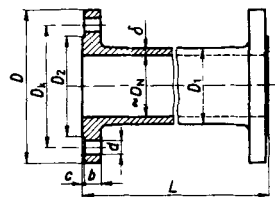
* Masa cijevi vrijedi za razred LA. Mase cijevi za razrede A i B su približno za 10 odnosno 20% veće.

Nazivni promjeri D_N	50, 65	80...150	200... mm
Duljine L	2 i 3	3, 4 i 5	4 i 5 m

Cijevi s prirubnicom
(JUS C.J1.033 — 1961)

Razred*	Nazivni tlak (bar)	Ispitni tlak (bar)			
		za D_N (mm) =			
		...300	300	...600	600
B	g	12,5	25	20	15

* g — gravitacijski lijev (u pješčanim kalupima).



Nazivni promjer D_N mm	Dimenzije					Rupe za vijke			Masa	
	D_1 mm	D_2 mm	D mm	b mm	δ mm	D_k mm	n^*	d mm	prirubnice kg	cijevi kg/m
50	66	98	165	20,5	8,0	125	4	19	2,7	10,4
65	82	118	185	21,0	8,3	145	4	19	3,3	13,7
80	98	133	200	21,0	8,6	160	4	19	3,7	17,3
100	118	153	220	22,0	9,0	180	8	19	4,2	22,0
125	144	183	250	22,5	9,5	210	8	19	5,3	28,7
150	170	209	285	23,0	10,0	240	8	23	6,7	35,9
200	222	264	340	24,5	11,0	295	8	23	9,3	52,1
250	274	319	395	26,0	12,0	350	12	23	12,0	70,6
300	326	367	445	27,5	13,0	400	12	23	14,8	91,4
350	378	427	505	29,0	14,0	460	16	23	19,0	114,5
400	429	477	565	30,0	15,0	515	16	28	23,4	139,5
450	480	528	615	31,5	16,0	565	20	28	26,5	169,0
500	532	582	670	33,0	17,0	620	20	28	32,1	196,7
600	635	682	780	36,0	19,0	725	20	31	44,0	262,9
700	738	797	895	38,5	21,0	840	24	31	59,9	338,2
800	842	904	1015	41,5	23,0	950	24	34	80,8	423,1
900	945	1004	1115	44,0	25,0	1050	28	34	94,6	516,6
1000	1048	1111	1230	47,0	27,0	1160	28	37	120,0	619,2
1100	1152	1221	1340	50,0	29,0	1270	32	37	139,0	731,5
1200	1256	1329	1455	52,5	31,0	1380	32	40	173,0	853,0

* n — broj rupa.

Vrijednost c na slici iznosi:

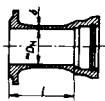
$D_N = 50 \dots 250$	$300 \dots 500$	$600 \dots 1200$	mm
$c = 3$	4	5	mm

Duljine L iznose za $D_N = 50, 65$ i 80 mm: 1, 2 ili 3 m, za sve ostale D_N : 1, 2, 3 ili 4 m.

Fazonski cijevni komadi (JUS C.J1. 040 ... 081 — 1961)

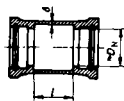
Spojni komadi

s kolčakom i prirubnicom (JUS C.J1.040)



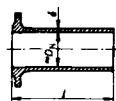
$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $l = 150 \dots 500$

s kolčacima (JUS C.J1.041)



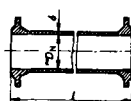
$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 10,1 \dots 38,0$
 $l = 155 \dots 270$

s prirubnicom (JUS C.J1.042)



$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $l = 400 \dots 800$

s prirubnicama (JUS C.J1.043)

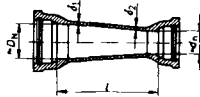


$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $l = 100 \dots 900$

(Sve su mjere u mm)

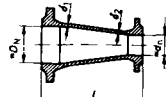
Redukcijski komadi

s kolčacima (JUS C.J1.050)



$D_N = 65 \dots 1200$ mm
 $d_n = 50 \dots 1100$ mm
 $\delta_1 = 9,7 \dots 36,2$ mm
 $\delta_2 = 9,3 \dots 33,8$ mm
 $l = 200 \dots 600$ mm

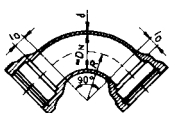
s prirubnicama (JUS C.J1.051)



$D_N = 65 \dots 1200$ mm
 $d_n = 50 \dots 1100$ mm
 $\delta_1 = 9,7 \dots 36,2$ mm
 $\delta_2 = 9,3 \dots 33,8$ mm
 $l = 200 \dots 600$ mm

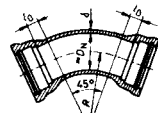
Lukovi — s kolčacima

$1/4$ luk (JUS C.J1.060)



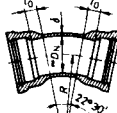
$D_N = 50 \dots 500$
 $\delta = 9,3 \dots 19,8$
 $R = 110 \dots 515$
 $l_0 = 40 \dots 85$

$1/8$ luk (JUS C.J1.061)



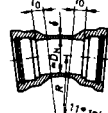
$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $R = 250 \dots 1400$
 $l_0 = 40 \dots 155$

$1/16$ luk (JUS C.J1.062)



$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $R = 250 \dots 1400$
 $l_0 = 40 \dots 155$

$1/32$ luk (JUS C.J1.063)

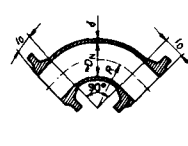


$D_N = 50 \dots 1200$
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$
 $R = 250 \dots 1400$
 $l_0 = 40 \dots 155$

(Sve su mjere u mm)

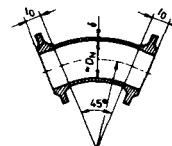
— s prirubnicama

$1/4$ luk (JUS C.J1.064)



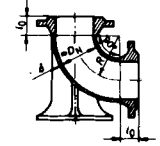
$D_N = 50 \dots 1200$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$ mm
 $R = 110 \dots 1145$ mm
 $l_0 = 40 \dots 155$ mm

$1/8$ luk (JUS C.J1.065)



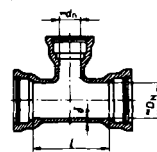
$D_N = 50 \dots 1200$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$ mm
 $R = 266 \dots 1400$ mm
 $l_0 = 40 \dots 155$ mm

luk sa stopalom (JUS C.J1.068)



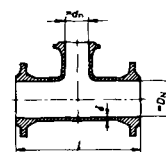
$D_N = 50 \dots 600$ mm
 $\delta = 9,2 \dots 22,2$ mm
 $R = 110 \dots 605$ mm
 $l_0 = 40 \dots 95$ mm

Odvojci s kolčacima (JUS C.J1.070)



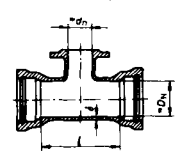
$D_N = 50 \dots 600$ mm
 $d_n = 50 \dots 600$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 22,2$ mm
 $l = 171 \dots 940$ mm

s prirubnicama (JUS C.J1.071)



$D_N = 50 \dots 1200$ mm
 $d_n = 50 \dots 1200$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$ mm
 $l = 300 \dots 1700$ mm

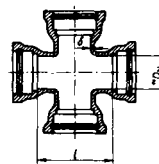
s kolčacima i prirubnicom (JUS C.J1.072)



$D_N = 50 \dots 1200$ mm
 $d_n = 50 \dots 1200$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$ mm
 $l = 170 \dots 1780$ mm

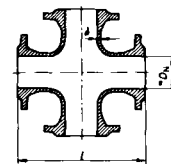
Križni komadi

s kolčacima (JUS C.J1.080)



$D_N = 50 \dots 600$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 22,2$ mm
 $l = 170 \dots 940$ mm

s prirubnicama (JUS C.J1.081)






$D_N = 50 \dots 1200$ mm
 $\delta = 9,3 \dots 36,2$ mm
 $l = 300 \dots 1700$ mm

ČELIČNI POLUPROIZVODI

Mase materijala po jedinici duljine (kg/m) ili jedinici površine (kg/m²) izračunane su s obzirom na gustoću čelika 7850 kg/m³.

Čelik u šipkama – vruće valjan:

okrugli (JUS C.B3.021 – 1984)			kvadratni (JUS C.B3.024 – 1984)			šesterokutni (JUS C.B3.026 – 1984)	
							
Nazivna debljina mm	Duljinska masa kg/m		Nazivna debljina mm	Duljinska masa kg/m		Nazivni zijev ključa mm	Duljinska masa kg/m
	okrugli	kvadr.		okrugli	kvadr.		
5,5	0,187		40	9,86	12,6	13	1,15
6	0,222		42	10,9		14	1,33
6,5	0,260		44	11,9		15	1,53
7	0,302		45	12,5		16	1,74
7,5	0,347		50	15,4	19,6	18	2,20
8	0,395	0,502	52	16,7		20,5	2,86
10	0,617	0,785	55	18,7		22,5	3,44
12	0,888	1,13	60	22,2	28,3	23,5	3,75
14	1,21	1,54	65	26,0		25,5	4,42
16	1,58	2,01	70	30,2	38,5	28,5	5,52
18	2,00	2,54	75	34,7		31,5	6,74
20	2,47	3,14	80	39,5	50,2	33,5	7,63
22	2,98	3,80	90	49,9		37,5	9,58
24	3,55		100	61,7	78,5	39,5	10,6
25	3,85	4,91	110	74,6		42,5	12,2
27	4,49		120	88,8	113	47,5	15,3
28	4,83		140	121		52	18,4
30	5,55	7,07	150	139		55	20,6
31	5,92		160	158		57	22,1
32	6,31	8,04	180	200		62,5	26,5
35	7,55	9,62	200	247		67	30,5
37	8,44		220	298		72	35,2
38	8,90					78	41,4
						83	46,8
						88	52,6
						93	58,8
						98	65,3
						103	72,1

Navedeni su samo čelici debljine skupine A koji se obično upotrebljavaju. (Za čelike debljine skupine B koji se upotrebljavaju samo iznimno – vidi gore navedeni standard!)

Okrugli betonski čelik (JUS C.K6.020 – 1955)

Promjeri: 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40.

Preporučuje se upotreba deblje tiskanih promjera.

Vučeni čelici u šipkama

Okrugli vučeni čelici

– vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11 (JUS C.B3.411 – 1984) i ISO h 9 (JUS C.B3.412 – 1984)

Promjer d mm	Masa kg/m	Promjer d mm	Masa kg/m	Promjer d mm	Masa kg/m	Promjer d mm	Masa kg/m
10	0,617	21	2,72	38	8,90	75	34,7
10,5	0,680	22	2,98	39	9,38	80	39,5
11	0,746	23	3,26	40	9,86	85	44,5
11,5	0,815	24	3,55	42	10,9	90	49,9
12	0,888	25	3,85	44	11,9	95*	55,6
12,5	0,963	26	4,17	45	12,5	100	61,7
13	1,04	27	4,49	46	13,0	110	74,6
13,5	1,12	28	4,83	48	14,2	120	88,8
14	1,21	30	5,55	50	15,4	125	96,3
14,5	1,30	31	5,92	52	16,7	130	104
15	1,39	32	6,31	55	18,7	140	121
16	1,58	33	6,71	58	20,7	150	139
17	1,78	34	7,13	60	22,2	160	158
18	2,00	35	7,55	63	24,5	180	200
19	2,23	36	7,99	65	26,0	200	247
20	2,47	37	8,44	70	30,2		

* Standardizirano samo u tolerancijskom području ISO h 11.

Kvadratni vučeni čelici (JUS C.B3.421 – 1986)
vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11

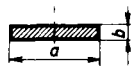
Debljina a mm	Masa kg/m	Debljina a mm	Masa kg/m	Debljina a mm	Masa kg/m	Debljina a mm	Masa kg/m
2	0,0314	10	0,785	22	3,80	50	19,6
3	0,0707	11	0,950	(24)	4,52	(55)	23,7
3,5	0,0962	12	1,13	25	4,91	(60)	28,3
4	0,126	13	1,33	(27)	5,72	63	31,2
4,5	0,159	14	1,54	28	6,15	(65)	33,2
5	0,196	(15)	1,77	(30)	7,07	70	38,5
5,5	0,237	16	2,01	32	8,04	(75)	44,2
6	0,283	(17)	2,27	(35)	9,62	80	50,2
7	0,385	18	2,54	36	10,2	100	78,5
8	0,502	(19)	2,83	40	12,6		
9	0,636	20	3,14	45	15,9		

Dimenzije u zagradama upotrebljavaju se jedino u iznimnim slučajevima.

*

Šesterokutni vučeni čelici – JUS C.B3.441 – 1984 (vučeni u tolerancijskom polju ISO h 11).

Plosnati čelik



vruće valjan (JUS C.B3.025 – 1984)

Debljine 5 ... 14 mm

Širina a mm	Duljinska masa kg/m									
	za debljinu b mm									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10	0,393	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,471	0,565	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0,550	0,659	0,769	0,879	-	-	-	-	-	-
15	0,589	0,707	0,824	0,942	-	1,18	-	-	-	-
16	0,628	0,754	0,879	1,00	1,13	1,26	1,38	-	-	-
18	0,707	0,848	-	1,13	1,27	1,41	-	-	-	-
20	0,785	0,942	1,10	1,26	1,41	1,57	-	1,88	2,04	-
22	0,864	1,04	1,21	1,38	-	1,73	1,90	2,07	2,25	2,42
25	0,981	1,18	1,37	1,57	-	1,96	-	2,36	2,55	2,75
26	1,02	1,22	1,43	1,63	-	2,04	-	2,45	2,65	2,86
28	1,10	1,32	1,54	1,76	-	2,20	-	2,64	2,86	3,08
30	1,18	1,41	1,65	1,88	2,12	2,36	-	2,83	3,06	3,30
32	1,26	1,51	-	2,01	-	2,51	-	3,01	3,27	3,52
35	1,37	1,65	1,92	2,20	2,47	2,75	-	3,30	3,57	3,85
38	1,49	1,79	-	2,39	-	2,98	-	3,58	3,88	4,18
40	1,57	1,88	2,20	2,51	2,83	3,14	-	3,77	4,08	4,40
45	1,77	2,12	2,47	2,83	-	3,53	-	4,24	4,59	4,95
50	1,96	2,36	2,75	3,14	3,53	3,93	-	4,71	5,10	5,50
55	2,16	2,59	-	3,45	-	4,32	-	5,18	5,61	6,04
60	2,36	2,83	3,30	3,77	4,24	4,71	-	5,65	6,12	7,14
65	2,55	3,06	-	4,08	4,59	5,10	-	6,12	6,63	-
70	2,75	3,30	3,85	4,40	-	5,50	-	6,59	7,14	-
75	2,94	3,53	-	4,71	-	5,89	-	7,07	7,65	-
80	3,14	3,77	4,40	5,02	-	6,28	6,91	7,54	8,16	-
90	3,53	4,24	4,95	5,65	6,36	7,07	7,77	8,48	9,18	-
100	3,93	4,71	5,50	6,28	-	7,85	8,64	9,42	10,2	11,0
110	-	-	-	6,91	7,77	8,64	9,50	10,4	11,2	12,1
120	-	-	-	7,54	8,48	9,42	10,4	11,3	12,2	-
130	-	-	-	8,16	9,18	10,2	11,2	12,2	13,3	14,3
140	-	-	-	8,79	9,89	11,0	-	13,2	-	-
150	-	-	-	9,42	-	11,8	13,0	14,1	15,3	16,5

Debelo otisnute mase vrijede za običajne dimenzije; ostale su izvanredne.
Duljina plosnatog čelika:
normalno: 3 ... 4 m, najveća: 12 m.

Vruće valjani plosnati čelik (JUS C.B3.025 – 1984)

Debljine 15 ... 50 mm

Širina a mm	Duljinska masa kg/m									
	za debljinu b mm									
	15	16	17	18	20	25	30	35	40	50
20	2,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	2,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	2,94	3,14	-	-	-	-	-	-	-	-
26	3,06	3,27	-	3,67	-	-	-	-	-	-
28	-	3,52	-	3,96	-	-	-	-	-	-
30	3,53	3,77	-	4,24	4,71	5,89	-	-	-	-
32	3,77	4,02	-	-	5,02	6,28	-	-	-	-
35	4,12	4,40	-	4,95	5,50	6,87	-	-	-	-
38	4,47	4,77	-	-	5,97	7,46	-	-	-	-
40	4,71	5,02	-	5,65	6,28	7,85	9,42	-	-	-
45	5,30	5,65	-	-	7,07	8,83	10,6	-	-	-
50	5,89	6,28	-	7,07	7,85	9,81	11,8	-	15,7	-
55	6,48	6,91	-	7,77	8,64	10,8	13,0	-	-	-
60	7,07	7,54	-	8,48	9,42	11,8	14,1	16,5	18,8	-
65	7,65	8,16	-	9,18	10,2	12,8	15,3	-	20,4	-
70	8,24	8,79	-	9,89	11,0	13,7	16,5	19,2	22,0	27,5
75	8,83	9,42	10,0	-	11,8	14,7	17,7	20,6	23,6	-
80	9,42	10,0	10,6	-	12,6	15,7	18,8	22,0	25,1	31,4
90	10,6	11,3	12,0	12,7	14,1	17,7	21,2	-	28,3	35,3
100	11,8	12,3	13,3	14,1	15,7	19,6	23,6	-	31,4	39,3
110	13,0	13,8	14,7	15,5	17,3	21,6	25,9	-	34,5	43,2
120	14,1	15,1	16,0	17,0	18,8	23,6	28,3	-	37,7	47,1
130	15,3	16,3	-	18,4	20,4	25,5	30,6	-	40,8	51,0
140	16,5	17,6	-	-	22,0	27,5	33,0	-	44,0	55,0
150	17,7	18,8	-	-	23,6	29,4	35,3	-	47,1	58,9

Duljina plosnatog čelika: normalna 3 ... 4 m, maksimalna 12 m.

Široki plosnati čelik – lamele, vruće valjan
(JUS C.B3.030 – 1986): širina a 150 ... 1250 mm,
debljina b 40 ... 80 mm,
duljina l 2 ... 12 m.

Plosnati čelik s rebrom – za lisnate opruge, vruće valjan
(JUS C.B3.031 – 1966): širina a 60 ... 120 mm,
debljina b 10 ... 16 mm.

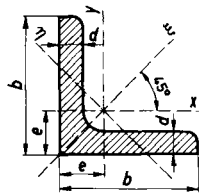
Vučeni plosnati čelik
(JUS C.B3.431 – 1986): širina a 5 ... 50 mm,
debljina b 1,5 ... 50 mm.

Hladno valjane čelične trake
(JUS C.B3.530 – 1967): širina a do 600 mm,
debljina b 0,08 ... 5,0 mm.

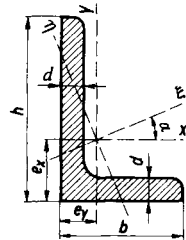
Trakasti (obručni) čelik, vruće valjan
(JUS C.B3.550 – 1960): širina a 10 ... 190 mm,
debljina b 1 ... 5 mm.

Čelični kutni profili — vruće valjani

Jednakokrani kutni profili
(JUS C.B3.101 — 1962)



Raznokračni kutni profili
(JUS C.B3.111 — 1962)



Statičke veličine:

I — moment tromosti plohe

W — moment otpora

i — polumjer tromosti

Konstruktivske mjere — vidi str. 431!

Jednakokrani kutni profili

Oznaka $b \times b \times d$ mm	Pre- sjek S mm ²	Dulj. masa kg/m	Statičke veličine					
			e mm	$I_x = I_y$ 10^4 mm^4 (= cm ⁴)	I_η	$W_x = W_y$ 10^3 mm^3 (= cm ³)	W_η	i_η mm
20 × 20 × 3	112	0,88	6,0	0,39	0,15	0,28	0,18	3,7
25 × 25 × 3	142	1,12	7,3	0,79	0,31	0,45	0,30	4,7
25 × 25 × 4	185	1,45	7,6	1,01	0,40	0,58	0,37	4,7
30 × 30 × 3	174	1,36	8,4	1,41	0,57	0,65	0,48	5,7
30 × 30 × 4	227	1,78	8,9	1,81	0,76	0,86	0,61	5,8
30 × 30 × 5	278	2,18	9,2	2,16	0,91	1,04	0,70	5,7
35 × 35 × 4	267	2,10	10,0	2,96	1,24	1,18	0,88	6,8
40 × 40 × 4	308	2,42	11,2	4,48	1,86	1,56	1,18	7,8
40 × 40 × 5	379	2,97	11,6	5,43	2,22	1,91	1,35	7,7
45 × 45 × 5	430	3,38	12,8	7,83	3,25	2,43	1,80	8,7
50 × 50 × 5	480	3,77	14,0	11,0	4,59	3,05	2,32	9,8
50 × 50 × 6	569	4,47	14,5	12,8	5,24	3,61	2,57	9,6
55 × 55 × 6	631	4,95	15,6	17,3	7,24	4,40	3,28	10,7

Jednakokrani kutni profili (nastavak)

Oznaka $b \times b \times d$ mm	Pre- sjek S mm ²	Dulj. masa kg/m	e mm	Statičke veličine				
				$I_x = I_y$ 10^4 mm^4 (= cm ⁴)	I_η	$W_x = W_y$ 10^3 mm^3 (= cm ³)	W_η	i_η mm
60 × 60 × 6	691	5,42	16,9	22,8	9,43	5,29	3,95	11,7
60 × 60 × 8	903	7,09	17,7	29,1	12,1	6,88	4,84	11,6
65 × 65 × 7	870	6,83	18,5	33,4	13,8	7,18	5,27	12,6
70 × 70 × 7	940	7,38	19,7	42,4	17,6	8,43	6,31	13,7
70 × 70 × 9	1 190	9,34	20,5	52,6	22,0	10,6	7,59	13,6
75 × 75 × 8	1 150	9,03	21,3	58,9	24,4	11,0	8,11	14,6
75 × 75 × 10	1 410	11,1	22,1	71,4	29,8	13,5	9,55	14,5
80 × 80 × 8	1 230	9,66	22,6	72,3	29,6	12,6	9,25	15,5
80 × 80 × 10	1 510	11,9	23,4	87,5	35,9	15,5	10,9	15,4
80 × 80 × 12	1 790	14,1	24,1	102	43,0	18,2	12,6	15,3
90 × 90 × 9	1 550	12,2	25,4	116	47,8	18,0	13,3	17,6
90 × 90 × 11	1 870	14,7	26,2	138	57,1	21,6	15,4	17,5
100 × 100 × 10	1 920	15,1	28,2	177	73,3	24,7	18,4	19,5
100 × 100 × 12	2 270	17,8	29,0	207	86,2	29,2	21,0	19,5
110 × 110 × 10	2 120	16,6	30,7	239	98,6	30,1	22,7	21,6
110 × 110 × 12	2 510	19,7	31,5	280	116	35,7	26,1	21,5
120 × 120 × 11	2 540	19,9	33,6	341	140	39,5	29,5	23,5
120 × 120 × 13	2 970	23,3	34,4	394	162	46,0	33,3	23,4
130 × 130 × 12	3 000	23,6	36,4	472	194	50,4	37,7	25,4
130 × 130 × 14	3 470	27,2	37,2	540	223	58,2	42,4	25,3
140 × 140 × 14	3 720	29,2	40,2	692	282	69,3	49,7	27,5
140 × 140 × 16	4 220	33,2	40,9	775	318	78,2	55,0	27,4
150 × 150 × 14	4 030	31,6	42,1	845	347	78,2	58,3	29,4
150 × 150 × 16	4 570	35,9	42,9	949	391	88,7	64,4	29,3
160 × 160 × 15	4 610	36,2	44,9	1 100	453	95,6	71,3	31,4
160 × 160 × 17	5 180	40,7	45,7	1 230	506	108	78,3	31,3
200 × 200 × 16	6 180	48,5	55,2	2 340	943	162	121	39,1
200 × 200 × 18	6 910	54,3	56,0	2 600	1 050	181	133	39,0

Normalne duljine jednakokranih kutnih profila: 3...15 m.

Raznokračni kutni profili

Oznaka $b \times h \times d$ mm	Pre-sjek S mm ²	Dulj. masa kg/m	Statičke veličine					
			e_x	e_y	I_x 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	I_y	W_x 10 ³ mm ³ (= cm ³)	W_y
20 × 30 × 3	142	1,11	9,9	5,0	1,25	0,44	0,62	0,29
20 × 30 × 4	185	1,45	10,3	5,4	1,59	0,55	0,81	0,38
20 × 40 × 3	172	1,35	14,3	4,4	2,79	0,47	1,08	0,30
30 × 45 × 4	287	2,25	14,8	7,4	5,78	2,05	1,91	0,91
40 × 60 × 5	479	3,76	19,6	9,7	17,2	6,11	4,25	2,02
40 × 60 × 6	568	4,46	20,0	10,1	20,1	7,12	5,03	2,38
40 × 60 × 7	655	5,14	20,4	10,5	23,0	8,07	5,79	2,74
40 × 80 × 6	689	5,41	28,5	8,8	44,9	7,59	8,73	2,44
50 × 65 × 5	554	4,35	19,9	12,5	23,1	11,9	5,11	3,18
50 × 65 × 7	760	5,97	20,7	13,3	31,0	15,8	6,99	4,31
50 × 100 × 10	1 410	11,1	36,7	12,0	141	23,4	22,2	6,17
55 × 75 × 7	866	6,80	24,0	14,1	47,9	21,8	9,39	5,32
60 × 90 × 6	869	6,82	28,9	14,1	71,7	25,8	11,7	5,61
60 × 90 × 8	1 140	8,96	29,7	14,9	92,5	33,0	15,4	7,31
65 × 80 × 8	1 100	8,66	24,7	17,3	68,1	40,1	12,3	8,41
65 × 100 × 9	1 420	11,1	33,2	15,9	141	46,7	21,0	9,52
65 × 100 × 11	1 710	13,4	34,0	16,7	167	55,1	25,3	11,4
65 × 130 × 10	1 860	14,6	46,5	14,5	321	54,2	38,4	10,7
75 × 130 × 8	1 590	12,5	43,6	16,5	276	68,3	31,9	11,7
80 × 120 × 8	1 550	12,2	38,3	18,7	226	80,8	27,6	13,2
80 × 120 × 10	1 910	15,0	39,2	19,5	276	98,1	34,1	16,2
80 × 120 × 12	2 270	17,8	40,0	20,3	323	114	40,4	19,1
90 × 130 × 10	2 120	16,6	41,5	21,8	358	141	40,5	20,6
90 × 130 × 12	2 510	19,7	42,4	22,6	420	165	48,0	24,4
100 × 150 × 10	2 420	19,0	48,0	23,4	552	198	54,1	25,8
100 × 150 × 12	2 870	22,6	48,9	24,2	650	232	64,2	30,6
100 × 200 × 12	3 480	27,3	70,3	21,0	1 440	247	111	31,3
100 × 200 × 14	4 030	31,6	71,2	21,8	1 650	282	128	36,1

Normalne duljine raznokračnih kutnih profila: 3...15 m.

Čelični profili

vruće valjani (JUS C.B3.141 — 1962)

Statičke veličine:

I — moment tromosti plohe

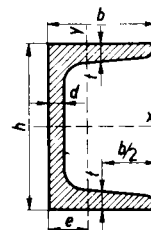
W — moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x/A}$$

$$i_y = \sqrt{I_y/A}$$

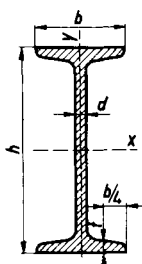
Konstruktivske mjere — vidi str. 431!



Oznaka*	Dimenzije mm				Pre-sjek S mm ²	Duljinska masa kg/m	Statičke veličine				
	h	b	d	t			e mm	I_x 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	I_y	W_x 10 ³ mm ³ (= cm ³)	W_y
6,5	65	42	5,5	7,5	903	7,09	14,2	57,5	14,1	17,7	5,07
8	80	45	6	8	1100	8,64	14,5	106	19,4	26,5	6,36
10	100	50	6	8,5	1350	10,6	15,5	206	29,3	41,2	8,49
12	120	55	7	9	1700	13,4	16,0	364	43,2	60,7	11,1
14	140	60	7	10	2040	16,0	17,5	605	62,7	86,4	14,8
16	160	65	7,5	10,5	2400	18,8	18,4	925	85,3	116	18,3
18	180	70	8	11	2800	22,0	19,2	1350	114	150	22,4
20	200	75	8,5	11,5	3220	25,3	20,1	1910	148	191	27,0
(22)	220	80	9	12,5	3740	29,4	21,4	2690	197	245	33,6
24	240	85	9,5	13	4230	33,2	22,3	3600	248	300	39,6
26	260	90	10	14	4830	37,9	23,6	4820	317	371	47,7
(28)	280	95	10	15	5330	41,8	25,3	6280	399	448	57,2
30	300	100	10	16	5880	46,2	27,0	8030	495	535	67,8

* Treba se kloniti dimenzija u zagradama.

Normalne duljine čeličnih profila □: 4...15 m.



Čelični profili I
vruće valjani (JUS C.B3.131 — 1962)

Statičke veličine:

I — moment tromosti plohe
 W — moment otpora

Polumjer tromosti:

$$i_x = \sqrt{I_x/A}$$

$$i_y = \sqrt{I_y/A}$$

Konstruktivske mjere — vidi str. 431!

Konstruktivske mjere čeličnih profila (po DIN 997)
Sve mjere u mm

Čelični kutni profili

b h	c ₁	c ₂	d ₀ max.				
				b h	c ₁	c ₂	d ₀ max.
20	12	—	4,3	75	40	—	23
25	15	—	6,4	80	45	—	23
30	17	—	8,4	90	50	—	25
35	18	—	11	100	45	60	25
40	22	—	11	110	45	70	25
45	25	—	13	120	50	80	25
50	30	—	13	130	50	90	25
55	30	—	17	140	50	95	28
60	35	—	17	150	50	105	28
65	35	—	21	160	60	115	28
70	40	—	21	200	60	150	28

Čelični profil C

b	c	d ₀ max.	h ₁					
b	c	d ₀ max.	h ₁					
42	25	11	33	75	40	23	151	
45	25	13	46	80	45	23	167	
50	30	13	64	85	45	25	184	
55	30	17	82	90	50	25	200	
60	35	17	98	95	50	25	216	
65	35	21	115	100	55	25	222	
70	40	21	133					

Čelični profil I

b	c	d ₀ max.	h ₁					
b	c	d ₀ max.	h ₁					
42	22	6,4	59	113	60	17	208	
50	28	6,4	75	119	62	17	225	
58	32	8,4	92	125	64	21	241	
66	34	11	109	131	70	21	258	
74	40	11	125	137	74	21	274	
82	44	13	142	143	76	23	290	
90	48	13	159	149	82	23	306	
98	52	13	176	155	86	23	323	
106	56	17	192					

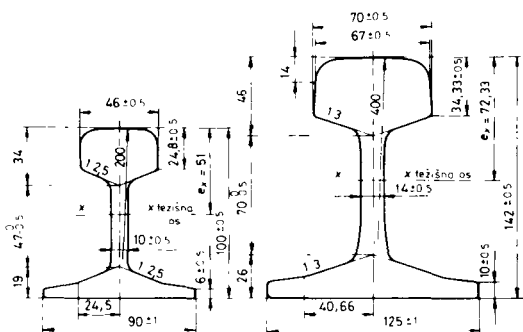
Orznaka*	Dimenzije mm				Pre- sjek S mm ²	Dulj. masa kg/m	Statičke veličine			
	h	b	d	t			I _x 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	I _y	W _x	W _y
8	80	42	3,9	5,9	758	5,95	77,8	6,3	19,5	3,00
10	100	50	4,5	6,8	1 060	8,32	171	12,2	34,2	4,88
12	120	58	5,1	7,7	1 420	11,2	328	21,5	54,7	7,41
14	140	66	5,7	8,6	1 830	14,4	573	35,2	81,9	10,7
16	160	74	6,3	9,5	2 280	17,9	935	54,7	117	14,8
18	180	82	6,9	10,4	2 790	21,9	1 450	81,3	161	19,8
20	200	90	7,5	11,3	3 350	26,3	2 140	117	214	26,0
(22)	220	98	8,1	12,2	3 960	31,1	3 060	162	278	33,1
24	240	106	8,7	13,1	4 610	38,2	4 250	221	354	41,7
26	260	113	9,4	14,1	5 340	41,9	5 740	288	442	51,0
(28)	280	119	10,1	15,2	6 110	48,0	7 590	364	543	61,2
30	300	125	10,8	16,2	6 910	54,2	9 800	451	653	72,2
(32)	320	131	11,5	17,3	7 780	61,1	12 510	555	782	84,7
34	340	137	12,2	18,3	8 680	68,1	15 700	674	923	98,4
(36)	360	143	13,0	19,5	9 710	76,2	19 610	818	1 090	114
(38)	380	149	13,7	20,5	10 700	84,0	24 010	975	1 250	131
40	400	155	14,4	21,6	11 800	92,6	29 210	1 160	1 460	149

* Treba se kloniti dimenzija u zagradama.

Normalne duljine čeličnih profila I: 4...15 m.

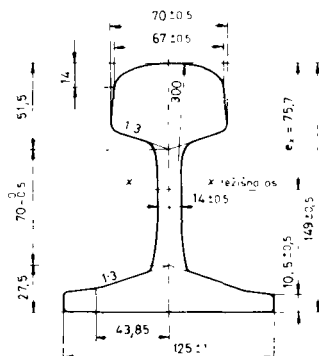
Željezničke tračnice (duljinske mase veće od 20 kg/m)
(JUS C.K1.021 – 1963)

Oznaka tipa tračnice	Dulj. masa kg/m	Presjek S mm ²	Moment tromosti I_x 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	Moment otpora W_x 10 ³ mm ³ (= cm ³)
22	22,12	2 818	375,5	73,6
45	45,44	5 784	1 552	215
49	49,43	6 297	1 819	240



Tip 22

Tip 45



Tip 49

Čelični limovi

Čelični debeli limovi (JUS C.B4.110 – 1972)

Debljina mm	u skokovima po	Širina mm			Duljina mm	
		400) ... 700	700) ... 1500	1500) ... 3000	... 6000	6000) ...
5 ... 7	0,5 mm u skokovima	u skokovima po 20 mm	u skokovima po 50 mm	u skokovima po 100 mm	u skokovima po 500 mm	u skokovima po 1000 mm
7) ... 30	1 mm					
30) ... 50	2 mm u skokovima	u skokovima po 50 mm				
50) ... 60	3 mm u skokovima	u skokovima po 50 mm				
60) ...	5 mm					

Čelični osrednji limovi (JUS C.B4.111 – 1956)

Debljina 3, 3,5 4, 4,5 4,75 mm
Širina ... 1200 ... 1450 ... 1700 mm
Duljina ... 4000 ... 5000 ... 6000 ... 7000 mm
Trgovački formati 1000 × 2000 mm 1250 × 2500 mm

Čelični tanki limovi (JUS C.B4.112 – 1962 in 113 – 1978)

Debljina 0,4 ... 0,8 mm u razmaku po 0,05 mm
0,9 ... 1,1 mm u razmaku po 0,1 mm
1,25 ... 2,75 mm u razmaku po 0,25 mm
Širina 550 ... 600, 750 ... 1000, 1100, 1200 mm
Duljina 1500 ... 2000, 2250, 2500, 3000 mm

Plošna masa čeličnih limova

Debljina mm	Plošna masa kg/m ²	Debljina mm	Plošna masa kg/m ²	Debljina mm	Plošna masa kg/m ²	Debljina mm	Plošna masa kg/m ²
0,40	3,14	2,00	15,70	9	70,65	25	196,2
0,45	3,53	2,25	17,66	10	78,50	26	204,1
0,50	3,93	2,50	19,63	11	86,35	27	211,9
0,55	4,32	2,75	21,59	12	94,20	28	219,8
0,60	4,71	3,00	23,55	13	102,0	29	227,6
0,65	5,10	3,25	25,51	14	109,9	30	235,5
0,70	5,50	3,50	27,48	15	117,8	32	251,2
0,75	5,89	4,0	31,40	16	125,6	34	266,9
0,80	6,28	4,5	35,32	17	133,4	36	282,6
0,85	6,67	5,0	39,25	18	141,3	38	298,3
0,90	7,07	5,5	43,18	19	149,2	40	314,0
0,95	7,46	6,0	47,10	20	157,0	42	329,7
1,00	7,85	6,5	51,03	21	164,8	44	345,4
1,25	9,81	7,0	54,95	22	172,7	46	361,1
1,50	11,78	7,5	58,88	23	180,6	48	376,8
1,75	13,74	8,0	62,80	24	188,4	50	392,5

Pocinčani lim (JUS C.B4.081 – 1984)

Debljina 0,45 ... 4 mm; širina 1000 mm; duljina 2000 (2500) mm.

Čelične bešavne cijevi (ISO)

Materijal cijevi:

- čelik Č. 0000 (JUS C.B5.226 — 1968)
- čelik Č. 1212 (JUS C.B5.122 — 1968)
- čelik Č. 1213 (JUS C.B5.123 — 1968)
- čelik Č. 1402 (JUS C.B5.124 — 1968)
- čelik Č. 3100 (JUS C.B5.125 — 1968)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
10	16	1,8	0,632	25	100	100	100	100
	17,2	1,8	0,688	25	100	100	100	100
15	20	2,0	0,890	25	100	100	100	100
	21,3	2,0	0,962	25	100	100	100	100
20	25	2,0	1,13	25	100	100	100	100
	26,9	2,3	1,41	25	100	100	100	100
25	30	2,6	1,77	25	100	100	100	100
	33,7	2,6	2,01	25	100	100	100	100
32	38	2,6	2,29	25	100	100	100	100
	42,4	2,6	2,57	25	100	100	100	100
40	44,5	2,6	2,70	25	100	100	100	100
	48,3	2,6	2,95	25	100	100	100	100
50	57	2,9	3,90	25	100	100	100	100
	60,3	2,9	4,14	25	100	100	100	100
65	76,1	2,9	5,28	25	80	80	100	100
		3,2	5,80	—	—	100	—	—
		3,6	6,49	—	100	—	—	—
80	88,9	3,2	6,81	25	64	80	80	100
		3,6	7,63	—	80	100	100	—
		4,0	8,43	—	100	—	—	—
100	108	3,6	9,33	25	64	80	80	100
		4,0	10,3	—	80	—	100	—
		4,5	11,4	—	—	100	—	—
		5,0	12,7	—	100	—	—	—

Čelične bešavne cijevi (nastavak)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
100	114,3	3,6	9,90	25	40	64	80	100
		4,0	11,0	—	80	80	100	—
		4,5	12,1	—	—	100	—	—
		5,0	13,5	—	100	—	—	—
125	133	4,0	12,8	25	40	40	80	100
		4,5	14,2	—	64	80	—	—
		5,0	15,8	—	80	—	100	—
		5,6	17,6	—	—	100	—	—
		6,3	19,8	—	100	—	—	—
150	139,7	4,0	13,5	25	40	40	80	80
		4,5	14,9	—	—	64	—	100
		5,0	16,6	—	80	80	100	—
		5,6	18,5	—	—	100	—	—
		6,3	20,8	—	100	—	—	—
150	159	4,5	17,1	25	40	40	80	80
		5,0	19,0	—	—	64	—	100
		5,6	21,1	—	80	80	100	—
		6,3	23,8	—	—	100	—	—
		7,1	26,6	—	100	—	—	—
150	168,3	4,5	18,1	25	40	40	64	80
		5,0	20,1	—	—	—	80	100
		5,6	22,4	—	64	80	—	—
		6,3	25,3	—	80	—	100	—
		7,1	28,3	—	100	100	—	—
(175)*	193,7	5,4... 8,8	25... 40					
200	216**	6,0**	31,1	25	40	40	64	80
		6,3	32,6	—	—	—	80	100
		7,1	36,6	—	64	80	—	—
		8,0	41,0	—	80	—	100	—
		8,8	45,0	—	—	100	—	—
		10,0	50,8	—	100	—	—	—

- * Nazivni promjer 175 mm JUS ne preporučuje.
- ** Dimenzije nisu prema ISO.

Čelične bešavne cijevi (nastavak)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
200	219,1	5,9	31,0	25	40	40	64	80
		6,3	33,2	—	—	—	80	100
		7,1	37,2	—	64	80	—	—
		8,0	41,5	—	80	—	100	—
		8,8	45,4	—	—	100	—	—
		10,0	51,6	—	100	—	—	—
250	267	6,3	40,6	25	40	40	40	80
		7,1	45,6	—	—	—	64	—
		8,0	50,9	—	—	64	80	100
		8,8	55,8	—	64	80	—	—
		10,0	63,4	—	80	—	100	—
		11,0	69,7	—	100	100	—	—
250	273	6,3	41,6	25	40	40	40	80
		7,1	46,7	—	—	—	64	—
		8,0	52,1	—	—	64	80	100
		8,8	57,1	—	64	80	—	—
		10,0	64,9	—	80	—	100	—
		11,0	71,4	—	—	100	—	—
300	318*	7,5*	57,4	16	40	40	40	64
		8,0	61,2	—	—	—	—	80
		8,8	67,1	—	—	—	80	—
		10,0	76,0	—	—	80	—	100
		11,0	83,3	—	80	—	100	—
		12,5	94,2	—	—	100	—	—
300	323,9	7,1	55,6	16	40	40	40	64
		8,0	62,1	—	—	—	—	80
		8,8	68,1	—	—	—	80	—
		10,0	77,4	—	—	80	—	100
		11,0	85,3	—	80	—	100	—
		12,5	96,7	—	—	100	—	—
		14,2	109	—	100	—	—	

* Dimenzije nisu po ISO.

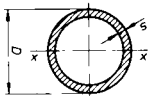
Čelične bešavne cijevi (nastavak)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer mm	Debljina stijenke mm	Dulj. masa kg/m	Nazivni tlak (bar)				
				Č. 0000	Č. 1212	Č. 1213	Č. 1402	Č. 3100
350	355,6	8,0	68,3	16	40	40	40	64
		8,8	74,9	—	—	—	—	80
		10,0	85,2	—	—	—	80	100
		11,0	93,9	—	—	80	—	—
		12,5	107	—	80	—	100	—
		14,2	120	—	—	100	—	—
		16,0	133	—	100	—	—	—
		8,0	70,8	16	40	40	40	64
		8,8	77,7	—	—	—	—	80
		10,0	88,3	—	—	—	80	—
350	368	11,0	97,3	—	—	64	—	100
		12,5	110	—	80	80	100	—
		14,2	124	—	—	100	—	—
		16,0	138	—	100	—	—	—
		8,8	85,9	16	40	40	40	64
		10,0	97,8	—	—	—	—	80
350	406,4	11,0	108	—	—	80	—	100
		12,5	122	—	—	80	—	—
		14,2	138	—	80	100	100	—
		17,5	168	—	100	—	—	—
		10,0	101	16	40	40	40	80
		11,0	111	—	—	—	64	—
350	419	12,5	126	—	—	64	80	100
		14,2	142	—	80	80	100	—
		16,0	158	—	—	100	—	—
		17,5	173	—	100	—	—	—
		11,0	135	10	40	40	40	40
		12,5	154	—	—	—	—	64
350	508	14,2	173	—	—	—	80	100
		16,0	193	—	64	80	—	—
		17,5	211	—	80	—	100	—
		20,0	241	—	—	100	—	—
		22,2	266	—	100	—	—	—

Od pojedinih vrsta čelika dolaze u obzir cijevi onih dimenzija za koje je označen nazivni tlak.

Precizne čelične cijevi

vučene ili hladno valjane (JUS C.B5.250 – 1983)



Polarni moment tromosti
Polarni moment otpora

$$I_p = 2I_x$$

$$W_p = 2W_x$$

Vanjski promjer <i>D</i> mm	Debljina <i>s</i> mm	Presjek <i>S</i> mm ²	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Moment tromosti <i>I_x</i> 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	Moment otpora <i>W_x</i> 10 ³ mm ³ (= cm ³)
10	1	28,3	0,222	0,028 98	0,057 96
	1,5	40,0	0,314	0,037 30	0,074 60
12	1	34,5	0,271	0,052 70	0,087 83
	1,5	49,5	0,388	0,069 58	0,116 0
16	1	47,1	0,370	0,133 1	0,166 4
	1,5	68,3	0,536	0,181 5	0,226 9
	2	88,0	0,690	0,219 9	0,274 9
18	1	53,4	0,419	0,193 6	0,215 1
	1,5	77,7	0,610	0,266 8	0,296 3
	2	100,5	0,789	0,326 7	0,363 0
20	1	59,7	0,468	0,270 1	0,270 1
	1,5	87,2	0,684	0,375 4	0,375 4
	2	113,1	0,888	0,463 7	0,463 7
	2,5	137,4	1,079	0,536 9	0,536 9
22	1	66,0	0,518	0,364 5	0,331 4
	1,5	96,6	0,758	0,510 2	0,463 8
	2	125,7	0,986	0,634 6	0,576 9
	2,5	153,1	1,202	0,739 9	0,672 7
25	1	75,4	0,592	0,543 8	0,435 0
	1,5	110,7	0,869	0,767 6	0,614 1
	2	144,5	1,134	0,962 8	0,770 2
	2,5	176,7	1,387	1,132	0,905 6
28	1	84,8	0,666	0,774 0	0,552 9
	1,5	124,8	0,980	1,100	0,785 7
	2	163,4	1,282	1,389	0,992 1
	2,5	200,3	1,572	1,644	1,174
30	1	91,1	0,715	0,958 9	0,639 3
	1,5	134,3	1,054	1,367	0,911 3
	2	175,9	1,381	1,733	1,155
	2,5	216,0	1,695	2,059	1,373
32	1	97,4	0,764	1,171	0,731 9
	1,5	143,7	1,128	1,675	1,047
	2	188,5	1,480	2,130	1,331
	2,5	231,7	1,819	2,538	1,586
35	1	106,8	0,838	1,545	0,882 9
	1,5	157,9	1,239	2,219	1,268
	2	207,3	1,627	2,833	1,619
	2,5	255,2	2,003	3,390	1,937
38	1	116,2	0,912	1,991	1,048
	1,5	172,0	1,350	2,869	1,510
	2	226,2	1,776	3,676	1,935
	2,5	278,8	2,189	4,414	2,323
40	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
45	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
50	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600

Precizne čelične cijevi

vučene ili hladno valjane (nastavak)

Vanjski promjer <i>D</i> mm	Debljina <i>s</i> mm	Presjek <i>S</i> mm ²	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Moment tromosti <i>I_x</i> 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	Moment otpora <i>W_x</i> 10 ³ mm ³ (= cm ³)
30	1	91,1	0,715	0,958 9	0,639 3
	1,5	134,3	1,054	1,367	0,911 3
	2	175,9	1,381	1,733	1,155
	2,5	216,0	1,695	2,059	1,373
	3	254,5	1,997	2,347	1,565
32	1	97,4	0,764	1,171	0,731 9
	1,5	143,7	1,128	1,675	1,047
	2	188,5	1,480	2,130	1,331
	2,5	231,7	1,819	2,538	1,586
	3	273,3	2,145	2,904	1,815
35	1	106,8	0,838	1,545	0,882 9
	1,5	157,9	1,239	2,219	1,268
	2	207,3	1,627	2,833	1,619
	2,5	255,2	2,003	3,390	1,937
	3	301,6	2,367	3,894	2,225
38	1	116,2	0,912	1,991	1,048
	1,5	172,0	1,350	2,869	1,510
	2	226,2	1,776	3,676	1,935
	2,5	278,8	2,189	4,414	2,323
	3	329,9	2,589	5,088	2,678
40	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
	3	348,7	2,737	6,007	3,004
45	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
	3	348,7	2,737	6,007	3,004
50	1	122,5	0,962	2,331	1,166
	1,5	181,4	1,424	3,367	1,684
	2	238,8	1,874	4,322	2,161
	2,5	294,5	2,312	5,200	2,600
	3	348,7	2,737	6,007	3,004

Precizne čelične cijevi
vučene ili hladno valjane (nastavak)

Vanjski promjer <i>D</i> mm	Debljina <i>s</i> mm	Presjek <i>S</i> mm ²	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Moment tromosti	
				I_x 10 ⁴ mm ⁴ (= cm ⁴)	I_y 10 ³ mm ⁴ (= cm ⁴)
56	1,5	256,8	2,016	9,543	3,408
	2	339,3	2,663	12,384	4,423
	2,5	420,2	3,298	15,066	5,381
	3	499,5	3,921	17,595	6,284
4	653,5	5,129	22,217	7,935	
63	1,5	289,8	2,275	13,710	4,352
	2	383,3	3,009	17,846	5,665
	2,5	475,2	3,730	21,777	6,913
	3	565,5	4,439	25,510	8,098
4	741,4	5,820	32,409	10,289	
70	1,5	322,8	2,534	18,942	5,412
	2	427,3	3,354	24,717	7,062
	2,5	530,1	4,161	30,235	8,639
	3	631,5	4,957	35,504	10,144
4	829,4	6,511	45,326	12,950	
80	1,5	369,9	2,904	28,505	7,126
	2	490,1	3,847	37,296	9,324
	2,5	608,7	4,778	45,746	11,437
	3	725,7	5,697	53,866	13,467
4	955,0	7,497	69,145	17,286	
90	2	552,9	4,340	53,550	11,900
	2,5	687,2	5,395	65,823	14,627
	3	820,0	6,436	77,670	17,260
	4	1080,7	8,483	100,127	22,250
100	2	615,8	4,833	73,952	14,790
	2,5	765,8	6,012	91,054	18,211
	3	914,2	7,176	107,624	21,525
	4	1206,4	9,470	139,215	27,843
110	2	678,6	5,327	98,971	17,995
	2,5	844,3	6,628	122,028	22,187
	3	1008,5	7,916	144,435	26,261
	4	1332,0	10,456	187,351	34,064
120	2	741,4	5,820	129,080	21,513
	2,5	922,8	7,244	159,334	26,556
	3	1102,7	8,656	188,809	31,468
	4	1457,7	11,443	245,476	40,913

Čelične cijevi za cijevni navoj
Čelične cijevi propisanih mehaničkih svojstava (JUS C.B5.222 – 1968)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer col*	Vanjski promjer mm	Nazivni tlak (bar)					
			1...50		80		100	
			debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m
6	1/8	10,2	—	—	—	—	2,65	0,493
8	1/4	13,5	—	—	—	—	2,9	0,769
10	3/8	17,2	—	—	—	—	2,9	1,02
15	1/2	21,3	—	—	—	—	3,25	1,45
20	3/4	26,9	—	—	—	—	3,25	1,9
25	1	33,7	—	—	—	—	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	—	—	—	—	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	—	—	—	—	4,05	4,43
50	2	60,3	—	—	—	—	4,50	6,17
65	2 1/2	76,1	—	—	—	—	4,50	7,90
80	3	88,9	—	—	—	—	4,85	10,1
100	4	114,3	—	—	5,4	14,4	6,3	16,8
125	5	139,7	5,4	17,8	7,1	23,3	8,0	25,9
150	6	165,1	5,4	21,2	8,0	30,9	8,8	33,8

Čelične cijevi bez propisanih mehaničkih svojstava (JUS C.B5.225 – 1968)

Nazivni promjer mm	Vanjski promjer col*	Vanjski promjer mm	Poluteške cijevi		Teške cijevi	
			debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m	debljina stijenke mm	dulj. masa kg/m
6	1/8	10,2	2,0	0,407	2,65	0,493
8	1/4	13,5	2,35	0,650	2,9	0,769
10	3/8	17,2	2,35	0,852	2,9	1,02
15	1/2	21,3	2,65	1,22	3,25	1,45
20	3/4	26,9	2,65	1,58	3,25	1,90
25	1	33,7	3,25	2,44	4,05	2,97
32	1 1/4	42,4	3,25	3,14	4,05	3,84
40	1 1/2	48,3	3,25	3,61	4,05	4,43
50	2	60,3	3,65	5,10	4,5	6,17
65	2 1/2	76,1	3,65	6,51	4,5	7,90
80	3	88,9	4,05	8,47	4,85	10,1
100	4	114,3	4,5	12,1	5,4	14,4
125	5	139,7	4,85	16,2	5,4	17,8
150	6	165,1	4,85	19,2	5,4	21,8

* Napuštena stara oznaka.

Čelična žica

Okrugla vučena čelična žica (JUS C.B6.110 – 1982)

Nazivni promjer mm	Tolerancija mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/km	Nazivni promjer mm	Tolerancija mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/km
0,1	± 0,005	0,00785	0,0617	1,4	± 0,04	1,54	12,1
0,12		0,0113	0,0888	1,6		2,01	15,8
0,14	± 0,01	0,0154	0,121	1,8	± 0,06	2,54	20,0
0,16		0,0201	0,158	2		3,14	24,7
0,18		0,0254	0,200	2,2		3,80	29,8
0,2	± 0,015	0,0314	0,247	2,5	± 0,08	4,91	38,5
0,22		0,0380	0,298	2,8		6,16	48,3
0,24		0,0452	0,355	3,1		7,55	59,2
0,26		0,0531	0,417	3,4		9,08	71,3
0,28		0,0616	0,483	3,8		11,3	89
0,31	± 0,02	0,0755	0,592	4	± 0,10	12,6	99
0,34		0,0908	0,713	4,2		13,9	109
0,37		0,108	0,844	4,6		16,6	130
0,4		0,126	0,986	5		19,6	154
0,45		0,159	1,25	5,5		23,8	187
0,5		0,196	1,54	6		28,3	222
0,55		0,238	1,87	6,5		33,2	260
0,6		0,283	2,22	7		38,5	302
0,7		0,385	3,02	8		50,3	395
0,8		± 0,03	0,503	3,95		9	± 0,15	63,6	499
0,9	0,636		4,99	10	78,5	617	
1	0,785		6,17	11	95	746	
1,1	0,950		7,46	12	113	888	
1,2	1,13		8,88	13	133	1040	
1,3	± 0,04	1,33	10,4	14	154	1210	

*

Okrugla vučena čelična žica od malougličnog čelika za posebne svrhe (JUS C.B6.011 – 1980)

Nazivni promjer 0,1...14 mm.

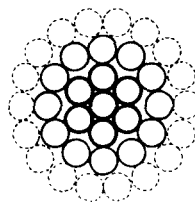
Okrugla čelična žica, vučena ili brušena u tolerancijskom polju ISO h 11 (JUS C.B6.111 – 1982):

Nazivni promjer 1...9,8 mm

Čelična užad

za opće svrhe

Čelična užad bez jezgre



Užad bez jezgre (srži) je spletena od žica istog promjera. Oko središnje žice sukano je u prvom sloju 6 ili u drugome 12, ili još u trećem 18 žica..

Sukanje prvog sloja može biti *desno* (tj. normalno) ili *lijevo*. Sukanje u slijedećim slojevima uvijek je suprotno sukanju u sloju prije toga.

Žice za užad bez jezgre su od čelika nazivne vlačne čvrstoće

$$R_m = 1570 \text{ ili } 1770 \text{ N/mm}^2$$

Žice mogu biti gole ili pocinčane.

Uže 1 × 7 (JUS C.H1.060 – 1982):

Izvedba užeta: 1 + 6 žica

Uže se sastoji od sedam žica od kojih je šest ovijeno oko središnje žice.

Nazivni promjer užeta d mm	Duljinska masa m _l kg/m	Prekidna sila			
		F _r – računska, F _{min} – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		R _m = 1570 N/mm ²		R _m = 1770 N/mm ²	
		F _r kN	F _{min} kN	F _r kN	F _{min} kN
0,6	0,001 81	0,342	0,308	0,385	0,347
0,8	0,003 21	0,608	0,547	0,685	0,617
1	0,005 02	0,950	0,855	1,07	0,963
1,5	0,011 3	2,14	1,92	2,41	2,17
2	0,020 1	3,80	3,42	4,28	3,85
2,5	0,031 4	5,93	5,34	6,69	6,02
3	0,045 2	8,55	7,69	9,63	8,67
3,5	0,061 5	11,6	10,5	13,1	11,8
4	0,080 3	15,2	13,7	17,1	15,4
4,5	0,102	19,2	17,3	21,7	19,5
5	0,126	23,7	21,4	26,8	24,1
6	0,181	34,2	30,8	38,5	34,7
7	0,246	46,5	41,9	52,4	47,2
8	0,321	60,8	54,7	68,5	61,7
9	0,407	76,9	69,2	86,7	78,0
10	0,502	95,0	85,5	107	96,3
12	0,723	137	123	154	139
14	0,984	186	167	210	189
16	1,29	243	219	274	247

Uže 1 × 19 (JUS C.H1.061 – 1982)

Uže se sastoji od 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, a u drugom 12 žica.

Nazivni promjer užeta <i>d</i> mm	Duljinska masa <i>m</i> ₁ kg/m	Prekidna sila <i>F</i> _r – računska, <i>F</i> _{min} – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		<i>R</i> _m = 1570 N/mm ²		<i>R</i> _m = 1770 N/mm ²	
		<i>F</i> _r kN	<i>F</i> _{min} kN	<i>F</i> _r kN	<i>F</i> _{min} kN
1.	0,004 95	0,937	0,825	1,06	0,930
1,5	0,011 1	2,11	1,86	2,38	2,09
2	0,019 8	3,75	3,30	4,23	3,72
2,5	0,031 0	5,86	5,15	6,61	5,81
3	0,044 6	8,43	7,42	9,51	8,37
3,5	0,060 7	11,5	10,1	12,9	11,4
4	0,079 3	15,0	13,2	16,9	14,9
5	0,124	23,4	20,6	26,4	23,2
6	0,178	33,7	29,7	38,1	33,5
7	0,243	45,9	40,4	51,8	45,6
8	0,317	60,0	52,8	67,6	59,5
9	0,401	75,9	66,8	85,6	75,3
10	0,495	93,7	82,5	106	93,0
11	0,599	113	99,8	128	112
12	0,713	135	119	152	134
13	0,837	158	139	179	157
14	0,971	184	162	207	182
15	1,11	211	186	238	209
16	1,27	240	211	271	238
17	1,43	271	238	305	269
18	1,61	304	267	342	301
19	1,79	338	298	382	336
20	1,98	375	330	423	372
21	2,18	413	364	466	410
22	2,40	454	399	512	450
23	2,62	496	436	559	492
24	2,85	540	475	609	536
25	3,10	586	515	661	581

Uže 1 × 37 (JUS C.H1.062 – 1982)

Uže se sastoji od 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica i u trećem 18 žica.

Nazivni promjer užeta <i>d</i> mm	Duljinska masa <i>m</i> ₁ kg/m	Prekidna sila <i>F</i> _r – računska, <i>F</i> _{min} – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		<i>R</i> _m = 1570 N/mm ²		<i>R</i> _m = 1770 N/mm ²	
		<i>F</i> _r kN	<i>F</i> _{min} kN	<i>F</i> _r kN	<i>F</i> _{min} kN
3	0,044 0	8,32	7,24	9,39	8,16
4	0,078 2	14,8	12,9	16,7	14,5
5	0,122	23,1	20,1	26,1	22,7
6	0,176	33,3	29,0	37,5	32,7
7	0,240	45,3	39,4	51,1	44,4
8	0,313	59,2	51,5	66,8	58,1
9	0,396	74,9	65,2	84,5	73,5
10	0,489	92,5	80,5	104	90,7
12	0,704	133	116	150	131
14	0,958	181	158	204	178
16	1,25	237	206	267	232
18	1,58	300	261	338	294
20	1,96	370	322	417	363
22	2,37	448	389	505	439
24	2,82	533	463	601	522
26	3,31	625	544	705	613
28	3,83	725	631	818	711
30	4,40	832	724	939	816
32	5,01	947	824	1070	929
34	5,65	1070	930	1210	1050
36	6,34	1200	1040	1350	1180

* Čelična užad za izvozne uređaje u rudarstvu JUS C.H1.030/052/055/056 – 1980)

Čelična užad za vitla i slično (JUS C.H1.051 – 1968)

Spojke za čeličnu užad (JUS C.H1.300/301 – 1975)

Uške za čeličnu užad (JUS C.H1.306 – 1983)

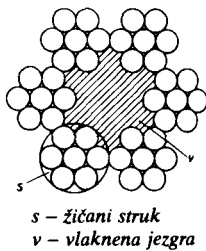
Stremenje (JUS C.H4.080 – 1975)

Čelična užad s jezgrom (dušom)

Užad s jezgrom ima 6 žičanih strukova (u izvedbi kao kod užeta bez jezgre, v. str. 443 do 445) sukanih oko vlaknene ili čelične jezgre.*

Sukanje žičanih strukova može biti desno (normalno) ili lijevo.

Prema tome da li je gornji sloj struka sukano desno ili lijevo može užde biti sukano križno (normalno) ili istosmjerno.



Uže 6 × 7 (JUS C.H1.070 – 1982)

Izvedba užeta: 6 strukova po 7 (1 + 6) žica, ovijenih oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta <i>d</i> mm	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Prekidna sila <i>F_r</i> – računska, <i>F_{min}</i> – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		<i>R_m</i> = 1570 N/mm ²		<i>R_m</i> = 1770 N/mm ²	
		<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN	<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN
2	0,014 3	–	–	2,61	2,35
3	0,032 2	–	–	5,88	5,29
4	0,057 2	–	–	10,5	9,41
5	0,089 4	–	–	16,3	14,7
6	0,129	–	–	23,5	21,1
7	0,175	–	–	32,0	28,8
8	0,229	37,1	33,4	41,8	37,6
9	0,289	46,9	42,2	52,9	47,6
10	0,357	58,0	52,2	65,3	58,8
11	0,432	70,1	63,1	79,1	71,1
12	0,515	83,4	75,1	94,1	84,7
13	0,604	97,9	88,1	110	99,4
14	0,701	114	102	128	115
16	0,915	148	134	167	151
18	1,16	188	169	212	191
20	1,43	232	209	261	235
22	1,73	280	252	316	285
24	2,06	334	300	376	339
26	2,42	392	353	442	397
28	2,80	454	409	512	461
32	3,66	593	534	669	602
36	4,63	751	676	847	762
40	5,72	927	835	1050	941

* Pri čeličnoj jezgri su duljinska masa i prekidna sila nešto veće.

*
Obično užde 8 × 7 (JUS C.H1.080 – 1982)

Uže 6 × 19 (JUS C.H1.072 – 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 19 (1 + 6 + 12) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta <i>d</i> mm	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Prekidna sila <i>F_r</i> – računska, <i>F_{min}</i> – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		<i>R_m</i> = 1570 N/mm ²		<i>R_m</i> = 1770 N/mm ²	
		<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN	<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN
3	0,031 1	–	–	5,69	4,90
4	0,055 4	–	–	10,1	8,70
5	0,086 5	–	–	15,8	13,6
6	0,125	–	–	22,8	19,6
7	0,170	–	–	31,0	26,7
8	0,221	35,9	30,9	40,5	34,8
9	0,280	45,4	39,1	51,2	44,1
10	0,346	56,1	48,2	63,3	54,4
11	0,419	67,9	58,4	76,5	65,8
12	0,498	80,8	69,5	91,1	78,3
13	0,585	94,8	81,5	107	91,9
14	0,678	110	94,6	124	107
16	0,886	144	124	162	139
18	1,12	182	156	205	176
20	1,38	224	193	253	218
22	1,67	272	234	306	263
24	1,99	323	278	364	313
26	2,34	379	326	428	368
28	2,71	440	378	496	426
32	3,54	575	494	648	557
36	4,48	727	625	820	705
40	5,54	898	722	1010	870
44	6,70	1090	934	1220	1050
48	7,97	1290	1110	1460	1250
52	9,36	1520	1300	1710	1470
56	10,9	1760	1510	1980	1710

*

Uže 6 × 19 – ispunjeno žicama (JUS C.H1.086 – 1982)

Uže 8 × 19 – ispunjeno žicama (JUS C.H1.088 – 1982)

Uže Warrington 6 × 19 (JUS C.H1.090 – 1982)

Uže Warrington 8 × 19 (JUS C.H1.096 – 1982)

Uže Seale 6 × 19 (JUS C.H1.100 – 1982)

Uže Seale 8 × 19 (JUS C.H1.104 – 1982)

Uže 6 × 37 (JUS C.H1.074 – 1982)

Uže se sastoji od 6 strukova po 37 (1 + 6 + 12 + 18) žica od kojih je oko središnje žice ovijeno u prvom sloju 6 žica, u drugom 12 žica, u trećem 18 žica, a strukovi su ovijeni oko vlaknaste jezgre.

Nazivni promjer užeta <i>d</i> mm	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Prekidna sila <i>F_r</i> – računska, <i>F_{min}</i> – najmanja			
		pri nazivnoj čvrstoći žica			
		<i>R_m</i> = 1570 N/mm ²		<i>R_m</i> = 1770 N/mm ²	
		<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN	<i>F_r</i> kN	<i>F_{min}</i> kN
6	0,125	–	–	22,8	18,8
7	0,170	–	–	31,0	25,6
8	0,221	35,9	29,6	40,5	33,4
9	0,280	45,4	37,5	51,2	42,3
10	0,346	56,1	46,3	63,3	52,2
11	0,419	67,9	56,0	76,5	63,1
12	0,498	80,8	66,6	91,1	75,1
13	0,585	94,8	78,2	107	88,2
14	0,678	110	90,7	124	102
16	0,886	144	118	162	134
18	1,12	182	150	205	169
20	1,38	224	185	253	209
22	1,67	272	224	306	253
24	1,99	323	267	364	301
26	2,34	379	313	428	353
28	2,71	440	363	496	409
32	3,54	575	474	648	534
36	4,48	727	600	820	676
40	5,54	898	741	1010	835
44	6,70	1090	896	1220	1010
48	7,97	1290	1070	1460	1200
52	9,36	1520	1250	1710	1410
56	10,9	1760	1450	1980	1640
60	12,5	2020	1670	2280	1880
64	14,2	2300	1900	2590	2140

*

Obično uže 8 × 37 (JUS C.H1.084 – 1982)

Uže Seale 6 × 37 (JUS C.H1.102 – 1982)

Uže 6 × 12 + 7 vlaknastih jezgri (JUS C.H1.076 – 1982)

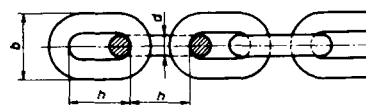
Uže 6 × 24 + 7 vlaknastih jezgri (JUS C.H1.078 – 1982)

Uže Warrington-Seale 6 × 31 (JUS C.H1.106 – 1982)

Uže Warrington-Seale 6 × 36 (JUS C.H1.108 – 1982)

Uže Warrington-Seale 8 × 36 (JUS C.H1.112 – 1982)

Čelični lanci



Lanci za opću upotrebu (JUS C.H4.020 – 1978)
(kalibrirani)

Nazivni promjer*	Korak	Širina članka <i>b</i> mm	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	dozvoljeno <i>F_{dop}</i> kN	Opterećenje ispitno**	
					LO, LC <i>F_{isp}</i> kN	LP <i>F_{isp}</i> kN
5***	18,5	17	0,500	–	–	–
6***	18,5	20	0,750	–	–	–
4	16	14	0,320	1,47	2,94	–
5	18,5	17	0,500	2,45	4,91	6,18
6	18,5	20	0,750	3,43	6,87	8,83
7	22	23	1,00	4,41	8,83	12,4
8	24	26	1,35	6,18	12,4	15,7
9	27	30	1,80	7,85	15,7	19,6
(9,5)	27	31	1,90	8,34	16,7	–
10	28	34	2,25	9,81	19,6	24,5
(11)	31	36	2,70	11,0	22,0	31,4
13	36	44	3,80	15,7	31,4	41,6
14	41	47	4,40	–	–	49,1
16	45	54	5,80	24,5	49,1	61,8
18	50	60	7,30	30,9	61,8	78,5
20	56	67	9,00	39,2	78,5	98,1
23	64	77	12,0	49,1	98,1	131
26	73	87	15,0	61,8	124	167
28	78	94	17,5	73,6	147	196
30	84	101	20,0	83,4	167	220
33	92	112	24,5	98,1	196	259
36	101	122	29,0	123	245	294
39	109	132	34,0	137	275	353
42	118	142	40,0	167	334	392
45	126	152	45,5	186	373	439
48	134	162	52,0	206	412	491
51	143	172	58,5	245	490	549
54	151	182	65,5	275	549	618
57	160	192	73,0	294	589	657
60	168	202	81,0	329	657	697

* Treba se kloniti nazivnih promjera u zagradama.

** LO-obični lanci, LC-cementirani lanci, LP-poboljšani lanci.

*** Samo za ručnu upotrebu.

Lanci za dizala (JUS C.H4.021 – 1978)
(kalibrirani)

Nazivni promjer <i>d</i> mm	Korak <i>h</i> mm	Širina članka <i>b</i> mm	Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m	Opterećenje	
				dozvoljeno <i>F_{dop}</i> kN	ispitno <i>F_{isp}</i> kN
13	36	42	3,80	15,7	31,4
16	45	52	5,80	24,5	49,1
18	50	58	7,30	30,9	61,8
20	56	65	9,00	39,2	78,5
23	64	74	12,0	49,1	98,1

Lanci za dizala (JUS C.H4.022/023/024 – 1978) kvalitetni razred: 5, 6, 8

Nazivni promjer* <i>d</i> mm	Korak* <i>h</i> mm	Širina članka		Duljinska masa <i>m_l</i> kg/m
		vanjska <i>b</i> maks. mm	unutarnja <i>b_n</i> min. mm	
4	12	13,7	5	0,35
5	15	16,9	6	0,54
(5)	(18,5)	16,9	6	0,50
6	18	20,2	7,2	0,78
(6)	(18,5)	20,2	7,2	0,77
7	21	23,6	8,4	1,07
(7)	(22)	23,6	8,4	1,05
8	24	27	9,6	1,40
9	27	30,4	10,8	1,75
10	28	34	12	2,25
11	31	37,4	13,2	2,70
13	36	44,2	15,6	3,80
14	41	47,6	16,8	4,40
16	45	54,4	19,2	5,75
18	50	63,0	21,6	7,30

* Dimenzije u zagradama treba izbjegavati.

*

Komadni lanci za opću upotrebu s kratkim člancima (JUS C.H4.025 – 1978).

Lanci za transportere s dugim člancima (JUS C.H4.030 – 1978).

Lanci za transportere sa srednje dugim člancima (JUS C.H4.031 – 1978).

ALUMINIJSKI POLUPROIZVODI

Mase poluproizvoda po jedinici duljine (kg/m) ili jedinici površine (kg/m²) izračunane su s obzirom na prosječnu gustoću aluminija od 2700 kg/m³.

Aluminijske šipke i žice

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane
(JUS C.C3.030/031/130/131 – 1963)

Promjer* mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Promjer* mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m		
vučeno al	sl			vučeno al	sl				
1	1	—	0,785	0,002 12	20	20	20	314,2	0,848
1,2	—	—	1,131	0,003 05	21	—	—	346,4	0,935
1,4	—	—	1,539	0,004 16	22	—	—	380,1	1,03
1,5	—	—	1,767	0,004 77	23	—	—	415,5	1,12
1,6	—	—	2,011	0,005 43	24	—	—	452,4	1,22
1,8	—	—	2,545	0,006 87	25	25	25	490,9	1,33
2,0	2	—	3,142	0,008 48	26	—	—	530,9	1,43
2,2	—	—	3,801	0,010 3	27	—	—	572,6	1,55
2,5	—	—	4,909	0,013 3	28	—	—	615,8	1,66
2,8	—	—	6,158	0,016 6	29	—	—	660,5	1,78
3,0	—	—	7,069	0,019 1	30	30	30	706,9	1,91
3,2	—	—	8,042	0,021 7	32	32	—	804,2	2,17
3,5	—	—	9,621	0,026 0	34	—	—	907,9	2,45
3,8	—	—	11,34	0,030 6	35	35	35	962,1	2,60
4,0	4	—	12,57	0,033 9	36	—	—	1 018	2,75
4,5	—	—	15,90	0,042 9	38	38	—	1 134	3,06
5,0	5	5	19,63	0,053 0	40	40	40	1 257	3,39
5,5	—	—	23,76	0,064 1	42	42	—	1 385	3,74
6,0	6	6	28,27	0,076 3	45	45	45	1 590	4,29
7,0	—	7	38,48	0,104	48	48	—	1 810	4,89
8,0	8	8	50,27	0,136	50	50	50	1 963	5,30
9,0	—	—	63,62	0,172	52	52	—	2 124	5,73
10	10	10	78,54	0,212	53	—	—	2 206	5,96
11	—	—	95,03	0,257	54	—	—	2 290	6,18
12	12	—	113,1	0,305	55	55	55	2 376	6,41
13	—	—	132,7	0,358	56	—	—	2 463	6,65
14	—	—	153,9	0,416	57	—	—	2 552	6,89
15	15	15	176,7	0,477	58	58	—	2 642	7,13
16	—	—	201,1	0,543	60	60	60	2 827	7,63
17	—	—	227,0	0,613	65	65	65	3 318	8,96
18	—	—	254,5	0,687	70	70	70	3 848	10,4
19	—	—	283,5	0,766	75	75	75	4 418	11,9

(Nastavak na str. 452)

* Vrijednosti »al« vrijede za poluproizvode od aluminija, a vrijednosti »sl« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Okrugle šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (nastavak).

Promjer* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Promjer* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno al	sl	prešano al, sl			vučeno al	sl	prešano al, sl		
80	80	80	5 027	13,6	—	170	22 698	61,3	
90	90	90	6 362	17,2	—	180	25 447	68,7	
95	—	—	7 088	19,1	—	190	28 353	76,6	
100	100	100	7 854	21,2	—	200	31 416	84,8	
—	110	110	9 503	25,7	—	210	34 636	93,5	
—	120	120	11 310	30,5	—	220	38 013	103	
—	—	130	13 273	35,8	—	230	41 548	112	
—	—	140	15 394	41,6	—	240	45 239	122	
—	—	150	17 672	47,7	—	250	49 087	133	
—	—	160	20 106	54,3	—	—	—	—	

* Vidi opasku na str. 451!

Kvadratne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.034/035/134/135 — 1963)

Debljina* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Debljina* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno al	sl	prešano al, sl			vučeno al	sl	prešano al, sl		
2	—	—	4	0,010 8	22	22	—	484	1,31
3	—	—	9	0,024 3	—	24	—	576	1,56
4	4	—	16	0,043 2	25	—	25	625	1,69
—	4,5	—	20,25	0,054 7	—	27	—	729	1,97
5	5	—	25	0,067 5	28	—	—	784	2,12
—	5,5	—	30,25	0,081 7	30	30	30	900	2,43
6	6	6	36	0,097 2	32	—	—	1 024	2,76
7	7	—	49	0,132	35	—	—	1 225	3,31
8	8	8	64	0,173	40	—	40	1 600	4,32
—	9	—	81	0,219	45	—	—	2 025	5,47
10	10	10	100	0,273	50	—	50	2 500	6,75
—	11	—	121	0,327	55	—	—	3 025	8,17
12	12	—	144	0,389	60	—	60	3 600	9,72
—	14	—	196	0,529	65	—	—	4 225	11,4
15	—	15	225	0,608	70	—	70	4 900	13,2
16	—	—	256	0,691	75	—	—	5 625	15,2
—	17	—	289	0,780	—	—	80	6 400	17,3
18	—	—	324	0,875	—	—	100	10 000	27,3
—	19	—	361	0,975	—	—	120	14 400	38,9
20	—	20	400	1,08	—	—	150	22 500	60,8

* Vidi opasku na str. 451!

Šesterokutne šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.036/037/136/137 — 1963)

Otvor ključa* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Otvor ključa* mm			Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno al	sl	preš. al, sl			vučeno al	sl	preš. al, sl		
3	3	—	7,794	0,021 0	25	—	25	541,3	1,46
3,5	3,5	—	10,61	0,028 6	27	27	—	631,3	1,70
4	4	—	13,86	0,037 4	28	—	—	678,9	1,83
4,5	4,5	—	17,54	0,047 3	30	30	30	779,4	2,10
5	5	—	21,65	0,058 5	32	32	—	886,8	2,39
5,5	5,5	—	26,20	0,070 7	33	—	—	943,0	2,55
6	6	6	31,18	0,084 2	35	—	—	1 060	2,86
7	7	—	42,44	0,115	36	36	—	1 122	3,03
8	8	8	55,43	0,150	38	—	—	1 250	3,38
9	9	—	70,15	0,189	—	—	40	1 384	3,74
10	10	10	86,60	0,234	41	41	—	1 456	3,93
11	11	—	104,8	0,283	42	—	—	1 527	4,12
12	12	—	124,7	0,337	45	—	—	1 753	4,73
13	—	—	146,4	0,394	46	46	—	1 833	4,95
14	14	—	169,7	0,458	50	50	50	2 165	5,85
—	—	15	194,8	0,526	55	—	—	2 620	7,07
17	17	—	250,3	0,676	60	—	60	3 118	8,42
18	—	—	280,6	0,750	—	—	70	4 243	11,46
19	19	—	312,6	0,844	—	—	80	5 542	14,96
20	—	20	346,0	0,934	—	—	100	8 660	23,42
22	22	—	419,2	1,13	—	—	120	12 470	36,70
24	24	—	498,8	1,35	—	—	150	19 481	52,60

* Vrijednosti »ak« vrijede za poluproizvode od aluminija, a vrijednosti »sk« za poluproizvode od aluminijskih slitina.

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijskih slitina, vučene ili prešane (JUS C.C3.200/201 — 1963)

Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno	prešano			vučeno	prešano		
5 × 2	—	10	0,027	6 × 4	—	24	0,065
5 × 3	—	15	0,041	6 × 5	—	30	0,081
5 × 4	—	20	0,054	8 × 2	—	16	0,043
6 × 2	—	12	0,032	8 × 3	—	24	0,065
6 × 3	—	18	0,049	8 × 4	—	32	0,086

(Nastavak na str. 454 i 455.)

