

Sredstva za spajanje u mehatronici

Krsnik, Neven

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:938775>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

SREDSTVA ZA SPAJANJE U MEHATRONICI

Završni rad br. 13/MEH/2020

Neven Krsnik

Bjelovar, rujan 2020.



Veleučilište u Bjelovaru

Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Krsnik Neven**

Datum: 21.07.2020.

Matični broj: 001755

JMBAG: 0314017816

Kolegij: **ELEMENTI PRECIZNE MEHANIKE**

Naslov rada (tema): **Sredstva za spajanje u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. dr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Ivana Jurković, mag. educ. philol. angl. et germ., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 13/MEH/2020

U radu je potrebno:

- opisati elemente precizne mehanike (općenito)
- opisati elemente i načine spajanja u mehatronici
- opisati nerastavljive spojeve
- opisati rastavljive spojeve
- prikazati osnove proračuna za svaku vrstu spajanja
- prikazati primjere proračuna.

Zadatak uručen: 21.07.2020.

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

Zahvala

Zahvaljujem se svim profesorima Veleučilišta u Bjelovaru na prenesenom znanju, a posebno mentoru dr. sc. Stjepanu Golubiću na pomoći i svim savjetima prilikom pisanja završnog rada.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. ELEMENTI PRECIZNE MEHANIKE	2
2.1 Podjela elemenata strojeva	3
2.2 Normizacija (standardizacija)	4
2.3 Tolerancije (dopuštena odstupanja)	6
2.4 Dopuštena naprezanja i čvrstoća	10
2.4.1 Dopuštena naprezanja	11
2.4.2 Čvrstoća	13
3. NERASTAVLJIVI SPOJEVI	15
3.1 Zavareni spojevi	15
3.1.1 Nastajanje spoja zavarivanjem	17
3.1.2 Pravila pri izradi zavarenih spojeva	18
3.1.3 Vrste spojeva i oblici šavova	21
3.1.4 Proračun	22
3.1.5 Primjer proračuna	25
3.2 Lemljeni spojevi	25
3.2.1 Vrste i oblici lemljenih spojeva	26
3.2.2 Postupci lemljenja	28
3.2.3 Osnove oblikovanja lemljenih spojeva	29
3.2.4 Proračun	31
3.2.5 Primjer proračuna	34
3.3 Lijepljeni spojevi	34
3.3.1 Vrste lijepljenja i ljepila	36
3.3.2 Oblikovanje lijepljenog spoja	36
3.3.3 Proračun	38
3.3.4 Primjer proračuna	39
3.4 Zakovični spojevi	40
3.4.1 Zakovica	41
3.4.2 Vrste zakovica	42
3.4.3 Oblikovanje zakovičnih spojeva	44
3.4.4 Podjela zakovičnih spojeva	46
3.4.5 Proračun	48
3.4.6 Primjer proračuna	49
3.5 Stezni spojevi	50
3.5.1 Vrste spajanja steznih spojeva	50
3.5.2 Proračun	53
4. RASTAVLJIVI SPOJEVI	55
4.1 Vijčani spoj	55
4.1.1 Navoj	56
4.1.2 Vijak	60
4.1.3 Matica	61
4.1.4 Podloške za osiguravanje	62
4.1.5 Materijali za vijke i matice	63
4.1.6 Proračun	63
4.1.7 Primjer proračuna	66
4.2 Spojevi glavine	67
4.2.1 Spojevi uzdužnim klinovima	67
4.2.2 Proračun uzdužnih klinova	69

4.2.3	Spojevi perima	70
4.2.4	Spojevi s klinastim vratilima	73
4.2.5	Proračun spojeva s klinastim vratilima	74
4.2.6	Spojevi sa zupčastim vratilima	74
4.2.7	Proračun spojeva sa zupčastim vratilima	75
4.2.8	Spojevi s poligonim profilima vratila	75
4.2.9	Konični spojevi	76
4.2.10	Proračun koničnih spojeva	76
4.2.11	Spojevi ostvareni steznom glavinom	76
4.2.12	Proračun spojeva sa steznim glavinama	77
4.2.13	Spojevi s čeonim ozubljenjem	77
4.2.14	Proračun spojeva s čeonim ozubljenjem	78
4.3	<i>Spojevi sa zaticima i svornjacima</i>	79
4.3.1	Zatik	79
4.3.2	Svornjak	81
4.3.3	Proračun svornjaka i zatika	82
4.3.4	Primjer proračuna zatika i svornjaka	86
4.4	<i>Opruge</i>	88
4.4.1	Karakteristika opruga	88
4.4.2	Materijali za opruge	90
4.4.3	Cilindrične vlačne i tlačne opruge	91
4.4.4	Proračun vlačne i tlačne opruge	94
4.4.5	Primjer proračuna vlačne opruge	95
5.	ZAKLJUČAK	96
6.	LITERATURA	97
7.	OZNAKE I KRATICE	99
8.	SAŽETAK	106
9.	ABSTRACT	107

1. Uvod

Tema ovog završnog rada dolazi iz područja proizvodnog strojarstva. Unutar ovog rada opisana su sredstva koja se najčešće koriste pri ostvarivanju veza u mehatronici. Svaki mehatronički sustav koji obavlja određenu funkciju sastoji se od više zasebnih podsustava. Svaki podsustav sastoji se od velikog broja strojnih dijelova ili strojnih elemenata povezanih u cjelinu koja omogućava normalno funkcioniranje sustava. Veze koje se ostvaruju u povezivanju strojnih dijelova i strojnih elemenata mogu se podijeliti na nerastavljive veze i rastavljive veze koje se opisuju kroz ovaj rad.

U početnom dijelu rada navedena je podjela elemenata strojeva, te su opisane tolerancije i norme. Također, navedena su dopuštena naprezanja i opisana čvrstoća materijala. Nadalje, u poglavlju 3 opisani su nerastavljivi spojevi u mehatronici. Od nerastavljivih spojeva opisani su zavareni spojevi, lemljeni spojevi, lijepljeni spojevi, zakovični spojevi i stezni spojevi. Svaki način ostvarivanja spoja općenito je opisan tako da su navedeni oblici spoja, nastanak i osnove oblikovanja spoja, vrste spoja, prednosti i nedostaci spoja te su navedene osnove proračuna uz priloženi primjer proračuna. U poglavlju 4 opisani su rastavljivi spojevi u mehatronici. Od rastavljivih spojeva opisani su vijčani spojevi, spojevi glavine, spojevi sa zaticima i svornjacima te spojevi oprugama. Poglavlje vijčanih spojeva prikazuje te opisuje navoj i navedeni su oblici navoja, prikazani su standardni vijci, matice i podloške, opisani su materijali pogodni za izradu vijaka te su prikazane osnove proračuna uz priložen primjer proračuna. U spojevima glavine opisani su spojevi klinovima, perima, klinastim vratilima, zupčastim vratilima, poligonim profilima vratila, konični spojevi, spojevi sa steznim glavinama i spojevi s čeonim ozubljenjem. U spojevima sa zaticima i svornjacima opisan je zatik, svornjak i navedene su osnove proračuna zatika i svornjaka uz priložen primjer proračuna. Kod opruga opisana je karakteristika opruga, navedeni su materijali od kojih se opruge izrađuju, opisane su cilindrične tlačne i vlačne opruge za koje su prikazane osnove proračuna i jedan primjer proračuna.

2. ELEMENTI PRECIZNE MEHANIKE

Svaki stroj, bilo da je to stroj u industriji, automobil, građevinski stroj ili bilo koji drugi stroj ili uređaj, sastavljen je od velikog broja dijelova koji zajedno povezani čine skladnu cjelinu koja je sposobna obavljati određenu funkciju za koju je namijenjena. Unutar te skladne cjeline svaki ugrađeni element obavlja određenu ulogu koja je ključna za ispravno funkcioniranje stroja. Svaki stroj ili uređaj se može rastaviti na jednostavnije dijelove koji se mogu podijeliti u nekoliko skupina. Prema [1] skupine u koje se dijelovi mogu podijeliti prema složenosti su:

- Strojni dio – sačinjava osnovni, gradivni dio stroja koji ima točno određenu ulogu u cjelokupnom skupu te zajedno s ostalim osnovnim dijelovima (zakovica, osovina, vratilo, opruga, zupčanik, vijak, matica, itd.) omogućuje ispravno funkcioniranje stroja. Strojni dio je najjednostavniji oblik i ne može se rastaviti.
- Sklop stroja – sačinjava više strojnih dijelova povezanih u skup koji obavlja određenu funkciju unutar sustava stroja. Primjer sklopa stroja je ventil, mehanizam brisača vjetrobranskog stakla na vozilima, itd.
- Grupa – sačinjava je više strojnih dijelova ili sklopova stroja povezanih u cjelinu koji obavljaju određenu funkciju unutar sustava stroja. Primjer grupe unutar stroja može biti motor, sustav za dizanje lifta, zupčasti mjenjač, itd.
- Strojni element – može biti strojni dio ili sklop koji obavlja osnovne, elementarne funkcije. U element stroja pripada strojni dio, strojni sklop ili grupa. Primjeri strojnih dijelova koji mogu biti i strojni elementi su vratilo, osovina, opruga, itd. Primjeri strojnih sklopova i grupe koji mogu biti strojni elementi su valjni ležaj, spojka, kočnica, kuglični ležaj, itd.
- Opći element stroja – podrazumijeva strojne elemente koji se primjenjuju u raznim strojevima, a to su vijci, klinovi, pera, zakovice, remenice, zupčanici, opruge, itd.
- Posebni element stroja – ovoj skupini pripadaju elementi koji imaju primjenu samo kod posebnih strojeva. U skupinu posebnih elemenata strojeva pripadaju elementi hidrauličnog uređaja, razni elementi alatnih uređaja, strojni elementi motornih vozila, parnih i plinskih turbina, itd.

2.1 Podjela elemenata strojeva

Prema funkciji koju obavljaju u određenom sustavu elementi precizne mehanike nazivaju se još i elementi strojeva te se mogu podijeliti u sljedeće skupine [2]:

- Sredstva za spajanje
 - Nerastavljivi spojevi
 - Zavareni spojevi
 - Lemljeni spojevi
 - Lijepljeni spojevi
 - Zakovični spojevi
 - Stezni spojevi
 - Rastavljivi spojevi
 - Pričvrtni vijci
 - Pokretni vijci
 - Spojevi glavine
 - Zatici
 - Svornjaci
 - Opruge
- Sredstva okretnog gibanja
 - Osovine
 - Vratila
 - Rukavci
 - Ležaji
 - Spojke
- Prijenosnici snage i gibanja
 - Tarni prijenosnici
 - Remenski prijenosnici
 - Lančani prijenosnici
 - Zupčani prijenosnici
 - Planetarni prijenosnici
 - Pužni prijenosnici
- Cijevni vodovi i zaporni organi
 - Cijevi
 - Zaporni organi

- Brtve i brtvljenje
 - Statičke brtve
 - Dinamičke brtve
 - Bezdodirne brtve
- Stapni mehanizmi i njihovi dijelovi
 - Zamašnjaci
 - Ručice i koljenasta vratila
 - Ekscentri
 - Ojnice
 - Križne glave
 - Klipovi i stapovi

2.2 Normizacija (standardizacija)

Elementi precizne mehanike su se na početku razvoja tehnike konstruirali i izrađivali samo za potrebe određenog stroja, te prema tome svaki stroj je imao dijelove i strojne elemente specifičnih karakteristika i dimenzija što je znatno otežavalo popravke na tim strojeva budući da je za svaki stroj trebalo proizvesti odgovarajući strojni dio kojim bi se samo taj stroj mogao popraviti. Daljnjim razvojem tehnike i povećanjem broja različitih strojeva uočena je mogućnost izrade jednakih dijelova za veći broj strojeva te je to dovelo do razvoja normizacije, odnosno standardizacije. Normizacija (standardizacija) je proces čiji je osnovni cilj uklanjanje razlika između proizvoda predviđenih za istu namjenu. Normizacija pridonosi prikladnosti proizvoda, usluga i proizvodnih postupaka u primjeni. Prema [3] osnovni su ciljevi normizacije (standardizacije):

- Racionalna raznovrsnost
- Kompatibilnost i zamjenjivost proizvoda
- Sigurnost i zaštita života i zdravlja potrošača, okoliša i imovine
- Uklanjanje prepreka u trgovini
- Olakšanje tehnološke suradnje
- Bolji privredni učinci.

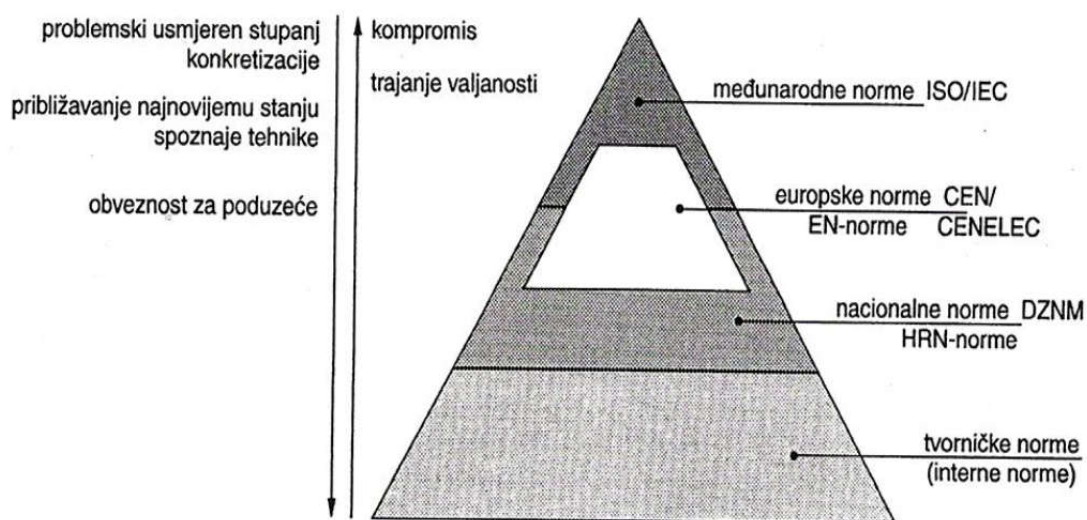
Rezultat uvođenja normi u tehniku je optimalno rješenje koje u najvećoj mjeri pogoduje proizvođaču i potrošaču određene robe. Norma određuje upravo one karakteristike proizvoda koje su najpovoljnije i za proizvođača i za krajnjeg korisnika. Isto tako, norma omogućuje veću masovnost proizvoda, a rezultat toga je u konačnici i jeftiniji

proizvod. Jedna od prednosti normizacije je i zamjenjivost standardnih elemenata, što omogućuje brže popravke i laku zamjenu dotrajalih dijelova novima.

Dvije su osnovne metode normizacije (standardizacije) [3]:

- Selektivna normizacija (standardizacija) polazi od raspoloživog mnoštva karakteristika stanja, stvari i pojava (karakteristični parametri, karakteristične dimenzije i sl.) i njihovih vrsta te se odabiru neke karakteristike ili neki nazivi i to se proglašava normom (standardom). Takva norma ima nepravilno stupnjevano karakteristike, a prednost ove norme je u zadržavanju postojećih karakteristika. U pripremi ove norme lakše se postiže sporazum budući da u tom radu podjednako sudjeluju i proizvođači i potrošači. Selektivna metoda normizacije naziva se još i naknadnom, a donedavno je bila jedina metoda normizacije.
- Sistemska (sustavna) normizacija (standardizacija) polazi od činjenice da između većine proizvoda i procesa postoje prirodni ili sustavni odnosi. Iz tog razloga se ne promatra samo predmet normizacije nego i svi drugi predmeti koji mogu utjecati na njega. Sustavna normizacija se naziva još i razvojno prateća standardizacija. Stalno je u porastu, a posebno se primjenjuje u područjima koja se brzo razvijaju.

Norme se mogu podijeliti i na razine normizacije. Sve razine normizacije čine sustav s uzajamnim vezama i međusobno se preklapaju. U sveobuhvatnom sustavu normizacije sudjeluju privredna poduzeća, nacionalne privrede i svjetske privrede. Norma može biti međunarodna norma, nacionalna norma ili tvornička (interna) norma, a navedene razine normizacije mogu se prikazati u normizacijskoj piramidi koja je prikazana na slici 2.1.



Slika 2.1: Normizacijska piramida [2]

Međunarodne organizacije koje su specijalizirane za normizaciju (standardizaciju) su međunarodna organizacija za normizaciju ISO (International Standardizing Organization) koja pokriva sva područja osim elektrotehnike i elektronike. Područja elektrotehnike i elektronike pokriva međunarodna tehnička komisija IEC (International Electrotechnical Commission). Tehnički odbori (Technical Committee, TC) zaduženi su za izradu međunarodnih normi. Odbor za koordinaciju određuje područje rada tehničkih odbora, a glavni je izvršni odbor koji odobrava to područje. Bitno je napomenuti da norme ISO i IEC nisu obavezne, ali postaju obavezne ako se unesu u ugovore kao osnova za međusobne obaveze ili ako se na njih pozove u propisima [3, 4].