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijevih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno	prešano			vučeno	prešano		
8 × 5	8 × 5	40	0,108	25 × 3	—	75	0,202
8 × 6	8 × 6	48	0,130	25 × 4	—	100	0,270
10 × 2	—	20	0,054	25 × 5	25 × 5	125	0,338
10 × 3	—	30	0,081	25 × 6	25 × 6	150	0,405
10 × 4	—	40	0,108	25 × 8	25 × 8	200	0,540
10 × 5	10 × 5	50	0,135	25 × 10	25 × 10	250	0,675
10 × 6	10 × 6	60	0,162	25 × 12	25 × 12	300	0,810
10 × 8	10 × 8	80	0,216	25 × 16	25 × 16	400	1,08
12 × 2	—	24	0,065	25 × 20	—	500	1,35
12 × 3	—	36	0,097	30 × 4	—	120	0,324
12 × 4	—	48	0,130	30 × 5	30 × 5	150	0,405
12 × 5	12 × 5	60	0,162	30 × 6	30 × 6	180	0,486
12 × 6	12 × 6	72	0,194	30 × 8	30 × 8	240	0,648
12 × 8	12 × 8	96	0,259	30 × 10	30 × 10	300	0,810
12 × 10	—	120	0,324	30 × 12	30 × 12	360	0,972
16 × 2	—	32	0,086	30 × 16	30 × 16	480	1,30
16 × 3	—	48	0,130	30 × 20	30 × 20	600	1,62
16 × 4	—	64	0,173	30 × 25	—	750	2,03
16 × 5	16 × 5	80	0,216	40 × 5	40 × 5	200	0,540
16 × 6	16 × 6	96	0,259	40 × 6	40 × 6	240	0,648
16 × 8	16 × 8	128	0,346	40 × 8	40 × 8	320	0,864
16 × 10	16 × 10	160	0,432	40 × 10	40 × 10	400	1,08
16 × 12	—	192	0,518	40 × 12	40 × 12	480	1,30
20 × 2	—	40	0,108	40 × 16	40 × 16	640	1,73
20 × 3	—	60	0,162	40 × 20	40 × 20	800	2,16
20 × 4	—	80	0,216	40 × 25	40 × 25	1000	2,70
20 × 5	20 × 5	100	0,270	40 × 30	—	1200	3,24
20 × 6	20 × 6	120	0,324	—	50 × 5	250	0,675
20 × 8	20 × 8	160	0,432	50 × 6	50 × 6	300	0,810
20 × 10	20 × 10	200	0,540	50 × 8	50 × 8	400	1,08
20 × 12	20 × 12	240	0,648	50 × 10	50 × 10	500	1,35
20 × 16	—	320	0,864	50 × 12	50 × 12	600	1,62
				50 × 16	50 × 16	800	2,16

Plosnate šipke i žice od aluminija i aluminijevih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Širina × debljina mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
vučeno	prešano			vučeno	prešano		
50 × 20	50 × 20	1000	2,70	—	125 × 10	1250	3,38
50 × 25	50 × 25	1250	3,38	—	125 × 12	1500	4,05
50 × 30	50 × 30	1500	4,05	125 × 16	125 × 16	2000	5,40
50 × 40	—	2000	5,40	125 × 20	125 × 20	2500	6,75
—	60 × 6	360	0,972	125 × 25	125 × 25	3125	8,44
60 × 8	60 × 8	480	1,30	125 × 30	125 × 30	3750	10,13
60 × 10	60 × 10	600	1,62	125 × 40	125 × 40	5000	13,50
60 × 12	60 × 12	720	1,94	—	125 × 50	6250	16,87
60 × 16	60 × 16	960	2,59	—	125 × 60	7500	20,25
60 × 20	60 × 20	1200	3,24	—	160 × 10	1600	4,32
60 × 25	60 × 25	1500	4,05	—	160 × 12	1920	5,18
60 × 30	60 × 30	1800	4,86	—	160 × 16	2560	6,91
60 × 40	60 × 40	2400	6,48	160 × 20	160 × 20	3200	8,64
—	80 × 8	640	1,73	160 × 25	160 × 25	4000	10,80
80 × 10	80 × 10	800	2,16	160 × 30	160 × 30	4800	12,96
80 × 12	80 × 12	960	2,59	160 × 40	160 × 40	6400	17,28
80 × 16	80 × 16	1280	3,45	—	160 × 50	8000	21,60
80 × 20	80 × 20	1600	4,32	—	160 × 60	9600	25,92
80 × 25	80 × 25	2000	5,40	—	180 × 10	1800	4,86
80 × 30	80 × 30	2400	6,48	—	180 × 12	2160	5,83
80 × 40	80 × 40	3200	8,64	—	180 × 16	2880	7,78
—	80 × 50	4000	10,80	—	180 × 20	3600	9,72
—	100 × 10	1000	2,70	—	180 × 25	4500	12,15
100 × 12	100 × 12	1200	3,24	—	180 × 30	5400	14,58
100 × 16	100 × 16	1600	4,32	—	180 × 40	7200	19,44
100 × 20	100 × 20	2000	5,40	—	200 × 10	2000	5,40
100 × 25	100 × 25	2500	6,75	—	200 × 12	2400	6,48
100 × 30	100 × 30	3000	8,10	—	200 × 16	3200	8,64
100 × 40	100 × 40	4000	10,80	—	200 × 20	4000	10,80
—	100 × 50	5000	13,50	—	200 × 25	5000	13,50
—	100 × 60	6000	16,20	—	200 × 30	6000	16,20
				—	200 × 40	8000	21,60

Aluminijski profili

Jednakokrakni kutni profili od aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.202 — 1963)

Duljina krakova mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Duljina krakova mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
10	1	19,2	0,051 8	40	2	156,8	0,423
10	1,5	28,2	0,076 1	40	4	307,0	0,828
10	2	36,8	0,099 3	50	4	387	1,045
12	1	23,2	0,062 6	50	5	480	1,296
12	1,2	27,6	0,074 5	60	5	580	1,565
15	1,5	43,2	0,116 5	60	6	691	1,86
15	2	56,8	0,153 2	80	6	931	2,51
15	2,5	70,0	0,189	80	8	1 229	3,32
20	2	76,8	0,207	100	8	1 549	4,18
20	2,5	95,0	0,256	100	10	1 920	5,18
20	3	112,8	0,304	125	10	2 420	6,53
25	2	96,8	0,261	125	12	2 885	7,78
25	2,5	120,0	0,324	140	12	3 245	8,76
30	3	172,8	0,466	140	14	3 763	10,15
30	4	227,0	0,612	160	12	3 725	10,06
				160	16	4 915	13,27

Profili T od aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.204 — 1963)

Širina noge mm	Visina mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Širina noge mm	Visina mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
20	20	1,6	62,6	0,169	30	30	3	175	0,472
20	20	2	78	0,212	30	45	3	220	0,594
20	30	2	98	0,264	30	45	4	291	0,785
20	30	3	145	0,391	40	25	2,5	159	0,429
25	16	1,6	64	0,173	40	25	3	190	0,513
25	16	2	80	0,216	40	40	3	235	0,634
25	25	2	98	0,264	40	40	4	311	0,839
25	25	2,5	121	0,328	50	50	3	295	0,796
30	30	2	118	0,318	50	50	4	391	1,055
30	30	2,5	146	0,394	50	50	5	485	1,310

Profili T od aluminijskih slitina, prešani (nastavak)

Širina noge mm	Visina mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Širina noge mm	Visina mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
60	40	4	391	1,055	125	80	10	1 991	5,38
60	40	5	485	1,310	125	125	10	2 441	6,59
60	60	5	585	1,58	125	125	12	2 915	7,87
60	60	6	699	1,87	140	90	10	2 241	6,05
80	50	5	635	1,71	140	90	12	2 675	7,22
80	50	6	759	2,05	140	140	12	3 275	8,84
80	80	6	939	2,53	140	140	14	3 804	10,27
80	80	8	1 242	3,35	160	100	12	3 035	8,19
100	100	8	1 562	4,23	160	100	14	3 524	9,52
100	100	10	1 941	5,24	160	160	14	4 364	11,77
125	80	8	1 602	4,33	160	160	16	4 969	13,41

Profili C od aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.203 — 1963)

Visina mm	Širina noge mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Visina mm	Širina noge mm	Debljina* mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
25	16	1,6	87,1	0,235	80	50	4	693	1,87
32	16	2	122	0,329	80	50	5	860	2,32
32	20	2	138	0,372	100	50	5	960	2,59
40	20	2	154	0,416	100	50	6	1 143	3,08
40	25	2,5	215	0,581	125	80	6	1 653	4,47
40	30	3	286	0,772	125	80	8	2 178	5,88
40	40	4	455	1,228	140	90	8	2 458	6,64
50	25	2,5	240	0,648	140	90	10	3 041	8,21
50	30	3	316	0,853	160	80	8	2 458	6,64
50	40	4	495	1,335	160	80	10	3 041	8,21
60	30	4	455	1,228	160	100	8	2 778	7,50
60	30	5	560	1,51	160	100	10	3 441	9,30
60	40	4	535	1,44	200	100	12(10)	4 219	11,39
60	40	5	660	1,78	200	125	16(12)	6 121	16,53
80	40	4	615	1,66	250	100	16(12)	5 921	15,99
80	40	5	760	2,05	250	125	16(12)	6 721	18,15

* Vrijednosti u zagradama vrijede za debljinu noge.



Profili I od aluminija i aluminijskih slitina, prešani
(JUS C.C3.205 — 1963)

Visina mm	Širina noge mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Visina mm	Širina noge mm	Debljina mm	Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m
25	16	1,6	88,2	0,238	125	80	8	2 205	5,95
25	25	1,6	117	0,316	125	125	6	2 208	5,96
30	20	2	135	0,364	125	125	8	2 925	7,90
30	30	2	175	0,473	140	90	8	2 485	6,72
40	25	2,5	218	0,588	140	90	10	3 083	8,33
40	40	4	461	1,245	140	140	8	3 285	8,86
50	30	3	319	0,861	140	140	10	4 083	11,02
50	50	3	439	1,185	160	100	8	2 805	7,57
50	50	5	721	1,947	160	100	10	3 483	9,42
60	40	4	541	1,46	160	160	8	3 765	10,17
60	50	4	621	1,68	160	160	10	4 683	12,64
60	60	5	871	2,35	200	125	10	4 383	11,85
80	50	4	701	1,89	200	125	12	5 231	14,12
80	50	5	871	2,35	200	200	10	5 883	15,90
80	80	4	941	2,54	200	200	12	7 031	18,98
80	80	5	1 171	3,16	250	160	12	6 671	18,01
100	100	5	1 471	3,97	250	160	16	8 820	23,80
100	100	6	1 758	4,74	250	250	12	8 831	23,84
125	80	6	1 668	4,50	250	250	16	11 700	31,60

Toplo valjani lim od aluminija i aluminijskih slitina
(JUS C.C4.019 — 1963)

Debljina mm	Širina mm	Plošt. masa kg/m ²	Debljina mm	Širina mm	Plošt. masa kg/m ²
4	do 2 500	10,8	15	do 3 000	40,5
5	do 2 500	13,5	20	do 3 000	54,0
6	do 3 000	16,2	25	do 1 000	67,5
8	do 3 000	21,6	30	do 1 000	81,0
10	do 3 000	27,0	40	do 1 000	108
12	do 3 000	32,4			

Duljine: do 10 000 mm.

*

Hladno valjane trake od aluminija i aluminijskih slitina (JUS C.C4.051/151 — 1963).
Hladno valjani lim od aluminija i aluminijskih slitina (JUS C.C4.050/150 — 1963).

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(JUS C.C5.030/031/130/131 — 1966)

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m		
	vučeno al sl	prešano al, sl				vučeno al sl	prešano al, sl				
4	0,5	0,5	—	5,49	20	0,5	—	30,63	0,083		
	0,8	0,8	—	8,04		0,8	0,8	—	48,26	0,130	
	1	—	—	9,42		1	1	—	59,69	0,161	
5	0,5	0,5	—	7,07	25	1,2	1,2	—	70,87	0,191	
	0,8	0,8	—	10,55		1,6	1,6	—	92,49	0,250	
	1	1	—	12,57		2	2	—	113,1	0,305	
8	0,5	0,5	—	11,78	32	2,5	2,5	—	137,4	0,371	
	0,8	0,8	—	18,10		3	3	—	160,2	0,433	
	1	1	—	22,01		0,5	—	—	38,49	0,104	
10	1,2	1,2	—	25,64	16	0,8	0,8	—	60,82	0,164	
	1,6	1,6	—	32,17		1	1	—	74,40	0,204	
	0,5	—	—	14,92		1,2	1,2	1,2	89,72	0,242	
12	0,8	0,8	—	23,12	16	1,6	1,6	1,6	117,6	0,318	
	1	1	—	28,27		2	2	2	144,5	0,390	
	1,2	1,2	—	33,18		2,5	2,5	2,5	176,7	0,477	
16	1,6	1,6	—	42,22	16	3	3	3	207,4	0,560	
	2	2	—	50,27		0,8	0,8	—	78,41	0,212	
	0,5	—	—	18,06		1	1	—	97,39	0,263	
20	0,8	0,8	—	28,15	16	1,2	1,2	1,2	116,1	0,314	
	1	1	—	34,46		1,6	1,6	1,6	152,8	0,413	
	1,2	1,2	—	40,72		2	2	2	188,5	0,509	
25	1,6	1,6	—	52,28	16	2,5	2,5	2,5	231,7	0,626	
	2	2	—	62,83		3	3	3	273,3	0,738	
	0,5	—	—	24,35		4	4	4	351,9	0,950	
30	0,8	0,8	—	38,20	16	—	5	5	424,1	1,15	
	1	1	—	47,12		—	6	6	490,1	1,32	
	1,2	1,2	—	55,80		—	8	8	603,2	1,63	
40	1,6	1,6	—	72,38	16	—	—	—	—	—	
	2	2	—	87,97		—	—	—	—	—	—
	2,5	2,5	—	106,0		—	—	—	—	—	—

(Nastavak — str. 460 i 461.)

* Uzeti su u obzir samo promjeri standardnih brojeva osnovnog reda R 10.
** Vrijednosti »ak« vrijede za cijevi od aluminija, a vrijednosti »sl« za cijevi od aluminijskih slitina.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	
	vučeno al sl	preš. al sl				vučeno al sl	preš. al sl			
40	0,8	—	98,68	0,266	63	—	6	1074	2,90	
	1	1	122,7	0,331		—	8	1382	3,73	
	1,2	1,2	146,3	0,395		—	10	1665	4,50	
	1,6	1,6	193,0	0,521	80	1,6	1,6	394,1	1,06	
	2	2	238,9	0,645		2	2	490,1	1,31	
	2,5	2,5	294,7	0,795		2,5	2,5	608,8	1,64	
	3	3	348,9	0,942		3	3	727,7	1,96	
	4	4	452,6	1,22		4	4	955,1	2,58	
	5	5	549,6	1,48		5	5	1178	3,18	
	—	6	640,9	1,73		6	6	1385	3,74	
	—	8	804,3	2,17		8	8	1810	4,89	
	—	—	—	—		—	10	10	2199	5,94
	50	1	1	153,9		0,416	100	2	2	615,8
		1,2	1,2	183,9	0,497	2,5		2,5	765,8	2,07
1,6		1,6	243,3	0,657	3	3		914,2	2,47	
2		2	301,6	0,814	4	4		1206	3,26	
2,5		2,5	373,1	1,01	5	5		1492	4,03	
3		3	444,0	1,20	6	6		1772	4,78	
4		4	578,1	1,56	8	8		2312	6,24	
5		5	706,9	1,91	10	10		2827	7,63	
—		6	829,4	2,24	—	—		—	—	
—		8	1055	2,85	—	—		—	—	
63	1,2	1,2	233,0	0,629	125	3	3	1150	3,11	
	1,6	1,6	308,6	0,833		4	4	1521	4,11	
	2	2	383,3	1,04		5	5	1885	5,09	
	2,5	2,5	475,2	1,28		6	6	2243	6,06	
	3	3	565,5	1,53		8	8	2941	7,94	
	4	4	741,2	2,00		10	10	3613	9,76	
	5	5	911,1	2,46		12	12	4260	11,5	

* ** Vidi primjedbe na str. 459.

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, vučene i prešane
(nastavak)

Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m	Vanj.prom.* (R 10) mm	Debljina stijenke** mm		Presjek mm ²	Dulj. masa kg/m		
	vučeno al sl	preš. al, sl				vučeno al sl	preš. al, sl				
160	3	—	1480	4,00	200	6	—	6 6	3657	9,87	
	4	—	1960	5,29		8	—	8 8	4824	13,0	
	5	—	2425	6,55		10	—	10 10	5969	16,1	
	6	—	2903	7,84		12	—	12 —	7087	19,1	
	8	—	3820	10,3		250	5	—	5 5	3849	10,4
	10	—	4712	12,7			6	—	6 6	4599	12,4
12	—	5580	15,1	8	—		8 8	6082	16,4		
—	—	—	—	10	—		10 10	7540	20,4		
200	4	—	2463	6,65	12	—	12 —	8972	24,2		
	5	—	3063	8,27	—	—	—	—	—	—	

* ** Vidi primjedbe na str. 459!

*

Okrugle cijevi od aluminija i aluminijskih slitina, koje imaju promjere standardnih brojeva osnovnih redova R 20 i R 40

Vanjski promjer mm	Debljine stijenke mm					
	R 20	R 40	vučene		prešane	
			aluminij	alum. slitine	aluminij	alum. slitine
14	6	30	0,5 ... 1,2	0,5 ... 1,2	—	—
18			0,5 ... 2	0,8 ... 2	—	—
22			0,5 ... 2,5	0,8 ... 2,5	—	—
28			0,5 ... 3	0,8 ... 3	—	—
36	38	45	0,5 ... 3	0,8 ... 3	1,2 ... 3	1,2 ... 3
45			0,8 ... 4	0,8 ... 6	1,2 ... 6	1,2 ... 6
56			0,8 ... 4	0,8 ... 8	1,6 ... 8	1,6 ... 8
70			0,8 ... 4	0,8 ... 8	2 ... 8	2 ... 8
90	45	56	1 ... 5	—	2,5 ... 8	2,5 ... 8
110			1,2 ... 5	1,2 ... 8	3 ... 8	3 ... 8
140			1,6 ... 6	1,6 ... 8	4 ... 8	5 ... 8
180			2 ... 8	2 ... 8	5 ... 8	5 ... 8
220	56	70	3 ... 10	—	5 ... 12	5 ... 10
—			3 ... 12	—	4 ... 12	4 ... 10
—			4 ... 12	—	4 ... 12	4 ... 10
—			5 ... 12	—	5 ... 12	5 ... 10

POLUPROIZVODI OD BAKRA I BAKRENIH SLITINA

Bakrene šipke, lim i žica

Okrugle šipke, vučene (JUS C.D3.520 – 1982)

Promjer mm	Dulj. masa kg/m	Promjer mm	Dulj. masa kg/m	Promjer mm	Dulj. masa kg/m
0,5	0,00175	4,5	0,141	22	3,38
0,6	0,00252	5	0,175	25	4,37
0,8	0,00447	5,5	0,211	28	5,48
1,0	0,00699	6	0,252	32	7,16
1,2	0,0101	6,5	0,295	36	9,06
1,4	0,0137	7	0,342	40	11,2
1,6	0,0175	8	0,447	45	14,1
1,8	0,0226	9	0,566	50	17,5
2,0	0,0279	10	0,699	56	21,9
2,2	0,0338	11	0,846	60	25,2
2,5	0,0437	12	1,01	63	27,7
2,8	0,0548	14	1,37	70	34,2
3	0,0629	16	1,79	75	39,3
3,5	0,0856	18	2,26	80	44,7
4	0,112	20	2,79		

Kvadratne šipke, vučene (JUS C.D3.525 – 1972) debljina: 2... 60 mm

Šesterokutne šipke, vučene (JUS C.D3.527 – 1972)

otvor ključa: 3... 60 mm

Plosnate šipke, vučene (JUS C.D3.523 – 1982)

debljina: 2... 40 mm, širina: 4... 200 mm

Limovi, hladno valjani (JUS C.D4.520 – 1972)

Debljina mm	Plošt. masa kg/m ²	Debljina mm	Plošt. masa kg/m ²	Debljina mm	Plošt. masa kg/m ²
0,20	1,89	0,70	5,91	2,0	16,9
0,25	2,11	0,80	6,75	2,5	21,1
0,30	2,53	0,90	7,60	3,0	25,4
0,35	2,96	1,0	8,45	3,5	29,6
0,40	3,38	1,1	9,30	4,0	34,8
0,45	3,80	1,2	10,1	4,5	38,0
0,50	4,23	1,5	12,7	5,0	42,3
0,60	5,06	1,8	15,2		

Širina: 1000 mm, duljina: 20000 mm.

Tanki limovi, hladno valjani (JUS C.D4.521 – 1972)

Žica, vučena (JUS C.D6.520 – 1972)

Debljina mm	Dulj. masa kg/km	Debljina mm	Dulj. masa kg/km	Debljina mm	Dulj. masa kg/km
Okrugla žica					
0,02	0,0028	0,45	1,42	3,5	85,6
0,05	0,0175	0,50	1,75	4,0	112
0,06	0,0251	0,56	2,19	4,5	142
0,07	0,0342	0,60	2,52	5,0	175
0,08	0,0447	0,70	3,42	5,5	211
0,09	0,0566	0,80	4,47	6,0	252
0,10	0,0689	0,90	5,66	6,5	295
0,12	0,101	1,0	6,99	7,0	342
0,14	0,137	1,2	10,1	8	447
0,16	0,179	1,4	13,7	9	566
0,18	0,226	1,6	17,9	10	699
0,20	0,280	1,8	22,6	11	846
0,22	0,330	2,0	28,0	12	1010
0,25	0,437	2,2	33,8	14	1370
0,28	0,548	2,5	43,7	16	1790
0,30	0,629	2,8	54,8	18	2265
0,36	0,906	3,0	62,9		
0,40	1,12	3,2	71,6		
Kvadratna žica					
3,0	80,1	6	320	12	1282
3,5	109	7	436	13	1504
4,0	142	8	570	14	1744
4,5	180	9	721	16	2278
5,0	222	10	890	17	2572
5,5	269	11	1077		
Šesterokutna žica					
3,0	69,4	6	277	12	1120
3,5	94,4	7	378	13	1303
4,0	123	8	493	14	1510
4,5	156	9	624	17	2238
5,0	193	10	771		
5,5	233	11	933		

Bakrena užad (za električne vodiče)

Konstrukcija užeta	Vanjski promjer užeta	Ukupni presjek žica	Dulj. masa	Omski otpor (20 °C)
broj žica × promjer žice mm	mm	mm ²	kg/km	Ω/km
7 × 1,70	5,10	16	143	1,11
7 × 2,10	6,30	25	222	0,715
7 × 2,5	7,50	35	311	0,51
7 × 3,0	9,00	50	443	0,36
19 × 2,1	10,50	70	620	0,26
19 × 2,5	12,50	95	844	0,19
19 × 2,8	14,00	120	1064	0,15
(19 + 18) × 2,25	16,50	150	1340	0,12

Bakrene cijevi, vučene
(JUS C.D5.500 — 1972, 501 — 1973)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)*						
	pri debljini stijenke (mm)						
	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
4	0,05	0,07	0,08	—	—	—	—
5	0,06	0,09	0,11	—	—	—	—
6	0,08	0,11	0,14	—	—	—	—
7	0,09	0,13	0,17	—	—	—	—
8	0,10	0,15	0,20	0,27	—	—	—
9	0,12	0,17	0,22	0,31	—	—	—
10	0,13	0,19	0,25	0,36	0,45	—	—
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	—	—
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	—	—
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	—
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	—
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	1,08	1,26
20	—	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43
22	—	—	0,59	0,86	1,12	1,36	1,59
24	—	—	0,64	—	1,23	—	—
25	—	—	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85
28	—	—	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10
30	—	—	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26
32	—	—	0,87	1,28	1,68	—	—
35	—	—	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68
38	—	—	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94
40	—	—	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10
42	—	—	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27
44,5	—	—	—	—	—	2,94	3,48
45	—	—	—	1,82	2,40	2,97	3,52
48	—	—	—	1,95	2,57	—	3,77
50	—	—	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94

* Vidi primjedbu na str. 465!

Bakrene cijevi, vučene (nastavak)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)*					
	pri debljini stijenke (mm)					
	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
54	2,20	2,91	—	—	—	—
55	—	—	3,67	—	—	—
56	—	—	—	4,45	—	—
57	—	—	3,81	4,53	5,93	7,27
58	—	—	—	—	6,04	7,41
60	—	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	2,62	3,47	—	—	—	—
65	—	—	4,37	—	—	—
66	—	—	—	5,28	—	—
70	—	3,80	4,72	—	—	9,09
74	—	4,03	—	—	—	—
75	—	—	5,07	—	—	—
76	—	—	5,14	6,12	8,05	9,93
80	—	—	5,42	—	8,50	10,5
84	—	4,59	—	—	—	—
85	—	4,64	5,77	—	—	—
86	—	—	—	6,96	—	—
89	—	—	6,05	7,21	9,51	11,7
100	—	5,48	—	8,14	—	—
105	—	—	7,16	—	—	—
106	—	—	—	8,64	—	—
108	—	—	—	8,81	11,6	14,4
114	—	—	—	9,31	12,3	—
120	—	—	8,21	—	—	16,1
130	—	—	—	—	—	17,5
133	—	—	—	10,9	14,4	—
150	—	—	—	—	—	20,3
159	—	—	—	—	17,3	21,5
170	—	—	—	—	18,6	23,1
190	—	—	—	—	—	25,9
194	—	—	—	—	21,2	—
200	—	—	—	—	—	27,3
219	—	—	—	—	24,0	—
267	—	—	—	—	29,4	—
273	—	—	—	—	30,1	—
324	—	—	—	—	35,8	—
368	—	—	—	—	40,7	—
419	—	—	—	—	46,4	—

* Standardizirane su one cijevi, za koje je u tablici navedena duljinska masa.

Cijevi od bakrenih slitina, vučene
(JUS C.D5.520 — 1972, 522 — 1973)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)*								
	pri debljini stijenke (mm)								
	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
4	0,05	0,07	0,08	—	—	—	—	—	—
5	0,06	0,09	0,11	—	—	—	—	—	—
6	0,08	0,11	0,14	—	—	—	—	—	—
7	—	—	0,17	—	—	—	—	—	—
8	0,10	0,15	0,20	0,27	0,34	—	—	—	—
9	—	—	0,22	—	—	—	—	—	—
10	0,13	0,19	0,25	0,36	0,45	0,52	0,59	—	—
12	0,16	0,24	0,31	0,44	0,56	0,66	0,75	0,89	—
14	0,19	0,28	0,36	0,52	0,67	0,80	0,92	1,12	—
15	0,20	0,30	0,39	0,57	0,73	0,87	1,01	1,23	—
16	0,22	0,32	0,42	0,61	0,78	0,94	1,09	1,34	—
18	0,24	0,36	0,48	0,69	0,89	—	1,26	1,57	1,82
20	0,27	0,40	0,53	0,78	1,01	1,22	1,43	1,79	2,10
22	—	0,45	0,59	0,86	1,12	—	1,59	2,01	2,38
25	—	0,51	0,67	0,99	1,29	1,57	1,85	2,35	2,80
28	—	—	0,75	1,11	1,45	1,78	2,10	2,68	3,22
30	—	—	0,81	1,20	1,57	1,92	2,26	2,91	3,50
32	—	—	0,87	1,28	1,68	—	—	—	—
35	—	—	0,95	1,40	1,85	2,27	2,68	3,47	4,19
38	—	—	1,03	1,53	2,01	2,48	2,94	3,80	4,61
40	—	—	1,09	1,61	2,12	2,62	3,10	4,03	4,89
42	—	—	1,15	1,70	2,24	2,76	3,27	—	—
44,5	—	—	—	1,80	2,38	2,94	3,48	—	—
45	—	—	—	1,82	2,40	2,97	3,52	—	—
48	—	—	—	1,95	2,57	—	—	4,92	—
50	—	—	1,37	2,03	2,68	3,32	3,94	5,14	6,29
55	—	—	—	—	—	3,67	4,36	—	6,99
56	—	—	—	—	—	—	4,45	—	—
57	—	—	—	2,33	3,08	3,81	4,53	—	—
58	—	—	—	—	—	—	—	6,04	—
60	—	—	—	2,45	3,24	4,02	4,78	6,26	7,69
64	—	—	—	—	3,47	—	—	—	—
65	—	—	—	—	—	4,37	—	—	—
66	—	—	—	—	—	—	5,28	—	—
70	—	—	—	2,87	3,80	4,72	5,62	7,38	9,09

* Vidi primjedbu na str. 467!

Cijevi od bakrenih slitina, vučene (nastavak)

Vanjski promjer mm	Duljinska masa cijevi (kg/m)*					
	pri debljini stijenke (mm)					
	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0
75	—	5,07	—	—	—	—
76	4,14	5,14	6,12	—	—	—
80	—	5,42	6,46	8,50	10,5	—
85	4,64	5,77	—	—	11,2	—
86	—	—	6,96	—	—	—
89	4,87	6,05	7,21	—	—	—
100	5,48	—	8,14	10,7	13,3	—
104	5,70	—	—	—	—	—
105	—	7,16	—	—	—	—
106	—	—	8,64	—	—	—
108	—	7,37	8,81	11,6	—	—
114	—	7,79	9,31	—	—	—
120	—	8,21	—	—	16,1	—
125	—	8,56	—	13,5	16,8	—
130	—	—	—	—	17,5	—
133	—	9,12	10,9	14,4	17,9	—
150	—	—	—	—	20,3	—
159	—	10,9	13,1	17,3	21,5	—
160	—	—	—	17,5	—	—
168	—	11,6	13,8	18,3	—	—
170	—	—	—	—	23,1	—
190	—	—	—	—	25,9	—
194	—	13,4	16,0	—	—	—
200	—	—	—	21,9	27,3	—
219	—	—	18,1	24,0	29,9	—
267	—	—	22,1	29,4	36,6	—
273	—	—	22,6	30,1	37,5	—
324	—	—	—	35,8	44,6	53,3
368	—	—	—	40,7	50,7	60,7
419	—	—	—	46,4	57,9	69,3

* Standardizirane su one cijevi za koje je u tablici navedena duljinska masa. – Masa je proračunana za gustoću od 8900 kg/m³. Pri gustoći slitine ρ kg/m³ valja vrijednosti tablice pomnožiti s faktorom $\rho/8900$.

Cijevi za kondenzatore i izmjenjivače topline – JUS C.D5.521 – 1981.

POLUPROIZVODI OD MJEDI, CINKA I OLOVA

Mjedeni poluproizvodi

Mjedne šipke, istiskane

- Okrugle šipke (JUS C.D3.522 – 1982)
- Plosnate šipke (JUS C.D3.524 – 1956)
- Kvadratne šipke (JUS C.D3.526 – 1956)
- Šesterokutne šipke (JUS C.D3.528 – 1956)

Mjedeni kutni profili

- jednakokrani*, prešani (JUS C.D3.529 – 1956)
duljine krakova 10 × 10... 60 × 60 mm
- raznokračni*, prešani (JUS C.D3.530/531 – 1956)
duljine krakova 10 × 20... 25 × 50, 15 × 20... 30 × 45 mm

Mjedena žica (okrugla)

- prešana* (JUS C.D6.521 – 1956), promjeri 5... 15 mm

Cinčani poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od cinka računamo s gustoćom od 7180 kg/m³.

Cinčani lim (JUS C.E4.020 – 1970)

- debljina lima 0,2... 6 mm
- veličina ploče 1000 × 2000 (3000) mm

Olovni poluproizvodi

Pri određivanju mase poluproizvoda od olova računamo s gustoćom od 11400 kg/m³.

Olovni lim (JUS C.E4.030 – 1963)

- debljina lima 1... 4 mm
- širina 1000 mm
- duljina do 10000 mm

Olovne cijevi

- *dovodne cijevi* (JUS C.E4.040 – 1963)
unutarnji promjeri 10... 26 mm
debljina stijenki 2,0... 7 mm
- *odvodne cijevi* (JUS C.E4.041 – 1963)
unutarnji promjeri 30... 125 mm
debljina stijenki 2,0... 2,5 mm

Olovna žica (JUS C.E6.050 – 1965)

- promjeri 2... 20 mm

NEKOVINSKI MATERIJALI

ANORGANSKI NEKOVINSKI MATERIJALI

Staklo

Staklo se sastoji od natrijskih i kalcijevih (te kalijevih i bornih) silikata. Posebna mu svojstva daju dodaci oksida nekih kovina (Pb, Mg, Al, Zn, Te).

Staklo je amorfno (nema kristalne strukture) i zato bez određenog tališta prelazi iz tekućeg u kruto stanje. Pri temperaturi 1300 do 1500 °C može biti tekuća talina (lijevanje!), pri temperaturi 1000 °C je gusta tekućina prikladna za preradu (puhanjem, vučenjem, valjanjem, prešanjem). Temperatura smekšavanja (prelaza u krutinu) je oko 500 °C. Kremično staklo – SiO₂ – smekšava se pri 1200 °C.)

Pri temperaturi okoliša je staklo u amorfnom stanju pothlađene tekućine. Njegova je tlačna čvrstoća 400... 1300 N/mm², vlačna čvrstoća iznosi 30... 90 N/mm².

Najznačajnija su svojstva stakla: propustivost za svjetlo (85... 90%), kemijska otpornost na zrak, vodu i kiseline (osim fluorovodične HF) i neprovodnost za električnu struju.

Upotreba: natrijsko staklo – za armature manjih zahtjeva; borno – za aparate s većim zahtjevima; kremično – za dijelove kod viših temperatura.

Brzim ohlađivanjem vruće staklene ploče javljaju se na površini tlačna naprezanja koje povećavaju čvrstoću na savijanje. Takvo se staklo pri lomu raspada na prašinu. Staklene ploče, s obih strana obljepljene folijom od prozirne plastike, upotrebljava se kao sigurnosno staklo (npr. za automobile).

Beton

Cementni beton je umjetni kamen od cementa, betonskih dodataka (pijeska i šljunka) i vode, a nastaje skrućivanjem cementnog veziva (mješavine cementa s vodom).

Portland cement se sastoji od 1 dijela SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ i najmanje 1,7 dijela CaO.

Volumenski omjer mješavine cement : pijesak	Tlačna čvrstoća betona* N/mm ²	Volumenski omjer mješavine cement : pijesak : šljunak	Tlačna čvrstoća betona* N/mm ²
1 : 4	22... 30	1 : 2 : 3	22... 25
1 : 5	18... 22	1 : 3 : 5	13... 18
1 : 8	9... 12	1 : 4 : 6	10... 12

* Nakon 28 dana.

Zbog male vlačne čvrstoće (u odnosu na tlačnu) ojačavaju se vlačna područja u betonu čeličnim ulošcima (armirani beton). Ako su čelični ulošci prednapregnuti, izazivaju u neopterećenom stanju u betonu tlačna naprezanja radi kojih je moguće, da se pri opterećenju uopće ne pojavljuju vlačna naprezanja (prednapregnuti beton).

Pjenasti beton

Normalni (teški) beton gustoće 2200...2600 kg/m³ provodi toplinu razmjerno dobro. Lakim dodacima (npr. mljevenom drvenom piljevinom, drvenom vunom i sl.) te odgovarajućom obradom stvaraju se u betonu pore (zrak) koje veoma snižuju njegovu gustoću (na 300...500 kg/m³) pa mu zbog velikog smanjenja tlačne čvrstoće smanjuju nosivost, ali mu veoma povećavaju izolacijsku sposobnost.

Polimerni beton

Polimarni beton je umjetni kamen pri kojemu umjesto cementa upotrebljavamo kao vezivo razna ljepljiva na bazi plastike (MMA, UP).

Polimerni beton (s 5...15% veziva) postizava nakon jednog dana sljedeća mehanička svojstva:

tlačnu čvrstoću 70...150 N/mm², modul elastičnosti 15000...30000 N/m², čvrstoću na savijanje 20...40 N/mm², temper. rastezljiv. (15...20) 10⁻⁶ K⁻¹.

Upotrebljava se za temelje strojeva i konstrukcija, mjerne ploče. I polimerni beton može biti pjenast.

Keramički materijali

Keramičke tvari sadrže većinom okside. Svi čisti oksidi su kemijski vrlo postojani i imaju visoka tališta:

Al₂O₃: 2046 °C BeO: 2530 °C
SiO₂: 1702 °C ZrO₂: 2700 °C

Sinterovani korund Al₂O₃ odlikuje se velikom tvrdoćom 3800 HV 30 i velikom tlačnom čvrstoćom. (Dodatkom Cr₂O₃ čistom Al₂O₃ nastaje sinterovani rubin tvrdoće 4000 HV 30.)

Sinterovani korund upotrebljava se za izradu dijelova koji moraju biti posebno otporni na habanje (matrice za vučenje žice, dijelovi tekstilnih strojeva) i postojani u visokoj temperaturi (svječiice motora s unut. sagor. i sl.).

Tvrdoća, koja se ni pri visokim temperaturama (do 1200°) bitno ne smanjuje te mala toplinska provodnost su svojstva sinterovanoga korunda koja su naročito značajna za izradu alata za rezanje (tokarenje, glodanje) i brušenje.

Sastavljeni keramički materijal Al₂O₃ · SiO₂ je veoma otporan na habanje (upotreba npr. pri dodirnim ploham mjerila). Materijal MgO · Al₂O₃ · SiO₂ (kao i MgO · SiO₂) vrlo je otporan na temperaturne promjene.

Od kvalitetne gline koja – osim Al₂O₃ – sadrži i SiO₂ te alkalne okside (kao i posebne dodatke) izrađen keramički materijal (kamenština) ima vlačnu čvrstoću 6,5...13 N/mm², tlačnu čvrstoću 320...350 N/mm². Zbog velike otpornosti prema kiselinama upotrebljava se u kemijskoj industriji za aparate i strojne dijelove (za pumpe, ventilatore, mješalice i sl.).

Opeka

Opeka je pri temperaturi 900...1300°C pečena glina (prven. Al₂O₃).

Tlačna čvrstoća opeka iznosi (po kvaliteti) 10...25(...35) N/mm².

Normalni je format opeke: 240 × 115 × 71 mm.

Vatrootalni keramički materijali

Talište mora biti najmanje 1580°C. Za kvalitetu su odlučni još: temperatura na kojoj se materijal pod tlakom smeškava; propustljivost za plinove; otpornost prema temperaturnim promjenama i prema kemijskim utjecajima.

Vatrootalne keramičke materijale dijelimo na:

a) *kisele* — glavna sastavina: kremen (SiO₂),

b) *bazične* — glavna sastavina: dolomitna (CaO · MgO) ili magnezitna (MgO),

c) *neutralne* — glavna sastavina: glina, kaolin (Al₂O₃ · 2SiO₂), glinica (Al₂O₃), kromit (Cr₂O₃) ili ugljen (C).

Naziv	Sastav %	Talište °C	Otpornost prema tlaku do °C	Upotreba
silika I	> 94,5 SiO ₂ < 2 Al ₂ O ₃ < 3,5 CaO	1720	1630	teško opterećeni dijelovi pri visokim temperaturama, velika osjetljivost prema bazičnoj troski
silika II	> 92 SiO ₂	1670	1560	
kremeni šamot (polukiselni)	≈ 90 SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO + Fe ₂ O ₃	1650	1470	srednje opterećeni dijelovi
šamot (bazični)	55...60 SiO ₂ 36...41 Al ₂ O ₃ 0,2...0,6 CaO 0,8...0,2 Fe ₂ O ₃	>1580	1300	manje opterećeni dijelovi ložišta (dimni kanali)
silimanit	55...60 Al ₂ O ₃ ost. SiO ₂	≈ 1875	1620	otporan prema troski i temperaturnim promjenama
magnezit	85...88 MgO 4...6 SiO ₂ 1...2 CaO 1...2 Al ₂ O ₃ 4...5 Fe ₂ O ₃	>2000	1400	za peći s bazičnom oblogom, velika osjetljivost prema temperaturnim promjenama
kromni magnezit	> 42 MgO > 15 Cr ₂ O ₃	≈ 1960	1560	otporan prema visokim temperaturama, brzim temperaturnim promjenama i utjecaju troske
karborund	45...80 SiC 10...25 SiO ₂ 9...20 Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	>2000	1700	neosjetljiv prema temperaturnim promjenama; iznad 1600°C raspada zbog oksidirajućih plinova
ugljen	85...90 C	>2000	1750	lonci, peći, elektrode

DRVO

Drvo se odlikuje malom gustoćom, razmjerno velikom čvrstoćom i lakom obradom.

Drvo upotrebljavamo kao gradivo (u građevinarstvu, brodogradnji, za vozila, u tekstilnoj industriji itd.) ili kao sirovinu (za izradu papira i celuloze).

Vrsta drveta	Gustoća kg/m ³	Smjer s obzir. vlakna	Čvrstoća N/mm ²			
			vlačna	tlačna	na savij.	smična
brijest	500...850	|| ⊥	60...210 4	30...60 10	50...160 -	7 25
bukva	500...900	|| ⊥	60...180 7	40...80 10	60...180 -	5...20 35
grab	500...850	|| ⊥	50...200 6	40...80 10	50...140 -	10 30
jasen	500...900	|| ⊥	30...220 7	30...60 10	50...180 -	7 -
hrast	400...950	|| ⊥	50...180 5	40...60 10	70...100 -	5...15 30
orah	600...750	|| ⊥	100 4	40...70 10	80...140 -	- -
bor	300...900	|| ⊥	40...190 3	30...80 10	40...200 90	5...15 20
jela	300...700	|| ⊥	50...120 2	30...50 4	40...100 -	5 25
smreka	300...700	|| ⊥	40...240 3	30...70 5...10	40...120 -	5...10 25

Na zraku sušeno drvo ima oko (10)12...15(20) postotaka vlage. Povećanjem vlage čvrstoća se osjetno smanjuje.

Oplemenjeno drvo

Svojstva drveta možemo poboljšati rezanjem na tanke ploče – furnire – i njihovim slepljivanjem.

Ukočeno drvo su slepljeni furniri i to:

- kao lamelirani nosači s jednosmjernim vlaknima (dobra čvrstoća u smjeru vlakana),
- kao vezane ploče s vlaknima pod kutom 45 ili 90° (u svim smjerovima jednolika čvrstoća).

Stolarske ploče (panel-ploče) imaju u unutrašnjosti slepljene letve, pokrivene s obje strana furnirom.

Vlaknatice (lesonit) su (razmjerno tanke) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše od piljevine i ljepila.

Iverice su (razmjerno deblje) ploče, izrađene valjanjem drvene kaše, obljepljene obostrano furnirom.

Oplemenjene drvene ploče su čvršće i praktički se ne savijaju.

PLASTIČNE MASE

Plastične mase (plastika) su umjetne tvari čija su glavna sastojina polimeri (str. 96). S obzirom na karakteristična svojstva razvrstavamo ih u slijedeće glavne skupine:

1. Termoplasti

Termoplasti su umjetne tvari od polimera koje imaju međusobno fizikalno vezane makromolekule. Po stanju su više ili manje viskozne tekućine. Mogu biti amorfnе ili djelomično kristalinične. Pri temperaturi okoliša su tvrdi, a pri zagrijavanju se smekšavaju (povratno). Lako se mogu preoblikovati i zavari-vati. Redovno su topivi u posebnim organskim otapalima. Njihovi se otpaci lako regeneriraju i ponovno upotrebljavaju. Ovamo se ubrajaju npr.:

amorfni termoplasti (koji se skrućuju odnosno smekšavaju do taline kontinuirano u širokom temperaturnom području)

PVC – polivinilklorid
PS – polistiren (polistirol)
ABS – akrilnitril butadienstiren

PMMA – polimetilmetakrilat
PC – polikarbonat
CN – celuloid

djelomično kristalinični termoplasti (koji se skrućuju iz taline u uskom temperaturnom području – »talištu«)

PE – polietilen
PP – polipropilen
SAN – stirenakrilnitril
POM – polioksimetilen

PTFE – politetrafluoretilen
PA – poliamid
PETP – polietilentereftalat (poliester)

2. Elasti

Elasti su umjetne tvari od polimera, koje imaju međusobno labavo vezane makromolekule. Dobivamo ih iz termoplasta vulkanizacijom (tj. kemijskim postupkom omreživanja). Uvijek su amorfni. Pri temperaturi okoliša su meko gumeno elastični. Već i najmanja naprezanja izazivaju velika elastična produ-ljenja. Ovamo ubrajamo npr.:

NR – prirodni kaučuk
PUR – poliuretanski kaučuk
SBR – stirenbutadienski kaučuk
BR – butadienski kaučuk

IIR – butilni kaučuk
NBR – akrilnitrilbutadienski kaučuk
SI – silikonski kaučuk

3. Duroplasti

Duroplasti su umjetne tvari od polimera koje imaju kemijski mrežom vezane makromolekule (nepovratni proces). Uvijek su amorfni. Oblikuju se (i učvršćuju) preko taline, a preoblikovanje je omeđeno. Teško se tope i zavaruju. Njihovi otpaci nisu upotrebljivi (ili samo kao dodatak). Ovamo spadaju npr.:

PF – fenolna smola (fenoplast)
UF – uratna smola (aminoplast)
MF – melaminska smola

UP – polieterska smola
EP – epoksidna smola
PUR – poliuretanska smola

S obzirom na broj polimera te dodatak još i drugih organskih ili anorganskih tvari dijelimo plaste na sljedeće skupine:

1. *Homogeni plasti* sastoje se iz samo jednog polimera. Mogu biti u amorfnom, kristaliničnom ili (kristalno) miješanom stanju. Udio kristalne tvari u cjelokupnoj tvari (mješavini amorfne i kristalinične tvari) određuje »stupanj kristalizacije« od koje ovise svojstva tvari.

2. *Heterogeni plasti* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različitih tvari koje su s polimerom vezane kemijski ili fizikalno. Ovamo se ubrajaju i međusobno miješani polimeri.

3. *Ukručeni plasti* sastoje se od polimera i još jedne ili više kemijski različitih tvari koje mogu biti organske ili anorganske te se većim dijelom osjetno razlikuju od polimera. Tvari su međusobno vezane fizikalno (rjetko kemijski). To su punilima ukruženi plasti.

Kao punila koja se dodaju u tekućim plastima dolaze u obzir u prvom redu:

- staklena vuna i predivo
- kameno brašno
- tinjac
- azbestna vlakna i vrpce
- drveno brašno
- celuloza
- pamučna vlakna i tkanine
- umjetna svila.

Svim vrstama plasta mogu se dodati svakakvi dodaci, npr. boje.

S obzirom na izbor jednog ili više međusobno miješanih polimera, kojima možemo dodati brojne druge tvari, dobivaju se plasti veoma raznovrsnih svojstava, prilagođenih zahtjevima upotrebe.

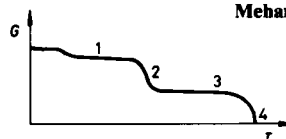
Plasti se (pre)oblikuju raznim tehnološkim postupcima (lijevanjem, prešanjem, istiskavanjem, zavarivanjem, ispuhivanjem, izvlačenjem, predenjem itd.) u:

- poluproizvode (cijevi, ploče, folije),
- dijelove strojeva i aparata (kućišta, strojni elementi),
- pjene, tvrde i meke (ulošci za blazine pokućstva, spužve za čišćenje, podne obloge),
- vlakna (za predivo u tekstilnoj industriji)

ili se upotrebljavaju kao pomoćna sredstva:

- lakove (za zaštitne i/ili ukrasne predmete),
- ljepila (za keramiku, kovine, drvo, papir).

Mehanička stanja plasta



Mehanička stanja plasta su ovisna o temperaturi. Ovu ovisnost pregledno prikazuje dijagram modula smika G pri raznim temperaturama T .

U dijagramu se razabiru sljedeća područja stanja:

- *Tvrdoelastično područje* (1) obuhvaća niske temperature. U tom su području plasti (umjetne tvari) tvrdi i krhki pa je za njih karakteristična ograničena elastična deformacija velikog modula elastičnosti ($E = 200 \dots 4000 \text{ N/mm}^2$), koji pada s povišenjem temperature.

Stoga uzevši kod plasta ne postoji čista elastična deformacija, jer se dodatno uvijek javlja - u ovisnosti o vremenu, temperaturi i opterećenju - i viskoelastičan udio preoblikovanja.

Modul smika se u tom području malo mijenja s temperaturom ($G = 10^2 \dots 10^3 \text{ N/mm}^2$).

- *Područje smekšavanja* (2) obuhvaća temperature pri kojima je već omogućeno pomicanje molekula (koje u tvrdoelastičnom području - kad su molekule još »smrznute« - nije bilo moguće).

U području smekšavanja prelaze plasti iz krhkoga u žilavo stanje.

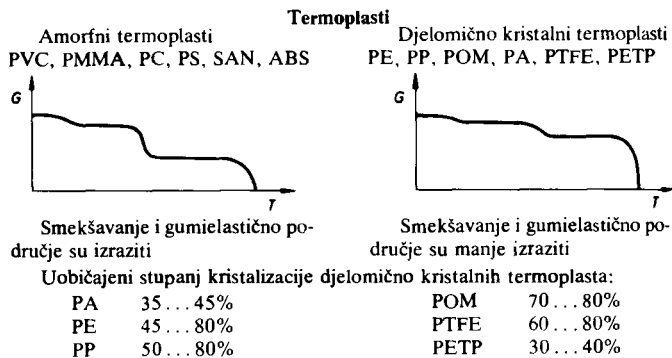
- *Gumielastično područje* (3) rasprostire se od područja smekšavanja do taljenja plasta. Za to je područje karakteristična vrlo velika elastična deformacija uz mali modul elastičnosti ($E = 2 \dots 600 \text{ N/mm}^2$).

Modul smika je u tom području neznatno ovisan o temperaturi ($G = 0,1 \dots 100 \text{ N/mm}^2$).

Smekšavanje i gumielastično područje se javljaju samo pri amorfnim tvarima. Pri kristalnim tvarima, tvrdoelastično stanje seže sve do područja taljenja; pri djelomično kristalnim tvarima, smekšavanje i gumielastično područje su ovisni o stupnju kristalizacije.

- *Područje taljenja* (4) se pri amorfnim tvarima izražava postupnim prijelazom tvari iz gumielastičnog stanja kroz plastično stanje (s izrazitim tečenjem tvari) do potpunog taljenja. Pri djelomično kristalnim tvarima se taljenje zbiva u užem temperaturnom području, a još izrazitije je talište pri kristalnim tvarima.

*



Mehanička svojstva termoplasta

Termoplast	Oznaka	Modul elast. kN/mm ²	Čvrstoća vlažna N/mm ²	Čvrstoća nasavij. N/mm ²	Zarezna žilavost kJ/m ²	Tvrdoća (kugl.) N/mm ²
polietilen	PE - HD	0,7...1,4	18...35	36	-	40...65
	PE - LD	0,2...0,5	8...23	-	-	13...20
polipropilen	PP	1,1...1,3	21...37	43	3...17	36...37
polivinilklorid	PVC tvrdi	1,0...3,5	50...75	110	2...50	75...155
	PVC meki	-	10...25*	-	-	-
polistiren	PS	3,2...3,3	45...65	90	2...3	120...130
	SAN	3,6	70...85	100	2...3	130...140
stirenakril-nitril akrilnitril-butadienstiren	ABS	1,9...2,7	32...45	75	7...20	80...120
polimetilmetakrilat	PMMA	2,7...3,2	50...77	105	2...6	180...200
polioksi-metilēn	POM	2,8...3,2	62...70	110	3...9	150...170
politetrafluoretilen	PTFE	0,41	25...36	18	13...15	27...35
poliamid	PA 6	1,4	70...85	27	8...16	75
	PA 66	2,0	77...84	50	15...20	100
	PA 11	1,0	56	-	30...40	75
	PA 12	1,6	56...65	-	10...20	75
polikarbonat	PC	2,1...2,4	56...67	100	20...30	110
polietilen-tereftalat	PETP	2,4	39	80	4...5	-
celulozni acetat	CA	2,2	28**	44	15	50
	CAB	1,6	26**	38	30...35	35...43

* Postotno produljenje > 400%. - ** Naprezanje tečenja R_p 0,2.

Toplinska svojstva i upotreba termoplasta

Oznaka	Ispit. po Vicatu °C	Područje tališta °C	Temper. rastez. 10 ⁻⁴ K ⁻¹	Topl. vodljiv. W/(m. K)	Upotreba
PE - HD	70...75	125...135	2	0,50	Cijevi, profili, ploče, folije, pjene, vlakna. Prešani dijelovi otporni na vodu, lužine, blage kiseline.
PE - LD	< 40	110...150	2,5	0,35	
PP	95	157...170	1,6	0,22	
PVC tvrdi	70...90		0,8	0,16	Cijevi, profili, folije, pjene. Dijelovi kem. apar. (pumpe).
	40...60		1,5	0,13	
PS	86...91		0,7	0,17	Kućišta i dijelovi kućnih aparata, uredske tehnike, vozila (karoserije), čamaca.
SAN	100...110		0,7	0,15	
ABS	90...105		1,0	-	
PMMA	40...108		0,7	0,19	Čisti bezbojni dijelovi (pleksi-staklo) ili obojeni. Habanju podlož. dijelovi. Klizni ležaji, zupčanici. Patentni zatvarači.
POM	173		0,9	0,22	
PTFE	50...60		1,6	0,24	Brtnice gibljivih dijelova. Ležaji (bez maziva).
PA - 6		220	0,8	0,23	Dijelovi otporni na habanje, udarce i dinamičko opterećenje. Kućišta, klizni ležaji, zupčanici.
	- 66	225...265	0,9	0,27	
	- 11	-	0,9	0,23	
	- 12	172...180	1,1	0,30	
PC	145...150	220...260	0,7	0,21	Ploče, folije. Providna kućišta.
PETP	80	255...258	0,8	0,24	Prozirne folije, čvrste i žilave.
CA	74...110		1,0	0,22	Cijevi, profili, ploče, folije (celofan). Češljevi, naočari, igračke. (Požarna opasnost!)
	65...111		1,2	0,21	

Ukručeni termoplasti

Ukručivanjem termoplasta se osjetno mijenjaju njihova mehanička svojstva: gustoća se povećava, čvrstoća jako raste, rastezljivost se veoma smanjuje. U vezi s tim promjenama mijenjaju se i druga mehanička svojstva.

Primjeri mehaničkih svojstava nekih termoplasta, ukrućenih staklenim vlaknima ($s_v \approx 30\%$) (zaokružene prosječne vrijednosti):

Termoplast	PP	PP + s_v	SAN	SAN + s_v	POM	POM + s_v
Gustoća kg/m ³	906	1114	1080	1360	1410	1560
Čvrstoća N/mm ²	29	71	75	110	66	130
Post. produlj. %	600	6	4	2	45	3
Termoplast	PA	PA + s_v	PC	PC + s_v	PETP	PETP + s_v
Gustoća kg/m ³	1135	1400	1200	1520	1330	1690
Čvrstoća N/mm ²	75	180	65	100	39	193
Post. produlj. %	30	3	100	3	225	2

Trajna čvrstoća termoplasta

Čvrstoća termoplasta vrlo je ovisna o trajanju opterećenja pa se s opterećenjem izrazito smanjuje.

Vremenska statička čvrstoća termoplasta

Trajanje opterećenja min	Vremenska statička čvrstoća N/mm ²			
	termoplasta			
	PE	PVC	PS	ABS
10 ⁻⁶	60	210	90	135
10 ⁻³	35	90	65	80
1	20	60	45	45
10 ³	15	40	30	25
10 ⁶	10	35	25	20
10 ⁹	8	32	22	18

Naprezanja u termoplastu s vremenom popuštaju (relaksacija).

Prvotno se naprezanje uz konstantnu deformaciju smanjuje (što valja uzeti u obzir u stanovitim slučajevima, npr. pri brtvama).

Uz konstantno opterećenje deformacija raste – javlja se puženje materijala, koje je ovisno o veličini opterećenja i njegovom trajanju (stoga treba pri projektiranju odabrati takvo opterećenje dijelova, pri kojem je – s obzirom na puženje – za određeno trajanje osigurana njihova funkcionalnost).

Trajna dinamička čvrstoća termoplasta

Termoplast	PE	SAN	PA 6	PC
Broj titraja	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁷
Trajna dinamička čvrstoća N/mm ²	17	20	30	6

Vremenska dinamička čvrstoća polivinilklorida PVC

Broj titraja	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Vremen. dinam. čvrst. N/mm ²	28	17	10	5

Klizavost

Termoplasti posjeduju dobre klizne sposobnosti za ležaje i vodila (u kombinaciji kovine i umjetne tvari). Mana je u maloj toplinskoj vodljivosti termoplasta, a time je i smanjena sposobnost odvođenja topline trenja.

Umjetna tvar	Koefficient trenja		Dozvoljeni pritisak N/mm ²
	bez podmazivanja	s podmazivanjem	
PE	0,18 ... 0,25	0,04 ... 0,07	10
PA	0,08 ... 0,25	0,01 ... 0,08	19
PA z MoS ₂	0,03 ... 0,14	0,01 ... 0,03	20

Ovisnost vlačne čvrstoće termoplasta o temperaturi

Termoplast	Vlačna čvrstoća N/mm ²								
	pri temperaturi °C								
	-50	-25	0	25	50	75	100	125	150
PE	59	49	39	30	20	14	10	8	
PVC		88	75	59	38				
PS	83	76	69	62	49	34			
PC	88	80	72	64	58	52	40	27	12

Temperaturna upotrebljivost umjetne tvari (u °C)

PE	-100 ... 85	POM	-100 ... 100
PP	-30 ... 110	PTFE	-100 ... 165
PVC	-45 ... 80	PA	-100 ... 145
PS	-100 ... 80	PC	-100 ... 120
PMMA	-100 ... 70	PETP	-100 ... 100

Kemijska postojanost termoplasta

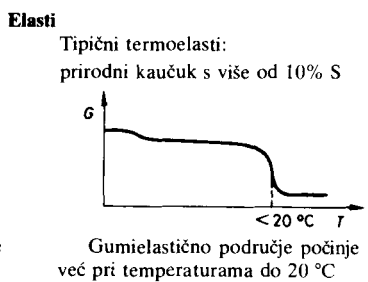
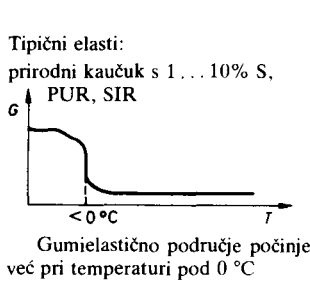
Termoplast	Otpornost* prema					
	vodi	slanoj otop.	kiselinama	bazama	oksidaciji	rastapalima
PE	+	+	+	+	(-)	(+)
PP	+	+	+	+	-	(+)
PVC	+	+	(+)	(+)	(-)	-
PS	+	+	+	+	(-)	-
SAN	+	+	o	+	-	-
ABS	+	+	o	+	-	-
PMMA	o	+	o	o	(-)	-
POM	+	+	-	o	-	(o)
PTFE	+	+	+	+	***	+
PA	o	o	-	o	-	(o)
PC	+	+	(-)	-	-	(-)
PETP	+	+	o	-	-	(o)

* + – velika otpornost
o – mala otpornost
– – nedovoljna otpornost
** PTFE je negorljiv.

U zagradama su označena odstupanja od vrijednosti određene otpornosti.

Starenje obuhvaća sve promjene u sastavu tvari što ih izazivaju mehanička opterećenja, više temperature, zračenje, električna struja, kemijske tvari itd.

Kemijsko raspadanje termoplasta koje pospješuju uzročnici starenja mogu trajati više desetljeća.



Mehanička svojstva elasta
Modul elastičnosti $E \approx 700 \dots 1000 \text{ N/mm}^2$.

Elasti		Gustoća kg/m ³	Čvrstoća N/mm ²		Postot. produlj. %	Temperatura upotrebe °C
kaučuk	oznaka		neutr.	utvr.		
prirodni –	NR	930	22	28	600	-45...85
poliuretanski – (meki)	PUR	1260	20	32	450	-100...50
stiren-butadienski –	SBR	940	5	25	500	-35...110
butadienski –	BR	940	2	18	450	-70...100
butilni –	IIR	930	5	21	600	-30...120
akrilnitril-butadienski –	NBR	1000	6	25	450	-20...110
silikonski –	SIR	1250	1	10	250	-100...200

Prirodni kaučuk NR ima odlične elastične sposobnosti i vrlo dobru udarnu žilavost. Postojan je u vodi i kiselinama; manje postojan u mineralnim uljima i mazivima. (Plaštevni kotača za teretnjake, gumene opruge, ležaji, brtve.)

Poliuretanski kaučuk PUR vanredno je otporan prema habanju, dobro upotrebljiv samo do temperature 50 °C. Postojan je u mineralnim uljima, ali nepostojan u vrućoj vodi. (Valjni koluti, ležajne blazinice, brtve, amortizeri.)

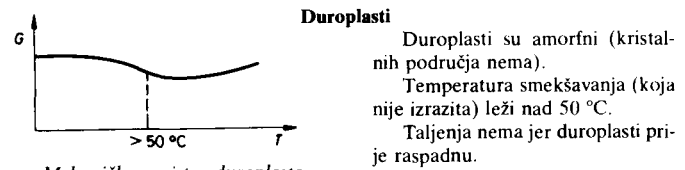
Stirenbutadienski kaučuk SBR (buna) veoma je otporan prema habanju i većim temperaturnim opterećenjima; pri dinamičkom opterećenju se jako zagrijava. (Plaštevni točkova za osobna vozila, brtve, gipke cijevi, profili, trake.)

Butadienski kaučuk BR (buna CB) vrlo je otporan prema habanju pa se zato upotrebljava za vozni sloj plaštevna kotača.

Butilni kaučuk IIR vrlo je otporan na vremenske uplive i starenje te vrlo malo propušta plinove. (Zračnice kotača za vozila, gibljive cijevi.)

Akrlnitrilbutadienski kaučuk NBR (perbunan) postojan je u mineralnim uljima, mastima i tekućim gorivima, ali nepostojan u kloriranim ugljikovodici. (Gibljive cijevi za benzin, membrane.)

Silikonski kaučuk SIR je izvanredno otporan na temperaturu. Postojan je u ulju i mastima, ali neotporan prema vrućoj vodi, ugljikovodicima, lužinama i kiselinama. (Brtve prehr. uređaja, transportne trake, električne izolacije.)



Mehanička svojstva duroplasta

Duroplasti		Gust. kg/m ³	Modul elast. N/mm ²	Čvrstoća		Zarez. žilav. kJ/m ²	Temper upotrebe °C
smola	oznaka			vlač.	na savij.		
fenolna – (fenoplast)	PF	1400	700	25	70	1,5	< 125
uratna – (aminoplast)	UF	1500	-	30	80	1,5	< 100
melaminska –	MF	1500	900	30	80	1,5	< 120
poliesterska –	UP	1200	3500	45	85	15	< 200
epoksidna –	EP	1200	3700	55	105	12	< 80
poliuretanska – (tvrda)	PUR	1500	-	85	170	25	< 130

Mehanička i toplinska svojstva ukrućenih duroplasta
Svi duroplasti, ukrućeni punilima, mehanički su znatno poboljšani.

Duroplast	Dodatak stakla (pletivo) %	Gust. kg/m ³	Modul elast. N/mm ²	vlačna N/mm ²	Čvrstoća na savij. N/mm ²	člačna N/mm ²	Temper. rastez. 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Topl. vodljiv. W/(m.K)
UP	25	1350	5000	70	120	120	35	0,15
	50	1600	10000	200	220	160	18	0,24
	65	1800	19000	300	350	280	15	0,26
	65*	1800	28000	500	550	400	12	0,26
EP	50	1600	10000	220	280	220	18	0,24
	65	1800	18000	350	400	300	15	0,26
	65*	1800	30000	700	800	600	12	0,26

* Uzdužni smjer pletiva.

Fenolna smola (fenoplast PF) upotrebljava se za manje opterećene predmete. (Armature, obloge kočnica, lopatična kola, izolacijski dijelovi – bakelit.)

Uratna smola (aminoplast) UF služi za malo opterećene predmete (sanitarnu tehniku, električne instalacije). U vezi sa prehranom je neupotrebljiva!

Melaminska smola MF namijenjena je za predmete s većim opterećenjem, npr. za dekorativne ploče (ultrapas).

Poliesterska smola UP polimerizira se s ukrućivačem. (Cijevi, profili, posude, dijelovi pokućstva, dijelovi vozila, čamci, letjelice.)

Epoksidna smola EP se također polimerizira s ukrućivačem. Upotrebljava se za dijelove s većim zahtjevima. Ima natprosječnu adhezijsku sposobnost (araldit).

Poliuretanska smola PUR je u prvom redu elektrotehnički materijal.

Posebni proizvodi od plastu

Pjenasti plasti

Oni se proizvode posebnim tehnološkim postupkom (pjenušanjem plastu u žilavo-tekućem stanju). Karakteristični su za njih mala gustoća (5... 400 kg/m³) i sastav ćelija.

Sastav ćelija je ili s otvorenim ćelijama (s neposrednim prelazom plinova i tekućina) ili sa zatvorenim ćelijama (pri kojima je prelaz plinova i tekućina moguć jedino difuzijom).

Pjenasti plasti mogu biti krhko-tvrđi (lome se), žilavo tvrdi (pod tlakom se dijelom deformiraju) i meko-elastični.

Mehanička i toplinska svojstva pjenastih plastu

Pjenasti plast	Gustoća kg/m ³	Čvrstoća		Toplin. vodljivost W/(m. K)	Temperatura upotrebe °C
		vlačna N/mm ²	ilačna N/mm ²		
meko-tvrđi: PF	40... 100	0,1... 0,4	0,2... 0,9	0,025	< 130
UF	5... 15	-	0,01... 0,05	0,03	< 90
žilavo tvrdi: PS	15... 30	0,1... 0,5	0,06... 0,25	0,032	70... 80
	30... 35	> 0,5	> 0,15	0,033	80... 85
	40... 60	> 0,5	> 0,5	0,033	80... 85
PVC	50... 130	0,7... 1,6	0,3... 1,1	0,038	< 60
PUR	20... 100	0,2... 1,1	0,1... 0,9	0,021	< 80
meko-elastični:					
PE*	25... 40	0,1... 0,2	-	0,036	< 100
	30... 70	0,3... 0,6	-	0,045	-70... 85
	100... 200	0,8... 2,0	-	0,05	-70... 110
PVC*	50... 70	0,3	-	0,036	-60... 50
	100	0,5	-	0,041	-60... 50
PUR**	20... 45	0,15	-	0,045	-40... 100

* Pretežno zatvorene ćelije. - ** Pretežno otvorene ćelije.

Vlaknasti plasti

Vlaknasti plasti (sintetička vuna) proizvode se od odgovarajućih vrsta plastu i to iz njihove taline ili rastopine (suhim ili vlažnim postupkom).

Za proizvodnju vlakana dolaze u obzir u prvom redu:

- polietilen, polipropilen - za vrpce, mreže (ribarske, plivaju na vodi)
- polistiren - za vlakna promjera ≥ 10 μm
- vinilni (ko)polimeri - za kemijski otporne proizvode (filteri, zaštita)
- akrilnitrilni polimeri - za odjevne predmete (dralon, orlon...)
- poliamidi - za odjevne predmete (perlon, najlon...)
- poliuretani - za elastične odjevne predmete (čarape, kupaće gaćice)
- politereftalni kiseli ester - za odjevne predmete (diolen, trevira...), često miješano vunom i pamukom, za tehn. upotrebu (remanje, transportne trake itd.)

ELEMENTI STROJEVA

Standardni brojevi

(JUS A. A0.001 - 1983)

Za brojčane vrijednosti različitih veličina (duljina, napon itd.) upotrebljavamo standardne brojeve (prema Renardu, prijedlog ISO).

Standardni brojevi su zaokružene vrijednosti članova geometrijskih redova sa stupnjevima

$$\sqrt[3]{10}, \sqrt[10]{10}, \sqrt[20]{10}, \sqrt[40]{10} \text{ ili } \sqrt[80]{10}$$

Razvrstani su u osnovne redove R 5, R 10, R 20 i R 40 te izuzetni red R 80. Njihove brojčane vrijednosti za decimalni interval od 1 do 10 vide se u tablici (desno).

Ograničenje reda označujemo — ako je potrebno — graničnim članom u zagradi, npr.

$$R 5 (16 \dots) \quad R 10 (\dots 400) \\ R 20 (2,5 \dots 5)$$

Izvedeni redovi nastaju ako se iz nekog osnovnog ili izuzetnog reda standardnih brojeva uzme svak i drugi, treći, ... n-ti član, npr.:

R 10/3 (... 80...) je red koji sadrži svaki treći član iz osnovnog reda R 10, ali mora sadržavati standardni broj 80.

Osnovni redovi imaju prednost pred izuzetnim ili izvedenim redovima.

Ako je upotreba standardnih brojeva potpuno isključena, upotrebljavaju se prilagođeni brojevi:

$$1,05 \quad 2,1 \quad 2,4 \quad 3,5 \quad 4,8 \\ 1,1 \quad 2,2 \quad 2,6 \quad 3,6 \quad 5,5 \\ 1,2 \quad 2,25 \quad 3,2 \quad 3,8 \quad 7,0 \\ 1,3 \quad 2,35 \quad 3,4 \quad 4,2$$

R 5	Osnovni redovi			Izuzetni red	
	R 10	R 20	R 40	R 80	
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03
				1,06	1,09
		1,12	1,12	1,12	1,15
			1,18	1,18	1,22
	1,25	1,25	1,25	1,25	1,28
			1,32	1,32	1,36
		1,40	1,40	1,40	1,45
			1,50	1,50	1,55
1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,65
			1,70	1,70	1,75
		1,80	1,80	1,80	1,85
			1,90	1,90	1,95
	2,00	2,00	2,00	2,00	2,06
			2,12	2,12	2,18
		2,24	2,24	2,24	2,30
			2,36	2,36	2,43
2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,58
			2,65	2,65	2,72
		2,80	2,80	2,80	2,90
			3,00	3,00	3,07
	3,15	3,15	3,15	3,15	3,25
			3,35	3,35	3,45
		3,55	3,55	3,55	3,65
			3,75	3,75	3,87
4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,12
			4,25	4,25	4,37
		4,50	4,50	4,50	4,62
			4,75	4,75	4,87
	5,00	5,00	5,00	5,00	5,15
			5,30	5,30	5,45
		5,60	5,60	5,60	5,80
			6,00	6,00	6,15
6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,50
			6,70	6,70	6,90
		7,10	7,10	7,10	7,30
			7,50	7,50	7,75
	8,00	8,00	8,00	8,00	8,25
			8,50	8,50	8,75
		9,00	9,00	9,00	9,25
			9,50	9,50	9,75
10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Standardne duljinske

mjere u mm (JUS A.A0.010 — 1959)

0,010 ... 1 mm				1 ... 10 mm			
R 5	R 10	R 20*	iz. vr.**	R 5	R 10	R 40*	iz. vr.**
0,0100	0,0100	0,0100 0,0112 0,011 0,0125 0,012 0,0140		1,00	1,00	1,00 1,06 1,05 1,12 1,1 1,18 1,15	
0,0160	0,0160	0,0160 0,0180 0,0200 0,0224 0,022	0,015		1,25	1,25 1,2 1,32 1,3 1,40 1,50	
0,0250	0,0250	0,0250 0,0280 0,0315 0,032 0,0355 0,036	0,030 0,035	1,60	1,60	1,60 1,70 1,80 1,90	
0,0400	0,0400	0,0400 0,0450 0,0500 0,0560	0,055		2,00	2,00 2,12 2,1 2,24 2,2 2,36 2,35	2,4
0,0630	0,0630	0,0630 0,0710 0,0800 0,0900	0,060 0,070	2,50	2,50	2,50 2,65 2,80 3,00	2,6
0,100	0,100	0,100 0,112 0,11 0,125 0,12 0,140			3,15	3,15 3,2 3,35 3,4 3,55 3,6 3,75 3,8	3,5
0,160	0,160	0,160 0,180 0,200 0,224 0,22	0,15	4,00	4,00	4,00 4,25 4,2 4,50 4,75 4,8	
0,250	0,250	0,250 0,280 0,315 0,32 0,355 0,36	0,30 0,35		5,00	5,00 5,30 5,60 6,00	5,5
0,400	0,400	0,400 0,450 0,500 0,560	0,55	6,30	6,30	6,30 6,70 7,10 7,50	6,0 6,5 7,0
0,630	0,630	0,630 0,710 0,800 0,900	0,60 0,70		8,00	8,00 8,50 9,00 9,50	
1,000	1,000	1,000		10,00	10,00	10,00	

* Brojevi desno su prilagođeni brojevi. — ** »iz. vr.« = izuzetne vrijednosti.

10 ... 100 mm				100 ... 1000 mm			
R 5	R 10	R 40*	iz. vr.**	R 5	R 10	R 40*	
10	10	10 10,6 10,5 11,2 11 11,8 11,5		100	100	100 106 105 112 110 118 115	
	12,5	12,5 12 13,2 13 14 15			125	125 120 132 130 140 150	
16	16	16 17 18 19		160	160	160 170 180 190	
	20	20 21,2 21 22,4 22 23,6 23,5	24		200	200 212 210 224 220 236 235	
25	25	25 26,5 28 30	26	250	250	250 265 280 300	
	31,5	31,5 32 33,5 34 35,5 36 37,5 38	35		315	315 320 335 340 355 360 375 380	
40	40	40 42,5 42 45 47,5 48		400	400	400 425 420 450 475 480	
	50	50 53 56 60	55		500	500 530 560 600	
60	63	63 67 71 75	65 70	630	630	630 670 710 750	
	80	80 85 90 95			800	800 850 900 950	
100	100	100		1000	1000	1000	

* Brojevi desno su prilagođeni brojevi. — ** »iz. vr.« = izuzetne vrijednosti.

DOSJEDANJE STROJNIH DIJELOVA

Sustav dosjedanja ISO međunarodno je općenito uveden, a u nas i standardiziran.

Tolerancije mjera prema ISO (JUS M.A1.110/111/112 – 1968)

a) Osnovni pojmovi

Nazivna mjera N mjera koju unosimo u crteže. Obično je to zaokružena mjera (vidi standardne duljine na str. 484 i 485).

Stvarna mjera N_d mjera, koju određujemo mjerenjem na izrađenom predmetu. U toj je mjeri uključena i netočnost mjerenja

Granična mjera najveća ili najmanja mjera koju još dopuštamo

Najveća mjera N_{max} veća od obiju graničnih mjera

Najmanja mjera N_{min} manja od obiju graničnih mjera

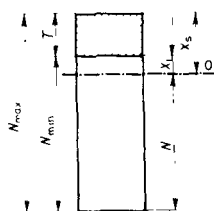
Gornje odstupanje x_s razlika između najveće i nazivne mjere ($N_{max} - N$)

Donje odstupanje x_i razlika između najmanje i nazivne mjere ($N_{min} - N$)

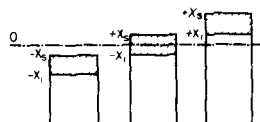
Tolerancija mjere T razlika između najveće i najmanje mjere ($T = N_{max} - N_{min}$)

Polje tolerancije sve mjere u okviru tolerancije

Nul-linija (0) crta u grafički prikazanom tolerancijskom polju, koja odgovara nazivnoj mjeri



Tolerancijsko polje može se rasprostirati s obje strane nul-linije, a može cijelo biti ispod nul-linije ili iznad nje (vidi donju sliku). Prema tome može gornje odstupanje biti pozitivno, a donje negativno, ili pak mogu oba odstupanja biti pozitivna ili negativna.



Temperatura pri mjerenju: 20 °C.

b) Osnovne tolerancije

Tolerancije su podijeljene u 18 osnovnih redova. Mjerimo ih međunarodnom jedinicom tolerancije i , koja ovisi o nazivnoj mjeri N , a određena je brojčanom jednadžbom

$$i = 0,45 \sqrt[3]{N} + 0,001 N$$

u kojoj mjerimo nazivnu mjeru N u mm, a mjeru tolerancije i u μm .

Red tolerancije	Tolerancija	Red tolerancije	Tolerancija	Red tolerancije	Tolerancija
IT 01	$0,3 + 0,008 N$	IT 5	$7 i$	IT 11	$100 i$
IT 0	$0,5 + 0,012 N$	IT 6	$10 i$	IT 12	$160 i$
IT 1	$0,8 + 0,020 N$	IT 7	$16 i$	IT 13	$250 i$
IT 2	—*	IT 8	$25 i$	IT 14	$400 i$
IT 3	—*	IT 9	$40 i$	IT 15	$640 i$
IT 4	—*	IT 10	$64 i$	IT 16	$1000 i$

* Vrijednosti za redove tolerancija IT 2, IT 3 i IT 4 su geometrijski stupnjevane između redova IT 1 i IT 5.

Upotreba osnovnih tolerancija:

IT 01...IT 6 — uglavnom za preciznu mehaniku i mjerila,
IT 5...IT 11 — uglavnom za dosjede elemenata strojeva,
IT 12...IT 16 — za veće tolerancije pri obradi.

c) Položaj tolerancijskog polja

označen je s obzirom na nul-liniju slovima, i to

za vanjske mjere (rukavce) — malim slovima:

a b c d e e f f g h j (j_s) k m n p r s t u v x y z za zb zc

za unutarnje mjere (provrtne) — velikim slovima:

A B C D D E E F F G G H J (J_s) K M N P R S T U V X Y Z ZA ZB ZC.

Tolerancijska polja a do h leže ispod nul-linije (polje h se dotiče nul-linije). Polje j seže s obje strane nul-linije, dok su polja k do zc iznad nje.

Tolerancijska polja A do H leže iznad nul-linije (polje H se dotiče nul-linije). Polje J seže s obje strane nul-linije, dok su polja K do ZC ispod nje.

d) Oznake tolerancijskih polja

Tolerancijska polja označujemo slovom (oznaka položaja tolerancijskog polja) i karakterističnom brojkom reda tolerancije, npr.

H 7 — znači tolerancijsko polje za provrt koje se rasprostire od nul-linije navije za vrijednost IT 7 (= 16 i).

Sustav dosjedanja ISO obuhvaća tolerancijska polja u svim položajima od a do zc i od A do ZC, te svako sa svim osnovnim tolerancijama od IT 01 do IT 16. Međutim, s obzirom na potrebu da broj mjerila bude što manji, upotrebljavamo u praksi samo nekoliko najprikladnijih tolerancijskih polja.

Na str. 488 do 491 dane su vrijednosti onih tolerancijskih polja za provrtne i rukavce koje, prema iskustvu u strojarstvu, većinom svuda zadovoljavaju (a odgovaraju 1. i 2. stupnju prednosti dopuštenih dosjedanja prema JUS M.A1.200/201/202/203 – 1968).

Tolerancije rukavaca (µm)

(JUS M.A1.150...158 — 1968)

Nazivna mjera (mm)	a 11	c 11	d 9	e 8	f 7	g 6	h 6	h 8	h 9	h 11
... 3	-270	-60	-20	-14	-6	-2	0	0	0	0
3) ... 6	-330	-120	-45	-28	-16	-8	-6	-14	-25	-60
6) ... 10	-270	-70	-30	-20	-10	-4	0	0	0	0
10) ... 18	-345	-145	-60	-38	-22	-12	-8	-18	-30	-75
18) ... 30	-280	-80	-40	-25	-13	-5	0	0	0	0
30) ... 40	-370	-170	-76	-47	-28	-14	-9	-22	-36	-90
40) ... 50	-290	-95	-50	-32	-16	-6	0	0	0	0
50) ... 65	-400	-205	-93	-59	-34	-17	-11	-27	-43	-110
65) ... 80	-300	-110	-65	-40	-20	-7	0	0	0	0
80) ... 100	-430	-240	-117	-73	-41	-20	-13	-33	-52	-130
100) ... 120	-310	-120	-80	-50	-25	-9	0	0	0	0
120) ... 140	-470	-280	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
140) ... 160	-320	-130	-89	-50	-25	-9	-16	-39	-62	-160
160) ... 180	-480	-290	-120	-72	-36	-12	0	0	0	0
180) ... 200	-340	-140	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
200) ... 225	-530	-330	-174	-106	-60	-29	-19	-46	-74	-190
225) ... 250	-360	-150	-80	-50	-25	-9	0	0	0	0
250) ... 280	-550	-340	-170	-100	-60	-29	-19	-46	-74	-190
280) ... 315	-380	-170	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
315) ... 355	-600	-300	-170	-100	-60	-29	-19	-46	-74	-190
355) ... 400	-410	-180	-90	-50	-25	-9	0	0	0	0
400) ... 450	-630	-400	-207	-126	-71	-34	-22	-54	-87	-220
450) ... 500	-460	-200	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
500) ... 550	-710	-450	-245	-148	-83	-39	-25	-63	-100	-250
550) ... 600	-520	-210	-145	-85	-43	-14	0	0	0	0
600) ... 650	-770	-460	-245	-148	-83	-39	-25	-63	-100	-250
650) ... 700	-580	-230	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
700) ... 750	-830	-480	-210	-125	-62	-18	0	0	0	0
750) ... 800	-660	-240	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
800) ... 850	-950	-530	-285	-172	-96	-44	-29	-72	-115	-290
850) ... 900	-740	-260	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
900) ... 950	-1030	-550	-285	-172	-96	-44	-29	-72	-115	-290
950) ... 1000	-820	-280	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1000) ... 1050	-1110	-570	-210	-125	-62	-18	0	0	0	0
1050) ... 1100	-920	-300	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1100) ... 1150	-1240	-620	-190	-110	-56	-17	0	0	0	0
1150) ... 1200	-1050	-330	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1200) ... 1250	-1370	-650	-210	-125	-62	-18	0	0	0	0
1250) ... 1300	-1200	-360	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1300) ... 1350	-1560	-720	-210	-125	-62	-18	0	0	0	0
1350) ... 1400	-1350	-400	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1400) ... 1450	-1710	-760	-210	-125	-62	-18	0	0	0	0
1450) ... 1500	-1500	-440	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1500) ... 1550	-1900	-840	-230	-135	-68	-20	0	0	0	0
1550) ... 1600	-1650	-480	-100	-60	-30	-10	0	0	0	0
1600) ... 1650	-2050	-880	-230	-135	-68	-20	0	0	0	0

Nazivna mjera (mm)	j 6	k 6	n 6	r 6	s 6	u 8	x 8
... 3	+4	+6	+10	+16	+20	+32	+34
3) ... 6	-2	0	+4	+10	+14	+18	+20
6) ... 10	+6	+9	+16	+23	+27	+41	+46
10) ... 14	-2	+1	+8	+15	+19	+23	+28
14) ... 18	+7	+10	+19	+28	+32	+50	+56
18) ... 24	-2	+1	+10	+19	+23	+28	+34
24) ... 30	+8	+12	+23	+34	+39	+60	+67+40
30) ... 40	-3	+1	+12	+23	+28	+33	+72+45
40) ... 50	+9	+15	+28	+41	+48	+74+41	+87+54
50) ... 65	-4	+2	+15	+28	+35	+81+48	+97+64
65) ... 80	+11	+18	+33	+50	+59	+99	+119
80) ... 100	-5	+2	+17	+34	+43	+60	+80
100) ... 120	+12	+21	+39	+60	+72	+133	+168
120) ... 140	-7	+2	+20	+41	+53	+87	+122
140) ... 160	+13	+25	+45	+73	+93	+178	+232
160) ... 180	-9	+3	+23	+51	+71	+124	+178
180) ... 200	+14	+28	+52	+90	+125	+253	+343
200) ... 225	-11	+3	+27	+65	+100	+190	+280
225) ... 250	+9	+13	+27	+88	+117	+233	+311
250) ... 280	+16	+33	+60	+63	+92	+170	+248
280) ... 315	-13	+4	+31	+90	+125	+253	+343
315) ... 355	+18	+40	+73	+65	+100	+190	+280
355) ... 400	-18	+4	+37	+93	+133	+273	+373
400) ... 450	+20	+45	+80	+68	+108	+210	+310
450) ... 500	-20	+5	+40	+106	+151	+308	+422
500) ... 550	+16	+33	+60	+77	+122	+236	+350
550) ... 600	-13	+4	+31	+109	+159	+330	+457
600) ... 650	+11	+16	+31	+80	+130	+258	+385
650) ... 700	+11	+16	+31	+113	+169	+356	+497
700) ... 750	+12	+16	+31	+84	+140	+284	+425
750) ... 800	+16	+36	+66	+126	+190	+396	+556
800) ... 850	-16	+4	+34	+94	+158	+315	+475
850) ... 900	+13	+4	+34	+130	+202	+431	+606
900) ... 950	+18	+40	+73	+98	+170	+350	+525
950) ... 1000	+14	+40	+73	+144	+226	+479	+679
1000) ... 1050	-18	+4	+37	+108	+190	+390	+590
1050) ... 1100	+15	+4	+37	+150	+244	+524	+749
1100) ... 1150	+11	+4	+37	+114	+208	+435	+660
1150) ... 1200	+16	+45	+80	+166	+272	+587	+837
1200) ... 1250	-20	+5	+40	+126	+232	+490	+740
1250) ... 1300	+20	+45	+80	+172	+292	+637	+917
1300) ... 1350	-20	+5	+40	+132	+252	+540	+820

Tolerancije provrta (µm)

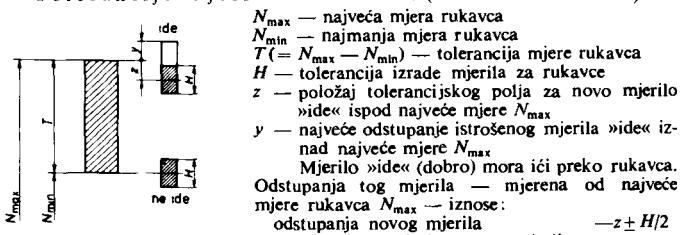
(JUS M.A1.170...177 — 1968)

Nazivna mjera (mm)	A 11	C 11	D 10	E 9	F 8	G 7
... 3	+ 330 + 270	+120 + 60	+ 60 + 20	+ 39 + 14	+ 20 + 6	+12 + 2
3)... 6	+ 345 + 270	+145 + 70	+ 78 + 30	+ 50 + 20	+ 28 + 10	+16 + 4
6)... 10	+ 370 + 280	+170 + 80	+ 98 + 40	+ 61 + 25	+ 35 + 13	+20 + 5
10)... 18	+ 400 + 290	+205 + 95	+120 + 50	+ 75 + 32	+ 43 + 16	+24 + 6
18)... 30	+ 430 + 300	+240 +110	+149 + 65	+ 92 + 40	+ 53 + 20	+28 + 7
30)... 40	+ 470 + 310	+280 +120	+180 + 80	+112 + 50	+ 64 + 25	+34 + 9
40)... 50	+ 480 + 320	+290 +130				
50)... 65	+ 530 + 340	+330 +140	+220 +100	+134 + 60	+ 76 + 30	+40 +10
65)... 80	+ 550 + 360	+340 +150				
80)... 100	+ 600 + 380	+390 +170	+260 +120	+159 + 72	+ 90 + 36	+47 +12
100)... 120	+ 630 + 410	+400 +180				
120)... 140	+ 710 + 460	+450 +200	+305 +145	+185 + 85	+106 + 43	+54 +14
140)... 160	+ 770 + 520	+460 +210				
160)... 180	+ 830 + 580	+480 +230	+355 +170	+215 +100	+122 + 50	+61 +15
180)... 200	+ 950 + 660	+530 +240				
200)... 225	+1030 + 740	+550 +260	+400 +190	+240 +110	+137 + 56	+69 +17
225)... 250	+1110 + 820	+570 +280				
250)... 280	+1240 + 920	+620 +300	+440 +210	+265 +125	+151 + 62	+75 +18
280)... 315	+1370 +1050	+650 +330				
315)... 355	+1560 +1200	+720 +360	+480 +230	+290 +135	+165 + 68	+83 +20
355)... 400	+1710 +1350	+760 +400				
400)... 450	+1900 +1500	+840 +440	+480 +230	+290 +135	+165 + 68	+83 +20
450)... 500	+2050 +1650	+880 +480				

Nazivna mjera (mm)	H 6	H 7	H 8	H 9	H 11
... 3	+ 6 0	+10 0	+14 0	+ 25 0	+ 60 0
3)... 6	+ 8 0	+12 0	+18 0	+ 30 0	+ 75 0
6)... 10	+ 9 0	+15 0	+22 0	+ 36 0	+ 90 0
10)... 18	+11 0	+18 0	+27 0	+ 43 0	+110 0
18)... 30	+13 0	+21 0	+33 0	+ 52 0	+130 0
30)... 40	+16 0	+25 0	+39 0	+ 62 0	+160 0
40)... 50					
50)... 65	+19 0	+30 0	+46 0	+ 74 0	+190 0
65)... 80					
80)... 100	+22 0	+35 0	+54 0	+ 87 0	+220 0
100)... 120					
120)... 140	+25 0	+40 0	+63 0	+100 0	+250 0
140)... 160					
160)... 180	+29 0	+46 0	+72 0	+115 0	+290 0
180)... 200					
200)... 225	+32 0	+52 0	+81 0	+130 0	+320 0
225)... 250					
250)... 280	+36 0	+57 0	+89 0	+140 0	+360 0
280)... 315					
315)... 355	+40 0	+63 0	+97 0	+155 0	+400 0
355)... 400					
400)... 450	+40 0	+63 0	+97 0	+155 0	+400 0
450)... 500					

Tolerancije mjerila

Tolerancije mjerila za rukavce (JUS M.A1.310 - 1983)



N_{max} — najveća mjera rukavca
 N_{min} — najmanja mjera rukavca
 $T (= N_{max} - N_{min})$ — tolerancija mjere rukavca
 H — tolerancija izrade mjerila za rukavce
 z — položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo
 »ide« ispod najveće mjere N_{max}
 y — najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« iznad najveće mjere N_{max}
 Mjerilo »ide« (dobro) mora ići preko rukavca.
 Odstupanja tog mjerila — mjerena od najveće mjere rukavca N_{max} — iznose:
 odstupanja novog mjerila $-z \pm H/2$
 gornje odstupanje istrošenog mjerila $+y$

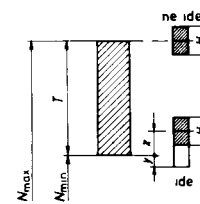
Mjerilo »ne ide« (odmetak) — označujemo ga crvenom bojom — ne smije ići preko rukavca. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najmanje mjere rukavca N_{min} — iznose: $\pm H/2$.

Vrijednosti H , z i y (μm) mjerila za rukavce

Nazivna mjera mm	Vrijednosti	Red tolerancije IT				
		6	7	8	9	11
1)...3	H	2	2	3	3	4
	z	1,5	1,5	2	5	10
	y	1,5	1,5	3	0	0
3)...6	H	2,5	2,5	4	4	5
	z	2	2	3	6	12
	y	1,5	1,5	3	0	0
6)...10	H	2,5	2,5	4	4	6
	z	2	2	3	7	14
	y	1,5	1,5	3	0	0
10)...18	H	3	3	5	5	8
	z	2,5	2,5	4	8	16
	y	2	2	4	0	0
18)...30	H	4	4	6	6	9
	z	3	3	5	9	19
	y	3	3	4	0	0
30)...50	H	4	4	7	7	11
	z	3,5	3,5	6	11	22
	y	3	3	5	0	0
50)...80	H	5	5	8	8	13
	z	4	4	7	13	25
	y	3	3	5	0	0
80)...120	H	6	6	10	10	15
	z	5	5	8	15	28
	y	4	4	6	0	0
120)...180	H	8	8	12	12	18
	z	6	6	9	18	32
	y	4	4	6	0	0

Tolerancije mjerila za provrte (JUS M.A1.310 - 1983)

N_{max} — najveća mjera provrta
 N_{min} — najmanja mjera provrta
 $T (= N_{max} - N_{min})$ — tolerancija mjere provrta
 H — tolerancija izrade mjerila za provrt
 z — položaj tolerancijskog polja za novo mjerilo
 »ide« iznad najmanje mjere N_{min}
 y — najveće odstupanje istrošenog mjerila »ide« ispod najmanje mjere N_{min}
 Mjerilo »ide« (dobro) mora pristajati u provrt.
 Odstupanja tog mjerila — mjerena od najmanje mjere provrta N_{min} — iznose:
 odstupanja novog mjerila $+z \pm H/2$
 donje odstupanje istrošenog mjerila $-y$



Mjerilo »ne ide« (odmetak) — označujemo ga crvenom bojom — ne smije pristajati u provrt. Odstupanja tog mjerila — mjerena od najveće mjere provrta N_{max} — iznose: $\pm H/2$.

Vrijednosti H , z i y (μm) mjerila za provrte

Nazivna mjera mm	Vrijednosti	Red tolerancije IT					
		6	7	8	9	10	11
1)...3	H	1,2	2	2	2	2	4
	z	1	1,5	2	5	5	10
	y	1	1,5	3	0	0	0
3)...6	H	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5
	z	1,5	2	3	6	6	12
	y	1	1,5	3	0	0	0
6)...10	H	1,5	2,5	2,5	2,5	2,5	6
	z	1,5	2	3	7	7	14
	y	1	1,5	3	0	0	0
10)...18	H	2	3	3	3	3	8
	z	2	2,5	4	8	8	16
	y	1,5	2	4	0	0	0
18)...30	H	2,5	4	4	4	4	9
	z	2	3	5	9	9	19
	y	1,5	3	4	0	0	0
30)...50	H	2,5	4	4	4	4	11
	z	2,5	3,5	6	11	11	22
	y	2	3	5	0	0	0
50)...80	H	3	5	5	5	5	13
	z	2,5	4	7	13	13	25
	y	2	3	5	0	0	0
80)...120	H	4	6	6	6	6	15
	z	3	5	8	15	15	28
	y	3	4	6	0	0	0
120)...180	H	5	8	8	8	8	18
	z	4	6	9	18	18	32
	y	3	4	6	0	0	0

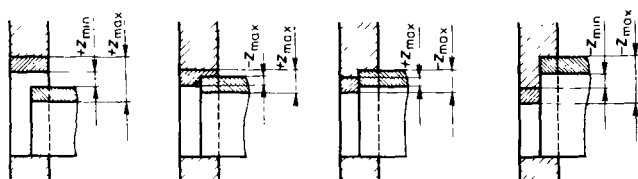
Dosjedi (nalijeganja)

a) Osnovni pojmovi

Dosjed	— oznaka međusobne podudarnosti dvaju strojnih dijelova, određena »zračnošću« ili »prisnošću«.
Zračnost (zazor) z	— razlika između unutarnje mjere većega vanjskog dijela (npr. provrta) i vanjske mjere manjega unutarnjeg dijela (npr. rukavca).
Najveća zračnost z_{max}	— razlika između najveće mjere vanjskog dijela i najmanje mjere unutarnjeg dijela.
Najmanja zračnost z_{min}	— razlika između najmanje mjere vanjskog dijela i najveće mjere unutarnjeg dijela.
Prisnost (preklop) $-z$	— »negativna zračnost« — razlika između vanjske mjere većega unutarnjeg dijela i unutarnje mjere manjega vanjskog dijela (prije sastavljanja obaju dijelova).
Najveća prisnost $-z_{max}$	— razlika između najveće mjere unutarnjeg dijela i najmanje mjere vanjskog dijela.
Najmanja prisnost $-z_{min}$	— razlika između najmanje mjere unutarnjeg dijela i najveće mjere vanjskog dijela.
Tolerancija dosjeda	— razlika između najveće i najmanje zračnosti (prisnosti). Jednaka je zbroju tolerancija vanjskog i unutarnjeg dijela.

b) Vrste dosjeda

Labavi dosjed	— ima uvijek zračnost (+z).
Prelazni dosjed	— ima — ovisno o stvarnoj mjeri obaju dijelova — zračnost (+z) ili prisnost (—z).
Čvrsti ili prisni dosjed	— ima uvijek prisnost (—z).



Labavi dosjed

Prelazni dosjedi

Čvrsti dosjed

c) Sustavi dosjeda

Sustav jedinstvenog provrta ima provrte s tolerancijskim poljem u položaju H. Dosjedi su u tom sustavu određeni položajem tolerancijskog polja rukavca a...zc, i to:

a...h — labavi dosjedi
j...zc — prelazni i čvrsti dosjedi.

Sustav jedinstvenog rukavca ima rukavce s tolerancijskim poljem u položaju h. U tom su sustavu dosjedi određeni položajem tolerancijskog polja provrta A...ZC, i to

A...H — labavi dosjedi
J...ZC — prelazni i čvrsti dosjedi.

d) Izbor dosjeda

Prema preporuci ISO (JUS M.A1.200/201 — 1968) prednost imaju slijedeći dosjedi:

Prednosni dosjedi u sustavu jedinstvenog provrta

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
H 6		— j6, k6	— g5, h5, j5, k5, m5, n5, p5, r5
H 7	— f6, h6, n6, r6	— g6, j6, k6, s6	— f6, m6, p6
H 8	— f7, h9, u8, x8	— d9, e8	— c9, f8, h8
H 9	— h9	— c11, h11	— d10, e9, f8, h8
H 11	— h9	— a11, c11, d9, h11	— b11, d11
H 12			— h12
H 13			— h13

Prednosni dosjedi u sustavu jedinstvenog rukavca

	1. prednost	2. prednost	3. prednost
h 5			— G6, H6, J6, K6, M6, N6, P6, R6
h 6	— F8, H7	— G7	— F7, J7, K7, M7, N7, P7, R7, S7
h 8	— F8, H8		— B9, C9, D9, E8, F7, H9
h 9	— C11, D10, E9, F8, H8	— H11	— H9
h 11	— C11, D10	— A11, H11	— B11, D9, D11, H9
h 12			— H12
h 13			— H13

Neki dosjedi s 3. prednosti, koji se preporučuju samo za ograničena područja promjera, nisu ovdje navedeni.

Tolerancije dosjeda s 1. i 2. prednosti, sabrane su na str. 496 do 499.

Tolerancije dosjeda u sustavu jedinstvenog rukavca (μm)

Nazivna mjera mm	A 11 h 11	C 11 h 11	D 10 h 11	C 11 h 9	D 10 h 9	E 9 h 9	F 8 h 9	F 8 h 8	F 8 h 6	G 7 h 6
1...3	+390 +270	+180 +60	+120 +20	+145 +60	+85 +20	+64 +14	+45 +6	+34 +6	+26 +6	+18 +2
3)...6	+420 +270	+220 +70	+153 +30	+175 +70	+108 +30	+80 +20	+58 +10	+46 +10	+36 +10	+24 +4
6)...10	+460 +280	+260 +80	+188 +40	+206 +80	+134 +40	+97 +25	+71 +13	+57 +13	+44 +13	+29 +5
10)...18	+510 +290	+315 +95	+230 +50	+248 +95	+163 +50	+118 +32	+86 +16	+70 +16	+54 +16	+35 +6
18)...30	+560 +300	+370 +110	+279 +65	+292 +110	+201 +65	+144 +40	+105 +20	+86 +20	+66 +20	+41 +7
30)...40	+630 +310	+440 +120	+340 +80	+342 +120	+242 +80	+174 +50	+126 +25	+103 +25	+80 +25	+50 +9
40)...50	+640 +320	+450 +130	+352 +130	+352 +130	+252 +80	+174 +50	+126 +25	+103 +25	+80 +25	+50 +9
50)...65	+720 +340	+520 +140	+410 +100	+404 +140	+294 +100	+208 +60	+150 +30	+122 +30	+95 +30	+59 +10
65)...80	+740 +360	+530 +150	+414 +150	+414 +150	+300 +100	+208 +60	+150 +30	+122 +30	+95 +30	+59 +10
80)...100	+820 +380	+610 +170	+477 +170	+477 +170	+347 +120	+246 +72	+177 +36	+144 +36	+112 +36	+69 +12
100)...120	+850 +410	+620 +180	+487 +180	+487 +180	+350 +120	+246 +72	+177 +36	+144 +36	+112 +36	+69 +12
120)...140	+960 +460	+700 +200	+550 +200	+550 +200	+390 +140	+285 +85	+206 +43	+169 +43	+131 +43	+79 +14
140)...160	+1020 +520	+710 +210	+555 +145	+560 +210	+405 +145	+285 +85	+206 +43	+169 +43	+131 +43	+79 +14
160)...180	+1080 +580	+730 +230	+580 +230	+580 +230	+420 +145	+285 +85	+206 +43	+169 +43	+131 +43	+79 +14
180)...200	+1240 +660	+820 +240	+645 +240	+645 +240	+470 +170	+330 +100	+237 +50	+194 +50	+151 +50	+90 +15
200)...225	+1320 +740	+840 +260	+645 +170	+665 +260	+470 +170	+330 +100	+237 +50	+194 +50	+151 +50	+90 +15
225)...250	+1400 +820	+860 +280	+685 +280	+685 +280	+500 +170	+370 +110	+267 +56	+218 +56	+169 +56	+101 +17
250)...280	+1560 +920	+940 +300	+720 +190	+750 +300	+530 +190	+370 +110	+267 +56	+218 +56	+169 +56	+101 +17
280)...315	+1690 +1050	+970 +330	+780 +330	+780 +330	+580 +210	+405 +125	+291 +62	+240 +62	+187 +62	+117 +18
315)...355	+1920 +1200	+1080 +360	+800 +210	+860 +360	+580 +210	+405 +125	+291 +62	+240 +62	+187 +62	+117 +18
355)...400	+2070 +1350	+1120 +400	+880 +230	+900 +400	+635 +230	+445 +135	+320 +68	+262 +68	+205 +68	+123 +20
400)...450	+2300 +1500	+1240 +440	+880 +230	+995 +440	+635 +230	+445 +135	+320 +68	+262 +68	+205 +68	+123 +20
450)...500	+2450 +1650	+1280 +480	+1035 +480	+1035 +480	+635 +230	+445 +135	+320 +68	+262 +68	+205 +68	+123 +20

Tolerancije dosjeda H — h (μm)

Nazivna mjera mm	H 11 h 11	H 9 h 11	H 11 h 9	H 9 h 9	H 8 h 9	H 8 h 8	H 7 h 6
1...3	+120 0	+85 0	+50 0	+39 0	+28 0	+16 0	
3)...6	+150 0	+105 0	+60 0	+48 0	+36 0	+20 0	
6)...10	+180 0	+126 0	+72 0	+58 0	+44 0	+24 0	
10)...14	+220 0	+153 0	+86 0	+70 0	+54 0	+29 0	
14)...18	+260 0	+182 0	+104 0	+85 0	+66 0	+34 0	
18)...24	+320 0	+222 0	+124 0	+101 0	+78 0	+41 0	
24)...30	+380 0	+264 0	+148 0	+120 0	+92 0	+49 0	
30)...40	+440 0	+307 0	+174 0	+141 0	+108 0	+57 0	
40)...50	+500 0	+350 0	+200 0	+163 0	+126 0	+65 0	
50)...65	+580 0	+405 0	+230 0	+187 0	+144 0	+75 0	
65)...80	+640 0	+450 0	+260 0	+211 0	+162 0	+84 0	
80)...100	+720 0	+500 0	+280 0	+229 0	+178 0	+93 0	
100)...120	+800 0	+555 0	+310 0	+252 0	+194 0	+103 0	
120)...140							
140)...160							
160)...180							
180)...200							
200)...225							
225)...250							
250)...280							
280)...315							
315)...355							
355)...400							
400)...450							
450)...500							

Tolerancije dosjeda

u sustavu jedinstvenog provrta (µm)

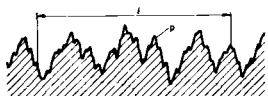
Nazivna mjera mm	H 6 j 6	H 6 k 6	H 7 f 7	H 7 g 6	H 7 j 6	H 7 k 6	H 7 n 6	H 7 r 6	H 7 s 6
1...3	+8 -4	+6 -6	+26 +6	+18 +2	+12 -4	+10 -6	+6 -10	0 -16	-4 -20
3)...6	+10 -6	+7 -9	+34 +10	+24 +4	+14 -6	+11 -9	+4 -16	-3 -23	-7 -27
6)...10	+11 -7	+8 -10	+43 +13	+29 +5	+17 -7	+14 -10	+5 -19	-4 -28	-8 -32
10)...18	+14 -8	+10 -12	+52 +16	+35 +6	+21 -8	+17 -12	+6 -23	-5 -34	-10 -39
18)...30	+17 -9	+11 -15	+62 +20	+41 +7	+25 -9	+19 -15	+6 -28	-7 -41	-14 -48
30)...40	+21 -11	+14 -18	+75 +25	+50 +9	+30 -11	+23 -18	+8 -33	-9 -50	-18 -59
50)...65	+26 -12	+17 -21	+90 +30	+59 +10	+37 -12	+28 -21	+10 -39	-11 -60	-23 -72
65)...80								-13 -62	-29 -78
80)...100	+31 -13	+19 -25	+106 +36	+9 +12	+44 -13	+32 -25	+12 -45	-16 -73	-36 -93
100)...120								-19 -76	-44 -101
120)...140								-23 -88	-52 -117
140)...160	+36 -14	+22 -28	+123 +43	+79 +14	+51 -14	+37 -28	+13 -52	-25 -90	-60 -125
160)...180								-28 -93	-68 -133
180)...200								-31 -106	-76 -151
200)...225	+42 -16	+25 -33	+142 +50	+90 +15	+59 -16	+42 -33	+15 -60	-34 -109	-84 -159
225)...250								-38 -113	-94 -169
250)...280	+48 -16	+28 -36	+160 +56	+101 +17	+68 -16	+48 -36	+18 -66	-42 -126	-106 -190
280)...315								-46 -130	-118 -202
315)...355	+54 -18	+32 -40	+176 +62	+111 +18	+75 -18	+53 -40	+20 -73	-51 -150	-133 -244
355)...400								-57 -63	-151 -169
400)...450	+60 -20	+35 -45	+194 +68	+123 +20	+83 -20	+58 -45	+23 -80	-166 -172	-272 -292

Nazivna mjera mm	H 11 a 11	H 11 c 11	H 11 d 9	H 9 c 11	H 8 d 9	H 8 e 8	H 8 f 7	H 8 u 8	H 8 x 8
1...3	+390 +270	+180 +60	+105 +20	+145 +60	+59 +20	+42 +14	+30 +6		-6 -34
3)...6	+420 +270	+220 +70	+135 +30	+175 +70	+78 +30	+56 +20	+40 +10		-10 -46
6)...10	+460 +280	+260 +80	+166 +40	+206 +80	+98 +40	+69 +25	+50 +13		-12 -56
10)...14	+510 +290	+315 +95	+203 +50	+248 +95	+120 +50	+86 +32	+61 +16		-13/-67 -18/-72
14)...18	+560 +300	+370 +110	+247 +65	+292 +110	+150 +65	+106 +40	+74 +20		-21/-87 -31/-97
18)...24	+630 +310	+440 +120	+302 +80	+342 +120	+181 +80	+128 +50	+89 +25		-21 -99
24)...30	+640 +320	+450 +130	+352 +130	+404 +140	+220 +100	+152 +60	+106 +30		-31 -109
30)...40	+720 +340	+520 +140	+364 +100	+404 +140	+220 +100	+152 +60	+106 +30		-41 -133
40)...50	+740 +360	+530 +150	+414 +150	+414 +150	+220 +100	+152 +60	+106 +30		-56 -148
50)...65	+820 +380	+610 +170	+427 +120	+477 +170	+261 +120	+180 +72	+125 +36		-70 -147
65)...80	+850 +410	+620 +180	+427 +120	+487 +180	+261 +120	+180 +72	+125 +36		-90 -198
80)...100	+960 +460	+700 +200	+550 +200	+550 +200					-107 -233
100)...120	+1020 +520	+710 +210	+495 +145	+560 +210	+308 +145	+211 +85	+146 +43		-127 -253
120)...140	+1080 +580	+730 +230	+580 +230	+580 +230					-147 -273
140)...160	+1240 +660	+820 +240	+645 +240	+645 +240					-164 -308
160)...180	+1320 +740	+840 +260	+575 +170	+665 +260	+357 +170	+244 +100	+168 +50		-186 -330
180)...200	+1400 +820	+860 +280	+685 +280	+685 +280					-212 -356
200)...225	+1560 +920	+940 +300	+750 +300	+750 +300					-234 -396
225)...250	+1690 +1050	+970 +330	+640 +190	+780 +330	+401 +190	+272 +110	+189 +56		-269 -431
250)...280	+1920 +1200	+1080 +360	+710 +210	+860 +360	+439 +210	+303 +125	+208 +62		-301 -479
280)...315	+2070 +1350	+1120 +400	+210	+900 +400	+210	+125	+62		-346 -524
315)...355	+2300 +1500	+1240 +440	+785 +230	+995 +440	+482 +230	+329 +135	+228 +68		-393 -587
355)...400	+2450 +1650	+1280 +480	+230	+1035 +480	+482 +230	+329 +135	+228 +68		-443 -637

POVRŠINSKA HRAPAVOST
(JUS M.A1.020/021 — 1964)

Površinska hrapavost su mikrogeometrijske nepravilnosti na površini predmeta koje su mnogo puta manje od dimenzija promatranog dijela površine.

Pod pojam »hrapavost« ne svrstavamo makrogeometrijskih nepravilnosti površine kojih se dimenzije približuju duljinskoj mjeri promatrane površine ili je premašuju, npr. valovitost.



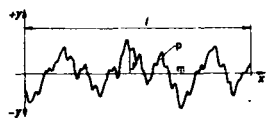
p — profil je presjek promatrane površine presječen određom ravninom

l — referentna duljina je (dogovorena) duljina dijela profila izabranog za određivanje hrapavosti.

Referentne duljine l izabiremo prema vrsti i finoći obrade i mjernoj metodi:

Postupak obrade	Prikladna referentna duljina l (mm)		
blanjanje	2,5	8	25
glodanje, bušenje	0,8	2,5	8
tokarenje, razvrtavanje	0,8	2,5	
brušenje	0,25	0,8	2,5
honanje, lepanje	0,25	0,8	

Sistem srednje linije



m — srednja linija profila siječe profil p tako da je — u granicama referentne duljine l — zbroj kvadrata udaljenosti y svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu.

Prosječno odstupanje profila R_a je srednja aritmetička udaljenost profila od srednje linije

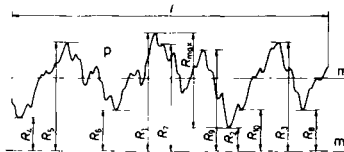
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

Približna vrijednost prosječnog odstupanja profila iznosi

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

y odn. y_i uzimamo u apsolutnim vrijednostima — bez obzira na predznak + ili —.

Visine neravnina



p — profil
 l — referentna duljina
 m — srednja linija profila
 m_z — paralela sa srednjom linijom koja ne siječe profil

Prosječna visina neravnina R_z (mjerena u 10 točaka) je razlika između srednjih aritmetičkih vrijednosti udaljenosti R_i i to 5 najviših i 5 najnižih točaka profila — u granicama referentne duljine l — od bilo koje linije koja ne siječe profila, a paralelna je sa srednjom linijom

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + \dots + R_9) - (R_2 + R_4 + \dots + R_{10})}{5}$$

Najveća visina neravnina R_{max} je razmak između dvaju pravaca, paralelnih sa srednjom linijom, koji dotiču — u granicama referentne duljine l — najviše odnosno najniže točke profila

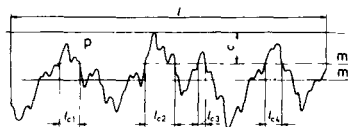
$$R_{max} = R_1 - R_2$$

Kao orijentacija služe izrazi:

$$R_z \approx 4 R_a$$

$$R_{max} \approx 1,6 R_z \quad (\approx 6,4 R_a)$$

Nošenje profila



p — profil
 l — referentna duljina
 m — srednja linija profila
 m_c — paralela sa srednjom linijom, udaljena od najviše točke profila za razmak c

Duljina nošenja profila l_n je zbroj odsječaka što ih — u granicama referentne duljine l — profil odsijeca na paraleli sa srednjom linijom, a koji su udaljeni od najviše točke profila za razmak c

$$l_n = l_{c1} + l_{c2} + \dots + l_{cn}$$

Za razmak c preporučuju se vrijednosti ovisno o najvećoj visini neravnina R_{max} :

R_{max} (μm)	... 1	1) ... 2,5	2,5) ... 4	4) ... 6
c (μm)	0,1	0,25	0,6	1,6

Postotak nošenja profila p_n

$$p_n = \frac{l_n}{l} 100 (\%)$$

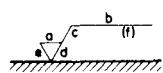
U strojogradnji postotak nošenja neka ne bude veći od 40%.

Stupanj površinske hrapavosti (JUS M.A0.065 – 1981) u ovisnosti o najvećem prosječnom odstupanju profila R_a

$R_{a \max}$ μm	Stupanj hrapavosti	$R_{a \max}$ μm	Stupanj hrapavosti	$R_{a \max}$ μm	Stupanj hrapavosti
0,025	N 1	0,4	N 5	6,3	N 9
0,05	N 2	0,8	N 6	12,5	N 10
0,1	N 3	1,6	N 7	25	N 11
0,2	N 4	3,2	N 8	50	N 12

Oznake površinske hrapavosti u nacrtima (JUS M.A0.065 – 1981)

Oznake hrapavosti pri obradi odvajanjem čestica:



a – prosječna odstupanja profila R_a (μm) ili oznaka stupnja hrapavosti (N...),

b – postupak obrade,

c – referentna duljina l ,

d – smjer obrade s obzirom na projekcijsku ravninu (usporedno: =, pravokutno: \perp , unakrsno: \times , u više smjerova: M, približno kružno prema središtu: C, približno radijalno prema središtu: R),

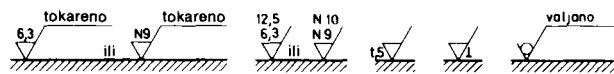
e – dodatak za strojnu obradu,

f – drugi podaci o hrapavosti.

Oznaka hrapavosti bez obrade odvajanjem čestica:



Primjeri:



Odnos reda tolerancije i stupnja hrapavosti

(JUS M.A1.025 – 1981 in M.A0.065 – 1981)

Red tolerancije (ISO)	Stupanj hrapavosti				
	za nazivne mjere (mm)				
	... 3	3) ... 18	18) ... 80	80) ... 250	250) ...
IT 5	N 3	N 4	N 5	N 5	N 6
IT 6	N 4	N 5	N 5	N 6	N 6
IT 7	N 5	N 5	N 6	N 7	N 7
IT 8	N 5	N 6	N 7	N 7	N 8
IT 9	N 6	N 6	N 7	N 8	N 9
IT 10	N 7	N 7	N 8	N 9	N 9
IT 11	N 7	N 8	N 9	N 9	N 10
JT 12	N 8	N 8	N 9	N 10	N 11
IT 13	N 9	N 9	N 10	N 11	N 11
IT 14	N 10	N 10	N 11	N 11	N 12

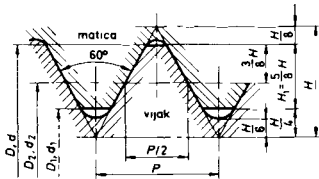
Postupak obrade u ovisnosti od stupnja hrapavosti

Postupak obrade	R_a (μm) 0,012	Razred hrapavosti N ...											R_a (μm)					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	100	200	400	800	
Ručna obrada																		
- grubo turpijanje																		
- fino turpijanje																		
Lijevanje																		
- u pijesak																		
- u kokilu																		
- u školjku																		
Kovanje																		
- toplo, slobodno																		
- toplo u ukovnju																		
- hladno u ukovnju																		
Valjanje																		
- toplo																		
- hladno																		
Pjeskarenje																		
Tokarenje																		
- grubo																		
- fino																		
Blanjanje																		
- grubo																		
- fino																		
Glodanje																		
- grubo																		
- fino																		
Bušenje svrdlom																		
Razvrtavanje																		
Brušenje																		
- grubo																		
- fino																		
Poliranje																		
- mehaničko																		
- električno																		
Honanje, lepanje																		
»Superfiniš«																		
Obrada navoja																		
- rezanje																		
- brušenje																		
Obrada zubaca																		
- blanjanje																		
- glodanje																		
- brušenje																		

NAVOJI

Metarski navoji s trokutnim profilom ISO

Profil metarskih navoja ISO (JUS M.B0.010 — 1972)



Korak navoja: P
Teoretska dubina navoja

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = 0,866\ 025\ P$$

Nosiva dubina navoja

$$H_1 = \frac{5}{8} H = 0,541\ 266\ P$$

d, d_1, d_2 — promjeri unutarnjeg navoja (vijka)

D, D_1, D_2 — promjeri vanjskog navoja (matice)

$$d = D \quad d_1 = D_1 = d - 2H_1 \quad d_2 = D_2 = d - 3/4 \cdot H_2$$

Mjere u mm

P	H	(5/8) H	(3/8) H	H/4	H/6	H/8
0,2	0,173 2	0,108 3	0,065 0	0,043 3	0,028 9	0,021 7
0,25	0,216 5	0,135 3	0,081 2	0,054 1	0,036 1	0,027 1
0,3	0,259 8	0,162 4	0,097 4	0,065 0	0,043 3	0,032 5
0,35	0,303 1	0,189 4	0,113 7	0,075 8	0,050 5	0,037 9
0,4	0,346 4	0,216 5	0,129 9	0,086 6	0,057 7	0,043 3
0,45	0,389 7	0,243 6	0,146 1	0,097 4	0,065 0	0,048 7
0,5	0,433 0	0,270 6	0,162 4	0,108 3	0,072 2	0,054 1
0,6	0,519 6	0,324 8	0,194 9	0,129 9	0,086 6	0,065 0
0,7	0,606 2	0,378 9	0,227 3	0,151 6	0,101 0	0,075 8
0,75	0,649 5	0,406 0	0,243 6	0,162 4	0,108 3	0,081 2
0,8	0,692 8	0,433 0	0,259 8	0,173 2	0,115 5	0,086 6
1	0,866 0	0,541 3	0,324 8	0,216 5	0,144 3	0,108 3
1,25	1,082 5	0,676 6	0,405 9	0,270 6	0,180 4	0,135 3
1,5	1,299 0	0,811 9	0,487 1	0,324 8	0,216 5	0,162 4
1,75	1,515 5	0,947 2	0,568 3	0,378 9	0,252 6	0,189 4
2	1,732 1	1,082 5	0,649 5	0,433 0	0,288 7	0,216 5
2,5	2,165 1	1,353 2	0,811 9	0,541 3	0,360 8	0,270 6
3	2,598 1	1,623 8	0,974 3	0,649 5	0,433 0	0,324 8
3,5	3,031 1	1,894 4	1,136 7	0,757 8	0,505 2	0,378 9
4	3,464 1	2,165 1	1,299 0	0,866 0	0,577 4	0,433 0
4,5	3,897 1	2,435 7	1,461 4	0,974 3	0,649 5	0,487 1
5	4,330 1	2,706 3	1,623 8	1,082 5	0,721 7	0,541 3
5,5	4,763 1	2,977 0	1,786 2	1,190 8	0,793 9	0,595 4
6	5,196 2	3,247 6	1,948 6	1,299 0	0,866 0	0,649 5

Metarski normalni navoji (JUS M.B0.012 — 1972)

Oznaka*	P mm	d = D mm	d ₂ = D ₂ mm	d ₁ = D ₁ mm	A mm ²
M1	0,25	1	0,838	0,729	0,377
M1,1	0,25	1,1	0,938	0,829	0,494
M1,2	0,25	1,2	1,038	0,929	0,626
M1,4	0,3	1,4	1,205	1,075	0,836
M1,6	0,35	1,6	1,373	1,221	1,08
M1,8	0,35	1,8	1,573	1,421	1,47
M2	0,4	2	1,740	1,567	1,79
M2,2	0,45	2,2	1,908	1,713	2,13
M2,5	0,45	2,5	2,208	2,013	2,98
M3	0,5	3	2,675	2,459	4,48
M3,5	0,6	3,5	3,110	2,850	6,00
M4	0,7	4	3,545	3,242	7,45
M4,5	0,75	4,5	4,013	3,688	10,1
M5	0,8	5	4,480	4,134	12,7
M6	1	6	5,350	4,917	17,9
(M7)	1	7	6,350	5,917	26,3
M8	1,25	8	7,188	6,647	32,8
(M9)	1,25	9	8,188	7,647	43,8
M10	1,5	10	9,026	8,376	52,3
(M11)	1,5	11	10,026	9,376	65,9
M12	1,75	12	10,863	10,106	76,2
M14	2	14	12,701	11,835	105
M16	2	16	14,701	13,835	144
M18	2,5	18	16,376	15,294	175
M20	2,5	20	18,376	17,294	225
M22	2,5	22	20,376	19,294	282
M24	3	24	22,051	20,752	325
M27	3	27	25,051	23,752	427
M30	3,5	30	27,727	26,211	519
M33	3,5	33	30,727	29,211	647
M36	4	36	33,402	31,670	759
M39	4	39	36,402	34,670	913
M42	4,5	42	39,077	37,129	1045
M45	4,5	45	42,077	40,129	1224
M48	5	48	44,752	42,587	1377
M52	5	52	48,752	46,587	1652
M56	5,5	56	52,428	50,046	1905
M60	5,5	60	56,428	54,046	2227
M64	6	64	60,103	57,505	2520
M68	6	68	64,103	61,505	2888

* Deblje tiskane oznake su navoji koji u upotrebi imaju prvu prednost, a obično tiskane oznake su navoji koji imaju drugu prednost. Navoji u zagradama imaju treću prednost i valja ih upotrebljavati samo iznimno u prijeko potrebnim slučajevima.

Metarski fini (sitni) navoji (JUS M.B0.013 — 1972)

Oznaka ¹⁾ $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka ¹⁾ $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka ¹⁾ $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka ¹⁾ $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 1 × 0,2	0,870	0,783	(M 15 × 1,5)	14,026	13,376	(M 35 × 1,5) ⁴⁾	34,026	33,376	(M 58 × 4)	55,402	53,670
M 1,1 × 0,2	0,970	0,883	(M 15 × 1)	14,350	13,917	M 36 × 3	34,051	32,752	(M 58 × 3)	56,051	54,752
M 1,2 × 0,2	1,070	0,983	M 16 × 1,5	15,026	14,376	M 36 × 2	34,701	33,835	(M 58 × 2)	56,701	55,835
M 1,4 × 0,2	1,270	1,183	M 16 × 1	15,350	14,917	M 36 × 1,5	35,026	34,376	(M 58 × 1,5)	57,026	56,376
M 1,6 × 0,2	1,470	1,383	(M 17 × 1,5)	16,026	15,376	(M 38 × 1,5)	37,026	36,376	M 60 × 4	57,402	55,670
M 1,8 × 0,2	1,670	1,583	(M 17 × 1)	16,350	15,917	M 39 × 3	37,051	35,752	M 60 × 3	58,051	56,752
M 2 × 0,25	1,838	1,729	M 18 × 2	16,701	15,835	M 39 × 2	37,701	36,835	M 60 × 2	58,701	57,835
M 2,2 × 0,25	2,038	1,929	M 18 × 1,5	17,026	16,376	M 39 × 1,5	38,026	37,376	M 60 × 1,5	59,026	58,376
M 2,5 × 0,35	2,273	2,121	M 18 × 1	17,350	16,917	(M 40 × 3)	38,051	36,752	(M 62 × 4)	59,402	57,670
M 3 × 0,35	2,773	2,621	M 20 × 2	18,701	17,835	(M 40 × 2)	38,701	37,835	(M 62 × 3)	60,051	58,752
M 3,5 × 0,35	3,273	3,121	M 20 × 1,5	19,026	18,376	(M 40 × 1,5)	39,026	38,376	(M 62 × 2)	60,701	59,835
M 4 × 0,5	3,675	3,459	M 20 × 1	19,350	18,917	M 42 × 4	39,402	37,670	(M 62 × 1,5)	61,026	60,376
M 4,5 × 0,5	4,175	3,959	M 22 × 2	20,701	19,835	M 42 × 3	40,051	38,752	M 64 × 4	61,402	59,670
M 5 × 0,5	4,675	4,459	M 22 × 1,5	21,026	20,376	M 42 × 2	40,701	39,835	(M 64 × 3)	62,051	60,752
(M 5,5 × 0,5)	5,175	4,959	M 22 × 1	21,350	20,917	M 42 × 1,5	41,026	40,376	M 64 × 2	62,701	61,835
M 6 × 0,75	5,513	5,188	M 24 × 2	22,701	21,835	M 45 × 4	42,402	40,670	M 64 × 1,5	63,026	62,376
(M 7 × 0,75)	6,513	6,188	M 24 × 1,5	23,026	22,376	M 45 × 3	43,051	41,752	(M 65 × 4)	62,402	60,670
M 8 × 1	7,350	6,917	M 24 × 1	23,350	22,917	M 45 × 2	43,701	42,835	(M 65 × 3)	63,051	61,752
M 8 × 0,75	7,513	7,188	(M 25 × 2)	23,701	22,835	M 45 × 1,5	44,026	43,376	(M 65 × 2)	63,701	62,835
(M 9 × 1)	8,350	7,917	(M 25 × 1,5)	24,026	23,376	M 48 × 4	45,402	43,670	(M 65 × 1,5)	64,026	63,376
(M 9 × 0,75)	8,513	8,188	(M 25 × 1)	24,350	23,917	M 48 × 3	46,051	44,752	M 68 × 4	65,402	63,670
M 10 × 1,25	9,188	8,647	(M 26 × 1,5)	25,026	24,376	M 48 × 2	46,701	45,835	M 68 × 3	66,051	64,752
M 10 × 1	9,350	8,917	M 27 × 2	25,701	24,835	M 48 × 1,5	47,026	46,376	M 68 × 2	66,701	65,835
M 10 × 0,75	9,513	9,188	M 27 × 1,5	26,026	25,376	(M 50 × 3)	48,051	46,752	M 68 × 1,5	67,026	66,376
(M 11 × 1)	10,350	9,917	M 27 × 1	26,350	25,917	(M 50 × 2)	48,701	47,835	(M 70 × 6)	66,103	63,505
(M 11 × 0,75)	10,513	10,188	(M 28 × 2)	26,701	25,835	(M 50 × 1,5)	49,026	48,376	(M 70 × 4)	67,402	65,670
M 12 × 1,5	11,026	10,376	(M 28 × 1,5)	27,026	26,376	M 52 × 4	49,402	47,670	(M 70 × 3)	68,051	66,752
M 12 × 1,25	11,188	10,647	(M 28 × 1)	27,350	26,917	M 52 × 3	50,051	48,752	(M 70 × 2)	68,701	67,835
M 12 × 1	11,350	10,917	(M 30 × 3) ³⁾	28,051	26,752	M 52 × 2	50,701	49,835	(M 70 × 1,5)	69,026	68,376
M 14 × 1,5	13,026	12,376	M 30 × 2	28,701	27,835	M 52 × 1,5	51,026	50,376	M 72 × 6	68,103	65,505
(M 14 × 1,25) ³⁾	13,188	12,647	M 30 × 1,5	29,026	28,376	(M 55 × 4)	52,402	50,670	M 72 × 4	69,402	67,670
M 14 × 1	13,350	12,917	M 30 × 1	29,350	28,917	(M 55 × 3)	53,051	51,752	M 72 × 3	70,051	68,752
			(M 32 × 2)	30,701	29,835	(M 55 × 2)	53,701	52,835	M 72 × 2	70,701	69,835
			(M 32 × 1,5)	31,026	30,376	(M 55 × 1,5)	54,026	53,376	M 72 × 1,5	71,026	70,376
			(M 33 × 3) ³⁾	31,051	29,752	M 56 × 4	53,402	51,670	(M 75 × 4)	72,402	70,670
			M 33 × 2	31,701	30,835	M 56 × 3	54,051	52,752	(M 75 × 3)	73,051	71,752
			M 33 × 1,5	32,026	31,376	M 56 × 2	54,701	53,835	(M 75 × 2)	73,701	72,835
						M 56 × 1,5	55,026	54,376	(M 75 × 1,5)	74,026	73,376

¹⁾ Vidi napomenu na str. 505! — ²⁾ Samo za svjećice motora s unutarnjim izgaranjem.
³⁾ Po mogućnosti ne upotrebljavati!

⁴⁾ Samo za matice za učvršćivanje valjnih ležaja.

Oznaka* $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka* $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka* $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm	Oznaka* $d (= D) \times P$ mm	$d_2 = D_2$ mm	$d_1 = D_1$ mm
M 76 × 6	72,103	69,505	M 115 × 3	113,051	111,752	M 170 × 6	166,103	163,505	(M 230 × 6)	226,103	223,505
M 76 × 4	73,402	71,670	M 115 × 2	113,701	112,835	M 170 × 4	167,402	165,670	(M 230 × 4)	227,402	225,670
M 76 × 3	74,051	72,752	M 120 × 6	116,103	113,505	M 170 × 3	168,051	166,752	(M 230 × 3)	228,051	226,752
M 76 × 2	74,701	73,835	M 120 × 4	117,402	115,670	(M 175 × 6)	171,103	168,505	(M 235 × 6)	231,103	228,505
M 76 × 1,5	75,026	74,376	M 120 × 3	118,051	116,752	(M 175 × 4)	172,402	170,670	(M 235 × 4)	232,402	230,670
(M 78 × 2)	76,701	75,835	M 120 × 2	118,701	117,835	(M 175 × 3)	173,051	171,752	(M 235 × 3)	233,051	231,752
M 80 × 6	76,103	73,505	M 125 × 6	121,103	118,505	M 180 × 6	176,103	173,505	M 240 × 6	236,103	233,505
M 80 × 4	77,402	75,670	M 125 × 4	122,402	120,670	M 180 × 4	177,402	175,670	M 240 × 4	237,402	235,670
M 80 × 3	78,051	76,752	M 125 × 3	123,051	121,752	M 180 × 3	178,051	176,752	M 240 × 3	238,051	236,752
M 80 × 2	78,701	77,835	M 125 × 2	123,701	122,835	(M 185 × 6)	181,103	178,505	(M 245 × 6)	241,103	238,505
M 80 × 1,5	79,026	78,376	M 130 × 6	126,103	123,505	(M 185 × 4)	182,402	180,670	(M 245 × 4)	242,402	240,670
(M 82 × 2)	80,701	79,835	M 130 × 4	127,402	125,670	(M 185 × 3)	183,051	181,752	(M 245 × 3)	243,051	241,752
M 85 × 6	81,103	78,505	M 130 × 3	128,051	126,752	M 190 × 6	186,103	183,505	M 250 × 6	246,103	243,505
M 85 × 4	82,402	80,670	M 130 × 2	128,701	127,835	M 190 × 4	187,402	185,670	M 250 × 4	247,402	245,670
M 85 × 3	83,051	81,752	(M 135 × 6)	131,103	128,505	M 190 × 3	188,051	186,752	M 250 × 3	248,051	246,752
M 85 × 2	83,701	82,835	(M 135 × 4)	132,402	130,670	(M 195 × 6)	191,103	188,505	(M 255 × 6)	251,103	248,505
M 90 × 6	86,103	83,505	(M 135 × 3)	133,051	131,752	(M 195 × 4)	192,402	190,670	(M 255 × 4)	252,402	250,670
M 90 × 4	87,402	85,670	(M 135 × 2)	133,701	132,835	(M 195 × 3)	193,051	191,752	M 260 × 6	256,103	253,505
M 90 × 3	88,051	86,752	M 140 × 6	136,103	133,505	M 200 × 6	196,103	193,505	M 260 × 4	257,402	255,670
M 90 × 2	88,701	87,835	M 140 × 4	137,402	135,670	M 200 × 4	197,402	195,670	(M 265 × 6)	261,103	258,505
M 95 × 6	91,103	88,505	M 140 × 3	138,051	136,752	M 200 × 3	198,051	196,752	(M 265 × 4)	262,402	260,670
M 95 × 4	92,402	90,670	M 140 × 2	138,701	137,835	(M 205 × 6)	201,103	198,505	(M 270 × 6)	266,103	263,505
M 95 × 3	93,051	91,752	(M 145 × 6)	141,103	138,505	(M 205 × 4)	202,402	200,670	(M 270 × 4)	267,402	265,670
M 95 × 2	93,701	92,835	(M 145 × 3)	143,051	141,752	(M 205 × 3)	203,051	201,752	(M 275 × 6)	271,103	268,505
M 100 × 6	96,103	93,505	(M 145 × 2)	143,701	142,835	M 210 × 6	206,103	203,505	(M 275 × 4)	272,402	270,670
M 100 × 4	97,402	95,670	M 150 × 6	146,103	143,505	M 210 × 4	207,402	205,670	M 280 × 6	276,103	273,505
M 100 × 3	98,051	96,752	M 150 × 4	147,402	145,670	M 210 × 3	208,051	206,752	M 280 × 4	277,402	275,670
M 100 × 2	98,701	97,835	M 150 × 3	148,051	146,752	(M 215 × 6)	211,103	208,505	(M 285 × 6)	281,103	278,505
M 105 × 6	101,103	98,505	M 150 × 2	148,701	147,835	(M 215 × 4)	212,402	210,670	(M 285 × 4)	282,402	280,670
M 105 × 4	102,402	100,670	(M 155 × 6)	151,103	148,505	(M 215 × 3)	213,051	211,752	(M 290 × 6)	286,103	283,505
M 105 × 3	103,051	101,752	(M 155 × 3)	152,402	150,670	M 220 × 6	216,103	213,505	(M 290 × 4)	287,402	285,670
M 105 × 2	103,701	102,835	(M 155 × 2)	153,051	151,752	M 220 × 4	217,402	215,670	(M 295 × 6)	291,103	288,505
M 110 × 6	106,103	103,505	M 160 × 6	156,103	153,505	M 220 × 3	218,051	216,752	(M 295 × 4)	292,402	290,670
M 110 × 4	107,402	105,670	M 160 × 4	157,402	155,670	(M 225 × 6)	221,103	218,505	M 300 × 6	296,103	293,505
M 110 × 3	108,051	106,752	M 160 × 3	158,051	156,752	(M 225 × 4)	222,402	220,670	M 300 × 4	297,402	295,670
M 110 × 2	108,701	107,835	(M 165 × 6)	161,103	158,505	(M 225 × 3)	223,051	221,752			
M 115 × 6	111,103	108,505	(M 165 × 4)	162,402	160,670						
M 115 × 4	112,402	110,670	(M 165 × 3)	163,051	161,752						

* Vidi napomenu na str. 505!

* Vidi napomenu na str. 505!

Tolerancije metarskih navoja (ISO)
(JUS M.B0.220 — 1967, 221 — 1974)

Nazivni promjeri navoja jesu promjeri profila navoja ISO (vidi str. 504 do 509). To su:

veliki nazivni promjeri d, D srednji nazivni promjeri d_2, D_2
mali nazivni promjeri d_1, D_1

Malim slovima označujemo vanjski navoj (vijak), a velikima unutarnji navoj (maticu).

Stvarni promjeri navoja su promjeri koje određujemo mjerenjem izrađenog navoja, a sadrže netočnosti mjerenja.

Grafični promjeri navoja su najveći i najmanji promjeri koje još dopuštamo. Gornje odnosno donje odstupanje je razlika između najvećeg odnosno najmanjeg promjera i nazivnog promjera navoja.

Gornja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja: Donja odstupanja velikog, srednjeg i malog promjera navoja:

vijka $a_{max} \quad a_{2max} \quad a_{1max}$ vijka $a_{min} \quad a_{2min} \quad a_{1min}$
matice $A_{max} \quad A_{2max} \quad A_{1max}$ matice $A_{min} \quad A_{2min} \quad A_{1min}$

Tolerancija promjera navoja je razlika između gornjeg i donjeg odstupanja (odn. između najvećeg i najmanjeg promjera).

Tolerancija je određena veličinom i položajem s obzirom na nazivni promjer.

Veličine tolerancija su određene sa 7 stupnjeva, koje označujemo brojkama 3 do 9, od kojih upotrebljavamo:

za promjere	veličine tolerancija
d	4, 6, 8
d_2, d_1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
D_2, D_1	4, 5, 6, 7, 8

Tolerancije velikoga promjera navoja matice D nisu propisane.

Položaj tolerancije s obzirom na nazivni promjer označujemo slovima. Određeno je:

5 položaja za navoje vijaka: e, g, h, k, p i 2 položaja za navoje matice: G, H
Ti su položaji tolerancija: e, g — ispod nazivnog promjera vijka, h — tik ispod nazivnog promjera vijka, k, p — iznad nazivnog promjera vijka, G — iznad nazivnog promjera matice, H — tik iznad nazivnog promjera matice.

Oznaka tolerancije je kombinacija oznaka za veličinu tolerancije i njezin položaj (npr. 6h).

Primjer oznake tolerancije:

- za metarski vijčani navoj M20 s tolerancijom 6h: M20 – 6h
- za isti navoj, ali s tolerancijom 4k za srednji promjer i 6h za veliki promjer: M20 – 4k 6h
- za metarski navoj M20 s tolerancijom 6H: M20 – 6H.

Nosiva duljina l (tj. duljina dodira između matice i vijka u smjeru osi) određena je korakom P i srednjim nazivnim promjerom vijka d .

Normalna nosiva duljina l_N

d mm	P mm	l_N^* mm	d mm	P mm	l_N^* mm
0,99)... 1,4	0,2	0,5)... 1,4	11,2)... 22,4	2	8)... 24
	0,25	0,6)... 1,7		2,5	10)... 30
	0,3	0,7)... 2		1	4)... 12
1,4)... 2,8	0,2	0,5)... 1,5	22,4)... 45	1,5	6,3)... 19
	0,25	0,6)... 1,9		2	8,5)... 25
	0,35	0,8)... 2,6		3	12)... 36
	0,4	1)... 3		3,5	15)... 45
	0,45	1,3)... 3,8		4	18)... 53
2,8)... 5,6	0,35	1)... 3	45)... 90	4,5	21)... 63
	0,5	1,5)... 4,5		1,5	7,5)... 22
	0,6	1,7)... 5		2	9,5)... 28
	0,7	2)... 6		3	15)... 45
	0,75	2,2)... 6,7		4	19)... 56
	0,8	2,5)... 7,5		5	24)... 71
5,6)... 11,2	0,75	2,4)... 7,1	90)... 180	5,5	28)... 85
	1	3)... 9		6	32)... 95
	1,25	4)... 12		2	12)... 36
	1,5	5)... 15		3	18)... 53
11,2)... 22,4	1	3,8)... 11	180)... 355	4	24)... 71
	1,25	4,5)... 13		6	36)... 106
	1,5	5,6)... 16		3	20)... 60
	1,75	6)... 18		4	26)... 80

* Kratka nosiva duljina $l_S < l_{N \min}$, duga nosiva duljina $l_L > l_{N \max}$.

Preporučene tolerancije (ovisno o kvaliteti tolerancije i nosivoj duljini l)

Kvaliteta izrade navoja	Preporučene tolerancije					
	za navoj vijka			za navoj matice		
	Nosiva duljina			Nosiva duljina		
	l_S	l_N	l_L	l_S	l_N	l_L
fina — bez labavosti — mala prisnost — veća prisnost	3h 4h	4h	5h 4h	4H	5H	6H
	4k 6h*	4k 6h*	4k 6h*			
	3p 4h	3p 4h	3p 4h			
srednja — velika labavost — mala labavost — bez labavosti	6e	6e	7e 6e	5G	6G	7G
	5g 6g	6g	7g 6g			
	5h 6h	6h	7h 6h			
gruba — mala labavost — bez labavosti	8g	8g	9g 8g	5H	6H	7H

* Također 3k 4h.

Odstupanja (po JUS M.B0.230 – 1967 i M.B0.232 – 1974) za preporučene tolerancije uz nosivu duljinu l_N sabrana su na str. 512 do 518.

Tolerancije srednjega
Gornje i donje

promjera navoja vijka d_2
odstupanje $a_{2\max}$ i $a_{2\min}$ (μm)

Nazivni pro- mjer d mm	Korak P mm	6e	8g	6g	Tolerancije			
					6h	4h	4k6h	3p4h
1,5)...2,8	0,2	—	—	—17 —67	0 —50	0 —32	—	—
	0,25	—	—	—18 —74	0 —56	0 —36	—	—
	0,35	—	—	—19 —82	0 —63	0 —40	—	—
	0,4	—	—	—19 —86	0 —67	0 —42	—	—
	0,45	—	—	—20 —91	0 —71	0 —45	—	—
	0,35	—	—	—19 —86	0 —67	0 —42	—	—
2,8)...5,6	0,5	—50 —125	—	—20 —95	0 —75	0 —48	+32 +30	+68 +30
	0,6	—53 —138	—	—21 —106	0 —85	0 —53	+39 +14	+73 +31
	0,7	—56 —146	—	—22 —112	0 —90	0 —56	+44 +12	+77 +32
	0,75	—56 —146	—	—22 —112	0 —90	0 —56	+44 +12	+77 +32
	0,8	—60 —155	—24 —174	—24 —119	0 —95	0 —60	+48 +12	+82 +34
	0,75	—56 —156	—	—22 —122	0 —100	0 —63	+51 +12	+82 +32
5,6)...11,2	1	—60 —172	—26 —206	—26 —138	0 —112	0 —71	+63 +8	+92 +36
	1,25	—63 —181	—28 —218	—28 —146	0 —118	0 —75	+70 +5	+98 +38
	1,5	—67 —199	—32 —244	—32 —164	0 —132	0 —85	+82 +3	+109 +42
11,2)...22,4	1	—60 —178	—26 —216	—26 —144	0 —118	0 —75	+75 +0	+96 +36
	1,25	—63 —195	—28 —240	—28 —160	0 —132	0 —85	+85 +0	+105 +38
	1,5	—67 —207	—32 —256	—32 —172	0 —140	0 —90	+90 +0	+113 +42
	1,75	—71 —221	—34 —270	—34 —184	0 —150	0 —95	+95 +0	+119 +44
	2	—71 —231	—38 —288	—38 —198	0 —160	0 —100	+100 +0	+128 +48
	2,5	—80 —250	—42 —307	—42 —212	0 —170	0 —106	+106 +0	+137 +52

Nazivni pro- mjer d mm	Korak P mm	6e	8g	6g	Tolerancije			
					6h	4h	4k6h	3p4h
22,4)...45	1	—60 —185	—26 —226	—26 —151	0 —125	0 —80	+80 0	+99 +36
	1,5	—67 —217	—32 —268	—32 —182	0 —150	0 —95	+95 0	+117 +42
	2	—71 —241	—38 —303	—38 —208	0 —170	0 —106	+106 0	+133 +48
	3	—85 —285	—48 —363	—48 —248	0 —200	0 —125	+125 0	+158 +58
	3,5	—90 —302	—53 —388	—53 —265	0 —212	0 —132	+132 0	+169 +63
	4	—95 —319	—60 —415	—60 —284	0 —224	0 —140	+140 0	+182 +70
	4,5	—100 —336	—63 —438	—63 —299	0 —236	0 —150	+150 0	+191 +73
	1,5	—67 —227	—32 —282	—32 —192	0 —160	0 —100	+100 0	+122 +42
	2	—71 —251	—38 —318	—38 —218	0 —180	0 —112	+112 0	+138 +48
	3	—85 —297	—48 —383	—48 —260	0 —212	0 —132	+132 0	+164 +58
45)...90	4	—95 —331	—60 —435	—60 —296	0 —236	0 —150	+150 0	+188 +70
	5	—106 —356	—71 —471	—71 —321	0 —250	0 —160	+160 0	+206 +81
	5,5	—112 —377	—75 —500	—75 —340	0 —265	0 —170	—	—
	6	—118 —398	—80 —530	—80 —360	0 —280	0 —180	—	—
	2	—71 —261	—38 —338	—38 —228	0 —190	0 —118	+118 0	+143 +48
90)...180	3	—85 —309	—48 —403	—48 —272	0 —224	0 —140	+140 0	+170 +58
	4	—95 —345	—60 —460	—60 —310	0 —250	0 —160	+160 0	+195 +70
	6	—118 —418	—80 —555	—80 —380	0 —300	0 —190	—	—
	3	—85 —335	—48 —448	—48 —298	0 —250	0 —160	+160 0	+183 +58
180)...355	4	—95 —375	—60 —510	—60 —340	0 —280	0 —180	+180 0	+210 +70
	6	—118 —433	—80 —580	—80 —395	0 —315	0 —200	—	—

Tolerancije srednjega promjera navoja matice D_2
Gornje odstupanje $A_{2,max}$ (μm)
(Donje odstupanje $A_{2,min}$ za sve tolerancije H je 0)

Nazivni promjer $D = d$ mm	Korak P mm	Tolerancije				
		7G	6G	7H	6H	5H
1,5) ... 2,8	0,2	—	—	—	—	—
	0,25	—	—	—	—	+ 60
	0,35	—	+104 +19	—	+ 85	+ 67
	0,4	—	+109 +19	—	+ 90	+ 71
2,8) ... 5,6	0,45	—	+115 +20	—	+ 95	+ 75
	0,35	—	+109 +19	—	+ 90	+ 71
	0,5	+145 +20	+120 +20	+125	+100	+ 80
	0,6	+161 +21	+133 +21	+140	+112	+ 90
	0,7	+172 +22	+140 +22	+150	+118	+ 95
5,6) ... 11,2	0,75	+172 +22	+140 +22	+150	+118	+ 95
	1	+184 +24	+149 +24	+160	+125	+100
	1,25	+192 +22	+154 +22	+170	+132	+106
	1,5	+216 +26	+176 +26	+190	+150	+118
11,2) ... 22,4	1,25	+228 +28	+188 +28	+200	+160	+125
	1,5	+256 +32	+212 +32	+224	+180	+140
	1	+226 +26	+186 +26	+200	+160	+125
	1,25	+252 +28	+208 +28	+224	+180	+140
	1,5	+268 +32	+222 +32	+236	+190	+150
22,4) ... 45	1,75	+284 +34	+234 +34	+250	+200	+160
	2	+303 +38	+250 +38	+265	+212	+170
	2,5	+322 +42	+266 +42	+280	+224	+180
	1	+238 +26	+196 +26	+212	+170	+132
	1,5	+282 +32	+232 +32	+250	+200	+160
	2	+318 +38	+262 +38	+280	+224	+180
45) ... 90	3	+383 +48	+313 +48	+335	+265	+212
	3,5	+408 +53	+333 +53	+355	+280	+224
	4	+435 +60	+360 +60	+375	+300	+236
	4,5	+463 +63	+378 +63	+400	+315	+250
	1,5	+297 +32	+244 +32	+265	+212	+170
	2	+338 +38	+274 +38	+300	+236	+190
90) ... 180	3	+403 +48	+328 +48	+355	+280	+224
	4	+460 +60	+375 +60	+400	+315	+250
	5	+496 +71	+406 +71	+425	+335	+265
	5,5	+525 +75	+430 +75	+450	+355	+280
	6	+555 +80	+455 +80	+475	+375	+300
	2	+353 +38	+288 +38	+315	+250	+200
180) ... 355	3	+423 +48	+348 +48	+375	+300	+236
	4	+485 +60	+395 +60	+425	+335	+265
	6	+580 +80	+480 +80	+500	+400	+315
	3	+473 +48	+383 +48	+425	+335	+265
355) ... 630	4	+535 +60	+435 +60	+475	+375	+300
	6	+610 +80	+505 +80	+530	+425	+335

Tolerancije velikog promjera navoja vijka d
Gornje i donje odstupanje a_{max} i a_{min} (μm)

Korak P mm	Tolerancije						
	6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
0,2	—	—	— 17 — 73	0 — 56	0 — 36	0 — 56	—
0,25	—	—	— 18 — 85	0 — 67	0 — 42	0 — 67	—
	0,35	—	— 19 —104	0 — 85	0 — 53	0 — 85	— 53
0,4	—	—	— 19 —114	0 — 95	0 — 60	0 — 95	— 60
	0,45	—	— 20 —120	0 —100	0 — 63	0 —100	— 63
0,5	— 50 —156	—	— 20 —126	0 —106	0 — 67	0 —106	— 67
	0,6	— 53 —178	—	— 21 —146	0 —125	0 — 80	0 —125	— 80
0,7	— 56 —196	—	— 22 —162	0 —140	0 — 90	0 —140	— 90
	0,75	— 56 —196	—	— 22 —162	0 —140	0 — 90	0 —140	— 90
0,8	— 60 —210	— 24 — 260	— 24 —174	0 —150	0 — 95	0 —150	— 95
	1	— 60 —240	— 26 — 306	— 26 —206	0 —180	0 —112	0 —180
1,25	— 63 —275	— 28 — 363	— 28 —240	0 —212	0 —132	0 —212	—132
	1,5	— 67 —303	— 32 — 407	— 32 —268	0 —236	0 —150	0 —236
1,75	— 71 —336	— 34 — 459	— 34 —299	0 —265	0 —170	0 —265	—170
	2	— 71 —351	— 38 — 488	— 38 —318	0 —280	0 —180	0 —280	—180
2,5	— 80 —415	— 42 — 572	— 42 —377	0 —335	0 —212	0 —335	—212
	3	— 85 —460	— 48 — 648	— 48 —423	0 —375	0 —236	0 —475	—236
3,5	— 90 —515	— 53 — 723	— 53 —478	0 —425	0 —265	0 —425	—265
	4	— 95 —570	— 60 — 810	— 60 —535	0 —475	0 —300	0 —475	—300
4,5	—100 —600	— 63 — 863	— 63 —563	0 —500	0 —315	0 —500	—315
	5	—106 —636	— 71 — 921	— 71 —601	0 —530	0 —335	0 —530	—335
5,5	—112 —672	— 75 — 975	— 75 —635	0 —560	0 —355	0 —560	—355
	6	—118 —718	— 80 —1030	— 80 —680	0 —600	0 —375	0 —600	—375

Tolerancije malog
Gornje i donje

promjera navoja vijka d_1
odstupanje $a_{1\max}$ i $a_{1\min}$ (μm)

Nazivni pro- mjer d mm	Korak P mm	Tolerancije						
		6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
1,5) ... 2,8	0,2	—	—	—46 —110	—29 —93	—29 —75	—	—
	0,25	—	—	—54 —128	—36 —110	—36 —90	—	—
	0,35	—	—	—70 —158	—51 —139	—51 —116	—	—
	0,4	—	—	—77 —173	—58 —154	—58 —129	—	—
	0,45	—	—	—85 —188	—65 —168	—65 —142	—	—
2,8) ... 5,6	0,35	—	—	—70 —162	—51 —143	—51 —118	—	—
	0,5	—122 —233	—	—92 —203	—72 —183	—72 —156	—124 —208	—78 —152
	0,6	—140 —268	—	—108 —236	—87 —215	—87 —183	—144 —240	—99 —184
	0,7	—157 —297	—	—123 —263	—101 —241	—101 —207	—163 —244	—119 —214
	0,75	—164 —308	—	—130 —274	—108 —252	—108 —218	—174 —284	—130 —229
5,6) ... 11,2	0,8	—176 —329	—140 —348	—140 —293	—116 —269	—116 —234	—185 —303	—139 —245
	0,75	—164 —318	—	—130 —284	—108 —262	—108 —225	—174 —291	—130 —234
	1	—204 —388	—170 —422	—170 —354	—144 —328	—144 —287	—224 —367	—180 —308
	1,25	—243 —451	—208 —488	—208 —416	—180 —388	—180 —345	—275 —440	—232 —382
	1,5	—284 —524	—249 —569	—249 —489	—217 —457	—217 —410	—327 —520	—282 —457
11,2) ... 22,4	1	—204 —394	—170 —432	—170 —360	—144 —334	—144 —291	—224 —371	—180 —312
	1,25	—243 —465	—208 —510	—208 —430	—180 —402	—180 —355	—275 —450	—232 —389
	1,5	—284 —532	—249 —581	—249 —497	—217 —465	—217 —415	—327 —525	—282 —461
	1,75	—324 —600	—287 —649	—287 —563	—253 —529	—253 —474	—378 —599	—334 —535
	2	—360 —664	—327 —721	—327 —631	—289 —593	—289 —533	—432 —676	—384 —608
2,5	—441 —791	—403 —848	—403 —753	—361 —711	—361 —647	—540 —826	—488 —753	

Nazivni pro- mjer d mm	Korak P mm	Tolerancije						
		6e	8g	6g	6h	4h	4k6h	3p4h
22,4) ... 45	1	—204 —401	—170 —442	—170 —367	—144 —341	—144 —296	—224 —376	—180 —315
	1,5	—284 —542	—249 —593	—249 —507	—217 —475	—217 —420	—327 —530	—282 —465
	2	—360 —674	—327 —736	—327 —641	—289 —603	—289 —539	—432 —682	—384 —613
	3	—518 —934	—481 —1012	—481 —897	—433 —849	—433 —774	—648 —989	—590 —906
	3,5	—595 —1059	—558 —1145	—558 —1022	—505 —969	—505 —889	—756 —1140	—693 —1051
	4	—672 —1184	—637 —1280	—637 —1149	—577 —1089	—577 —1005	—864 —1292	—794 —1194
	4,5	—750 —1310	—713 —1412	—713 —1273	—650 —1210	—650 —1124	—972 —1446	—899 —1341
	1,5	—284 —552	—249 —607	—249 —517	—217 —485	—217 —425	—327 —535	—282 —470
	2	—360 —684	—327 —751	—327 —651	—289 —613	—289 —545	—432 —688	—384 —618
	3	—518 —946	—481 —1032	—481 —909	—433 —861	—433 —781	—648 —996	—590 —912
45) ... 90	4	—672 —1196	—637 —1300	—637 —1161	—577 —1101	—577 —1015	—864 —1302	—794 —1200
	5	—828 —1438	—793 —1553	—793 —1403	—722 —1332	—722 —1242	—1080 —1600	—999 —1484
	5,5	—906 —1567	—869 —1690	—869 —1530	—794 —1455	—794 —1360	—	—
	6	—984 —1696	—946 —1828	—946 —1658	—866 —1578	—866 —1478	—	—
	2	—360 —694	—327 —771	—327 —661	—289 —623	—289 —551	—432 —694	—384 —623
90) ... 180	3	—518 —958	—481 —1052	—481 —921	—433 —873	—433 —789	—648 —1004	—590 —918
	4	—672 —1210	—637 —1325	—637 —1175	—577 —1115	—577 —1025	—864 —1312	—794 —1207
	6	—984 —1716	—946 —1853	—946 —1678	—866 —1598	—866 —1488	—	—
	3	—518 —984	—481 —1097	—481 —947	—433 —899	—433 —809	—648 —1024	—590 —931
	4	—672 —1240	—637 —1375	—637 —1205	—577 —1145	—577 —1045	—864 —1332	—794 —1222
180) ... 355	6	—984 —1731	—946 —1878	—946 —1693	—866 —1613	—866 —1498	—	—

Tolerancije malog promjera navoja matice D_1
 Gornje odstupanje $A_{1\max}$ (μm)
 (Donje odstupanje $A_{1\min}$ za sve tolerancije H je 0)

Korak P mm	Tolerancije				
	7 G	6 G	7 H	6 H	5 H
0,2	—	—	—	—	—
0,25	—	—	—	—	+ 56
0,35	—	+119	+19	—	+ 80
0,4	—	+131	+19	—	+112
0,45	—	+145	+20	—	+125
0,5	+200	+20	+160	+20	+180
0,6	+221	+21	+181	+21	+200
0,7	+246	+22	+202	+22	+224
0,75	+258	+22	+212	+22	+236
0,8	+274	+24	+224	+24	+250
1	+326	+26	+262	+26	+300
1,25	+363	+28	+293	+28	+335
1,5	+407	+32	+332	+32	+375
1,75	+459	+34	+369	+34	+425
2	+513	+38	+413	+38	+475
2,5	+602	+42	+492	+42	+560
3	+678	+48	+548	+48	+630
3,5	+763	+53	+613	+53	+710
4	+810	+60	+660	+60	+750
4,5	+913	+63	+733	+63	+850
5	+971	+71	+781	+71	+900
5,5	+1025	+75	+825	+75	+950
6	+1080	+80	+880	+80	+1000

Navojni dosjedi

Pod navojnim dosjedom razumijevamo međusobnu podudarnost vijka i matice.
 Zračnost (zazor) navojnog dosjeda je razlika između većeg promjera matice i manjeg promjera vijka.

Prisnost (preklop) navojnog dosjeda je razlika između manjeg promjera matice i većeg promjera vijka.

Tolerancija navojnog dosjeda je razlika između najveće i najmanje zračnosti (odnosno prisnosti) navojnog dosjeda.

Vrste navojnih dosjeda

Labavi navojni dosjedi: H/e, H/g

Npr. vijci i matice za opću upotrebu

— gruba kvaliteta 7H/8g — srednja kvaliteta 6H/6e, 6H/6g

— fina kvaliteta 5H/4h

Prelazni navojni dosjedi: H/h

Čvrsti navojni dosjedi: H/k, H/p

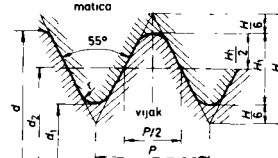
Npr. za čvrsto (s prisnošću) pritegnete vijke i matice

— čvrsto pritezanje 6H/4k6h — vrlo čvrsto pritezanje 5H/3p4h

Cijevni navoji
 (JUS M.B0.056 — 1952)

Profil cijevnih navoja (Whitworthov)

Broj navoja na 25,4 mm: n
 Korak navoja (mm) $P = 25,4/n$
 Teoretska dubina navoja
 $H = 0,96049 P$
 Nosiva dubina navoja
 $H_1 = 0,64033 P$
 Zaobljenost
 $r = 0,13733 P$



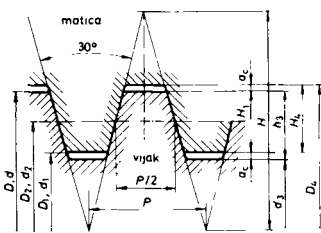
Veliki promjer navoja d
 Mali promjer navoja $d_1 = d - 2H_1$
 Srednji promjer navoja $d_2 = d - H_1$

Oznaka*	d mm	n	P mm	Oznaka*	d mm	n	P mm
R 1/8	9,728	28	0,907	R 3 1/2	100,330	11	2,309
R 1/4	13,157	19	1,337	R 3 3/4	106,680	11	2,309
R 3/8	16,662	19	1,337	R 4	113,030	11	2,309
R 1/2	20,955	14	1,814	R 4 1/2	125,730	11	2,309
R 5/8	22,911	14	1,814	R 5	138,430	11	2,309
R 3/4	26,441	14	1,814	R 5 1/2	151,130	11	2,309
R 7/8	30,201	14	1,814	R 6	163,830	11	2,309
R 1	33,249	11	2,309	R 7	189,230	10	2,540
(R 1 1/8)	37,897	11	2,309	R 8	214,630	10	2,540
R 1 1/4	41,910	11	2,309	R 9	240,030	10	2,540
(R 1 3/8)	44,323	11	2,309	R 10	265,430	10	2,540
R 1 1/2	47,803	11	2,309	R 11	290,830	8	3,175
R 1 3/4	53,746	11	2,309	R 12	316,230	8	3,175
R 2	59,614	11	2,309	R 13	347,472	8	3,175
R 2 1/4	65,710	11	2,309	R 14	372,872	8	3,175
R 2 1/2	75,184	11	2,309	R 15	398,272	8	3,175
R 2 3/4	81,534	11	2,309	R 16	423,672	8	3,175
R 3	87,884	11	2,309	R 17	449,072	8	3,175
R 3 1/4	93,980	11	2,309	R 18	474,472	8	3,175

* Oznaka (nazivni promjer) daje približan unutarnji promjer cijevi u (napuštenim) colima. — Treba se po mogućnosti kloniti dimenzija u zagradama.

Trapezni navoji
(JUS M.B0.060 — 1977)

Profil trapezних navoja



Korak navoja P
 Dubina osnovnoga profila navoja
 (= nosiva dubina) $H_1 = 0,5 P$
 Nazivna dubina navoja
 — vijka $h_3 = H_1 + a_c$
 — matice $H_4 = H_1 + a_c$
 Zračnost a_c
 Zaobljenost
 — na tjemenu R_1
 — u korijenu R_2

Mjere profila trapeznoga navoja (mm)

P	H ₁	a _c	h ₃ = H ₄	R _{1max}	R _{2max}	P	H ₁	a _c	h ₃ = H ₄	R _{1max}	R _{2max}
1,5	0,75	0,15	0,9	0,075	0,15	14	7	1	8	0,5	1
2	1	0,25	1,25	0,125	0,25	16	8	1	9	0,5	1
3	1,5	0,25	1,75	0,125	0,25	18	9	1	10	0,5	1
4	2	0,25	2,25	0,125	0,25	20	10	1	11	0,5	1
5	2,5	0,25	2,75	0,125	0,25	22	11	1	12	0,5	1
6	3	0,5	3,5	0,25	0,5	24	12	1	13	0,5	1
7	3,5	0,5	4	0,25	0,5	28	14	1	15	0,5	1
8	4	0,5	4,5	0,25	0,5	32	16	1	17	0,5	1
9	4,5	0,5	5	0,25	0,5	36	18	1	19	0,5	1
10	5	0,5	5,5	0,25	0,5	40	20	1	21	0,5	1
12	6	0,5	6,5	0,25	0,5	44	22	1	23	0,5	1

Veliki promjer navoja — vijka d ($= D$)

— matice $D_4 = d + 2a_c$

Mali promjer navoja — vijka $d_3 = d - 2h_3$

— matice $D_1 = d - 2H_1$ ($= d_1$)

Srednji promjer navoja $d_2 = D_2 = d - H_1$

Presjek jezgre $A = d_3^2 \pi / 4$

Viševojni trapezni navoji

Korak navoja P n -vojnih navoja veći je n -puta od koraka jednojnog navoja, dok sve druge mjere ostaju nepromijenjene.

*

Trapezne navoje upotrebljavamo posebno za radna vretena.
 Mjere standardiziranih trapezних navoja su na str. 521 do 523.