2.3 Tolerancije (dopuštena odstupanja)

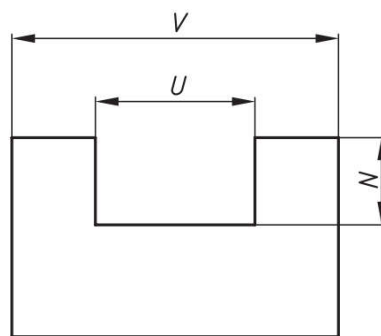
Tolerancije ili dopuštena odstupanja sastavni su dio elemenata strojeva budući da nam daju potrebne informacije o tome koliko stvarna mjera smije odstupati od nazivne mjere (zadane mjere). Za ispravno funkcioniranje tehničkih sustava, konstrukcijski elementi tog sustava moraju međusobno pristajati na odgovarajući način te prema tome konstrukcijski elementi moraju imati odgovarajuće mjere. Prilikom izrade elemenata strojeva nije moguće izraditi savršeno točno svaku dimenziju zbog nepreciznosti i netočnosti strojeva i alata, toplinskih utjecaja okoline te nehomogenosti materijala, stoga je potrebno propisati dozvoljene greške mjera uz koje će sustav normalno funkcionirati. Jedan od razloga zašto je bitno propisati tolerancije je i ekonomski faktor. Visoka točnost nije uvijek ekonomski opravdana jer znatno poskupljuje proizvodnju, a često nije ni potrebna. Prema definiciji, tolerancija je odstupanje od zadane mjere uz koje će određeni dio normalno obavljati svoju funkciju [5, 6, 7].

Tolerancije mogu biti [2]:

- Tolerancije mjera
- Tolerancije oblika
- Tolerancije orijentacije
- Tolerancije smještaja
- Tolerancije vrtnje
- Tolerancije hrapavosti površine.

Tolerancije mjera toleriraju funkcionalne mjere, montažne mjere, tehnološke mjere te ostale mjere koje utječu na kvalitetu proizvoda. Tolerancije su utemeljene na normi ISO

286. ISO sustav je razrađen za mjere konstrukcijskih elemenata kružnog presjeka, ali se može primijeniti i na bilo koje druge mjere. Za označavanje vanjskih mjera predviđene su posebne tolerancije, a posebne za označavanje unutarnjih mjera. U normama za tolerancije, vanjske mjere su predstavljene osovinom i označavaju se malim slovima abecede. Vanjska mjera je mjera između dviju paralelnih ploha koje ograničavaju određenu geometriju konstrukcijskog elementa izvana, na slici 2.2 vanjska mjera je označena slovom V. Unutarnje mjere su predstavljene cilindričnim provrtima i označavaju se velikim slovima abecede. Unutarnja mjera je mjera između dviju paralelnih ploha koje ograničavaju određenu geometriju konstrukcijskog elementa iznutra, na slici 2.2 unutarnja mjera je označena slovom U. Mjere koje se ne mogu svrstati niti u vanjske niti u unutarnje nazivaju se neodređene i označene su slovom N.

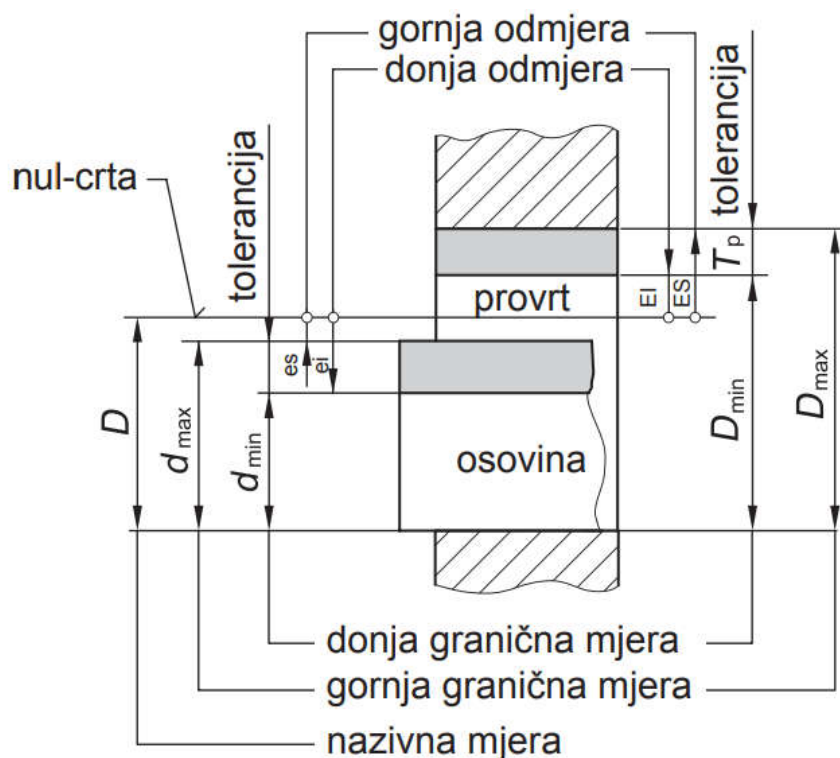


Slika 2.2: Vanjska-V, unutarnja-U i neodređena-N mjera [7]

Karakteristične veličine mjera i odstupanja [5, 7, 8]:

- Stvarna mjera (I) je mjera koja je ustanovljena mjerenjem na izrađenom strojnom elementu. Ako se nalazi unutar tolerancijskog polja strojnog komada, komad se može koristiti kao ispravan, a ako prekoračuje navedeno tolerancijsko polje strojni dio se šalje na doradu ili u slučaju da se ne može popraviti odbacuje se kao škart. Ova mjera uzima u obzir i pogrešku pri mjerenju. Oznake za stvarnu mjeru su i , D_s , d_s ili N_s .
- Granična mjera (G) je najveća ili najmanja dopuštena mjera između kojih se mora nalaziti stvarna mjera ispravno izrađenog konstrukcijskog elementa.
- Gornja granična mjera (Gg) je najveća dopuštena stvarna mjera. Oznake su i , D_{\max} , d_{\max} , D_g ili d_g .
- Donja granična mjera (Gd) je najmanja dopuštena stvarna vrijednost mjere. Označava se s D_{\min} ili d_{\min} , odnosno D_d ili d_d .

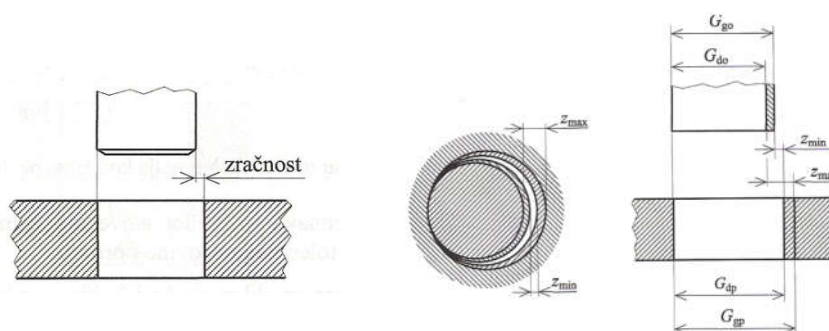
- Tolerancija mjera (T) određuje se rasponom između gornje granične vrijednosti i donje granične vrijednosti mjera. $T = Gg - Gd$.
- Polje tolerancije je područje omeđeno gornjom i donjom graničnom mjerom.
- Nominalna (nazivna) mjera (N) je mjera koja se kao kota unosi na tehnički crtež, služi kao osnova za određivanje odstupanja. Nazivna mjera se može nalaziti u tolerancijskom polju, ali može biti i izvan njega.
- Nul-linija (0-linija) je ravna linija u grafičkim prikazima tolerancijskog polja i istovjetna je nazivnoj mjeri. Odstupanja se računaju od nul-linije.
- Gornje odstupanje je raspon između gornje granične vrijednosti i zadane mjere. Kod osovine, odnosno vanjskih mjera, označava se sa es i računa se prema formuli $es = dg - N$. Kod provrta, unutarnjih mjera, označava se s ES i računa se prema formuli $ES = Dg - N$.
- Donje odstupanje je raspon između donje granične vrijednosti i zadane mjere. Kod osovine, odnosno vanjskih mjera, označava se s ei , a kod provrta, odnosno unutarnjih mjera označava se s EI .



Slika 2.3: Karakteristične veličine mjera i odstupanja [8]

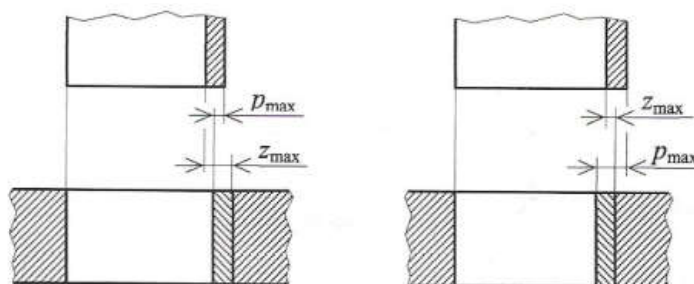
Dosjed je odnos između dvaju dijelova jednog sklopa, npr. osovina i provrt. Da bi oni bili spojeni u jednu cjelinu, potrebno ih je izraditi u određenim tolerancijama odnosno odstupanjima. Prema vrsti, dosjedi se mogu podijeliti na [8]:

- Labavi dosjed – postoji zračnost u dosjedu jer je gornja granična vrijednost mjere vratila manja od donje granične vrijednosti mjere provrta. Labavi dosjed prikazuje slika 2.4.



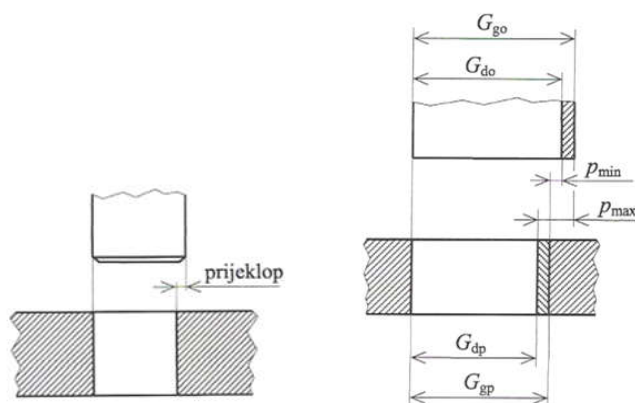
Slika 2.4: Labavi dosjed [2]

- Prijelazni dosjed je dosjed u kojem može nastati ili prisnost ili zračnost. Prijelazni dosjed prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5: Prijelazni dosjed [2]

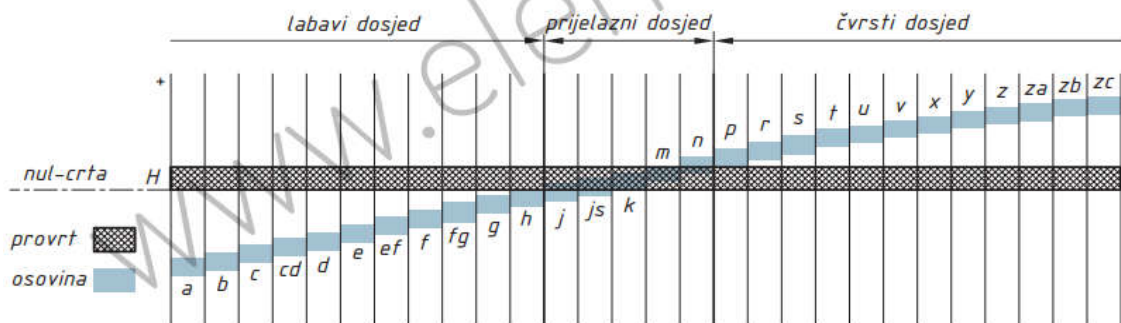
- Čvrsti dosjed – dosjed u kojem ne postoji zračnost jer je donja granična vrijednost mjere vratila veća od gornje granične vrijednosti mjere provrta. U čvrstom dosjedu pojavljuje se prijeklop. Čvrsti dosjed prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6: Čvrsti dosjed [2]

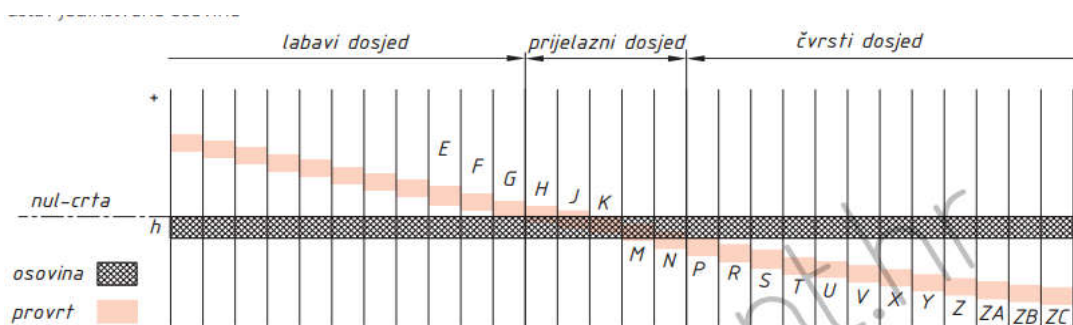
Prema ISO sustavu postoje dva dosjedna sustava [8]:

- Sustav zajedničkog provrta – sve unutarnje mjere imaju tolerancijsko polje H, a tolerancijska polja vanjskih mjera uzimaju se prema željenom dosjedu. Na slici 2.7 prikazan je sustav zajedničkog provrta.



Slika 2.7: Sustav zajedničkog provrta [8]

- Sustav zajedničke osovine – sve vanjske mjere imaju tolerancijsko polje h, a tolerancijsko polje unutarnjih mjera uzima se prema željenom dosjedu. Na slici 2.8 prikazan je sustav zajedničke osovine.



Slika 2.8: Sustav zajedničke osovine [8]

2.4 Dopuštena naprezanja i čvrstoća

Svi elementi strojeva tijekom svog životnog ciklusa susreću se s opterećenjem i naprezanjem. Da bi se odredila radna sposobnost elemenata strojeva, treba odrediti toplinska i mehanička opterećenja koja će djelovati na te elemente u vremenu eksploatacije. U tom vremenu mogu biti izloženi statičkom ili dinamičkom opterećenju, vlačnom, tlačnom, savojnom, torzijskom ili udarnom opterećenju. Takva opterećenja izazivaju u elementu odgovarajuća naprezanja (vlačno, tlačno, savojno, smično, torzijsko). Da bi strojni elementi izdržali navedena opterećenja i naprezanja, potrebna im je određena čvrstoća. Čvrstoća elementa podrazumijeva sposobnost elementa da u predviđenom vremenu korištenja ne dođe do nedozvoljenih oštećenja koja bi mogla oštetiti sustav ili izazvati opasnu okolinu za čovjeka.

2.4.1 Dopuštena naprezanja

Izloženost strojnih elemenata opterećenjima izaziva određena naprezanja. Ta naprezanja ne smiju niti u kojem slučaju prijeći granicu elastičnosti. U obzir se uzimaju i dodatna nepredvidiva opterećenja te se prema njima konstruira određeni strojni element tako da se materijal ne napreže niti do granice elastičnosti. Dopuštena naprezanja se računaju uz faktor sigurnosti. Faktor sigurnosti se mijenja ovisno o uvjetima rada i može imati vrijednosti od 2 do 10. Oznaka za dopušteno naprezanje je σ_{dop} i računa se prema relaciji (2.1). Kod materijala s izraženim prijelazom u plastično područje umjesto vlačne čvrstoće materijala R_m uzima se granica razvlačenja (tečenja) R_e .

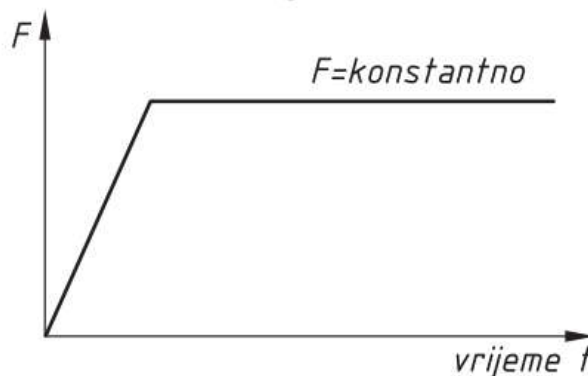
$$\begin{aligned}\sigma_{\text{dop}} &= R_m/\nu \\ \sigma_{\text{dop}} &= R_e/\nu\end{aligned}\quad (2.1)$$

Dopuštena naprezanja ovise o opterećenju kojem je strojni element izložen i prema tome naprezanja može biti [2]:

- Vlačno σ_{dop}
- Tlačno $-\sigma_{\text{dop}}$
- Savojno $\sigma_{\text{f dop}}$
- Smično (tangencijalno) $\tau_{\text{s dop}}$
- Torzijsko (uvijanje) $\tau_{\text{t dop}}$

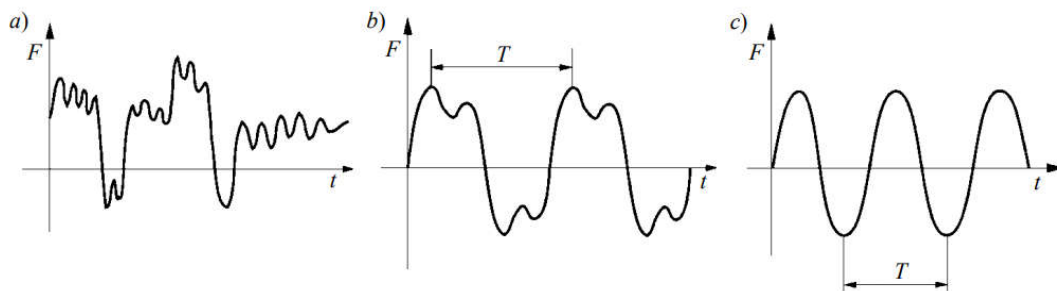
Opterećenje može biti konstantno ili se može mijenjati s vremenom pa prema tome razlikujemo statičko i dinamičko opterećenje.

Statičko ili mirno opterećenje karakterizira konstantnost opterećenja, odnosno intenzitet opterećenja je jednak, nepromjenjiv. Posljedica statičkog opterećenja bit će statičko naprezanje u elementu. Na slici 2.9 prikazan je odnos sile koja djeluje na strojni element i vremena u statičkom opterećenju.



Slika 2.9: Statičko opterećenje [8]

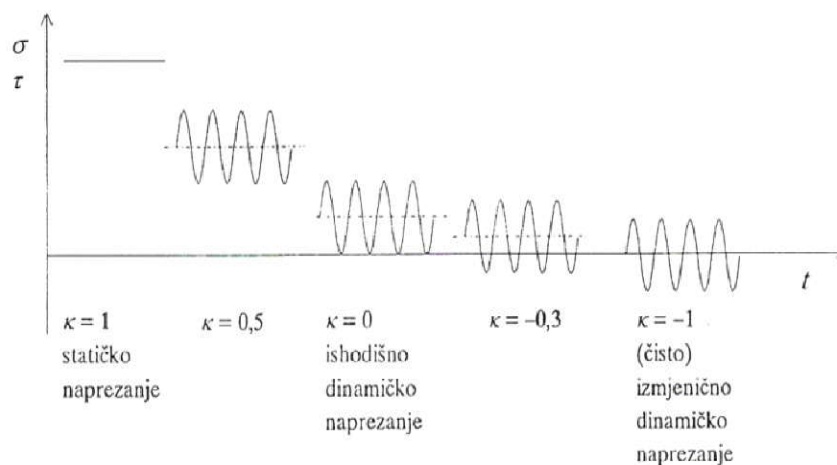
Dinamičko opterećenje ima svojstvo promjenjivosti opterećenja u vremenu. Promjenjivost može biti po smjeru ili po veličini. Promjena veličine opterećenja može biti harmonička, periodička ili stohastička što prikazuje slika 2.10. Pravilne periodičke promjene prikazuje sinusoida. Mogu se pojaviti i udarna opterećenja kod koji se veličina opterećenja mijenja skokovito s kratkotrajnim impulsima. Nadalje, opterećenja mogu biti istosmjernog ili izmjeničnog karaktera. Ako dinamičko naprezanje mijenja predznak, odnosno ako sinusoida prelazi preko apscise $\sigma = 0$, radi se o izmjeničnom naprezanju, a ako to nije slučaj, tada se govori o pulsirajućem naprezanju [1].



Slika 2.10: Dinamička opterećenja
a) stohastička; b) periodička; c) harmonička [1]

S obzirom na promjenjivost tijekom vremena, dinamičko naprezanje može biti [2]:

- Pulsirajuće dinamičko naprezanje
- Čisto pulsirajuće dinamičko naprezanje
- Opći slučaj izmjeničnog dinamičkog naprezanja
- Čisto izmjenično dinamičko naprezanje
- Udarno naprezanje
- Statičko naprezanje.



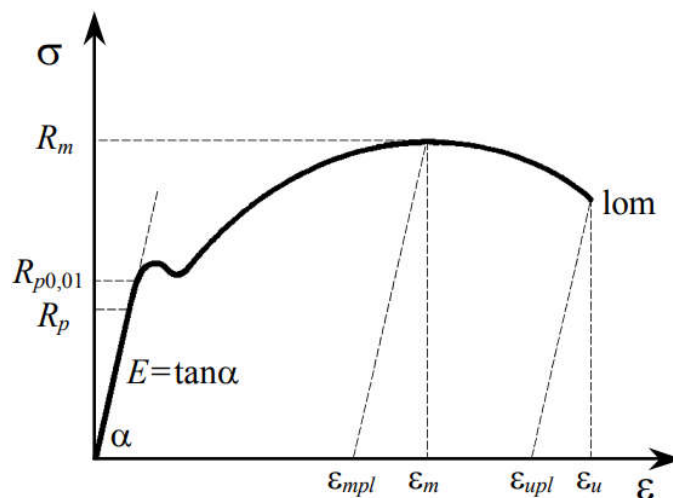
Slika 2.11: Vrste naprezanja s obzirom na promjenjivost tijekom vremena [2]

2.4.2 Čvrstoća

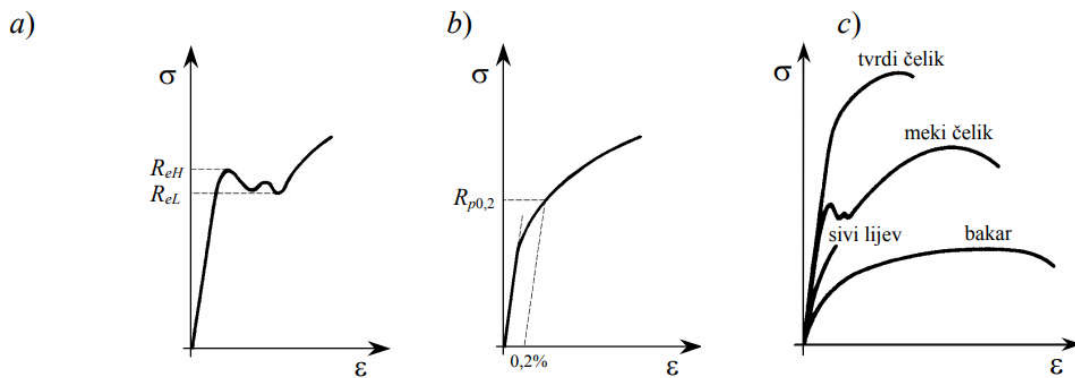
U vremenu eksploatacije, svi elementi strojeva izloženi su određenom opterećenju. Da bi oni izdržali to opterećenje i obavljali funkciju za koju su namijenjeni potrebna im je određena čvrstoća. Čvrstoća je svojstvo elementa stroja kojim se element odupire pojavi opasnih oštećenja koja su posljedica raznih opterećenja. Dvije su vrste nedozvoljenih oštećenja. Nastaju kod graničnih opterećenja i mogu biti lom (ili pukotina koja može uzrokovati lom) ili plastične deformacije. Uvjet da ne dođe do oštećenja je da na mjestu napreznja elementa σ_{dop} (dopušteno napreznje) ima manju vrijednost od σ_{gr} (graničnog napreznja) koje može uzrokovati nedopuštena oštećenja prema relaciji (2.2). Granično napreznje određuje se na temelju karakteristike materijala koji se koristio za izradu strojnog elementa [1].

$$\sigma_{\text{dop}} < \sigma_{\text{gr}} \quad (2.2)$$

Ako je strojni element izložen statičkom napreznju te ako je bitno da se ne pojavi lom, tada se u obzir uzima statička čvrstoća R_m . Ako nije dozvoljena niti plastična deformacija na strojnom elementu koji je pod statičkim opterećenjem, tada se uzima u obzir granica tečenja materijala R_e . Granica tečenja nije jednako izražena kod svih materijala. Kod mekših materijala (meki čelik) lako se može odrediti granica tečenja, dok kod tvrdih materijala (tvrđi čelik) to nije slučaj. Zato je za materijale kod kojih nije izražena granica tečenja dogovorena tehnička granica tečenja koja se označava s $R_{p0,2}$. Tehnička granica tečenja je ono napreznje koje će nakon rasterećenja ostaviti trajnu deformaciju od 0,2 %. Na slici 2.12 prikazan je dijagram rastezanja za meki čelik, a na slici 2.13 prikazani su dijagrami rastezanja nekih materijala.



Slika 2.12: Grafički prikaz rastezanja mekog čelika [1]

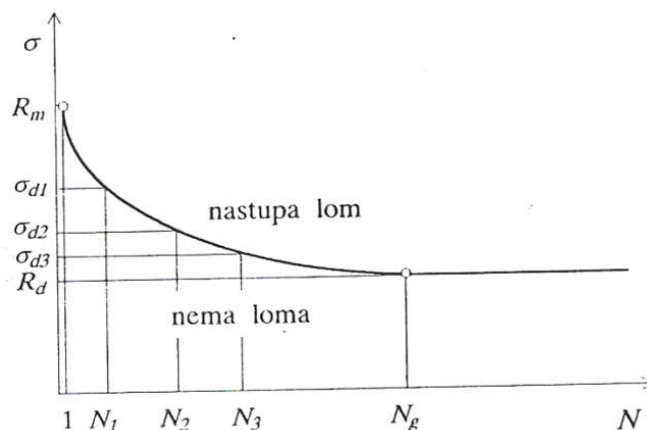


Slika 2.13: Grafički prikaz razvlačenja materijala

a) granica razvlačenja mekog čelika; b) dogovorena granica razvlačenja;

c) grafički prikaz naprezanje-deformacija ovisno o materijalu [1]

Strojni elementi izloženi promjenjivom (dinamičnom) naprezanju duže vrijeme, lome se kod znatno manjeg naprezanja od granice razvlačenja i statičke čvrstoće. Izazvani lomovi su posljedice zamora materijala. Lomovi izazvani zamorom materijala nastaju bez prethodnog razvlačenja materijala, bez obzira na to o kojoj se vrsti materijala radi. U procesu zamaranja materijala ne prelazi se granica tečenja, a lom nastaje zbog inicijalne pukotine koja je posljedica gomilanja plastičnih deformacija na mjestu mikrokoncentracije naprezanja. Da bi se izbjeglo stvaranje pukotina i u krajnjem slučaju lom, uvedena je trajna dinamička čvrstoća R_d . Konstantna (trajna) dinamička čvrstoća označava najveće promjenjivo opterećenje koje može izdržati materijal prilikom beskonačnog broja ciklusa N , a da se ne pojavi lom. Ako je strojni element izložen vremenski promjenjivom opterećenju (dinamičko opterećenje), tada će mjerodavna karakteristika čvrstoće biti trajna dinamička čvrstoća R_d (granica zamora materijala). Dinamička čvrstoća prikazuje se Woehlerovim dijagramom prema slici 2.14.



Slika 2.14: Woehlerov $\sigma - N$ dijagram u linearno-logaritamskom mjerilu [2]

3. NERASTAVLJIVI SPOJEVI

Nerastavljivi spojevi su takvi spojevi koji se ne mogu rastaviti bez razaranja vezivnog sredstva. Nakon razaranja spoja, vezivno sredstvo se više ne može koristiti za ponovno ostvarivanje veze. Veza između materijala koji se povezuju ostvaruje se neposredno (taljenje i skrućivanje primarnog materijala) ili uz dodavanje dopunskog materijala koji može biti lem ili ljepilo.

Prema nastanku, nerastavljivi spojevi dijele se na [8]:

- Spojeve nastale promjenom materijala
 - Zavareni spojevi
 - Lemljeni spojevi
 - Lijepljeni spojevi
- Spojeve nastale plastičnom deformacijom
 - Zakovični spojevi
 - Spojevi presavijanjem
 - Spojevi pregibanjem i utiskivanjem
- Spojeve nastale elastičnom deformacijom
 - Stezni spojevi.

3.1 Zavareni spojevi

Zavarenim spojem smatra se spajanje dijelova pomoću zavara koji nastaje nekim od postupaka zavarivanja. Upotrebljavaju se za spajanje konstrukcija i raznih strojnih elemenata. Postupak zavarivanja podrazumijeva ostvarivanje veze između metalnih ili nemetalnih dijelova taljenjem ili omekšavanjem osnovnog materijala na mjestu spoja, ili uz dodavanje dodatnog materijala. Zavarivanje je postalo jedan od najvažnijih postupaka spajanja zbog veće slobode u oblikovanju konstrukcija, manjeg troška za materijal u odnosu na kovane ili lijevane dijelove, zavareni dijelovi mogu imati do 50 % manju težinu u odnosu na lijevane dijelove i zbog uštede u troškovima za modele i alate. Mjesto na kojem se ostvaruje veza između elemenata koji se spajaju naziva se zavar. Zavar zajedno s zavarenim elementima sačinjava zavaren spoj. Više pojedinačnih dijelova međusobno povezanih zavarivanjem čine zavareni dio, a više zavarenih dijelova čini zavareni sklop. Elementi zavarivanja obično imaju isti ili slični sastav materijala uz jednaku temperaturu taljenja. Usprkos tome, zavarivati se mogu i materijali različitog sastava. Zavareni spojevi se primjenjuju za izradu nepropusnih spojeva, prijenos sila, momenata savijanja i uvijanja

te se koriste na visokim temperaturama. Iako zavareni spojevi imaju i nedostatke, ipak je zavareni spoj istisnuo zakovične spojeve u strojarstvu i u graditeljstvu [1, 2, 5, 10].

Prednosti zavarenih spojeva [2]:

- Najekonomičniji kod manjeg broja zavara i velikih dijelova
- Zavarene konstrukcije lakše su od kovanih i zakovicama spojenih konstrukcija
- Površine zavarenog spoja su relativno glatke
- Čvrstoća zavarenog spoja je jednaka ili nešto malo manja od čvrstoće osnovnog materijala
- Mogućnost popravka zavarenog spoja.

Nedostaci zavarenih spojeva [1, 2]:

- Raznolika kvaliteta zavarenog spoja zbog velikog broja faktora
- Moguće povećanje krhkosti te pojave uključaka, pukotina i zaostalih naprezanja
- Mogućnost spajanja samo istih ili sličnih materijala
- Nema rupa koje određuju montažu
- Zbog cijene, zavareni spojevi nisu primjenjivi u velikoserijskoj proizvodnji
- Mjesto zavarivanja potrebno je primjereno oblikovati te očistiti od oksida
- Manja otpornost na koroziju
- Slabo prigušivanje vibracija.

S obzirom na namjenu, zavarivanje je [2]:

- Zavarivanje – spajanje dva ili više elemenata
- Navarivanje – nanošenja dodatnog materijala na osnovni materijal u svrhu poboljšanja svojstava površinskog sloja osnovnog materijala.

Najvažniji zavarivi materijali [10]:

- Čelici s 0,3 % ugljika
- Neželjezni materijali kao što su aluminij, bakar, cink, mjed, bronca.

Postupci zavarivanja teljenjem za metale [10]:

- Plinsko zavarivanje
- Otporno zavarivanje

- Elektrolučno zavarivanje
- Zavarivanje plazmom
- Zavarivanje elektronskim snopom
- Zavarivanje svjetlosnim snopom.

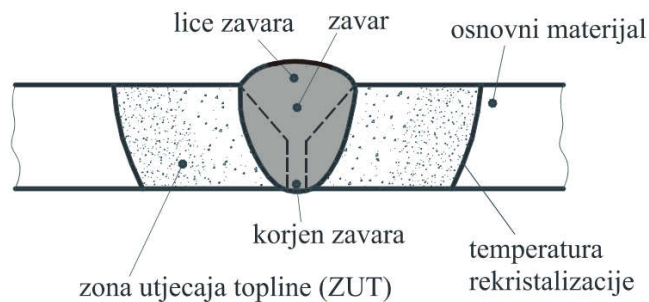
Postupci zavarivanja termoplastičnih umjetnih masa [10]:

- Zavarivanje toplinskim impulsom
- Zavarivanje vrućim plinom
- Zavarivanje grijaćim tijelima
- Frikcijsko zavarivanje
- Dielektrično visoko frekventno zavarivanje.

3.1.1 Nastajanje spoja zavarivanjem

Zavareni spojevi ostvaruju se kohezijskom silom unutar zavara i njom se ostvaruje neraskidiva cjelina. Prema načinu nastajanja kohezijske sile, razlikuje se zavarivanje uz pomoć toplinske energije (taljenjem) i zavarivanje uz pomoć mehaničke energije (toplo ili hladno).

Zavarivanjem energijom topline zavaruju se dijelovi istog ili sličnog materijala te dopunski materijali zagrijavanjem na temperaturu višu od temperature tališta. Nakon taljenja, u području spoja spajaju se taline primarnog i sekundarnog (dopunskog) materijala. Nakon hlađenja ostvaruje se spoj zbog kohezijskih sila među atomima primarnog i sekundarnog materijala. Slika 3.1 prikazuje dijelove zavara [1].