Trapezni navoji (JUS M.B0.061/062 — 1977)

Oznaka*	P mm	d mm	d ₂ = D ₂ mm	d ₃ mm	D ₁ mm	D ₄ mm	A mm ²
Tr 8 × 1,5	1,5	8	7,25	6,2	6,5	8,3	30,2
Tr 9 × 2	2	9	8	6,5	7	9,5	33,2
Tr 10 × 1,5	1,5	10	9,25	8,2	8,5	10,3	52,8
Tr 10 × 2	2	10	9	7,5	8	10,5	44,2
Tr 11 × 2	2	11	10	8,5	9	11,5	56,7
Tr 12 × 2	2	12	11	9,5	10	12,5	70,9
Tr 12 × 3	3	12	10,5	8,5	9	12,5	56,7
Tr 14 × 3	3	14	12,5	10,5	11	14,5	86,6
Tr 16 × 2	2	16	15	13,5	14	16,5	143
Tr 16 × 4	4	16	14	11,5	12	16,5	104
Tr 18 × 4	4	18	16	13,5	14	18,5	143
Tr 20 × 2	2	20	19	17,5	18	20,5	241
Tr 20 × 4	4	20	18	15,5	16	20,5	189
Tr 22 × 5	5	22	19,5	16,5	17	22,5	214
Tr 24 × 3	3	24	22,5	20,5	21	24,5	330
Tr 24 × 5	5	24	21,5	18,5	19	24,5	269
Tr 24 × 8	8	24	20	15	16	25	177
Tr 26 × 5	5	26	23,5	20,5	21	26,5	330
Tr 28 × 3	3	28	26,5	24,5	25	28,5	471
Tr 28 × 5	5	28	25,5	22,5	23	28,5	398
Tr 28 × 8	8	28	24	19	20	29	284
Tr 30 × 6	6	30	27	23	24	31	415
Tr 32 × 3	3	32	30,5	28,5	29	32,5	638
Tr 32 × 6	6	32	29	25	26	33	491
Tr 32 × 10	10	32	27	21	22	33	346
Tr 34 × 6	6	34	31	27	28	35	573
Tr 36 × 3	3	36	34,5	32,5	33	36,5	830
Tr 36 × 6	6	36	33	29	30	37	661
Tr 36 × 10	10	36	31	25	26	37	491
Tr 38 × 7	7	38	34,5	30	31	39	707
Tr 40 × 3	3	40	38,5	36,5	37	40,5	1046
Tr 40 × 7	7	40	36,5	32	33	41	804
Tr 40 × 10	10	40	35	29	30	41	661
Tr 42 × 7	7	42	38,5	34	35	43	908
Tr 44 × 3	3	44	42,5	40,5	41	44,5	1288
Tr 44 × 7	7	44	40,5	36	37	45	1018
Tr 44 × 10	10	44	38	31	32	45	755
Tr 46 × 8	8	46	42	37	38	47	1075

* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Trapezni navoji (nastavak)

Oznaka*	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm ²	Oznaka*	P mm	d mm	$d_2 = D_2$ mm	d_3 mm	D_1 mm	D_4 mm	A mm ²
Tr 48 × 3	3	48	46,5	44,5	45	48,5	1 555	(Tr 145 × 14)	14	145	138	129	131	147	13 070
Tr 48 × 8	8	48	44	39	40	49	1 195	Tr 150 × 16	16	150	142	132	134	152	13 685
Tr 48 × 12	12	48	42	35	36	49	962	(Tr 155 × 16)	16	155	147	137	139	157	14 741
Tr 50 × 8	8	50	46	41	42	51	1 320	Tr 160 × 6	6	160	157	153	154	161	18 385
Tr 52 × 3	3	52	50,5	48,5	49	52,5	1 847	Tr 160 × 16	16	160	152	142	144	162	15 837
Tr 52 × 8	8	52	48	43	44	53	1 452	Tr 160 × 28	28	160	146	130	132	162	13 273
Tr 52 × 12	12	52	46	39	40	53	1 195	(Tr 165 × 16)	16	165	157	147	149	167	16 972
Tr 55 × 9	9	55	50,5	45	46	56	1 590	Tr 170 × 16	16	170	162	152	154	172	18 146
Tr 60 × 3	3	60	58,5	56,5	57	60,5	2 507	(Tr 175 × 16)	16	175	167	157	159	177	19 359
Tr 60 × 9	9	60	55,5	50	51	61	1 963	Tr 180 × 8	8	180	176	171	172	181	22 966
Tr 60 × 14	14	60	53	44	46	62	1 521	Tr 180 × 18	18	180	171	160	162	182	20 106
Tr 65 × 10	10	65	60	54	55	66	2 290	Tr 180 × 28	28	180	166	150	152	182	17 671
Tr 70 × 4	4	70	68	65,5	66	70,5	3 370	(Tr 185 × 18)	18	185	176	165	167	187	21 382
Tr 70 × 10	10	70	65	59	60	71	2 734	Tr 190 × 18	18	190	181	170	172	192	22 698
Tr 70 × 16	16	70	62	52	54	72	2 124	(Tr 195 × 18)	18	195	186	175	177	197	24 053
Tr 75 × 10	10	75	70	64	65	76	3 217	Tr 200 × 8	8	200	196	191	192	201	28 652
Tr 80 × 4	4	80	78	75,5	76	80,5	4 477	Tr 200 × 20	20	200	191	180	182	202	25 447
Tr 80 × 10	10	80	75	69	70	81	3 739	Tr 200 × 33	33	200	184	166	168	202	21 642
Tr 80 × 16	16	80	72	62	64	82	3 019	Tr 210 × 20	20	210	200	188	190	212	27 759
Tr 85 × 12	12	85	79	72	73	86	4 072	Tr 220 × 8	8	220	216	211	212	221	34 967
Tr 90 × 4	4	90	88	85,5	86	90,5	5 741	Tr 220 × 20	20	220	210	198	200	222	30 791
Tr 90 × 12	12	90	84	77	78	91	4 657	Tr 220 × 36	36	220	202	182	184	222	26 016
Tr 90 × 18	18	90	81	70	72	92	3 848	Tr 230 × 20	20	230	220	208	210	232	33 979
Tr 95 × 12	12	95	89	82	83	96	5 281	Tr 240 × 8	8	240	236	231	232	241	41 910
Tr 100 × 4	4	100	98	95,5	96	100,5	7 163	Tr 240 × 22	22	240	229	216	218	242	36 644
Tr 100 × 12	12	100	94	87	88	101	5 945	Tr 240 × 36	36	240	222	202	204	242	32 047
Tr 100 × 20	20	100	90	78	80	102	4 778	Tr 250 × 22	22	250	239	226	228	252	40 115
(Tr 105 × 12)	12	105	99	92	93	106	6 648	Tr 260 × 12	12	260	254	247	248	261	47 916
Tr 110 × 12	12	110	104	97	98	111	7 390	Tr 260 × 22	22	260	249	236	238	262	43 744
(Tr 115 × 14)	14	115	108	99	101	117	7 698	Tr 260 × 40	40	260	240	218	220	262	37 325
Tr 120 × 6	6	120	117	113	114	121	10 029	Tr 270 × 24	24	270	258	244	246	272	46 759
Tr 120 × 14	14	120	113	104	106	122	8 495	Tr 280 × 12	12	280	274	267	268	281	55 990
Tr 120 × 22	22	120	109	96	98	122	7 238	Tr 280 × 24	24	280	268	254	256	282	50 671
(Tr 125 × 14)	14	125	118	109	111	127	9 331	Tr 280 × 40	40	280	260	238	240	282	44 488
Tr 130 × 14	14	130	123	114	116	132	10 207	Tr 290 × 24	24	290	278	264	266	292	54 739
(Tr 135 × 14)	14	135	128	119	121	137	11 122	Tr 300 × 12	12	300	294	287	288	301	64 692
Tr 140 × 6	6	140	137	133	134	141	13 893	Tr 300 × 24	24	300	288	274	276	302	58 965
Tr 140 × 14	14	140	133	124	126	142	12 076	Tr 300 × 44	44	300	278	254	256	302	50 671
Tr 140 × 24	24	140	128	114	116	142	10 207								

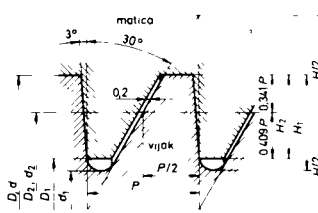
* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

* Uzeti su u obzir svi navoji prve prednosti (debelo tiskani), od navoja druge prednosti samo oni s prednosnim korakom.

Pilasti navoji
(JUS M.B0.070-1981)

Pilasti navoji prve prednosti

Profil pilastih navoja



- Korak navoja P
- Teoretska dubina navoja $H = 1,732\ 05\ P$
- Dubina navoja na vijku $H_1 = 0,867\ 77\ P$
- Dubina navoja na matici (= nosiva dubina navoja) $H_2 = 0,75\ P$
- Zračnost $b = 0,117\ 77\ P$
- Zaobljenost $r = 0,124\ 27\ P$

Mjere profila pilastog navoja (mm)

P	H ₁	H ₂	b	r	P	H ₁	H ₂	b	r
2	1,736	1,5	0,236	0,249	16	13,884	12	1,884	1,988
3	2,603	2,25	0,353	0,373	18	15,620	13,5	2,120	2,237
4	3,471	3	0,471	0,497	20	17,355	15	2,355	2,485
5	4,339	3,75	0,589	0,621	22	19,091	16,5	2,591	2,734
6	5,207	4,5	0,707	0,746	24	20,826	18	2,826	2,982
7	6,074	5,25	0,824	0,870	26	22,562	19,5	3,062	3,231
8	6,942	6	0,942	0,994	28	24,298	21	3,298	3,480
9	7,810	6,75	1,060	1,118	32	27,769	24	3,769	3,977
10	8,678	7,5	1,178	1,243	36	31,240	27	4,240	4,474
12	10,413	9	1,413	1,491	40	34,711	30	4,711	4,971
14	12,149	10,5	1,649	1,740	44	38,182	33	5,182	5,468

Veliki promjer navoja – vijka d

– matice $D = d$

Mali promjer navoja – vijka $d_1 = d - 2H_1$

– matice $D_1 = D - 2H_2$

Srednji promjer

$$d_2 = d + 1,050\ 14\ P - H$$

$$= D_1 - 0,913\ 96\ P + H$$

Presjek jezgre

$$A = d_1^2 \pi / 4$$

Viševojni pilasti navoji

Korak navoja P n -vojnih pilastih navoja veći je n -puta od koraka jednojovnog navoja, dok sve druge mjere navoja ostaju nepromijenjene.

Pilasti navoj upotrebljavamo za vretena koja mnogo rade, a prenose velike sile, ali samo u jednom smislu.

Razlikujemo tri prednosna stupnja pilastog navoja: prvi je za običajnu upotrebu, drugi za posebne slučajeve, a treći još samo u starim konstrukcijama.

Oznaka*	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	A mm ²
S 10 × 2	2	10	6,528	8,636	10	7	33,5
S 12 × 2	2	12	8,528	10,636	12	9	57,1
S 12 × 3	3	12	6,794	9,954	12	7,5	36,3
S 16 × 2	2	16	12,528	14,636	16	13	123
S 16 × 4	4	16	9,058	13,272	16	10	64,4
S 20 × 2	2	20	16,528	18,636	20	17	215
S 20 × 4	4	20	13,058	17,272	20	14	134
S 24 × 3	3	24	18,794	21,954	24	19,5	277
S 24 × 5	5	24	15,322	20,590	24	16,5	184
S 24 × 8	8	24	10,116	18,545	24	12	80,4
S 28 × 3	3	28	22,794	25,954	28	23,5	408
S 28 × 5	5	28	19,322	24,590	28	20,5	293
S 28 × 8	8	28	14,116	22,545	28	16	156
S 32 × 3	3	32	26,794	29,954	32	27,5	564
S 32 × 6	6	32	21,586	27,909	32	23	370
S 32 × 10	10	32	14,644	25,181	32	17	168
S 36 × 3	3	36	30,794	33,954	36	31,5	745
S 36 × 6	6	36	25,586	31,909	36	27	514
S 36 × 10	10	36	18,644	29,181	36	21	273
S 40 × 3	3	40	34,794	37,954	40	35,5	951
S 40 × 7	7	40	27,852	35,227	40	29,5	609
S 40 × 10	10	40	22,644	33,181	40	25	403
S 44 × 3	3	44	38,794	41,954	44	39,5	1 182
S 44 × 7	7	44	31,852	39,227	44	33,5	797
S 44 × 12	12	44	23,174	35,817	44	26	422
S 48 × 3	3	48	42,794	45,954	48	43,5	1 438
S 48 × 8	8	48	34,116	42,545	48	36	914
S 48 × 12	12	48	27,174	39,817	48	30	580
S 52 × 3	3	52	46,794	49,954	52	47,5	1 720
S 52 × 8	8	52	38,116	46,545	52	40	1 141
S 52 × 12	12	52	31,174	43,817	52	34	763
S 60 × 3	3	60	54,794	57,954	60	55,5	2 358
S 60 × 9	9	60	44,380	53,863	60	46,5	1 547
S 60 × 14	14	60	35,702	50,453	60	39	1 001
S 70 × 4	4	70	63,058	67,272	70	64	3 123
S 70 × 10	10	70	52,644	63,181	70	55	2 177
S 70 × 16	16	70	42,232	59,089	70	46	1 401

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Pilasti navoji prve prednosti (nastavak)

Oznaka*	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	A mm ²
S 80 × 4	4	80	73,058	77,272	80	74	4 192
S 80 × 10	10	80	62,644	73,181	80	65	3 082
S 80 × 16	16	80	52,232	69,089	80	56	2 143
S 90 × 4	4	90	83,058	87,272	90	84	5 418
S 90 × 12	12	90	69,174	81,817	90	72	3 758
S 90 × 18	18	90	58,760	77,726	90	63	2 712
S 100 × 4	4	100	93,058	97,272	100	94	6 801
S 100 × 12	12	100	79,174	91,817	100	82	4 923
S 100 × 20	20	100	65,290	86,362	100	70	3 348
S 120 × 6	6	120	109,586	115,909	120	111	9 432
S 120 × 14	14	120	95,702	110,453	120	99	7 193
S 120 × 22	22	120	81,818	104,998	120	87	5 258
S 140 × 6	6	140	129,586	135,909	140	131	13 189
S 140 × 14	14	140	115,702	130,453	140	119	10 514
S 140 × 24	24	140	98,348	123,634	140	104	7 597
S 160 × 6	6	160	149,586	155,909	160	151	17 574
S 160 × 16	16	160	132,232	149,089	160	136	13 733
S 160 × 28	28	160	111,404	140,907	160	118	9 747
S 180 × 8	8	180	166,116	174,545	180	168	21 673
S 180 × 18	18	180	148,760	167,726	180	153	17 381
S 180 × 28	28	180	131,404	160,907	180	138	13 562
S 200 × 8	8	200	186,116	194,545	200	188	27 206
S 200 × 18	18	200	168,760	187,726	200	173	22 368
S 200 × 32	32	200	144,462	178,179	200	152	16 391
S 220 × 8	8	220	206,116	214,545	220	208	33 367
S 220 × 20	20	220	185,290	206,362	220	190	26 965
S 220 × 36	36	220	157,520	195,451	220	166	19 488
S 240 × 8	8	240	226,116	234,545	240	228	40 156
S 240 × 22	22	240	201,818	224,998	240	207	31 990
S 240 × 36	36	240	177,520	215,451	240	186	24 751
S 260 × 12	12	260	239,174	251,817	260	242	44 928
S 260 × 22	22	260	221,818	244,998	260	227	38 644
S 260 × 40	40	260	190,578	232,724	260	200	28 526
S 280 × 12	12	280	259,174	271,817	280	262	52 756
S 280 × 24	24	280	238,348	263,634	280	244	44 618
S 280 × 40	40	280	210,578	252,724	280	220	34 827
S 300 × 12	12	300	279,174	291,817	300	282	61 213
S 300 × 24	24	300	258,348	283,634	300	264	52 420
S 300 × 44	44	300	223,636	269,996	300	234	39 280

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Pilasti navoji prve prednosti

Oznaka	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	A mm ²
S 340 × 12	12	340	319,174	331,817	340	322	80010
S 340 × 44	44	340	263,636	309,996	340	274	54588
S 380 × 12	12	380	359,174	371,817	380	362	101321
S 420 × 18	18	420	388,760	407,726	420	393	118701
S 460 × 18	18	460	428,760	447,726	460	433	144384
S 500 × 18	18	500	468,760	487,726	500	473	172580
S 540 × 24	24	540	498,348	523,634	540	504	195053
S 580 × 24	24	580	538,348	563,634	580	544	227622
S 620 × 24	24	620	578,348	603,634	620	584	262704

Pilasti navoji druge prednosti*

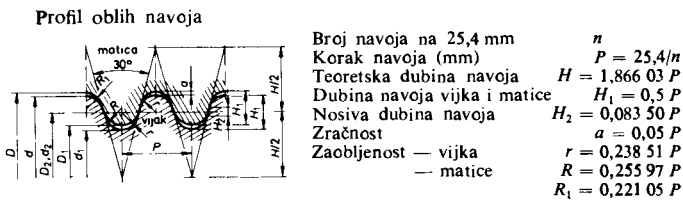
S 14 × 2	S 38 × 3	S 75 × 4	S 170 × 6	S 290 × 12
S 14 × 3	S 38 × 7	S 75 × 10	S 170 × 16	S 290 × 24
	S 38 × 10	S 75 × 16	S 170 × 28	S 290 × 44
S 18 × 2	S 42 × 3	S 85 × 4	S 190 × 8	S 320 × 12
S 18 × 4	S 42 × 7	S 85 × 12	S 190 × 18	
	S 42 × 10	S 85 × 18	S 190 × 32	S 320 × 44
S 22 × 3	S 46 × 3	S 95 × 4	S 210 × 8	S 360 × 12
S 22 × 5	S 46 × 8	S 95 × 12	S 210 × 20	
S 22 × 8	S 46 × 12	S 95 × 18	S 210 × 36	S 400 × 12
S 26 × 3	S 50 × 3	S 110 × 4	S 230 × 8	S 440 × 18
S 26 × 5	S 50 × 8	S 110 × 12	S 230 × 20	
S 26 × 8	S 50 × 12	S 110 × 20	S 230 × 36	S 480 × 18
S 30 × 3	S 55 × 3	S 130 × 6	S 250 × 12	S 520 × 24
S 30 × 6	S 55 × 9	S 130 × 14	S 250 × 22	
S 30 × 10	S 50 × 14	S 130 × 22	S 250 × 40	S 560 × 24
S 34 × 3	S 65 × 4	S 150 × 6	S 270 × 12	S 600 × 24
S 34 × 6	S 65 × 10	S 150 × 16	S 270 × 24	
S 34 × 10	S 65 × 16	S 150 × 24	S 270 × 40	S 640 × 24

Pilasti navoji treće prednosti*

S 105 × 4	S 125 × 6	S 145 × 6	S 165 × 6	S 185 × 8
S 105 × 12	S 125 × 14	S 145 × 14	S 165 × 16	S 185 × 18
S 105 × 20	S 125 × 22	S 145 × 24	S 165 × 28	S 185 × 32
S 115 × 6	S 135 × 6	S 155 × 6	S 175 × 8	S 195 × 8
S 115 × 14	S 135 × 14	S 155 × 16	S 175 × 16	S 195 × 18
S 115 × 22	S 135 × 24	S 155 × 24	S 175 × 28	S 195 × 32

* Upotrebljavati treba u prvom redu debelo označene navoje

Obli navoји
(JUS M.B0.081 — 1952)



Broj navoja na 25,4 mm n
 Korak navoja (mm) $P = 25,4/n$
 Teoretska dubina navoja $H = 1,866 03 P$
 Dubina navoja vijka i matice $H_1 = 0,5 P$
 Nosiva dubina navoja $H_2 = 0,083 50 P$
 Zračnost $a = 0,05 P$
 Zaobljenost — vijka $r = 0,238 51 P$
 — matice $R = 0,255 97 P$
 $R_1 = 0,221 05 P$

Mjere profila oblog navoja (mm)

n	P mm	H ₁ mm	H ₂ mm	r mm	R mm	R ₁ mm	a mm
10	2,540	1,270	0,212	0,606	0,650	0,561	0,127 00
8	3,175	1,588	0,265	0,757	0,813	0,702	0,158 75
6	4,233	2,117	0,353	1,010	1,084	0,936	0,211 65
4	6,350	3,175	0,530	1,515	1,625	1,404	0,317 50

Veliki promjer navoja — vijka $D = d + 2a$
 — matice $d_1 = d - 2H_1$
 Mali promjer navoja — vijka $D_1 = D - 2H_1$
 — matice $d_2 = d - H_1 = d_1 + H_1$
 Srednji promjer $A = d_1^2 \pi / 4$
 Presjek jezgre

Obli normalni navoји (JUS M.B0.081 — 1952)

Oznaka	n	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	A mm ²
Rd 8 × 1/10	10	2,540	8	5,460	6,730	8,254	5,714	23,4
Rd 9 × 1/10	10	2,540	9	6,460	7,730	9,254	6,714	32,8
Rd 10 × 1/10	10	2,540	10	7,460	8,730	10,254	7,714	43,7
Rd 11 × 1/10	10	2,540	11	8,460	9,730	11,254	8,714	56,2
Rd 12 × 1/10	10	2,540	12	9,460	10,730	12,254	9,714	70,3
Rd 14 × 1/8	8	3,175	14	10,825	12,412	14,318	11,142	92,0
Rd 16 × 1/8	8	3,175	16	12,825	14,412	16,318	13,142	129
Rd 18 × 1/8	8	3,175	18	14,825	16,412	18,318	15,142	172
Rd 20 × 1/8	8	3,175	20	16,825	18,412	20,318	17,142	222
Rd 22 × 1/8	8	3,175	22	18,825	20,412	22,318	19,142	278
Rd 24 × 1/8	8	3,175	24	20,825	22,412	24,318	21,142	340
Rd 26 × 1/8	8	3,175	26	22,825	24,412	26,318	23,142	409
Rd 28 × 1/8	8	3,175	28	24,825	26,412	28,318	25,142	484
Rd 30 × 1/8	8	3,175	30	26,825	28,412	30,318	27,142	565
Rd 32 × 1/8	8	3,175	32	28,825	30,412	32,318	29,142	652
Rd 36 × 1/8	8	3,175	36	32,825	34,412	36,318	33,142	846
Rd 40 × 1/6	6	4,233	40	35,767	37,883	40,423	36,190	1 005
Rd 44 × 1/6	6	4,233	44	39,767	41,883	44,423	40,190	1 242
Rd 48 × 1/6	6	4,233	48	43,767	45,883	48,423	44,190	1 505
Rd 52 × 1/6	6	4,233	52	47,767	49,883	52,423	48,190	1 792

Obli normalni navoји (nastavak)

Oznaka	n	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	A mm ²
Rd 55 × 1/6	6	4,233	55	50,767	52,883	55,423	51,190	2 024
Rd 60 × 1/6	6	4,233	60	55,767	57,883	60,423	56,190	2 443
Rd 65 × 1/6	6	4,233	65	60,767	62,883	65,423	61,190	2 900
Rd 70 × 1/6	6	4,233	70	65,767	67,883	70,423	66,190	3 397
Rd 75 × 1/6	6	4,233	75	70,767	72,883	75,423	71,190	3 933
Rd 80 × 1/6	6	4,233	80	75,767	77,883	80,423	76,190	4 509
Rd 85 × 1/6	6	4,233	85	80,767	82,883	85,423	81,190	5 123
Rd 90 × 1/6	6	4,233	90	85,767	87,883	90,423	86,190	5 777
Rd 95 × 1/6	6	4,233	95	90,767	92,883	95,423	91,190	6 471
Rd 100 × 1/6	6	4,233	100	95,767	97,883	100,423	96,190	7 203
Rd 110 × 1/4	4	6,350	110	103,650	106,825	110,635	104,285	8 438
Rd 120 × 1/4	4	6,350	120	113,650	116,825	120,635	114,285	10 145
Rd 130 × 1/4	4	6,350	130	123,650	126,825	130,635	124,285	12 008
Rd 140 × 1/4	4	6,350	140	133,650	136,825	140,635	134,285	14 029
Rd 150 × 1/4	4	6,350	150	143,650	146,825	150,635	144,285	16 207
Rd 160 × 1/4	4	6,350	160	153,650	156,825	160,635	154,285	18 542
Rd 170 × 1/4	4	6,350	170	163,650	166,825	170,635	164,285	21 034
Rd 180 × 1/4	4	6,350	180	173,650	176,825	180,635	174,285	23 683
Rd 190 × 1/4	4	6,350	190	183,650	186,825	190,635	184,285	26 489
Rd 200 × 1/4	4	6,350	200	193,650	196,825	200,635	194,285	29 453

Obli grubi navoj za željeznička vozila (JUS M.B0.082 — 1952)

Profil se toga navoja razlikuje od profila normalnoga oblog navoja time što mu kut nosivih površina teoretskog profila iznosi 15° 56'.

Dimenzije grubog oblog navoja:

$P = 7$ mm, $H_1 = 4,5$ mm, $r = 1,65$ mm, $R = 1,55$ mm, $R_1 = 1,75$ mm

Oznaka	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	D mm	D ₁ mm	D ₂ mm	A mm ²
Rd 34 × 7	34	25	29,5	34,4	25,4	31,143	491
Rd 39 × 7	39	30	34,5	39,4	30,4	36,143	707
Rd 44 × 7	44	35	39,5	44,4	35,4	41,143	962
Rd 49 × 7	49	40	44,5	49,4	40,4	46,143	1 256
Rd 54 × 7	54	45	49,5	54,4	45,4	51,143	1 590
Rd 59 × 7	59	50	54,5	59,4	50,4	56,143	1 963
Rd 64 × 7	64	55	59,5	64,4	55,4	61,143	2 376
Rd 69 × 7	69	60	64,5	69,4	60,4	66,143	2 827
Rd 74 × 7	74	65	69,5	74,4	65,4	71,143	3 318
Rd 79 × 7	79	70	74,5	79,4	70,4	76,143	3 848

Obli navoj za željezničke spojke (JUS M.B0.083 — 1952)

Profil toga navoja u principu je isti kao u normalnoga oblog navoja s promjerom vijka 50 mm i korakom navoja 7 mm:

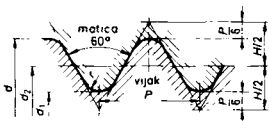
Oznaka: Rd 50 × 7 (odn. Rd 50 × 7 lijevi)

Dimenzije:

$P = 7$ mm $r = 1,67$ mm $d = 50$ mm $D = 50,6$ mm
 $H_1 = 3,5$ mm $R = 1,635$ mm $d_1 = 43$ mm $D_1 = 43,6$ mm
 $H_2 = 0,75$ mm $R_1 = 1,704$ mm $d_2 = 46,5$ mm $D_2 = 47,3$ mm
 $(D_2$ je srednji promjer matice.)

Navoji za bicikle (JUS M.B0.95 — 1957)

Profil navoja

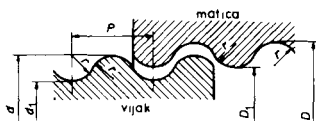


Broj navoja na 25,4 mm n
 Korak navoja (mm) $P = 25,4/n$
 Dubina navoja $H_1 = 0,5327 P$
 Zaobljenost $r = P/6$
 Veliki promjer d
 Srednji promjer $d_2 = d - H_1$
 Mali promjer $d_1 = d - 2H_1$

Oznaka	d mm	n	P mm	H ₁ mm	r mm	d ₂ mm	d ₁ mm
Bi 3/8	9,525	26	0,977	0,520	0,163	9,004	8,484
Bi 0,415	10,550	26	0,977	0,520	0,163	10,029	9,509
Bi 9/16	14,288	20	1,270	0,677	0,212	13,611	12,934
Bi 1,29	32,766	24	1,058	0,564	0,176	32,202	31,638
Bi 1,37	34,798	24	1,058	0,564	0,176	34,234	33,670

Edisonovi navoji (JUS M.B0.086 — 1952)

Profil navoja



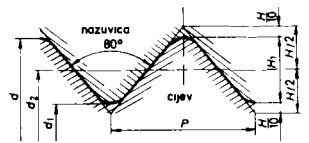
Broj navoja na 25,4 mm n
 Korak navoja (mm) $P = 25,4/n$
 Zaobljenost r
 Veliki promjer vijka d
 Mali promjer vijka d_1
 Veliki promjer matice D
 Mali promjer matice D_1

Oznaka	n	P mm	r mm	d* mm	d ₁ * mm	D* mm	D ₁ * mm
E 10	14	1,814	0,531	9,53 9,36	8,51 8,34	9,78 9,61	8,76 8,59
E 14	9	2,822	0,822	13,89 13,70	12,29 12,10	14,16 13,97	12,56 12,37
E 27	7	3,629	1,025	26,45 26,15	24,26 23,96	26,85 26,55	24,66 24,36
E 33	6	4,233	1,187	33,05 32,65	30,45 30,05	33,55 33,15	30,95 30,55
E 40	4	6,350	1,850	39,50 39,05	35,90 35,45	40,05 39,60	36,45 36,00

* Gornji i donji brojevi označuju granične vrijednosti.

Navoji za oklopne cijevi (JUS M.B0.090 — 1952)

Profil navoja

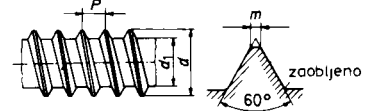


Broj navoja na 25,4 mm n
 Korak navoja (mm) $P = 25,4/n$
 Teoretska dubina navoja $H = 0,595875 P$
 Stvarna dubina navoja $H_1 = 0,4767 P$
 Zaobljenost $r = 0,107 P$
 Veliki promjer navoja d
 Mali promjer navoja $d_1 = d - 2H_1$
 Srednji promjer navoja $d_2 = d - H_1$

Oznaka	n	P mm	d mm	d ₁ mm	d ₂ mm	H ₁ mm	r mm
Re 7	20	1,27	12,50	11,28	11,89	0,61	0,14
Re 9	18	1,41	15,20	13,86	14,53	0,67	0,15
Re 11	18	1,41	18,60	17,26	17,93	0,67	0,15
Re 13,5	18	1,41	20,40	19,06	19,73	0,67	0,15
Re 16	18	1,41	22,50	21,16	21,83	0,67	0,15
Re 21	16	1,588	28,30	26,78	27,54	0,76	0,17
Re 29	16	1,588	37,00	35,48	36,24	0,76	0,17
Re 36	16	1,588	47,00	45,48	46,24	0,76	0,17
Re 42	16	1,588	54,00	52,48	53,24	0,76	0,17
Re 48	16	1,588	59,30	57,78	58,54	0,76	0,17

Navoji samoreznih vijaka (JUS M.B0.100 — 1983)

Profil navoja



Veliki promjer d
 Mali promjer d_1
 Korak navoja P
 Širina vrha navoja m

Oznaka	d mm	d ₁ mm	P mm	m mm	Oznaka	d mm	d ₁ mm	P mm	m mm
NI 2,2	2,2	1,6	0,79	0,1	NI 4,8	4,8	3,6	1,59	0,15
NI 2,9	2,9	2,2	1,06	0,1	NI 5,5	5,5	4,2	1,81	0,15
NI 3,5	3,5	2,6	1,27	0,1	NI 6,3	6,3	4,9	1,81	0,15
NI 3,9	3,9	2,9	1,34	0,1	NI 8	8	6,2	2,12	0,15
NI 4,2	4,2	3,1	1,41	0,1	NI 9,6	9,6	7,8	2,12	0,15

DOPUŠTENA NAPREZANJA

U konstrukcijama se ne smiju pojaviti trajne plastične deformacije, već mora sva konstrukcija stalno ostati u području elastičnih deformacija. To znači, da dopuštena naprezanja u materijalu ne smiju prijeći granicu elastičnosti. No, zbog sigurnosti (u slučaju pojavljivanja nepredviđenih dodatnih opterećenja, npr. dinamičkih) materijal neće naprezati ni do granice elastičnosti. (Iznimke su posebni slučajevi, kada određenom plastičnom deformacijom postizemo djelomično ukrućivanje materijala.)

U praksi su uvedena dopuštena naprezanja, određena koeficijentom sigurnosti v , tj. omjerom (vlačne) čvrstoće i dopuštenog naprezanja materijala. Taj se koeficijent mijenja – prema zahtijevanoj sigurnosti – od 2 do 10.

Dopušteno naprezanje $\sigma_{dop} = R_m/v$

Dopušteno naprezanje ovisi o osnovnim vrstama opterećenja pa razlikujemo dopuštena naprezanja:

na vlak	σ_{dop}
na tlak	$-\sigma_{dop}$
na savijanje	σ_{fdop}
na smik (tangencijalno)	τ_{sdop}
na torziju (uvijanje)	τ_{tdop}

Dopušteno naprezanje, dakako, veoma ovisi i o posebnim faktorima koji utječu na čvrstoću materijala, napose o koeficijentu oblika te o trajnom (statičkom i dinamičkom) opterećenju (str. 537 do 542).

Za određivanje dopuštenog naprezanja posebno je važno stanje materijala. Zdrav materijal mora biti homogen i ne smije imati unutarnjih grešaka (šupljina, mjehura, nakupina itd.), koje smanjuju nosive presjeka i mogu izazvati znatna zarezna naprezanja.

Osim toga, treba pri određivanju dopuštenog naprezanja uzeti u obzir još i druge okolnosti koje utječu na čvrstoću, kao što je na primjer smanjenje presjeka zbog gubitka materijala pri habanju, koroziji itd.

Za proračunavanje konstrukcijskih dijelova jednostavnih i iskušanih oblika, na koje djeluju potpuno poznata opterećenja, možemo upotrijebiti dopušteno naprezanje koje je iskustvom određeno za slične slučajeve. Tako postupamo u praksi pri proračunu jednostavnih strojnih elemenata uzimajući dopuštena naprezanja prema iskustvu (sabrana u tablicama na str. 533 do 535). Pri proračunu čeličnih konstrukcija uzimamo za njih posebna dopuštena naprezanja (vidi tablicu na str. 536).

Međutim, za sve novo oblikovane konstrukcijske dijelove, napose za komplicirane oblike i opterećenja, takav način proračunavanja nije više dovoljan. U takvim slučajevima treba čvrstoću i dopuštena naprezanja odrediti posebnim studioznim proračunima i ispitivanjima.

Dopuštena naprezanja najvažnijih kovinskih materijala

U slijedećim tablicama znače:

- $R_{p0,2}$ – (dogovorno) naprezanje tečenja
- R_m – čvrstoću na vlak,
- σ_{Df} – trajnu dinamičku čvrstoću za savijanje (slučaj III),
- σ_{dop} – dopušteno naprezanje na tlak, i to:
 - I – pri mirnom opterećenju,
 - II – pri kolebanju opterećenja između maksimalne vrijednosti i nule,
 - III – pri kolebanju opterećenja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti.

Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okoline.

Oznaka po JUS	$R_{p0,2}$	R_m	σ_{Df}	I	σ_{dop} II	III
N/mm ²						

Sivi lijev (JUS C.J2.020 – 1973) – neobrađen

SL 15	–	110...180	60...80	40...55	30...45	25...30
SL 20	–	160...230	75...110	55...70	45...60	25...40
SL 25	–	210...280	100...140	80...100	60...80	40...60
SL 30	–	250...300	110...160	80...110	65...90	40...70

Temperovani lijev (JUS C.J2.021 – 1958)

BTeL 35	–	320...360	110...140	80...110	50...80	40...50
BTeL 40	200...240	380...410	130...170	90...120	60...90	45...60
CTeL 35	–	350...380	80...110	70...85	40...60	30...40
CTeL 38	200...240	380...400	100...130	80...100	50...75	35...50

Čelični lijev (JUS C.J3.011 – 1973) – normalno žaren

ČL 0300	180...230	380...450	160...190	100...130	80...110	50...75
ČL 0400	220...280	450...520	180...220	110...160	90...120	60...85
ČL 0500	250...320	520...600	200...240	130...180	100...130	70...95
ČL 0600	280...360	600...700	220...260	140...200	110...150	80...110

Opći konstrukcijski čelici (JUS C.B0.500 – 1970 i 1972) – normalno žareni

Č. 0261	200...230	340...420	160...200	110...130	90...120	75...95
Č. 0361	220...250	370...450	170...200	120...140	100...130	80...100
Č. 0461	240...280	420...500	190...250	130...150	110...140	90...110
Č. 0561	340...420	520...620	300...350	180...210	140...180	110...150
Č. 0545	280...340	500...600	220...270	150...180	120...160	95...120
Č. 0645	320...380	600...720	280...330	180...210	150...185	105...140
Č. 0745	340...420	700...850	300...380	210...250	160...200	115...170

Dopuštena naprezanja najvažnijih

Značenje oznaka naprezanja – vidi str. 533

Oznaka po JUS	$R_{p0.2}$	R_m	σ_{Df}	σ_{dop}		
				I	II	III
N/mm ²						

Čelici za cementiranje (JUS C.B9.020 – 1974) – nakon kaljenja
(Podaci vrijede za svojstva jezgre pri debljini ispitnog uzorka 15 do 40 mm)

Č. 1120	250... 300	420... 520	220... 280	110... 150	90... 120	70... 90
Č. 1121						
Č. 1220	300... 360	500... 650	250... 300	140... 170	120... 150	90... 110
Č. 1221						
Č. 4120	400... 600	600... 850	300... 360	200... 260	140... 200	120... 170
Č. 4320	600... 800	800... 1100	320... 400	300... 360	230... 320	150... 220
Č. 4321	700... 950	1000... 1300	350... 420	320... 420	260... 360	180... 240
Č. 4721	750... 950	1100... 1450	360... 460	320... 420	250... 350	160... 250
Č. 5420	650... 800	900... 1200	320... 420	300... 380	240... 330	160... 230
Č. 5421	800... 1000	1200... 1450	400... 480	340... 440	270... 370	190... 260

Čelici za poboljšanje (JUS C.B9.021 – 1974) – poboljšani

Č. 1330	300... 380	500... 650	220... 270	140... 170	120... 150	90... 115
Č. 1331						
Č. 1430	330... 450	550... 800	270... 320	170... 200	130... 170	100... 125
Č. 1431						
Č. 1530	360... 500	600... 850	300... 340	190... 220	150... 200	110... 150
Č. 1531						
Č. 1730	440... 600	700... 1000	340... 400	220... 260	170... 240	130... 170
Č. 1731						
Č. 3130	500... 650	750... 1000	360... 480	260... 330	200... 260	160... 230
Č. 4130	550... 800	800... 1050	400... 500	280... 350	220... 280	180... 250
Č. 4131	550... 800	800... 1100	400... 500	300... 360	230... 290	200... 250
Č. 4730	450... 700	700... 1050	320... 400	210... 270	150... 200	130... 180
Č. 4731	550... 800	800... 1100	380... 480	260... 330	200... 250	170... 230
Č. 4732	650... 900	950... 1200	460... 550	300... 380	230... 280	200... 260
Č. 4733	700... 950	1000... 1350	500... 580	320... 380	230... 280	210... 260
Č. 4734	800... 1100	1100... 1450	520... 650	320... 400	240... 300	220... 280
Č. 4830	650... 950	500... 1250	450... 580	310... 380	250... 300	200... 270
Č. 5430	650... 900	950... 1200	480... 580	300... 380	230... 280	200... 260
Č. 5431	700... 950	1000... 1350	500... 600	320... 380	240... 280	210... 260
Č. 5432	800... 1100	1100... 1450	520... 620	320... 400	250... 300	220... 280

kovinskih materijala (nastavak)

Sva naprezanja vrijede pri temperaturi okoline.

Oznaka po JUS*	$R_{p0.2}$	R_m	σ_{Df}	σ_{dop}		
				I	II	III
N/mm ²						

Čelici za opruge (JUS C.B0.551 – 1984) – poboljšani

Č. 2133	1100... 1400	1300... 1500	550... 650	720... 880	420... 500	300... 380
Č. 4830	1200... 1600	1350... 1700	580... 700	750... 900	420... 520	320... 400

Aluminijske slitine za lijevanje (JUS C.C2.300 – 1983)

Al Si 12.01	70... 90	140... 200	60... 90	40... 70	30... 60	20... 40
Al Si 12.02	90... 110	150... 200	70... 100	40... 70	30... 60	20... 40
Al Si 6 Cu4.01	100... 150	160... 200	60... 90	40... 70	30... 60	20... 40
Al Si 6 Cu4.02	110... 160	170... 220	70... 100	40... 70	30... 60	20... 40
Al Mg 5 Si.01	90... 100	170... 250	60... 80	40... 70	30... 60	20... 40

Aluminijske slitine za gnječenje (JUS C.C2.100 – 1967)

Al Cu4 Si Mg	m	80... 140	180... 220	80... 120	50... 90	40... 60	30... 40
	u	220... 320	280... 450	120... 180	90... 130	60... 90	50... 70
Al Si1 Mg	m	50... 80	110... 150	50... 70	30... 50	20... 40	20... 30
	u	150... 210	170... 290	70... 130	60... 110	40... 70	30... 60
Al Mg2	m	70... 120	180... 220	70... 120	50... 80	30... 60	30... 50
	h	140... 180	230... 260	100... 170	70... 110	50... 70	40... 60

Čisti bakar (JUS C.D1.002 – 1972)

Cu – ljevan	70... 120	140... 200	40... 50	30... 40	20... 30	10... 20
– žaren	40... 80	200... 250	80... 110	30... 40	30... 50	20... 40
– vučen	300... 400	380... 440	100... 120	90... 120	40... 60	20... 40

Bakrene slitine za lijevanje (JUS C.D2.300/301 – 1982)

P.CuZn33Pb2.01	60... 80	150... 200	50... 70	20... 40	20... 30	20
K.CuZn40Pb.02	80... 150	250... 350	70... 100	30... 50	20... 40	20... 30

Bakrene slitine za gnječenje (JUS C.D2.100/101/102 – 1982)

CuZn39Pb2	m	100... 150	370... 480	130... 170	80... 90	60... 80	50... 60
	t	120... 160	510... 610	180... 220	120... 150	90... 110	70... 80
CuZn28	m	70... 100	250... 300	90... 120	50... 60	40... 50	30... 40
	t	210... 260	380... 460	140... 180	100... 130	70... 90	50... 60
CuZn10	m	70... 100	240... 290	80... 120	50... 60	40... 60	30... 50
	t	220... 280	350... 430	140... 180	110... 140	70... 90	50... 70
CuSn6	–	360... 420	120... 150	90... 120	70... 90	50... 70	

* Posebne oznake znače: m – meko, t – tvrdo, u – očvrstnuto, h – hladno očvrstnuto.

Dopušteno naprezanje za čelične konstrukcije

Dopušteno naprezanje za kovinske dijelove

Sestavni dio konstrukcije	Dopuštena naprezanja na						Bočni pritisak* P
	vlak σ_{dop}		tlak $-\sigma_{dop}$		smik τ_{dop}		
	N/mm ²						
	a	b	a	b	a	b	
Nosачи od Č.0000	120	120	120	120	96	96	
	140	160	140	160	112	128	
Zakovice u nosačima od Č.0246 od Č.0000 od Č.0370					120	120	240 240
					140	160	280 320
Vijci u nosačima od Č.0246 od Č.0000 od Č.0370	85	85			96	96	240 240
	100	110			112	128	280 320
Temeljni vijci od Č.0000 od Č.0370	85	85					
	100	110					
Dijelovi ležaja i zglobova od Č.1430 od ČL.0501 od SL.15	200	220	200	220			950 1200
	180	200	180	200			850 1000
	45	50	100	110			500 600

* Pod »bočnim pritiskom« podrazumijevamo pritisak zakovice ili vijka na dosjednu površinu provrta (rupe).

Vrijednosti u tablici vrijede pri temperaturi okoline 20°C, i to:

a) za opterećenje glavnim silama: vlastitom težinom, korisnom težinom težinom snijega;

b) za opterećenje koje se ne sastoji samo od glavnih sila (kao pod a), već i od dodatnih: sile vjetra, kočne sile, horizontalnih bočnih sila, sile zbog temperaturnog rastezanja.

Odlučan je onaj proračun opterećenja koji daje veće nosive presjeke.

*

Dopušteno naprezanje za nekovinske materijale

Materijal	Modul elastičnosti E	Dopuštena naprezanja na			
		vlak σ_{dop}	tlak $-\sigma_{dop}$	savij. $\sigma_{f dop}$	smik $\tau_{s dop}$
		N/mm ²			
Drvo	||	14000	10,5	7...12	8...14
		1000	0,5	3	—
		11000	9	6...11	7...13
Beton nearmiran	⊥	550	0,3	2	—
		14000...36000	—	1,5...8	—

Utjecaj oblika predmeta

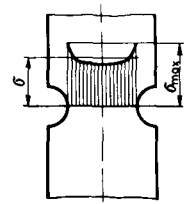
Kod predmeta, kojima se presjek znatno mijenja, nije razdioba naprezanja više jednolika po cijelom presjeku, već se na mjestima gdje se presjek mijenja (osobito kod naglih prijelaza), javlja znatno veće naprezanje σ_{max} koje može biti nekoliko puta veće od nazivnog naprezanja σ , koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po cjelokupnom presjeku.

»Koefficient oblika« α_k

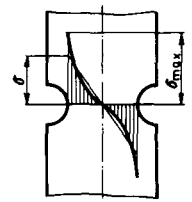
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 1 \dots 3 (\dots 10)$$

Koefficient oblika α_k praktički ovisi samo o načinu opterećenja i vanjskom obliku predmeta, a osobito o dubini zarez a i zakrivljenosti njegova tjemena, dakle općenito o oštini zarez a. U običnim slučajevima koefficient oblika dostiže vrijednost 3, a u posebnim slučajevima i do 10.

Veliki porast naprezanja zbog oblika doveo je nužno do opsežnih sistematskih ispitivanja »zarezne čvrstoće«.



Razdioba naprezanja pri vlak u



Razdioba naprezanja pri savijanju

Koefficienti oblika α_k za najobičnije slučajeve

Oblik zarez a	Vrsta opterećenja	Nazivno naprezanje	$\frac{r}{D}$	Koefficient oblika α_k za $h/D =$			
				0,025	0,05	0,1	0,2
	vlak	$\frac{4F}{\pi(D-2h)^2}$	0,01	2,1	2,4	2,6	2,64
			0,05	1,55	1,85	1,95	1,9
			0,1	1,38	1,55	1,7	1,58
	savijanje	$\frac{32M_t}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	2,0	2,22	2,3	2,2
			0,05	1,5	1,7	1,78	1,65
			0,1	1,32	1,43	1,48	1,42
	torzija	$\frac{16T}{\pi(D-2h)^3}$	0,01	1,5	1,6	1,65	1,65
			0,05	1,22	1,35	1,4	1,3
			0,1	1,13	1,2	1,3	1,2
			0,2	1,1	1,13	1,12	1,1

Koeficijenti oblika α_k za najobičnije slučajeve (nastavak)

Oblika zarez	Vrsta opterećenja	Nazivno naprezanje	$\frac{r}{a}$	Koeficijent oblika α_k za $h/a =$			
				0,025	0,05	0,1	0,2
	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	0,01	2,2	2,5	2,8	2,9
			0,05	1,65	1,95	2,1	2,15
			0,1	1,45	1,6	1,8	1,7
			0,2	1,35	1,45	1,55	1,5
	savijanje	$\frac{6M_f}{b(a-2h)^2}$	0,01	2,05	2,3	2,5	2,3
			0,05	1,55	1,8	1,85	1,8
0,1			1,4	1,5	1,5	1,45	
0,2			1,25	1,3	1,3	1,28	
	vlak	$\frac{F}{b(a-h)}$	0,025	1,8	2,0	2,15	2,18
			0,05	1,55	1,8	1,88	1,88
			0,1	1,32	1,55	1,6	1,6
			0,2	1,23	1,28	1,4	1,4
	savijanje	$\frac{6M_f}{b(a-h)^2}$	0,025	1,92	2,2	2,45	2,58
			0,05	1,6	1,95	2,15	2,25
0,1			1,42	1,62	1,81	1,9	
0,2			1,31	1,43	1,52	1,6	
	vlak	$\frac{F}{b(a-2h)}$	$= \frac{h}{a}$		2,15	2,1	2,03
	savijanje	$\frac{3M_f h}{2b\left(\frac{a}{2}\right)^2 - h^3}$	$= \frac{h}{a}$		1,58	1,62	1,64

Pri mirnom opterećenju većina žilavih materijala nije posebno osjetljiva na zarezna naprezanja, tako da vršna opterećenja često ne treba ni uzimati u obzir pa možemo računati s nazivnim naprezanjem, koje zamišljamo da je jednoliko raspodijeljeno po cijelom presjeku.

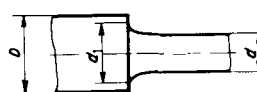
Osjetljivost čelika prema zareznom naprezanju je veća ako mu je granica plastičnosti viša, pa je tvrdi čelik mnogo osjetljiviji prema zarezima od mekoga.

Lijevano željezo praktički nije osjetljivo prema zareznom naprezanjima zbog svojih »unutarnjih zarez« (grafitni listići!).

Zarezna se osjetljivost jako povećava ako opterećenje nije mirno, kao što je to npr. pri djelovanju udaraca. U tom slučaju govorimo o »dinamičkoj ili udarnoj zareznoj čvrstoći«.

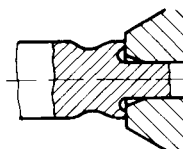
Općenito se pri promjenljivom opterećenju znatno povećava osjetljivost za zarezna naprezanja, što nužno traži dublje istraživanje i studij o razdiobi naprezanja.

Da smanjimo zarezno naprezanje σ_{\max} , u konstrukcijama se dosljedno klonimo oštrih zarez i prijelaza pa izvodimo što je moguće postupnije prijelaze:



– postupni prijelaz (paraboličnog ili bar kružnog oblika) od promjera d do promjera d_1 ;

– rasterećeni prijelaz sa zaobljenom udubinom na predmetima gdje se ne može načiniti pristupni prijelaz.



Ne možemo li izbjeći oštri prijelaz, valja takvo mjesto pojačati većim dimenzijama ili upotrijebiti čvršći materijal, kako bismo uspješno spriječili zarezno djelovanje.

Utjecaj trajanja opterećenja

Pri opterećivanju do određenog naprezanja ne moraju se sve deformacije pojaviti odmah, već djelomice tek nakon dužeg vremena. Tu pojavu vremenskog zaostajanja deformacija iza opterećenja nazivamo puženjem materijala.

Puženje sprečavamo tako da materijal opteretimo manje nego je to dopušteno za kratkotrajno opterećenje. Čvrstoća materijala dakle ovisi o trajanju opterećenja pa je ona to manja što opterećenje duže traje. Svakom trajanju opterećenja odgovara određena čvrstoća materijala, a nazivamo je vremen-skom statičkom čvrstoćom.

Pri stanovitom manjem opterećenju puženje može prestati. Odgovarajuću čvrstoću materijala koja više ne ovisi o trajanju opterećenja nazivamo trajnom statičkom čvrstoćom (vidi str. 320).

Utjecaj promjenljivog opterećenja

Čvrstoća materijala znatno opada ako opterećenje nije jednoliko, već se neprestano mijenja (koleba; titra). To kolebanje opterećenja uzrokuje i kolebanje naprezanja u materijalu.

Pri promjenljivom naprezanju čvrstoća se smanjuje s povećanjem broja titraja. Pri vrlo velikom broju titraja čvrstoća se približava vrijednosti pri kojoj više ne ovisi o broju titraja. Nazivamo je »dinamičkom čvrstoćom« (vidi str. 321).

Dinamička čvrstoća ovisi o tome kako se kolebaju naprezanja. Najčešće određujemo »pulzirajuću (titranju) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja od 0 do neke vrijednosti vlaka ili tlaka, i »njihajnu (kolebljivu) dinamičku čvrstoću«, pri kolebanju naprezanja između apsolutno jednakih vrijednosti vlaka i tlaka.

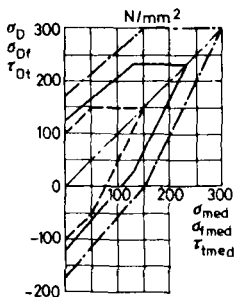
Dijagrami dinamičke čvrstoće (Smithovi dijagrami, str. 321) za neke konstrukcijske čelike sabrani su na str. 540 do 542.

Dijagrami dinamičke žvrstoće

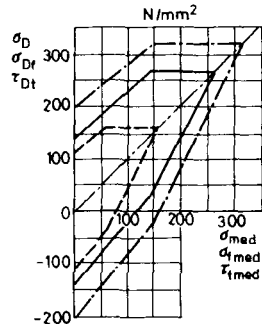
U dijagramima dinamičke žvrstoće nekih konstrukcijskih čelika označene krivulje predstavljaju

- σ_D za vlak i tlak
- - - σ_{Df} za savijanje
- τ_{Dt} za torziju

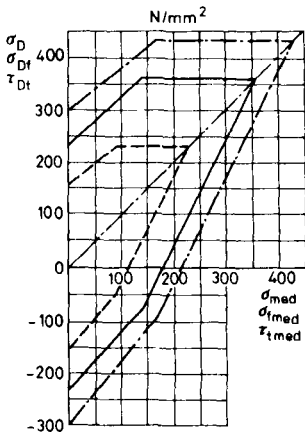
i to ovisno o srednjim naprezanjima σ_{med} , σ_{fmed} , τ_{tmed} .
Sva su naprezanja u dijagramima dana u N/mm^2 .



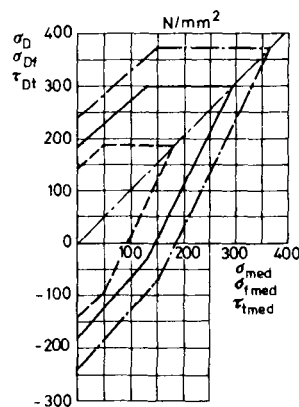
Obični konstrukcijski čelik Č. 0361



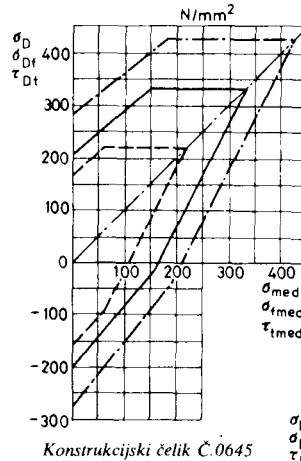
Obični konstrukcijski čelik Č. 0461



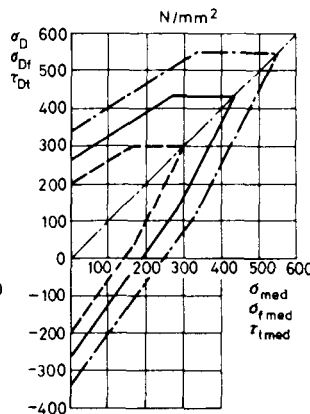
Obični konstrukcijski čelik Č. 0561



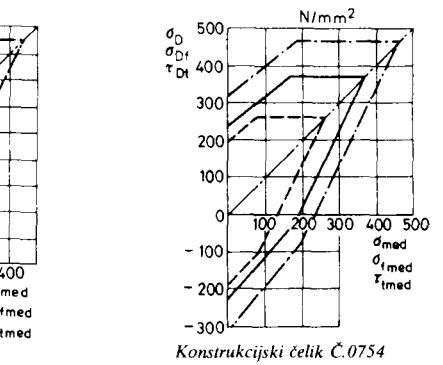
Konstrukcijski čelik Č. 0545



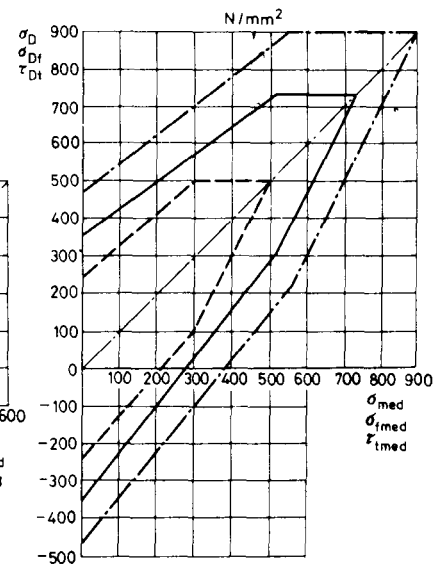
Konstrukcijski čelik Č. 0645



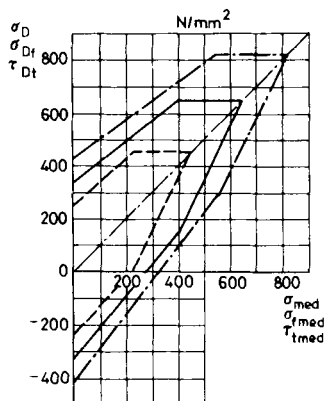
Nelegirani čelik za poboljšanje Č. 1530



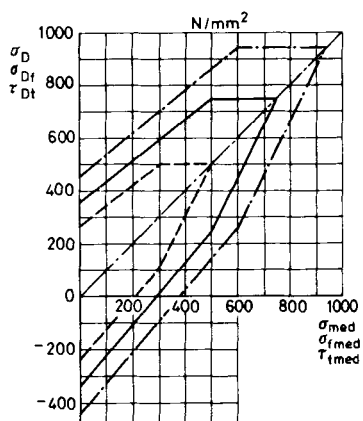
Konstrukcijski čelik Č. 0754



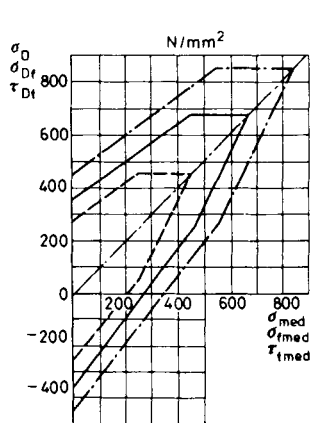
Malo legirani Mn-Si čelik za poboljšanje Č. 3130



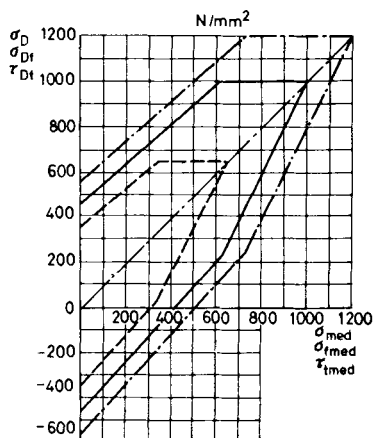
Legirani Cr-želik za poboljšanje Č. 4130



Legirani Cr-V-želik za poboljšanje Č. 4830



Legirani Cr-Mo-želik za poboljšanje Č. 4731



Legirani Cr-Mo-V-želik za poboljšanje Č. 4734

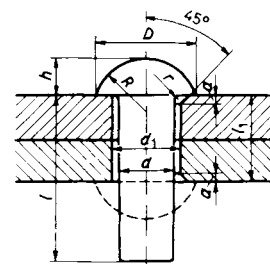
NERASTAVLJIVI SPOJEVI

Zakovični spojevi

Zakovice s poluokruglom glavom
 – za čelične konstrukcije
 (JUS M.B3.021 – 1984), (lijevi dio slike),
 – za kotlove pod tlakom (desni dio slike).

Nazivni promjer (sirove) zakovice d
 Promjer zakovane zakovice d_1
 Presjek zakovane zakovice $A = d_1^2 \pi / 4$

Dimenzije zakovica se vidi u donjoj tablici. Duljina sirove zakovice l ovisi o ukupnoj debljini limova l_1 .



d mm	d ₁ mm	Zakovice za čelične konstrukcije				Zakovice za kotlove pod tlakom					A mm ²
		D mm	h mm	R mm	r mm	D mm	h mm	R mm	r mm	a mm	
10	11	16	6,5	8	0,4	18	7	9,5	1	1	95
13	14	21	8,5	11	0,6	23	9	12	1,5	1,5	154
16	17	26	10	13,5	0,8	30	12	15,5	2	2	227
19	20	30	12	15,5	0,8	35	14	18	2	2	314
22	23	35	14	18	1	40	16	20,5	2	2	415
25	26	40	16	20,5	1	45	18	23	2,5	2,5	531
28	29	45	18	23	1	50	20	25,5	3	3	661
31	32	50	20	25,5	1,5	55	22	28	3	3	804
34	35	55	22	28	1,5	60	24	30,5	3,5	3,5	962
37	38	60	24	30,5	1,5	67	26	34,5	4	4	1134

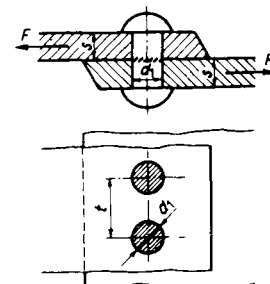
Proračun zakovičnih spojeva

Zakovice računamo s obzirom na presjek A u zakovanom stanju, tj. prema promjeru rupe d_1 , što je zakovica pri zakivanju gotovo sasvim ispuni.

Sila F , koju može prenosi limena traka debljine s i širine, jednake razmaku t među zakovicama u redu, je

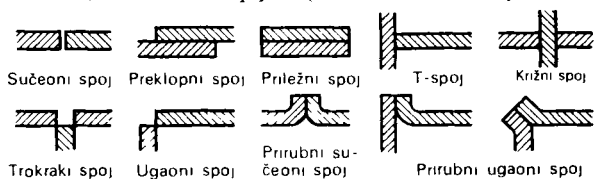
$$F = (t - d_1)s \sigma_{dop} = A \tau_{s dop} = d_1 s p_{dop}$$

gdje su: σ_{dop} – dopušteno vlačno naprezanje zakovice, $\tau_{s dop}$ – dopušteno smično naprezanje zakovice, p_{dop} – dopušteni bočni pritisak (između zakovice i lima).



Zavari

Oblici zavarenih spojeva (JUS C.T3.001 — 1971)



Vrste šavova i njihovi znakovi (JUS C.T3.011 — 1980)

Naziv šava	Presjek	Znak	Naziv šava	Presjek	Znak
I-šav		||	Šav iz priruba		
V-šav		∇	Kutni šav		△
Polovični V-šav		∇			
Y-šav		Y	Korišasti šav		└
Polovični Y-šav		Y			
U-šav		U	Točkasti šav		○
Polovični U-šav		U			
X-šav		X	Kolutni šav		⊕
Korijenski zavar		⊕			

Dopunske oznake za oblik površine šava:

ravna: — ispupčena: ⤴ udubljena: ⤵

V-šav s ravnim tjemenom	∇	X-šav s ispupčenim tjemenom	
Kutni šav s udubljenim tjemenom	∇	U-šav s ravnim korijenskim zavarom	

Označivanje zavara na nacrtima — strelicom

Prikaz	Označivanje	
		nad crtom strelice, ako je tjeme zavara na strani strelice
		pod crtom strelice, ako je tjeme zavara na suprotnoj strani strelice
		kroz crtu strelice, ako je zavar na prekrivenim ploham spoja

Proračun zavarenih spojeva

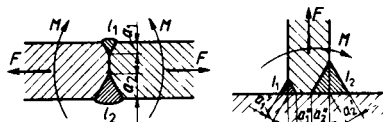
Naprezanja na vlak (tlak) σ zbog djelovanja sile F i naprezanje na savijanje σ_f zbog djelovanja momenta M iznose u osnovnim slučajevima zavarenih spojeva debljine zavara a i duljine l :



$$\sigma = \frac{F}{al}$$

$$\sigma_f = \frac{6M}{a^2l}$$

Naprezanja u dvostranim zavarima:



$$\sigma = \frac{F}{a_1l_1 + a_2l_2}$$

$$a_1 = a_1' + a_1''$$

$$a_2 = a_2' + a_2''$$

$$\sigma_f = \frac{M}{W}$$

gdje je W — moment otpora zavara.

Dopuštena naprezanja u zavaru $\sigma_{dop\ zav}$ znatno su manja od normalnih dopuštenih naprezanja σ_{dop} : $\sigma_{dop\ zav} = \alpha \sigma_{dop}$.

Koeficijent zavarivanja α veoma ovisi o statičkom i dinamičkom opterećenju, vrsti zavarenog spoja i izvedbi zavara. Njegove su vrijednosti približno u slijedećim granicama:

	Vlak (tlak)	Savijanje	Smik
Statičko opterećenje:	sučeoni spoj	0,7...1,0	0,8...1,0
	T-spoj	0,6...0,7	0,6...0,7
Dinamičko opterećenje:	sučeoni spoj	0,5...0,9	0,6...0,9
	T-spoj — jednostrani	0,2...0,6	0,1...0,3
	— dvostrani	0,3...0,7	0,6...0,8

Pri običnoj izvedbi zavarenog spoja te se vrijednosti mogu smanjiti i do 50%.

Lemljeni spojevi

O lemovima v. str. 414 i 415.

Proračun lemljenih spojeva

Lemljene spojeve računamo uglavnom na smik, iznimno na vlak. Sila F , koju prenosi lemljeni spoj opterećen na smik, iznosi

$$F = b/\tau_s$$

gdje su: b – širina spoja, l – duljina spoja.

Naprezanje τ_s u spoju, opterećenom na smik, ne smije biti veće od dopuštenog naprezanja $\tau_{s\text{dop}}$

$$\tau_s \leq \tau_{s\text{dop}}$$

Čvrstoća na smik je najveća pri debljini lemnog sloja 0,05 ... 0,2 mm.

Meki lemovi pri opterećenju puze; njihova čvrstoća s vremenom jako popušta (npr. meki lem S.Sn 40 ima kratkotrajnu čvrstoću na smik 35 N/mm², a nakon 10⁵ h samo još 2 N/mm²). Čvrstoća mekih lemovi veoma ovisi i o temperaturi (pa npr. pri 150 °C može iznositi još samo 15% od vrijednosti pri 20 °C).

Čvrstoća lemljenih spojeva mnogo ovisi također o dinamičkom opterećenju (npr. srebrni lem pri 10⁴ titraja ima čvrstoću 210 N/mm², a pri 10⁷ titraja, samo još 170 N/mm².)

Lijepljeni spojevi

Lijepljeni se spojevi upotrebljavaju pri spajanju kovina i nekovina (drveta, umjetnih tvari, gume, stakla, porculana itd.). Za međusobno spajanje kovina dolazi u obzir lijepljenje naročito tamo gdje treba spriječiti gubitak svojstava, postignutih termičkom obradom (npr. kod termički obrađenog duralumina) ili kod vrlo tankih dijelova.

Kao ljepila se upotrebljavaju tvari na bazi umjetnih smola (trgovačka imena; araldit, reduks, bostik, metalon itd.). Pri njihovoj upotrebi treba se strogo pridržavati uputa proizvođača.

Čvrstoća lijepljenih spojeva posljedica je adhezije između ljepila i slijepljenog dijela (dok je značenje mehaničkog usidrenja mnogo manje). Deblji sloj ljepila ima manju čvrstoću (pri debljini 0,05 mm može iznositi npr. 38 N/mm², a pri debljini 1 mm još samo 15 N/mm²).

Čvrstoća se lijepljenog spoja mnogo smanjuje pri višim temperaturama (ako npr. između -50 i +80 °C iznosi oko 25 N/mm², pri +150 °C može se smanjiti na samo 2 N/mm².)

Nadalje čvrstoća lijepljenog spoja mnogo ovisi o broju titraja (pa se može između 10³ i 10⁸ titraja smanjiti za 80%, a da pri 10⁹ titraja još nije postignuta trajna dinamička čvrstoća).

Stezni spojevi

Stezne spojeve dobivamo navlačenjem obruča unutarnjeg promjera d_2 na rukavac većeg vanjskog promjera D_1 , i to – obično – hlađenjem rukavca i zagrijavanjem obruča.

Relativna deformacija ϵ rukavca i obruča (s obzirom na prvobitni promjer rukavca) iznosi

$$\epsilon = (D_1 - d_2)/D_1 = \Delta d/D_1$$

Pritisak p na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju ovisi o dopuštenim naprezanjima u rukavcu $\sigma_{1\text{dop}}$ i obruču $\sigma_{2\text{dop}}$:

$$p \leq \sigma_{1\text{dop}}[1 - (d_1/D_1)^2]/2 \quad p \leq \sigma_{2\text{dop}}[1 - (d_2/D_2)^2]/2$$

Po Hookeovu zakonu vrijedi za rukavac i obruč

$$\frac{\epsilon}{p} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{1 + (d_1/D_1)^2}{1 - (d_1/D_1)^2} - \frac{1}{m_1} \right] + \frac{1}{E_2} \left[\frac{1 + (d_2/D_2)^2}{1 - (d_2/D_2)^2} - \frac{1}{m_2} \right]$$

gdje su: E_1 i E_2 – moduli elastičnosti za rukavac i obruč, m_1 i m_2 – Poissonovi koeficijenti za rukavac i obruč.

Stezna deformacija

$$\Delta d = D_1 p (\epsilon/p)$$

Temperaturne razlike, potrebne pri navlačenju;

Hlađenje rukavca za temperaturnu razliku $T_0 - T_1$ uzrokuje suženje rukavca za Δd_1 , dok zagrijavanje obruča za temperaturnu razliku $T_2 - T_0$ uzrokuje proširenje obruča za Δd_2 :

$$\Delta d_1 = \alpha_1 D_1 (T_0 - T_1) \quad \Delta d_2 = \alpha_2 d_2 (T_2 - T_0)$$

gdje su: T_0 – temperatura okoline, T_1 – temperatura ohlađenog rukavca, T_2 – temperatura zagrijanog obruča, α_1 i α_2 – koeficijenti temperaturnog rastezanja rukavca i obruča (v. str. 157).

Ukupna promjena promjera treba da je veća od tražene stezne deformacije

$$\Delta d_1 + \Delta d_2 > \Delta d$$

Prijenosna sila F steznog spoja je

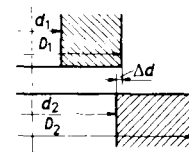
$$F = \mu D_1 \pi l p$$

gdje je l duljina korisne prijenosne površine rukavca.

Koeficijent trenja μ na plohi između rukavca i obruča u stegnutom stanju iznosi 0,05 ... 0,19 (za srednje tvrdi čelik oko 0,16).

Prijenosni moment M_1 steznog spoja je

$$M_1 = (d_2/2) F$$



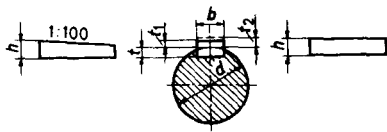
RASTAVLJIVI SPOJEVI

Spojevi klinovima

Razlikujemo klinove (s nagibom 1:100) i pera.

Klinovi

Pera



d — promjer osovine
 b — širina } klina odn. pera
 h — visina }
 dubina utora:
 t — na osovini
 t_1 — na glavini za klinove
 t_2 — na glavini za pera

Osnovni standardizirani klinovi i pera prema JUS:

Klinovi (JUS M.C2.020 — 1957). — Plosnati klinovi (JUS M.C2.021 — 1957). — Pera, visoka (JUS M.C2.060 — 1957). — Pera, niska (JUS M.C2.061 — 1957).

d mm	b mm	JUS M.C2.020					JUS M.C2.060					JUS M.C2.021					JUS M.C2.061					
		h mm	t mm	t_1 mm	t mm	t_2 mm	h mm	t mm	t_1 mm	t mm	t_2 mm	h mm	t mm	t_1 mm	t mm	t_2 mm	h mm	t mm	t_1 mm	t mm	t_2 mm	
6)...8	2	2	1,1	0,6	1,1	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8)...10	3	3	1,7	1,0	1,7	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10)...12	4	4	2,4	1,3	2,4	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12)...17	5	5	2,9	1,8	2,9	2,2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17)...22	6	6	3,5	2,1	3,5	2,6	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22)...30	8	7	4,1	2,4	4,1	3,0	5	1,3	3,2	3,1	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30)...38	10	8	4,7	2,8	4,7	3,4	6	1,8	3,7	3,7	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38)...44	12	8	4,9	2,6	4,9	3,2	6	1,8	3,7	3,9	2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
44)...50	14	9	5,5	2,9	5,5	3,6	6	1,4	4,0	4,0	2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50)...58	16	10	6,2	3,2	6,2	3,9	7	1,9	4,5	4,7	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
58)...65	18	11	6,8	3,5	6,8	4,3	7	1,9	4,5	4,8	2,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
65)...75	20	12	7,4	3,9	7,4	4,7	8	1,9	5,5	5,4	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
75)...85	22	14	8,5	4,8	8,5	5,6	9	1,8	6,5	6,0	3,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
85)...95	25	14	8,7	4,6	8,7	5,4	9	1,9	6,4	6,2	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
95)...110	28	16	9,9	5,4	9,9	6,2	10	2,4	6,9	6,9	3,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
110)...130	32	18	11,1	6,1	11,1	7,1	11	2,3	7,9	7,6	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
130)...150	36	20	12,3	6,9	12,3	7,9	12	2,8	8,4	8,3	3,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150)...170	40	22	13,5	7,7	13,5	8,7	14	4,0	9,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
170)...200	45	25	15,3	8,9	15,3	9,9	16	4,7	10,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200)...230	50	28	17,0	10,1	17,0	11,2	18	5,2	11,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
230)...260	56	32	19,3	11,8	19,3	12,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260)...290	63	32	19,6	11,5	19,6	12,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290)...330	70	36	22,0	13,1	22,0	14,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
330)...380	80	40	24,6	14,5	24,6	15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
380)...440	90	45	27,5	16,6	27,5	17,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
440)...500	100	50	30,4	18,7	30,4	19,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Za klinove i pera upotrebljavamo čelik čvrstoće $R_m \geq 600 \text{ N/mm}^2$.

Utorni spojevi

Utorni spojevi s ravnim bokovima (JUS M.C1.410 — 1958)

Unutarnji promjer d

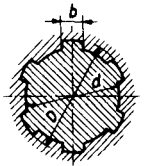
Vanjski promjer D

— za laku izvedbu D_1

— za srednju izvedbu D_2

Širina utora b

Broj utora n



d mm	D_1 mm	D_2 mm	b mm	n	d mm	D_1 mm	D_2 mm	b mm	n
11	—	14	3	6	42	46	48	8	8
13	—	16	3,5	6	46	50	54	9	8
16	—	20	4	6	52	58	60	10	8
18	—	22	5	6	56	62	65	10	8
21	—	25	5	6	62	68	72	12	8
23	26	28	6	6	72	78	82	12	10
26	30	32	6	6	82	88	92	12	10
28	32	34	7	6	92	98	102	14	10
32	36	38	6	8	102	108	112	16	10
36	40	42	7	8	112	120	125	18	10

Svornjaci i zaticima

Standardizirani promjeri d

3 4 5 6 8 10 12 14 16 18 20 22 25 28 30
 32 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

Obrađeni bez glave (JUS M.C3.040 — 1954) $d = 3 \dots 100 \text{ mm}$

svornjaci s malom glavom (JUS M.C3.020 — 1954) $d = 3 \dots 100 \text{ mm}$

Poluobrađeni s velikom glavom (JUS M.C3.021 — 1954) $d = 6 \dots 100 \text{ mm}$

svornjaci s malom glavom (JUS M.C3.022 — 1954) $d = 5 \dots 100 \text{ mm}$

Zaticima

Standardizirani promjeri d

0,6 0,8 1 1,5 2 2,5 3 4 5 6 8 10 13 16 20 25 30 40 50

Cilindrični zaticima

— u tolerancijskom polju h 8 (JUS M.C2.201 — 1952) $d = 0,8 \dots 50 \text{ mm}$

— u tolerancijskom polju h 11 (JUS M.C2.202 — 1952) $d = 0,8 \dots 50 \text{ mm}$

— u tolerancijskom polju m 6 (JUS M.C2.203 — 1952) $d = 1 \dots 50 \text{ mm}$

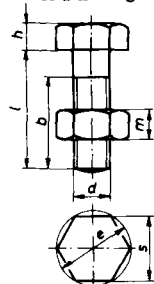
Zakaljeni cilindrični zaticima (60 HRC)

— u tolerancijskom polju m 6 (JUS M.C2.204 — 1952) $d = 0,8 \dots 20 \text{ mm}$

Konični zaticima (1:50), (promjer d mjeri se na užem kraju) (JUS M.C2.205 — 1952) $d = 0,6 \dots 50 \text{ mm}$

Vijčani spojevi

Standardiziranih vijaka i matice ima mnogo. Najobičniji su vijci sa šesterokutnom glavom i maticom (ISO).



Nazivne duljine tijela vijka i duljine navoja (JUS M.B1.019 — 1972)

Duljine tijela l (mm):

2	(7)	14	(28)	45	75	(105)	140	200
2,5	8	16	30	50	80	110	150	220
3	(9)	(18)	(32)	55	85	(115)	160	240
4	10	20	35	60	90	120	170	260
5	(11)	(22)	(38)	65	(95)	(125)	180	280
6	12	25	40	70	100	130	190	300

Treba se kloniti duljina tijela u zagradama!

Duljine navoja b : za $l \leq 125$ mm $b = 2d + 6$ mm
za $l = 125 \dots 200$ mm $b = 2d + 12$ mm
za $l > 200$ mm $b = 2d + 25$ mm

Ako je $l \leq b$, navoj se izvodi do glave vijka.

Vijci sa šesterokutnom glavom — izrade C i B (JUS M.B1.050/051 — 1976)
Šesterokutne matice za opće svrhe (JUS M.B1.600 — 1965)

Materijal: čelik ili mjed — bez propisanih mehaničkih svojstava. Mjere u mm

Nazivni promjer d	Normalne duljine tijela l	Duljina navoja vijka*			Dimenzije glave vijka i matice			
		l_1	l_2	l_3	h	m	s	e
M 5	20...50	16	—	—	3,5	4	8	8,63
M 6	25...80	18	—	—	4	5	10	10,89
M 8	30...100	22	—	—	5,5	6,5	13	14,20
M 10	35...200	26	32	—	7	8	17	18,72
M 12	40...220	30	36	—	8	10	19	20,88
(M 14)	45...220	34	40	—	9	11	22	23,91
M 16	50...220	38	44	57	10	13	24	26,17
(M 18)	55...220	42	48	61	12	15	27	29,56
M 20	60...220	46	52	65	13	16	30	32,95
(M 22)	60...220	50	56	69	14	18	32	35,03
M 24	60...220	54	60	73	15	19	36	39,55
(M 27)	70...220	60	66	79	17	22	41	45,20
M 30	80...220	66	72	85	19	24	46	50,85
(M 33)	100...220	72	78	91	21	26	50	55,37
M 36	100...220	78	84	97	23	29	55	60,79
(M 39)	100...220	84	90	103	25	31	60	66,44
M 42	120...220	90	96	109	26	34	65	72,09
(M 45)	140...220	—	102	115	28	36	70	77,74
M 48	150...220	—	108	121	30	38	75	83,39
(M 52)	180...220	—	116	129	33	42	80	89,04

* Prema JUS M.B1.019 — 1972: $l_1 \leq 125$ mm, $l_2 = 125 \dots 200$ mm, $l_3 > 200$ mm.

Vijci sa šesterokutnom glavom izrade A: JUS M.B1.052 — 1976, s navojem do glave: JUS M.B1.053/055 — 1976, s finim navojem: JUS M.B1.057/060 — 1976.

Kvalitetni vijci i matice (JUS M.B1.023 — 1983 i 028 — 1975)

Razred čvrstoće	Vijci				Matice			
	Naprez. tečenja R_e N/mm ²	$R_{p0,2}$	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Pos. tot. prod. A_s %	Tvrdoća	Razred čvrstoće	Čvrstoća N/mm ²	Tvrdoća HV
4.6	240		400...550	25	110...170 HB	4 ³⁾	400	302
4.8	320			14				
5.6	300		500...700	20	140...215 HB	5 ³⁾	500	302
5.8	400			10				
6.6	360			16				
6.8	480		600...800	8	170...245 HB	6 ³⁾	600	302
6.9		540		12				
8.8	640		800...1000	12	225...300 HV	8	800	302
10.9	900		1000...1200	9	280...370 HV	10	1000	353
12.9	1 080		1200...1400	8	330...440 HV	12 ⁴⁾	1200	353
14.9	1 260		1400...1600	7	400...510 HV	14	1400	380

¹⁾ Nelegirani čelici ($P \leq 0,06\%$, $S \leq 0,07\%$) i čelici za automate ($P \leq 0,12\%$, $S \leq 0,34\%$, $Pb \leq 0,35\%$).

²⁾ Poboľšani čelici, nelegirani ($C = 0,32 \dots 0,5\%$) i legirani ($C = 0,19 \dots 0,52\%$).

Razred čvrstoće: 8.8 10.9 12.9 14.9
Cr + Mo + Ni + V $\geq 0 \dots 0,5$ 0...0.9 0.9...1.5 1.5...2.5

³⁾ Nelegirani čelici ($C \leq 0,5\%$, $P \leq 0,110\%$, $S \leq 0,150\%$).