Slika 3.1: Zavar nastao taljenjem [1]

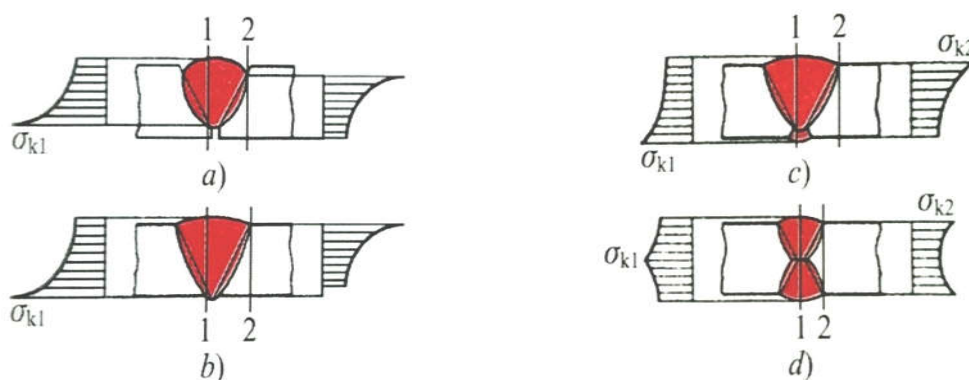
Zavarivanjem mehaničkom energijom ostvaruje se zavareni spoj bez dodavanja materijala. Na mjestu spajanja materijali se izlažu velikoj plastičnoj deformaciji koja uzrokuje nastajanje adhezijskih i kohezijskih sila među elementima spajanja. U odnosu na

postupak zavarivanja taljenjem, postupak zavarivanja pritiskom je jednostavniji i ekonomičniji te je zato prikladan za primjenu u velikoserijskoj proizvodnji [1].

3.1.2 Pravila pri izradi zavarenih spojeva

Prilikom izrade zavarenih spojeva treba se držati određenih pravila da bi izrađeni zavareni spoj imao zadovoljavajuću kvalitetu. Svakako, kvaliteta će ovisiti i o kvalifikaciji i o sposobnosti zavarivača. Pravila kojih se treba držati prilikom izrade zavarenog spoja su sljedeća [10]:

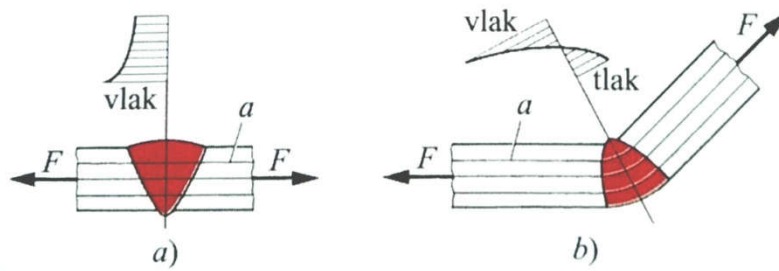
1. Potrebno je izbjegavati zarezno djelovanje jer loš spoj osnovnog i dodatnog materijala u korijenu zavora pri dinamičnom opterećenju može dovesti do loma. Na slici 3.1 prikazana je podjela naprezanja u pravilno i nepravilno izvedenom zavoru.



.Slika 3.2: Naprezanje u tupom zavarenom spoju (σ_k zarezna naprezanja)

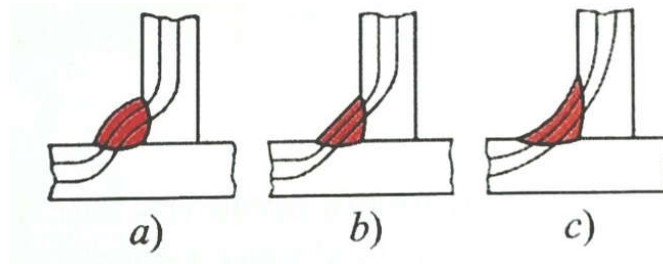
- a) V-zavar s loše provarenim korijenom; b) V-zavar s dobro provarenim korijenom;
- c) V-zavar uz čist i zavaren korijen; d) X-zavar [10]

2. Potrebno je izbjeći skretanje sile na mjestu zavora. Skretanje sile u zoni zavora izaziva vršna naprezanja koja su prikazana na slici 3.3. Pri statičkom opterećenju to će umanjiti čvrstoću te sposobnost plastičnih deformacije što može izazvati krti lom. Pri dinamičkom opterećenju materijal će se brže razoriti budući da se njegova dinamička izdržljivost snizuje. Tupi zavari bolje podnose promjenjiva opterećenja nego kutni budući da u njemu ne dolazi do skretanja sile. Od kutnih zavora prikazanih na slici 3.4 najveću dinamičku otpornost imaju udubljeni kutni zavari zbog najslabijeg skretanja sile.



Slika 3.3: Naprezanje u zavarenom spoju uz skretanje sile

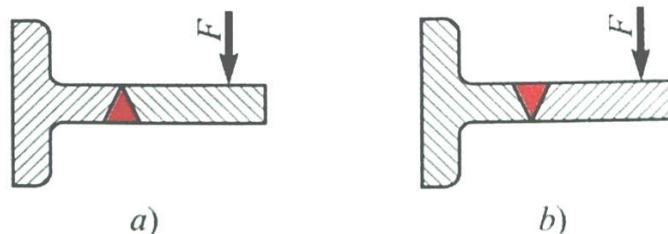
a) tupi zavar; b) kutni zavar [10]



Slika 3.4: Tok sile u kutnom zavaru

a) ispupčen kutni zavar; b) ravni kutni zavar; c) upušten (udubljen) kutni zavar [10]

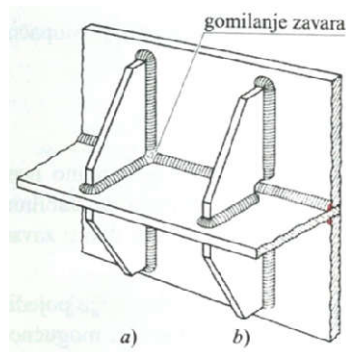
- Potrebno je izbjeći naprezanje na vlak u korijenu. Ako je moguće, korijen zavara uvijek treba biti tlačno opterećen. Na slici 3.5 prikazano je povoljno i nepovoljno postavljanje zavara.



Slika 3.5: Savojno opterećeni zavari

a) nepovoljno vlačno opterećen korijen zavara;
b) povoljno tlačno opterećen korijen zavara [10]

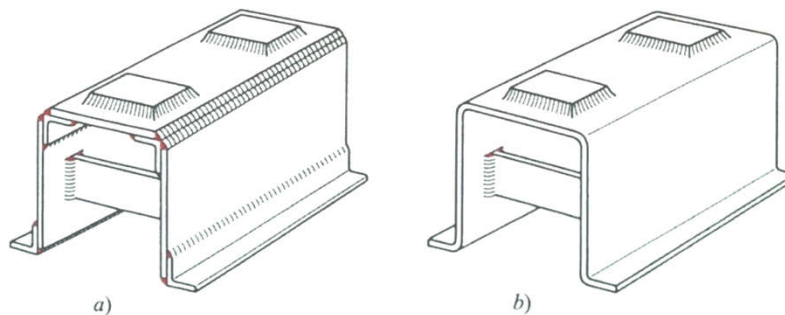
- Izbjegavati gomilanje zavara. Gomilanjem zavara dovodi se prekomjerna količina topline koja zagrijava materijal i nakon hlađenja uzrokuje unutarnja napreznja. Na slici 3.6 prikazano je nagomilavanje zavara te kako to izbjeći. Gomilanje zavara prema slici 3.6 može se izbjeći optimalnom debljinom zavara.



Slika 3.6: Privarena rebra

a) nepravilno zbog gomilanja zavara; b) pravilno [10]

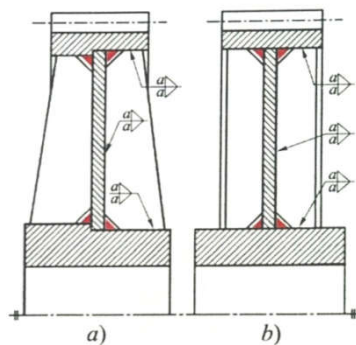
5. Dati prednost poluproizvodima. Zavareni dijelovi su jeftiniji uz korištenje poluproizvoda. Kod izrade dijelova prednost imaju plosnati i profilirani čelici, cijevi, skošeni ili savijeni ili autogeno zavareni limovi. Na slici 3.7 prikazano je zavareno podnožje u nepravilnoj izvedbi s gomilanjem zavara i mnogo pojedinačnih dijelova i u pravilnoj izvedbi korištenjem poluproizvoda.



Slika 3.7: Podnožje nastalo zavarivanjem

a) nepravilno – previše zasebnih dijelova i zavara;
b) pravilno – korištenje poluproizvoda [10]

6. Izbjegavati skupe pripreme radove. Dijelove poskupljuju radovi oko krojenja i obrada rezanjem te iz tog razloga potrebno je izbjegavati nepotrebno smanjenje promjera tokarenjem, obradu kosih ili okruglih rubova limova i raznih profila što prikazuje slika 3.8. Savijanjem i pregibanjem rubova često se mogu uštedjeti zavareni šavovi.



Slika 3.8: Zavareni zupčanik

a) nepravilno zbog tokarskih radova na glavi i vijencu, te potrebe krojenja rebara; b) pravilno [10]

7. Paziti na pristupačnost šavova. Potrebno je ostaviti dovoljno prostora za pristup alata za zavarivanje.

3.1.3 Vrste spojeva i oblici šavova

Tablica 3.1 Taljeni zavari prema normi EN 22553 [1]

Naziv zavora	Oznaka	Priprema	Izvedba	Naziv zavora	Oznaka	Priprema	Izvedba
Sučeonni spojevi							
Zavar s ivicom	∩			Polovični Y zavar	Y		
I zavar				Dvostruki Y zavar	X		
V zavar	∇			K zavar	K		
Polovični V zavar	∇			U zavar	U		
Široki V zavar	∇			Dvostruki U zavar	U		
X zavar	X			J zavar	J		
Y zavar	Y			Dvostruki J zavar	K		
Kutni spojevi							
Kutni zavar	△			Ugaoni zavar	△		
Dvostruki i kutni zavar	△						
Rubni spojevi							
Rubni plosnati zavar	≡			Rubni V zavar	≡		

Tablica 3.2: Mehanički zavari prema normi EN 22553 [1]

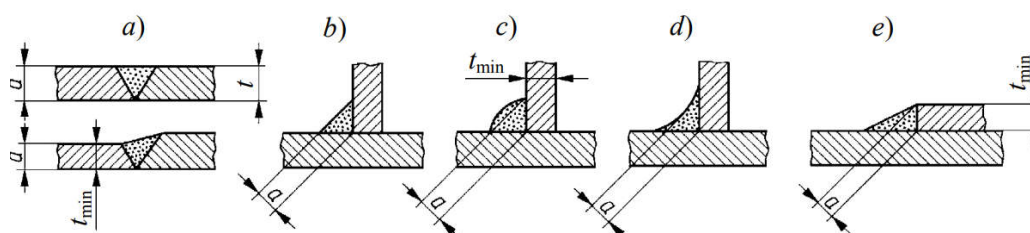
Naziv	Oznaka	Priprema	Izvedba	Naziv	Oznaka	Priprema	Izvedba
Čeoni spojevi							
Zavar s zadebljanjem				Gnječeni zavar			
Zavar sa srhom							
Preklopni spojevi							
Jednoredni točkasti zavar				Bradavičasti zavar			
Dvoredni točkasti zavar				Šavni zavar			

Tablica 3.3: Vrste spojeva prema DIN 1912 (HRN EN 22553) [10]

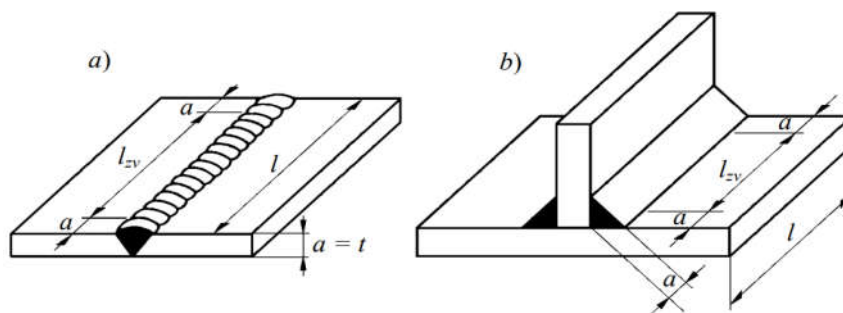
<i>Preklopni spoj</i> Dijelovi se preklapaju		<i>Čelni (tupi) spoj</i> Dijelovi leže u jednoj ravni	
<i>Paralelni spoj</i> Dijelovi leže po široj strani jedan uz drugog		<i>Kosi spoj</i> Jedan dio naslonjen je koso na drugi	
<i>T-spoj</i> Dva dijela spajaju se tako da je jedan dio svojim krajem okomito postavljen na površinu drugoga		<i>Kutni spoj</i> Krajevi dijelova položeni su jedan prema drugome pod bilo kojim kutom	
<i>Križni spoj</i> Dva dijela koji leže u jednoj ravni naslanjaju se okomito na treći između njih		<i>Višestruki spoj</i> Tri ili više dijelova spajaju se krajevima pod bilo kojim kutom	

3.1.4 Proračun

Čvrstoća zavarenog spoja računa se prema osnovnim izrazima čvrstoće. Uspoređuju se radno naprezanje i dopušteno naprezanje u zavaru. Zavar se smatra samostalnim elementom, a radno naprezanje se određuje u kritičnim presjecima zavara. Za sučeone zavare to je okomiti presjek uzduž osi zavara, prema slici 3.9. Za kutne zavare to su ravnine zavara na spojenim elementim, prema slici 3.10. Za proračun je najbitnije odrediti ukupnu nosivu površinu zavara $A_{zv} = \Sigma(a \cdot l_{zv})$, gdje je a debljina, a l_{zv} korisna dužina zavara koji podnosi opterećenje [1].



Slika 3.9: Debljina zavara potrebna za računanje
a) sučeoni zavari; b) kutni zavar; c) ispupčen kutni zavar;
d) upušten kutni zavar; e) raznostraničan kutni zavar [1]



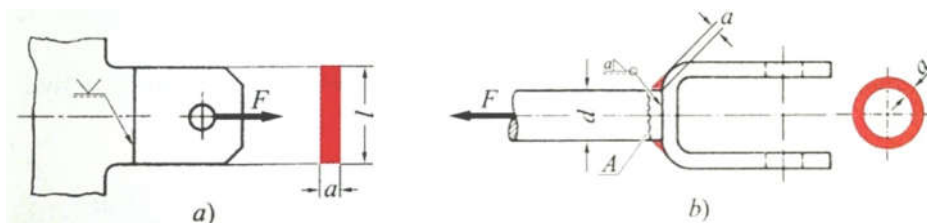
Slika 3.10: Dužina zavora za računanje l_{zv}
a) sučeoni zavari; b) kutni zavari [1]

Vlačno i tlačno opterećenje zavora silom koja uzrokuje stanje naprezanja određuje se prema relaciji (3.1):

$$\sigma_{\perp v,t} = \frac{F}{\sum(a \cdot l)} \quad (3.1)$$

Gdje je:

$\sigma_{\perp v,t}$	[N/mm ²]	vlačno ili tlačno naprezanje u zavaru
F	[N]	vlačna ili tlačna sila
$\sum(a \cdot l)$	[mm ²]	površina zavora
a	[mm]	debljina zavora
l	[mm]	korisna duljina zavora



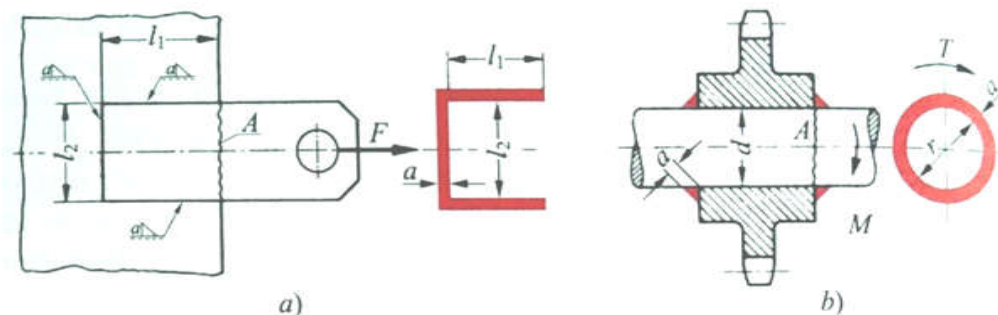
Slika 3.11: Zavareni priključci opterećeni na vlak
a) tupi zavar; b) kutni zavar [10]

Smično naprezanje određuje se prema relaciji (3.2):

$$\tau_{\parallel} = \frac{F}{\sum(a \cdot l)} \quad (3.2)$$

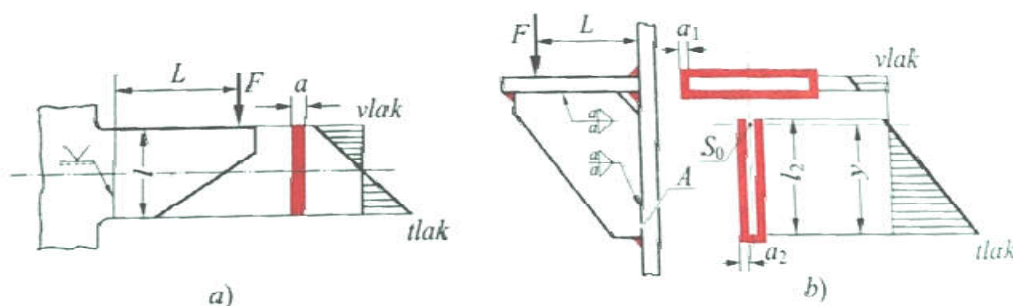
Gdje je:

τ_{\parallel}	[N/mm ²]	naprezanje na smik u zavaru
F	[N]	sila na površini zavora koja opterećuje na smik; na slici 3.12 b) $F=T/r$ sa T za torzioni okretni moment
$\sum(a \cdot l)$	[mm ²]	površina zavarenog šava; na slici 3.12 a) $\sum(a \cdot l) = a(2l_1 + l_2)$, a na slici 3.12 b) $\sum(a \cdot l) = a(d + a)\pi$



Slika 3.12: Zavareni priključci opterećeni na smik
 a) bočni i tupi kutni zavar; b) kružni kutni zavar opterećen momentom okretanja i savijanja [10]

Pri opterećenju zavara savojnim momentom M , javlja se savojno naprezanje koje prikazuje slika 3.13. Izražava se prema relaciji (3.3):



Slika 3.13: Savojno opterećen zavar
 a) tupi zavar; b) kutni zavar [10]

$$\sigma_{\perp f} = \frac{M}{I_{zav}} \cdot y \quad (3.3)$$

Gdje je:

$\sigma_{\perp f}$	[N/mm]	vlačno ili tlačno savojno naprezanje u zavaru
M	[mm ⁴]	moment savijanja na površini šava $M = F \cdot L$
I_{zav}	[mm ⁴]	moment tromosti na površini zavara
y	[N/mm ²]	udaljenost naprezanja na savijanje od težišnice površine zavara

Kada na nekom presjeku zavara postoji jako opterećena točka određenog zavara, te ako istodobno djeluje naprezanje na tlak ili vlak i naprezanje na savijanje, potrebno ih je skupiti u jedno rezultatno normalno naprezanje. Ako u nekom opasnom presjeku osim

normalnog naprezanja ili rezultirajućeg normalnog naprezanja, djeluje još i dodatno okomito smično naprezanje, tada treba računati s ekvivalentnim (reduciranim) naprezanjem koje se računa prema relaciji (3.4) [10].

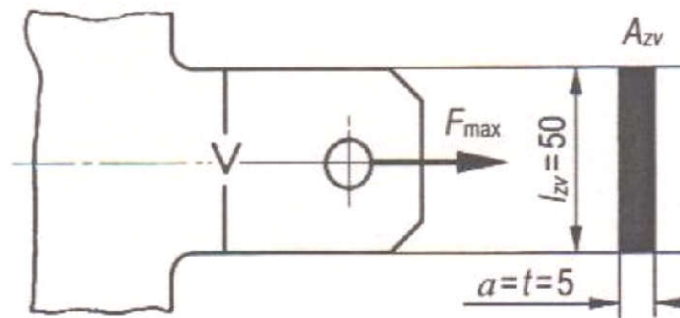
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 2\tau^2} \quad (3.4)$$

Gdje je:

- σ_{red} [N/mm²] reducirano naprezanje u zavaru
- σ [N/mm²] normalno naprezanje u zavaru prema relaciji (3.1) ili (3.3),
- τ [N/mm²] naprezanje na smik u zavaru okomito ili uzduž smjera zavara

3.1.5 Primjer proračuna

Ušica opruge zavarena je na kućište V zavarom. Materijal ušice i kućišta je čelik E295 (Č0545). Zavar je opterećen silom od 25 kN prema slici 3.14. Potrebno je provjeriti naprezanje u zavaru za $\sigma_{dop} = 138 \text{ N/mm}^2$ [2].



Slika 3.14: Ušica opruge [2]

Rješenje:

naprezanje u zavaru računa se prema relaciji (3.1) i iznosi:

$$\sigma = \frac{F}{\sum(a \cdot l)} = \frac{F}{a \cdot (l_{zv} - 2 \cdot a)} = \frac{25\,000 \text{ N}}{5 \cdot (50 - 2 \cdot 5)} = \frac{25\,000 \text{ N}}{200 \text{ mm}^2} = 125 \text{ N/mm}^2$$

Zaključak:

Zavareni spoj zadovoljava jer stvarno naprezanje ne prelazi dopušteno naprezanje u zavaru.

3.2 Lemljeni spojevi

Lemljenje je postupak koji se pretežno koristi za spajanje metalnih dijelova kao što su razni okviri od čelika, hladnjaci na motornim vozilima, lagane konstrukcije, razni strojni dijelovi, rezervoari i slično. Lemljenjem nastaje veza koja se ostvaruje dodavanjem

rastaljene legure (lema). U usporedbi sa zavarivanjem koje je isto termički postupak, temperature prilikom lemljenja su drastično niže od tališta materijala koji se leme. Prema tome, kod lemljenja nema taljenja primarnog materijala, već se tali samo dodatni (dopunski) materijal. Kao prednost nad zavarivanjem također treba istaknuti i to što lemljenje omogućuje spajanje različitih metala u kojima, nakon hlađenja, nema pojave zaostalih naprezanja. Postupak lemljenja može se poboljšati korištenjem talila ili zaštitne atmosfere. Talila dolaze u raznim oblicima (pasta, tekućina, prašak) i nanose se na površinu koja mora prethodno biti mehanički i kemijski očišćena. Prilikom zagrijavanja talila se aktiviraju te na sebe počinju vezati okside. Lemljenje je korisna tehnologija spajanja jer se pri relativno niskoj temperaturi zagrijavanja, ispod temperature rekristalizacije, dobije relativno čvrst spoj. Iako se svi metali i neki nemetali mogu spajati lemljenjem, kod nekih metala kao što su aluminij i visokolegirani čelici javljaju se poteškoće pri lemljenju. Lemljenje pronalazi primjenu u automobilskoj i elektronskoj industriji te u strojarstvu [10,11,12].

Prednosti lemljenih spojeva [11]:

- Relativno male deformacije
- Relativno lako spajanje raznovrsnih materijala
- Laka automatizacija
- Zalemljeni spoj ne zahtijeva dodatnu obradu
- Relativno brz postupak
- Visoka točnost izrade
- Nema većih strukturnih promjena
- Ekonomična izvedba
- Mogućnost spajanja debelih i tankih limova.

Nedostaci lemljenih spojeva [11]:

- Skup dodatni materijal
- Mala otpornost mekih lemovi prema višim temperaturama
- Relativno niska nosivost.

3.2.1 Vrste i oblici lemljenih spojeva

Lemljenje se dijeli prema nekoliko kriterija (temperaturi na kojoj se lem tali, obliku lemljenog spoja, vrsti zaštitne atmosfere i načinu zagrijavanja) [10].

S obzirom na temperaturu na kojoj se lem tali, lemljenje može biti [12]:

- Meko lemljenje – provodi se na temperaturi od oko 450°C
- Tvrdo lemljenje – provodi se na temperaturi od 450 do 900°C
- Visokotemperaturno lemljenje – provodi se na temperaturama iznad 900°C.

Meko lemljenje primjenu nalazi u spajanju metalnih dijelova uz nisko talište lema. Materijali koji se koriste kao lem u mekom lemljenju su slitine olova, kositra, cinka, kadmija i antimona. Meko lemljenje koristi se za spajanje bakra, bakrenih legura i čelika, a primjenu je našlo i u spajanju električnih vodova. Prednost mekog lemljenja je relativno jeftina oprema za ručno i strojno lemljenje, lako se automatizira, lako se popravljaju spojevi, te lako se formira oblik zbog prirodnog tečenja lema [11, 12].

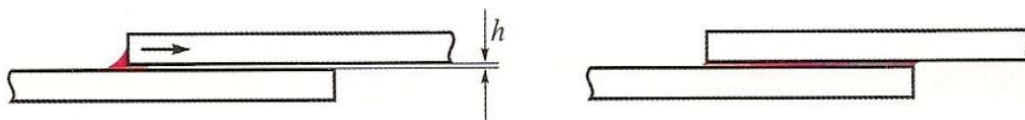
Tvrdo lemljenje se koristi kod spojeva gdje je potrebno ostvariti veću nosivost spoja. U tvrdom lemljenju metala, metal je potrebno prije zagrijati električnom strujom ili plamenom. Da se izbjegne pojava oksida potrebno je provesti i dezoksidaciju. Sredstva za dezoksidaciju koja se koriste su na bazi bora (boraks) s dodatkom fosfata, fluorida i silikata. Postupak tvrdog lemljenja može se provoditi i u zaštitnoj atmosferi. Ova vrsta spoja omogućava brzu i jeftinu izradu nepropusnih i jakih spojeva. Koristi se i za spajanje dijelova na teško dostupnim mjestima te za složene spojeve s različitim debljinama stijenki elemenata koji se spajaju. Pravilno izveden spoj ima čvrstoću veću ili jednaku osnovnom materijalu. Tvrdo lemljenje ima mnogo prednosti, a neke od njih su dobre mehaničke karakteristike, mogućnost spajanja raznovrsnih metala, omogućuje spajanje nemetala s metalima, mogućnost postizanja preciznih tolerancija, omogućuje spajanje debljih metala, isplativa izrada složenijih spojeva i spojeva s više komponenata [11, 12].

Visokotemperaturno lemljenje odvija se pod zaštitom plina ili u vakuumu. Primjenu nalazi u spajanju plemenitih i skupih materijala te materijala koji nemaju mogućnost zavarivanja ili zavarivanje znatno mijenja svojstvo materijala. Visokotemperaturno lemljenje omogućuje vezu između keramike i tvrdih metala. Lemovi koji se koriste u ovom postupku su slitine bazirane na kobaltu, niklu, zlatu ili drugim plemenitim metalima. Nedostatak ove tehnologije je velika osjetljivost na pogreške tijekom izvođenja postupka [11, 12].

Prema obliku mjesta na kojem se lemi ono može biti [10]:

- Lemljenje sa zračnošću (rasporom) naziva se još i kapilarno lemljenje budući da se primjenjuje kapilarni efekt. Površine koje se spajaju ovom tehnologijom moraju imati malu, po mogućnosti jednako široku zračnost, koje ne prekoračuju $h = 0.25$

mm. U ovim uvjetima lem kapilarnim putem ulazi u predviđeni prostor između elemenata koje je potrebno spojiti te se nakon hlađenja ostvaruje veza. Na slici 3.15 prikazano je kapilarno djelovanje.



Slika 3.15: Lemljenje kapilarnim djelovanjem [10]

- Lemljenje sa šavom po obliku je slično zavarivanju taljenjem. Elementi koji se povezuju ovom tehnologijom trebaju razmak veći od 0.5 mm ili V ili X oblik šava. Primjenom ove tehnologije nastali šavovi su slični zavarivačkim šavovima i zbog toga se nekad naziva i zavarivačko lemljenje.

3.2.2 Postupci lemljenja

Podijela lemljena prema načinu na koji se toplina dovodi na mjesto ostvarivanja spoja. Prema normi DIN 8505 razlikuje se [10]:

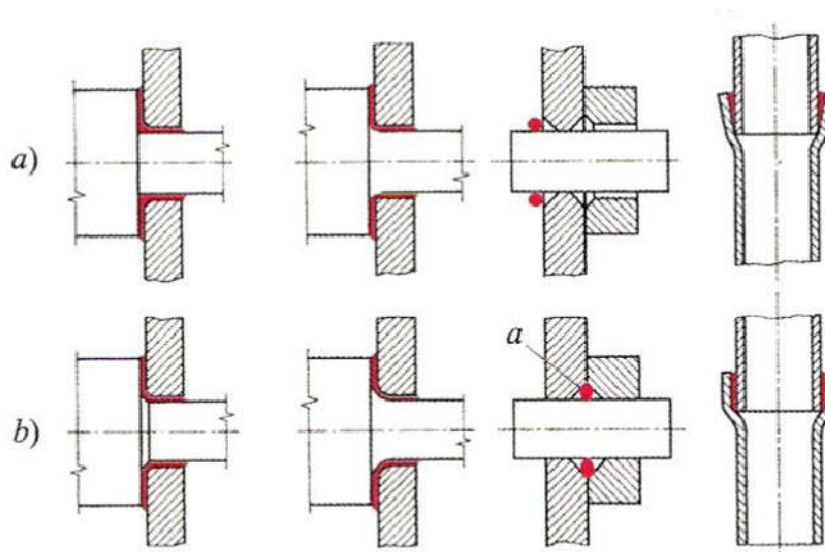
- Plameno lemljenje. Postupak se provodi plamenikom ili plinskim napravama tako da se najprije zagrije mjesto spajanja, a lem se prije i poslije zagrijavanja prsloni na mjesto spoja. Postupak plamenog lemljenja prikladan je za meko lemljenje i tvrdo lemljenje.
- Lemljenje uz primjenu lemila. Postupak se provodi uz pomoć vrućeg lemila koje rukom ili strojem vođeno ugrije mjesto lemljenja. Lem se dodaje na mjesto nastajanja spoja ili se površine prije pokositre. Pri tome dolazi do otapanja lema te se ostvaruje spoj. Postupak lemljenja pomoću lemila prikladan je samo za meko lemljenje.
- Lemljenje uronjavanjem provodi se tako da se dijelovi koje je potrebno spojiti urone u lem u tekućem stanju u željenom položaju u kojem ih je potrebno spojiti. Nakon uranjanja lem ulazi u područje spoja i povezuje dijelove. Prije lemljenja potrebno je samo zaštititi dijelove koje ne treba zalemiti određenim pastama ili rastopima. Ovaj postupak je prikladan za tvrdo i meko lemljenje.
- Lemljenje u peći. Postupak se provodi tako da se lem dodaje na mjesto spajanja, dijelovi se ugriju u električnoj ili plinskoj prolaznoj ili mufolnoj peći i na taj način

se ostvari zalemljeni spoj. Postupak je primjeren u tvrdom lemljenju i mekom lemljenju.

- Otporno lemljenje. Pogodno je za primjenu u mekom i tvrdom lemljenju. Postupak se provodi slično elektrootpornom zavarivanju, mjesta koja se spajaju se ugriju pritiskanjem u kliještima ili na posebnom stroju predviđenom za elektrootporno lemljenje uz prethodno umetnuti lem.

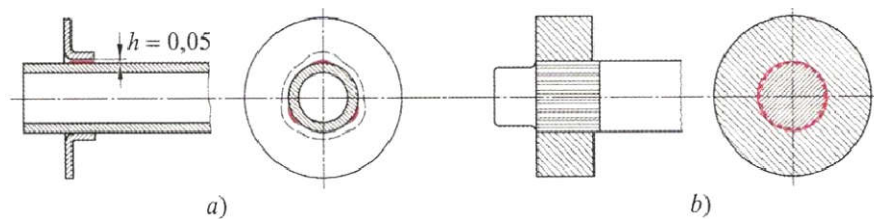
3.2.3 Osnove oblikovanja lemljenih spojeva

Kod lemljenih spojeva važnu ulogu ima pravilan odabir i priprema spoja kojim se dobiva potrebna čvrstoća spoja. Kod lemljenih spojeva je slučaj da lem ima manju čvrstoću od primarnog materijala koji se spaja i zato je lemljene spojeve potrebno oblikovati tako da mjesto na kojem se nalazi spoj ima dosta veliku površinu da bi nastali spoj ostvario dovoljnu nosivost u usporedbi s osnovnim materijalom. Važnu ulogu ima priprema spoja jer proširenje zračnosti na nekom mjestu između spojnih dijelova može smanjiti kapilarni efekt, a suženje može pospješiti protok taline obogaćene oksidima. Na slici 3.16 prikazani su primjeri za pravilnu i pogrešnu izradu potrebne zračnosti.



Slika 3.16: Kreiranje zračnosti za lemljenje
a) pogrešno; b) pravilno; (a je lem) [10]

Kvaliteta obrade dijelova koji se spajaju također utječe na čvrstoću spoja. Tako brazde nastale tijekom obrade koje su okomite na smjer lemljenja, te imaju dubinu od 0.05 do 0.1 h (prema slici 3.17) onemogućavaju slobodno kretanje taline lema. Brazde koje su postavljene u smjeru toka lemljenja djeluju kao kanali koji potpomažu tečenje te se zato češće i posebno izrađuju.



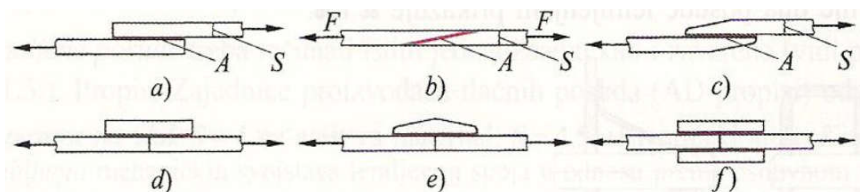
Slika 3.17: Zračnosti za lemljenje kanalnog oblika

a) stezni spoj u tri točke;

b) spoj narovašenom površinom [10]

Primjeri uobičajenih lemljenih spojeva [10]:

- Spojevi limova. Čeoni spojevi limova nisu preporučeni u postupku lemljenja zbog male površine spoja. Za spajanje limova lemljenjem najbolje je koristiti prijeklopne spojeve i spojeve s podmetačima koji su prikazani na slici 3.18. Preporučuje se i stvaranje zakošenja na preklopljenjima dijelova koji se spajaju ili na podmetačima koji omogućuju blaže skretanje toka sile te se ujedno i povećava čvrstoća. Korisna duljina prijklopa iznosi tri ili četiri debljine lima u spoju.