⁴⁾ Mn — čelici ($C \leq 0,58\%$, $Mn \geq 0,30 \dots 0,45\%$).

Preporučeni promjeri svrdla za rupe pred narezivanjem navoja (JUS M.B1.003 — 1972)

Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm	Oznaka navoja	Promjer svrdla mm
M 1	0,75	M 3,5	2,9	M 12	10,2	M 36	32
M 1,1	0,85	M 4	3,3	M 14	12	M 39	35
M 1,2	0,95	M 4,5	3,7	M 16	14	M 42	37,5
M 1,4	1,1	M 5	4,2	M 18	15,5	M 45	40,5
M 1,6	1,25	M 6	5	M 20	17,5	M 48	43
M 1,8	1,45	M 7	6	M 22	19,5	M 52	47
M 2	1,6	M 8	6,8	M 24	21	M 56	50,5
M 2,2	1,75	M 9	7,8	M 27	24		
M 2,5	2,05	M 10	8,5	M 30	26,5		
M 3	2,5	M 11	9,5	M 33	29,5		

Promjeri provrta za vijke s metarskim navojem
(JUS M.B1.004 – 1986)

Oznaka navoja	Promjer provrta*			Oznaka navoja	Promjer provrta*			Oznaka navoja	Promjer provrta*		
	f	s	g		f	s	g		f	s	g
M 1	1.1	1.2	1.3	M 14	15	15.5	16.5	M 64	66	70	74
M 1.2	1.3	1.4	1.5	M 16	17	17.5	18.5	M 68	70	74	78
M 1.4	1.5	1.6	1.8	M 18	19	20	21	M 72	74	78	82
M 1.6	1.7	1.8	2	M 20	21	22	24	M 76	78	82	86
M 1.8	2.0	2.1	2.2	M 22	23	24	26	M 80	82	86	91
M 2	2.2	2.4	2.6	M 24	25	26	28	M 85	87	91	96
M 2.5	2.7	2.9	3.1	M 27	28	30	32	M 90	93	96	101
M 3	3.2	3.4	3.6	M 30	31	33	35	M 95	98	101	107
M 3.5	3.7	3.9	4.2	M 33	34	36	38	M 100	104	107	112
M 4	4.3	4.5	4.8	M 36	37	39	42	M 105	109	112	117
M 4.5	4.8	5	5.3	M 39	40	42	45	M 110	114	117	122
M 5	5.3	5.5	5.8	M 42	43	45	48	M 115	119	122	127
M 6	6.4	6.6	7	M 45	46	48	52	M 120	124	127	132
M 7	7.4	7.6	8	M 48	50	52	56	M 125	129	132	137
M 8	8.4	9	10	M 52	54	56	62	M 130	134	137	144
M 10	10.5	11	12	M 56	58	62	66	M 140	144	147	155
M 12	13	13.5	14.5	M 60	62	66	70	M 150	155	158	165

* f – fina izrada (za finu mehaniku, precizne strojeve i alat); s – osrednja izrada (za opće strojarstvo); g – gruba izrada (za grube dijelove, lijevane rupe).

Proračun vijaka

a) Vijci za pričvršćivanje

Maksimalna sila F_{max} , koje može prenositi vijak presjeka A (s promjerom jezgre navoja d_1), iznosi $F_{maks} \leq A \sigma_{dop}$ $A = d_1^2 \pi / 4$

Dopušteno naprezanje σ_{dop} za vijke određujemo obično ovisno o naprezanju tečenja R_e ($R_p 0.2$) $\sigma_{dop} \approx 0,3 R_e$

Za prednapregnute vijke uzimamo $F_{max} = (1,3 \dots 1,6) F$, gdje je F vanjska sila, kojom opterećujemo vijak na vlak.

b) Vijci za prijenos gibanja (obično s trapeznim ili pilastim navojem)

Nosiva sila F određuje se – osim proračunom čvrstoće (kao pod a) – još i s obzirom na bočni pritisak p dodirnih ploha u navoju

$$F_{maks} \leq \frac{(d^2 - d_1^2)\pi}{4} p n$$

gdje su: d – vanjski promjer vijaka; n – broj nosivih navoja.

Bočni pritisak p kod brončanih matica iznosi:

$$\begin{aligned} &\text{za vijke od mekog čelika} && p \leq 7,5 \text{ N/mm}^2 \\ &\text{za vijke od tvrdog čelika} && p \leq 16 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

STROJNI DIJELOVI ZA PRIENOS KRUŽNIH GIBANJA

Osovine

Okrugle osovine promjera d mogu prenositi moment vrtnje T

$$T = W_p \tau_{tdop}$$

gdje je W_p – polarni moment otpora okrugle osovine

$$W_p = (\pi/16)d^3 \approx 0,2 d^3$$

a τ_{tdop} je dopušteno naprezanje na torziju.

Za osovine uzimamo čelik čvrstoće $R_m = 420 \dots 700 \text{ N/mm}^2$. Ako dodatni momenti savijanja nisu poznati, računamo s dopuštenim naprezanjem na torziju τ_{tdop} ovisno o promjeru osovine d

d (mm)	... 25	25 ... 50	50 ... 80	80 ...
τ_{tdop} (N/mm ²)	10	20	30	40

Ako su, međutim, momenti savijanja poznati, treba osovinu računati pomoću sastavljenih opterećenja (v. str. 122).

Za prijenos momenta vrtnje T treba promjer osovine d biti

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} \frac{T}{\tau_{tdop}}} \approx \sqrt[3]{\frac{5 T}{\tau_{tdop}}}$$

Moment vrtnje možemo izraziti snagom P , koju osovina prenosi, i brzinom vrtnje osovine n

$$T = \frac{P}{2\pi n}$$

Remenski prijenos

Zbog trenja između remena i remenice sila F_1 u vučnoj strani remena veća je od sile F_2 u povratnoj strani

$$F_1 > F_2 \quad \frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} = e^{\mu \alpha} \quad F_c = m_l v^2 = \rho A v^2$$

gdje su: e – baza prirodnih logaritama, μ – koeficijent trenja, α – obuhvatni kut (rad) remena na remenici, F_c – sila u remenu zbog centrifugalne sile, m_l – duljinska masa remena (kg/m), ρ – gustoća remena, A – presjek remena, v – brzina remena.

Vrijednosti izraza $e^{\mu \alpha}$

μ	120°	140°	160°	α	180°	200°	220°
0,2	1,52	1,63	1,75		1,88	2,01	2,16
0,4	2,31	2,66	3,06		3,51	4,04	4,65
0,6	3,51	4,33	5,34		6,59	8,12	10,0
0,8	5,34	7,06	9,34		12,4	16,3	21,6

Obodna sila F

$$F = F_1 - F_2 = (F_1 - F_c)(e^{\mu\alpha} - 1)/e^{\mu\alpha} = (F_2 - F_c)(e^{\mu\alpha} - 1)$$

Snaga P , koju remen prenosi pri obodnoj brzini $v = d\pi n$

$$P = Fv = (F_1 - F_2)d\pi n$$

Sila F_1 , kojom je remen napregnut (u vučnom dijelu):

$$F_1 = (F_1 - F_2)e^{\mu\alpha}/(e^{\mu\alpha} - 1) + F_c = A\sigma_{dop}$$

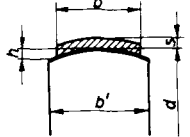
gdje su: A – presjek remena, σ_{dop} – dopušteno naprezanje remena.

Prijenosni omjer i je omjer brzine vrtnje n_1 pogonske remenice i brzine vrtnje n_2 gonjene remenice: $i = n_1/n_2$.

a) Plosnati remeni

izrađuju se od kože, gume, tekstila, umjetnih masa itd.

Širine remena i remenica (JUS M.C1.231 – 1965)



Mjere u mm											
b		b'		b		b'		b		b'	
16	20	50	63	100	112	180	200	315	355		
20	25	63	71	112	125	200	224	355	400		
25	32	71	80	125	140	224	250	400	450		
32	40	80	90	140	160	250	280	450	500		
40	50	90	100	160	180	280	315	500	560		
									630		

Promjeri remenica d (mm) (JUS M.C1.241 – 1965)

40	56	80	112	160	224	315	450	630	900	1250	1800
45	63	90	125	180	250	355	500	710	1000	1400	2000
50	71	100	140	200	280	400	560	800	1120	1600	

Izbočenost vijenca remenice h (JUS M.C1.242 – 1965). Mjere u mm

d	h	d	h	d	h
40...112	0,3	160, 180	0,5	250, 280	0,8
125, 140	0,4	200, 224	0,6	315, 355	1,0

Izbočenost za $d = 400 \dots 2000$ mm iznosi između 1 i 6 mm (ovisi i o širini remenice b').

Specifična snaga P/A , tj. prijenosna snaga remena P po jedinici presjeka A , ovisi o materijalu remena, obuhvatnom kutu α , relativnoj debljini s/d ($s =$ = debljina remena, $d =$ promjer remenice) i o obodnoj brzini v .

Specifična snaga P/A za plosnati kožni remen pri obuhvatnom kutu $\alpha = 180^\circ$

s/d	P/A (kW/mm ²)							
	v (m/s)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
1 : 400	0,013	0,025	0,036	0,047	0,056	0,063	0,065	0,063
1 : 200	0,012	0,023	0,034	0,045	0,053	0,060	0,062	0,059
1 : 100	0,011	0,021	0,032	0,042	0,049	0,055	0,057	0,053
1 : 50	0,010	0,019	0,029	0,037	0,043	0,047	0,048	0,042

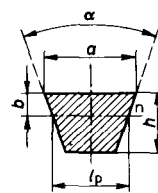
Prijenosni je omjer kod plosnatih remena: $i \leq 5$.

b) Beskonačni klinasti remeni

Profil klinastih remena je trapez širine (dulje) osnovice a i visine h , dok bočne stranice zatvaraju kut od 40° .

Normalni klinasti remeni (JUS G.E2.053 – 1964)

Oznaka profila	Dimenzije (mm)				
	a	h	b	l_p	L_p
Y	6	4	1,6	5,3	200... 1250
Z	10	6	2,4	8,5	400... 2800
A	13	8	3,1	11	560... 4000
B	17	11	4,1	14	800... 6300
C	22	14	5,6	19	1400... 9000
D	32	19	8,2	27	2240... 18000
E	38	25	9,7	32	3150... 18000



n – neutralna os
 $\alpha = 40 \pm 1^\circ$

Uski klinasti remeni

Oznaka profila	Dimenzije (mm)				
	a	h	b	l_p	L_p
SPZ	9,7	8	2	8,5	630... 3550
SPA	12,7	10	2,75	11	800... 4500
SPB	16,3	13	3,5	14	1250... 8000
SPC	22	18	4,8	19	2000... 12500

Računske duljine L_p (mm) (JUS G.E2.053 – 1964)

200	355	630	1120	2000	3550	6300	11200
224	400	710	1250	2240	4000	7100	12500
250	450	800	1400	2500	4500	8000	14000
280	500	900	1600	2800	5000	9000	16000
315	560	1000	1800	3150	5600	10000	18000

Snaga P , što je prenosi klinasti remen, ovisi o obuhvatnom kutu α , o najmanjem promjeru remenice d_{min} i o obodnoj brzini v .

Snaga P klinastog remena pri obuhvatnom kutu $\alpha = 180^\circ$

Oznaka profila	d_{min} mm	P (kW)							
		v (m/s)							
		2	4	6	10	14	18	22	26
Y	32	0,037	0,074	0,11	0,16	0,19	0,19	0,15	0,058
Z	63	0,14	0,27	0,41	0,64	0,81	0,88	0,88	0,74
A	90	0,27	0,55	0,81	1,25	1,6	1,9	2,0	1,9
B	125	0,51	0,96	1,4	2,3	2,9	3,4	3,5	3,3
C	210	0,89	1,75	2,6	4,1	5,3	6,1	6,4	5,9
D	345	1,7	3,3	4,8	7,7	10,0	11,5	12,1	11,2
E	490	2,6	5,2	7,7	11,9	15,4	18,1	18,9	17,5

Pri manjem obuhvatnom kutu α valja vrijednosti za snagu P množiti s faktorom k

α°	170	160	150	140	130	120	110	100	90
k	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86	0,82	0,78	0,73	0,68

Prijenosni je omjer kod klinastih remena $i \leq 10$ (... 15).

Lančani prijenos

Obodna sila F_0 proizlazi iz snage što je prenosi lanac pri brzini v , odnosno iz momenta vrtnje T lančanika (lančanog zupčanika) i promjera njegove diobene kružnice d_0

$$F_0 = \frac{P}{v} = \frac{2T}{d_0}$$

pri čemu brzina lanca, koja je jednaka obodnoj brzini na diobenom valjku, ovisi o brzini vrtnje n

$$v = d_0 \pi n$$

U lancu djeluje još i komponenta centrifugalne sile

$$F_c = m_1 v^2$$

gdje je m_1 – duljinska masa lanca (kg/m).

Ukupna sila, kojom je opterećen lanac, iznosi

$$F = F_0 + F_c$$

Bočni pritisak p na dodirne plohe članaka A

$$p = \frac{F}{A} < p_{dop}$$

Dopušteni bočni pritisak p_{dop} ovisi o brzini lanca v , a iznosi pri uobičajenim pogonskim prilikama:

v (m/s) 0,1 0,5 1,0 1,5 2 3 4 5,5 7 9 12
 p (N/mm²) 3100 2800 2600 2400 2250 2050 1850 1600 1400 1250 1000

Lančani

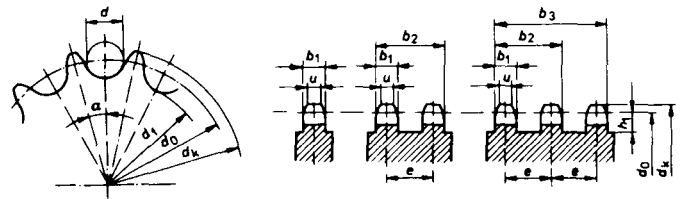
Promjer diobenog valjka d_0

$$d_0 = \frac{h}{\sin \alpha} = hN \quad \alpha = \frac{180^\circ}{z}$$

gdje su: h – korak lanca; α (°) – polovični kut među susjednim zupcima; z – broj zubaca lančanika.

Vrijednosti N

z	N	z	N	z	N	z	N	z	N
6	2,0000	16	5,1258	26	8,2962	36	11,4737	46	14,6537
7	2,3048	17	5,4422	27	8,6138	37	11,7916	47	14,9717
8	2,6131	18	5,7588	28	8,9314	38	12,1096	48	15,2898
9	2,9238	19	6,0755	29	9,2491	39	12,4275	49	15,6079
10	3,2361	20	6,3925	30	9,5668	40	12,7455	50	15,9260
11	3,5495	21	6,7095	31	9,8845	41	13,0635	51	16,2441
12	3,8637	22	7,0267	32	10,2023	42	13,3815	52	16,5622
13	4,1786	23	7,3439	33	10,5201	43	13,6995	53	16,8803
14	4,4940	24	7,6613	34	10,8380	44	14,0176	54	17,1984
15	4,8097	25	7,9787	35	11,1558	45	14,3356	55	17,5166

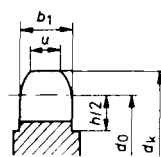


Tjemeni valjak
 za $z = 7 \dots 12$ $d_k = d_0 + (0,5 \dots 0,6)d$
 za $z = 13 \dots 25$ $d_k = d_0 + (0,6 \dots 0,7)d$
 za $z \geq 26$ $d_k = d_0 + (0,7 \dots 0,8)d$

Lančani za člankaste lance s valjcima

Lanac (mm)		Dimenzije lančanika (mm)				
h	e	b_1	b_2	b_3	u	h_1 min
6	5,5	2,5	8	–	1,3	3,5
8	5,64	2,7	8,3	–	1,5	5
12,7	–	3	–	–	2	8
12,7	–	4,4	–	–	3	8
25,4	31,88	15,4	47	79	11	17
25,4	31,4	15,4	53	90,2	11	17
31,75	36,45	18	54,5	91	13	19
38,1	48,36	23	71,4	120	16	25
44,45	59,56	28	87,6	147	20	28
50,8	58,55	28	86,6	145	20	31
63,5	72,29	34	106	178	24	41
76,2	91,21	41	132	233	29	48

Lančani za člankaste lance s tuljcima i svornjacima



Tjemeni valjak lančanika:

– za lance s tuljcima

$$d_k = d_0 + (0,8 \dots 1)d$$

– za lance sa svornjacima

$$d_k = d_0 + (3 \dots 4 \text{ mm})$$

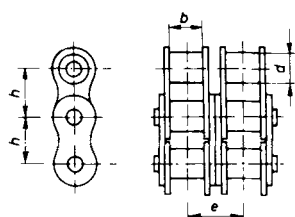
*

$$b_1 \approx 0,9 b \quad u \approx 0,6 b$$

b je nosiva širina lanca (vidi str. 558 i 559).

Člankasti lanci

su lanci s valjcima, tuljcima i svornjacima.



h – korak
 b – nosiva širina članka
 d – nosivi promjer članka
 e – razmak među člancima

Člankasti lanci s valjcima (JUS M.C1.820 – 1960), jedno-, dvo- in troredni

Dimenzije (mm)				Prekidna sila (kN)			Duljin. masa (kg/m)		
h	b min	d	e	jedno- redni	dvo- redni	tro- redni	jedno- redni	dvo- redni	tro- redni
6	2,8	4	—	3	—	—	0,12	—	—
8	3	5	5,64	5	9	—	0,18	0,36	—
12,7	3,3	7,75	—	8	—	—	0,40	—	—
12,7	4,88	7,75	—	8	—	—	0,44	—	—
25,4	17,02	15,88	31,88	45	80	115	2,7	5,4	8
(30)	17,02	15,88	—	45	—	—	2,5	—	—
31,75	19,56	19,05	36,45	55	100	140	3,6	7,2	11
38,1	25,4	25,4	48,36	120	215	300	6,7	13,5	21
44,45	30,99	27,94	59,56	140	250	360	8,3	16,6	25
50,8	30,99	29,21	58,55	180	320	450	10,5	21	32
63,5	38,1	39,37	72,29	270	480	680	16	32	48
76,2	45,75	48,26	91,21	400	700	1000	25	50	75

Člankasti lanci s valjcima:

- za povećano opterećenje (JUS M.C1.821 – 1960)
- s dugim člancima (JUS M.C1.822 – 1960)
- za poljoprivredne strojeve (JUS M.C1.827 – 1967)

Člankasti lanci s tuljcima (JUS M.C1.830 – 1960) — jednoredni

Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)	Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)
h	b	d			h	b	d		
15	14	9	12,5	1,20	55	45	30	125	13,6
20	16	12	25	2,15	60	50	32	160	14,9
25	18	15	31,5	2,55	65	55	36	200	18,9
30	20	17	40	4,00	70	65	42	250	24,7
35	22	18	50	4,30	80	70	44	315	31,0
40	25	20	63	5,50	90	80	50	400	41,8
45	30	22	80	7,55	100	90	56	500	48,4
50	35	26	100	9,04					

Člankasti (Gallovi) lanci sa svornjacima (JUS M.C1.840/841-1960) — jednoredni

Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)	Dimenzije (mm)			Prekidna sila (kN)	Dulj. masa (kg/m)
h	b	d			h	b	d		
Laki lanci									
20	8	7	2,5	0,26	50	20	11	40	2,76
25	12	5	5	0,35	60	22	12	60	3,14
35	15	8	12,5	0,69	70	25	14	80	3,31
40	18	10	25	1,25	80	30	17	100	4,50
Teški lanci									
3,5	2	2	0,75	0,07	45	30	17	100	6,4
6	4	3	1,25	0,16	50	35	22	150	10,6
8	6	3,5	1,5	0,25	55	40	24	200	15,5
10	8	4	2,5	0,40	60	45	26	250	18,0
15	12	5	5	0,70	70	50	32	375	33,5
20	15	8	12,5	1,10	80	60	36	500	38,2
25	18	10	25	1,75	90	70	40	750	53,0
30	20	11	40	3,4	100	80	45	1000	76,6
35	22	12	60	4,5	110	90	50	1250	90,0
40	25	14	80	4,7	120	100	55	1500	112

Broj članaka lanca x

$$x = 2 \frac{a}{h} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \frac{h}{a} \left(\frac{z_2 - z_1}{2} \right)^2$$

pri čemu znače: a — razmak osi; h — korak lanca; z_1 — broj zubaca malog lančanika; z_2 — broj zubaca velikog lančanika.

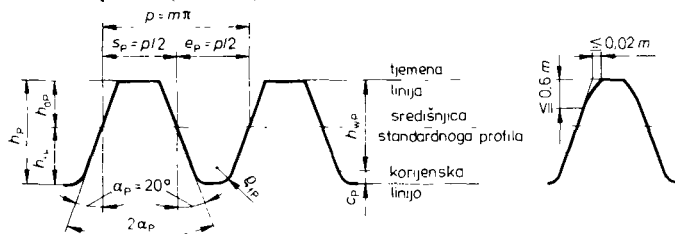
Zupčani prijenos

Prijenosni omjer i je omjer brzine vrtnje pogonskog zupčanika n_1 i gonjenog zupčanika n_2 , odnosno broja zubaca gonjenog zupčanika z_2 i malog pogonskog z_1

$$i = n_1/n_2 = z_2/z_1$$

$i > 1$ – prijenos na manju brzinu; $i < 1$ – prijenos na veću brzinu

Standardni profil evolventnih zupčanika (JUS M.C1.016 – 1958) – s novijim oznakama po ISO (DIN 876) osim oznaka po JUS:



Standardni profil koji treba upotrebljavati pri projektiranju i izradi evolventnih čelnika (cilindričnih zupčanika)

Korekcija profila koju, u slučaju potrebe, treba izvesti samo na glavi zupca

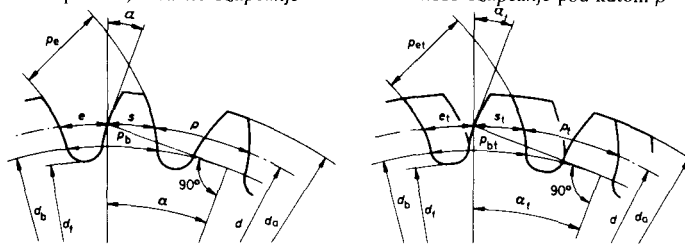
Veličina	Oznaka	
	ISO	JUS
standardni modul	$m = d/z$	m_n
korak	$p = m\pi$	t_n
visina zubnog vrha	$h_{ap} = m$	h_k
visina zubnog korijena	$h_{fp} = m + c$	h_t
visina ravnoga dijela	$h_{wp} = 2m$	h_n
visina zaokruženja	$c_p = 0,17m; 0,25m; 0,3m$	$c_n m_n$
polumjer zaokruženja	$\rho_{fp} = 0,25m; 0,38m; 0,45m$	ρ_n
visina zuba	$h_p = 2m + c$	h
kut nagiba	$\alpha_p = 20^\circ$	α_n
bočni kut	$2\alpha_p$	-

Standardni moduli m (mm) po ISO (JUS M.C1.015 – 1965):

1	1,375	2	2,75	3,5	4,5	6	8	11	16	22	32	45
1,125	1,5	2,25	3	(3,75)	5	(6,5)	9	12	18	25	36	50
1,25	1,75	2,5	(3,25)	4	5,5	7	10	14	20	28	40	

Upotrebljavati valja u prvom redu debelo tiskane vrijednosti modula (1. prednost), tanko tiskane u slučaju opravdanih razloga (2. prednost), a vrijednosti u zagradama samo iznimno (3. prednost).

Parovi čelnika (cilindričnih zupčanika) (JUS M.C1.012 – 1958) (s oznakama po ISO) ravno ozupčanje koso ozupčanje pod kutom β



Veličine parova čelnika	ravno ozubljenje	koso ozubljenje
Modul	$m = m_n^*$	$m_t = m_n/\cos \beta$
Zahvatni kut	$\alpha = (\alpha_p = 20^\circ)$	$\alpha_t = \arctan(\tan \alpha_p/\cos \beta)$
Diobeni cilindar		
- promjer	$d = mz$	$d = m_t z = m_n z/\cos \beta$
- korak	$p = m\pi$	$p_t = m_t \pi = m_n \pi/\cos \beta$
- osnovni korak	$p_b = p \cos \alpha$	$p_{bt} = p_t \cos \alpha_t$
- korak među evolventnim bokovima	$p_e = p \cos \alpha = p_b$	$p_{et} = p_t \cos \alpha_t = p_{bt}$
Debljina zupca		
- pri vanjskom ozupčanju	$s = p/2 + 2xm \tan \alpha$	$s_t = p_t/2 + 2xm_t \tan \alpha_t$
- pri unut. ozupčanju	$s = p/2 - 2xm \tan \alpha$	$s_t = p_t/2 - 2xm_t \tan \alpha_t$
Širina međuzublja	$e = p - s$	$e_t = p_t - s_t$
Promjeri korijenskih cilindara		
- pri vanjskom ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fp} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fp} - x_1 m_t)$
- pri unut. ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fp} - x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 - 2(h_{fp} - x_2 m_t)$
- pri vanjskom ozupčanju za gonjeni zupčanik	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fp} - x_1 m)$	$d_{f1} = d_1 - 2(h_{fp} - x_1 m_t)$
- pri unut. ozupčanju za gonjeni zupčanik	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fp} + x_2 m)$	$d_{f2} = d_2 + 2(h_{fp} + x_2 m_t)$
Promjeri osnovnih cilindara		
- pri vanjskom ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{a1} = 2(a - 0,5 d_{f2} - c_2)$	$d_{a2} = 2(a - 0,5 d_{f1} - c_1)$
- pri unut. ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{a1} = d_{f2} - 2(a + c_2)$	
- pri vanjskom ozupčanju za gonjeni zupčanik	$d_{a2} = d_{f1} + 2(a + c_1)$	$a = \text{razmak osi}$
- pri unut. ozupčanju za gonjeni zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i + 1)$	
- pri vanjskom ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{w2} = 2a/(i + 1) = id_{w1}$	
- pri unut. ozupčanju za pogonski zupčanik	$d_{w1} = 2a/(i - 1)$	
- pri unut. ozupčanju za gonjeni zupčanik	$d_{w2} = 2a/(i - 1) = id_{w1}$	

* m_n – normalni modul (modul u normalnoj ravni presjeka).

Pomak profila osnovne ozubnice izražava se umnoškom koeficijenta pomaka profila osnovne ozubnice x (koji je ovisan od broja zubaca i upadnog kuta α) i modula:

$$\begin{aligned} \text{pri ravnom ozupčanju: } & xm & (x_{\min} = 1 - 0,5 z \sin^2 \alpha) \\ \text{pri kosom ozupčanju: } & xm_i & (x_{\min} = 1 - 0,5 z \sin^2 \alpha_i) \end{aligned}$$

Pomakom profila osnovne ozubnice povećava se nosivost, sprečava podre-
zivanje pri malom broju zubaca ($z < 17$), a smanjuje relativna brzina klizanja.

Razmak osi

$$\begin{aligned} & \text{pri ravnom ozupčanju} & \text{pri kosom ozupčanju} \\ - \text{ pri vanjskom ozupčanju:} & & \\ a = 0,5 m(z_1 + z_2) \cos \alpha / \cos \alpha_w & & a = 0,5 m_i(z_1 + z_2) \cos \alpha_i / \cos \alpha_{wi} \\ - \text{ pri unutarnjem ozupčanju:} & & \\ a = 0,5 m(z_2 - z_1) \cos \alpha / \cos \alpha_w & & a = 0,5 m_i(z_2 - z_1) \cos \alpha_i / \cos \alpha_{wi} \end{aligned}$$

dok za pogonski zahvatni kut α_w odn. α_{wi} vrijedi:

$$\begin{aligned} - \text{ pri vanjskom ozupčanju:} & & \\ \text{inv } \alpha_w = 2(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2) \cdot & & \text{inv } \alpha_{wi} = 2(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2) \cdot \\ \cdot \tan \alpha + \text{inv } \alpha & & \cdot \tan \alpha_i + \text{inv } \alpha_i \\ - \text{ pri unutarnjem ozupčanju:} & & \\ \text{inv } \alpha_w = 2(x_2 - x_1)/(z_2 - z_1) \cdot & & \text{inv } \alpha_{wi} = 2(x_2 - x_1)/(z_2 - z_1) \cdot \\ \cdot \tan \alpha + \text{inv } \alpha & & \cdot \tan \alpha_i + \text{inv } \alpha_i \end{aligned}$$

Vrijednost evolventne funkcije $\text{inv } \alpha$ ($= \tan \alpha - \alpha$) – vidi str. 33!

Mjerni broj zubaca

$$\begin{aligned} k = \frac{z}{\pi} (\tan \alpha_x - \text{inv } \alpha) - & & k = \frac{z}{\pi} \left(\frac{\tan \alpha_{xt}}{\cos^2 \beta_b} - \text{inv } \alpha_i \right) - \\ - \frac{2x \tan \alpha}{\pi} + 0,5 & & - \frac{2x \tan \alpha_i}{\pi} + 0,5 \end{aligned}$$

pri čemu je

$$\tan \alpha_x = \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{4(x/z)(1+x/z)}{\cos^2 \alpha}} \quad \tan \alpha_{xt} = \sqrt{\tan^2 \alpha_i + \frac{4(x/z)(1+x/z)}{\cos^2 \alpha_i}}$$

$$\sin \beta_b = \sin \beta \cos \alpha_n$$

pri čemu je $\alpha_n = \alpha_p$

Mjerni broj zubaca k zaokružujemo na najbliži cijeli broj.

Ako je $x = 0$, dobivamo:

$$k = z \hat{\alpha} / \pi + 0,5 \quad k = z(\hat{\alpha}_i + \tan \alpha_i \cdot \tan^2 \beta_b) / \pi + 0,5$$

Mjera pomoću zubaca:

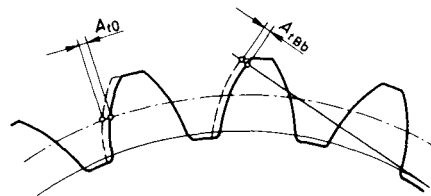
$$\begin{aligned} W = m \cos \alpha [\pi(k - 0,5) + & & W = m \cos \alpha_i [\pi(k - 0,5) + z \text{inv } \alpha_i + \\ + z \text{inv } \alpha + 2x \tan \alpha] & & + 2x \tan \alpha_i] \cdot \cos \beta_b \end{aligned}$$

Tolerancije parova evolventnih čelnika (ISO) (JUS M.C1.031 – 1966)

Za sve tolerancije parova čelnika s evolventnim zupcima predviđeno je 12 kvaliteta – osim za tolerancije razmaka osi, za koje je predviđeno 6 kvaliteta. Kvaliteta izražava stupanj točnosti, tj. odgovarajuću veličinu tolerancije.

Granična odstupanja koraka zubnog profila A_{T0} i dopušteni zbroj odstupanja koraka zubnog profila TT_{T0}

Kvaliteta	A_{T0}		TT_{T0} (μm)
	gornje $A_{T0,g}$ (μm)	donje $A_{T0,d}$ (μm)	
1	$0,66 \varphi_p + 0,80$	$A_{T0,d} = -A_{T0,g}$	$0,25 \sqrt{N} + 0,60$
2	$0,10 \varphi_p + 1,25$		$0,40 \sqrt{N} + 1,00$
3	$0,16 \varphi_p + 2,00$		$0,63 \sqrt{N} + 1,60$
4	$0,25 \varphi_p + 3,20$		$1,00 \sqrt{N} + 2,50$
5	$0,40 \varphi_p + 5,00$		$1,60 \sqrt{N} + 4,00$
6	$0,63 \varphi_p + 8,00$		$2,50 \sqrt{N} + 6,00$
7	$0,90 \varphi_p + 11,00$		$3,55 \sqrt{N} + 8,00$
8	$1,25 \varphi_p + 16,00$		$5,00 \sqrt{N} + 12,00$
9	$1,80 \varphi_p + 22,00$		$7,10 \sqrt{N} + 17,00$
10	$2,50 \varphi_p + 32,00$		$10,00 \sqrt{N} + 25,00$
11	$3,55 \varphi_p + 45,00$		$14,00 \sqrt{N} + 33,00$
12	$5,00 \varphi_p + 63,00$		$20,00 \sqrt{N} + 50,00$
	$\varphi_p = m_n + 0,25 \sqrt{d}$ m_n (mm), d (mm)		$N = 0,5 z m \pi$ m (mm)

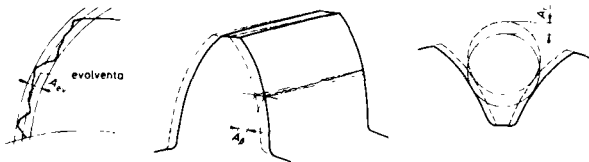


Granična odstupanja pri osnovnom koraku bokova zubaca

- za zupčanike s ravnim zupcima
 $A_{TBb,g} = A_{T0,g}$ $A_{TBb,d} = A_{T0,d}$
- za zupčanike s kosim zupcima
 $A_{TBb,g} = A_{T0,g} \cdot \cos \beta_0$ $A_{TBb,d} = A_{T0,d} \cdot \cos \beta_0$

Tolerancije profila T_{ev} i bočne linije zupca T_{β}

Kvalitetni razred	T_{ev} (μm)	T_{β} (μm)
1	$0,06 \varphi_p + 2,00$	$0,315 \sqrt{b} + 1,60$
2	$0,10 \varphi_p + 2,50$	$0,40 \sqrt{b} + 2,00$
3	$0,16 \varphi_p + 3,00$	$0,50 \sqrt{b} + 2,50$
4	$0,25 \varphi_p + 4,00$	$0,63 \sqrt{b} + 3,00$
5	$0,40 \varphi_p + 5,00$	$0,80 \sqrt{b} + 4,00$
6	$0,63 \varphi_p + 6,30$	$1,00 \sqrt{b} + 5,00$
7	$1,00 \varphi_p + 8,00$	$1,25 \sqrt{b} + 6,00$
8	$1,60 \varphi_p + 10,00$	$2,00 \sqrt{b} + 10,00$
9	$2,50 \varphi_p + 16,00$	$3,15 \sqrt{b} + 16,00$
10	$4,00 \varphi_p + 25,00$	$5,00 \sqrt{b} + 25,00$
11	$6,30 \varphi_p + 40,00$	$8,00 \sqrt{b} + 40,00$
12	$10,00 \varphi_p + 63,00$	$12,50 \sqrt{b} + 63,00$
	$\varphi_t = m_n + 0,1\sqrt{d}$ m_n (mm), d (mm)	b (mm)



Tolerancije kružnog toka T_r

Kvalitetni razred	T_r (μm)	Kvalitetni razred	T_r (μm)
1	$0,224 \varphi_p + 3,00$	7	$3,15 \varphi_p + 40,00$
2	$0,355 \varphi_p + 4,50$	8	$4,00 \varphi_p + 50,00$
3	$0,56 \varphi_p + 7,00$	9	$5,00 \varphi_p + 63,00$
4	$0,90 \varphi_p + 11,00$	10	$6,30 \varphi_p + 80,00$
5	$1,40 \varphi_p + 18,00$	11	$8,00 \varphi_p + 100,00$
6	$2,24 \varphi_p + 28,00$	12	$10,00 \varphi_p + 125,00$
	$\varphi_p = m_n + 0,25\sqrt{d}$		m_n (mm), d (mm)

Tolerancije pri tangencijalnoj kontroli zahvatom tj. pri kontroli zahvatom u etalonski zupčanik s konstantnim nazivnim razmakom osi. (Registriramo odstupanja stvarnog kuta rotacije gonjenog zupčanika.)

- A_i' – odstupanje s obzirom na 1 okretaj
- $\Delta A_i'$ – odstupanje s obzirom na 1 korak
- tolerancija odstupanja $T_i' = TT_{10} + T_{ev}$
- tolerancija porasta odstupanja $\Delta T_i' = A_{10,g} + T_{ev}$

Tolerancije pri radijalnoj kontroli zahvatom

tj. pri kontroli zahvatom u etalonski zupčanik bez bočne zračnosti – što postizemo elastičnim radijalnim pritiskanjem zupčanika na etalonski zupčanik stalnom silom. (Registriramo odstupanja razmaka osi.)

- A_i'' – odstupanje s obzirom na 1 okretaj
- $\Delta A_i''$ – odstupanje s obzirom na 1 korak

Kvalitetni razred	T_i'' (μm)	$\Delta T_i''$ (μm)
1	$0,32 \varphi_p + 4,00$	$0,16 \varphi_p + 2,00$
2	$0,50 \varphi_p + 6,00$	$0,224 \varphi_p + 3,00$
3	$0,80 \varphi_p + 10,00$	$0,32 \varphi_p + 4,00$
4	$1,25 \varphi_p + 16,00$	$0,45 \varphi_p + 6,00$
5	$2,00 \varphi_p + 25,00$	$0,56 \varphi_p + 9,00$
6	$3,20 \varphi_p + 40,00$	$0,90 \varphi_p + 12,00$
7	$4,50 \varphi_p + 56,00$	$1,25 \varphi_p + 16,00$
8	$5,60 \varphi_p + 71,00$	$1,80 \varphi_p + 22,00$
9	$7,10 \varphi_p + 90,00$	$2,24 \varphi_p + 28,00$
10	$9,00 \varphi_p + 112,00$	$2,80 \varphi_p + 36,00$
11	$11,20 \varphi_p + 140,00$	$3,55 \varphi_p + 45,00$
12	$14,00 \varphi_p + 180,00$	$4,50 \varphi_p + 56,00$
	$\varphi_p = m_n + 0,25\sqrt{d}$	m_n (mm), d (mm)

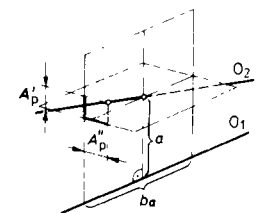
Tolerancija paralelnosti osi

Inklinacija osi A_p' je komponentno odstupanje paralelnosti osi u ravnini, koja je određena jednom osi i okomicom na nju do druge osi.

Dozvoljena inklinacija $T_p' = T_{\beta}$

Devijacija osi A_p'' je komponentno odstupanje paralelnosti osi u ravnini, koja je paralelna s jednom osi i okomita na inklinacijsku ravninu.

Dozvoljena devijacija $T_p'' = T_{\beta}/2$



a – razmak osi
 b_a – aktivna širina zupčanika
 O_1, O_2 – osi

Tolerancije za mjeru pomoću zubaca označujemo dvama slovima iz niza $j \dots r'$, od kojih označuje

- prvo – gornje granično odstupanje $A_{w,g}$
- drugo – donje granično odstupanje $A_{w,d}$

Odstupanja dobivamo tako da gornje granično odstupanje koraka $A_{to,g}$ pomnožimo slijedećim koeficijentima:

niz	j	h	g	f	e	d	c	b	a
koeficijent	+1	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14
niz	z'	y'	x'	w'	v'	u'	t'	s'	r'
koeficijent	-18	-22	-26	-30	-34	-38	-42	-46	-50

Primjer označivanja kvalitete tolerancije za mjeru pomoću zubaca: npr. 5 fa.

Grafična odstupanja razmaka osi

Odstupanje razmaka osi A_a je algebarska razlika između stvarnog i nazivnog razmaka osi.

Kvalitetni razred	Gornje odstupanje $A_{a,g}$ (μm)	Kvalitetni razred	Gornje odstupanje $A_{a,g}$ (μm)
1	0,5 IT 4	4	0,5 IT 8
2	0,5 IT 6	5	0,5 IT 9
3	0,5 IT 7	6	0,5 IT 11

Donje odstupanje: $A_{a,d} = -A_{a,g}$

Kružna zračnost

– za zupčanike s ravnim zupcima

$$j_{max} = - (A_{w1,d} + A_{w2,d}) / \cos \alpha_w + 2A_{a,g} \tan \alpha_w$$

$$j_{min} = - (A_{w1,g} + A_{w2,g}) / \cos \alpha_w + 2A_{a,d} \tan \alpha_w$$

– za zupčanike s kosim zupcima

$$j_{max} = - \frac{A_{w1,d} + A_{w2,d}}{\cos \alpha_{wt} \cos \beta_b} + 2A_{a,g} \tan \alpha_{wt}$$

$$j_{min} = - \frac{A_{w1,g} + A_{w2,g}}{\cos \alpha_{wt} \cos \beta_b} + 2A_{a,d} \tan \alpha_{wt}$$

Da spriječimo interferenciju (istodobno prekrivanje) zubnih bokova, mora biti

$$j_{min} > 2(T_{11}'' + T_{12}'') \tan \alpha_{wt}$$

Orijentacijske vrijednosti za kružnu zračnost u ovisnosti o standardnom modulu m_n

$$j = k(m_n + 1) \quad m_n \text{ (mm)} \quad j \text{ (μm)}$$

pri čemu faktor k iznosi:

- $k = 26 \dots 38$ – bez posebnih zahtjeva
- $k = 18 \dots 32$ – za alatne strojeve
- $k = 18 \dots 50$ – u automobilskoj industriji

Izbor kvaliteta tolerancije zupčanika

Kvalitet tolerancije zupčanika odabiremo s obzirom na upotrebu, obodnu brzinu i način obrade.

Izbor s obzirom na upotrebu

Upotreba	Kvalitet tolerancije											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
etalonski zupčanici												
precizni instrumenti												
precizni prigoni												
automobili												
kamioni												
opće strojarstvo												
grubi strojevi												

Izbor s obzirom na obodnu brzinu

Obodna brzina (m/s)	Kvalitet tolerancije											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
> 20												
20...6												
6...3												
< 3												

Izbor s obzirom na način obrade

Način obrade	Kvalitet tolerancije											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
brušenje												
brijanje												
precizno odvajanje čestica												
osrednje odvajanje čestica												
obično odvajanje čestica												

Razred površinske obrade (orijentacijski)

Standardni modul m_n (mm)	Kvalitet tolerancije											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1...2												
2...4												
4...6	4			5		6		7		8		9
6...8												
8...10												
10...16												
16...20												11

Proračun čvrstoće čelnika (po DIN 3990)

Prvi proračun – za osnovu

Za poznati okretni moment na pogonskom zupčaniku T_1 izračunavamo:

– promjer diobene kružnice pogonskog zupčanika

$$d_1 \geq \sqrt{2 \frac{T_1}{b_k} \cdot \frac{i+1}{i} \cdot \frac{S_{Hmin}}{\sigma_{Hlim}} Z_M \cdot Q_H}$$

– modul

$$m \geq 2 \frac{T_1}{b_k d_1} \cdot \frac{S_{Fmin}}{\sigma_{Flim}} Y_F \cdot Q_F$$

gdje su:

b_k – širina korisnog dijela boka zupca

i – prijenosni omjer

S_{Hmin} – najmanji koeficijent sigurnosti s obzirom na jamičenje ($\geq \sqrt{1,4}$)

S_{Fmin} – najmanji koeficijent sigurnosti s obzirom na trajni lom ($\geq 1,7$)

σ_{Hlim} – dinamička čvrstoća za bočni tlak (Hertzov tlak)

Materijal	Tvrd. HV	σ_{Hlim} (N/mm ²)
čelik za cementiranje	650...750	1450...1650
čelik za poboljšanje, nelegiran	140...200	500...610
legiran	200...400	1,25 HV + (245...355)
čelični ljev, legiran	200...400	1,10 HV + (210...310)

σ_{Flim} – dinamička čvrstoća za naprezanje u korijenu zupca

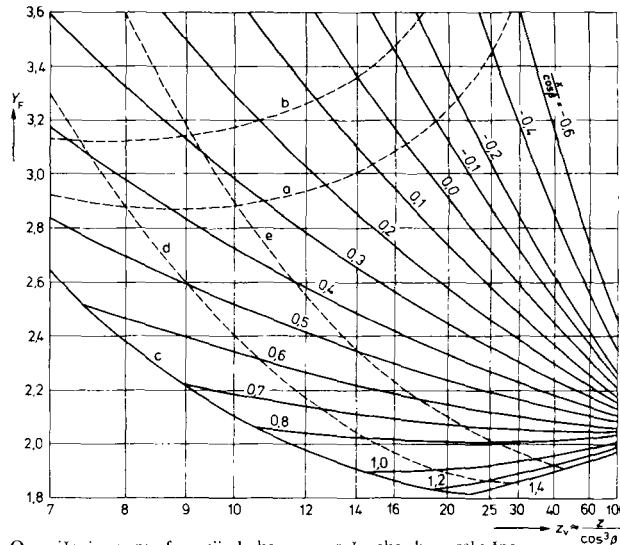
Materijal	Tvrd. HV	σ_{Hlim} (N/mm ²)
čelik za cementiranje	650...750	350...500
čelik za poboljšanje, nelegiran	140...200	0,67 HV + (55...115)
legiran	200...400	0,43 HV + (115...195)
čelični ljev, legiran	200...400	0,40 HV + (40...120)

Z_M – karakteristika materijala

$$Z_M = \sqrt{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}$$

Kombinacije materijala	Z_M (√N/mm ²)
čelik – čelik	268
čelik – čelični ljev	267
čelik – sivi ljev	234
čelik – bronca	219

Y_F – koeficijent oblika zupca (ovisi o broju zuba z , kutu nagiba bočne linije β_0 i koeficijentu pomaka profila osnovne ozubnice x)



Ograničenje za interferenciju bokova: a – računsko; b – praktično
Ograničenje za siljasti vrh: c: $s_k = 0$; d: $s_k = 0,2 m_n$; e: $s_k = 0,4 m_n$

Q_H, Q_F – korekcijski faktori		Točno ozupčanje	Grubo ozupčanje
$Q_H = \frac{Q_{HA} Q_{HB}}{Q_{HD}}$	Q_{HA}	> 1	> 1
	$Q_{HB} \begin{cases} \beta = 0^\circ \\ \beta \approx 30^\circ \end{cases}$	1,45...1,50	1,77
	Q_{HD}	1,20...1,30	1,77
$Q_F = \frac{Q_{FA} Q_{FB}}{Q_{FD}}$	$Q_{FA} (\leq Q_{HA})$	> 1	> 1
	Q_{FB}	0,55...0,75	1
	$Q_{FD} \begin{cases} \rho_f \geq 0,25 m & 1.2) \\ \rho_f < 0,25 m & 1.3) \end{cases}$	≈ 1 < 1	≈ 1 < 1

¹⁾ β_0 – kut nagiba bočne linije, ρ_f – zaobljenost u korijenu. – ²⁾ Ako u prijelaznim dijelovima bokova zupca nema zareza. – ³⁾ Ako su u prijelaznim dijelovima bokova zupca zarezi (npr. stepenica pri bušenju).

Kontrola podataka iz prvog proračuna

Koeficijenti sigurnosti moraju biti:

— s obzirom na jamičenje

$$S_H = \frac{d_{o1}}{\sqrt{2} \frac{T_1}{b_k} \cdot \frac{i+1}{i}} \cdot \frac{\sigma_{H \text{ lim}}}{Z_M} \cdot \frac{1}{Q_H'} > S_{H \text{ min}}$$

— s obzirom na trajni lom

$$S_F = \frac{m}{2 \frac{T_1}{b_k d_{o1}}} \cdot \frac{\sigma_{F \text{ lim}}}{Y_F} \cdot \frac{1}{Q_F'} > S_{F \text{ min}}$$

pri čemu su:

$$\frac{1}{Q_H'} = \frac{Z_v Z_R}{Z_H Z_\epsilon} \cdot \frac{K_L K_{H\alpha}}{\sqrt{K_I K_v K_{F\alpha} K_{H\beta}}} \cdot \frac{1}{Y_s} \cdot \frac{1}{K_{Fx}}$$

$$\frac{1}{Q_F'} = \frac{1}{Y_\beta Y_\epsilon K_I K_v K_{F\alpha} K_{F\beta}}$$

dok pojedini (bezdimenzijski) koeficijenti iznose:¹⁾

Z_v — koeficijent brzine (≈ 1)*

Z_R — koeficijent hrapavosti ($= 0,8 \dots 1$)*

Z_H — koeficijent oblika boka zupca

$$Z_H = \sqrt{\frac{\cos \beta_b}{\tan \alpha} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}} \quad \begin{matrix} \alpha - \text{kut zahvata} \\ \beta_b - \text{kut zavojnice na osnovnom valjku} \end{matrix}$$

Z_ϵ — koeficijent zahvata

$$Z_\epsilon = \sqrt{\left[\frac{4 - \epsilon_p}{3} (1 - \epsilon_q) + \frac{\epsilon_q}{\epsilon_p} \right] \cos \beta_b}$$

$$\epsilon_p = \frac{z_1}{2} [\tan \alpha_{k1} + i \tan \alpha_{k2} - (i+1) \tan \alpha]$$

$$\tan \alpha_k = \sqrt{(d_k/d_b)^2 - 1}$$

d_k — promjer tjemnog valjka

$$\epsilon_q = \frac{b_A \sin \beta_0}{m_n \pi}$$

d_b — promjer osnovnog valjka
 b_A — širina aktivnog dijela bokova zupca

Y_s — koeficijent zarezeta (≈ 1)*

Y_β — koeficijent nagiba zupca $Y_\beta = 1 - \beta_0/120 \geq 0,75$

Y_ϵ — koeficijent razdiobe sile $Y_\epsilon = 1/\epsilon_p$

¹⁾ Vrijednosti označene zvijezdicom * samo su orijentacijske.

K_L — koeficijent maziva ($= 0,82 \dots 1,1$)*

$K_{H\alpha}$ — veličinski koeficijent (≈ 1)*

K_{Fx} — veličinski koeficijent (≈ 1)*

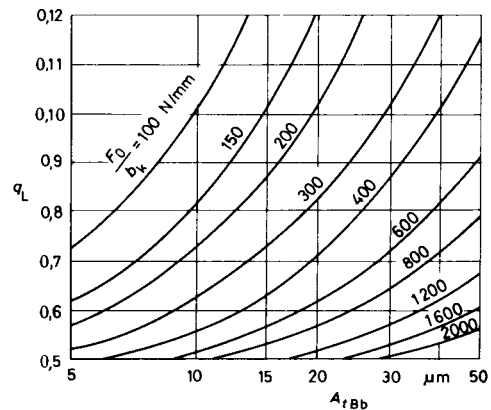
K_I — koeficijent udarnog opterećenja

		Rad radnog stroja		
		jednoliki	nejednoliki	udarni
Rad pogonskog stroja	jednoliki	1,00	1,25	1,75
	nejednoliki	1,10	1,35	1,80
	udarni	1,25	1,50	1,85

K_v — dinamički koeficijent (≈ 1)*

$K_{H\alpha}$ — koeficijent razdiobe sile u ravni profila

$$K_{H\alpha} = 1 + 2(1/Z_\epsilon^2 - 1)(q_L - 0,5)$$



$K_{F\alpha}$ — koeficijent razdiobe sile u ravni profila

$$K_{F\alpha} = 1 + 2(\epsilon_p - 1)(q_L - 0,5)$$

$K_{H\beta}$ — koeficijent razdiobe sile po širini zupca

$$K_{H\beta} = 1,5 b_k/b_A$$

$K_{F\beta}$ — koeficijent razdiobe sile po širini zupca pri jednolikoj razdiobi opterećenja

$$K_{F\beta} \approx (1 + K_{H\beta})/2 \quad 1 < K_{H\beta} < 2$$

pri nejednolikoj razdiobi opterećenja

$$1 < K_{F\beta} \leq 0,75 K_{H\beta} \quad K_{H\beta} = 2 b_k/b_A$$

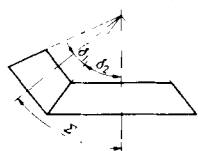
Parovi stožnika (DIN 3971 – 1980)

Prijenosni omjer je

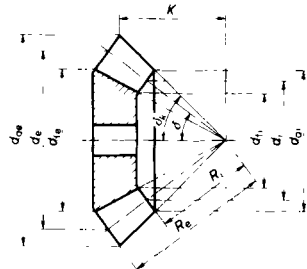
$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

gdje su: n_1 i n_2 – brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika, z_1 i z_2 – brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.

Kutovi kinematičkih stožaca δ_1 i δ_2 ovise o prijenosnom omjeru i te o kutu među osima $\Sigma = \delta_1 + \delta_2$:



Mjere stožnika



$$\delta_1 = \arctan \frac{\sin \Sigma}{i + \cos \Sigma}$$

$$\delta_2 = \arctan \frac{i \sin \Sigma}{1 + i \cos \Sigma}$$

$$\frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_1} = i = \frac{z_2}{z_1}$$

Promjeri kinematičkih kružnica:

vanjski $d_c = 2 R_e \sin \delta$

nutarnji $d_i = 2 R_i \sin \delta$

gdje su duljine izvodnice stošca:

R_e – vanjska, R_i – unutarnja

$$R_e = \frac{d_c}{2 \sin \delta} = \frac{z m_{te}}{2 \sin \delta}$$

Promjeri tjemernih kružnica:

$$d_{ae} = d_e + 2 h_{ae} \cos \delta$$

$$d_{ai} = d_i + 2 h_{ai} \cos \delta$$

Promjeri korijenskih kružnica:

$$d_{te} = d_e - 2 h_{te} \cos \delta$$

$$d_{ti} = d_i - 2 h_{ti} \cos \delta$$

h_{ke} (h_{te}) i h_{ki} (h_{ti}) su visine vrha (odn. korijena) zubaca za vanjske i unutarnje duljine izvodnice stošca.

Udaljenost vanjske tjemene kružnice

$$K = R_e \cos \delta - h_{ae} \sin \delta = d_c/2 \cdot \cot \delta - h_{ae} \sin \delta$$

Kut tjemernog stošca $\vartheta_a = \delta + \vartheta_a$ $\vartheta_a = \arctan (h_{ae}/R_e)$

Kut podnožnog stošca $\vartheta_t = \delta - \vartheta_t$ $\vartheta_t = \arctan (h_{te}/R_e)$

Korak – kutni $\tau = 2 \pi/z$ $\tau_1/\tau_2 = z_2/z_1 = i$

– lučni $\rho_t = \tau d/2 = d \pi/z = m_t \pi$

Modul $m_t = \rho_t/\pi = d/z$

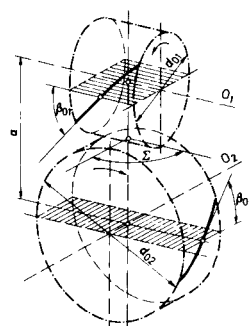
Parovi hiperboloidnih zupčanika

Evolutni hiperboloidni parovi zupčanika

Prijenosni omjer je

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

gdje su: n_1 i n_2 – brzine vrtnje pogonskog i gonjenog zupčanika, z_1 i z_2 – brojevi zubaca pogonskog i gonjenog zupčanika.



Kut među osima iznosi

$$\Sigma = \beta_{01} + \beta_{02}$$

gdje su β_{01} i β_{02} – kutovi nagiba bočnih linija u pogonskog i gonjenog zupčanika.

Promjeri diobenih kružnica:

– pogonskog zupčanika

$$d_{01} = \frac{z_1 m_n}{2 \cos \beta_{01}}$$

– gonjenog zupčanika

$$d_{02} = \frac{z_2 m_n}{2 \cos \beta_{02}}$$

Za kut među osima $\Sigma = \beta_{01} + \beta_{02} = 90^\circ$ iznose:

– razmak osi a

$$a = \frac{d_{01} + d_{02}}{2} = \frac{m_n}{2} \left(\frac{z_1}{\cos \beta_{01}} + \frac{z_2}{\cos \beta_{02}} \right)$$

$$a = \frac{z_1 m_n}{2} \left(\frac{1}{\cos \beta_{01}} + \frac{i}{\sin \beta_{01}} \right)$$

– kutovi nagiba bočne linije β_{01} i β_{02}

$$\left. \begin{array}{l} \tan \beta_{01} \geq \sqrt{i} \\ \beta_{02} = 90^\circ - \beta_{01} \end{array} \right\} \text{ ako je } \frac{1}{\cos \beta_{01}} + \frac{i}{\sin \beta_{01}} = \frac{2a}{z_1 m_n}$$

– razmak osi za prijenosni omjer $i = 1$

$$a = \frac{z_1 m_n}{\sin 2\beta_{01}} (\sin \beta_{01} + \cos \beta_{01})$$

pti čemu je

$$\sin \beta_{01} = \frac{1}{2K^2} (1 + \sqrt{1 + 4K^2})$$

$$K = a/z_1 m_n$$

Cilindrični pužni prijenos (ISO)
(DIN 3975 – 1976)

S obzirom na oblik bokova zubaca pužnog vijka, koji je ovisan o postupku obrade, razlikuju se parovi cilindričkog pužnog prijenosa ZA (oblika bokova A), ZN (oblika bokova N), ZI (oblika bokova I) i ZK (oblika bokova K).

Prijenosni omjer je $i = n_1/n_2 = z_2/z_1$

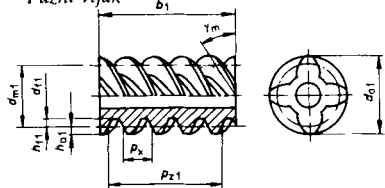
pri čemu su: n_1 i n_2 – brzine vrtnje pužnog vijka i pužnog kola, z_1 i z_2 – brojevi zubaca pužnog vijka i pužnog kola.

Kut među osima Σ je po volji; obično je $\Sigma = 90^\circ$.

Moduli m (mm):

1	1,25	1,5	2	2,5	3	4
5	6	8	10	12	16	20

Pužni vijak



Promjer središnjeg valjka
 $d_{m1} = m q$

Pužna karakteristika q :	1. prednost:	8	10	12	16	20
	2. prednost:	7	9	11	14	18

Kut središnje zavojnice

$$\gamma_m = \arctan(z_1/q) = \arctan(m z_1/d_{m1})$$

Osni korak

$$p_x = m \pi$$

Debljina zupca (širina međuzublja) na središnjem valjku u ravni presjeka kroz os

$$s_{mx} = e_{mx} = m \pi/2$$

Korak zavojnice

$$p_{z1} = z_1 p_x = z_1 m \pi$$

Visina zupčanog vrha

$$h_{a1} = m$$

U posebnim slučajevima može visina vrha zupca biti nešto veća ili manja od m .

Visina korijena zupca

$$h_{f1} = m(1 + c_1)$$

pri čemu je $c_1 = 0,1 \dots 0,3$ ($c_1 \approx 0,2$).

Promjer tjemelog valjka

$$d_{a1} = d_{m1} + 2 h_{a1}$$

Promjer podnožnog valjka

$$d_{f1} = d_{m1} - 2 h_{f1}$$

Pužno kolo

Promjer diobene kružnice $d_2 = z_2 m$

Korak $p_2 = m \pi = d_2 \pi/z_2 = p_x$

Promjer tjemene kružnice

$$d_{a2} = d_2 + 2 m(1 + x)$$

Promjer tjemelog valjka

$$d_{c2} = d_{a2} + m$$

Promjer anuloidne kružnice

$$r_k = a - (d_{a2}/2)$$

Promjer podnožne kružnice

$$d_{f2} = d_{a2} - 2 m(2 + c_2)$$

Visina zupca

$$h_2 = h_{a2} + h_{f2}$$

Visina zupčanog vrha

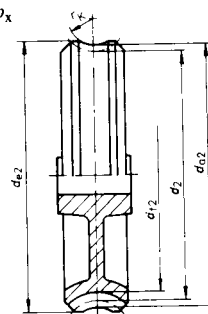
$$h_{a2} = m(1 + x)$$

Visina zupčanog korijena

$$h_{f2} = m(1 - x + c_2)$$

pri čemu su: $c_2 = 0,1 \dots 0,3$ ($c_2 \approx 0,2$); x – koeficijent pomaka profila.

Razmak osi $a = 0,5(d_{m1} + d_2) + x m$



Izbor veličina za pužni prijenos

Broj zubaca pužnog vijka z_1 i mehanička korisnost η_m ovise o prijenosnom omjeru i :

i	5...10	10...15	15...30	> 30
z_1	4	3	2	1
η_m	0,78...0,90	0,75...0,88	0,65...0,85	0,55...0,80

Okretni moment na pužnom kolu T_2 proizlazi iz okretnog momenta na pužnom vijku T_1 , prijenosnog omjera i i mehaničke korisnosti η_m

$$T_2 = i T_1 \eta_m$$

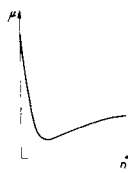
Modul procjenjujemo prema jednadžbi

$$m \approx 0,43 \sqrt{\frac{T_2}{p z_2}} \quad \begin{matrix} m \text{ (mm)} \\ T_2 \text{ (N} \cdot \text{mm)} \\ p \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{matrix}$$

pri čemu ocjenjujemo bočni pritisak s obzirom na materijal pužnog kola:

materijal	p (N/mm ²)
sivi lijev	2...3
bakrene slitine s kositrom	5...8
aluminijske slitine	4...7

Promjer središnjeg valjka pužnog vijka d_m ocjenjujemo s obzirom na modul m i broj zubaca pužnog vijka z_1 : za puni pužni vijak $d_m \approx 2 m (1,4 + 2\sqrt{z_1})$ za navučeni pužni vijak $d_m \approx 2 m (5,3 + 0,1 z_1)$ a zatim ga odabiremo s obzirom na $d_m = m q$ (str. 574).



LEŽAJI

Klizni ležaji

U stanju mirovanja klizne se plohe rukavca i blazinice ležaja dodiruju neposredno. Zbog toga se u početku pogona pojavljuje »suho trenje« s razmjerno velikim koeficijentom trenja $\mu = 0,1 \dots 0,2$. U tom je stanju potrebno ulje utiskivati pod tlakom u ležaj.

Kako se brzina vrtnje n povećava, stvara se između rukavca i blazinice uljni film i podmazivanje prelazi postupno u hidrodinamičko, u kojem se koeficijent trenja snižuje na $\mu = 0,005 \dots 0,01$ (a zatim s povećanjem brzine vrtnje opet raste).

Prosječni pritisak p_{med} u ležaju je

$$p_{med} = F/dl$$

gdje su: F – sila, koja djeluje okomito na ležaj, d – promjer rukavca, l – nosiva duljina rukavca: $l = (0,5 \dots 1)d$.

Prosječni pritisak p_{med} za različite materijale blazinica približno je u sljedećim granicama:

materijal	p_{med} (N/mm ²)	materijal	p_{med} (N/mm ²)
bijela kovina	5 ... 15	sivi lijev	$\leq 0,8$
olovna bronca	15 ... 35	guma (u vodi)	$\leq 0,4$

Relativna zračnost ψ u ležaju, potrebna za nastajanje uljnog filma, iznosi

$$\psi = (D - d)/d$$

gdje su: D – promjer blazinice, d – promjer rukavca.

Relativna zračnost ψ ovisi o prosječnom pritisku p_{med} i brzini vrtnje n . Vrijednosti relativne zračnosti vide se u sljedećoj tablici:

Brzina vrtnje n	Relativna zračnost ψ	
	malen p_{med}	velik p_{med}
malena	$(0,7 \dots 1,2) 10^{-3}$	$(0,3 \dots 0,6) 10^{-3}$
velika	$(2 \dots 3) 10^{-3}$	$(1,5 \dots 2,5) 10^{-3}$

Uzimajući u obzir različite koeficijente temperaturnog rastezanja, preporučljivo je odabrati sljedeće relativne zračnosti prema materijalu blazinice:

materijal	ψ	materijal	ψ
bijela kovina	$(0,5 \dots 1) 10^{-3}$	sinterovano željezo	$(1,5 \dots 2) 10^{-3}$
olovna bronca	$(1 \dots 1,5) 10^{-3}$	umjetne tvari	$(3 \dots 4) 10^{-3}$
alumijske slitine	$(2 \dots 3) 10^{-3}$		

Toplina trenja

Toplinski tok Φ , koji nastaje zbog trenja pri obodnoj brzini rukavca v , iznosi

$$\Phi = \mu F v,$$

a prelazi uglavnom na mazivo, zbog čega se mazivo mora hladiti.

Valjni ležaji (ISO)

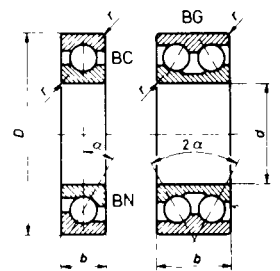
Kuglični ležaji

Nizovi BC, BN i BG
(JUS M.C3.601/611/621 – 1966)

Niz BC: jednoredni kuglični ležaji, obični ($\alpha = 0$, vidi str. 597)

Niz BN: jednoredni kuglični ležaji, s kosim dodirom

Niz BG: dvoredni kuglični ležaji, s kosim dodirom



Jednoredni kuglični ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm)		r	Nosivost (kN)	
	d	D		C_0	C
Niz BC 10					
10 BC 10	10	26	0,5	1,9	3,4
12	12	28	0,5	2,2	3,75
15	15	32	0,5	2,55	4,2
17 BC 10	17	35	0,5	2,85	4,5
20	20	42	1	4,5	6,95
25	25	47	1	5	7,5
30 BC 10	30	55	1,5	~	10
35	35	62	1,5	8,6	12
40	40	68	1,5	9,4	12,7
45 BC 10	45	75	1,5	12,4	16,3
50	50	80	1,5	13,3	17
55	55	90	2	17,3	22
60 BC 10	60	95	2	19,3	22,8
65	65	100	2	21,2	24
70	70	110	2	24,5	30
75 BC 10	75	115	2	26,6	31,5
80	80	125	2	32	37,5
85	85	130	2	34	39
90 BC 10	90	140	2,5	40	45,5
95	95	145	2,5	43	48
100	100	150	2,5	43	48
105 BC 10	105	160	3	56,5	57
110	110	170	3	59	64
120	120	180	3	62,5	67
Niz BC 02					
10 BC 02	10	30	1	1,98	3,4
12	12	32	1	3	5,3
15	15	35	1	3,6	5,85

Jednoredni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	d	Dimenzije (mm)			Nosivost (kN)	
		D	b	r	C ₀	C
<i>Niz BC 02</i>						
17 BC 02	17	40	12	1,5	4,4	7,2
20	20	47	14	1,5	6,55	9,8
25	25	52	15	1,5	7,1	10,4
<i>30 BC 02</i>						
30	30	62	16	1,5	10	14,6
35	35	72	17	2	13,7	19,6
40	40	80	18	2	16	22,4
<i>45 BC 02</i>						
45	45	85	19	2	18,3	25
50	50	90	20	2	21	27
55	55	100	21	2,5	26	32,5
<i>60 BC 02</i>						
60	60	110	22	2,5	32	40
65	65	120	23	2,5	35,5	44
70	70	125	24	2,5	39	46,5
<i>75 BC 02</i>						
75	75	130	25	2,5	42,5	50
80	80	140	26	3	45,5	55
85	85	150	28	3	55	63
<i>90 BC 02</i>						
90	90	160	30	3	63	71
95	95	170	32	3,5	72	80
100	100	180	34	3,5	81,5	90
<i>Niz BC 03</i>						
10 BC 03	10	35	11	1	3,6	6,55
12	12	37	12	1,5	4,3	8
15	15	42	13	1,5	5,2	8,8
<i>17 BC 03</i>						
17	17	47	14	1,5	6,3	10,4
20	20	52	15	2	7,65	12,5
25	25	62	17	2	10,4	16,6
<i>30 BC 03</i>						
30	30	72	19	2	14,6	22
35	35	80	21	2,5	17,6	26
40	40	90	23	2,5	22	31,5
<i>45 BC 03</i>						
45	45	100	25	2,5	30	40,5
50	50	110	27	3	35,5	47,5
55	55	120	29	3	42,5	54
<i>60 BC 03</i>						
60	60	130	31	3,5	48	61
65	65	140	33	3,5	55	69,5
70	70	150	35	3,5	63	78
<i>75 BC 03</i>						
75	75	160	37	3,5	72	85
80	80	170	39	3,5	80	93
85	85	180	41	4	88	102
<i>90 BC 03</i>						
90	90	190	43	4	98	110
95	95	200	45	4	112	120
100	100	215	47	4	132	137
<i>Niz BC 04</i>						
17 BC 04	17	62	17	2	12,1	19,3
20	20	72	19	2	16,9	26
25	25	80	21	2,5	19,7	29
30	30	90	23	2,5	24,3	34,5

Jednoredni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	d	Dimenzije (mm)			Nosivost (kN)	
		D	b	r	C ₀	C
<i>Niz BC 04</i>						
35 BC 04	35	100	25	2,5	31,5	43
40	40	110	27	3	37,5	51,5
45	45	120	29	3	47	61,2
<i>50 BC 04</i>						
50	50	130	31	3,5	53	70
55	55	140	33	3,5	63	79
60	60	150	35	3,5	71	86
<i>65 BC 04</i>						
65	65	160	37	3,5	79,5	90
70	70	180	42	4	106	118
75	75	190	45	4	116	127
<i>80 BC 04</i>						
80	80	200	48	4	127	137
85	85	210	52	5	138	143
90	90	225	54	5	148	153

Jednoredni kuglični ležaji s kosim dodirom

Oznaka	Dimen- zije (mm) d, D, b	Nosivost (kN)		Oznaka	Dimen- zije (mm) d, D, b	Nosivost (kN)	
		C ₀	C			C ₀	C
<i>Niz BN 02</i>							
15 BN 02	kao kod niza BC 02	4,15	6,2	<i>Niz BN 03</i>			
17		5,3	7,65	17 BN 03	7,8	11,8	
20		7,35	10,4	20	9,3	13,7	
25 BN 02		8,8	11,6	25	14,3	19,6	
30		12,7	16,3	30 BN 03	19,3	25	
35		17,3	21,6	35	23,2	30	
40 BN 02		21,2	26	40	29	35,5	
45		24,5	29	45 BN 03	39	46,5	
50		26,5	30,5	50	45,5	54	
55 BN 02		33,5	38	55	54	62	
60	41,5	45,5	60 BN 03	62	69,5		
65	49	51	65	72	78		
70 BN 02	53	56	70	83	88		
75	57	58,5	75 BN 03	93	96,5		
80	64	65,5	80	104	106		
85 BN 02	73,5	72	85	116	116		
90	86,5	85	90 BN 03	129	127		
95	100	95	95	143	137		
100	106	102	100	170	156		
105 BN 02	d = 105	120	112	105 BN 03	d = 105	186	170
	D = 190				D = 225		
	b = 36				b = 49		
110 BN 02	d = 110	134	122	110 BN 03	d = 110	216	190
	D = 200				D = 240		
	b = 38				b = 50		

Dvoredni kuglični ležaji (s kosim dodirom)

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz BG 32</i>						
10 BG 32	10	30	14,0	1	4,55	6,95
12	12	32	15,9	1	5,6	7,8
15	15	35	15,9	1	5,6	7,8
17 BG 32	17	40	17,5	1,5	8,5	11
20	20	47	20,6	1,5	11	15,3
25	25	52	20,6	1,5	13,7	17,3
30 BG 32	30	62	23,8	1,5	20,4	25
35	35	72	27,0	2	28	33,5
40	40	80	30,2	2	32,5	38
45 BG 32	45	85	30,2	2	37,5	42,5
50	50	90	30,2	2	43	47,5
55	55	100	33,3	2,5	49	54
60 BG 32	60	110	36,5	2,5	63	66,5
65	65	120	38,1	2,5	69,5	71
70	70	125	39,7	2,5	71	71
75 BG 32	75	130	41,3	2,5	80	78
80	80	140	44,4	3	96,5	95
85	85	150	49,2	3	106	102
90 BG 32	90	160	52,4	3	127	118
95	95	170	55,6	3,5	150	137
100	100	180	60,3	3,5	160	146
<i>Niz BG 33</i>						
15 BG 33	15	42	19,0	1,5	9,3	13,7
17	17	47	22,2	1,5	12,9	18,6
20	20	52	22,2	2	14	18,6
25 BG 33	25	62	25,4	2	20	26
30	30	72	30,2	2	27	34,5
35	35	80	34,9	2,5	36	43
40 BG 33	40	90	36,5	2,5	45,5	55
45	45	100	39,7	2,5	56	65,5
50	50	110	44,4	3	73	80
55 BG 33	55	120	49,2	3	80	86,5
60	60	130	54,0	3,5	96,5	100
65	65	140	58,7	3,5	112	114
70 BG 33	70	150	63,5	3,5	129	132
75	75	160	68,3	3,5	140	137
80	80	170	68,3	3,5	160	156
85 BG 33	85	180	73,0	4	180	173
90	90	190	73,0	4	212	196
95	95	200	77,8	4	240	216
100 BG 33	100	215	82,6	4	265	236
105	105	225	87,3	4	300	255
110	110	240	92,1	4	320	275

Valjkasti ležaji

Nizovi RU, RN, RJ, RT, RA in RD-K
(JUS M.C3.631/632/635/636/637/641/642 - 1966)

Niz RU: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RN: u oba smjera aksijalno pomični ležaji s vodećim unutarnjim prstenom*

Niz RJ: u jednom smjeru aksijalno pomični ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RT: aksijalno nepomični ležaji*

Niz RA: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim vanjskim prstenom*

Niz RD-K: u oba smjera aksijalno pomični dvoredni ležaji s vodećim unutarnjim prstenom i koničnom rupom*

* Za sve nizove je $\alpha = 0$ (vidi str. 597).

Jednoredni valjkasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm)					Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>r₁</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz RU 10</i>							
25 RU 10	25	47	12	1	0,5	7,5	10
30	30	55	13	1,5	0,8	10,4	13,2
35	35	62	14	1,5	0,8	13,2	16
40 RU 10	40	68	15	1,5	1	15,3	18,6
45	45	75	16	1,5	1	18,6	22,4
50	50	80	16	1,5	1	21,2	24
55 RU 10	55	90	18	2	1,5	24	27,5
60	60	95	18	2	1,5	25	28,5
65	65	100	18	2	1,5	26,5	29
70 RU 10	70	110	20	2	1,5	37,5	42,5
75	75	115	20	2	1,5	39	44
80	80	125	22	2	1,5	47,5	53
85 RU 10	85	130	22	2	1,5	55	58,5
90	90	140	24	2,5	2	60	65,5
95	95	145	24	2,5	2	63	68
100 RU 10	100	150	24	2,5	2	65,5	69,5
110	110	170	28	3	2	93	102
120	120	180	28	3	2	102	110

Jednoredni valjkasti ležaji (nastavak)

Oznaka	d	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
		D	b	r	r ₁	C ₀	C
<i>Niz RU 02</i>							
20 RU 02	20	47	14	1,5	1	8	11,8
25	25	52	15	1,5	1	9,65	13,2
30	30	62	16	1,5	1	12,9	17,6
35 RU 02	35	72	17	2	1	18,6	25,5
40	40	80	18	2	2	24,5	33,5
55	45	85	19	2	2	27	34,5
50 RU 02	50	90	20	2	2	29	36,5
55	55	100	21	2,5	2	34,5	44
60	60	110	22	2,5	2,5	41,5	53
65 RU 02	65	120	23	2,5	2,5	49	62
70	70	125	24	2,5	2,5	52	64
75	75	130	25	2,5	2,5	61	75
80 RU 02	80	140	26	3	3	69,5	85
85	85	150	28	3	3	80	98
90	90	160	30	3	3	93	118
95 RU 02	95	170	32	3,5	3,5	110	137
100	100	180	34	3,5	3,5	122	153
<i>Niz RU 03</i>							
20 RU 03	20	52	15	2	1	10,6	16,6
25	25	62	17	2	2	15	22,4
30	30	72	19	2	2	20,4	30
35 RU 03	35	80	21	2,5	2	25	36
40	40	90	23	2,5	2,5	32,5	45,5
45	45	100	25	2,5	2,5	40	58,5
50 RU 03	50	110	27	3	3	51	71
55	55	120	29	3	3	58,5	85
60	60	130	31	3,5	3,5	72	102
65 RU 03	65	140	33	3,5	3,5	81,5	114
70	70	150	35	3,5	3,5	90	125
75	75	160	37	3,5	3,5	108	158
80 RU 03	80	170	39	3,5	3,5	118	160
85	85	180	41	4	4	129	180
90	90	190	43	4	4	153	208
95 RU 03	95	200	45	4	4	166	224
100	100	215	47	4	4	193	260
110	110	240	50	4	4	220	300
120	120	260	55	4	4	270	355

Nizovi RN 02, RJ 02 i RT 02 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 02.

Nizovi RN 03, RJ 03 i RT 03 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 03.

Jednoredni valjkasti ležaji (nastavak)

Oznaka	d	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
		D	b	r	r ₁	C ₀	C
<i>Niz RU 04</i>							
30 RU 04	30	90	23	2,5	2,5	32	51
35	35	100	25	2,5	2,5	41,5	63
40	40	110	27	3	3	53	80
45 RU 04	45	120	29	3	3	60	90
50	50	130	31	3,5	3,5	73,5	112
55	55	140	33	3,5	3,5	81,5	118
60 RU 04	60	150	35	3,5	3,5	98	143
65	65	160	37	3,5	3,5	108	156
70	70	180	42	4	4	137	200
75 RU 04	75	190	45	4	4	160	232
80	80	200	48	4	4	183	265
85	85	210	52	5	5	208	305
90 RU 04	90	225	54	5	5	232	345
95	95	240	55	5	5	255	365
100	100	250	58	5	5	285	405
110 RU 04	110	280	65	5	5	320	455
120	120	310	72	6	6	355	500
<i>Niz RU 22</i>							
25 RU 22	25	52	18	1,5	1	13,2	16,6
30	30	62	20	1,5	1	19	23,2
35	35	72	23	2	1	28,5	35,5
40 RU 22	40	80	23	2	2	34,5	41,5
45	45	85	23	2	2	37,5	44
50	50	90	23	2	2	40,5	45,5
55 RU 22	55	100	25	2,5	2	47,5	54
60	60	110	28	2,5	2,5	62	71
65	65	120	31	2,5	2,5	75	85
70 RU 22	70	125	31	2,5	2,5	80	90
75	75	130	31	2,5	2,5	86,5	96,5
80	80	140	33	3	3	102	114
85 RU 22	85	150	36	3	3	118	132
90	90	160	40	3	3	134	153
95	95	170	43	3,5	3,5	163	183
100 RU 22	100	180	46	3,5	3,5	186	204
110	110	200	53	3,5	3,5	224	255
120	120	215	58	3,5	3,5	265	300

Nizovi RN 04, RJ 04 i RT 04 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 04.

Nizovi RJ 22 i RT 22 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 22.

Jednoredni valjkasti ležaji (nastavak)

Oznaka	d	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
		D	b	r	r ₁	C ₀	C
<i>Niz RU 23</i>							
25 RU 23	25	62	24	2	2	23,2	31,5
30	30	72	27	2	2	28,5	37,5
35	35	80	31	2,5	2	34	44
40 RU 23	40	90	33	2,5	2,5	49	61
45	45	100	36	2,5	2,5	57	75
50	50	110	40	3	3	73,5	93
55 RU 23	55	120	43	3	3	83	108
60	60	130	46	3,5	3,5	106	132
65	65	140	48	3,5	3,5	110	143
70 RU 23	70	150	51	3,5	3,5	134	170
75	75	160	55	3,5	3,5	166	212
80	80	170	58	3,5	3,5	183	224
85 RU 23	85	180	60	4	4	196	245
90	90	190	64	4	4	220	270
95	95	200	67	4	4	255	310
100 RU 23	100	215	73	4	4	300	365
110	110	240	80	4	4	405	500
120	120	260	86	4	4	510	620
<i>Niz RU 49</i>							
10 RU 49	10	22	13	0,5		4,3	5,3
12	12	24	13	0,5		5,1	5,85
15	15	28	13	0,5		6,55	7,5
17 RU 49	17	30	13	0,5		6,55	7,5
20	20	37	17	0,5		12	13,7
22	22	39	17	0,5		12	13,7
25 RU 49	25	42	17	0,5		13,7	15
28	28	45	17	0,5		15,6	16,3
30	30	47	17	0,5		15,6	16,3
32 RU 49	32	52	20	1		22	24
35	35	55	20	1		24,5	26
40	40	62	22	1		31	32,5
45 RU 49	45	68	22	1		34,5	35,5
50	50	72	22	1		38	37,5
55	55	80	25	1,5		47,5	45,5
60 RU 49	60	85	25	1,5		52	49
65	65	90	25	1,5		56	51
70	70	100	30	1,5		78	73,5
75 RU 49	75	105	30	1,5		85	78
80	80	110	30	1,5		85	78
85	85	120	35	2		108	98
90 RU 49	90	125	35	2		116	104
95	95	130	35	2		116	104

Nizovi RJ 23 i RT 23 imaju iste dimenzije i nosivosti po tablici kao niz RU 23.