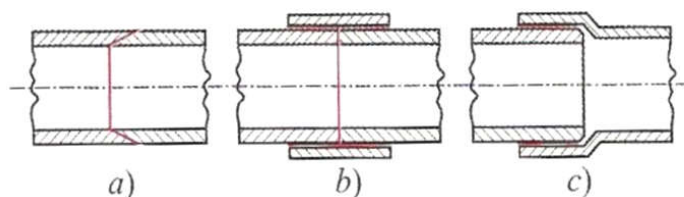


Slika 3.18: Spojevi lima lemljenjem

a) prijeklop; b) kosi prijeklop; c) zakošeni prijeklopni spoj; d) spoj s dodatnom vezicom;

e) spoj sa željeznom vezicom; f) spoj s dvije vezice [10]

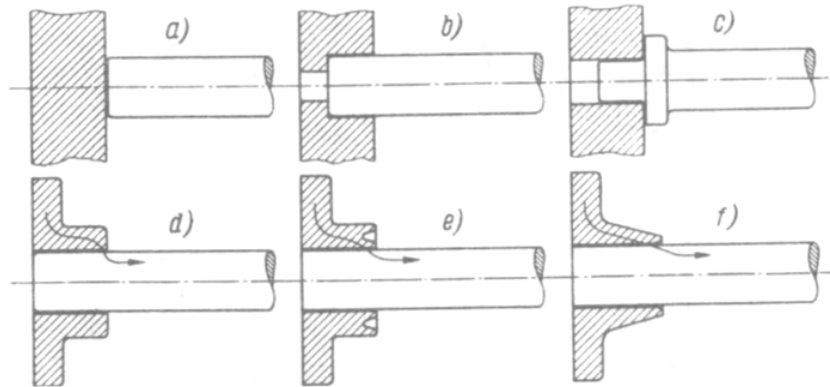
- Cijevni spojevi. Pri spajanju cijevi koristi se čeono spajanje koje je najbolje tvrdo lemiti. Prilikom lemljenja debljih cijevi stožastom pripremom krajeva povećava se površina spoja. Kod tanjih cijevi koje imaju debljinu stijenke tanju od 2 mm i kod cijevi koje je potrebno meko lemiti koristi se kolčak ili se prošire na jednoj strani što je prikazano na slici 3.19.



Slika 3.19: Cijevni spojevi lemljenjem

a) stožasti čeoni spoj; b) spoj kolčakom; c) prijeklopni spoj [10]

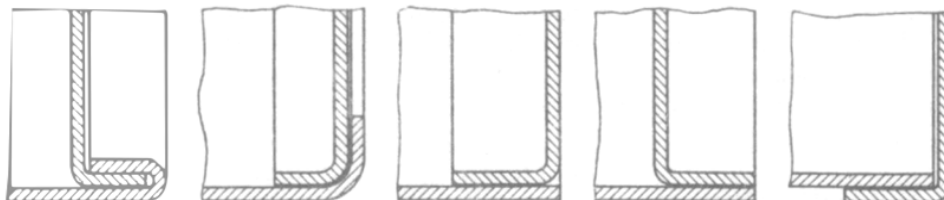
- Okrugle šipke. Zbog geometrijskih karakteristika ne preporučuje se čeono lemljenje okruglih šipki. Bolje rješenje je ulaganje šipke u provrt koji ima zračnost za ulazak lema. Na slici 3.20 su prikazani načini za spajanje okrugle šipke lemljenjem. Slika 3.20 d, e i f prikazuju kako odgovarajući oblik glavine utječe na tok sile.



Slika 3.20: Šipke spojene lemljenjem

- a) nalemljena šipka; b) šipka lemljena na obodu; c) rukavac zalemljen na obodu;
d) ulemljeno u krutoj glavini; e) i f) ulemljeno u elastične glavine [10]

- Spremnici. Spremnici se spajaju isto kao i limovi te prema tome vrijede ista pravila. Na slici 3.21 prikazano je spajanje dna posude lemljenjem.



Slika 3.21 Lemljenjem spojena dna posude [10]

3.2.4 Proračun

Postupkom lemljenja ostvaruje se nosivi spoj. Čvrstoća lemljenih nosivih spojeva ovisi o nekoliko čimbenika. Čimbenici koji imaju utjecaj na čvrstoću spoja su pogonska temperatura, način opterećenja, izbor lema u odnosu na materijal koji se spaja, debljina lema u spoju, hrapavost površine te smjer kanala nastalih za vrijeme obrade površine [12].

Proračun se provodi na temelju opterećenja F i prema površini spoj A_L (površina lemljenog spoja). Za sučeoni spoj i lim deblji od 2 mm određuje se normalno naprezanje prema relaciji (3.5).

- Normalno naprezanje:

$$\sigma_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \sigma_{dop}; \quad \sigma_{dop} = \frac{\sigma_{LB}}{S} \quad (3.5)$$

U većini slučajeva radi se o preklapnom spoju i prema tome računa se srednje tangencijalno naprezanje prema relaciji (3.6).

- Srednje tangencijalno naprezanje:

$$\tau_L = \frac{K_A F}{A_L} \leq \tau_{dop}; \quad \tau_{dop} = \frac{\tau_{LB}}{S} \quad (3.6)$$

Gdje je:

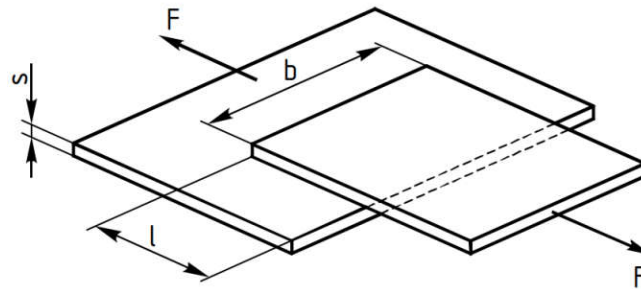
σ_L	[N/mm ²]	naprezanje materijala lema
K_A		parametar udara
A_L	[mm ²]	površina zalemljenog spoja
σ_{LB}	[N/mm ²]	čvrstoća lema - vlačna
τ_L	[N/mm ²]	srednje tangencijalno opterećenje spoja
τ_{LB}	[N/mm ²]	odrezna čvrstoća lema
S		faktor sigurnosti; poprima vrijednosti između 2 i 4

- U prijeklopnim spojevima (što je prikazano na slici 3.22) u kojima materijali imaju jednaku debljinu (s), dužina preklopa se računa prema relaciji (3.7):

$$l = s \frac{K_A R_m}{\tau_{LB}} = s \frac{K_A \sigma_{dopM}}{\tau_{dopL}} \quad (3.7)$$

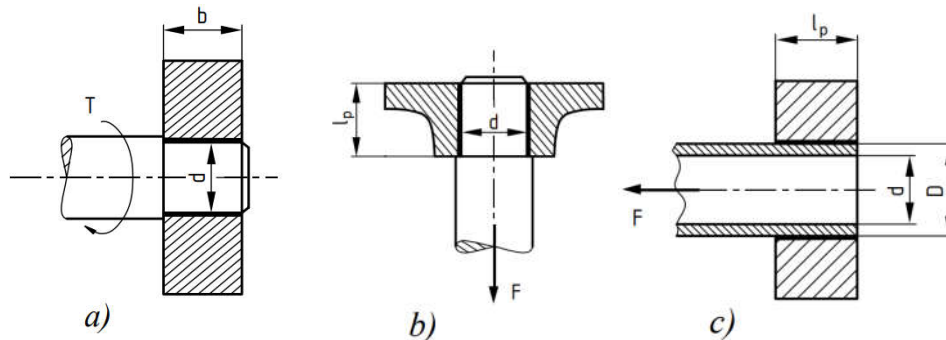
Gdje je:

$l(l_p)$	[mm]	potrebna dužina preklopa
s	[mm]	debljina osnovnog materijala
R_m	[N/mm ²]	čvrstoća primarnog materijala (vlačna)
σ_{dopM}	[N/mm ²]	dopušteno opterećenje primarnog materijala
τ_{dopL}	[N/mm ²]	dopušteno opterećenje lema



Slika 3.22: Važni parametri u lemljenom spoju [12]

- Različiti slučajevi opterećenja lemljenih spojeva prikazani su na slici 3.23.



Slika 3.23: Primjeri opterećenja lemljenog spoja [12]

Na primjeru kada je spoj opterećen torzionim momentom prema slici 3.23 a), naprezanje se računa prema relaciji (3.8).

$$\tau_L = \frac{2T/d}{d\pi b} = \frac{2T}{d^2\pi b} \quad (3.8)$$

Gdje je:

τ_L	[N/mm ²]	naprezanje na smik
T	[Nmm]	moment kojeg je potrebno prenijeti
d, b	[mm]	promjer i širina lemljenog spoja
R_m	[N/mm ²]	vlačna čvrstoća osnovnog materijala

U slučaju čepa u provrtu koji je opterećen aksijalnom silom prema slici 3.23 b), vrijedi relacija (3.9) iz koje se može izračunati potrebna dužina preklopa l_p prema relaciji (3.10), a u slučaju da se umjesto punog materijala čepa upotrijebi cijev prema slici 3.23 c), potrebna dužina preklopa računa se prema relaciji (3.11).

$$d\pi l_p \tau_{LB} = d^2\pi R_m/4 \quad (3.9)$$

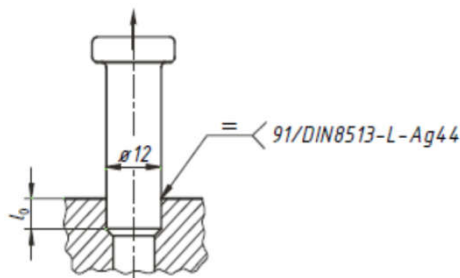
$$l_P = \frac{K_A R_m d}{\tau_{LB}} \frac{d}{4} \quad (3.10)$$

$$l_P = \frac{K_A R_m D^2 - d^2}{\tau_{LB}} \frac{1}{4d} \quad (3.11)$$

3.2.5 Primjer proračuna

Zatik koji je tvrdo zalemljen za podnožje u aksijalnom smjeru opterećuje sila F prema slici 3.23. Materijal zatika i postolja je čelik S235JR (EN) čvrstoće $R_m = 340 \text{ N/mm}^2$. Odreznna čvrstoća materijala lema iznosi $\tau_{LB} = 205 \text{ N/mm}^2$.

Potrebno je izračunati dužinu spoja l_P uz uvjet da nosivost zatika ostane nepromijenjena i najveću silu F kojom se spoj može opteretiti. Potreban faktor sigurnosti S iznosi 3, a u mirnom opterećenju parametar udara je $K_A = 1$.



Slika 3.23: Zatik zalemljen za podnožje [12]

Rješenje:

Dužina prijeklopa se računa prema relaciji (3.10):

$$l_P = \frac{K_A R_m d}{\tau_{LB}} \frac{d}{4} = \frac{1 \cdot 340 \cdot 12}{205} \frac{12}{4} = 4,9756 \approx 5 \text{ mm}$$

Maksimalna nosivost dobije se na temelju relacije (3.6):

$$F = \frac{\tau_{LB} A_L}{K_A S} = \frac{\tau_{LB} d \pi l_P}{K_A S} = \frac{205 \cdot 12 \cdot \pi \cdot 5}{1 \cdot 3} = 12\,874 \text{ N} = 12,87 \text{ kN}$$

3.3 Lijepljeni spojevi

Posljednjih godina lijepljenje postaje sve popularniji način spajanja materijala u industrijskoj proizvodnji, a razlog tome su nove generacije ljepila koje donose mnoge prednosti. Tako je jedna od važnijih prednosti koju je bitno istaknuti i mogućnost brzog i

pouzdanog spajanja svih vrsta materijala i zato se ljepila smatraju standardnim dijelovima mnogih proizvodnih procesa [13].

Lijepljenim spojem ostvaruje se nerastavljiva veza. Pod procesom lijepljenja podrazumijeva se povezivanje elemenata uz pomoć ljepila odnosno uz pomoć adhezivnih i kohezivnih sila bez značajnog utjecaja na strukturu. Lijepljeni se spojevi upotrebljavaju pri spajanju metala i nemetala (stakla, drveta, gume, umjetnih materijala, porculana, itd.). Ljepila se koriste za međusobno spajanje metala osobito tamo gdje je potrebno spriječiti gubitak određenih svojstava postignutih npr. termičkom obradom. Pomoću ljepila osiguravaju se spojevi vijcima, brtve se spojne površine, osiguravaju se i brtve navoji, spajaju ravne plohe i ostvaruje se veza između glavina i vratila. Kao ljepila koriste se tvari na bazi umjetnih smola (araldit, reduks, metalon). Pri upotrebi ljepila treba se strogo pridržavati navedenih uputa. Treba napomenuti da je ljepilo za plastične materijale ono lijepilo koje spaja samo umjetne materijale, a ljepilo od plastične mase ono ljepilo koje je izrađeno od umjetne tvari, a primjenjuje se za spajanje metala [10].

Prednosti lijepljenih spojeva [10]:

- Zauzimaju vrlo malo prostora
- Neznatna masa materijala koji ostvaruje spoj
- Mogućnost povezivanja elemenata raznorodnih materijala
- Naprezanja na spoju se jednolično raspoređuju
- Nepropusni spojevi, otporni na koroziju
- Nema utjecaja na svojstva osnovnog materijala
- Niska cijena spojeva.

Nedostaci lijepljenih spojeva [10]:

- Manja čvrstoća u usporedbi s drugim načinima spajanja
- Mogućnost primjene samo kod opterećenja na smik
- Mala toplinska otpornost, te slaba postojanost u agresivnoj atmosferi
- Potrebno dobro očistiti površine lijepljenja
- Sloj ljepila mora imati točno određenu debljinu
- Potrebno je neko vrijeme da ljepilo otvrdne.

Prilikom korištenja ljepila bitno je posvetiti pažnju stanju ploha koje se spajaju jer ono znatno utječe na izdržljivost lijepljenog spoja. Adhezivne sile su djelotvorne samo onda kad je površina čista, ohrapavljena i odmašćena. Hrapavljenjem površine stvaraju se udubljenja i uzvišenja čime se povećava površina prijanjanja. Hrapavljenje se kod metalnih

površina provodi brušenjem, četkanjem ili pjeskarenjem. Površine se čiste i odmašćuju ugljičnim tetrakloridom, perkloretilenom, acetonom ili lužinama. Ljepilo se na dobro pripremljenu površinu treba nanositi u što tanjem sloju (teoretski sloj treba biti jednak debljini molekule), jer veća debljina sloja znatno smanjuje čvrstoću spoja. U debljem sloju ljepila pojavljuje se unutarnja napetost koja dodatno smanjuje čvrstoću spoja [10, 14, 15].

3.3.1 Vrste lijepljenja i ljepila

Razlikuju se dvije osnovne vrste lijepljenja [10]:

- Lijepljenje obloga – lijepljenje obloga od tkiva, pusta, kože, folij na druge dijelove, ploče, nosače, itd.
- Lijepljenje slojeva – međusobno lijepljenje sastavnih dijelova.

Ljepila povezuju elemente uz pomoć ljepila koje je smješteno između ploha prijanjanja i prema tome se dijele na [10]:

- Prionljiva ljepila – imaju malu kohezijsku silu i veliku adhezijsku silu, a elementi spojeni ovim ljepilom mogu se odvojiti bez oštećenja.
- Kontaktna ljepila – javlja se srednje velika kohezija i velika adhezija, a spojne elemente nije moguće rastaviti bez oštećenja.
- Čvrsta ljepila – javlja se visoka kohezija i vrlo visoka adhezija, nakon vezivanja postaju čvrste tvari i ostvaruje se nerastavljiv spoj.

Čvrsto ljepilo uglavnom pronalazi primjenu u izgradnji uređaja i strojeva. Proizvodi se od umjetne smole bazirane na urei, fenolu, melaminu, epoksidu i poliesteru. Primjenjuje se u obliku tekućine, paste ili krutine. Može biti jednokomponentno ili dvokomponentno. Jednokomponentna ljepila stvrdnjavaju bez dodatnog otvrdivača dok je kod dvokomponentnih ljepila potrebno prvoj komponenti prije primjene dodati stvrdivač (drugu komponentu) koja će omogućiti stvrdnjavanje i odrediti vrijeme otvrdnjavanja. Čvrsta omrežavajuća ljepila otporna su na vodu, otopinu i lužinu, eter, benzol, alkohol, itd. [10, 15].

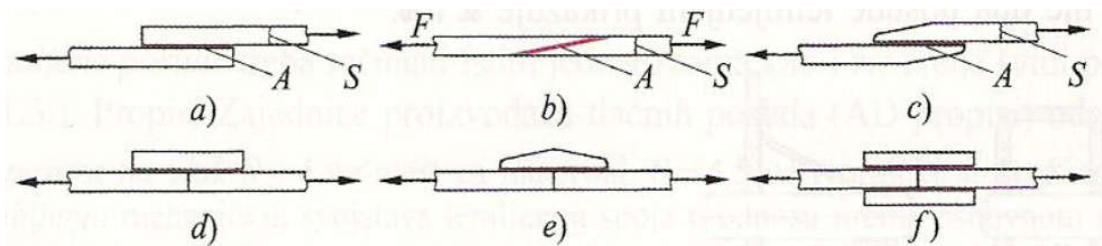
3.3.2 Oblikovanje lijepljenog spoja

Lijepljeni spoj potrebno je ostvariti tako da je u vremenu eksploatacije izložen naprezanju na smik. Pravila pri izradi lijepljenog spoja poklapaju se s pravilima koja vrijede pri izradi lemljenog spoja, međutim postupak lijepljenja je kompleksniji i

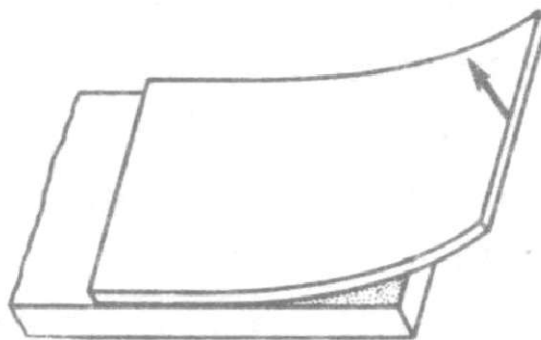
osjetljiviji na pogreške. Budući da su smična i vlačna čvrstoća lijepljenog sloja znatno ispod čvrstoće metala u spoju, potrebno je ostvariti veliku površinu spoja. Najpovoljnija duljina lijepljenja je $l = 20$ do $25 s$ što prikazuje slika 3.24. Na slici 3.25 prikazani su prihvatljivi načini ostvarivanja lijepljenih spojeva. Lijepljeni spojevi osobito su osjetljivi na ljuštenje, pa je potrebno izbjegavati spojeve s takvim opterećenjima. Na slici 3.26 prikazano je ljuštenje lijepljenog spoja, a na slici 3.27 prikazano je nastajanje lijepljenog nosača avionskog krila [10].



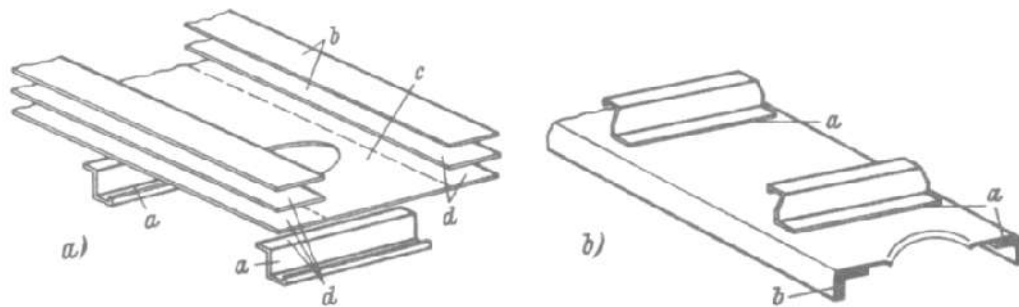
Slika 3.24: Lijepljeni prijklopni spoj limova
(s je debljina lima, l duljina prijklopa, A površina prijklopa) [10]



Slika 3.25: Spojevi lima lijepljenjem
a) prijklop; b) kosi prijklop; c) zakošen prijklopni spoj; d) spoj s vezicom;
e) spoj sa željeznom vezicom; f) spoj s dvije vezice [10]



Slika 3.26: Ljuštenje lijepljenog spoja [10]



Slika 3.27: Lijepljeni avionski nosač

a) prije postupka lijepljenja;

b) nakon završetka lijepljenja [10]

3.3.3 Proračun

Čvrstoću lijepljenog spoja određuje sila adhezije između slijepljenog elementa i ljepila. Budući da su ovi spojevi osjetljivi na opterećenje na savijanje, spojeve je potrebno formirati tako da se izbjegne opterećenje na savijanje te da su u vremenu eksploatacije izloženi naprezanju na smik prema slici 3.24. Čvrstoću spoja određuje i debljina sloja ljepila i radna temperatura. Najviša čvrstoća se postiže uz sloj ljepila debljine od 0.1 do 0.3 mm. Porastom debljine sloja ljepila do 1 mm, čvrstoća lijepljenog spoja opada na 60 %. Čvrstoća spoja smanjuje se i tijekom vremena zbog starenja i to za 20 do 30 %. Kod lijepljenih spojeva proračunavaju se smična i uvojna naprezanja, a rjeđe vlačna naprezanja.

- Smično naprezanje lijepljenog spoja računa se prema relacijama (3.12) i (3.13):

$$\tau = \frac{F}{A_L} \quad (3.12)$$

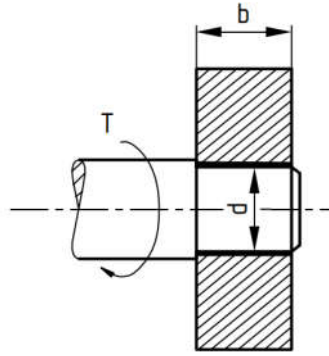
$$F_{max} = K_A F_{naz} \quad (3.13)$$

$$F_{naz} = A_L \frac{\tau_{LB}}{S} = bl \frac{\tau_{LB}}{S}$$

- Uvojno naprezanje se računa prema relaciji (3.14) i prikazuje ga slika 3.28:

$$T_{max} = K_A T_{naz} \quad (3.14)$$

$$T_{naz} = 0.5b\pi d^2 \frac{\tau_{LB}}{S}$$



Slika 3.28 Spoj remenice i rukavca lijepljenjem [14]

- Vlačno naprezanje se računa prema relaciji (3.15):

$$F_{max} = K_A F_{naz} \quad (3.15)$$

$$F_{naz} = A_L \frac{\sigma_{LB}}{S} = bs \frac{\sigma_{LB}}{S}$$

U gore navedenim relacijama su:

τ	[N/mm ²]	naprezanje na smik u ljeplju
F	[N]	smična sila
A_L	[mm ²]	površina lijepljena sloja
F_{max}	[N]	najveća smična ili vlačna sila kojom se opterećuje spoj
T_{max}	[Nm]	maksimalni moment uvijanja
σ_{LB}	[N/mm ²]	vlačna čvrstoća lijepljenog spoja
τ_{LB}	[N/mm ²]	smična čvrstoća spoja
l, l_p	[mm]	korisna dužina spoja (dužina prijeklopa)
b	[mm]	širina spoja
K_A	-	faktor primjene
s	[mm]	minimalna debljina elemenata koji se lijepe
S	-	faktor sigurnosti

3.3.4 Primjer proračuna

Primjer 1.

Remenica izrađena od čelika ima unutrašnji promjer glavine $d = 25$ mm. Zalijepljena je na rukavac vratila ljepljom koje ima smičnu čvrstoću $\tau_{LB} = 23$ N/mm². Spojem je potrebno prenositi torzioni moment $T = 15$ Nm. Faktor primjene iznosi $K_A = 1.5$. Potrebno je izračunati korisnu duljinu lijepljenog spoja. Prema uvjetima u kojima spoj radi određen je faktor sigurnosti i on iznosi 3. Spoj je ostvaren prema slici 3.28 [14].

Rješenje:

Prema relaciji (3.14) slijedi:

$$b = \frac{T_{naz}}{0,5\pi d^2 \frac{\tau_{LB}}{S}} = \frac{15}{0,5 \cdot \pi \cdot 25^2 \cdot \frac{23}{3}} = 0,001993 \text{ m} \approx 2 \text{ mm}$$

Primjer 2.

Postignut je lijepljen spoj između dvije cijevi od aluminijske čiji je vanjski promjer 40 mm, a korisna duljina prijeklopa spoja iznosi 40 mm. Spoj radi pri temperaturi od 55 °C uz sigurnosni faktor 1,5. Ljepilo spoja ima odreznu čvrstoću $\tau_{LB} = 14 \text{ N/mm}^2$ pri navedenim uvjetima rada. Treba odrediti koliku vlačnu silu može podnijeti lijepljeni spoj u uvjetima u kojima vlada mirno opterećenje ($K_A = 1$).

Rješenje:

Prema relaciji (3.15) slijedi:

$$F_{naz} = A_L \frac{\tau_{LB}}{S} = d\pi l \frac{\tau_{LB}}{S} = 40 \cdot \pi \cdot 40 \cdot \frac{14}{1,5} = 46\,914 \text{ N} = 46,914 \text{ kN}$$

3.4 Zakovični spojevi

Zakovični spojevi spadaju u nerastavljive spojeve strojnih elemenata. Ovakva vrsta spoja se ostvaruje zakovicom. Zakovične spojeve u brodogradnji, strojogradnji i drugim čeličnim konstrukcijama sve više istiskuju zavareni spojevi, a razlog tome je što bušenje provrta i oblikovanje zakovičnog spoja zahtijeva veću potrošnju energije. Zakovični spojevi se još samo ponekad koriste, a inače slove kao bezuvjetno sigurni spojevi osobito u radu s lakim metalima (npr. aluminij i njegove legure). Zakivanje konstrukcije izrađene od lakog metala ispostavilo se prihvatljivije od zavarivanja jer zavarivanje ima nepovoljan utjecaj na karakteristike lakih metala dok su spojevi nastali zakivanjem trajniji unatoč visokim koncentracijama naprezanja zbog provrta. Zakovični spojevi se upotrebljavaju pretežno u gradnji vozila, zrakoplova, brodova, ali i kod mostova i dizalica [10, 15, 17].

Prednosti zakovičnih spojeva [15, 17]:

- Lako provođenje kontrole spoja
- Toplina nije neophodna za ostvarivanje spoja
- Nema promjene u kristalnoj građi i nema pojave stvrdnjavanja

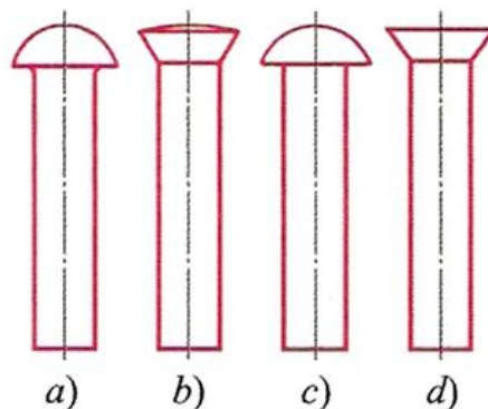
- Mogu se spajati različite debljine materijala, materijali s presvlakama, te različiti materijali
- Ako je potrebno spoj se eventualno može rastaviti
- Nema iskrivljenja elemenata
- Lakše i jeftinije ostvarivanje spoja
- Suvremene pop zakovice omogućuju jednostavno i brzo izvođenje visoko zahtjevnih spojeva
- Izrađuju se u raznim oblicima te imaju širok raspon dimenzija.

Nedostaci zakovičnih spojeva [15, 17]:

- Neravnomjerna raspodjela naprezanja
- Potreban prijeklop spojnih elemenata
- Provrti oslabljuju konstrukciju
- Pojava kontaktne korozije pri spajanju raznovrsnih materijala
- Ne mogu se izvesti čeonu spojevi.

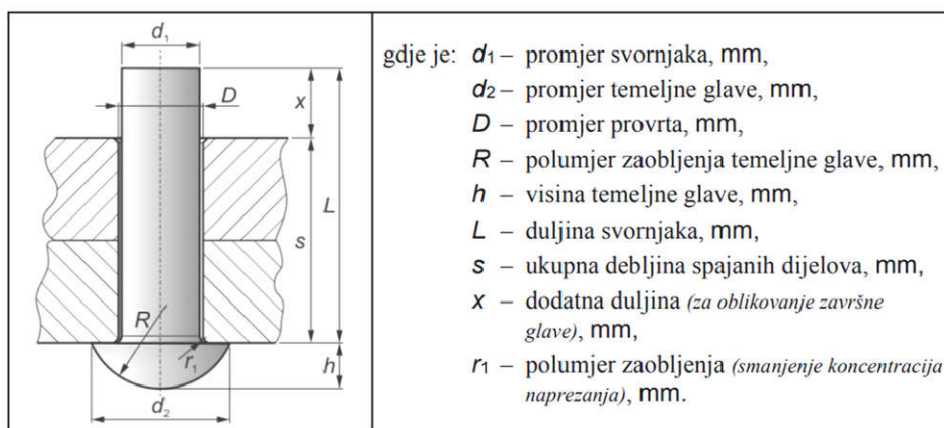
3.4.1 Zakovica

Zakovica je osnovni strojni dio kojim se ostvaruje veza u zakovičnim spojevima. Sirovu zakovicu čini struk i osnovna glava oblikovana sabijanjem. Druga strana oblikuje se tijekom operacije zakivanja. Na slici 3.29 prikazani su uobičajeni oblici čeličnih zakovica. Slika 3.30 prikazuje osnovne dimenzije zakovice.



Slika 3.29: Razni oblici zakovica od čelika

- a) polukrugle zakovice; primjena u gradnji kotlova prema normi DIN 123 i DIN 124; b) upuštene zakovice DIN 302; c) polukrugle zakovice DIN 660; primjena u strojogradnji; d) upuštene zakovice DIN 661; također primjena u strojogradnji [10]

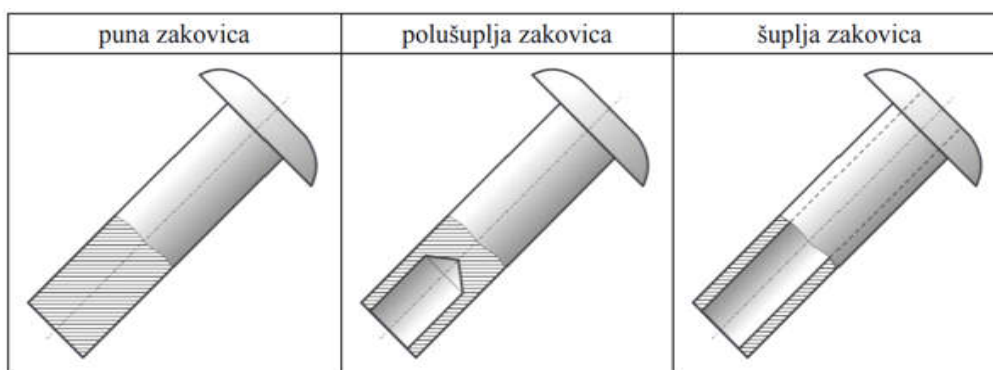


Slika 3.30: Osnovne dimenzije zakovice [15]

3.4.2 Vrste zakovica

Zakovice se mogu podijeliti u nekoliko skupina, a to su klasične zakovice koje su prikazane na slici 3.29, slijepe ili pop zakovice i specijalne zakovice u koje se svrstavaju zakovice s eksplozivom.

Od klasičnih zakovica, najčešće se koriste zakovice s okruglom glavom i to u strojogradnji, brodogradnji, kotlogradnji i čeličnim konstrukcijama. Zakovica s upuštenom glavom primjenjuje se većinom na mjestima koja zahtijevaju glatke plohe. Klasične zakovice mogu, prema obliku svornjaka, biti izvedene u nekoliko oblika što je prikazano na slici 3.31.



Slika 3.31: Zakovice prema obliku svornjaka [15]

Tablica 3.4: Normirane pune zakovice [15]

Broj	1	2	3	4	5	6	7	
DIN	124	660	302	661	662	674	675	
puna zakovica								
	d ₁	10 ÷ 38	1 ÷ 8	10 ÷ 36	1 ÷ 8	1,6 ÷ 6	14 ÷ 6	3 ÷ 5
	d ₂	1,6·d ₁	1,75·d ₁	–	1,75·d ₁	2·d ₁	2,25·d ₁	2,75·d ₁
	α	–	75, 60, 45	75	140	–	140	

Prema tablici 3.4

1. Poluokrugle zakovice primjenu pronalaze u izgradnji konstrukcija od čelika.
2. Poluokrugle zakovice primjenu pronalaze u izgradnji raznih konstrukcija od metala.
3. Zakovica s mogućnošću upuštanja primjenjuje se u izgradnji čeličnih konstrukcija.
4. Zakovice s mogućnošću upuštanja primjenjuju se u izgradnji metalnih konstrukcija i vozila.
5. Zakovica za lajsne lijepo izgleda i primjenjuje se pri montiranju lajsni, rukohvata, obloga, stubišta i gazišta.
6. Ravna poluokrugla zakovica upotrebljava se u gradnji zrakoplova i karoserija, pri radu s kožnim materijalima, tankim limovima, kartonima i plastičnim masama.
7. Ravna zakovica za upuštanje upotrebljava se u proizvodnji kaiševa i remena od tkanine, kože i plastičnih masa.

Tablica 3.5: Polušuplje i šuplje zakovice [15]

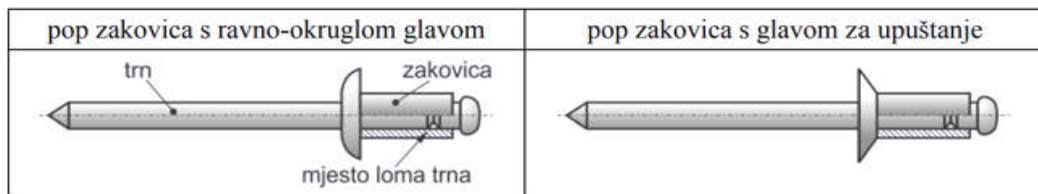
Broj	1	2	3	4	5	6	
DIN	6791	6792	7331	7338	7339	7340	
polušuplje i šuplje zakovice							
	d ₁	1,6 ÷ 10	1,6 ÷ 10	2 ÷ 6	3 ÷ 10	1,5 ÷ 6	1,6 ÷ 10
	d ₂	2·d ₁	2·d ₁	–	1,9·d ₁	–	–
	α	–	120	–	–	–	–

Prema tablici 3.5:

1. Polušuplja zakovica koja ima ravnookruglu glavu prikladna je za proizvodnju na automatiziranim strojevima koji rade s zakovicama, a primjenjuje se pri spajanju osjetljivih materijala.