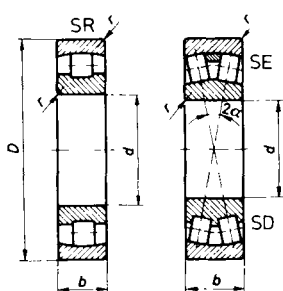
Dvoredni valjkasti ležaji

Oznaka	d	Dimenzije (mm)			Nosivost (kN)		
		D	b	r	C ₀	C	
<i>Niz RA 49</i>							
100 RA 49	100	140	40	2	104	98	
105	105	145	40	2	108	100	
110	110	150	40	2	110	102	
120 RA 49	120	165	45	2	137	125	
130	130	180	50	2,5	166	153	
140	140	190	50	2,5	176	160	
150 RA 49	150	210	60	3	224	208	
160	160	220	60	3	236	216	
170	170	230	60	3	245	220	
180 RA 49	180	250	69	3	305	285	
190	190	260	69	3	325	290	
200	200	280	80	3,5	390	365	
220 RA 49	220	300	80	3,5	415	380	
240	240	320	80	3,5	455	400	
260	260	360	100	3,5	640	600	
280 RA 49	280	380	100	3,5	680	620	
300	300	420	118	4	900	830	
320	320	440	118	4	915	850	
<i>Niz RD 30 K*</i>							
30 RD 30 K	30	55	19	1,5	21,2	25	
35	35	62	20	1,5	26,5	31	
40	40	68	21	1,5	34,5	39	
45 RD 30 K	45	75	23	1,5	42,5	46,5	
50	50	80	23	1,5	46,5	49	
55	55	90	26	2	57	62	
60 RD 30 K	60	95	26	2	63	65,5	
65	65	100	26	2	67	67	
70	70	110	30	2	83	85	
75 RD 30 K	75	115	30	2	86,5	88	
80	80	125	34	2	102	106	
85	85	130	34	2	110	110	
90 RD 30 K	90	140	37	2,5	129	132	
95	95	145	37	2,5	134	134	
100	100	150	37	2,5	140	137	
110 RD 30 K	110	170	45	3	200	208	
120	120	180	46	3	216	216	
130	130	200	52	3	275	275	
140 RD 30 K	140	210	53	3	285	285	
150	150	225	56	3,5	335	325	
160	160	240	60	3,5	375	365	

* Niz RD 30 K ima koničnu rupu s konusom 1 : 12. Vrijednosti za nutarnji promjer d odnose se na užu stranu rupe.

Bačvasti ležaji

Nizovi SR, SE in SD
(JUS M.C3.651/655/657 — 1966)



Niz SR: jednoredni samopodesivi ležaji s radialnim dodirom i vodečim nutarnjim prstenom ($\alpha = 0$, vidi str. 597)

Niz SE: dvoredni samopodesivi ležaji s kosim dodirom i prstenastim uloškom

Niz SD: dvoredni samopodesivi ležaji s radialnim dodirom i vodečim nutarnjim prstenom

Jednoredni bačvasti ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz SR 02</i>						
25 SR 02	25	52	15	1,5	14,3	15
30	30	62	16	1,5	16,3	17,3
35	35	72	17	2	24,5	25
40 SR 02	40	80	18	2	30	30
45	45	85	19	2	32	32
50	50	90	20	2	38	37,5
55 SR 02	55	100	21	2,5	48	47,5
60	60	110	22	2,5	56	55
65	65	120	23	2,5	64	62
70 SR 02	70	125	24	2,5	73,5	71
75	75	130	25	2,5	78	75
80	80	140	26	3	90	85
85 SR 02	85	150	28	3	112	100
90	90	160	30	3	122	120
95	95	170	32	3,5	146	140
100 SR 02	100	180	34	3,5	160	156
110	110	200	38	3,5	208	196
120	120	215	40	3,5	228	216
130 SR 02	130	230	40	4	245	232
140	140	250	42	4	290	275
150	150	270	45	4	335	310

Jednoredni bačvasti ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz SR 03</i>						
20 SR 03	20	52	15	2	14,6	16
25	25	62	17	2	20	21,6
30	30	72	19	2	28	30
35 SR 03	35	80	21	2,5	34,5	36,5
40	40	90	23	2,5	46,5	50
45	45	100	25	2,5	53	56
50 SR 03	50	110	27	3	68	71
55	55	120	29	3	78	81,5
60	60	130	31	3,5	96,5	100
65 SR 03	65	140	33	3,5	112	116
70	70	150	35	3,5	122	129
75	75	160	37	3,5	146	146
80 SR 03	80	170	39	3,5	163	166
85	85	180	41	4	183	186
90	90	190	43	4	204	212
95 SR 03	95	200	45	4	224	232
100	100	215	47	4	245	250
110	110	240	50	4	290	300
120 SR 03	120	260	55	4	345	355
130	130	280	58	5	400	400
140	140	300	62	5	475	475
150	150	320	65	5	530	540
<i>Niz SR 04</i>						
25 SR 04	25	80	21	2,5	34,5	36,5
30	30	90	23	2,5	46,5	48
35	35	100	25	2,5	53	58,5
40 SR 04	40	110	27	3	68	73,5
45	45	120	29	3	78	85
50	50	130	31	3,5	96,5	106
55 SR 04	55	140	33	3,5	112	120
60	60	150	35	3,5	122	129
65	65	160	37	3,5	146	150
70 SR 04	70	180	42	4	183	190
75	75	190	45	4	204	212
80	80	200	48	4	224	250
85 SR 04	85	210	52	5	255	280
90	90	230	54	5	270	310
95	95	240	55	5	290	335
100 SR 04	100	250	58	5	340	375
110	110	280	65	5	380	430

Dvoredni bačvasti ležaji

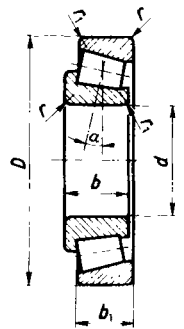
Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
Niz SE 13						
20 SE 13	20	52	15	2	19	28,4
25	25	62	17	2	27	30,5
30	30	72	19	2	38	43
35 SE 13	35	80	21	2,5	45	49
40	40	90	23	2,5	60	63
45	45	100	25	2,5	78	76,5
50 SE 13	50	110	27	3	83	88
55	55	120	29	3	98	104
60	60	130	31	3,5	114	118
65 SE 13	65	140	33	3,5	137	140
70	70	150	35	3,5	156	160
75	75	160	37	3,5	176	180
80 SE 13	80	170	39	3,5	196	196
85	85	180	41	4	220	220
90	90	190	43	4	245	240
95 SE 13	95	200	45	4	265	260
100	100	215	47	4	310	300
105	105	225	49	4	340	325
110	110	240	50	4	375	360

Prema JUS M.C3.655—1966 standardizirani su još i dvoredni bačvasti ležaji (samopodesivi):

niz SD 22:	<i>d</i> = 25 ... 200 mm
	<i>D</i> = 52 ... 360 mm
	<i>b</i> = 18 ... 98 mm
niz SD 23:	<i>d</i> = 40 ... 200 mm
	<i>D</i> = 90 ... 420 mm
	<i>b</i> = 33 ... 138 mm
niz SD 30:	<i>d</i> = 110 ... 400 mm
	<i>D</i> = 170 ... 600 mm
	<i>b</i> = 45 ... 148 mm
niz SD 31:	<i>d</i> = 110 ... 360 mm
	<i>D</i> = 180 ... 600 mm
	<i>b</i> = 56 ... 192 mm
niz SD 32:	<i>d</i> = 90 ... 500 mm
	<i>D</i> = 160 ... 920 mm
	<i>b</i> = 52,4 ... 336 mm
niz SD 40:	<i>d</i> = 120 ... 360 mm
	<i>D</i> = 180 ... 540 mm
	<i>b</i> = 60 ... 180 mm
niz SD 41:	<i>d</i> = 110 ... 300 mm
	<i>D</i> = 180 ... 500 mm
	<i>b</i> = 69 ... 200 mm

Standardi JUS za te ležaje ne propisuju nosivost *C₀* i *C*.

Stožasti ležaji
Niz KB
(JUS M.C3.735 — 1966)



Niz KB:

Stožasti ležaji podnose velika sastavljena (radijalna i aksijalna) opterećenja. Vanjski i unutarnji prsten mogu se montirati posebice.

Oznaka	Dimenzije (mm)						Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>b₁</i>	<i>r</i>	<i>r₁</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
Niz KB 02								
20 KB 02	20	47	14	12	1,5	0,5	12,9	18,3
25	25	52	15	13	1,5	0,5	15,6	19
30	30	62	16	14	1,5	0,5	20,8	26
35 KB 02	35	72	17	15	2	0,8	26,5	32,5
40	40	80	18	16	2	0,8	31	38
45	45	85	19	16	2	0,8	36	42,5
50 KB 02	50	90	20	17	2	0,8	40,5	46,5
55	55	100	21	18	2,5	0,8	52	56
60	60	110	22	19	2,5	0,8	56	62
65 KB 02	65	120	23	20	2,5	0,8	65,5	73,5
70	70	125	24	21	2,5	0,8	71	78
75	75	130	25	22	2,5	0,8	81,5	85
80 KB 02	80	140	26	22	3	1	88	96,5
85	85	150	28	24	3	1	106	114
90	90	160	30	26	3	1	120	127
95 KB 02	95	170	32	27	3,5	1,2	132	137
100	100	180	34	29	3,5	1,2	156	160
105	105	190	36	30	3,5	1,2	170	176
110 KB 02	110	200	38	32	3,5	1,2	196	196
120	120	215	40	34	3,5	1,2	216	220
130	130	230	40	34	4	1,5	232	240
140 KB 02	140	250	42	36	4	1,5	280	280
150	150	270	45	38	4	1,5	325	310

Stožasti ležaji (nastavak)

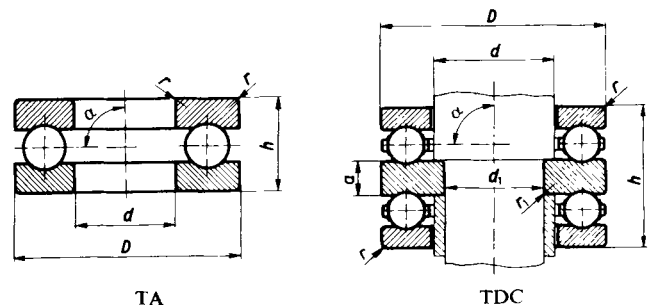
Oznaka	Dimenzije (mm)						Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>b</i> ₁	<i>r</i>	<i>r</i> ₁	<i>C</i> ₀	<i>C</i>
Niz KB 03								
20 KB 03	20	52	15	13	2	0,8	16	22,4
25	25	62	17	15	2	0,8	21,6	30
30	30	72	19	16	2	0,8	28,5	37,5
35 KB 03	35	80	21	18	2,5	0,8	37,5	48
40	40	90	23	20	2,5	0,8	45	56
45	45	100	25	22	2,5	0,8	57	68
50 KB 03	50	110	27	23	3	1	67	78
55	55	120	29	25	3	1	78	90
60	60	130	31	26	3,5	1,2	91,5	108
65 KB 03	65	140	33	28	3,5	1,2	108	125
70	70	150	35	30	3,5	1,2	122	140
75	75	160	37	31	3,5	1,2	137	156
80 KB 03	80	170	39	33	3,5	1,2	153	173
85	85	180	41	34	4	1,5	170	193
90	90	190	43	36	4	1,5	190	212
95 KB 03	95	200	45	38	4	1,5	228	250
100	100	215	47	39	4	1,5	255	275
105	105	225	49	41	4	1,5	270	290

Oznaka	Širina (mm)		Nosivost (kN)		Oznaka	Širina (mm)		Nosivost (kN)	
	<i>b</i>	<i>b</i> ₁	<i>C</i> ₀	<i>C</i>		<i>b</i>	<i>b</i> ₁	<i>C</i> ₀	<i>C</i>
Niz KB 22*					Niz KB 23**				
30 KB 22	20	17	27,5	32	20 KB 23	21	18	22,8	29
35	23	19	36,5	43	25	24	20	32	40
40	23	19	40,5	47,5	30	27	23	43	52
45 KB 22	23	19	46,5	52	35 KB 23	31	23	54	64
50	23	19	48	53	40	33	27	67	75
55	25	21	63	67	45	36	30	81,5	90
60 KB 22	28	24	76,5	80	50 KB 23	40	33	102	110
65	31	27	93	98	55	43	35	120	127
70	31	27	93	98	60	46	37	140	146
75 KB 22	31	27	102	104	65 KB 23	48	39	160	170
80	33	28	116	120	70	51	42	183	190
85	36	30	137	137	75	55	45	212	216
90 KB 22	40	34	166	163	80 KB 23	58	48	236	240
95	43	37	186	186	85	60	49	275	275
100	46	39	212	208	90	64	53	315	315
105 KB 22	50	43	245	240	95 KB 23	67	55	345	345
110	53	46	275	260	100	73	60	405	390
120	58	50	340	305	105	77	63	450	430

* Promjeri *d* i *D* te polumjeri *r* i *r*₁ isti su kao kod odgovarajućih veličina niza KB 02.
 ** Promjeri *d* i *D* te polumjeri *r* i *r*₁ isti su kao kod odgovarajućih veličina niza KB 03.

Aksijalni kuglični ležaji

Nizovi TA i TDC (JUS M.C3.701/705 — 1966)



TA

TDC

Niz TA: jednoređni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u jednom smjeru).

Niz TDC: dvoređni aksijalni kuglični ležaji (podnose aksijalna opterećenja u oba smjera).

Jednoređni aksijalni kuglični ležaji

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivosti (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>r</i>	<i>C</i> ₀	<i>C</i>
Niz TA 11						
10 TA 11	10	24	9	0,5	11,4	5,7
12	12	26	9	0,5	12,5	6,1
15	15	28	9	0,5	13,7	6,5
17 TA 11	17	30	9	0,5	16	7,2
20	20	35	10	0,5	22	9,65
25	25	42	11	1	29	12,2
30 TA 11	30	47	11	1	32,5	13,2
35	35	52	12	1	39	14,6
40	40	60	13	1	52	19,6
45 TA 11	45	65	14	1	57	20,8
50	50	70	14	1	62	22,4
55	55	78	16	1	76,5	27
60 TA 11	60	85	17	1,5	93	32
65	65	90	18	1,5	96,5	33,5
70	70	95	18	1,5	104	34,5
75 TA 11	75	100	19	1,5	112	36,5
80	80	105	19	1,5	116	37,5
85	85	110	19	1,5	125	39
90 TA 11	90	120	22	1,5	156	50
100	100	135	25	1,5	220	69,5
110	110	145	25	1,5	236	73,5

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>r</i>	<i>C_u</i>	<i>C</i>
<i>Niz TA 12</i>						
10 TA 12	10	26	11	1	14	7,2
12	12	28	11	1	15,6	7,8
15	15	32	12	1	20,4	9,5
17 TA 12	17	35	12	1	22	10
20	20	40	14	1	31	14
25	25	47	15	1	41,5	18
30 TA 12	30	52	16	1	48	19,6
35	35	62	18	1,5	64	26,5
40	40	68	19	1,5	76,5	30,5
45 TA 12	45	73	20	1,5	86,5	32,5
50	50	78	22	1,5	91,5	34,5
55	55	90	25	1,5	132	49
60 TA 12	60	95	26	1,5	146	53
65	65	100	27	1,5	156	55
70	70	105	27	1,5	163	57
75 TA 12	75	110	27	1,5	173	58,5
80	80	115	28	1,5	180	61
85	85	125	31	1,5	220	72
90 TA 12	90	135	35	2	270	86,5
100	100	150	38	2	340	108
110	110	160	38	2	375	114
<i>Niz TA 13</i>						
25 TA 13	25	52	18	1,5	51	22,8
30	30	60	21	1,5	65,5	28
35	35	68	24	1,5	86,5	36
40 TA 13	40	78	26	1,5	112	45
45	45	85	28	1,5	134	53
50	50	95	31	2	166	63
55 TA 13	55	105	35	2	204	76,5
60	60	110	35	2	220	81,5
65	65	115	36	2	236	85
70 TA 13	70	125	40	2	280	98
75	75	135	44	2,5	325	112
80	80	140	44	2,5	355	116
85 TA 13	85	150	49	2,5	405	132
90	90	155	50	2,5	405	132
100	100	170	55	2,5	490	156
110 TA 13	110	190	63	3	585	180
120	120	210	70	3,5	720	216
130	130	225	75	3,5	780	232
140 TA 13	140	240	80	3,5	930	260
150	150	250	80	3,5	1000	270
160	160	270	87	4	1200	320

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>r</i>	<i>C_u</i>	<i>C</i>
<i>Niz TA 14</i>						
25 TA 14	25	60	24	1,5	73,5	33,5
30	30	70	28	1,5	104	44
35	35	80	32	2	127	53
40 TA 14	40	90	36	2	170	68
45	45	100	39	2	200	78
50	50	110	43	2,5	250	95
55 TA 14	55	120	48	2,5	300	108
60	60	130	51	2,5	360	127
65	65	140	56	3	405	140
70 TA 14	70	150	60	3	455	153
75	75	160	65	3	510	170
80	80	170	68	3,5	560	183
85 TA 14	85	180	72	3,5	620	196
90	90	190	77	3,5	680	212
100	100	210	85	4	880	260
110 TA 14	110	230	95	4	1020	290
120	120	250	102	5	1100	310
130	130	270	110	5	1460	380
140 TA 14	140	280	112	5	1460	380
150	150	300	120	5	1630	415
160	160	320	130	6	2000	480

Jednoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)				Nosivost (kN)				
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>r</i>	<i>C_u</i>	<i>C</i>			
<i>Niz TDC 22</i>									
15 TDC 22	15	10	32	22	5	1	0,5	20,4	9,5
20	20	15	40	26	6	1	0,5	31	14
25	25	20	47	28	7	1	0,5	41,5	18
30 TDC 22	30	25	52	29	7	1	0,5	48	19,6
35	35	30	62	34	8	1,5	0,5	64	26,5
40	40	30	66	36	9	1,5	1	76,5	30,5
45 TDC 22	45	35	73	37	9	1,5	1	86,5	32,5
50	50	40	78	39	9	1,5	1	91,5	34,5
55	55	45	90	45	10	1,5	1	132	49
60 TDC 22	60	50	95	46	10	1,5	1	146	53
65	65	55	100	47	10	1,5	1	156	55
70	70	55	105	47	10	1,5	1,5	163	57
75 TDC 22	75	60	110	47	10	1,5	1,5	173	58,5
80	80	65	115	48	10	1,5	1,5	180	61
85	85	70	125	55	12	1,5	1,5	220	72

Dvoredni aksijalni kuglični ležaji (nastavak)

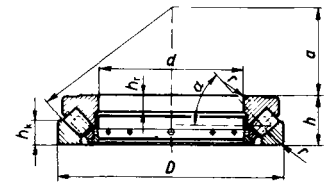
Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>d_i</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>r₁</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz TDC 22</i>									
90 TDC 22	90	75	135	62	14	2	1,5	270	86,5
100	100	85	150	67	15	2	1,5	340	108
110	110	95	160	67	15	2	1,5	375	114
<i>120 TDC 22</i>									
120	120	100	170	68	15	2	2	390	118
130	130	110	190	80	18	2,5	2	510	150
140	140	120	200	81	18	2,5	2	540	156
<i>Niz TDC 23</i>									
25 TDC 23	25	20	52	34	8	1,5	0,5	51	22,8
30	30	25	60	38	9	1,5	0,5	65,5	28
35	35	30	68	44	10	1,5	0,5	86,5	36
<i>40 TDC 23</i>									
40	40	30	78	49	12	1,5	1	112	45
45	45	35	85	52	12	1,5	1	134	53
50	50	40	95	58	14	2	1	166	63
<i>55 TDC 23</i>									
55	55	45	105	64	15	2	1	204	76,5
60	60	50	110	64	15	2	1	220	81,5
65	65	55	115	65	15	2	1	236	85
<i>70 TDC 23</i>									
70	70	55	125	72	16	2	1,5	280	98
75	75	60	135	79	18	2,5	1,5	325	112
80	80	65	140	79	18	2,5	1,5	355	116
<i>85 TDC 23</i>									
85	85	70	150	87	19	2,5	1,5	405	132
90	90	75	155	88	19	2,5	1,5	405	132
100	100	85	170	97	21	2,5	1,5	490	156
<i>110 TDC 23</i>									
110	110	95	190	110	24	3	1,5	585	180
120	120	100	210	123	27	3,5	2	720	216
130	130	110	225	130	30	3,5	2	780	232
<i>140 TDC 23</i>									
140	140	120	240	140	31	3,5	2	930	260
150	150	130	250	140	31	3,5	2	1000	275
160	160	140	270	153	33	4	2	1200	320
<i>Niz TDC 24</i>									
25 TDC 24	25	15	60	45	11	1,5	1	73,5	33,5
30	30	20	70	52	12	1,5	1	104	44
35	35	25	80	59	14	2	1	127	53
<i>40 TDC 24</i>									
40	40	30	90	65	15	2	1	170	68
45	45	35	100	72	17	2	1	200	78
50	50	40	110	78	18	2,5	1	255	95
<i>55 TDC 24</i>									
55	55	45	120	87	20	2,5	1	300	108
60	60	50	130	93	21	2,5	1	360	127
65	65	50	140	101	23	3	1,5	405	140
<i>70 TDC 24</i>									
70	70	55	150	107	24	3	1,5	455	153
75	75	60	160	115	26	3	1,5	510	170
80	80	65	170	120	27	3,5	1,5	560	183
<i>85 TDC 24</i>									
85	85	65	180	128	29	3,5	2	620	196
90	90	70	190	135	30	3,5	2	680	212
100	100	80	210	150	33	4	2	880	260

Aksijalni bačvasti ležaji

Nizovi TS i TSA
(JUS M.C3.711/715 — 1966)

Niz TS: samopodesivi aksijalni ležaji s nesimetričnim bačvastim valjčićima.

Niz TSA: samopodesivi aksijalni ležaji sa simetričnim bačvastim valjčićima.



Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h_r</i>	<i>h_k</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz TS 92</i>									
200 TS 92	200	280	48	15	24	108	3	1 140	425
220	220	300	48	15	24	117	3	1 250	430
240	240	340	60	19	30	130	3,5	1 800	630
<i>260 TS 92</i>									
260	260	360	60	19	30	139	3,5	1 860	640
280	280	380	60	19	30	150	3,5	2 000	680
300	300	420	73	21	38	162	4	2 450	850
<i>320 TS 92</i>									
320	320	440	73	21	38	172	4	2 600	880
340	340	460	73	21	38	183	4	2 700	915
360	360	500	85	25	38	194	5	3 250	1 160
<i>380 TS 92</i>									
380	380	520	85	27	42	202	5	3 800	1 270
400	400	540	85	27	42	212	5	4 050	1 320
420	420	580	95	30	46	225	6	4 900	1 600
<i>440 TS 92</i>									
440	440	600	95	30	46	235	6	5 000	1 660
460	460	620	95	30	46	245	6	5 200	1 660
480	480	650	103	33	55	259	6	5 700	1 900
500	500	670	103	33	55	268	6	6 000	1 930
<i>Niz TS 93</i>									
100 TS 93	100	170	42	14	20,8	58	2,5	585	280
110	110	190	48	16	23	64	3	750	345
120	120	210	54	18	26	70	3,5	950	430
<i>130 TS 93</i>									
130	130	225	58	19	28	76	3,5	1 080	490
140	140	240	60	20	29	82	3,5	1 250	550
150	150	250	60	20	29	87	3,5	1 290	570
<i>160 TS 93</i>									
160	160	270	67	23	32	92	4	1 500	655
170	170	280	67	23	32	96	4	1 560	670
180	180	300	73	25	35	103	4	1 860	800
190	190	320	78	27	38	110	5	2 160	930
<i>200 TS 93</i>									
200	200	340	85	29	41	116	5	2 550	1 060
220	220	360	85	29	41	125	5	2 650	1 080
240	240	380	85	29	41	135	5	2 800	1 120
260	260	420	95	32	45	148	6	3 600	1 460

Aksijalni bačvasti ležaji (nastavak)

Oznaka	Dimenzije (mm)							Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h_r</i>	<i>h_k</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz TS 93</i>									
280 TS 93	280	440	95	32	46	158	6	3 750	1 500
300	300	480	109	37	50	168	6	4 500	1 800
320	320	500	109	37	53	180	6	4 750	1 830
<i>340 TS 93</i>	340	540	122	41	59	192	6	5 600	2 200
360	360	560	122	41	59	202	6	5 850	2 240
380	380	600	132	44	63	216	8	7 100	2 700
<i>400 TS 93</i>	400	620	132	44	64	225	8	7 350	2 800
420	420	650	140	48	68	235	8	7 650	2 900
440	440	680	145	49	70	245	8	8 500	3 250
<i>460 TS 93</i>	460	710	150	51	72	257	8	9 500	3 550
480	480	730	150	51	72	270	8	9 650	3 600
500	500	750	150	51	74	280	8	10 200	3 650
<i>Niz TS 94</i>									
60 TS 94	60	130	42	15	20	38	2,5	404	232
65	65	140	45	16	21	42	3	520	275
70	70	150	48	17	23	44	3	570	300
<i>75 TS 94</i>	75	160	51	18	24	47	3	670	345
80	80	170	54	19	26	50	3,5	720	375
85	85	180	58	21	28	54	3,5	830	425
<i>90 TS 94</i>	90	190	60	22	29	56	3,5	965	490
100	100	210	67	24	32	62	4	1 160	585
110	110	230	73	26	35	69	4	1 370	680
<i>120 TS 94</i>	120	250	78	29	37	74	5	1 600	780
130	130	270	85	31	41	81	5	1 860	915
140	140	280	85	31	41	86	5	2 000	950
<i>150 TS 94</i>	150	300	90	32	44	92	5	2 280	1 080
160	160	320	95	34	45	99	6	2 600	1 220
170	170	340	103	37	50	104	6	2 900	1 370
<i>180 TS 94</i>	180	360	109	39	52	110	6	3 250	1 530
190	190	380	115	41	55	117	6	3 600	1 660
200	200	400	122	43	59	122	6	4 050	1 860
220	220	420	122	43	59	132	8	4 250	1 900
<i>240 TS 94</i>	240	440	122	43	59	142	8	4 500	1 960
260	260	480	132	48	64	154	8	5 500	2 360
280	280	520	145	52	68	166	8	6 400	2 800
300	300	540	145	52	70	175	8	6 400	2 800

Standardizirani su (JUS M.C3.715 — 1966) još i slijedeći nizovi aksijalnih bačvastih ležaja:

niz TSA 92: $d = 240 \dots 500$ mm, $D = 340 \dots 670$ mm,
niz TSA 93: $d = 120 \dots 500$ mm, $D = 210 \dots 750$ mm,
niz TSA 94: $d = 60 \dots 300$ mm, $D = 130 \dots 540$ mm.

Standardi JUS za te nizove ležaja ne propisuju nosivosti C_0 i C .

Nosivost valjnih ležaja (prema ISO)

Statička nosivost ležaja (JUS M.C3.851 — 1963).

Statička nosivost je nosivost u mirovanju, tj. ono radijalno odn. aksijalno (centrično) opterećenje radijalnih odnosno aksijalnih ležaja pri kojem nastaje ukupna plastična deformacija od 10^{-4} promjera valjnog tijela.

Proračun statičke nosivosti (JUS M.C3.853 ... 856 — 1965).

Statička nosivost C_0 za pojedine vrste ležaja dana je u tablicama (str. 577 do 596)

Ekvivalentno statičko opterećenje F_0 ovisno je o radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a .

a) Ekvivalentno statičko opterećenje za radijalne ležaje

— pri čistom radijalnom opterećenju ($F_a = 0$)

$$F_0 = F_r$$

— uz istodobno radijalno i aksijalno opterećenje — uzimamo veću od slijedećih dviju vrijednosti

$$F_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad F_0 = F_r$$

Vrijednosti za X_0 i Y_0 iznose:

Vrsta radijalnog ležaja	Jednoredni ležaji		Dvoredni ležaji	
	X_0	Y_0	X_0	Y_0
Kuglični ležaji s radijalnim dodirom	0,6	0,5	0,6	0,5
Kuglični ležaji s kosim dodirom				
$\alpha = 20^\circ$	0,5	0,42	1	0,84
$\alpha = 25^\circ$	0,5	0,38	1	0,76
$\alpha = 30^\circ$	0,5	0,33	1	0,66
$\alpha = 35^\circ$	0,5	0,29	1	0,58
$\alpha = 40^\circ$	0,5	0,26	1	0,52
Samopodesivi kuglični ležaji	0,5	$0,22 \cot \alpha$	1	$0,44 \cot \alpha$
Valjkasti ležaji	0,5	$0,22 \cot \alpha$	1	$0,44 \cot \alpha$

b) Ekvivalentno statičko opterećenje za aksijalne ležaje

— istodobno aksijalno i radijalno opterećenje*

$$F_0 = F_a + 2,3 F_r \tan \alpha$$

(Za jednoredne aksijalne ležaje ta jednadžba više ne vrijedi točno ako je $F_r > 0,44 F_a \cot \alpha$.)

*

Statička nosivost C_0 ne smije biti manja od ekvivalentnog statičkog opterećenja F_0

$$C_0 \geq F_0$$

* α je kut dodira (kut između dodirne osi i okomice na os ležajnog provrta).

Dinamička nosivost ležaja (JUS M.C3.852 — 1963)

Trajnost valjnog ležaja određena je brojem okretaja (ili satima rada uz konstantnu brzinu vrtnje) pri kojem se pojavljuju prvi znakovi umora materijala.

Nazivno trajanje skupine jednakih ležaja je onaj broj okretaja (ili sati rada uz konstantnu brzinu vrtnje) što ga dostigne ili premaši 90% ležaja iz te skupine prije pojave prvih znakova umora materijala.

Dinamička nosivost radijalnog odn. aksijalnog ležaja je čisto radijalno odn. aksijalno konstantno opterećenje kojim možemo opteretiti skupinu jednakih ležaja s nazivnim trajanjem od 10^6 okretaja.

Proračun dinamičke nosivosti (JUS M.C3.857/858/859/860 — 1964).

Dinamička nosivost C za pojedine vrste ležaja dana je u tablicama (str. 577 do 596).

a) Ekvivalentno dinamičko opterećenje F pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a — za aksijalne ležaje

$$F = V \cdot XF_r + YF_a$$

pri čemu faktor V iznosi:

Vrsta radijalnog ležaja	Unutarnji prsten se okreće	
	miruje	miruje
kuglični ležaji		
— s radijalnim dodirom	1	1,2
— s kosim dodirom	1	1,2
— samopodesivi	1	1
— jednoredni s radijalnim dodirom, rastavljivi	1	1
valjkasti ležaji	1	1,2

Vrijednosti X i Y za radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom

$\frac{F_a}{C_0}$	e	Jednoredni ležaji		Dvoredni ležaji				
		$F_a/VF_r > e$	$F_a/VF_r \leq e$	$F_a/VF_r \leq e$		$F_a/VF_r > e$		
		X	Y	X	Y	X	Y	
0,014	0,19	0,56	2,30	1	0	0,56	2,30	
0,028	0,22							1,99
0,056	0,26							1,71
0,084	0,28							1,55
0,11	0,30							1,45
0,17	0,34							1,31
0,28	0,38							1,15
0,42	0,42							1,04
0,56	0,44							1,00

Za rastavljive jednoredne radijalne kuglične ležaje s radijalnim dodirom vrijedi

$$F_a/VF_r > 0,2 \begin{cases} X = 0,50 \\ Y = 2,5 \end{cases}$$

Vrijednosti X i Y za radijalne kuglične ležaje s kosim dodirom

α	$\frac{F_a}{C_0}$	e	Jednoredni ležaji		Dvoredni ležaji				
			$F_a/VF_r > e$	$F_a/VF_r \leq e$	$F_a/VF_r \leq e$		$F_a/VF_r > e$		
			X	Y	X	Y	X	Y	
5°	0,014	0,23	0,46	1,88	1	0,78	2,78	3,74	
	0,028	0,26							2,40
	0,056	0,30							2,07
	0,085	0,34							1,87
	0,11	0,36							1,75
	0,17	0,40							1,58
	0,28	0,45							1,39
	0,42	0,50							1,26
	0,56	0,52							1,21
	10°	0,014							0,29
0,029		0,32	1,98						
0,057		0,36	1,76						
0,086		0,38	1,63						
0,11		0,40	1,55						
0,17		0,44	1,42						
0,29		0,49	1,10						
0,43		0,54	1,01						
0,57		0,54	1,00						
15°		0,015	0,38	0,44	1,47	1	0,72	1,65	2,39
	0,029	0,40	1,40						
	0,058	0,43	1,30						
	0,087	0,46	1,23						
	0,12	0,47	1,19						
	0,17	0,50	1,12						
	0,29	0,55	1,02						
	0,44	0,56	1,00						
	0,58	0,56	1,00						
	20°	—	0,57							0,43	1,00	1	0,70	1,63
25°	—	0,68	0,41	0,87	1	0,67	1,41		
30°	—	0,80	0,39	0,75	1	0,63	1,24		
35°	—	0,95	0,37	0,65	1	0,60	1,07		
40°	—	1,14	0,35	0,57	1	0,57	0,93		

* i — broj redova kuglica u jednom ležaju.

Vrijednosti X i Y za samopodesive radijalne ležaje

Vrsta radijalnog ležaja	$F_a/V F_r \leq 1,5 \tan \alpha$		$F_a/V F_r > 1,5 \tan \alpha$	
	X	Y	X	Y
Samopodesivi kuglični ležaji				
— jednoredni	—	—	0,40	$0,4 \cot \alpha$
— dvoredni	1	$0,42 \cot \alpha$	0,65	$0,65 \cot \alpha$
Samopodesivi valjkasti ležaji				
— jednoredni	1	0	0,4	$0,4 \cot \alpha$
— dvoredni	1	$0,45 \cot \alpha$	0,67	$0,67 \cot \alpha$

Za $\alpha = 0$: $F_a = 0$, $X = 1$

b) Ekvivalentno dinamičko opterećenje F pri radijalnom opterećenju F_r i aksijalnom opterećenju F_a – za aksijalne ležaje

$$F = X F_r + Y F_a$$

Vrijednosti X i Y

Vrsta aksijalnog ležaja	e	Jednosmj. ležaji		Dvosmjerni ležaji			
		$F_a/F_r > e$		$F_a/F_r \leq e$		$F_a/F_r > e$	
		X	Y	X	Y	X	Y
Kuglični ležaji s kosim dođirom							
$\alpha = 45^\circ$	1,25	0,66	1	1,18	0,59	0,66	1
$\alpha = 60^\circ$	2,17	0,92	1	1,90	0,54	0,92	1
$\alpha = 75^\circ$	4,67	1,66	1	3,89	0,52	1,66	1
Samopodesivi valjkasti ležaji	$1,5 \tan \alpha$	$\tan \alpha$	1	$1,5 \tan \alpha$	0,67	$\tan \alpha$	1

Za $\alpha = 90^\circ$: $F_r = 0$, $Y = 1$

*

Trajnost ležaja L ovisi o dinamičkoj nosivosti C i ekvivalentnom opterećenju F te iznosi

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^m \quad (10^6 \text{ okretaja})$$

pri čemu je eksponent m :

za kuglične ležaje $m = 3$

za valjkaste ležaje $m = 10/3$

MAZIVA

S obzirom na izvor maziva razlikujemo slijedeće vrste:

Mineralna ulja se najčešće upotrebljavaju kao maziva u tehnici. Dobivamo ih destilacijom iz sirovog zemnog ulja (nafte). Većinu destilata treba još i rafinirati. Rafinirani su skuplji, no ujedno i trajniji te imaju dobru mazivost ako nisu previše rafinirani.

Biljna i životinjska ulja (koštano, ricinusovo, repičino ulje) veoma su masna pa bolje mažu od mineralnih, ali se pri upotrebi pretvaraju djelomice u smolu i razgrađuju. Stoga se vrlo rijetko upotrebljavaju posve sama.

Zamašćena (kompaundirana) ulja mješavina su mineralnih i biljnih ili životinjskih ulja. Zato je njihova mazivost osobito dobra, ali brže stare nego čista mineralna ulja.

Mineralna ulja s dodacima (aditivima) imaju bolja svojstva od čistih mineralnih. Dodaci služe za poboljšanje mazivosti i viskoznosti, sprječavaju auto-oksidaciju, koroziju, pjenjenje i rđanje, te omogućuju detergentno djelovanje i mazanje pri visokom tlaku. Tzv. »detergenti-disperzanti« osobito su potrebni za motorna ulja, jer sprječavaju nakupljanje taloga i izgorjelih čestica u motoru.

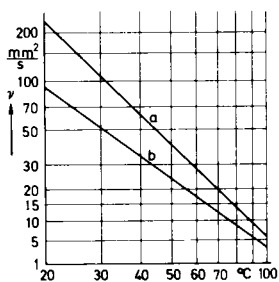
Neka se sintetska ulja (silikoni i sl.) sve više primjenjuju u suvremenoj tehnici zbog specijalnih svojstava.

Masti (za strojeve i valjne ležaje) su smjese sapuna i mineralnih ulja. Uglavnom razlikujemo litijeve i natrijeve masti; poznat je, međutim, cio niz posebnih masti izrađenih npr. na osnovu aluminijeva ili drugog sapuna. Natrijeve masti tvore s vodom emulziju pa izdrže više temperature.

*

Kvalitet maziva i mazivost prosuđujemo s obzirom na ovlaživanje i prijanjanje na kovinske površine i otpornost prema starenju. Pri izboru maziva za određenu svrhu odlučna su fizikalna i kemijska svojstva: gustoća, viskoznost, plamište, krutište, kapljište, neutralizacijski broj i druga.

Gustoća pri 15°C gotovo je za sva ulja manja od 1000 kg/m^3 . Kvalitetna stabilna ulja na parafinskoj osnovi imaju gustoću oko 870 kg/m^3 , naftna imaju nešto veću, a ulja s asfaltnom osnovom još veću gustoću. Sintetska ulja iz ugljenog katrana dosežu gustoću $1100 \dots 1200 \text{ kg/m}^3$. Općenito su gustoća i viskoznost tim manje što ugljikovodici, od kojih je sastavljeno dotično mineralno ulje, sadrže više vodika.



Dijagram ovisnosti viskoznosti ν o temperaturi T
 a — poluteško (srednje) ulje,
 b — lako ulje.

Viskoznost je najvažniji podatak pri izboru ulja za određenu svrhu.

Mjere za viskoznost (kinematičku) — vidi str. 65. Viskoznost veoma ovisi o temperaturi te se s porastom temperature znatno smanjuje.

Za ležaje s velikom brzinom vrtnje i malim opterećenjem potrebno je ulje manje viskoznosti. Za veća opterećenja i pri višim pogonskim temperaturama (npr. u vrućim prostorijama) potrebno je ulje veće viskoznosti, a za promjenljive pogonske prilike potrebno je ulje s blago položenom krivuljom viskoznosti. Te osnovne upute treba uskladiti s uvjetima koji, svi zajedno, odlučuju o konačnom izboru najpravičnijeg maziva.

Plamište je temperatura pri kojoj se uljne pare prvi put zapale kad im se približavamo s otvorenim plamenom. Ako ulje nastavi dalje samo gorjeti, dosegli smo gorište, koje je 30 do 40 stupnjeva više od plamišta. Plamište moramo uzeti u obzir samo ako su pogonske temperature blizu plamišta. Ono veoma ovisi o tlaku; pri povećanom tlaku (npr. u kompresorima) plamište je znatno više, dok je pri sniženom tlaku (npr. u vakuum-pumpama) znatno niže.

Kaplište je temperatura na kojoj se pojavi prva kaplja tekuće masti kad se ona zagrijava u određenoj posudi. Mnoge se masti razgrađuju već mnogo prije nego su dosegle kaplište, pa zato ono mora biti znatno više od pogonske temperature ležaja.

Krutište je temperatura pri kojoj ulje više ne teče. Tim ocjenjujemo upotrebljivost ulja pri niskim temperaturama.

Penetracija je mjera za tvrdoću masti (tj. dubina do koje se, uz propisane uvjete, u uzorak masti utisne stožac određenih dimenzija).

Neutralizacijski broj. Zbog upotrebe ulja pri višim temperaturama i katalitičkog djelovanja kovina u prisustvu kisika iz zraka, u mineralnim se i zamašćenim uljima stvaraju nakon dužeg vremena slobodne organske kiseline, pa ulje »stari«. Neutralizacijski broj jest broj mg kalijeva hidroksida (KOH) koji je potreban da se neutraliziraju slobodne organske kiseline u 1 g ulja.

★

Budući da laboratorijska ispitivanja spomenutih fizikalnih i kemijskih karakteristika nisu uvijek dovoljna za ocjenu radnih svojstava, uvedena su i ispitivanja za specijalna maziva i neposredno na strojevima, a osobito na motorima s nutarnjim izgaranjem. Ispituju se odnosno ocjenjuju slijedeća svojstva: sposobnost prijanjanja i debljina sloja maziva na ploham, oksidacijska stabilnost, detergentnost i dr. Te metode obično nisu standardizirane.

Ležajna, vretenska, osovinska i cirkulacijska ulja

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm ² /s	Krutište 0 °C maks.	Plamište °C min.
<i>Ležajno ulje – destilat (JUS B.H3.313...316 – 1956)</i>				
		pri 50 °C		
lako	LD – 30	21... 38	–5	140
srednje	LD – 45	40... 52	–5	150
poluteško	LD – 60	55... 75	0	160
teško	LD – 100	80... 110	0	170
<i>Vretensko ulje (JUS B.H3.3000/301 – 1956) – za protočno mazanje</i>				
		pri 20 °C		
lako	VL	20... 45	–15	130
teško	VT	60... 85	–15	130
<i>Vretensko ulje – destilat (JUS B.H3.310/311 – 1956) – za protočno mazanje</i>				
lako				
teško				
<i>Osovinsko ulje (JUS B.H3.321/323 – 1956) – za osovine tračničkih vozila</i>				
		pri 50 °C		
lako	OL	45... 60	–15	150
teško	OT	90... 110	0	160
<i>Cirkulacijsko ulje (JUS B.H3.230 – 1973) – za optočno mazanje</i>				
		pri 50 °C		
super super lako	CP 2	1,6	–40	80
super lako	CP 3	3	–30	90
ekstra ekstra lako	CP 7	7	–20	110
ekstra lako	CP 9	9	–20	140
posebno lako	CP 14	14	–16	160
vrlo lako	CP 20	20	–15	165
lako	CP 27	27	–15	170
srednje	CP 37	37	–10	180
teško	CP 50	50	–10	200
vrlo teško	CP 75	75	–10	200
osobito teško	CP 100	100	–5	210
ekstra teško	CP 150	150	–5	215
ekstra ekstra teško	CP 215	215	–5	220
super teško	CP 300	300	–5	230
super super teško	CP 425	425	–5	230

Ulje za visoki tlak, zupčanike i zupčane prigone

Oznaka	Viskoznost mm ² /s			Krtište ($^{\circ}$ C maks.	Plamište $^{\circ}$ C min.
	-17,8 $^{\circ}$ C	50 $^{\circ}$ C	98,9 $^{\circ}$ C		
<i>Ulje za visoki tlak (JUS B.H3.211 ... 215 - 1962)</i>					
UVP — 75 ¹⁾	3 268	22 ... 29		-20	150
UVP — 80 ¹⁾		53 ... 76	8,5 ... 12	-15	165
UVP — 90 ²⁾		91 ... 190	14,2 ... 25,1	-12	180
UVP — 140 ²⁾			25,1 ... 42,9	-10	200
UVP — 250 ³⁾			42,9	0	220
<i>Ulje za otvorene zupčanike (JUS B.H3.270 ... 272 - 1955)</i>					
OZ 5			33	—	190
OZ 10			72	—	190
OZ 15			125	—	190
<i>Ulje za zatvorene zupčane prigone (JUS B.H3.319 - 1973)</i>					
ZU 40		40		-25	180
ZU 55		55		-20	190
ZU 80		80		-18	200
ZU 110		110		-15	210
ZU 150		150		-12	220
ZU 190		190		-12	230
ZU 230		230		-10	235
ZU 305		305		- 5	240
ZU 455		455		- 5	240
<i>Ulje za mehaničke prigone motornih vozila (JUS B.H3.302/303 - 1973)</i>					
MP 4 — 80	< 23 000	9 ... 11,5		-20	170
MP 4 — 90	—	16,8 ... 19,2		-15	190
MP 4 — 140	—	25,5 ... 31,5		- 8	210
MP 5 — 75	< 3 300	> 4,2		—	150
MP 5 — 80	< 11 000	9 ... 11,5	(-25)		160
MP 5 — 90	< 76 000	16,8 ... 19,2	(-18)		180
MP 5 — 140	—	25,5 ... 31,5	(- 7)		200

¹⁾ — za zupčane prigone, ²⁾ — za mjenjače i diferencijale, ³⁾ — za pužne prigone.

Hidrauličko, kompresorsko, turbinsko i cilindarsko ulje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm ² /s	Krtište		Plamište	
			$^{\circ}$ C maks.	$^{\circ}$ C min.	$^{\circ}$ C maks.	$^{\circ}$ C min.
<i>Hidrauličko ulje (JUS B.H3.120 ... 128 - 1963) za uljno-hidrauličke naprave</i>						
pri 50 $^{\circ}$ C						
ekstra ekstra lako	HU-EEL	10 ... 12	-35		81	
ekstra lako	HU-EL	12 ... 14	-30		100	
vrlo lako	HU-VL	17 ... 21	-25		160	
lako	HU-L	30 ... 34	-20		200	
srednje	HU-S	38 ... 42	-15		210	
teško	HU-T	49 ... 53	-10		220	
vrlo teško	HU-VT	61 ... 75	-10		230	
posebno teško	HU-NT	80 ... 95	-10		240	
<i>Kompresorsko ulje (JUS B.H3.151 ... 156 - 1962) — za stapne i rotacijske kompresore</i>						
pri 50 $^{\circ}$ C						
lako	KU-L	35 ... 50	-20		175	
srednje	KU-S	52 ... 72	-15		185	
teško	KU-T	75 ... 105	-10		195	
vrlo teško	KU-VT	110 ... 140	- 5		215	
posebno teško	KU-NT	150 ... 200	- 5		230	
ekstra teško	KU-ET	220 ... 270	- 5		250	
<i>Ulje za rashladne kompresore (JUS B.H3.141 ... 144 - 1962) — za kompresore za NH₃, CO₂, SO₂, freone i sl.</i>						
pri 50 $^{\circ}$ C						
vrlo lako	KH-VL	10 ... 17	-40		135	
lako	KH-L	18 ... 26	-35		160	
srednje	KH-S	26 ... 36	-25		180	
teško	KH-T	36 ... 50	-20		200	
<i>Turbinsko ulje (JUS B.H3.210 - 1976) — za vodne, parne i plinske turbine</i>						
pri 50 $^{\circ}$ C						
vrlo lako	TU-VL	16 ... 24	-10		180	
lako	TU-L	25 ... 33	- 8		190	
srednje	TU-S	34 ... 42	- 8		210	
teško	TU-T	44 ... 52	- 8		220	
<i>Cilindarsko ulje (JUS B.H3.341 - 1956, 382 - 1970) — za parne cilindre</i>						
pri 100 $^{\circ}$ C						
za zasićenu paru	CU 250	30 ... 52	+ 5		250	
za pregrijanu paru	CU 300	44 ... 55	+ 5		310	

Motorna ulje
(JUS B.H3.129/139/149/169 — 1974)

Razdioba mineralnih motornih ulja po kvaliteti

Klasifikaciju API su (1970/71) zajednički izdali: API (American Petroleum Institute) i ASTM (American Society for Testing Materials)

Kvalitet po JUS	Klasifikacija API*	Karakteristika ulja	Upotreba
A	SB	inhibirano	laki } benzinski teži } motori
B	SD	inhibirano, detergentno	
C	CC	jače detergentno	laki } dizel- teži } motori
D	CD	jako detergentno	

* Klasifikacija API poznaje još i kvalitete: SA, SC i SE (od SA do SE s porastom dodatka) te CA i CB (od CA do CD za povećani stupanj kompresije motora).

Motorna ulje za dvotaktne benzinske motore je ulje s dodacima, a upotrebljava se pomiješano s benzinom.

Razdioba po viskoznosti

Po SAE (Society of Automotive Engineers) motorna su ulja podijeljena u gradacije po viskoznosti (pri čemu nisu uzeti u obzir ni kvalitet ulja, ni ovisnost njegove viskoznosti o temperaturi).

Gradacija po SAE	Viskoznost mm ² /s		Krutište °C maks.	Plamište °C min.
	—17,8°C	98,9°C		
<i>Zimska ulja</i>				
SAE 10 Z	2 400	5,4 ... 7,3	—25	200
SAE 20 Z	9 600	7,3 ... 9,6	—20	205
<i>Ljetna ulja</i>				
SAE 20	—	7,3 ... 9,6	—20	205
SAE 30	—	9,6 ... 12,9	—15	220
SAE 40	—	12,9 ... 16,8	—10	230
SAE 50	—	16,8 ... 22,7	—10	240

»Svesezonska ulja« obuhvaćaju viskoznosću više gradacija. (Ulje koje odgovara gradacijama SAE 10 Z i SAE 30, označeno je sa SAE 10 Z—30).

Vazelinsko, izolacijsko ulje i ulje za obradu

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm ² /s	Krutište °C maks.	Plamište °C min.
-------	--------	-------------------------------	-------------------	------------------

Vazelinsko ulje, tehničko (JUS B.H3.160 ... 163 — 1958) — za precizne instrumente i lake radilice

vrlo lako	VZT-VL	pri 20°C 20 ... 37	—25	120
		pri 50°C 12 ... 17		
lako	VZT-L	12 ... 17	—20	120
		18 ... 25		
srednje	VZT-S	18 ... 25	—15	140
		26 ... 42		
teško	VZT-T	26 ... 42	—15	160

Izolacijsko ulje (JUS B.H3.561/562 — 1970)

za transformatore	IU-T	pri —30°C 1800	pri 20°C 30	—45	130
		pri —15°C 800	pri 20°C 40		
za sklopke	IU-P	800	40	—30	140

Dielektrična čvrstoća izolacijskih ulja IU-T i IU-P iznosi: za neprerađeno ulje 30 kV, za prerađeno ulje 50 kV.

Ulja i tekućine za obradu — za hlađenje i mazanje alata pri odvajanju čestica s kovina

Neemulgirajuća ulja (JUS B.H3.526 — 1973)

neaktivna ulja	N 5 N 10 NEP NVEP	pri 50°C 3,0 ... 6,5	—20	90
		6,5 ... 12		
		12 ... 37,5		
		12 ... 37,5		
		12 ... 37,5		
aktivna ulja	A 10 A 25 VA	6,5 ... 12	—20	100
		12 ... 37,5		
		12 ... 37,5		

Emulgirajuća ulja i sintetične tekućine (JUS B.H3.536—1974) — za emulzije s vodom u omjeru ulje/voda = 1 : 10 ... 1 : 40 (1 : 60), otopine u vodi u omjeru koncentrat/voda = 1 : 50 ... 1 : 1000.

Masti za mazanje

Vrsta	Oznaka	Viskoznost mm ² /s 50 °C	Penetracija (po gnje- čenju)	Krutište °C maks.	Kapljište °C min.
<i>Masti za otvorene zupčanike (JUS B.H3.273/274 — 1955)</i>					
teška	OZ-20	—	310 ... 340	—	—
vrlo teška	OZ-41	—	290 ... 310	—	—
<i>Masti za visoki tlak i temperaturu — za klizne i valjne ležaje pri povišenim temperaturama i tlakovima (JUS B.H3.624 — 1974)</i>					
vrlo meka	MVP-1	—	310 ... 340	—	175
meka	MVP-2	—	265 ... 295	—	180
srednja	MVP-3	—	220 ... 250	—	185
<i>— za visoke temperature (JUS B.H3.644/648 — 1965)</i>					
tvrdna	MVT-4	—	175 ... 205	—	160
briketna	MVT-B	—	< 80	—	180
<i>Masti na osnovi Li-sapuna (JUS B.H3.634 — 1974) — za više namjena</i>					
vrlo meka	VM-1	> 40	310 ... 340	-15	175
meka	VM-2	> 40	265 ... 295	-15	180
srednja	VM-3	> 40	220 ... 250	-15	185
<i>Masti na osnovi Na-sapuna (JUS B.H3.645 — 1974) — za valjne ležaje</i>					
meka	MKL-2	> 35	265 ... 295	-15	140
srednja	MKL-3	> 35	220 ... 250	-15	150
<i>Grafitirana mast (JUS B.H3.661 — 1970)</i>					
srednja	LMG-3	> 37	200 ... 250	-15	95
Sadrži: 2 ... 4% grafit, 8% pepela, 2% vode.					
<i>Masti s molibdenovim disulfidom MoS₂ (JUS B.H3.666 — 1976)</i>					
—	MMo-1	> 40	310 ... 340	-15	175
—	MMo-2	> 40	265 ... 295	-15	180
Sadrži: > 3% MoS ₂ .					
<i>Antikorozijski vazelin (JUS B.H3.681 — 1977)</i>					
—	AV-55	—	200 ... 325	—	55
—	AV-65	—	90 ... 150	—	65
—	AV-75	—	30 ... 80	—	75

Izbor maziva *

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti		Maziva po JUS
	t — temperatura (°C)	n — brzina vrtnje (okr./min)	
Ležaji			
<i>Klizni ležaji</i>			
— podmazivanje uljem, ručno ili mazalicama	n < 50		LD 100
	n = 50 ... 200		LD 60
	n = 200 ... 700		LD 45
— podmazivanje uljem, cirkulacijsko ili prstenom	t > 0 °C:		
	n < 50		CP-100
	n = 50 ... 200		CP-75
	n = 200 ... 700		CP-50
	n = 700 ... 1500		CP-37
	n = 1500 ... 3000		CP-20
	n > 3000		CP-7
	t < 0 °C		KH-S
— podmazivanje mašću	t < 60 °C:		
	mazalicama		LMG-3
	tlačno		MVP-2
	t > 60 °C		MKL-3
<i>Valjni ležaji</i>			
— podmazivanje uljem	t = -25 ... 40 °C		KH-T
	t = 0 ... 60 °C:		
	n < 700		CP-37
	n = 700 ... 3000		CP-20
	n > 3000		CP-7
	t = 60 ... 90 °C:		
	n < 700 °C		CP-100
	n = 700 ... 3000		CP-37
	n > 3000		CP-20
	t > 90 °C:		
	n < 700		CP-300
	n = 700 ... 3000		CP-215
	n > 3000		CP-75
— podmazivanje mašću	t = -20 ... 125 °C:		
	normalno opterećenje		VM-3
	veliko opterećenje		MVP-3

* Navedene su upute informativne. U pojedinim slučajevima, a napose pri većim zahtjevima, valja uzeti u obzir upute proizvođača stroja ili uređaja i proizvođača maziva.

Izbor maziva

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti		Maziva po JUS
	t — temperatura (°C) n — brzina vrtnje pogonskog zupčanika (okr./min) P — prenesena snaga (kW)		
Zupčani prijenosi Zatvoreni zupčanici	$t = -20 \dots 20$ °C: veliko opterećenje manje opterećenje		ZU-80 ZU-40
— podmazivanje cirkulacijsko	$t = 0 \dots 70$ °C: $n < 350$: $P < 18$ $P = 18 \dots 65$ $P > 65$ $n = 350 \dots 1000$: $P < 11$ $P = 11 \dots 50$ $P > 50$		ZU-55 ZU-80 ZU-190 ZU-40 ZU-55 ZU-80
— podmazivanje u uljnoj kupelji	$n < 350$: $P < 18$ $P = 18 \dots 65$ $P > 65$ $n = 350 \dots 1000$: $P < 11$ $P = 11 \dots 50$ $P > 50$		ZU-80 ZU-190 ZU-305 ZU-55 ZU-80 ZU-190
— podmazivanje cirkulacijsko ili u uljnoj kupelji	$n = 1000 \dots 2500$: $P < 7$ $P = 7 \dots 37$ $P > 37$ $n = 2500 \dots 5000$: $P < 4$ $P = 4 \dots 15$ $P > 15$		ZU-40 ZU-55 ZU-80 CP-20 ZU-40 ZU-55 OZ 15
Otvoreni zupčanici Pužni prijenosi	$t < 60$ °C t — normalne — niske		MP4-140 MP4-80
Lanci i užad Gallovi lanci	t — normalne — niske		MP4-90 KH-T
Čelična užad	t — normalne i niske		OZ 5

(nastavak)

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti		Maziva po JUS
	t — temperatura (°C) n — brzina vrtnje (okr./min) P_1 — snaga po cilindru (kW)		
Vodne turbine Potporni ležaji — sa čvrstim potpornim prstenom	$t < 50$ °C srednja i velika opterećenja, mala i srednja brzina		TU-T
— s pomičnim segmentima	$t < 60$ °C: opterećenje $< 3,5$ N/mm ² mala opterećenja, velika brzina		TU-S TU-S
Horizontalni potporni i grebenasti ležaji Svornjaci statorkih lopatica, vodivi podvodni ležaji	$t < 15$ °C mala i srednja opterećenja		LMG-3 CP-300 TU-S
Glavine Kaplanovih turbina	servomotor u osovine servomotor u glavini		
Parne turbine Ležaji	$n > 3000$ $n = 1500 \dots 3000$		TU-VL TU-S
Stapni parni strojevi Cilindri	Temperatura pare: $t_p < 320$ °C $t_p < 260$ °C		CU-300 CU 250
Dizel-motori (stabilni) Vertikalni motori — cilindri i ležaji	$P_1 < 120$ kW $P_1 > 120$ kW		D-SAE 30 D-SAE 40
Horizontalni motori — cilindri i ležaji	$P_1 < 40$ kW $P_1 > 40$ kW		D-SAE 20Z D-SAE 30
Regulatori Protočni regulatori Tlačni regulatori	t — normalne t — normalne — niske		TU-S TU-S KH-L KH-T KH-S
Stapni kompresori za regulatore	$t > 10$ °C $t < 10$ °C		KU-T KU-S

Izbor maziva (nastavak)

Mjesto i način podmazivanja	Pogonski uvjeti		Maziva po JUS
	<i>t</i> — konačna temperatura kompresije (°C)	<i>p</i> — tlak (bar)	
Hidraulički strojevi Stapne pumpe Rotacijske pumpe	normalno opterećenje normalno opterećenje veliko opterećenje		HU-VL HU-S HU-VT
Stapni kompresori Cilindri i brtve			
— mali jednostepeni zračni kompresor	<i>p</i> < 6 bar: vani — zimi — ljeti unutra		KU-L KU-S KU-S
— višestepeni kompresor za zrak, N ₂ , CO, NH ₃ , C ₂ H ₂ i sl.	<i>p</i> < 100 bar: <i>t</i> < 140 °C <i>t</i> < 160 °C <i>t</i> < 190 °C <i>t</i> > 190 °C		KU-S KU-T KU-NT KU-ET
— kompresori za koksni ili rasvjetni plin	<i>t</i> < 140 °C <i>t</i> > 140 °C		KU-S KU-T
— kompresori za metan, propan, butan	<i>t</i> < 140 °C		KU-T
— kompresori za vlažni zrak ili plin	<i>t</i> < 135 °C <i>t</i> > 135 °C		KU-S KU-VT
— rashladni kompresori za NH ₃ i CO ₂ za freon i CH ₃ Cl za SO ₂			KH-S KH-T KH-T
Ležaji i pogonski mehanizam			
— cirkulacijsko podmazivanje			CP-75
— tlačno podmazivanje			CP-50
Rotacijski kompresori			
Jednostepeni	<i>p</i> < 2,5 bar <i>t</i> < 140 °C <i>p</i> > 2,5 bar: <i>t</i> < 180 °C <i>t</i> > 180 °C		KU-S KU-VT KU-ET
Dvostepeni	<i>p</i> < 8 bar <i>t</i> < 140 °C <i>p</i> > 8 bar: <i>t</i> < 180 °C <i>t</i> > 180 °C		KU-S KU-VT KU-ET
Alatni strojevi			
Vodila	malo opterećenje veliko opterećenje		LD-30 LD-60

TEHNOLOGIJA

Lijevanje

Modeli po kojima se izrađuju kalupi za lijevanje dijele se na:

— *Višekratno upotrebive modele* koje izrađujemo od kovine (čelik, sivi ljev, aluminij, mjed itd.), plastu, drveta ili sadre. Moraju biti dijeljivi i s kosim bočnim plohamu da ih nakon kalupljenja možemo izvući iz pješanog kalupa.

Jezgrenici su modeli za izradu pješanih jezgara.

— *Jednokratno upotrebivi modeli* izrađuju se od voska (kojega po konačnoj izradi pješanog kalupa istalimo zagrijavanjem) ili od plastu (UF ili pjenastoga PS koji se dodiranjem s vrućom talinom ispare).

Osnova za izradu modela je konstrukcijski nacrt. Pri dimenzioniranju modela valja uzeti u obzir kontrakciju ljeva pri skrućivanju i ohlađivanju. Stoga su dimenzije modela za nadmjeru povećane s obzirom na konstrukcijski nacrt.

Nadmjerne lijevova (JUS K.H5.050 – 1959)

Ljev	Nadmjera %		Ljev	Nadmjera %	
	manji odljevci	veći odljevci		manji odljevci	veći odljevci
sivi ljev	1.0	0.75	lijevana bronca	1.5	1.3
			lijevana Al bronca	2.1	1.8
nodularni ljev					
— nežareni	2.0	1.5	lijevana mjed	1.7	1.5
— žareni	0.5	0.3	cinčani ljev	1.5	1.2
temperovani ljev			aluminijski ljev	1.2	1.0
— nežareni	2.0	2.0	— Al-Mg ljev	1.5	1.3
— bijeli, žareni	1.6	—	— Al-Cu-Mg ljev		
— crni, žareni	0.5	0.5			
čelični ljev	2.0	1.8	magnezijski ljev	1.4	1.3
lijevani Mn čelici	2.3	2.3	bijela kovina	0.5	—

Na plohamu, koje će biti obradene, treba na modelu dodati za obradu:

Najveća dimenzija odljevka mm	Dodatak za obradu* u mm					
	sivog ljeva		za odljevke od čeličnog ljeva		neželjeznih kovina	
	I	II	I	II	I	II
... 200	2...3	3...5	3...4	6...7	2...2	3...4
200)... 300	2...3	5...6	3...4	7...9	2...2	4...5
300)... 500	3...4	6...8	4...5	9...12	3...3	5...6
500)... 800	3...5	7...9	4...7	10...13	3...4	5...7
800)... 1200	4...6	8...10	6...9	12...15	4...5	6...8
1200)... 1800	5...7	9...11	7...10	14...16	4...5	7...9
1800)... 2600	6...8	10...12	9...12	15...18	5...6	8...10
2600)... 3800	—	11...14	—	16...21	—	9...11
3800)... 5400	—	12...16	—	18...24	—	10...13
5400)...	—	14...18	—	24...30	—	12...16

* I – pri masovnoj izradi odljevaka, II – pri pojedinačnoj izradi

Zbog veće preglednosti pri izradi kalupa i upozorenje za koji je lijev predviđen pojedini model (nadmjerne!) označuju se pojedine plohe na modelima posebnim bojama.

Boje modela

Površine modela i jezgrenika	L i j e v					
	sivi	nodularni	temperovani	čelični	lake kovine	teške kovine
površine na kojima ostaju odljevci neobrađeni	crveno	ljubičasto	sivo	modro	zeleno	žuto
površine na kojima će se odljevci obraditi	žute crte*	žute crte*	žute crte*	žute crte*	žute crte*	crvene crte*
mjesta za rashladne ploče i uložene trnove	modro	crveno	crveno	crveno	crveno	modro
sastavi dijeljenih modela	crni rub					
jezgreni oslonci	crno					

* Manje se plohe oboje tom bojom u cjelini.

Modeli nisu potrebni pri posebnom načinu lijevanja (tlačnom, kokilnom, centrifugalnom, kontinuiranom itd.).

Kalupi su pomoćno sredstvo u kojima se uljevna kovinska talina hladjenjem skrućuje u odljevak.

Kalupi moraju izdržati visoke temperature taline, ne smiju s njom reagirati, moraju biti i kod tih temperatura dovoljno čvrsti i porozni za odvođenje nastalih plinova. Razlikujemo:

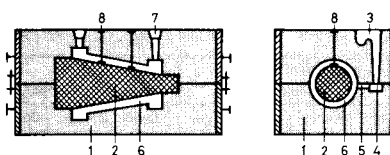
– *Kalupe za jednokratnu upotrebu*, koje izradujemo nabijanjem ljevačkog pijeska.

Ljevački pijesak sastoji se pretežno od kremenih zrnaca (SiO_2), ima visoko talište (1720°C) te postaje gnjecav tek povrh 1600°C . Debljina zrna kreće se između $0,06 \dots 0,5 \text{ mm}$ (u ovisnosti od tražene glatkoće ploha odljevka i njegove veličine). Kremenova zrna sama su sipka. Vežemo ih dodatkom veziva. Najobičajenije vezivo je glina ($2 \dots 30\%$) uz dodatak vlage ($5 \dots 15\%$). Po količini gline u ljevačkom pijesku razlikujemo suhi, polumasni i masni pijesak. Suhi pijesak ima najveću propustivost za plinove, ali manju čvrstoću. Upotrebljavamo ga npr. za jezgre (do 5% gline). Polumasni pijesak upotrebljavamo za svježe kalupe, a masni – najveće čvrstoće – za sušene kalupe. Osim posebnih vrsta anorganskih veziva (gline s određenim mješavinom Al_2O_3 i SiO_2 uz dodatke K, Mg i sl.) upotrebljavamo i organska veziva (uljna, škrobna, od plasta – PF, UF i sl.), naročito pri izradi jezgara i ljevačkih maski (za velike serije malih odljevaka – po Croningu).

Kalupljenje može biti ručno (pri pojedinačnoj izradi odljevaka i pri velikim odljvcima) ili strojno (pri masovnoj izradi manjih odljevaka).

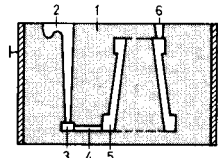
Pješčani kalupi

Dijeljeni kalup za model za višekratnu upotrebu:



- 1 – kalup
- 2 – jezgra
- 3 – ulijevak
- 4 – razvodnik
- 5 – privodnik
- 6 – odljevak
- 7 – pojilo
- 8 – jezgreni oslonac

Kalup za model (od plasta) za jednokratnu upotrebu:



- 1 – kalup
- 2 – ulijevak
- 3 – razvodnik
- 4 – privodnik
- 5 – odljevak
- 6 – pojilo (odušnik)

U pojilu (koje mora biti dovoljno veliko pri punim, debelim odljvcima) mora se talina održati tekućom (toplinskom izolacijom ili dodatnim zagrijavanjem) sve do skrućenja odljevka, da bi se sprečilo stvaranje lunkera u odljevku.

Za odvod zraka valja namjestiti na najvišim mjestima modela odušnike, koji mogu također preuzeti ulogu pojila. Pijesak u kalupu valja na mjestima probosti (zračnici), kako bi pri ulijevanju nastalim plinovima olakšali izlaz.

Pri dijeljenom okviru za kalup moramo gornji dio čvrsto spojiti s donjim dijelom, da se ne bi dignuo zbog hidrostatskog uzgona. Da uzgon u talini ne bi skrivio ili srušio jezgre, učvršćujemo ih osloncima i opteretimo utezima.

– *Kalupi za višekratnu upotrebu* izraduju se od kovina, grafita ili keramike.

Kokile su kovinski kalupi (obično od čelika ili sivog lijeva) pomoću kojih je moguće izraditi vrlo točne odljevke (s toler. $\pm 0,3 \dots \pm 0,05 \text{ mm}$). U potpunim kokilama su i jezgre kovinske, u dijeljenim kokilama su jezgre od pijeska.

Talina se ulijeva u kokile otvorenim mlazom.

Zbog više cijene upotrebljavamo kokile pri masovnoj izradi odljevaka. Zbog velikih temperaturnih opterećenja je njihova primjena ograničena na izradu odljevaka od slitina nižeg tališta (Sn, Zn, Pb – Al, Mg, mjedi).

Centrifugalno lijevanje, pri kojem se talina zbog rotacije kokile sabere uz vanjsku njenu stijenku, prikladno je za izradu lijevanih koluta i cijevi.

Pri kontinuiranom lijevanju se kovinska talina ulijeva u obostrano otvorenu kokilu (zatvorenu samo pri početku postupka). Talina se u kokili skrućuje toliko, da nastane dovoljno čvrsta vanjska kora, koja omogućuje izvlačenje odljevka. Postupak je prikladan za kontinuirano lijevanje punih ili šupljih profila (u duljinama koje ograničava samo vanjski uređaj radnih prostorija).

Dozvoljeno odstupanje pri dimenzijama neobrad. odljevaka od sivog i čeličnog lijeva

Preporučene smjernice (pri dimenzijama bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčane kalupe). — Mjere u mm.

Nazivna mjera	Sivi lijev				Čelični lijev			
	kalupljenje*		kalupljenje*		kalupljenje*		kalupljenje*	
	ručno	strojno	ručno	strojno	ručno	strojno	ručno	strojno
	vel.	deblj.	vel.	deblj.	vel.	deblj.	vel.	deblj.
... 6		± 1,5		± 1				
6)... 10	+2 -1,5	± 2,5	± 1	± 2	+3	± 3	+3	± 2
10)... 18					-2	± 4			-2
18)... 30			+2		+4	± 5		
30)... 50		± 3,5	-1,5	± 2,5	-2	± 7		± 3
50)... 80					+5	± 8	+4	
80)... 120		± 4,5		± 3,5	-3		-2	± 4
80)... 120	+3 -2		+2,5		+6	± 9	+5	
120)... 180			-1,5		+7		-3	± 5
120)... 180					+7	± 11		
180)... 250					+8	± 12	+7	± 6
250)... 315	+4 -3		+3		+9	± 13	-4	
315)... 400			-2		+9			
400)... 500					+10	± 15	+8	± 7
500)... 630	+6 -4		+4,5		-5	± 16	-4	± 8
630)... 800			-2,5		+11			+9
630)... 800	+7 -5		+5		-6		-5	
800)... 1000			-3		+13			+11
1000)... 1250					+13			-6
1250)... 1600	+10 -7		+6		+15			
1600)... 2000			-4		+16			+14
1600)... 2000	+13 -9		+8		+18			
2000)... 2500			-5		-9			
2000)... 2500					+20			
					-10			

* vel. — odstupanje pri veličini odljevka (promjer, širina, duljina); deblj. — odstupanja pri debljini stijenki.

Dozvoljena odstupanja pri dimenzijama za neobrađene odljevke neželjeznih kovina

Preporučene smjernice (pri dimenzijama bez propisanih tolerancija i za odljevke u pješčanim kalupima). — Mjere u mm.

Nazivna mjera	Odljevci teških kovina				Odljevci lakih kovina				
	kalupljenje		kalupljenje		kalupljenje		kalupljenje		
	ručno	strojno	ručno	strojno	ručno	strojno	ručno	strojno	
	vel.	deblj.	vel.	deblj.	dij.	jez.	dij.	jez.	
... 6		± 1,5			± 1	± 1,2	± 1,6	± 0,6	± 0,8
6)... 10	± 1,5	± 1,5	± 1,5	± 1,5	+1,5	± 1,6	± 2,3	± 1,2	± 1,5
10)... 18					-1	± 2	± 3	± 1,8	± 2,2
18)... 30					+2	± 2	± 3	± 1,8	± 2,2
18)... 30	± 2	+3 -2	± 2	± 2	± 2	jedn.	sast.	jedn.	sast.
30)... 50								+2,5	± 1	± 1,6	± 0,8	± 1
30)... 50	± 2,5	+3,5 -2,5	± 2	± 2	-2				
50)... 80								+4,5	± 1,2	± 1,9	± 0,9	± 1,2
50)... 80					+3				
80)... 120	± 3,5	+5 -4	± 3	± 3	± 2	± 1,4	± 2,2	± 1,1	± 1,4
120)... 180									± 1,6	± 2,5	± 1,2	± 1,6
180)... 250						± 1,8	± 2,9	± 1,4	± 1,8
250)... 315						± 2	± 3,2	± 1,6	± 2
315)... 400	± 4		± 3,5			± 2,2	± 3,6	± 1,8	± 2,2

Oznake za odstupanja:
vel. — za veličinu odljevka; deblj. — za debljinu stijenki; dij. — pri dijeljenom kalupu; jez. — za kalupe s jezgrama; jedn. — pri jednodijelnim kalupima; sast. — pri sastavljenim kalupima.

Čišćenje odljevaka

Postupak čišćenja odljevaka:

- istresanje pijeska obavlja se ručno ili strojno (vibratorima);
- grubim čišćenjem odstranjuje se sav pijesak i to ručno i/ili strojno (pneumatskim dlijetima, u okretnim bubnjevima, pjeskaranjem kremenovim ili čeličnim zrnjem — pneumatski ili mehaničkim bacačima, vodenim mlazom — 25 ... 150 bar);
- priljevci (uljevci i pojila) odstranjuju se piljenjem, plamenim ili lučnim rezanjem, brusnom pločom;
- brušenjem se poravnavaju neravnosti ploha po odstranjenju priljevaka i sl. Eventualne greške odljevaka popravljaju se isjecanjem ili zavarivanjem.

Plastična obrada

Plastična obrada – preoblikovanje – je radni postupak u kojem krutom kovinskom materijalu (sirovom odljevku ili već prije preoblikovanom poluproizvodu, npr. limu) plastičnom (trajnom) deformacijom promijenimo oblik, pri čem se ujedno promijeni i struktura materijala.

Preoblikovanje se zbiva u području prisilnog tečenja kovine ili slitine. S obzirom na temperaturu preoblikovanja razlikujemo:

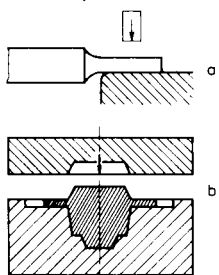
- preoblikovanje u hladnom, tj. pod temperaturom rekristalizacije, pri čem materijal očvršne (povećavaju se čvrstoća i tvrdoća uz smanjenje rastegljivosti),
- preoblikovanje u toplom, tj. nad temperaturom rekristalizacije, pri čem materijal ne očvršne, jer se pritom nastala naprezanja usput gube.

Porastom deformacije rastu i naprezanja u materijalu. Pri prevelikoj deformaciji materijal se kida. Stoga je veličina deformacije pri preoblikovanju ograničena. Naprezanja, koja nastaju zbog očvršćivanja pri preoblikovanju u hladnom, mogu se žarenjem odstraniti, nakon čega se materijal može dalje preoblikovati. Na taj način možemo postepenim preoblikovanjem i međuzarenjem postići vrlo velike deformacije materijala.

Značajna je brzina deformacije. Pri malenoj brzini deformacije materijal će se prognječiti do u dubinu presjeka, pri velikoj brzini stići će deformacija samo do manjih dubina.

Najznačajniji su primjeri preoblikovanja:

Kovanje



Kvalitetne dijelove kompliciranih oblika i s velikim razlikama presjeka izrađujemo najjednostavnije kovanjem valjanih profila (štapova, traka) u otkovke. Kujemo obično u toplom. Pri kovanju u hladnom materijal jako očvršne, a tada su moguće samo male deformacije.

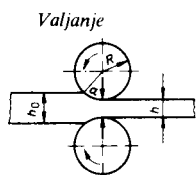
Slobodno kovanje (a) – ručno ili strojno – sastoji se iz velikog broja udaraca, a upotrebljava se pri pojedinačnoj izradi i pri velikim otkovcima.

Kovanje u kalupu (b) sastoji se iz manjeg broja udaraca, daje točnije dimenzije otkovka, a upotrebljava se pri masovnoj izradi.

Pri valjanju lima ili profila među dvama valjcima smanjujemo debljinu izratka za razliku Δh ($= h_0 - h$) koja je ovisna od promjera valjaka $2R$ i koeficijenta trenja μ

$$\Delta h \leq 2R(1 - \cos \alpha) = 2R(1 - 1/\sqrt{\mu^2 + 1})$$

Fino valjanje (»glačanje«) je fina obrada tokarenih ili brušenih kovinskih ploha plastičnom deformacijom pri kojoj površinski sloj jako očvršne.



Valjanje

Utiskivanje

Utiskivanje patrice (utisnog alata pozitivnoga oblika) u materijal izrađujemo razne gravure ili udubine (negativnog oblika).

Istiskivanje

Hladnim istiskivanjem materijala kroz matricu (istosmjerno – a, b) ili protiv patrice (protusmjerno – c) oblikujemo štapove, profile, cijevi (u prvom redu od Sn, Pb, Zn, Al, Cu i sl.).

Vučenje (kalibriranje)

Vučenjem odvaljaka kroz matrice (a, b) ili valjke (c) dobivamo vučene profile i žicu.

Duboko izvlačenje

Duboko izvlačimo lim iz pripremljenih odrezaka (platina odn. kružno izrezanih rondela) – pri jednostavnim proizvodima u jednom stupnju, pri kompliciranijim u više stupnjeva.

Savijanje

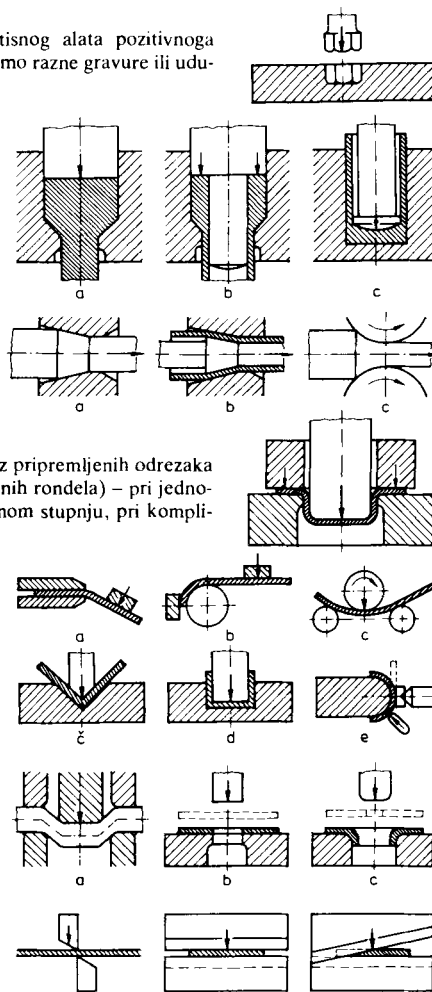
Savijamo u prvom redu lim i trake i to: slobodno (a, b), pomoću valjaka (c), u kalupima (č, d) ili postepenim razvlačenjem preko modela (e).

Smično preoblikovanje

Smično preoblikovanje upotrebljavamo npr. za savijanje štapa u koljenčastu osovinu (a), stvaranje rupa u limu – čistih (b) ili s prirubom (c).

Odreživanje

Odreživanje je postupak pri kojem smičnim opterećenjem odvajamo čestice izratka.



Oblikovanje plastu

Veći je dio oblikovanih proizvoda i poluproizvoda od plastu – termoplast; od duroplasta ih je manje.

Termoplaste možemo lijevati (težinskim ili centrifugalnim postupkom), no mnogo više ih oblikujemo tlačnim lijevanjem u kokilama (proizvode kabastog oblika) ili istiskivanjem kroz sapnice (profile, cijevi, ploče). Dodatnim razvlačenjem izrađuju se folije (debljine 0.02...0,3 mm).

Duroplaste lijevamo ili prešamo u kalupima (tlakom 150...1000 bar pri temperaturama alata 140...180 °C).

Primarni oblik plastu za preradu su prašak i zrnje.

Pri tlačnom lijevu i istiskivanju materijal se potiskuje pužnim vijkom ili klipom, a za prešanje upotrebljavaju se preše (tijeskovni) i to: ručne (50...800 kN), mehaničke (400...1500 kN) ili hidrauličke (150...10000 kN).

SINTEROVANJE

Sinterovanjem spajamo materijale (kompozite) iz komponenata koji se drugim tehnološkim metodama ne daju spajati (ili veoma teško).

Mješavinu komponenata u obliku prašine (veličine zrna 1...500 μm) ponajprije stisnemo (hladno ili vruće) velikim tlakom (1...10 kbar) u konačni oblik, da bi ih nato pri visokim temperaturama sinterovali (difuzijski stopili).

Temperature sinterovanja su: za bakrene slitine 600...800 °C, za željezne slitine 1000...1300 °C, za karbidne tvrde metale 1400...1600 °C, za Mo, W, Ta i sl. 2000...2900 °C.

Veličinom zrna komponenata, tlakom pri tlačenju i temperaturom sinterovanja utičemo na poroznost sastavljenoga materijala:

volumenski udio pora	upotreba
do 60%	– filteri
do 30%	– klizni ležaji
15...20%	– strojni dijelovi
do 5%	– vrlo čvrsti strojni dijelovi

Primjeri upotrebe:

- karbidni tvrdi metali: sinterovanje tvrdih i krhkih volframovih, molibdenovih ili tantalovih karbida žilavim vezivom, npr. kobaltom;
- »dijamantne kovine«: sinterovanje dijamantnog zrnja (ili drugih tvrdih tvari, npr. korunda) kovinskim vezivom;
- slitine komponenata vrlo raznolikih tališta: sinterovanje kovina razmjerno visokog tališta (Fe, Ni, Co) s kovinama vrlo niskih tališta (Zn, Cd, Pb);
- slitine za filtere i klizne ležaje: sinterovanje kovina i kovinskih spojeva željene poroznosti (kod ležaja valja pore napojiti uljem);
- slitine za četkice kolektorskih električnih strojeva: sinterovanje grafita (klizavost) i bakra (vodljivost);
- slitine za električne kontakte: sinterovanje volframa ili molibdena (tvrdća) s bakrom ili srebrom (vodljivost).

ZAVARIVANJE KOVINA

Zavarivanje pritiskom (JUS C.T3.001 — 1971)

1. **Kovačko zavarivanje.** Dijelove zagrijemo u peći do bijelog žara, dezoksidiramo površine (npr. boraksom) te ih zavarimo udarcima čekićem.

2. **Plameno zavarivanje pritiskom.** Dijelove zagrijemo plamenom te ih zavarimo pritiskom.

3. **Aluminotermijsko zavarivanje pritiskom.** Dijelove zagrijemo toplinom egzotermne reakcije aluminija s oksidom kovine, koja se zavaruje, te ih zavarimo jakim pritiskom u prešama.

4. **Čeono zavarivanje električnim otporom**

a) **Zavarivanje pritiskom** je postupak u kojem propuštamo jaku električnu struju kroz oba dijela što ih zavarujemo, a koji su u stalnom dodiru. Na mjestu dodira stvara se Jouleova toplina pa se dodirno mjesto jako ugrije. Kad se postigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

b) **Zavarivanje iskrenjem** je postupak pri kojem propuštamo električnu struju kroz oba dijela što ih zavarujemo, a koji se izmjenično dotiču i razmiču, tako da se pojavi iskrenje zbog kojega se dodirno mjesto jako zagrije. Kad se dostigne temperatura zavarivanja, oba dijela zavarimo jakim pritiskom.

5. **Preklopno zavarivanje električnim otporom**

a) **Točkasto zavarivanje** je zavarivanje dvaju dijelova stisnutih između dva pritiskivača, kroz koje dovodimo električnu struju. Dodirno se mjesto obaju dijelova ugrije Jouleovom toplinom te se zavari pod pritiskom. To ponavljamo na limu u stanovitim razmacima — po točkama.

b) **Kolutno zavarivanje** srodno je točkastom zavarivanju, ali su pritiskivači izvedeni u obliku koluta koji valjanjem po dijelovima što ih treba zavari daju neprekidno zavar.

c) **Bradavičasto zavarivanje** je točkasto zavarivanje na pojedinim posebno ispučenim mjestima lima (bradavicama) kroz koja prelazi električna struja.

6. **Indukcijsko zavarivanje.** Dijelove zagrijemo visokofrekventnom strujom te ih zavarimo pritiskom.

7. **Zavarivanje trenjem.** Dijelove zagrijemo trenjem između dodirnih ploha mirujućeg i rotirajućeg dijela te ih zavarimo pritiskom.

8. **Hladno zavarivanje.** Dijelove dovedemo do tjesnog dodira te ih jako stisnemo. Pri tom se pojavljuje međusobno prodiranje elementarnih čestica iz jednog dijela u drugi pa se oni kovinski spoje.

9. **Zavarivanje ultrazvukom.** Dijelovi se zagriju toplinom trenja zbog ultrazvučnog titranja, a zatim ih zavarimo pritiskom.

10. **Zavarivanje difuzijom** je spajanje kovina u krutom stanju u određen čas pri odgovarajućoj temperaturi i umjerenom pritisku. Uvjet za uspješan difuzijski proces je vrlo čista dodirna površina, a katkada i zaštitna atmosfera.

11. **Zavarivanje eksplozijom** je spajanje dvaju dijelova pritiskom što ga stvara sila eksplozije.

Zavarivanje taljenjem (JUS C.T3.001 — 1971)

1. Ljevačko zavarivanje upotrebljavamo uglavnom za popravak pokvarenih odljevaka. Pokvareni dio, ugrađen u poseban kalup, prelijevamo taljevinom dok se mjesto kvara ne zatali.

2. Aluminotermijsko zavarivanje taljenjem. Termitni prašak, smjesa aluminija i željeznog oksida u prahu, izgara pri visokoj temperaturi uz oksidaciju aluminija i oslobađanje željeza iz željeznog oksida. Rastaljenim se željezom zavaruju čelični dijelovi.

3. Zavarivanje plamenom. Za stvaranje plamena služe acetilen, rasvjetni plin, vodik ili teški ugljikovodici (benzen, teški benzin) s kisikom ili zrakom. Najbolji plamen daje acetilen s kisikom. Kao dodatni materijal služe žice za zavarivanje koje talimo u plamenu.

4. Lučno zavarivanje kovinskom elektrodom

Plameni luk nastaje između kovinske elektrode i predmeta koji zavarujemo. Ako se elektroda tali, služi još i kao dodatni materijal. Kovinske elektrode koje se ne tale (volfram), služe samo za stvaranje električnog luka, a ako je potreban dodatni materijal, dobiva se taljenjem dodatne žice u plamenom luku.

a) Lučno zavarivanje u slobodnoj atmosferi

- golom elektrodom
- elektrodom s plaštem
- elektrodom s jezgrom
- položenom elektrodom

b) Lučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi

- u inertnom plinu (Ar, He itd.)
- volframovom (»tungsten«) elektrodom (postupak TIG)
- kovinskom (»metal«) elektrodom (postupak MIG)
- u ugljičnom dioksidu (CO₂)
- kovinskom elektrodom (postupak MAG — CO₂)
- u vodenoj pari ili smjesi zaštitnih plinova
- pod zaštitnim prahom (postupak EPP)
- pod zaštitom vodika atomiziranjem (disocijacijom vodikovih molekula i njihovim ponovnim spajanjem, što povisuje temperaturu na mjestu zavarivanja).

5. Lučno zavarivanje ugljenom elektrodom

Plameni luk nastaje između dviju ugljenih elektroda ili između elektrode i predmeta koji zavarujemo. Po potrebi dodajemo — žicom za zavarivanje — još i dodatni materijal. Postupak se može obavljati u slobodnoj ili zaštitnoj atmosferi, a upotrebljava se za tanke limove i za kutne zavare.

6. Zavarivanje pod troskom

Proces počinje kao kod postupka EPP. Kad se skupi dovoljno troske koja pokriva rastaljenu kovinu, ugasi se plameni luk, a dodatnu žicu, koju primičemo, talimo Jouleovom toplinom što se razvija pri prolasku električne struje kroz trosku.

7. Posebni postupci zavarivanja

a) Zavarivanje elektronskim snopom

Kinetička se energija ubrzanih elektrona pri udaru u kovinu pretvara u toplinu kojom talimo materijal.

b) Zavarivanje plazmom

Kovinu talimo toplinskom energijom plazmenog luka. (Plazma nastaje disocijacijom i ionizacijom plina.) Rastaljenu kovinu štitimo zaštitnim plinom.

c) Zavarivanje laserom

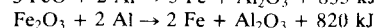
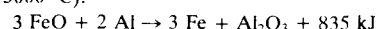
Kovinu talimo usmjerivanjem laserskog snopa na mjesto zavarivanja. Ne može se zavarivati neprekinuto, već samo u točkama. Mogu se zavarivati vrlo sitni predmeti.

Aluminotermijsko zavarivanje

Aluminotermijsko zavarivanje je postupak zavarivanja kemijskom energijom koja se oslobađa pri eksotermijskoj reakciji među aluminijem i željeznim oksidima.

Reakcijska smjesa — termit — sastoji se od jednog dijela aluminijevog praška i triju dijelova željeznih oksida (okujina) — kao eksotermijskog dijela smjese — te sitnih čeličnih otpadaka i legiranih dodataka — za dodatnu kovinsku masu.

Pri eksotermijskoj reakciji (redoks) termita reducira aluminij željezne okside te i sam oksidira, pri čem se oslobađa znatna toplina (temperatura dostiže 2800 . . . 3000 °C):



Postupak je prikladan za zavarivanje teških strojnih dijelova, tračnica i sl.

Otporno zavarivanje

Za zavarivanje potrebna toplina stvara se u dodiru među dijelovima koje treba zavariti kao Jouleova toplina

$$Q = UIt = I^2 R t$$

gdje su: U — napon, I — struja, R — električni otpor i t — vrijeme.

U međusobnom dodiru obaju dijelova može se postići temperatura 1260 . . . 1480 °C, što je dovoljno da se materijal pod pritiskom zavari.

Debljina pojednog lima mm	Promjer elektrode mm	Debljina pojednog lima mm	Pritisak elektrode N	
			čisti lim	oksidirani lim
0,1 . . . 0,3	5	0,5	400	800
0,4 . . . 1,0	6 . . . 8	1	500	1000
		2	800	1500
1,2 . . . 2,0	8 . . . 10	3	1200	1900
		4	1500	2400
3	10 . . . 12	5	1900	2900
		6	2300	3500
iznad 3	12 . . . 15	6	2300	3500

Zavarivanje plamenom

Žice za zavarivanje plamenom (JUS C.H3.051 – 1981)

Za zavarivanje plamenom čelika upotrebljavamo čelične žice koje se označuju dvostrukom oznakom i to:

- općom oznakom P– i
- dodatnom oznakom s tri simbola koji označuju mehanička svojstva žice i to (redom): vlačnu čvrstoću R_m u N/mm^2 , postotno produljenje A u % i prekidnu energiju (udarnu žilavost) KV u J:

Čvrstoća R_m N/mm ²	Simbol	Postotno produljenje A %	Simbol	Prekidna energija KV J	Simbol
–	O	–	O	–	–
340	Z	14	Z	30	Z
340	Y	–	–	–	–
400	1	14	1	30	1
430	2	18	2	60	2
470	3	22	3	90	3
510	4	26	4	120	4
550	5	30	5	150	5
590	6	–	–	–	–

Primjer:

svojstva žice: $R_m = 480 N/mm^2$, $A = 29\%$, $KV = 100 J$
oznaka: P-343

Promjeri žica: (1,0) (1,6) 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3 mm.
Duljina žica: u komadima od 1000 mm, u svicima do mase 40 kg.

Zavarivanje acetilenskim plamenom

Debljina predmeta mm	Kisik		Acetilen potrošak l/h	Brzina zavarivanja m/h	
	pretlak bar	potrošak l/h		čelik	lake kov.
0,2...0,5	0,5	50	50	10...12	12...15
0,5...1	0,75	85	75	7...10	8...12
1...2	1	165	150	6...8	7...9
2...4	1,25	325	300	5...7	4...8
4...6	1,5	500	475	4...6	4...6
6...9	1,75	750	700	3...5	2...3
9...14	1,75	1200	1100	2...3,5	1...2
14...20	2	1700	1600	1,5...2,5	0,6...1,2
20...30	2,25	2500	2350	1...2	–
30...50	2,25	3500	3300	0,7...0,9	–
50...70	3	4750	4500	0,5...0,7	–
70...100	3,5	7350	7000	0,3...0,5	–

Zavarivanje vodikovim plamenom

Debljina predmeta mm	Kisik		Potrošak vodika l/h	Brzina zavarivanja m/h
	pretlak bar	potrošak l/h		
0,2...0,5	0,75	35	140	7...10
0,5...1	1	75	300	6...9
1...2	1	150	675	4...7
2...4	1,25	300	1350	3...5
4...6	1,5	500	2250	2...3,5

Zavarivanje plamenom rasvjetnog plina

Debljina predmeta mm	Kisik		Potrošak ras- vjetnog plina l/h	Brzina zavarivanja m/h
	pretlak bar	potrošak l/h		
0,2...0,5	1	80	200	4...7
0,5...1	1,25	130	350	2...5
1...2	1,5	270	600	1,5...3
2...3,5	1,75	500	1200	1...2

Rezanje kovina

Rezanje kovina plamenom («autogeno») upotrebljava se za čelik, pri čemu se iskoristava toplina izgaranja (oksidacijska) željeza. Upotrebljavamo gotovo sam kisik.

Posebno se lako plamenom reže nelegirani ili slabo legirani meki čelik $C < 0,3\%$, pri tvrdem čeliku $C > 0,5\%$ je rezanjem plamenom moguće jedino dodatnim zagrijavanjem. Rezanje plamenom legiranih čelika ovisno je od pojedinih legiranih komponenata.

Različiti posebni postupci rezanja plamenom omogućuju rezanje i u slučajevima kad običan postupak nije upotrebljiv.

Rezanje plamenom nelegiranih čelika

Debljina predmeta mm	Kisik		Potrošak acetilena l/m	Brzina rezanja m/h
	pretlak bar	potrošak l/m		
5	2,0	65	13,0	22
10	3,0	120	20,0	19,5
20	4,0	215	22,5	16
50	5,0	580	57,0	11
100	7,5	1240	111,0	7,5
150	9,0	2180	155,0	6
200	10,0	3125	190,0	5
300	13,0	5650	258,0	3,75

Sivi lijev, bakar i lake kovine režemo protalijavanjem plamenom ili elektrodom (rezne površine nisu osobito čiste).

Elektrolučno zavarivanje

Za elektrozavarivanje čelika upotrebljavaju se čelične elektrode. S obzirom na vanjštinu razlikujemo

- gole elektrode,
- elektrode s jezgrom,
- elektrode s plaštem (obložene).

Obložene elektrode za ručno zavarivanje nelegiranih ili slabo legiranih čelika s malo ugljika (JUS C.H3.011 - 1982)

- Oznaku elektrode sastavljaju:
- opća oznaka,
 - oznaka mehaničkih svojstava,
 - oznaka tipa plašta,
 - oznaka iskoristivosti,
 - oznaka položaja zavarivanja,
 - oznaka vrste struje.

1) Opća oznaka elektrode je: E

2) Oznaka mehaničkih svojstava:

Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Postotno produljenje A % min.	Temperatura koja odgovara udarnoj žilavosti KV = 28 J °C	Oznaka
430...510	-	-	430
	22	+20	431
	22	0	432
	24	-20	433
	24	-30	434
510...610	24	-40	435
	-	-	510
	18	+20	511
	18	0	512
	20	-20	513
510...610	20	-30	514
	20	-40	515

3) Oznaka vrste plašta

Vrsta plašta	Oznaka	Vrsta plašta	Oznaka
kiseo	A	oksidan	O
kiseo - rutilan	AR	rutilan - osrednje debeo (TiO ₂)	R
bazičan	B	rutilan - debeo	RR
celulozan	C	ostale vrste	S

4) Iskoristivost (JUS C.H3.020 - 1982) je omjer kovinske mase rastaljene dodatne tvari i ukupne mase (jezgre i plašta) ispitivane elektrode. Oznaka iskoristivosti navodi se samo u slučaju, ako je njena vrijednost veća od 105% i to uvijek zaokruženo na pune desetice, tj.:

110 - 120 - 130 - 140 itd.

5) Oznaka položaja zavarivanja:

Položaj pri zavarivanju	Oznaka
svi položaji	1
svi položaji osim okomito prema dolje	2
svi sučelni i kutni položaji u horizontalnom i horizontalno okomitom položaju	3
svi sučelni i kutni spojevi u horizontalnom položaju	4
svi položaji u koritastom položaju	5

6) Oznaka vrste struje

Istosmjerna struja preporučeni polaritet	Izmjenična struja nazivni napon praznog hoda	Oznaka
+		0
+ ili -	50 V	1
-		2
+		3
+ ili -	70 V	4
-		5
+		6
+ ili -	90 V	7
-		8
+		9

Tablica vrijedi za elektrode promjera $d \geq 2,5$ mm. Pri manjim je promjerima potreban viši napon praznog hoda.

7) Za bazične elektrode (B) označuje se i količina vodika u čistoj kovini zavara:

Količina vodika u ml u 100 g čiste kovine zavara ml/100 g	Oznaka
3...5	H
1...3	2 H
1	3 H

P r i m j e r i z a oznake elektroda:

- Oplaštena elektroda s rutilnim plaštem osrednje debljine, vlačne čvrstoće R_m iznad 500 N/mm², postot. produljenja A iznad 23% i udarne žilavosti KV iznad 71 J pri +20 °C i iznad 20 J pri -20 °C, za zavarivanje u svim položajima izmjeničnom strujom i s naponom praznog hoda 50 V ili istosmjernom strujom na pozitivnom polu:

oznaka elektrode: E 43 2 R 13

- Oplaštena elektroda s bazičnim plaštem, vlačne čvrstoće R_m iznad 560 N/mm², postot. produljenja A iznad 22% i udarne žilavosti KV iznad 47 J pri -20 °C, iskoristivosti 158%, za zavarivanje u svim položajima osim okomito prema dolje pomoću istosmjerne struje, uz količinu vodika u čistoj kovini zavara 1...2 ml/100 g:

oznaka elektrode: E 51 3 B 160 20 2H

Elektrode s plaštem za ručno zavarivanje sivog lijeva
(JUS C.H3.016 – 1984)

Oznaku elektroda tvore:

- opća oznaka
- oznaka kemijskog sastava
- oznaka vrste plašta
- oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje.

1) Opća oznaka elektrode: E.

2) Oznaka kemijskog sastava:

Vrsta elektrode skupina	Karakteristični sastav* u %	Vrsta slitine čiste kovine zavara	Oznaka elektrode
na osnovi željeza	Fe + 3,4 C; 2,9 Si	sivi lijev	FeC 1
	Fe + 0,15 C; 0,03 Si	sivi lijev, legiran iz plašta čelik	FeC 2 Fe
na osnovi nikla	Fe + 53 Ni; 4,0 Si	slitina nikla i željeza	NiFe
	55 Ni; 40 Cu; 4,5 Fe	slitina nikla i bakra	NiCu 1
	65 Ni; 30 Cu; 4,5 Fe		NiCu 2
	85 Ni; 8 Fe; 4,0 Si	nikal	Ni
na osnovi bakra	Cu + 10 Al	aluminijiska bronca	CuAl
	Cu + 5 Sn	kositrena bronca	CuSn 1
	Cu + 8 Sn		CuSn 2

* Navedene su zaokružene prosječne vrijednosti karakterističnih sastavina. Podroban kemijski sastav svih navedenih elektroda vidljiv je u standardu JUS C.H3.016 – 1984.

3) Oznaka vrste plašta:

Vrsta plašta	Oznaka
bazičan	B
grafitan	G
bazičan s grafitom	BG
na osnovi soli i celuloze	S
ostale vrste	V

4) Oznaka položaja zavarivanja i vrsta struje

Ovdje vrijede jednake oznake kao kod elektroda za zavarivanje čelika – vidi str. 627 (pod 5 i 6).

Primjer oznake elektrode:

Elektroda s plaštem sa čistom kovinom zavara FeNi (55/45%), s grafitnim plaštem, samo za horizontalni položaj zavarivanja istosmjernom strujom na pozitivnom polu ili izmjeničnom strujom pri naponu praznog hoda 75 V:

oznaka elektrode: E (NiFe) G 49

Potrebna jakost struje

Gole elektrode, elektrode s tankim plaštem i elektrode s jezgrom		Elektrode s debelim plaštem	
promjer mm	jakost struje A	promjer mm	jakost struje A
2	50... 70	2	50... 80
3	90... 130	2,5	60... 110
4	140... 190	3,25	90... 160
5	190... 250	4	130... 200
6	240... 330	5	180... 260
		6	230... 350

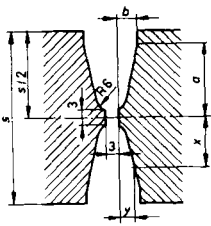
Priprema čelika za zavarivanje (neki slučajevi)

Slika	Debljina lima s mm	Razmak limova b mm	Promjeri elektrode mm	
			gole, s tankim plaštem, s jezgrom	s debelim plaštem
	1	0	2	2
	1,5	0,5	2	2
	2	1	2	2,5
	3	2	3	3,25
	4	2	4	4
	5	1	4	3,25, 4
	6	1,5	4, 5	3,25, 4
	8	2	4, 5	3,25, 4, 5
	10	2	4, 5	3,25, 4, 5
	12	2	4, 5	3,25, 4, 5
	14	2	4, 5	4, 5, 6
	16	2	4, 5	4, 5, 6
	12	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	14	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	16	1,5	4, 5	3,25, 4, 5
	18	1,5	4, 5	4, 5, 6
	20	2	4, 5	4, 5, 6
	25	2	4, 5	-

Priprema rubova za zavarivanje čelika pri većim debljinama

Skica	Debljina lima s mm	Dubina otvora		Kut otvora	
		a mm	b mm	α °	β °
	50	30	20	60	60
	60	36	24	60	60
	70	42	28	50	60
	80	48	32	50	60
	90	54	36	50	50
	100	60	40	50	50
	110	66	44	45	50
	120	72	48	45	50

Priprema rubova za zavarivanje za dvostruki U-zavar kod debelih ploča:



Debljina ploča <i>s</i> mm	Otvor utora		Oblik utora	
	<i>a</i> mm	<i>b</i> mm	<i>x</i> mm	<i>y</i> mm
140	60	16	20	8
			30	10
			40	12
			50	14
160	70	18	60	16
			70*	18*

Samo kod debljine ploča *s* = 160 mm.

Priprema čeličnih ploča za čelične konstrukcije

<i>s</i> mm	<i>a</i> mm	<i>s</i> mm	<i>a</i> mm	α°	<i>s</i> mm	<i>a</i> mm	α°	β°
5	2	8	2...3	30	15	3	30	30
6	2...3	10	3	35	18	3	30	35
		12	3	35				

Deformacije konstrukcija zbog skupljanja zavara

Uzdužna deformacija

Zavar Δ mm	Kut deform. α°
5	1
7	3
9	7
12,5	13

Izravnavanje deformacija

Upotrebljivost najznačajnijih postupka zavarivanja i rezanja plamenom

Način zavarivanja	Debljina mm		
	za materijal		
	čelik	lake kovine	ostale kovine
čelno iskrenjem	(0,2...40000 mm ²)	(do 10000 mm ²)	Cu, mjed (do 500 mm ²)
točkasto	2 × 12	2 × 5	Cu slit. 2 × 2
kolutno	0,1...2,5	0,1...1,5	Cu slit. 0,1...1,2
plamenom	1...40	2...40	Cu 2...30,
elektrolučno			
- s kovinskom elektr.	1...40 (...100)	2...25	Cu 2...30
- s ugljenom elektr.	1...40	2...12	Cu 2...15, Pb 2...8
- u argonu	-	1...20	-
- u vodiku	1...40	-	Cu slit. 1...10
- pod praškom	5...100	-	-
rezanje plamenom	0,5...500 (...1000)	-	-

Zavarivanje plasta

Od plasta prikladni su za zavarivanje termoplasti i elasti, dok se duroplasti ne mogu zavarivati.

Plasti se zavaruju vrućim plinom (zrakom, dušikom), vrućim alatom, visokofrekventnom strujom, trenjem itd.

LEMLJENJE

Lemljenje (lotanje) je spajanje kovinskih dijelova pomoću lema kao dodatnog materijala. Pri lemljenju se lem rastali, dok se spajani dijelovi samo zagriju: - do temperature pod talištem lema uz neposredno zagrijavanje lema (lemilom ili plamenikom), - do temperature nad talištem lema pri posrednom zagrijavanju lema (umetnutog) putem ugrijanih spajanih dijelova.

Dodirne plohe spajanih dijelova čiste se mehanički, kemijski i pomoćnim sredstvima.

Meko lemljenje

Za meko lemljenje čelika i neželjeznih kovina upotrebljavaju se:

- meki lem (vidi str. 414),
- pomoćna sredstva: cinčani klorid ZnCl₂ (sa solnom kiselinom HCl), salmijak NH₄Cl, kolofonij.

Tvrdo lemljenje

Za tvrdo lemljenje čelika i neželjeznih kovina potrebni su:

- tvrdi lem, bakreni ili mjedeni (str. 414) ili srebrni lem (str. 415),
- pomoćna sredstva: borni spojevi (npr. boraks Na₂B₄O₇ · 10 H₂O) s dodacima fluorida, fosfata, silikata i sl.

Za lemljenje aluminija upotrebljavaju se posebni lemovi (str. 415), dok su talila fluoridi i kloridi lakih kovina (Li, Be).

LJEPLJENJE KOVINA

Ljepila za ljepljenje kovina:

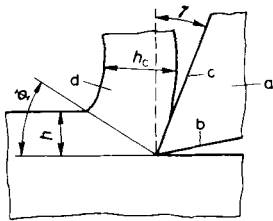
- anorganska ljepila (mineralnih, keramičkih ili staklastih sastavina) su postojanija pri višim temperaturama, ali su krhkija,
- organska ljepila (od naravnih ili umjetnih spojeva ugljikovodika, npr. epoksidne smole) vezuju fizikalno ili kemijski, žilavi su, no postojana su samo pri nižim temperaturama (do oko 150 °C).

Jednokomponentna ljepila su pripremljena kao pasta s prikladnim rastapalom, koje pri ljepljenju ishlapi, ili su suho umetnuta među spajanje plohe te lijepe pri dovođenju topline.

Pri dvokomponentnim ljepilima djeluje na ljepilo (kao pastu ili tekućinu) tik pred ljepljenjem primješani otvrdivač koji izaziva polimerizaciju ljepila, a time i njegovo očvršćivanje.

OBRADA KOVINA ODVAJANJEM ČESTICA

Osnovi



a - alat
b - stražnja ploha
c - prednja ploha
d - strugotina

Pri obradi materijala odvajanjem čestica nastaje strugotina debljine h_c , koja je veća od debljine rezanja h .

Faktor sabijanja iznosi

$$\Theta_h = h_c/h = \cos(\Phi - \gamma)/\sin \varphi > 1$$

gdje znače: φ - kut rezanja i γ - prednji kut alata.

$$\varphi = \arctan [\cos \gamma / (\Theta_h - \sin \gamma)]$$

Za $\gamma = 0^\circ$ je $\varphi = \arctan [1/\Theta_h]$

Faktor sabijanja ovisi o brzini rezanja v_c .

*

Strugotina klizi po prednjoj plohi brzinom v_r , koja ovisi o brzini rezanja v_c , kutu rezanja φ i prednjem kutu γ

$$v_r = v_c \sin \varphi / \cos(\varphi - \gamma) = v_c / \Theta_h$$

Brzina deformacije materijala u ravni rezanja iznosi

$$v_s = v_c \cos \gamma / \cos(\varphi - \gamma)$$

Pri obradi žilavih i mekih materijala redovno nastaje neprekinuta (tekuća) strugotina, dok je strugotina pri obradi krhkih materijala izlomljena i rastrgana. Neprekinuta strugotina nastaje ako materijal može postići neki minimalni stupanj deformacije.

*

Najveći se dio energije utrošen na oštrici alata za odvajanje strugotine pretvara u toplinu. Toplina nastaje:

- zbog kidanja atomskih veza u obrađivanom materijalu (u području rezanja),
- zbog trenja između alata (na stražnjoj plohi) i izratka te između alata (na prednjoj plohi) i strugotine.

Nastali toplinski tok iznosi

$$\Phi = A v_c k_c$$

gdje su: A - presjek odvojenog materijala; v_c - brzina rezanja; k_c - specifična sila rezanja (sila po jedinici površine).

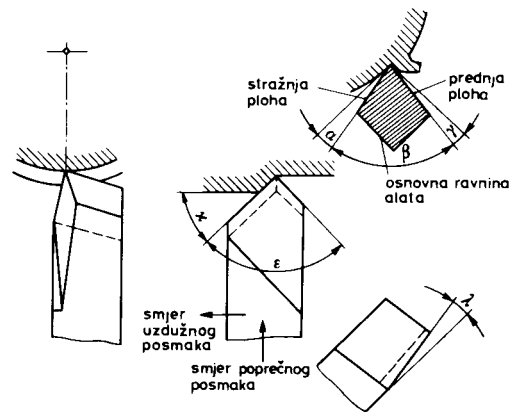
Toplinski tok koji zagrijava strugotinu iznosi

$$\Phi' = \Delta T \cdot A v_c \rho c < \Phi$$

gdje su: $\Delta T = (T_2 - T_1)$ - temperaturna razlika između temperature strugotine T_2 i temperature materijala T_1 , ρ - gustoća; c - spec. topl. kapac. materijala.

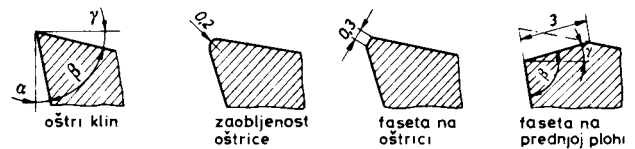
Geometrija oštrice

Kutovi alata

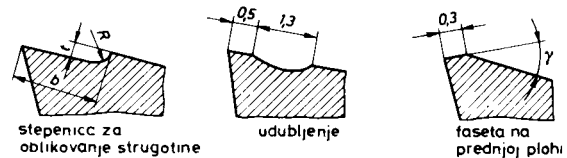


α - stražnji (slobodni) kut γ - prednji (radni) kut ϵ - vršni kut
 β - kut klina κ - postavni kut λ - kut nagiba

Oblici oštrice

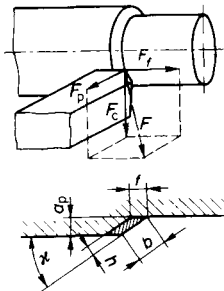


Pojačanje klina zaobljenjem, fasetom na oštrici ili fasetom na prednjoj plohi



Odođenje strugotine olakšavamo stepenicom, udubljenjem ili fasetom na prednjoj plohi

Tokarenje



Sila rezanja alata F , koja mora svladati otpor rezanja materijala, rastavlja se u tri komponente:

- posmičnu silu F_t
- odzivnu silu F_p
- glavnu silu F_c

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_p^2 + F_c^2}$$

Glavna sila F_c iznosi

$$F_c = k_{c1 \times 1} b h (h_s/h)^{c_c}$$

$$b = a / \sin \alpha$$

$$h = f \sin \alpha$$

gdje znače: $k_{c1 \times 1}$ – specifičnu silu rezanja, b – širinu rezanja, h – geometrijsku debljinu strugotine, h_s – standardnu debljinu strugotine 1 mm, a_p – dubinu rezanja, f – posmak, α – postavni kut; c_c eksponent debljine, ovisan o materijalu.

Specifična sila rezanja $k_{c1 \times 1}$ i eksponent c_c

Obrađivani materijal	$k_{c1 \times 1}$ N/mm ²	c_c	Obrađivani materijal	$k_{c1 \times 1}$ N/mm ²	c_c
čelik					
Č.0545	1990	0,26	sivi lijev		
Č.0645	2110	0,17	SL 25	1160	0,26
Č.0745	2260	0,30	tvrdi lijev	2060	0,19
Č.1531	2220	0,14	brona	1780	0,17
Č.1731	2130	0,18			
Č.4320	2100	0,26	mjed	780	0,18
Č.5421	2260	0,30	Al – slitine	640	0,25
Č.4731	2240	0,21	Mg – slitine	280	0,19
Č.4732	2500	0,26			

Za određivanje posmične sile F_t i odzivne sile F_p često upotrebljavamo omjer koji vredi za postavni kut $\alpha = 45^\circ$:

$$F_t : F_p : F_c = 1 : 2 : 5$$

Uz drukčiji postavni kut α' , glavna sila F_c' iznosi

$$F_c' = F_c \left(\frac{\sin 45^\circ}{\sin \alpha'} \right)^{c_c}$$

Kutovi oštice i brzine rezanja pri tokarenju čelika alatom od tvrdog metala

Obrađivani materijal	vrsta	čvrstoća N/mm ²	Vrsta reza ¹⁾	Nož			Brzina rezanja v_{c240} ⁴⁾ m/min				
				tvrdi me- tal ²⁾	prednji kut i kut nagiba (°) ³⁾		pri posmaku f (mm/okr.)				
					γ	γ_f	λ	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
čelični lijev		< 520	m P 10	8	–	0...4	135	110	95	80	–
			v P 30	6	–5	5...10	–	–	40	32	27
			m P 10	6	–	0...4	110	90	75	65	–
520...700			v P 30	6	–5	5...10	–	–	30	25	22
			m P 10	6	–	0...4	70	60	50	45	–
			v P 30	6	–7	5...10	–	–	20	17	14
> 700			m P 10	6	–	0...4	–	–	–	–	–
			v P 30	6	–7	5...10	–	–	–	–	–
meki čelik		< 500	m P 10	15	–	0...4	250	210	180	150	–
			v P 30	12	–3	5...10	–	–	85	70	60
polutvrđi čelik		500...700	m P 10	12	–	0...4	220	185	155	130	–
			v P 30	10	–3	5...10	–	–	65	55	45
tvrdi čelik		700...1000	m P 10	10	–	4...6	165	135	110	85	–
			v P 30	8	–3	5...10	–	–	45	35	25
legirani čelik		1000...1400	m P 10	6	0	0...4	85	65	55	45	–
			v P 30	6	–7	5...10	–	–	22	18	14
1400...1800			m K 10	4	–3	0...4	–	30	25	15	–
			s K 10	4	–7	5...10	–	–	–	–	–
Mn tvrdi čelični lijev		–	m K 10	0	–	0...4	–	18	15	–	–
			s K 10	0	–5	5...10	–	–	–	–	–
Mn tvrdi čelik kovani		–	m P 20	4	–	0...4	–	18	15	–	–
			s P 20	4	–5	5...10	–	–	–	–	–
nerđajući čelik lijevani		600...700	m K 10	6	–	0...4	30	25	20	15	–
			s K 10	6	–5	5...10	–	–	–	–	–
nerđajući čelik kovani		600...700	m P 10	12	–	0...4	80	65	50	45	–
			s P 20	12	0	5...10	–	40	30	25	–
alatni čelik		1500...1800	m K 10	0	–	3...5	23	18	15	12	–
			s K 10	0	–5	3...5	–	–	–	–	–

¹⁾ m – mali presjek, neprekinuti rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – srednji presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, prekinuti rez s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

²⁾ Vrste tvrdih metala – vidi str. 390.

³⁾ Kutovi na alatu – vidi str. 633. – γ_f je kut fasete na prednjoj plohi, široke od 0,5 do dva posmaka. $\alpha = 8^\circ$. Kut fasete na stražnjoj plohi $\alpha_f = 6^\circ$.

⁴⁾ v_{c240} – brzina rezanja za postojanost $T = 240$ min. Za drukčiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1,26 : 1 : 0,89$$

Kutovi oštrice i brzine rezanja pri tokarenju lijevanog željeza i neželjeznih kovina alatom od tvrdog metala

Obradivani materijal		Vrsta reza ¹⁾	Nož				Brzina rezanja v_c ⁴⁾ m/min					
vrsta	tvrdoća HB		tvrđi metal ²⁾	stražnji, prednji i nagibni kut (°) ³⁾				pri posmaku f (mm/okr.)				
				α	α_f	γ	λ	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
sivi lijev	...200	m v	K 20 K 20	7 7	5 5	6 6	0...4 5...7	75	70	65	50	45
	200...250	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 3	0...4 5...7	45	40	35	30	27
sivi lijev legirani	250...400	m v	K 10 K 10	6 6	4 4	0 0	0...4 5...7	23	21	20	18	16
bijeli temperovani lijev	-	m v	K 10 P 20	7 7	5 5	6 0	0...4 5...7	65	55	45	40	-
crni temperovani lijev	-	m v	K 10 K 10	7 7	5 5	6 0	0...4 5...7	45	40	35	28	-
bakar, mjed	35...40	m s	K 20	12	10	≈ 15	-5	150...300	120...200			
mjed, bronca	45...85	m s	K 20	10	8	≈ 12	0	150...400	120...250			
	85...200	m s	K 20	8	6	≈ 8	0...3	200...400	150...250			
aluminij, Al-slitine	...60	m s	K 20	10	8	≈ 28	0	...2300	...1500			
Al-slitine	60...110	m s	K 20 K 10	8	6	≈ 16	0	250...700	150...500			
Al-slitine < 13,5% Si	-	m s	K 10	8	6	≈ 11	0	100...500	80...150			
Al-slitine > 13,5% Si	-	m s	K 05	8	6	≈ 8	0	70...120	50...90			

¹⁾ m – mali presjek, jednoliki rez s dubinom rezanja do 3 mm i posmakom do 0,3 mm; s – osrednji presjek, mali prekidi reza s dubinom rezanja do 6 mm i posmakom do 0,6 mm; v – veliki presjek, tvrda mjesta ili prekidi reza s dubinom rezanja do 10 mm i posmakom do 1,5 mm.

²⁾ Vrste tvrdih metala – vidi str. 390.

³⁾ Kutovi oštrice noža – vidi str. 633. – α_f je kut fasete na stražnjoj plohi oštrice. (Faseta pod kutom γ_f na prednjoj plohi nije potrebna.)

⁴⁾ Navedene brzine rezanja v_c vrijede za sivi i temperovani lijev kao brzine rezanja v_{c240} pri postojanosti $T = 240$ min. Za drukčiju postojanost alata vrijede ovi omjeri brzina rezanja:

$$v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} = 1,5 : 1 : 0,85$$

Blanjanje i dubljenje

Pri **blanjanju** se giba stol s izratkom pravocrtno prema suprtu s nožem; pri **dubljenju** (horizontalnom ili okomitom) giba se suprt s nožem pravocrtno prema stolu s izratkom. Pri gibanju stola odn. noža za dubljenje razlikujemo:

- radni hod pri gibanju napred – nož reže
- povratni hod pri gibanju natrag – nož ne reže.

Prosječna brzina gibanja stola odn. noža za dubljenje iznosi

$$v_m = 2 v_d v_p / (v_d + v_p)$$

gdje su: v_d – brzina rezanja pri radnom hodu, v_p – brzina pri povratnom hodu. Glavna sila rezanja (pri blanjanju ili dubljenju) iznosi

$$F_c = k_{c1 \times 1} b (h_s/h)^{c_c} \quad b = a/\sin \alpha \quad h = f \sin \alpha$$

gdje su: $k_{c1 \times 1}$ – specifična sila rezanja, b – širina rezanja, h – debljina rezanja, h_s – standardna debljina rezanja 1 mm, a – dubina rezanja, f – posmak (pri dvojnem hodu), α – postavni kut, c_c – eksponent debljine ovisan o materijalu.

Za specifičnu silu rezanja $k_{c1 \times 1}$ i eksponent c_c valja odabrati iste vrijednosti kao pri tokarenju (vidi str. 634).

Kutovi na noževima od tvrdog metala ili brzoreznog čelika i brzine rezanja pri blanjanju ili dubljenju čelika i sivog lijeva

Obradivani materijal	Nož			Brzina rezanja v_{c240} m/min ³⁾				
	vrsta	čvrstoća R_m N/mm ² tvrdoća HB	rezn ¹⁾ materijal	kutovi (°) ²⁾		pri posm. f mm		
				γ	γ_f	0,5	1,0	1,6
meki čelik	400...500	P 40 h. j.	15...20 12	0...-5 -	60 28	48 23	40 20	
								polutvrđi čelik	500...800	P 40 h. j.	12...15 8...10	-5...-10 -	55 21	45 17	38 15
tvrđi čelik	750...900	P 40 h. j.	10...20 8	0...-5 -	40 14	35 11	30 10	
								sivi lijev	140...180 HB	K 20 h. j.	15...20 4	0...-5 -	50 25	40 18	30 14
sivi lijev	200...220 HB	K 20 h. j.	10...15 4	-5...-10 -	55 32	45 26	35 24	

¹⁾ Vrste tvrdih metala (P 40, K 20) – vidi str. 390! »h. j.« brzorezni čelik vrhunskog kvaliteta – vidi str. 383!

²⁾ Kut nagiba $\lambda = -6...-15^\circ$

³⁾ v_{c240} je brzina rezanja pri postojanosti alata $T = 240$ min. Uz drugu postojanost alata vrijede odnosi brzina rezanja:

$$\begin{aligned} \text{pri obradi čelika} \quad v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} &= 1,26 : 1 : 0,84 \\ \text{pri obradi sivog lijeva} \quad v_{c60} : v_{c240} : v_{c480} &= 1,5 : 1 : 0,85 \end{aligned}$$

Bušenje i razvrtavanje

Vijačno svrdlo* reže s dvije oštrice. Prostorna krivulja po kojoj su smještene oštrice je zavojnica.

Kut uspona zavojnice i vršni kut svrdla ovise o materijalu koji treba obraditi.

Obradivani materijal	Kut uspona $\lambda(^{\circ})$	Vršni kut $\varphi(^{\circ})$
čelik – čvrstoće $R_m < 700 \text{ N/mm}^2$	30	118
– čvrstoće $R_m > 700 \text{ N/mm}^2$	25	118
– za poboljšanje, legirani	35...40	118
sivi lijev	30	118
bakar, bronca	40	140
mjed	18...20	130
Al – slitine	40...45	140
Mg – slitine	40...45	100

Presjek odreska

- za jednu oštricu $A_1 = df_d/2 = df/4$
- za obje oštrici $A = df_z = df/2$

pri čem su: d – promjer svrdla, f_z – posmak za oštricu, f – posmak (za 1 okretaj svrdla).

Sila rezanja za oštrice

$$F_{cz} = df_z k_c/2 = df k_c/4$$

gdje je k_c specifična sila rezanja (za jedinicu presjeka).

Obradivani materijal	$k_c \text{ (N/mm}^2\text{)}$					
	pri $f \text{ (mm/okr.)}$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
čelik $R_m > 900 \text{ N/mm}^2$	5000	4600	4300	4000	3750	3500
Č.0745	4000	3700	3450	3200	3000	2850
Č.0645	3700	3450	3200	3000	2850	2700
Č.0545	3300	3050	2850	2650	2500	2350
Č.0245	2700	2450	2250	2050	1900	1750
sivi lijev, tvrdi	2100	1900	1700	1500	1350	1200
meki	1700	1500	1300	1150	1000	900
bakar, bronca	1800	1600	1400	1250	1100	1000
Al – slitine	1350	1150	1000	850	750	650
Mg – slitine	900	750	650	550	475	400

* Naziv »spiralno« svrdlo, kako se često naziva, nije ispravan.

Bušenje svrdlima od brzoreznog čelika

Obradivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer svrdla d (mm)					
			6,3	10	16	25	40	63
čelik 500 N/mm ²	35,5	n okr./min	1800	1120	710	450	280	180
		f mm/okr.	0,16	0,20	0,25	0,32	0,40	0,50
čelik 700 N/mm ²	22,4	n okr./min	1120	710	450	280	180	112
		f mm/okr.	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25	0,32
legirani čelik	11,2	n okr./min	560	355	224	140	90	56
		f mm/okr.	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25
sivi lijev do SL 20	28,0	n okr./min	1400	900	560	355	224	140
		f mm/okr.	0,18	0,22	0,28	0,36	0,45	0,56
sivi lijev do SL 25	18,0	n okr./min	900	560	355	224	140	90
		f mm/okr.	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,45

Razvrtavanje razvrtalima od brzoreznog čelika

Obradivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Brzina vrtnje n i posmak f	Promjer razvrtala* d (mm)					
			6,3	10	16	25	40	63
čelik do 700 N/mm ²	7,0	n okr./min	355	224	140	90	56	35,5
		f mm/okr.	0,45	0,56	0,71	0,90	1,10	1,40
čelik iznad 700 N/mm ²	2,24	n okr./min	112	71	45	28	18	11,2
		f mm/okr.	0,20	0,25	0,31	0,40	0,50	0,63
sivi lijev do 200 HB	11,2	n okr./min	560	355	224	140	90	56
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40
sivi lijev iznad 200 HB	5,6	n okr./min	280	180	112	71	45	28
		f mm/okr.	0,45	0,56	0,71	0,90	1,10	1,40
bakar i bakrene slitine	14,0	n okr./min	710	450	280	180	112	71
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40
lake kovine	22,5	n okr./min	1120	710	450	280	180	112
		f mm/okr.	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40

* Odstupanje od promjera: –0,2 mm za promjere 6,3 i 10 mm
–0,3 mm za promjere 16 i 25 mm
–0,4 mm za promjere 40 i 63 mm

Rezanje navoja na tokarilicama (i revolverskim tokarilicama) alatom od brzoreznog čelika

Obradivani materijal	Brzina rezanja v_c (m/min)					
	ureznic i narez- nice	automatska navojna glava				tokarski ili navoj- nož
		korak navoja P (mm)				
	6...4,5	4...3	2,5...1,75	1,5...1		
sivi lijev	2...5	2...3	2,5...4	3...4,5	4...5	9...12
temperovani lijev	2...5	3...6	4...8	6...10	8...12	9...12
čelični lijev	2...5	1,5...3	2...4	3...5	4...6	9...12
čelik						
340 N/mm ²	3...9	4...5	4...8	5...10	6...12	14...18
420 N/mm ²	3...7	4...5	4...8	5...10	6...12	12...16
500 N/mm ²	2...5	2...3	3...4	4...5	4...6	10...14
600 N/mm ²	2...4	2...3	3...4	4...5	4...6	9...12
CrNi, CrMo	1...3	1...2	1...3	1,5...3,5	2...4	8...10
bronca	2...5	2...3,5	2,5...4	3...4,5	3,5...5	6...8
crveni lijev	3...8	4...6	5...8	6...9	8...12	12...14
mjed	4...12	4...8	6...10	8...12	10...20	25...34
Al-sliuine	20	25	25	25	25	30...40
Mg-sliuine	30	30	40	40	40	40

Piljenje kovina

Piljenje okvirnim pilama

Čvrstoća obradivanog materijala N/mm ²	Brzina rezanja v_c m/min		Broj hodova (dvojnih) u min		
	srednja	najveća	pri hodu pile (mm)		
			140	150	160
... 700	30	47	108	98	93
700... 1000	20	32	73	67	63
1000... 1300	14	22	50	47	43

Piljenje tračnim pilama

Obradivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min	Obradivani materijal	Brzina rezanja v_c m/min
sivi lijev*	20...30	bakar	80
konstrukcijski čelik	60	mjed, crveni lijev	100
alatni čelik	20...30	lake kovine	400...1200

* Priljevci s grubom, tvrdom korom.

Piljenje kružnim pilama

Obradivani materijal	Hladno rezanje		Vruće rezanje	
	brzina rezanja v_c m/min	brzina posmaka v_f mm/min	brzina rezanja v_c m/min	brzina posmaka v_f mm/min
sivi lijev	15...45	20...55		
čelik	30...55	35...60		
mjed, bronca	100...200	100...300	...6000	50...250
lake kovine	400...600	100...300		

Glodanje

Glodanje povezuje kružno gibanje glodala (brzina rezanja) i pravocrtno gibanje izratka (posmak). Glodanje može biti obodno ili čeono.

Pri obodnom glodanju razlikujemo protusmjerno glodanje (glodanje protivno smjeru posmaka) i istosmjerno glodanje (glodanje u smjeru posmaka).

Brzina rezanja iznosi $v_c = d \pi n$

gdje su: d – promjer glodala, n – brzina vrtnje trna glodala.

Posmak za svaki zubac glodala

$$f_z = f/z_f n$$

gdje znače: f – brzinu posmaka, z_f – broj zubaca glodala.

Prosječna glavna sila pri glodanju

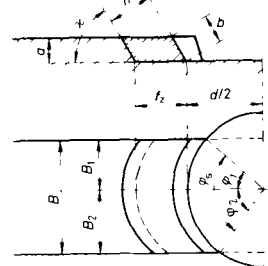
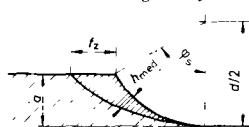
$$F_{z,med} = b h_{med} k_{c1 \times 1} (h_s/h_{med})^{z_1} \cdot z_i$$

gdje su: $k_{c1 \times 1}$ – specifična sila rezanja, b – geometrijska širina strugotine, h_{med} – prosječna geometrijska debljina strugotine, h_s – standardna debljina strugotine 1 mm, z – eksponent debljine, ovisan o materijalu, z_i – prosječni broj zubiju glodala koji režu u zoni kuta $\hat{\varphi}_s$ (rad).

$$z_i = z_f \hat{\varphi}_s / 2\pi \quad \hat{\varphi}_s = \pi / 180^\circ \cdot \varphi_s^\circ$$

Čeono glodanje

Obodno glodanje



$$b = B$$

$$h_{med} = 2 a s_z / \hat{\varphi}_s d$$

$$\varphi_s = \arccos(1 - 2a/d)$$

a – dubina glodanja

d – promjer glodala

B – širina obradivane plohe

$$b = a / \sin \kappa$$

$$h_{med} = s_z \sin \kappa / d \cdot (B_1 / \hat{\varphi}_1 + B_2 / \hat{\varphi}_2)$$

$$\varphi_1 = \arcsin(2B_1/d) \quad \varphi_2 = \arcsin(2B_2/d)$$

Obradivani materijal	$k_{c1 \times 1}$ N/mm ²	c_c	Obradivani materijal	$k_{c1 \times 1}$ N/mm ²	c_c
čelik Č.0545	2050	0,26	čelik Č.4320	2200	0,26
Č.0645	2200	0,17	Č.5421	2300	0,30
Č.0745	2200	0,20	Č.4731	2300	0,21
Č.1531	2300	0,14	Č.4732	2600	0,26
Č.1731	2200	0,18	sivi lijev	1050	0,26
			tvrdi lijev	2100	0,19

Smjernice za broj zubaca na glodalu od brzoreznog čelika (za obradu normalnih materijala)

Glodalo	Broj zubaca glodala											
	za promjer glodala (mm)											
	20	30	40	50	60	75	90	110	130	150	200	
za duge rupe	2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
vretenasto	6	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
valjkasto	—	—	6	6	6	6	8	8	10	10	—	—
valjkasto-čono	—	—	8	8	8	10	12	12	14	16	—	—
kutno čono	—	—	10	12	14	16	18	20	22	24	—	—
pločasto	—	—	—	8	8	10	12	12	14	16	18	—
— ravno ozupčano	—	—	—	10	10	12	14	14	16	18	20	—
— križno ozupčano	—	—	—	8	10	10	10	12	14	16	18	—
profilno, zatokareno	—	—	8	10	10	10	12	14	16	18	—	—
odvaljno	—	—	—	12	10	10	9	9	9	8	8	—
za uture T	8	10	12	12	—	—	—	—	—	—	—	—
za navoje	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
— ravno ozupčano	8	12	14	16	18	20	—	—	—	—	—	—
— vijčano ozupčano	—	10	12	14	16	18	—	—	—	—	—	—
pilasto	—	—	—	—	34	40	44	50	52	56	64	—
glodalne glave (s noževima)	—	—	—	—	—	—	—	8	10	10	12	—

Općenito je za obradu žilavih i tvrdih materijala potrebno više zubaca, a za lake kovine manje nego za normalne materijale.

Smjernice za kutove na glodalima od brzoreznog čelika i glodalnim glavama s noževima od tvrdih metala

(α — stražnji kut, γ — prednji kut, λ — kut nagiba)

Obradivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika									Glodalne glave s noževima od tvrdog metala					
	vretenasta			valjkasta			pločasta — križno ozupčana			glave s noževima					
	α	γ	λ	α	γ	λ	α	γ	λ	α	γ	λ			
sivi lijev	7	12	30	6	12	40	6	12	15	6	15	12	5	12	0
tvrdi lijev	4	8	15	4	8	30	3	6	10	3	5	5	3	8	-5
temporni lijev	6	12	30	5	12	40	5	12	20	5	12	12	4	10	+5
čelični lijev	6	10	30	5	12	40	5	10	20	5	10	7	4	10	+5
čelik	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
600 N/mm ²	8	15	30	7	15	45	7	15	20	7	15	15	6	15	+10
900 N/mm ²	7	10	20	6	12	40	6	12	15	6	10	20	4	10	+5
1000 N/mm ²	6	6	15	5	8	35	5	7	10	5	6	7	3	6	+5
bakar	6	12	45	6	20	45	6	15	20	6	25	15	6	15	+20
mjed	6	12	35	6	15	45	6	15	20	6	8	12	4	12	+12
bronca	6	10	30	5	12	40	6	12	15	6	15	12	3	10	-5
Al-slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	25	20	8	25	+30
Mg-slitine	10	25	40	8	25	50	8	25	30	8	30	25	8	25	+30

Brzine rezanja v_c (m/min) pri protusmjernom glodanju

Obradivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika				Glodalne glave s noževima od tvrdog met.
	vretenasta	valjkasta, pločasta	valjkasto-čono	glave s noževima	
sivi lijev	—	—	—	—	—
SL 20	16...25	14...20	16...22	17...25	60...100
SL 25	10...16	10...16	12...17	12...18	30...50
čelični lijev	—	—	—	—	—
ČL 0500	14...22	12...18	14...20	15...22	60...100
čelik	—	—	—	—	—
500 N/mm ²	18...28	16...24	18...28	20...30	120...200
600 N/mm ²	18...28	16...24	18...28	18...28	100...160
700 N/mm ²	17...25	15...20	17...23	16...24	80...120
Č. 1530	18...26	16...22	18...25	18...28	100...160
Č. 4730	14...20	12...18	14...20	15...22	60...100
Č. 4732	12...20	11...18	12...20	14...22	40...70
bakar	30...50	30...50	40...50	40...60	100...200
mjed	40...60	30...50	40...60	50...70	150...200
bronca (Sn)	30...40	25...40	40...50	40...60	100...150
aluminij	300...400	250...300	300...400	400...500	800...1000
alumin. slitine	200...250	140...180	200...250	300...400	600...800
magnez. slitine	300...400	300...400	400...500	400...500	800...1000

Posmaci za svaki zubac glodala f_z (mm/zubac) pri protusmjernom glodanju

Obradivani materijal	Glodala od brzoreznog čelika					Glodalne glave s noževima od tvrdog met.
	vretenasta	pločasta	valjkasta	valjkasto-čono	glave s noževima	
sivi lijev	—	—	—	—	—	—
SL 20	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
SL 25	0,02	0,05	0,1	0,15	0,1	0,05
čelični lijev	—	—	—	—	—	—
ČL 0500	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,08
čelik	—	—	—	—	—	—
500 N/mm ²	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,1
600 N/mm ²	0,05	0,06	0,15	0,2	0,3	0,1
700 N/mm ²	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č. 1530	0,03	0,07	0,2	0,2	0,3	0,1
Č. 4730	0,03	0,06	0,1	0,15	0,2	0,08
Č. 4732	0,02	0,05	0,08	0,1	0,15	0,06
bakar	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,12
mjed	0,05	0,07	0,2	0,25	0,3	0,12
bronca (Sn)	0,04	0,06	0,15	0,2	0,2	0,1
aluminij	0,05	0,07	0,15	0,2	0,2	0,1
alumin. slitine	0,03	0,06	0,15	0,15	0,15	0,07
magnez. slitine	0,04	0,07	0,1	0,15	0,1	0,06

Brušenje

Osnovni su načini brušenja:

- po obliku izratka: vanjsko kružno brušenje, unutarnje brušenje i plosno brušenje
- po obliku brusa: profilno brušenje.

Brus je sastavljen od zrnaca brusnog sredstva različite veličine koja su međusobno spojena vezivom. Brus je određen geometrijskim oblikom i dimenzijama, brusnim sredstvom, kvalitetom zrna, vezivom, tvrdoćom i strukturom.

Brzina brušenja (*rezanja*) v_c je zbroj obodne brzine brusa v_b i brzine posmaka v_f (pri kružnom ili plosnom brušenju)

$$v_c = v_b + v_f \quad v_b = d_b \pi n_b$$

gdje znače: d_b – promjer brusa (brus na mehanički pogon ili brusno kolo naziva se još i točiljem ili točilom), n_b – brzinu vrtnje brusa.

Posmična brzina vrtnje izratka (pri kružnom brušenju $v_f = v_o$) iznosi

$$v_o = d_o \pi n_o$$

gdje su: d_o – promjer izratka, n_o – brzina vrtnje izratka.

O posmičnoj brzini vrtnje izratka uvelike ovisi kvaliteta brušenja i trošnje brusa.

Najvažnija sredstva za brušenje

Materijal	Kem. sastav	Tvrdoća (Mohs)	Upotreba
smirak	60...65% Al ₂ O ₃	8	meki čelik, temper. lijev
korund			
naravni	90...96% Al ₂ O ₃	9	žilavi čelici
normalni	95...98% Al ₂ O ₃	9	tvrdi čelici, čelični lijev
plemeniti	nad 99% Al ₂ O ₃	9	tvrdi čelici, brušenje alata
silicijev karbid	SiC (krist.)	> 9	sivi lijev, tvrdi lijev, tvrdi metal, meke kovine, ugljen, staklo, kamenština
borov karbid	B ₄ C (krist.)	> 9	tvrdi metal
dijamant	C (krist.)	10	tvrdi metal, staklo, kamenština

Veličina brusnog zrna određena je brojem očica sita za zrna na duljini 25 mm, a finog zrna i praha ispiranjem i otpuhivanjem.

Kvaliteta zrna	Oznaka zrna	Kvaliteta zrna	Oznaka zrna
vrlo grub	8 10 12	fin	70 80 90 100 120
grub	14 16 20 24	vrlo fin	150 180 200 220 240
osrednji	30 36 46 50 60	prah	280 320 400 500 600

Smjernice za izbor veličine zrna:

prvo brušenje	20...36
konačno brušenje	46...80
fino brušenje	100...200
najfinije brušenje	220...600

Veziva (ljeplila) za brusove su:

- mineralna (magnezitna, silikatna),
- keramička – za jako pečene brusove (vrlo prikladne poroznosti),
- vegetabilna (guma, ulje, šelak), koja su osobito elastična.

Vrsta veziva	Standardna oznaka	Vrsta veziva	Standardna oznaka
keramičko	V	magnezitno	O
umjetne smole	B	silikatno	S
šelak (naravne smole)	E	guma	R

Tvrdoćom brusa označujemo otpor veziva prema ljuštenju zrna iz brusa.

Stupanj tvrdoće	Oznaka tvrdoće	Upotreba
vrlo mek	EFG	plošno brušenje čelika
mek	HIJK	kružno brušenje sivog lijeva i kaljenog čelika
polutvrd	LMNO	kružno brušenje mekog i srednjetrovdog čelika, brušenje alata
tvrd	PRS	ručno brušenje tokarskih noževa, brušenje listova pila
vrlo tvrd	TUV	brušenje većih predmeta, grubo brušenje tvrdih i oštih rubova
osobito tvrd	XYZ	brušenje čeličnih kugli

Struktura označuje sastav brusa, tj. volumenske udjele zrna, veziva i pora u brusu

$$V_z + V_v + V_p = 100\%$$

gdje znače u postocima: V_z – volumenski udio zrna, V_v – volumenski udio veziva, V_p – volumenski udio pora.

Vrsta strukture	gusta	osrednja	rijetka
Oznaka strukture	1 2 3	4 5 6	7 8 9

Maksimalne brzine brušenja (obodne brzine brusova)

Vezivo	Način brušenja	Maksimalna obodna brzina $v_{c\text{maks}}$ m/s			
		za brusne ploče $d_b \leq 150$ mm		za brusne ploče $d_b > 150$ mm	
		ravne i približno ravne	ostale	ravne i približno ravne	ostale
mineralno	ručno	15	15	15	12
	strojno	25	20	20*	15
keramičko vegetabilno umjetne smole	ručno	30	25	25	20
	strojno	35	30	30	25

* Maksimalna obodna brzina velikih brusnih ploča ($d_b > 1000$ mm) smije dostići najviše 15 m/s pri ručnom i strojnom brušenju.

Obodne brzine brusova od korunda*, koje su najprikladnije za brušenje raznih materijala

Obradivani materijal	Obodne brzine v_c (m/s)**					
	vanjsko	nutarnje	za brušenje			
			plošno	alata	za čišćenje	za rezanje
sivi lijev	25	25	20	-	25	45...80
čelik	30	25	25	25	< 45	45...80
tvrdi metali	8	8	8	12	-	45...80
lake kovine	35	25	30	-	-	45...80

* Za brusove od silicijeva karbida prikladnije su nešto manje brzine nego za brusove od korunda. - ** Brušenje brzinom većom od maksimalno dopuštene $v_{c\text{maks}}$ (vidi gornju tablicu) dopušteno je samo specijalnim brusovima koji su posebno ispitani za te brzine, a i tada samo na specijalnim brusilicama.

Svaki brus djeluje pri većim obodnim brzinama tvrde, a pri manjima mekše.

Posmična brzina vrtnje izratka v_0 pri kružnom brušenju

Obradivani materijal	Posmična brzina vrtnje v_0 (m/s)		Obradivani materijal	Posmična brzina v_0 (m/s)	
	vanjsko brušenje	nutarnje brušenje		vanjsko brušenje	nutarnje brušenje
sivi lijev	0,25	0,35	crveni lijev	0,3	0,5
	0,125			0,25	
čelik	0,25	0,3	lake kovine	1,0	0,6
	0,125			0,6	

Posebne obrade

Obrada dijamantima

Dijamant je alat za finu obradu lakih kovina, bakrenih i cinčanih slitina te sivog lijeva, a dijelom i kaljenog čelika (za obradu mekog čelika nije prikladan). Dijamantom obrađujemo također tvrdu gumu, ljepenu i izolacijske materijale. Zbroj kutova $\alpha + \beta + \gamma$ iznosi redovno 90° . Za negativan prednji kut γ može biti $\beta \geq 90^\circ$.

Honanje (vlačno glačanje)

Kao alat služe posebna premjesta držala na koja su priliječeni brusovi (3...10) finoga zrna u keramičkom vezivu ili vezivu od umjetne smole. Brzina brušenja iznosi 10...20 m/s, a posmak 16...20 m/min. Potrebno je intenzivno hlađenje rijetkim uljem ili petrolejem. Točnost obrade iznosi do 0,01 mm.

Lepanje (glačanje brusnim prahom)

Lepanje je konačna obrada izratka nakon odgovarajuće prethodne obrade. Alati za lepanje su od različitih kovina (sivog lijeva, bakra, bakrenih slitina, bijele kovine, antimona, olova). Kao sredstvo za lepanje upotrebljava se kromov oksid, prah korunda ili pak dijamanta. Ta se sredstva miješaju s uljem, petrolejem, mašću ili sl. Postiže se granična točnost u tolerancijama od $\pm 5 \mu\text{m}$.

Superfinit

Alat se sastoji od više brusova, vrlo fine kvalitete zrna (100...1000) i guste strukture, koji pri relativno malom pritisku na obrađivanu površinu osciliraju (pri pomaku od 2...10 mm s 200...2100 pomaka u minuti) u aksijalnom smjeru izratka (koji se okreće). Potrebno je intenzivno hlađenje (petrolej s dodacima). Postiže se hrapavost od 0,2...0,5 μm .

Ultrazvučna obrada kovina

Proces se osniva na erozivnom djelovanju što ga izazivaju mali, veoma tvrdi i oštrobriđni kristali brusnog sredstva (u prostoru između alata i izratka) na koje djeluju visokofrekventni mehanički titraji alata. Alat može u izratku izdupsti oblik koji točno odgovara njegovu profilu. Obrada je upotrebijiva za najtvrdje i krhke materijale.

Elektroerozivna obrada kovina

Pri toj obradi nema djelovanja mehaničkih sila. Čestice se materijala odstranjuju djelovanjem električnog izbijanja između dviju elektroda, od kojih je jedna alat (bakar, mjed), a druga izradak. Visoka temperatura i tlak što nastaju pri električnom izbijanju u vrlo malom prostoru izazivaju raspršivanje sitnih čestica materijala, pri čemu elektrode također djelomice ispare. Erozivni učinak većih uređaja (snage do 15 kW) iznosi oko 500...800 mm³/min pri obradi čelika, a 80...100 mm³/min pri obradi tvrdih metala.

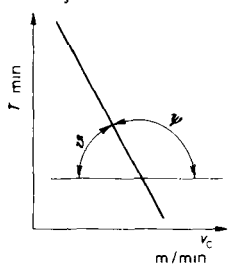
Postojanost alata

Alat za rezanje izvrnut je za vrijeme rada mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice, tj. njezinu istrošenost.

Istrošenost je najveća na onim mjestima alata koja su u neposrednom dodiru s izratkom odnosno strugotinom, tj. na prednjoj i stražnjoj plohi. Glavni su uzroci trošenju alata:

- plastična deformacija alata zbog utjecaja temperature,
- izlomljenost alata kao posljedica utjecaja dinamičkog opterećenja pri odvijanju strugotine koje prelazi titrajnu čvrstoću alata na savijanje,
- gubitak materijala u obliku mikroskopski malih čestica koje odlaze dijelom sa strugotinom, a dijelom ostaju prilijepljene uz površinu izratka.

Postojanost alata T je istrošenošću određeno trajanje oštrice između dvaju brušenja.



T i v_c : u logaritamskoj podjeli!

Postojanost T – po iskustvu – ovisi u prvom redu o brzini rezanja v_c

$$T = m/v_c^c$$

gdje su m i c konstante.

Logaritmiranjem dobivamo oblik

$$\lg T = \lg m - c \lg v_c$$

što u dijagramu s logaritamskom podjelom odgovara jednadžbi pravca.

Krivulja postojanosti (ili krivulja $T - v_c$) prikazuje ovisnost postojanosti T o brzini rezanja v_c .

Povećava li se brzina rezanja v_c postojanost alata opada.

Brzine rezanja v_{c1} odgovara postojanost T_1 , brzini rezanja v_{c2} postojanost T_2 :

$$T_1 = m/v_{c1}^c \quad T_2 = m/v_{c2}^c$$

odakle proizlazi da konstanta c odgovara nagibu pravca (u dijagramu s logaritamskom podjelom), tj. kvocijentu

$$c = (\lg T_1 - \lg T_2) / (\lg v_{c2} - \lg v_{c1}) = \tan \theta = -\tan \psi \quad \psi = 180^\circ - \theta$$

Iz poznate brzine rezanja v_{c60} pri postojanosti T_{60} izračunavamo brzinu rezanja v_{c1} pri drukčijoj postojanosti T_1 pomoću jednadžbe

$$v_{c1} = v_{c60} \sqrt[3]{T_{60}/T_1}$$

*

U tablicama na str. 635...643 navedene su brzine rezanja za alat od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Slojem titanovog nitrida na oštrici može se pod određenim uvjetima postići višestruko povećana postojanost.

Optimalna brzina rezanja

Troškove obrade za jedan izradak S (din/kom.) možemo podijeliti na pojedinačne troškove S_p , opće troškove S_s i troškove alata S_0 .

$$S = S_p + S_s + S_0$$

Pojedinačni troškovi S_p (npr. troškovi transporta i upinjavanja izratka i sl.) ovise samo o izratku i ne mijenjaju se s brzinom rezanja v_c .

Opći troškovi S_s (npr. troškovi za radilicu – otpis, uzdržavanje, energija, – troškovi osobnih dohodaka, upravni troškovi i sl.) su – reducirani na pojedini izradak – to manji, na što su veći broj izradaka podijeljeni, dakle koliko je kraće vrijeme obrade; stoga se s povećanjem brzine rezanja v_c znatno smanjuju.

Troškovi alata S_0 ovise o postojanosti alata T pa se zato s brzinom rezanja v_c jako povećavaju.

Troškove alata S_0 izračunavamo iz jednadžbe

$$S_0 = (V_n - V_i + i_b S_b) / n_T = (V_n - V_i + i_b S_b) / n_T (i_b + 1)$$

pri čemu su: V_n – cijena novog alata, V_i – cijena istrošenog alata, S_b – troškovi jednokratnog brušenja, i_b – broj brušenja do istrošenosti alata, n_T – broj svih izradaka u vremenu t trajnosti alata, n_T – broj izradaka u vremenu T postojanosti alata.

Broj svih izradaka n_T ovisan je prije svega od materijala alata i izratka te o brzini rezanja v_c , posmaka f i dubine rezanja a .

Optimalna brzina rezanja $v_{c\text{opt}}$ je ona brzina rezanja, pri kojoj su troškovi izrade S za jedan izradak najniži.

Izbor optimalnog tehnološkog postupka

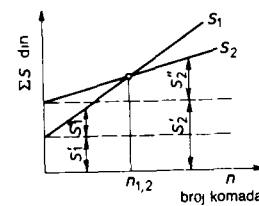
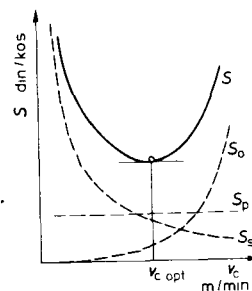
Izradak možemo obraditi različitim tehnološkim operacijama (npr. tokarenjem ili glodanjem; na univerzalnom ili serijskom stroju itd.).

Za obavljanje svake tehnološke operacije potrebni su neki stalni troškovi S' , neovisni o broju komada, te posebni troškovi S'' , ovisni o pojedinom komadu te stoga rastu s njihovim brojem.

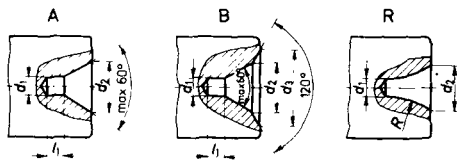
Ukupni su troškovi

$$\sum S = S' + S''$$

Desna slika prikazuje troškove S_1 i S_2 za 2 različita tehnološka postupka (1 i 2). Do broja komada $n_{1,2}$ jeftiniji je postupak 1, a dalje postupak 2.



Središnja gnijezda
Gnijezda sa središnjim kutom 60° (JUS M.A5.210 — 1972)

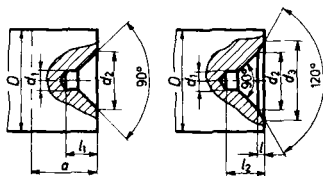


Mjere u mm

Nazivni* promjer d_1	l_1 min.	d_2	d_3	R	
				min.	maks.
(0,5)	0,8	1,06	—	—	—
(0,63)	0,9	1,32	—	—	—
(0,8)	1,1	1,70	—	—	—
1,0	1,3	2,12	3,15	2,5	3,15
(1,25)	1,6	2,65	4	3,15	4,0
1,6	2,0	3,35	5	4,0	5,0
2,0	2,5	4,25	6,3	5,0	6,3
2,5	3,1	5,30	8	6,3	8,0
3,15	3,9	6,70	10	8,0	10,0
4,0	5,0	8,50	12,5	10,0	12,5
(5,0)	6,3	10,60	16	12,5	16,0
6,3	8,0	13,20	18	16,0	20,0
(8,0)	10,1	17,0	22,4	20,0	25,0
10,0	12,8	21,2	28	25,0	31,5

* Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

Gnijezda sa središnjim kutom 90° (JUS M.A5.211 — 1953) upotrebljavaju se za dijelove s masom većom od 100 kg i pri obradi velikim silama.

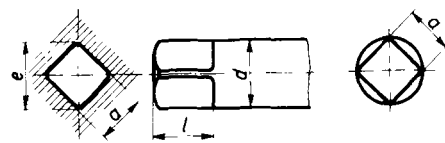


Mjere u mm

Promjer D	d_1	d_2	d_3	l_1	l_2	$l \approx$	a^*
25) ... 63	3	9	12,5	4,5	5,5	1	8
63) ... 100	5	13	18	6,5	8	1,5	11
100) ... 160	8	22	29	11	13	2	18

* Mjere za mjesto reza na predmetu na kojem ne smije ostati gnijezdo.

Četverobridi za alat
(JUS K.A2.001 — 1969)



Mjere u mm

Promjeri drška* d		Četvero- brid		Promjeri drška* d		Četvero- brid	
preporu- čeni	mogući	a	l	preporu- čeni	mogući	a	l
(1,12)	1,06) ... 1,18	0,9	4	(11,2)	10,6) ... 11,8	9	12
1,25	1,18) ... 1,32	1	4	12,5	11,8) ... 13,2	10	13
(1,4)	1,32) ... 1,5	1,12	4	(14)	13,2) ... 15	11,2	14
1,6	1,5) ... 1,7	1,25	4	16	15) ... 17	12,5	16
(1,8)	1,7) ... 1,9	1,4	4	(18)	17) ... 19	14	18
2	1,9) ... 2,12	1,6	4	20	19) ... 21,2	16	20
(2,24)	2,12) ... 2,36	1,8	4	(22,4)	21,2) ... 23,6	18	22
2,5	2,36) ... 2,65	2	4	25	23,6) ... 26,5	20	24
(2,8)	2,65) ... 3	2,24	5	(28)	26,5) ... 30	22,4	26
3,15	3) ... 3,35	2,5	5	31,5	30) ... 33,5	25	28
(3,55)	3,35) ... 3,75	2,8	5	(35,5)	33,5) ... 37,5	28	31
4	3,75) ... 4,25	3,15	6	40	37,5) ... 42,5	31,5	34
(4,5)	4,25) ... 4,75	3,55	6	(45)	42,5) ... 47,5	35,5	38
5	4,75) ... 5,3	4	7	50	47,5) ... 53	40	42
(5,6)	5,3) ... 6	4,5	7	(56)	53) ... 60	45	46
6,3	6) ... 6,7	5	8	63	60) ... 67	50	51
(7,1)	6,7) ... 7,5	5,6	8	(71)	67) ... 75	56	56
8	7,5) ... 8,5	6,3	9	80	75) ... 85	63	62
(9)	8,5) ... 9,5	7,1	10	(90)	85) ... 95	71	68
10	9,5) ... 10,6	8	10	100	95) ... 106	80	75

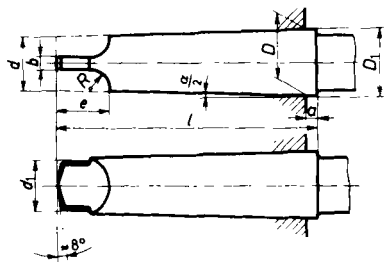
* Preporučeni promjeri bez zagrada smatraju se osnovnima (u nizu standardnih brojeva R 10), a preporučeni promjeri u zagradama su pomoćni (u nizu standardnih brojeva R 20).

Na dršcima promjera do 3 mm prelazi četverobrid redovno u središnji vršak, a na dršcima promjera većeg od 3 mm nalazi se na kraju četverobrida središnje gnijezdo oblika A (vidi str. 650).

Konični dršci za alat

Morseov konus	0	1 : 19,212 = 0,05205
	1	1 : 20,047 = 0,04988
	2	1 : 20,020 = 0,04995
	3	1 : 19,922 = 0,05020
	4	1 : 19,254 = 0,05194
	5	1 : 19,002 = 0,05263
	6	1 : 19,180 = 0,05214
Metrički konus	1 : 20	= 0,05

Vanjski konusi (JUS K.D0.011 – 1982)

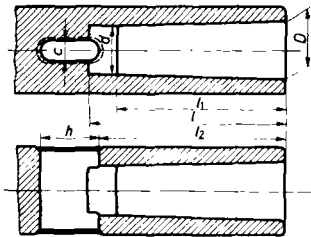


Konus	$\frac{\alpha}{2}$	Mjere u mm							
		D	D_1	d	d_1	l	e	R	a
Morseov	0	9,045	9,2	6,1	6	59,5	10,5	4	3
	1	12,065	12,2	9	8,7	65,5	13,5	5	3,5
	2	17,780	18	14	13,5	80	16	6	5
	3	23,825	24,1	19,1	18,5	99	20	7	5
	4	31,267	31,6	25,2	24,5	124	24	8	6,5
	5	44,399	44,7	36,5	36	156	30	11	6,5
6	63,348	63,8	52,4	51	218	44	17	8	
metrički	1:20 = 0,05	80	80,4	69	67	228	48	24	8
		100	100,5	87	85	270	58	30	10
		120	120,6	105	102	312	68	36	12
		140	140,7	123	120	354	78	42	14
		160	160,8	141	138	396	88	48	16
		180	180,9	159	156	438	98	54	18
	200	200	201	177	480	108	60	20	

Osim takvih koničnih držaka upotrebljavaju se i dršci koji na čelu imaju navoj za vijak:

konus	navoj	konus	navoj
Morse 1	M 6	metrički: 80 100, 120, 140 160, 180, 200	M 30 M 36 M 48
2	M 10		
3	M 12		
4	M 16		
5	M 20		
6	M 24		

Unutarnji konusi (JUS M.G0.051 — 1968)

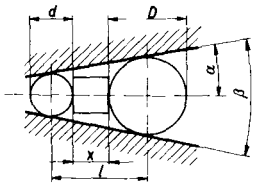


Konus		Mjere u mm						
		D	d	l ₁	l min.	l ₂	c	h
metrički	4	4	3	20	25	21	2,2	8
	6	6	4,6	28	34	29	3,2	12
Morseov	0	9,045	6,7	45	52	49	3,9	15
	1	12,065	9,7	47	56	52	5,2	19
	2	17,780	14,9	58	67	62	6,3	22
	3	23,825	20,2	72	84	78	7,9	27
	4	31,267	26,5	92	107	98	11,9	32
	5	44,399	38,2	118	135	125	15,9	38
6	63,348	54,8	164	188	177	19	47	
metrički	80	80	71,5	170	202	186	26	52
	100	100	90	200	240	220	32	60
	120	120	108,5	230	276	254	38	70
	(140)	140	127	260	312	286	44	80
	160	160	145,5	290	350	321	50	90
	(180)	180	164	330	388	355	56	100
200	200	182,5	350	424	388	62	110	

MJERENJE KUTOVA I KONUSA

Mjerenje kutova

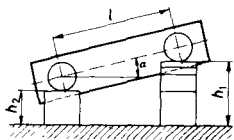
Određivanje kutova pomoću dviju okruglih ploča



$$\sin \alpha = \frac{D-d}{2x+(D+d)}$$

$$x = \frac{D(1-\sin \alpha) - d(1+\sin \alpha)}{2 \sin \alpha}$$

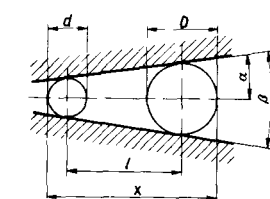
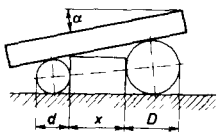
Sinusov postupak



$$\sin \alpha = \frac{h_1 - h_2}{l}$$

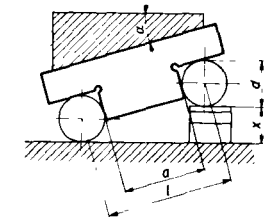
$$h_1 - h_2 = l \sin \alpha$$

Tangensov postupak



$$\sin \alpha = \frac{D-d}{2x-(D+d)}$$

$$x = \frac{D(1+\sin \alpha) - d(1-\sin \alpha)}{2 \sin \alpha}$$



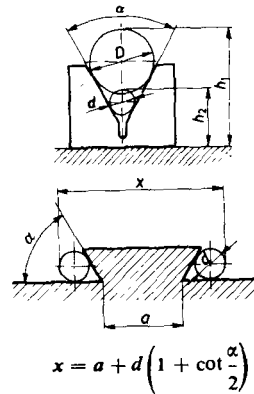
$$\sin \alpha = \frac{x}{l} = \frac{x}{a+d}$$

$$x = l \sin \alpha = (a+d) \sin \alpha$$

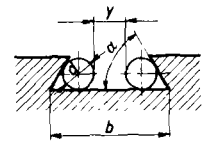
$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{D+d+2x}$$

$$x = \frac{D-d}{2} \cot \frac{\alpha}{2} = \frac{D+d}{2}$$

Mjerenje kutnih vodilica



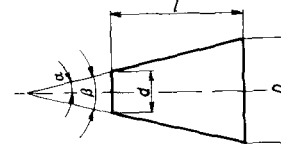
$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2(h_1-h_2)-(D-d)}$$



$$y = b - d \left(1 + \cot \frac{\alpha}{2}\right)$$

Mjerenje konusa

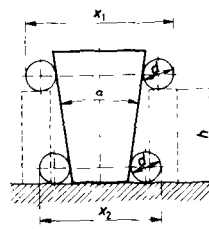
Koničnost obično izražavamo omjerom



$$\frac{D-d}{l} = 1 : k$$

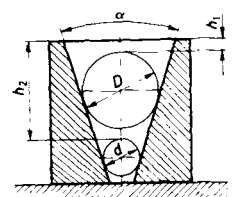
$$\tan \alpha = \frac{D-d}{2l} = \frac{1}{2k}$$

Vanjski konus



$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{x_1 - x_2}{2h}$$

Unutarnji konus



$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{D-d}{2(h_2-h_1)-(D-d)}$$

KOROZIJA I POVRŠINSKA ZAŠTITA

Korozija

Korozija je nenamjerni kemijski ili elektrokemijski utjecaj na materijal pri čemu se mijenja njegova struktura od površine prema unutrašnjosti.

Kemijske reakcije javljaju se u prvom redu pri djelovanju električki nevodljivim tvarima (npr. pri suhim plinovima) na materijal; elektrokemijske reakcije izazivaju električki vodljive tvari (npr. vodljive tekućine – elektroliti).

Prema nastajanju korozije razlikujemo:

– jednoliku koroziju koju u prvom redu izazivaju kemijske reakcije, a pojavljuje se na cjelokupnoj površini predmeta,

– lokalnu koroziju koju većinom izazivaju elektrokemijske reakcije, a ograničena je na određena manja mjesta na predmetu.

Jednolika korozija može neograničeno napredovati, ako produkti korozije po nastajanju smjesta odlaze s materijala (ako se ljušte, tope, otpadaju) čime omogućuju daljnje korozijsko djelovanje (npr. oksidacija željeza pri visokim temperaturama ili razjedanje Cu s talinom Sn). Jednolika korozija se zaustavlja, ako se produkti korozije tijesno i čvrsto priljube uz osnovni materijal te ga zaštićuju pred daljnom korozijom (npr. zaštitni sloj na površini pri Pb, Al, Cu ili – nevidljivo tanak – i pri Ni, Cr itd.).

Primjeri otpornosti nekih kovinskih materijala prema jednolikoj koroziji

Upliv korozije	Kovinski materijal (sastav u postocima)								
	Fe	Cr	Ni	Fe + 18 Cr 8 Ni	Al	Al + 10 Si	Cu	Cu + 8 Sn	Ni + 30 Cu
Voda									
destilirana	-	++	++	++	+-	++	+	+	++
meka	+-	++	++	++	+-	++	+	+	++
tvrdna	+	++	++	++	++	++	+	+	++
morska	-	+	++	+	-	++	-	+	++
Plinovi									
norm. atmosfera	+	++	++	++	++	++	+	++	++
morski zrak	+-	+	+	+	-	++	-	+-	+
dimni plinovi	+-	++	-	++	++	++	-	+-	++
pregr. para	+-	++	++	++	-	++	-	+	++
Kiseline									
HNO ₃ – 10%	--	+	--	++	+	++	-	-	+
– konc.	++	++	--	++	++	++	--	--	+
HCl – 0,5%	--	+-	++	+	--	++	-	+-	+
– konc.	--	-	--	--	--	+	--	-	+
H ₂ SO ₄ – 10%	--	+	+-	++	-	+	+	+	++
– konc.	+-	+	+-	++	--	++	-	-	++
Luzine									
KOH – 20%	++	+	++	++	--	++	+	+	++
NaOH – 20%	++	+	++	++	--	++	+-	+	++

Ocjene korozijske otpornosti: ++ vrlo dobra, + dobra, +- osrednja, - loša, -- vrlo loša.

Lokalna korozija je većinom elektrokemijska pojava pri kojoj dvije kovine, različitih elektrokemijskih potencijala, u dodiru s vodljivom tekućinom (elektrolitom) tvore galvaniski članak.

Elektrokemijski naponski niz kovina sastavljen je po njihovim normalnim potencijalima s obzirom na normalnu vodikovu elektrodu:

Kovina	Normalni potencijal V	Kovina	Normalni potencijal V	Kovina	Normalni potencijal V
Ka	- 2,92	Fe II	- 0,44	H	± 0,00
Na	- 2,71	Cd	- 0,40	Cu II	+ 0,34
Mg	- 2,35	Co	- 0,27	Cu III	+ 0,52
Al	- 1,28	Ni	- 0,25	Ag	+ 0,81
Mn	- 1,08	Sn	- 0,14	Hg	+ 0,85
Zn	- 0,76	Pb	- 0,13	Pt	+ 0,87
Cr	- 0,56	Fe III	- 0,04	Au	+ 1,50

Kovine manjeg potencijala nazivamo »manje plemenitima«, a one većeg potencijala »plemenitijima«.

Zbog elektrokemijskog potencijala poteče u galvanском članku tok elektrona od anode ka katodi. Anoda (manje plemenita kovina) se pritom rastvara (korozija!), a katoda (plemenitija kovina) se prekriva (zaštita).

Raznoliki elektrokemijski potencijal može proizaći iz dviju kovina, dviju faza iste kovina, razlici u strukturi, razlici napetostnog stanja itd. Što veća je potencijalna razlika, to veća će biti lokalna korozija.

Velika otpornost kovina ili njihovih slitina prema jednolikoj (kemijskoj) koroziji ne štiti ih pred lokalnim (elektrokemijskom) korozijom.

Površinska zaštita

Pred jednolikom (kemijskom) korozijom štitimo kovinske dijelove prikladnim otpornim materijalom.

Ako upotreba nekog prema koroziji otpornog materijala nije prikladna (zaradi čvrstoće, temperaturne otpornosti – ili cijene) dolaze u obzir postupci prevlačenja površinskim slojem: platanje (npr. Ni na osnovu Fe), potapljanje (u cink, kositar, olovo), galvaniziranje (niklovanje, kromiranje), navarivanje, sinterovanje, metaliziranje (Zn, Al, Pb, Cu, Cr, Ni), prskanje plazmom i sl.

Zaštita kemijskim postupcima su: bruniranje, fosfatiranje, bondiranje itd. Prekrivna zaštita su: ulja, masti, premazi, ocakline i plasteni lakovi.

Pred lokalnom (elektrokemijskom) korozijom najlakše je štititi kovinske predmete u suhom prostoru, gdje ne postoji mogućnost stvaranja elektrolita. Ako to nije moguće (na slobodnom prostoru, u vlažnim prostorijama i sl.), treba posebno zaštititi spojeve kovinskih dijelova od vlage. Jednostavno je sredstvo debeo namaz mašču. Značajan je i razuman izbor dvaju dijelova u dodiru (kako bi se smanjila elektrokemijska potencijalna razlika). Velikom otpornošću prema koroziji odlikuju se plasti. Stoga pri potrebi naročite otpornosti prema koroziji rješenje treba tražiti u potpuno plastenoj konstrukciji (ili njenim dijelovima).

RAZNO
TEHNIČKO PISMO

Zbog preglednosti tehničkog tiska i razlikovanja znakova za veličine i drugih znakova pišu se:

- nagnuto znakovi veličina
- uspravno ostali znakovi.

*

U zapadnonjemačkim standardima (DIN 1338) je određeno što valja pisati (tiskati) uspravno, a što nagnuto, i to:

- a) U s p r a v n o se pišu:
- brojevi napisani brojkama, npr. $1,32 \cdot 10^{-6}$, $3/4$, 625-puta, $6r^2$, a_6
 - posebni brojevi, označeni brojkama: Ludolfov broj π , osnova prirodnih logaritama e , imaginarna jedinica i ($i^2 = -1$)
 - matematički znakovi određenog značenja, npr.: $d, \partial, \Delta, \int, \sum, \lim, \sin, \cos, \tan, \cot, \log, \ln, \lg$
 - znakovi mjernih jedinica i njihovi mnogokratnici: m (metar), C (kulon, coulomb), F (farad), μ (mikro = 10^{-6}), μF (mikrofarad), mol
 - simboli kemijskih elemenata: Fe, H₂O, NaCl
- b) N a g n u t o (*kurzivno*) se pišu:
- brojevi napisani slovima: a, b, x, y, n -puta, $\sqrt[n]{3}, \sum_{i=1}^n k_i, i = 1 \dots n$
 - svi simboli fizikalnih veličina: m (masa), C (kapacitet), F (sila), μ (koeficijent trenja)
 - matematičke oznake funkcija: $f(x), g(x), \varphi(x), \mu(x), L(y) = y'' + f_1 y' + f_0 y$

Indeksi veličina pišu se uspravno ako su to samo dodatne oznake veličina, npr.:

α_1 – određeni kut, p_k – kritični tlak, v_{\max} – najveća brzina, σ_{dop} – dopušteno naprezanje;

nagnuto (*kurzivno*) se pišu kada znače slovima napisane broježane vrijednosti ili vlićine:

k_n – za $n = 1, 2, 3, \dots, w_x = \partial w / \partial x$ – komponenta brzine u smjeru osi x ; σ_z – naprezanje u smjeru osi z , V_{p_1, T_1} – volumen pri tlaku p_1 i temperaturi T_1 .

Normalni formati papira

Oznaka	Površina m ²	Mjere mm
A0	1	841 × 1189
A1	1/2	594 × 841
A2	1/4	420 × 594
A3	1/8	297 × 420
A4	1/16	210 × 297
A5	1/32	148 × 210
A6	1/64	105 × 148

Normalni se formati upotrebljavaju za sve tehničke crteže, za službene dopise i različite tiskanice. Format se mogu upotrebljavati uzdužno ili poprečno. Za crtanje uskih i dugačkih predmeta, objekata i sličnoga dopušta se produženi format, sastavljen od jednakih ili susjednih formata. Okvir crteža odmaknut je od ruba papira 5 mm.

Dimenzije formata redova B i C:

Red	Oznaka	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
B:	mjere (mm)	125 × 176	176 × 250	250 × 353	353 × 500	500 × 707	707 × 1000	1000 × 1414
Red	Oznaka	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
C:	mjere (mm)	114 × 162	162 × 229	229 × 324	324 × 458	458 × 648	648 × 917	917 × 1297

Mjerila

Crteže treba raditi samo u standardnim mjerilima:

za naravnu veličinu	1 : 1		
za smanjenja	1 : 2,5 (1 : 2)	1 : 5	1 : 10
	1 : 20	1 : 50	1 : 100
	1 : 200	1 : 500	1 : 1000
za povećanja	2 : 1	5 : 1	10 : 1

Treba se kloniti vrijednosti u zagradama.

Grčka slova

α A	alfa	η H	eta	ν N	ni	τ T	tau
β B	beta	θ Θ	t(h)eta	ξ Ξ	ksi	υ Y	ipsilon
γ Γ	gama	ι I	jota	o O	omikron	φ Φ	fi
δ Δ	delta	κ K	kapa	π, π Π	pi	χ X	hi
ϵ E	epsilon	λ Λ	lambda	ρ P	ro	ψ Ψ	psi
ζ Z	(d)zeta	μ, μ M	mi	σ Σ, Σ	sigma	ω Ω, Ω	omega

Rimske brojke

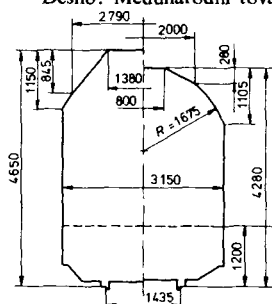
I = 1	VIII = 8	LX = 60	CD = 400
II = 2	IX = 9	LXX = 70	D = 500
III = 3	X = 10	LXXX = 80	DC = 600
IV = 4	XX = 20	XC = 90	DCC = 700
V = 5	XXX = 30	C = 100	DCCC = 800
VI = 6	XL = 40	CC = 200	CM = 900
VII = 7	L = 50	CCC = 300	M = 1000

TOVARNE MJERE ŽELJEZNIČKIH KOLA

Tovarne mjere za kola na prugama normalnog kolosijeka (1435 mm)

Lijevo: Tovarni profil Jugoslavenskih željeznica (JŽ)¹⁾

Desno: Međunarodni tovarni profil UIC²⁾ (JUS P.A.0.004 — 1972)



Najveće mjere tovara:

širina do 3150 mm
visina do 3080 (3450) mm
duljina do 7,7 (... 22) m
masa do 15 (... 80) t

Gornji rub tovarne platforme

Gornji rub tračnice

Tovarna širina je ograničena razmakom osovina, tj. razmakom osovina pri dvoosovinskim kolima odnosno razmakom među čepovima obrtnih postolja pri četveroosovinskim kolima. Pri razmaku osi većem od 8 m postoji ograničenje tovarne širine u sredini razmaka osi (na svakoj strani):

razmak osi m: 8 9 10 11 12 13 14 16 18 20 22 24 26 28 30
ograničenje cm: 1 2 3 4 5 6 8 10 15 20 27 35 43 52 62

Tovarna širina kola

Vrsta kola	otvorena	pokrivena	plitka (plato)
dvoosovinska	7,7 m i više	9 m i više	> 12 m
četveroosovinska (s obrtnim posteljima)	12 m i više	15 m i više	> 18 m

Opterećenje pruge

Kategorija pruge	Osovinsko opterećenje	Duljinsko opterećenje
A (A', A'')	12...16 t	3,5...4,8 t/m
B (B ₁ , B ₂)	18 t	5,0...6,4 t/m
C (C ₂ , C ₃ , C ₄)	20 t	6,4...8,0 t/m

Nosivost kola

dvoosovinska kola	20 t i više
četveroosovinska kola (s obrt. posteljima)	40 t i više*

Za sve prevoze posebnih predmeta (po mjerama i masi) potreban je dogovor sa željezničkom upravom.

¹⁾ Za pruge Postojna—Sežana i Pivka—Rijeka vrijedi međunarodni profil UIC.

²⁾ UIC = *Union International des Chemins de fer.*

* Specijalna četveroosovinska: do 58 t, šesteroosovinska: do 80 t.

JUGOSLAVENSKI STANDARDI — JUS

Jugoslavenski se standardi označuju oznakama od dva slova i četiri brojeke (npr. »JUS A.A.0.001«). Slovim se označuju grane i glavne skupine standarda; prvom brojkom skupine standarda, a posljednjim trima brojkama pojedini standardi.

Grane i glavne skupine jugoslavenskih standarda

A. Osnovni i opći standardi

- A.A Osnovni standardi o standardizaciji, standardni brojevi, jedinice itd.
- A.C Terminologija, dokumentacija
- A.D Knjigovodstvo
- A.E Organizacija upravljanja
- A.F Obrada informacija
- A.K Kvalitet i atestiranje proizvoda

B. Rudarstvo i prerada minerala, ugljena i nafte

C. Metalurgija i tehnologija prerade kovina

- C.A Osnovni i opći standardi za granu metalurgije i tehnologije prerade kovina
- C.B Osnovni proizvodi crne metalurgije
- C.C Osnovni proizvodi od lakih kovina i njihovih slitina
- C.D Osnovni proizv. od bakra i drugih teško taljivih kovina i njihovih slitina
- C.E Proizvodi od cinka, olova i drugih lako taljivih kovina i njihovih slitina
- C.G Proizvodi od plemenitih kovina i njihovih slitina
- C.H Izvedeni proizvodi crne i obojene metalurgije
- C.J Ljevaonički proizvodi crne i obojene metalurgije
- C.K Proizvodi crne metalurgije s posebnom namjenom
- C.L Proizvodi obojene metalurgije s posebnom namjenom
- C.T Tehnološki procesi prerade kovina
- C.Z Razni standardi na području metalurgije i tehnologije prerade kovina

D. Šumarstvo, drvna industrija i prerada drvnih tvari

E. Poljoprivreda, ribarstvo i prehrambena industrija

F. Tekstilna industrija

G. Industrija kože, gume i umjetnih masa

H. Kemijska industrija

K. Radai i mjerai alat i pribor

- K.A Osnovni i opći standardi o alatu
- K.B Čekići, sjekire, budaci, čuskije i sličan alat za kovanje, cijepanje i slične radnje udarcima
- K.C Noževi, škare, sjekala, dlijeta, kose, srpovi, ašovi, motike i sličan alat za sječenje jednom ili dvjema oštricama

- K.D Pile, glodala, svrdla, turpije i sličan rezni alat s više oštrica
 K.E Probojci, šila, igle i sličan alat za probijanje
 K.F Alat za brušenje i glačanje
 K.G Kliješta, stege, ključevi i sličan alat za hvatanje i stezanje
 K.H Kalupi za kovanje i prešanje, probijanje i sličan alat za oblikovanje; ploče za ravnanje, obilježavanje i slično
 K.J Lopate, vile, grablje, žlice i sličan alat za grabljanje i hvatanje
 K.L Četke, češljevi i sličan alat za struganje, gladenje i razmazivanje
 K.M Posebni alat i pribor za kovinoprerađivačku djelatnost
 K.N Posebni alat i pribor za preradu drva i drvnih tvari
 K.P Posebni alat i pribor za poljoprivredu, šumarstvo, lov i ribarstvo te za industriju hrane i pića
 K.R Posebni alat i pribor za razne industrijske i zanatske djelatnosti
 K.T Mjerni alat za gruba mjerenja
 K.Z Razni alat i pribor
- L. Mjerni aparati i proizvodi precizne mehanike**
 L.C Aparati za mjerenje duljine, površine, obujma, kutova i slično
 L.D Aparati za mjerenje duljine, težine, tlaka, sile, napona i slično
 L.E Aparati za mjerenje vremena, brzine, prijednog puta, izvršenog rada i sl.
 L.F Aparati za mjerenje temperature i ostala toplinska mjerenja
 L.G Aparati za električna mjerenja
 L.J Aparati za razna tehnička i laboratorijska mjerenja
 L.K Optički aparati opće namjene
 L.M Medicinski i kirurški instrumenti i aparati
 L.N Aparati za regulaciju temperature, vlažnosti i slično
 L.R Pisaci i računski strojevi, aparati za umnožavanje i ostali aparati birotehnike i široke potrošnje
- M. Strojogradnja i industrija kovina**
 M.A Osnovni i opći standardi za granu strojogradnje i industrije kovina
 M.B Vijci, zakovice i ostali elementi za spajanje
 M.C Elementi strojeva
 M.D Radni strojevi i uređaji univerzalnog tipa
 M.E Termoenergetski uređaji
 M.F Strojevi za transformaciju energije
 M.G Strojevi i uređaji za obradu kovina skidanjem strugotine
 M.J Posebni strojevi, uređaji i drugi kovinski proizvodi za rudarstvo i industriju mineralnih proizvoda te za gradevinarstvo
 M.K Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za šumarstvo, drvenu industriju i preradu drvnih tvari
 M.L Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za poljoprivredu, prehrambenu industriju, kemijsku industriju i industriju nafte
- M.M Strojevi, uređaji i razni kovinski proizvodi za industriju vlaknastih tvari, kože, gume, smole i plastičnih masa
 M.N Cestovna vozila
 M.R Kovinski namještaj, strojevi i kovinski proizvodi za grafičku industriju, kovinski proizvodi za uredske i školske potrebe te za ugostiteljstvo i kućanstvo
 M.T Kovinski proizvodi za vatrogastvo i službu zdravstvene zaštite
 M.Z Razni strojevi, uređaji i ostali kovinski proizvodi
- N. Elektrotehnika i elektroindustrija**
 N.A Osnovni i opći standardi iz elektrotehnike i elektroindustrije
 N.B Proizvodnja, prijenos i razdioba električne energije
 N.C Električni vodiči
 N.E Materijal za električne instalacije
 N.F Materijal za električne, nadzemne i podzemne vodove niskog i visokog napona
 N.G Električni rotacijski strojevi
 N.H Transformatori, usmjerači i slični uređaji
 N.J Elementi, akumulatori i kondenzatori
 N.K Naprava za uključivanje
 N.L Električne žarulje i svjetiljke
 N.M Elektrotehnički proizvodi za potrebe kućanstva
 N.N Elektronika i telekomunikacije
 N.P Električna aparatura na vozilima
 N.R Sastavni dijelovi za elektroniku i telekomunikacije
 N.S Posebni električni strojevi, uređaji i aparati za industrijske i medicinske svrhe
- P. Uređaji, postrojenja i vozila tračničkog prometa**
 P.A Osnovni i opći standardi o uređajima, postrojenjima i vozilima tračničkog prometa
 P.B Postrojenja gornjeg stroja tračničkog prometa
 P.C Signalno-sigurnosna postrojenja tračničkog prometa
 P.F Zajednički elementi tračničkih vozila
 P.G Kočni uređaji tračničkih vozila
 P.J Parne lokomotive
 P.N Putnička, poštanska i četvoosovinska službena kola
 P.P Teretna i dvoosovinska službena kola
 P.R Vagoneti i motorna kolica
 P.S Tračnička vozila posebne namjene
- R. Brodogradnja i postrojenja riječnog i pomorskog prometa**
 R.F Propulzijska brodska sredstva
- U. Gradevinarstvo**
- Z. Standardi, koji ne ulaze ni u jednu posebnu granu standardizacije**

IZGOVARANJE STRANIH IMENA

Stranim imenima dodan je približan izgovor, transkribiran samo našim slovima.

Bach	bah	Martin	martèn
Bain	béin	Mayer	májer
Baumé	bomé	Maxwell	méksvel
Beaufort	bofór	Mishima	mišima
Becquerel	békerej	Mohr	mor
Bernoulli	bernúli	Mollier	móljer
Bessemmer	bésemer	Moody	múdi
Böhler	béler	Newton	njutn
Bohr	bor	Oersted	érsted
Boltzmann	bólcman	Ohm	om
Boyle	bojl	Otto	óto
Brggs	brigs	Pascal	paskál
Brinell	brinél	Péclet	peklé
Carnot	karnó	Pelton	peltn
Charpy	čárpi	Poiseuille	poazej
Clapeyron	klápejron	Poisson	poasón
Clausius	kláuzius	Prandtl	prantl
Colebrooke	kóulbruk	Redwood	redvúd
Coulomb	kulón	Renard	renár
Cremona	kremóna	Reynolds	renélds
Culmann	kúlman	Richter	rihter
Curie	kiri	Rockwell	rókvel
Curtis	kértis	Rose	róze
D'Alembert	dalambèr	Rosin	rózin
Dalton	doltn	Röntgen	réntgen
Darcy	darsí	Sankey	sénki
Descartes	dekárt	Saybolt	sejbolt
Diesel	dízl	Schmidt	šmit
Einstein	ájnštajn	Seale	sil
Euler	ójler	Shore	šor
Fahrenheit	fárnhajt	Siemens	símens
Faraday	féredi	Sievert	sivert
Fehling	féling	Smith	smit
Francis	frénsis	Stauffer	štáufèr
Gauss	gáus	Stefan	štéfan
Gay-Lussac	gejlisák	Steiner	štájner
Giorgi	džórdži	Student	stjudent
Grasshof	gráshof	Taylor	téjlr
Gray	grej	Thomas	iómas
Guldin	gulđin	Thomson	tómsn
Henry	hénri	Torricelli	toričéli
Hertz	herc	Vickers	víkèr
Hooke	huk	Warrington	uóringtn
Joule	džul	Watt	uót
Kirchhoff	kírhhof	Wheatstone	vítstoun
Laplace	laplás	Wöhler	véler
Mariotte	mariót	Wood	vud

IZVORI BROJČANIH PODATAKA

U prvim izdanjima priručnika brojčani su podaci sabrani iz sljedećih djela:

Techniques de l'Ingénieur

Généralités, tomes I, II et III
 Mécanique et Chaleur, tomes I et II
 Métallurgie, tomes I, II et III
Naklada: Techniques de l'Ingénieur, Paris.

Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch

Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
 Band I: Theoretische Grundlagen (HÜTTE I).
 Band II A: Maschinenbau, Teil A (HÜTTE II A).
 Band II B: Maschinenbau, Teil B (HÜTTE II B).
 Band V: Verkehrstechnik-Vermessungstechnik (HÜTTE V).
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Hütte, Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebshütte)

Herausgegeben vom Akademischen Verein Hütte, E. V. in Berlin,
 Band I: Fertigung.
 Band II: Betrieb.
Naklada: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin.

Dubbels Taschebuch für den Maschinenbau

Band I und II.
Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Машиностроение: Энциклопедический справочник

Том 1 и 2: Инженерные расчёты в машиностроении.
 Том 3 и 4: Материалы машиностроения.

Naklada: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, Москва.

Schmidt, E.: Properties of Water and Steam in SI-Units

Naklada: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.

Standardi

JUS – Jugoslavenski standardi.
 ISO – International Standardizing Organization.
 DIN – Deutsche (Industrie-) Norm.

*

U novom, potpuno prerađenom izdanju priručnika – osim prijašnjih – uzeti su u obzir najnoviji podaci iz zakona o mjernim jedinicama i mjerilima te iz (dostupne) suvremene znanstvene i stručne literature – iz knjiga i revija.

KAZALO

- acetilen 93, 94, 163, 206, 207
aceton 93, 94
aciklički spojevi 92
adijabata 161
aditivi 601
aerodinamički otpor 147
aerosoli 97
ajnstajnij 78
akceleracija – vidi ubrzanje
aktinij 77
aktivnost radioaktivnog izvora 68
akumulacija vode 154
akumulator 279
akustika 288
alatni čelik 357, 379
alatni strojevi (maz.) 607
aldehidi 93
alfanumerički podaci 304
algebarske jednadžbe 27
algoritam 308
alifatski spojevi 92
alkalne kovine 80
alkalni oksidi 34
alkanali 93
alkani 93
alkanoli 93
alkanoni 93
alkanske kiseline 93
alkeni 93
alkili 92
alkini 93
alkoholi, vidi alkanoli
alpaka 404
aluminij 76, 80, 98, 112, 158, 215, 219,
257, 261, 289,
aluminijaska bronca 403, 408
aluminijski oksid 84
aluminijске slitine 98, 112, 393
aluminijски poluproizvodi 451
aluminotermičko zavarivanje 621, 622,
623
američij 78
amidi 93
amini 93
aminoplast 473
amonij 83
amonijačna vodica 88
amonijak 83, 163, 189, 212, 214
amonijски hidroksid 87
amonijске soli 91
amper 54
amplituda 34, 125
analitička geometrija 30
analogna tehnika 302
anergija 160
anglosaske mjere 71
ångström 71
anilin 95
anion 78
anorganski spojevi 82, 92, 97
antikorodal (anticorodal) 393
antimon 77, 80
aparaturna oprema 307
apsolutna nula 66
apsolutni rad 160
apsolutna vrijednost 26
apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja 68
apsorpcijski koeficijent 218
ar 59
araldit 481
argentan 404
argon 76, 81, 159, 163
argument 33
Arhimedov zakon 134
aritmetički red 22
arsen 76, 80
asfalt 99, 217, 264
asimptota 32
asinhroni motori 271
astat 77
atmosfera (mjera) 92
atmosferski tlak 135
atmosfersko stanje 135
ato- 58
atom 75
atomska jedinica mase 63
atomska masa 75
atomske veze 82
austenit 344, 345
austenitni čelik 346
autogeno rezanje, vidi rezanje kovina pla-
menom
automatizacija 291
Avogadrov zakon 162
Avogadrova konstanta 55
azbest 99, 216

Bachov faktor 123
 bačvasti ležaji 586
 baint, vidi beinit
 Bainov dijagram 345
 bajt 307
 bakar 76, 81, 98, 112, 158, 215, 219, 257, 261, 289, 400
 bakelit 217, 264, 481
 bakrene slitine 394, 519
 bakrene soli 90
 bakreni oksidi 401, 405
 bakreni poluproizvodi 462
 bar 65
 barij 77, 80
 barijske soli 90
 barit 89, 90
 barn 71
 barometarski tlak, vidi atmosferski tlak
 barye 72
 Bauméova areometarska skala 74
 baze 87
 Beaufortova skala 74
 beinit 345
 bekerel 57
 benzen 93, 95, 159, 203, 206, 207
 benzin 99, 159, 206, 207
 benzol, vidi benzen
 berilij 76, 80
 berkelij 78
 Bernoullijeva jednadžba,
 -- za kapljevine 136
 -- za plinove 200
 beton 100, 159, 216, 469
 bijela kovina 98, 413
 bijeli lijev 345
 binomi 26
 bit 303
 bizmut 77, 80
 blanjanje 637
 bofor 74
 Bohrov model atoma 75
 boksit 99
 Booleove funkcije 305
 bor 76, 80
 boraks 631
 borij, vidi hanij
 borni karbid 85, 644
 borova skupina elemenata 80
 Boyle-Mariotteov zakon 162
 bradavični zavar 621
 Brigsovi logaritmi 5
 briketi 99
 Brinell, tvrdoća po –u 322

brojčane jednadžbe 53
 brom 76, 81
 bromovodik 83, 87, 88
 bromovodična kiselina 87, 88
 bronca 98, 158, 215, 257, 403, 406
 brusovi 644
 brušenje 644
 brzina 62, kutna – 62, – vrtnje 62, 125,
 -- kritična 132, -- specifična 152, 155,
 brzina istjecanja 138, – svjetlosti 62, 288,
 – zvuka 201, 289
 brzorezni čelik 98, 383
 buna 96
 bušenje 638
 butan 92, 94, 207
 butanal 108
 butanol 108
 butanska kiselina 94
 buten 94
 butil 92
 butilalkohol 94
 butilen 94
 butin 94
 byte 307
 candela 54
 Carnotov kružni proces 161
 cekas 257, 268, 416
 celofan 99
 celulozoid 99, 159, 217, 473
 celuloza 95, 96
 Celzijevi stupnjevi 66
 cement 99, 100, 469
 cementiranje (ugljičenje) čelika 351
 cementit 85, 344, zrnati – 345
 cent 71
 centi- 52
 centrifugalna sila 130
 centrifugalne pumpe 152
 cer 77
 cezij 77, 80
 Charpyjev pokus 319
 chip 307
 cijan 83
 cijaniranje čelika 352
 cijankalij 90
 cijanovodik 83, 87, 88
 cijanovodična kiselina 87, 88
 cijevi, – od sivog lijeva 418, čelične – 434,
 – od aluminija 459, bakrene – 464
 cijevni navoj 519
 cikličke krivulje 32
 ciklički spojevi 92

ciklobutan 92, 94
 ciklobuten 94
 cikloida 32
 ciklometrijske funkcije 35
 cilindarsko ulje 99, 605
 cin, vidi kositar
 cinčane slitine 411
 cinčane soli 91
 cinčani oksid 84
 cinčani poluproizvodi 468
 cinčano bjelilo 84
 cink 76, 81, 98, 158, 215, 219, 257, 261,
 289, 411, 468
 cirkonij 76, 81
 cirkulacijsko ulje 603
 Clapeyronova jednadžba 168
 Clausius 160
 col (palac) 71
 Colebrookeova jednadžba 141
 coulomb 57
 Cremonin plan 105
 crvena kovina 403
 crveni krvni lužac 91
 crveni lijev 158, 215, 407
 Culmannov pravac 102
 curie 73
 Curiejeva temperatura 343
 curij, vidi kirij
 Curtisovo kolo 231
 čelik 98, 112, 158, 215, 219, 257, 343, 357,
 358, 386
 čelik za automate 370
 čelični lijev 112, 384
 čelični poluproizvodi 422
 čelnici, parovi 561
 četverobrudi za alate 651
 četverokuti 18
 četverotaktni motori 239
 čip 307
 člankasti lanci 558
 čunjosječnice 31
 čvor 72
 čvrstoća 112, vlačna – 315, trajna – 320,
 – zupčanika 568
 D'Alembertov princip 126
 Daltonov zakon, – za plinove 167,
 – za smjesu plinova i para 193
 dan 62
 Darcyjeva jednadžba 141
 deci- 58
 decibel 290
 decimalne mjerne jedinice 58

deformacijski rad 112, 113
 deka 58
 dekrement (logaritamski) 35
 De Lavalova sapnica 201
 delta kovina 98
 derivacija, – funkcije 36, parcijalna – 37,
 – vektora 47
 determinante 24
 dielektrična konstanta 264
 Diesel-motor, (dizel-m.) 255, 595
 diferencijal funkcije 36
 diferencijalne jednadžbe 42
 difluordiklormetan 95, 163, 190
 difluoromonoklormetan 191
 difuzijsko žarenje čelika 348
 digitalna tehnika 303
 dijagram TTT 345
 dijagram σ_c , ϵ 313
 dijament 85, 159, 644
 diklormetan 95, 189
 dilatacija 157
 dimni plinovi 202
 din 72
 dinamička čvrstoća 320, 539
 dinamička viskoznost 65, 133
 dinamička ravnoteža 130
 dinamika 124, hidro- 136
 diobeni cilindar 561
 dioda 281
 diskovi, diskete 306
 diskretni signali 301
 diskriminanta 27
 dispergent 97
 disperzni sistemi 97
 disprizij 77
 distribucija, vidi razdioba
 dobavna visina (pumpe) 148
 dolomit 90
 dopuštena naprezanja 532
 – trajna struja 275
 – usisna visina 149
 dosjedanje strojnih dijelova 486
 dosjedi 494, navojni – 518
 dršci za alat (konični) 652
 drveni ugljen 206, 217
 drvo 99, 100, 112, 206, 207, 217, 219,
 289, 472
 dubljenje 637
 duboko izvlačenje 619
 duljinska masa 63
 duljinske mjere 58, standardne – – 484
 duralumin 98, 158, 215, 393
 duranalij 393

- duroplasti 473, 481
 dušična kiselina 87, 88
 dušični oksidi 84
 dušik 76, 80, 85, 159, 163, 164
 dušikova skupina elemenata 80
 dvostruki integral 41
 dvotaktni motori 239
 džul 56, 57
- ebonit 217
 Edisonov navoj 530
 ekonomajzer, vidi zagrijač vode
 eksa- 58
 eksurgija 160
 eksotermičke reakcije 83
 eksponencijalna funkcija 34
 eksponencijalne jednadžbe 29
 eksponent 3
 ekspozijska doza ionizirajućeg zračenja 68
 ekstremitetna funkcija 37
 ekvivalentna doza ionizirajućeg zračenja 68
 elasti 473, 480
 elastična krivulja 114
 elastični modul, vidi modul elastičnosti
 elastičnost, granica – i 313
 električnost 69
 električna jakost polja 69, 264
 – mjerila 286
 električna rasvjeta 270
 – struja 69
 – vodljivost 69, 256
 električne mjere 69
 – veličine 69
 električni generator 266
 – nabo 69
 – napon 69
 – niskonaponski vodovi 274
 – otpor 69, 256
 – ventili 290
 električno grijanje 268
 – polje 262, 264
 elektrode za lučno zavarivanje 626
 elektroerozivna obrada 647
 elektrografit 268
 elektrokemijski ekvivalent 261
 elektrolitski bakar 400
 elektromagnetski valovi 288
 elektromotori 271
 elektron (fiz.) 75
 elektron (kovina) 98, 215, 398
 elektronika 280
- elektronke 280
 elektronska obrada podataka 301
 elektronvolt 66
 elektrotehnika 255
 elektrovalentne veze 82
 elementi (kem.) 75, 97
 elementi (stroj.) 483
 elipsa 19, 31
 emajl 219
 emisijski koeficijent 218
 emulzija 97
 endotermijske reakcije 83
 energetske veličine 66
 energija 66, kinetička – 127, potencijalna – 127, unutarnja – 160
 Englerovi stupnjevi 72
 entalpija 67, 157, 160
 entropija 67, 160
 epocikloida 32
 epoksidi 93
 epoksidna smola 473
 epruveta, vidi ispitni uzorak
 erbij 77
 erg 73
 Erichsenov pokus 318
 erozija lopatica 237
 esteri 93
 etan 93, 94, 163, 207
 etanal 93, 94
 etandiol 95
 etanol 93, 94, 159, 203, 206
 etanska kiselina 93, 94
 eten 93, 94, 163, 203
 eter 95
 etil 92
 etilalkohol 93, 94, 207
 etilen 94, 163
 etilenklorid 95
 etin 93, 94, 163, 203, 206
 Eulerov broj (e) 2
 Eulerova jednadžba (izvijanje) 120
 europij 77
 eutektik 342
 evolventa 33
 evolventni zupčanici 560
- fadom 71
 Fahrenheitovi stupnjevi 73
 faktor grijanja 250
 farad 57
 Faradayevi zakoni 261
 faza 97
 fazna struja 267
- fazni napon 267
 – pomak 266
 femto- 58
 fenol 93, 95
 fenolftalein 95
 fenolna smola (fenoplast) 473
 ferit 344
 feritni čelik 346
 fermij 78
 fiksirna sol 91
 filtriranje 97
 fluid 133
 fluor 76, 84
 fluorovodik 83, 87, 88
 fluorovodična kiselina 87, 88
 formaldehid 93, 94
 formalin 94
 formati papira 659
 fosfidi 86
 fosfor 76, 80, 86
 fosforovodična kiselina 87, 88
 fosforni oksidi 84
 fosforovodnik 83, 87
 fosforovodična kiselina 87
 frakcionirana destilacija 206
 francij 77
 Francisove turbine 155
 frekvencija 62, titrajna – 125, – izmjenične struje 266, kružna – 131
 freon 95
 funkcije 33, trigonometrijske – 10
 funta 71
 furnir 472
- gadolinij 77
 gal 71
 galica 90
 galij 76, 80
 gama-zrake 288, 337
 gauss 73
 Gaussova krivulja 57
 Gay-Lussacov zakon 162
 generator, plinski – 206, električni – 266, 278
 generatorski plin 206
 geometrijski red 23
 geometrijske veličine 59
 germanij 76, 80, 280
 gibanje, jednoliko – 124, jednoliko ubrzano – 124, kružno – 125
 giga- 58
 Giorgijev apsolutni sustav jedinica 54
 gips 90
- Glauberova sol 91
 glicerol 94, 95, 159
 glikol 95
 glina 471
 glinica 84, 471
 glodanje 641
 glukoza 95
 gnijezda, središnja – 650
 gon 60
 gorište 602
 goriva 202, 206
 gorka sol 91
 gradiva 100
 gradus 60
 grafit 85, 99, 159, 344
 gram 63
 granica elastičnosti 313
 – plastičnosti 316
 – puženja 320
 granit 100, 216
 Grasshofova značajka 210
 gray 57
 grčka slova 659
 grej 57
 greške mjerenja 52
 grijanje, električno – 268
 grotleni plin 207
 Guldinova pravila 40
 guma 99, 217, 264, 289
 gustoća 63, 98
 – magnetskog toka 70, 262
 – naboja 264
- hafnij 77, 81
 halkogeni 80
 halogeni 81
 Hamiltonov operator 2
 hanij 78
 harmonijsko titranje 125
 hefnerova svijeća 73
 heksagonalna rešetka 341
 hektar 59
 hekto- 58
 helij 76, 81, 159, 163
 henri 71
 herc 57
 Hertzov tlak 568
 Hessov zakon 83
 heterogene smjese 97
 heteropolarne veze 82
 hidraulička ulja 605
 hidraulički promjer 140
 – strojevi 148

hidridi 83
 hidriranje 206
 hidrodinamika 136
 hidroksibenzen 95
 hidroksidi 87
 hidroksil 87
 hidromehanika 133
 hidronalij 393
 hidrostatika 133
 hidrostatski tlak 133
 hiperbola 30, 32
 hiperbolne funkcije 35
 hiperboloidni zupčanici 573
 hipocikloida 38
 hipotenuza 10
 histereza (magn.) 262
 histogram 50
 hitac, kosi – 125
 hladnjak 250, 253
 hlađenje 199
 holmij 77
 homeopolarne veze 82
 homogene smjese 97
 honanje 647
 Hookeov zakon 112
 hrapavost (hidr.) 142
 – površina 500
 Huberov faktor 123
 idealni fluid 133
 – plin 162
 imaginarna jedinica (i) 1
 impedancija 266
 impuls sile 65, 128
 impulsni stavak 137
 inch 71
 indicirana snaga 229
 indicirani tlak 229, 241
 indij 77, 80
 indikator (za pH) 88
 indikatorski dijagram 240, 245
 indukcija, magnetska – 70, 262
 induksijsko zaviranje 621
 induktancija 266
 induktivnost 70, 263
 infleksija funkcije 37
 informatika 301
 infracrveno zračenje 288
 infrazvuk 289
 integral 38
 involuta, vidi evolventa
 ion 78
 ionske veze 82

iridij 77, 81, 158
 iskrenje, pokus – m 338
 isparivač 224
 ispitivanje, – čvrstoće na vlak 314, – – na savijanje 317 – – na tlak 317, udarno – 319, – žica 318, – dubokog izvlačenja 318, – tvrdoće kovina 322, – bez oštećivanja 336, – sustava materijala 328, – tvrdoće plasta 334, – materijala 313, – trajne čvrstoće 320
 ispitni uzorak (epruveta) 314
 ispravljajući 282
 istiskanje 619
 istjecanje, brzina – a kapljevine 138, – – plina 200 – količina – a kapljevine 138, – – plina 200 – kroz sapnice 201
 istosmjerna struja (elektr.) 256
 istosmjerni tok (topl. prenos) 221
 iterbij 77
 itrij 76
 iverice 472
 izentalpa 161
 izentropa, – plinova 166, – para 192
 izmjenična struja 266
 izmjerena vrijednost 52
 izmjenjivači topline 221, 223, 224
 izobara, – plinova 166, – para 192
 izobutan 92
 izohigra 199
 izohora, – plinova 166, – para 192
 izolacijsko ulje 607
 izoliranje 276
 izomeri 92
 izooktan 94
 izoterma, – plinova 181, – para 208
 izotop 78
 izvedene jedinice 53
 izvijanje 120, koeficijenti – a 121
 jakost energetskog zračenja 70
 jakost magnetskog polja, vidi magnetska – jakost polja
 jalov otpor 266
 jalov učin 267
 jard 71
 jedinice 53, stare – 71
 jednadžba stanja plina 162
 – – kontinuiteta 136, 200
 jednadžbe, algebarske – 27, transcendentne – 29,
 jednakostranični trokut 16

jednofazna struja 267
 jednofazni motor 272
 jednoliko gibanje 124
 jednoliko kružno gibanje 125
 jezgra, polumjer jezgre 122
 jezgra, atomska – 75, – presjeka 122
 jezgrenik 613
 jod 77, 81
 jodovodik 83, 87, 88
 jodovodična kiselina 87, 88
 Joule 160
 joule 56, 57
 Jouleova toplina 268
 Joule-Thomson efekt 192
 jugoslavenski standardi JUS 661
 kadmij 71, 81, 158
 kalcij 76, 80
 kalcijске soli 90
 kalcijски hidroksid 87
 kalcijски karbid 85
 kalifornij 78
 kalij 76, 80, 261
 kalijska lužina 88
 kalijske soli 90, 91
 kalijski hidroksid 87, 88
 kaljenje, – čelika 350, – aluminijskih slitina 393
 kalorija 73
 kalorijska vrijednost 203
 kalupi 613
 kandela 54
 kantil 257, 268, 416
 kaolin 471
 kapacitancija 266
 kapacitet, toplinski – 67, električni – 70, 265
 Kaplanova turbina 155
 kaplište ulja 602
 karakteristika, – logaritma 5, – goriva 202, geometrijska – presjeka 113
 karat 71
 karbidi 85
 karboksil 93
 karbonil 93
 karbonske kiseline 93
 karborund 84, 268, 471
 kasiopej, vidi lutecij
 kateta 10
 kation 78
 katodni bakar 400
 katran 99, 206
 katransko ulje 99

kaučuk 96, 99, 473, 480
 kavitacija 149, 153
 kelvin 54
 kemijska analiza 338
 kemijske reakcije 83
 kemijske veze 82
 kemijski elementi 76
 kemijski spojevi 82
 keramički materijal 99, 470
 ketoni 93
 kibernetika 301
 kilo- 58
 kilogram 54
 kilokalorija 73
 kilopond 72
 kilovat 66
 kilovatsat 66
 kinematika 124, 126
 kinematska viskoznost 65, 133
 kinematski, – stožac 572, – valjak 561
 kinesko srebro 404
 kinetička energija 127
 kinetički tlak 147
 kinetika 124, 126
 Kirchhoffov zakon (topl.) 218
 Kirchhoffovi zakoni (el.) 256
 kirij 78
 kiseline 87
 kisik 76, 80, 84, 163, 164, 261
 klimatizacija 253
 klin 21
 klinasti utor (trenje) 110
 – spojevi 548
 klinasto remenje 555
 klizni ležaji 576
 klor 76, 81
 klorid 89
 klorna kiselina 88
 kloroform 95
 klorovodična kiselina 87, 88
 klorovodik 83, 87, 88
 kobalt 76, 81, 158
 kocka 20
 kodiranje 304
 koeficijent, – apsorpcije 218, – emisije 218, – gubitaka 157, – oblika 537, – temperaturnog rastezanja 67, 157, – trenja (hidr.) 141, – – (krut. tijela) 109
 koercitivna sila 262
 koerzit 416
 koherentne jedinice 53
 kokile 615
 koks 99, 206, 207, 217

- koksni plin 206, 207
 kolektorski motor 272
 količina, – gibanja 65, 128, – istjecanja 138, 200, – dimnih plinova 202, – elektriciteta 69
 kolofonij 99
 koloidna, – emulzija 97, – pjena 97, – rastopina 97
 kolumbij (Cb), vidi niobij
 kolutno trenje (111)
 – varenje 621
 kombinatorika 22
 komponente sile 101
 kompresori 242, 245
 kompresorska ulja 605
 kondenzacija 232
 kondenzator (el.) 265
 – (topl.) 248
 konični dršci 652
 konjska snaga 73
 konstanta, Avogadrova – 55, plinska – 162, – zračenja 218
 konstantan 98, 158, 257, 416
 konstrukcijski čelici 357, 360
 kontinuitet, jednadžba – a 136, 200
 kontrakcija materijala 315
 – mlaza 138, 200
 konus, Morseov – 652, metrički – 652, mjerena – a 654
 kopolimerizacija 96
 korak (zupč.) 561
 korelacija 52
 korijeni 3
 korozija 656
 korund 84, 99, 159, 470, 644
 kosi hitac 125
 kosinus 10, 34
 kosinusov stavak 17
 kositar 77, 80, 98, 158, 215, 219, 257, 261, 289
 kositrena bronca 403, 406
 kositrene slitine 413
 kosokutni trokut 17
 kotangens 10, 34
 kotlovac 216
 kotlovi, parni – 223
 kotlovni lim 374
 kovačko zavarivanje 621
 kovanje 618
 kovalentne veze 82
 kovina, bijela – vidi kositrene slitine za ležaje
 kovine 78, 98, lake – 392
 kovinske veze 82
 kovinski karbidi 85, – materijali 340, – oksidi 84, – poluproizvodi 418
 kozmičke zrake 288
 kreda 90, 99
 kreiranje 206
 kremen 84, 99, 216, 264, 471
 krhke tvari 316
 kriolit 99
 kripton 76, 81
 kristali, – rastopinski 342
 kristalna rešetka 341
 krivulja magnetiziranja 263
 krom 76, 81, 219
 kromit 471
 kromni, – karbidi 85, – oksidi 84
 krug 19
 kružište ulja 602
 kružna, – frekvencija 62, 131
 kružni proces 161
 – prsten 19
 kružnica 31
 kružno gibanje 125
 krvni lužac 91
 ksenon 77, 81
 ksilol 93
 kubna rešetka 341
 kubni metar 59, standardni (normni) – – 74
 kugla 21
 kuglični ležaji 577
 kuhinjska sol 89, 91
 kulon 57
 kupelji (topl. obrada) 353
 kurčatovij 78
 kut 60, mjerenje – ova 654
 kut, fazni – 266, – prirodnog pokosa 100
 kutna brzina 62, 125, kritična – – 132
 kutna minuta 60, – sekunda 60
 kutne funkcije 34
 – mjere 60
 kutni stupanj 60
 – profili, čelični – – 426, aluminijski – – 456
 kutno ubrzanje 62, 125
 kutovi na alatu 633
 kvadrat 18, 19
 kvadratne jednadžbe 27, 310
 kvadratni metar 59
 kvarcilit 268
 kvintal 71
 labavost 494
 lak 219
 lake kovine 392
 laminarno strujanje 136
 lanci, čelični – 449, člankasti – 558
 laneno ulje 99
 lantan 77
 lantanidi 79
 Laplaceov operator 2
 Laplaceova transformacija 48
 Lavalova brzina 201
 led 99, 216, 219, 289
 ledeburit 344
 ledeburitni čelik 346
 ledišta vodenih otopina 252
 legirani čelici 357
 lemljeni spojevi 546
 lemljenje 631
 lemovi 414
 lepanje 647
 ležaji 576
 ležajna ulja 603
 ležajne slitine 413
 lijev, sivi – 354, čelični – 384, temperovani – 356
 lijevanje 613
 lijevano željezo 354
 likovi, geometrijski – 18, težišta – a 107
 lim, čelični – 372, 433, aluminijski – 458, bakreni – 462
 linearne jednadžbe 27, 28
 linije, težište – a 106
 linijska struja 267
 linijski naponi 267
 litar 59
 litar – atmosfera 73
 litij 76, 80
 logaritamska funkcija 34
 – temperaturna razlika 221
 logaritamske jednadžbe 29
 logaritamski dekrement 35
 logaritmi 4, dekadski (Briggsovi) – 5, prirodni – 5
 lorencij 78
 ložišni uređaj 223
 ložišta 202
 loživo ulje 99, 206, 207
 lučna mjera 60
 lučno zavarivanje 622, 626
 Ludolfov broj (π) 2
 luk (kružni) 19, 39
 luks 57
 lumen 57
 lutecij 77
 ljepljenka, azbestna – 99, tvrda – 264
 ljepljeni spojevi 546
 ljepljenje 546, 631
 ljevačko zavarivanje 622
 ljuske atomske jezgre 75
 magnet 263
 magnetska indukcija 70, 262
 magnetski lim 369
 – tok 70
 magnetsko ispitivanje 336
 – polje 262
 magnezij 76, 80, 112, 158, 215, 257, 261
 magnezija 84, 159
 magnezijske, – slitine 112, 398, – soli 91
 magnezit 91, 471
 makroskopski pregled 340
 maksimum funkcije 37
 mangan 76, 81, 158
 manganin 98, 158, 257, 416
 manganski oksidi 84
 mantisa logaritma 5
 Mariotte 162
 martenzit 345
 masa 63, 98, molna – 82, relativna atomska – 75
 masene veličine 63
 maseni broj elemenata 75
 – protok 64, 139
 – moment inercije 128, 129
 maslena kiselina 94
 masti 99, 601, 608
 matematika 1
 materijali 100
 matice 550
 matrice 25
 maxwell 73
 Mayer 160
 maziva 601
 mazut 206
 međunarodni sustav jedinica SI 53, 54
 međuosni razmak 562
 međupregrijavanje pare 237
 mega- 58
 mehanika 98, hidro- 133
 melaninska smola 473
 memorije 306
 mendelevij 78
 Mendeljejev, periodični sistem elemenata po – u 79
 metalografski pregledi 340
 metan 93, 94, 163, 203
 metanal 93, 94
 metanol 93, 94

metanska kiselina 93, 94
metar 54, kvadratni – 59, kubni – 59
metastabilni sustav željezo-ugljik 344
metil 92
metilalkohol 93, 94
metilenklorid 95, 189
metilklorid 95, 189
metrički, – konus 652, – navoj 504
miješani plin 206
miješanje 167, 199
mješanci, kristali – 342
mikro- 58
mikron 71
mikroskopski pregled 340
mikrovalovi 288
mili- 58
milja, morska – 59
minimum funkcije 37
minuta, vremenska – 62, kutna – 60
Mishima – slitina 416
mjedeni poluproizvodi 468
mjedi (slitine) 98, 112, 158, 215, 219, 257, 401, 405, 468
mjera rasipanja, vidi varijanca
mjere 53, – veličina 59, stare – 71, anglosaske – 71
mjerenje električnih veličina 286
mjerila (crteža) 659
mjerila temperature, otporna – – 274, termoelektrična – – 259
mjerne greške (greške mjerenja) 52
mlazni (reaktivni) motori 249
mnogokuti, vidi višekuti
modeli, vidi kalupi
modificirani lijev 355
modifikacije 341, – željeza 343
modra galica 90
modul elastičnosti 112, 313
moduli zupčanika 560
Mohrov faktor 123
mol 54
molarnost 68
molekule 82
molibden 76, 81, 158, 268
Mollierov h, s – dijagram za vodenu paru 168, 170/171
– h, x – dijagram za vlažni zrak 198
molna, – entalpija 68, – entropija 68, – masa 68,
molne veličine 68
molni, – volumen 68, – toplinski kapacitet 68
moment, – sile 65, statički – plohe 113,

– inercije plohe 113, 116, – savijanja 114, – otpora presjeka 114, 116, – torzije 117, – zamaha 128, zakretni – 65, 126, – inercije mase 63, 128, 129
monel 98, 215, 409
monofluordiklormetan 95, 191
monofluortriklormetan 95, 190
monokloreten 95
monokloreten 95
monoklormetan 95, 163, 189, 214
monomeri 96
Moodyjeva jednadžba 142
Morseov konus 652
morska milja 59
– voda 59
motori, – s unutarnjim izgaranjem 239, elektromotori 271
motorna ulja 606
mramor 100, 216, 219, 264
mravlja kiselina 93, 94
nabla 2
nadmjere lijeva 613
nafta 99, 206
naftalen (naftalin) 95, 203
nalijeganja, vidi dosjedi nano- 58
napojne pumpe 226
napon (el.) 69, linijski – 267, fazni – 267
naprezanje 65, 112, 313, tlačno – 313, dozvoljeno – 532, – tečenja 316, temperaturno – 113
napuštanje čelika 350
nasute tvari (kutovi) 100
natrij 76, 80, 261
natrijska lužina 88
natrijske soli 91
natrijski hidroksid 87, 88
navoji 504
navoji dosjedi 518
nečistoće 342
nejednadžbe 29
nekovine 78
nekovinski materijali 469
neodim 77
neodređeni integral 38
neon 76, 81, 159
nepovrativi procesi 160
neptunij 78
nerastavljivi spojevi 543
neutralizacijski broj 602
neutralna os (savij.) 114
neutron 75

Newtonov zakon 126, 133
nikal 76, 81, 158, 215, 219, 257, 261, 289, 408
nikal-krom 260
nikelin 257, 416
niklena bronca 404
niklene slitine 409
nikrom 260
Nikuradseova jednadžba 142
njobij 76, 81
nišador, vidi salmijak
nit (svj. jed.) 73
niton, vidi radon
nitrati 89
nitridi 85
nitrili 93
nitriranje čelika 352
nitroglicerin 95
nobelij 78
nodularni lijev 112, 355
normala na krivulju 37
normaliziranje čelika 348
normalna razdioba 51
normalni napor 112
normalno stanje, vidi standardno stanje
normni (standardni) kubni metar 73
nosачи 105
novo srebro 158, 215, 257, 404
nukleoni 75
nukovanje 276
numerička integracija 40
Nusseltova teorija sličnosti 210
Nusseltova značajka 210
njutn 56, 57
obli navoj 528
obrada kovina odvajanjem čestica 632
obrade, posebne – 647
obujam, vidi volumen
octena kiselina 93, 94
određeni integral 39
odstupanje (str. dij.) 486, standardno – 50
oersted 73
ogrjevna moć 67, 203
Ohmov zakon 256
okretaj 62
okretni impuls 128
– moment 126
oksidi 84
oktan 94
oktava 290
olefini 93
olovne, – slitine 412, – soli 91

olovni, – oksidi 84, – poluproizvodi 468, – sulfid 86
olovo 77, 80, 98, 158, 215, 219, 257, 261, 289, 412, 468
om 56, 57
omega, – postupak (izvij.) 121
omjer specifičnih toplinskih kapaciteta plinova 162
omov otpor 256
omova vodljivost 256
opeka 100, 159, 216, 219, 289, 470
opruge 119, čelici za – 371
opterećenje, sastavljeno – 122
optika 288
organski spojevi 92
Orsatov aparat 204
osmerokut 19
osovine 553
osovinska ulja 603
oštrica 633
otopina 97, koloidna – 97, kruta – 97
otopinski kristali 97, 342
otpor, električni – 69, 256, 266, – strujanja 141, – gibanja u fluidu 147
otpor, moment otpora presjeka 114, polarni – – – 117
otporno mjerenje temperature 259
– zavarivanje 621, 623
Ottov motor 239
ozubljenje 561
pad, – entalpije 227, – napona (el.) 274, – vode 154
pakfong 404
palac, vidi col
paladij 76, 81
panel-ploče 472
papir 99, 217, 219
par sila 103
parabola 30, 31
parafini 93
parafinsko ulje 99
paralelepiped 20
paralelogram 18
paralelogram sila 101
pare 168, 200
parna postrojenja 233
parne turbine 230
parni kotlovi 223
– strojevi 228

- Pascalov zakon 134
 paskal 57
 Pečletova značajka 210
 Pečornikova formula 142
 peći, električne – 269
 Peltonova turbina 155
 penetracija masti 602
 pepeljika 89, 90
 pepeo 99
 pera 548
 period 125
 periodički sustav elemenata 79
 perlit 344
 permaloy 416
 permeabilitet 262
 permendur 416
 permutacija 22
 peta- 58
 peterokut 57
 petrolej 99
 pH-vrijednost 88
 phot 73
 pi (π) 24
 piže 72
 piko- 58
 pilasti navoji 524
 piljenje kovina 640
 piramida 20
 pirometri 352
 Pitagorin poučak 16
 pjena, koloidna – 97
 pješčenjak 100, 216
 plamište ulja 602
 plamensko rezanje kovina 625
 plamensko zavarivanje 621, 622, 624
 plasti 473
 plastične tvari 316
 platina 71, 81, 158, 215, 257, 259, 261
 platin-rodij 259
 plemeniti čelici 357
 – plinovi 81
 plinovi, gorivi – 206, idealni – 162, plemeniti – 81, realni – 162
 plinska konstanta 162
 plinske smjese 97, 167
 plinske turbine 247
 plinski generator 206
 plinsko ulje 99, 206, 207
 ploština 18, 39
 ploštinska masa 63
 ploštinske mjere 59
 pluto 99, 217, 289
 plutonij 78
 poaz 72
 pobjegnuće turbine 156
 poboljšanje čelika 357
 podtlak 65
 pogonsko ulje 206
 pokus, vidi ispitivanje
 poise 72
 Poissonov broj 112
 Poissonova razdioba 57
 pokretač, vidi uputnik
 polarni moment otpora presjeka 117, 118
 – – tromosti presjeka 113, 117
 poliamid 473
 polietilen 473
 poligoni, vidi višekuti
 polikarbonat 473
 polimeri 96
 polimerizacija 96, 206
 polimorfizam 341
 polipropilen 473
 polistiren (polistirol) 473
 politropa plinova 166
 poliuretanska smola 473
 polivinilklorid 473
 polje, magnetsko – 262, električno – 262
 polje, jakost polja, – – magnetskog 70, 262, – – električnog 69, 264
 polonij 77
 polumjer, – tromosti 113
 poluproizvodi, oblici kovinskih -a 418
 poluvodjci 280
 pomak zubnog profila 562
 porculan 99, 159, 216, 219, 264, 280
 postavni član 297
 postojanost alata 648
 potaša, vidi pepeljika
 potencijalna energija 127
 potencijalne krivulje 30
 potencije 3
 potpore 104
 pound 71
 povrativi procesi 160
 površina tjelesa 20
 površinska hrapavost 500
 – masa 63
 – zaštita 656
 površinske mjere 59
 prakilogram 55
 prametar 55
 Prandtl–Kármánova jednadžba 141
 Prandtlova značajka 210
 pravac 30
 pravi kut 60
 pravokutni trokut 16
 pravokutnik 18
 prazecodim 77
 pregrijač pare 224
 pregrijana para 168
 preljev 140
 preoblikovanje 618
 presjek, geometrijska karakteristika –a 113
 pretičak zraka 202
 pretvorbe 341, 343, točka – 343
 prigušnice 139
 prijelaz topline 210
 koeficijent -a – 67, 210
 prijenos kružnih gibanja 533
 – topline 210
 prijenosna funkcija 291
 prijenosni faktor 291
 prijenosnici topline, vidi izmjenjivači topline
 prijenosni omjer 560, 572, 573
 prirodna goriva 206
 prirodni broj(e), vidi Eulerov broj
 – kaučuk 473
 prisnost (preklop) 494
 pritisak, – na stijenke 134, – mlaza 153
 prisilno titranje 132
 prividna snaga 267
 prividni otpor 266
 prizma 20
 probojna čvrstoća 264
 procesni računar 312
 procesor 307
 produljenje 112, 313, 315, postotno – 112, 313, 315
 profili, čelični – 429, 431, aluminijski – 456
 progib 114, – užeta 106
 programska oprema 308
 programski jezici 308, 311
 projekcijski poučak 17
 prokaljivost čelika 365, 368
 prolaz topline 220
 koeficijent prolaza topline – 67, 220
 prokron čelici 385
 prometij 77
 promjer 19
 propan 93, 94, 207
 propanal 93, 94
 propanol 93, 94
 propanon 93, 94
 propanska kiselina 93, 94
 propantriol 94, 159
 propelerne turbine 155
 propen 93, 94
 propil 92
 propilalkohol 93, 94
 propilen 94
 propin 93, 94
 prosječna vrijednost 49
 prosjek, statistički – 49
 prosti pad 124
 protaktinij 77
 protočne veličine 64
 protok, maseni – 64, 139, volumenski – 64, magnetski – 70
 proton 75
 protusmjerno strujanje 221
 provrti za vijke 552
 pumpe 148, stapne – 150, turbo- 152, napojne – 226, toplinske – 250
 puni kut 60
 put 124
 puženje 320
 pužni prijenos 574
 – vijak 574
 pužno kolo 575
 rad (mjera) 73
 rad 66, 126, 160
 radij 77
 – tromosti 113
 radijan 57, 60
 radikand 3
 radio-valovi 288
 radna sposobnost pare 227
 radon 77
 rashladne smjese 252
 rashladne tvari 188
 rashladni faktor 251
 – stroj 251
 rasipanje 50
 rasplinjavanje 206
 rastavljivi spojevi 548
 rastezanje, mehaničko – 315, temperaturno – 157
 rasvijetljenost 70, 270
 rasvjeta, električna – 270
 rasvjetni plin 206
 ravninski kut 60
 ravnoteža sila, statička – – 104, dinamička – – 130
 razdioba, normalna – 51
 razmak, osni – 562
 razvrtavanje 638
 reakcija mlaza 137
 reakcije u osloncima 104, 105

reaktancija 266
 reaktivna sila 137
 reaktivni motori 249
 realni fluid 133
 – plin 162
 redovi 22
 redni broj elemenata 75
 refleksija 289
 refrigerator 250
 regenerativno zagrijavanje napojne vode 236
 registarska tona 71
 regresija 52
 regulacija 291
 regulacijski članovi 291
 relativna atomska masa 75
 – dielektričnost 254
 – učestalost 49
 – vlažnost 193
 relativni permeabilitet 162
 rem 73
 remenski prijenos 553
 Renardovi brojevi 483
 rendgenske zrake 288
 renij 77, 81
 repično ulje 99
 rešetkasti nosači 105
 rešetke, kristalne – 341, 343, ložišne – 223
 retortni plin 206
 Reynoldsova značajka 140, 210
 rezanje kovina 619, – – plamenom 625
 rezanje navoja 640
 rezanje, brzina -a 649
 rezultanta sila 101
 ricinusovo ulje 99
 rimske brojke 659
 Rockwell, tvrdoća po -u 330
 rodij 76, 81, 268
 romb 18
 röntgen 73
 Roseova slitina 414
 Rosin-Fehlingov dijagram 204
 roštilji 223
 rotacijsko tijelo 40
 rubidij 76, 80
 rutenij 76, 81

 sadra (gips) 89, 90, 100
 saharin 95
 salicil 95
 salicilna kiselina 95
 salitra 89, 90, 91
 salitretna kiselina, vidi dušična kis.

salmijak 89, 91
 samarij 77
 sapnice 139, 201
 sastavljeno opterećenje 122
 sat 62
 savijanje 619, naprezanje na – 114, moment -a 114
 sedimentacija 97
 sekunda, vremenska – 54, 62, kutna – 60
 selen 76, 80
 senzon 295
 Shore, tvrdoća po -u 334
 shunt 286
 sila, – trenja 109, centrifugalna – 130, reaktivna – 137, veličine – 64
 silicij 76, 80, 280
 silicijski dioksid 84, – karbid 85, 644
 silika 216, 471
 silikarbon 268
 silikon 96
 silikonski kaučuk 473
 silit 268
 silumin 98, 158, 215, 257, 393
 simens 57
 sinterovanje 620
 sinteza 206
 sinus 10
 sinusna funkcija 34
 sinusov poučak 17
 sirovo željezo 343
 sisaljke, vidi pumpe
 sistem dosjeda ISO 486
 – željezo-ugljik 344
 sivert 57
 sivi lijev 98, 112, 158, 215, 219, 257, 317, 345, 354
 skalar 43
 skalarno polje 46
 skandij 76
 skin-efekt 266
 skraćanje 313
 sličnost strujanja 140
 slitine 342
 smična naprezanja 117
 smik 117, modul -a 113
 smirak 99, 644
 Smithov dijagram 321
 smjese 97, plinske – 167, – plinova i para 193
 smola 99, 481
 snaga 66, 127
 soda 89, 91
 soli 82, 89, kuhinjska sol 89

solna kiselina, vidi klorovodična kis.
 – rastopina 99
 sorbit 345
 specifična energija 160, – eksergija 160, – električna vodljivost 256, – entalpija 67, 157 – entropija 67, 160, – masa, vidi gustoća, – težina 64
 specifični električni otpor 69, 256, – toplinski kapacitet 67, 157, – volumen 63
 spektralna analiza 338
 spiralno svrdlo 638
 spoj (elektr.), zvjezdasti – 258, trokutni – 258
 spojevi, nerastavljivi – 543, rastavljivi – 548 utorni – 549, klinasti – 548, vijčani – 550, – sa zaticima i svornjacima 549, lemljeni – 546, stezni – 547, ljepjeni – 546
 spojevi, kemijski – 75, 82, 97
 spremanje podataka 306
 sraz 130
 srebro 77, 81, 98, 158, 215, 219, 257, 261
 središnja gnijezda 650
 srednja vrijednost 26
 stabilni sistem željezo – grafit 344
 stabilnost 104
 stacionarno strujanje 136, 200
 staklena vuna 216
 staklo 99, 159, 216, 219, 264, 289, 469
 standardi, jugoslavenski – (JUS) 661
 standardna divijacija 50
 standardne dužinske mjere 484
 standardni brojevi 483, – (normni) kubni metar 74, – modul 560
 standardno stanje 74
 stanje, – plinova 165, – para 192, – atmosfere 135
 stapne pumpe 150
 stapni kompresori 245, – parni strojevi 245
 statička čvrstoća, trajna – – 320, 539
 statički moment plohe 113, – – sile 103
 statika 101, – uzeta 106, hidro- 133
 statistička vjerojatnost 49
 statistički prosjek 49
 statistika 49
 Stefan-Boltzmannov zakon 218
 Steinerovo pravilo 113, 129
 stelit 390
 steradian 57, 61
 stezni spojevi 547
 stilb 73
 stipsa (alaun) 91
 stirol 93

stojište 343
 stoks (stokes) 72
 stolarske ploče 472
 stopa (mjera) 71
 stožac 21
 stožasti ležaji 589, – zupčanici 572
 strojevi, hidraulički – 148, parni – 228, elementi -a 483
 stroncij 76, 80
 struja (el.) 69, istosmjerna – 256, izmjenična – 266, jednofazna – 267, dozvoljena trajna jakost -e 275
 strujanje, stacionarno – 136, laminarno – 136, turbulentno – 136, – plinova i para 200, toplinsko – 66, svjetlosno – 70
 stupac vode 72
 – žive 72
 stupanj, kutni – 60, – Celzija 66, – Fahrenheita 73, Englerov – 72, – Beauméa 74
 stupanj nejednolikosti 127
 suha destilacija 206
 suha para 168
 suhi zrak 194
 suhoća pare 168
 sulfidi 86
 sumpor 76, 80, 86, 159, 203
 sumporasta kiselina 87
 sumporna kiselina 87, 88
 sumporni dioksid 84, 159, 163, 164, 188, 212, 214
 – trioksid 84
 sumporovodik 83
 sumporovodična kiselina 87
 superfiniš 647
 suspenzije 97
 sušenje 253, 254
 suženje (kontrakcija) 112, 315
 svijeća, hefnerova – 73, međunarodna – 87
 svila 99, 217, 219
 svjetlosna jakost 70, 270
 svjetlosne veličine 70
 svjetlosni tok 70, 270
 svjetlost 288, brzina -i 62, 288
 svornjaci 549
 svrdlo 638

 šamot 99, 216, 219, 471
 šećer 99, 217
 šesterokut 19
 škrob 99, 206
 šperploče 472
 špirit 206
 štrcaljka 148

talij 77, 80
 tangencijalno naprezanje 112
 tangens 10, 34
 tangenta 37
 tantal 77, 81
 Taylorovi redovi 23
 tehnecij 76, 81
 tehnička granica elastičnosti 313
 tehnički rad 160
 tehničko pismo (tisak) 658
 – željezo 343
 tehnologija 613
 teks 63
 telur 77, 80
 temperatura 66, – inverzije 192,
 – izgaranja 205
 temperaturna naprezanja 114
 temperaturni koeficijent rastezanja 67, 157
 temperovani lijev 356
 teorija sličnosti 210
 tera- 58
 terbij 77
 termalno kaljenje 350
 termodinamika 160
 termoelementi 352
 termometri 352
 termonaponi 259
 termoplasti 473, 476
 terpentinsko ulje 99, 159
 tesla 57
 tetiva 19
 Tetmajerove jednadžbe 121
 tetragonalna rešetka 341
 tetraklormetan 95
 težina 64, 98, specifična – 64
 težišta 106
 Thomson 160
 Thomsonova jednadžba 161
 tijela, geometrijska – 18, 20, 108
 tinjac 99, 264
 tiristor 285
 tiskarske slitine 412
 titan 76, 84, 417
 titanske slitine 417
 titrajno dinamičko opterećenje 321
 titranje 131, prigušeno – 35, 131, harmo-
 ničko – 125, prisilno – 132
 tlačno naprezanje 313
 tlačna visina 136
 tlačno ispitivanje 317
 tlak 65, 114, standardni atmosferski – 65,
 hidrostatski – 133
 tlo 216

točkasto zavarivanje 621
 tok, toplinski – 66, svjetlosni – 70
 tokarenje 643
 tolerancija, redovi – 487, polje -e 486
 tolerancije, – dosjeda 494, – mjera 486,
 – mjerila 492, – metričkih navoja 510,
 – zupčanih parova 563
 toluol 93
 tona 63, registarska – 71
 tonska skala 290
 toplane 237
 toplina 66, 157, 160, – izgaranja 67, 203,
 Jouleova – 268
 toplinska obrada čelika 348
 – vodljivost 67, 210
 toplinske pumpe 250
 – veličine 66
 toplinski kapacitet, specifični – – 67, 157,
 molni – – 68
 – prijelaz 67, 210
 – prolaz 67, 220
 – tok 66
 toplinsko zračenje 218
 torr (stupac žive) 72
 torij 77
 Torricellijeva jednadžba 138
 torzija (sukanje) 117, 118, moment -e 117
 torzijska naprezanja 117
 tovarne mjere željezničkih vozila 660
 tračnice, željezničke – 432
 trajna čvrstoća 320
 transcendentne jednadžbe 29
 transformator (el.) 267
 transformatorsko ulje 214, 264
 transurani 78
 tranzistor 284
 trapez 18
 trapezna jednadžba 40
 trapezni navoji 520
 trenje 109, sila -a 109, koeficijent -a 109,
 – valjanja 127, – kolutno 111
 treset 99
 trifluoromonobrommetan 191
 trifluoromonoklormetan 190
 trigonometrijske funkcije 10
 – jednadžbe 29
 triklorometan 95
 trofazni sistem 267
 trohoida 32
 trojna točka vode 66
 trokut 16, 18, 19
 tromost, sila -i 126, moment -i mase 63,

128, 129, moment -i plohe 113, radij -i
 113
 troostit, vidi trustit
 trotil 95
 trustit 345
 TTT – dijagram 345
 tulij 77
 tungsten, vidi volfram
 turbine, vodne – 154, parne – 230, plinske
 – 247
 turbinska ulja 605
 turbokompresori 246
 turbopumpe 152
 turbulentno strujanje 136
 tvari 75, pregled – 97
 tvrdi (bijeli) lijev 355
 tvrdi metali, karbidni – – 390
 tvrdoća, ispitivanje -e 322, – po Brinellu
 322, – po Vickersu 326, – po Rockwellu
 330, – plasteni tvari 334
 ubrzanje (akceleracija) 62, 124, zemaljsko
 – (g) 62, 98, kutno – 62, 125
 učestalost 50
 udarna žilavost 319
 ugljen 99, 206, 207, 208, 217
 ugljičenje čelika 351
 ugljična kiselina 87
 ugljični čelici 357, 379
 – dioksid 84, 159, 163, 164, 188, 212
 – monoksid 84, 159, 163, 164, 203, 207
 ugljik 76, 80, 85, 203
 ugljikova skupina elemenata 80
 ugljikovodici 92
 ukočeno drvo, vidi vezano drvo
 ulje, pogonsko – 206, zemno – 206, plinsko
 – 206, – za loženje 206, 207, – za maza-
 nje 214, 604, transformatorsko – 214,
 264, – za obradu 607
 ultrazvučna obrada 647
 ultrazvuk 289
 umjetna goriva 206
 unakrsno strujanje 221
 unutarnja energija 160
 upojna visina pumpi 149
 upravljanje 291
 uputnik 277
 uran 77
 uranidi, vidi transurani
 usporjenje, vidi retardacija
 utiskivanje 619
 utorni spojevi 549
 uzemljenje 276

uzgon 134
 užad, statika -i 106, čelična – 443, bakrena
 – 464

vakuum, vidi podtlak
 vakuumirane cijevi 280
 valencija 80
 valovanje, elektromagnetsko – 288
 valjak 20
 valjanje (valjno trenje) 111
 valjanje 618
 valjkasti ležaji 581
 valjni ležaji 577
 vanadij 76, 81
 vapnenac 89, 90, 99, 100, 216
 vapno 84, 87, 88, 99, – gašeno 88
 varijacija 22
 varijanca 50
 vat 56, 57
 vatni učin 267
 vazelin 608
 vazelinska ulja 607
 veber 57
 vektori 43
 vektorsko polje 46
 veličine 53, vremenske – 62, energetske
 – 66, električne – 69, geometrijske – 59,
 svjetlosne – 70, toplinske – 66, masene
 – 63, – sile 64, protočne – 64, molne
 – 68, – zračenja 68
 veličinske jednadžbe 53
 ventilatori 153
 ventili (el.), poluprovodnički – 280
 ventilni čelici 377
 Venturijeva sapnica 139
 vezano drvo 472
 veze, kemijske – 82
 Vicat, ispitivanje po -u 335
 Vickers, tvrdoća po -u 326
 vidna svjetlost 288
 vijci 550
 vijčani spojevi 550
 vijčani zupčanici 573
 vinil 93
 vinilklorid 95
 viskoznost 65, 133, 602
 višekuti 18, pravilni – 19
 višestruki integral 41
 vitkost 120
 vjerojatnost, statistička – 49
 vlačna čvrstoća 315
 vlačni pokus 314
 vlak 114

vlaknasti plasti 482
 vlaknatice 472
 vlastita frekvencija 131
 vlastito titranje 131
 vlaženje zraka 199
 vlažni zrak 193, 194, 195
 vlažnost 193
 voda 83, 99, 159, 164, 175/187, 214, 257, 289
 vodena para 213, zasićena -- 172, pregrijana -- 168, 175
 vodeni plin 206
 vodič električne struje 265
 vodični peroksid 83
 vodič 76, 80, 83, 159, 163, 164, 203, 207, 212, 261
 vodljivost, električna -- 69, 259, toplinska -- 67, 210
 vodna snaga 154
 vodne turbine 154
 vodovi, električni -- 274
 volfram 77, 81, 158, 215, 257
 volframovi oksidi 84
 volt 56, 57
 volumen 59, -- tjelesa 20, specifični -- 63, molni -- 68
 volumenska masa 63
 volumenske mjere 63
 volumenski protok 64, 139
 vosak 99
 vremenska statička čvrstoća 320, 539
 vremenske, -- mjere 62, -- veličine 62
 vremenski odziv 292
 vretenska ulja 603
 vrijednost, prosječna -- 49, pH- -- 88
 vrijeme 62
 vučenje 619
 vuna 99, 217, troščana -- 216
 Whitworthov profil cijevnog navoja 519
 Widia 390
 Wöhlerova krivulja 321
 Woodova slitina 414
 yard 71
 zagrijač (parni kotl.) 224
 zahvat (zupč.) 565
 zakovice 543
 zakovični spojevi 543
 zamašni moment 128
 zamašnjak 127
 zapremina, vidi volumen
 zasićena para 168
 zaštita električnih instalacija 275
 zatici 549
 zavari 544
 zavarivanje 621, -- taljenjem 622
 zelena galica 90
 zemaljsko ubrzanje 62
 Zemlja (planet) 99
 zemlja (tlo) 99
 zemni plin 206
 zemno ulje 206
 zemno-alkalijske kovine 80
 zid 100, 216
 zlato 77, 81, 98, 158, 215, 219, 261
 zračenje 288, toplinsko -- 218
 zračni plin 206
 zrak 163, 164, 167, 169, 212, vlažni -- 193, 195
 zrake 288, gama -- 288
 zupčani prijenos 560
 zupčanici (parovi) 561, 574
 zvučna brzina 201, 289
 zvučni tlak 290
 zvuk 289
 žarenje čelika 348
 žbuka 100, zidna -- 216
 željezne slitine 343
 -- soli 90
 željezni karbid 85
 -- oksidi 84
 željeznička kola (mjere) 660
 željezo 76, 84, 158, 215, 257, 261, 289, 343
 žica, čelična -- 442, aluminijska -- 451, bakrena -- 463
 žice za zavarivanje plamenom 624
 žilave tvari 316
 žilavost, udarna -- 319
 živa 77, 81, 159, 214, 257, 261, 289
 živin ventil 280
 živo (prženo) vapno 84

Znak: 8806 P

Izdanje

STROJARSKI PRIRUČNIK
 Deveto prerađeno i popunjeno
 hrvatsko ili srpsko izdanje

Autor

Univ. prof. u m.
 dipl. ing. **BOJAN KRAUT**
 zaslužni profesor Fakultete za strojništvo
 Univerze Edvarda Kardelja u Ljubljani,
 počasni doktor Univerze u Mariboru

Preveo sa slovenskoga

Dipl. ing. **MIROSLAV PEČORNIK**
 umirovljeni profesor Tehničkog fakulteta
 Sveučilišta Vladimir Bakarić u Rijeci

Izdavač

IRO TEHNIČKA KNJIGA
OOOR IZDAVAČKA DJELATNOST
 Zagreb, Jurišićeva 10

Za izdavača odgovara

Ing. **ZVONIMIR VISTRičKA**

Urednik izdanja

Ing. **SREČKO ŠOŠTARIĆ**

Naklada

20 000 primjeraka

Tisak

Tiskarna Ljudske pravice u Ljubljani
 Tisak dovršen u lipnju 1988.

© B. Kraut, 1954

YU ISBN 86-7059-063-8