2. Polušuplje zakovice za upuštanje su također prikladne za automatiziranu proizvodnju i spajanje osjetljivih materijala.
3. Šuplja zakovica koja se sastoji iz dva dijela primjenjuje se pri spajanju metala i osjetljivog materijala s kartonom, kožom i plastikom.
4. Zakovica za spojke i kočnice upotrebljava se za spajanje obloga potisnih ploča spojke i obloga pločica i čeljusti kočnica.
5. Šuplja jednodijelna zakovica koristi se za spojeve u izradi raznih konstrukcija od limova, proizvodnji šupljih elemenata te u elektrotehnici.
6. Cjevaste zakovice.

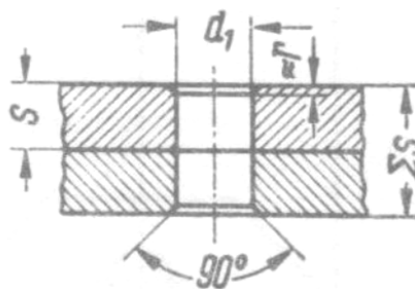
Pop zakovice ili slijepe zakovice koriste se kod zakivanja dijelova koji imaju mogućnost prilaza od jedne strane (npr. šuplji i polušuplji profili). Slijepa zakovica se sastoji od tijela valjnog oblika sa šupljinom u sredini kroz koju je umetnuti trn koji na sebi ima proširenje nasuprot glavi zakovice. Slijepim zakovicama spajaju se šuplji elementi, konstrukcije vozila, konstrukcije od limova, aluminijske i metalne konstrukcije. Na slici 3.32 prikazana je pop zakovica [17].



Slika 3.32: Pop zakovica [15]

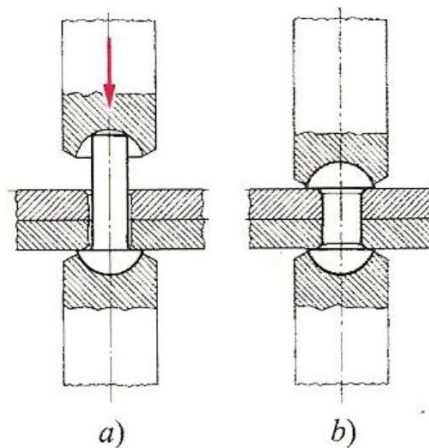
3.4.3 Oblikovanje zakovičnih spojeva

Zakovični spojevi ostvaruju se postupkom zakivanja. Prvo je potrebno napraviti provrte koji se mogu izvesti bušenjem ili probijanjem. Nakon probijanja je potrebno dodatno obraditi provrt jer mikropukotine nastale uslijed probijanja mogu izazvati lom, zbog toga je probijanje zabranjeno u gradnji čeličnih konstrukcija. Potrebno je još upustiti rubove provrta kako bi se ostvario polagani prelazak između glave i struka zakovice. Na slici 3.33 je prikazan provrt za zakovice [10].



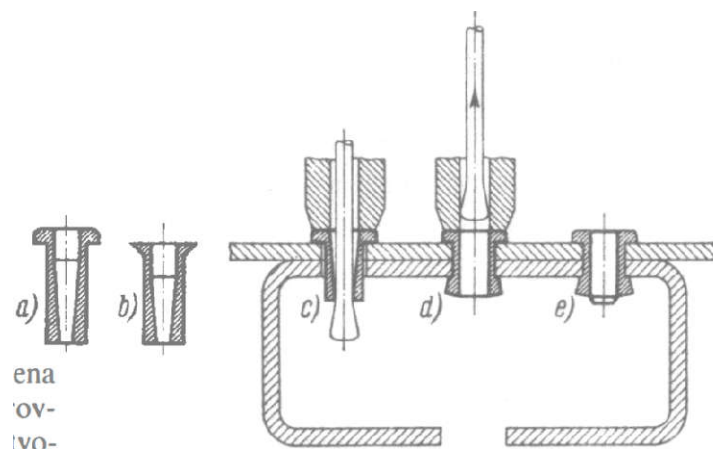
Slika 3.33: Oblikovanje provrta za spoj zakovicom [10]

Zakovice od čelika do promjera 8 mm i sve zakovice koje nisu od željeza zakivaju se hladnim postupkom, a sve zakovice kojima je promjer veći od 10 mm toplim postupkom zakivanja. Postupak toplog zakivanja provodi se tako da se zakovica ugrije na temperaturu od 1000 °C, osnovna glava se podupire posebnim alatom za to, a završna glava se izrađuje oblikačem kojim se postiže željeni oblik glave bilo na stroju ili udarcem čekića. Oblik završne glave će ovisiti o obliku oblikača. Postupak zakivanja pokazuje slika 3.34 [10].

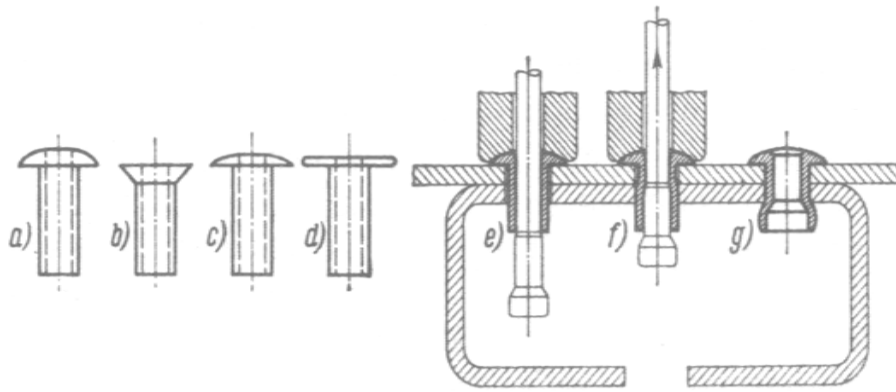


Slika 3.34: Zakivanje poluokrugle glave
a) prije zakivanja; b) nakon zakivanja [10]

Zakovični spojevi koji se ostvaruju slijepim (pop) zakovicama ili provlačnim zakovicama koriste se kod spojeva gdje postoji pristupačnost samo s jedne strane. Spoj se ostvaruje tako da se zakovica umetne u provrt te izvlači trn koji deformira donji kraj zakovice stvarajući tako drugu glavu. Pri tome višak trna puca i ostvaruje se zakovični spoj. Koriste se kod spajanja lakih metala i limova. Slika 3.35 prikazuje ostvarivanje spoja provlačnom zakovicom, a slika 3.36 nastajanje spoja šupljom zakovicom.

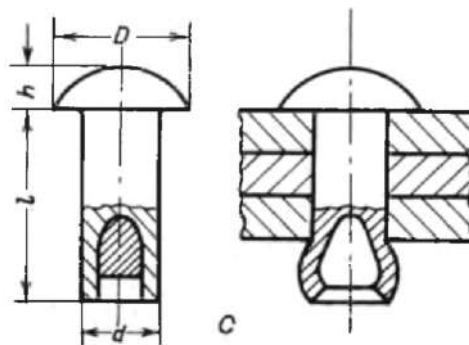


Slika 3.35: Provlačna zakovica
a) plosnato-okrugla zakovica; b) upuštena zakovica; c) zakovica prije provlačenja trna; d) provlačenje trna; e) zakovica zatvorena zatikom [10]



Slika 3.36: Šuplje zakovice zakivane s unutrašnje strane uz pomoć trna
 a) okrugla glava; b) upuštena glava; c) plosnato-okrugla glava; d) s plosnatom glavom; e) umetnuta zakovica; f) uvlačenje trna; g) zakovica zatvorena ostatkom trna [10]

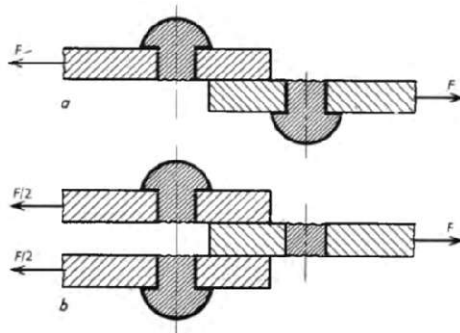
Zakovični spoj koji se ostvaruju eksplozivnom zakovicom prikazan je na slici 3.37. Eksplozivne zakovice formiraju oblik pomoću umetnutog eksploziva koji se aktivira preko glave zakovice uporabom specijalnog alata za aktivaciju. Posljedica eksplozije je tlak koji širi tijelo zakovice i kreira drugu šuplju glavu[10]. Slika 3.37 prikazuje spoj ostvaren eksplozivnom zakovicom.



Slika 3.37: Zakovica s eksplozivom [18]

3.4.4 Podjela zakovičnih spojeva

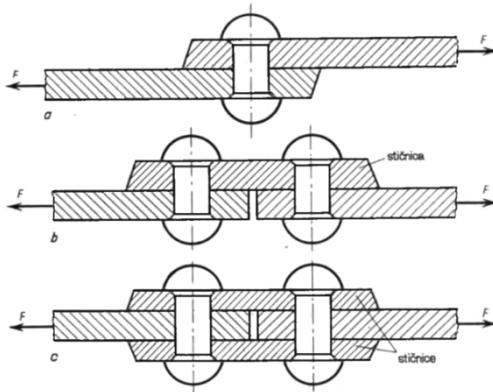
Zakovični spojevi koji se još nazivaju i zakovični šavovi mogu se podijeliti prema nekoliko kriterija. Ovisno o presjecima zakovice u kojima postoji naprezanje na odrez kao posljedica smicanja elemenata u spoju, spojevi zakovicama mogu se podijeliti na dvorezne, jednorezne i višerezne što je prikazano na slici 3.38 [18].



Slika 3.38: Lom zakovičnog spoja

a) jednorezni; b) dvorezni [18]

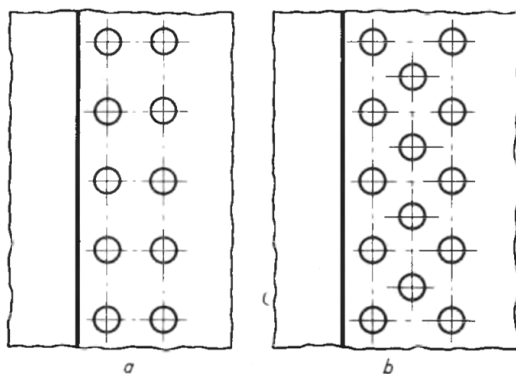
Ovisno o položaju elemenata u spoju, spojevi zakovicama mogu se podijeliti na prijklopne spojeve (krajevi elemenata nalaze se jedan iznad drugog), te vezne spojeve koji mogu biti ostvareni s jednom ili dvije vezice. Slika 3.39 pokazuje podjelu zakovičnih spojeva u odnosu na međusoban položaj dijelova koji se spajaju.



Slika 3.39: Spojevi sa zakovicama s obzirom na položaj spojnih elemenata u spoju

a) prijklopni spoj; b) jednostrani vezni spoj; c) dvostrani vezni spoj [18]

Prema razmještanju zakovica u spoju, zakovični spojevi mogu imati paralelan raspored ili izmjenični raspored prema slici 3.40.



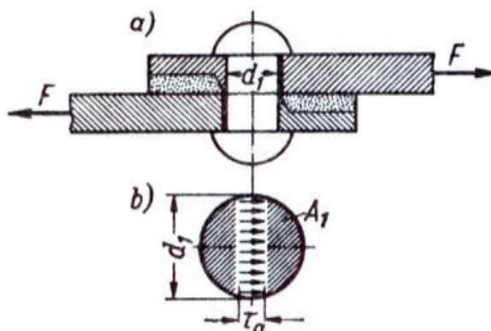
Slika 3.40: Spojevi sa zakovicama s obzirom na raspored zakovica

a) paralelni raspored; b) izmjenični raspored [18]

S obzirom na primjenu, spojevi zakovicama mogu biti čvrsti, nepropusni i čvrsti-nepropusni. Čvrsti spojevi se koriste pri izradi čeličnih konstrukcija krovova, mostova, dizalica. Nepropusni spojevi primjenjuju se u izgradnj spremnika koji nisu podvrgnuti predtlaku, a čvrsti-nepropusni spojevi primjenu pronalaze u gradnji brodova, kotlova te spremnika koji su tlačno opterećeni.

3.4.5 Proračun

- Naprezanje zakovice na odrez prema slici 3.41 računa se prema relaciji (3.16):



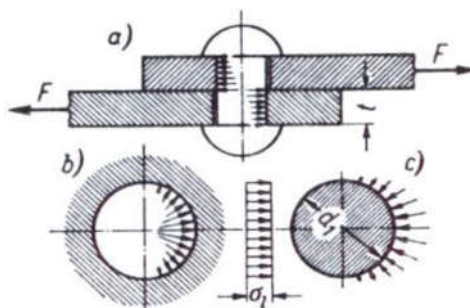
Slika 3.41: Smicanje svornjaka zakovice [15]

$$\tau_s = \frac{F}{n \cdot m \cdot A_1} \quad (3.16)$$

Gdje je:

τ_s	[N/mm ²]	odrežno naprezanje u presjeku zakovice
F	[N]	vlačna ili tlačna sila
n	-	broj zakovica
m	-	broj rezova spoja
A_1	[mm ²]	površina presjeka zakovane zakovice

- Naprezanje bokova provrta prikazano na slici 3.42 računa se prema relaciji (3.17):



Slika 3.42: Utjecaj pritiska na bočne strane zakovice i provrta

a) utjecaj pritiska na bočne strane; b) pritisak na bok provrta; c) utjecaj pritiska na zakovicu [15]

$$P = \frac{F}{n \cdot d_1 \cdot t} \quad (3.17)$$

Gdje je:

P	[N/mm ²]	tlak na bočnu stranu provrta
F	[N]	sila koja može biti tlačna ili vlačna
n	-	broj zakovica u spoju
d_1	[mm]	promjer provrta zakovice
t	[mm]	mjerodavna debljina lima

3.4.6 Primjer proračuna

Potrebno je spojiti dva čelična lima prema slici 3.41 zakovicom izrađenom od otvrdnute legura aluminija smične čvrstoće $\tau_{s,M} = 380 \text{ N/mm}^2$. Treba odrediti promjer zakovice koja može podnijeti opterećenje $F = 50 \text{ kN}$ uz faktor sigurnosti $S = 3$ [15].

Rješenje:

Jednoredni zakovični spoj; $n = 1$, $m = 1$.

Prema relaciji (3.16) slijedi:

$$\tau_s = \frac{F}{A_1} = \frac{F}{d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = \frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi}$$

$$\tau_s \leq \tau_{dop} = \frac{\tau_{s,M}}{S}$$

$$\frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi} = \frac{\tau_{s,M}}{S}$$

$$\frac{4 \cdot F}{\frac{\tau_{s,M} \cdot \pi}{S}} = d^2$$

$$d^2 = \frac{4 \cdot F \cdot S}{\tau_{s,M} \cdot \pi}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot S}{\tau_{s,M} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 50\,000 \cdot 3}{380 \cdot \pi}} = 22,42 \text{ mm}$$

Najmanji promjer zakovice koja može podnijeti navedeno opterećenje je 22,42 mm. Budući da nije ekonomično proizvoditi zakovicu točno takvog promjera, koristit će se standardna zakovica prvog većeg promjera.

3.5 Stezni spojevi

Steznim spojevima podrazumijevaju se spojevi dva dijela kod kojih jedna ima unutarnju, a drugi vanjsku istu nazivnu mjeru, pri čemu se ostvaruje prijeklop između dijelova. Da bi se ostvario stezni spoj, unutarnja mjera vanjskog dijela mora biti nešto manja od vanjske mjere unutarnjeg dijela. Zbog toga nastaje površinski tlak na dodirnim površinama koji osigurava potrebno trenje za prijenos vrtnje. Spoj ostvaren na taj način podnosi i aksijalna opterećenja. Stezni spojevi pronalaze primjenu na mjestima na kojim preostali spojevi glavine i vratila nisu dostatni za prenošenje velikog okretnog momenta. Stezni spojevi također solidno podnose i udarna i promjenjiva opterećenja jačeg intenziteta. Stezni spojevi se najčešće koriste za spajanje rotacijskih dijelova kao što su remenice, lančanici, turbinski i ventilatorski rotori, zupčanici, elektromotorni rotori, itd. Stezni spojevi se oblikuju uz odgovarajući postupak montaže zbog čvrstog dosjeda koji se ostvaruje između vratila i glavine, a to je prikazano u poglavlju 3.5.1 [1, 2, 10].

Prednosti steznih spojeva:

- Precizno međusobno centriranje elemenata
- Dobro podnošenje vibracija
- Izdržljivost spoja
- Prikladni za prenošenje dinamičkog i udarnog opterećenja koje ima promjenjiv smjer
- Niska cijena i jednostavna izrada spoja
- Čvrsto fiksiranje dijelova spoja.

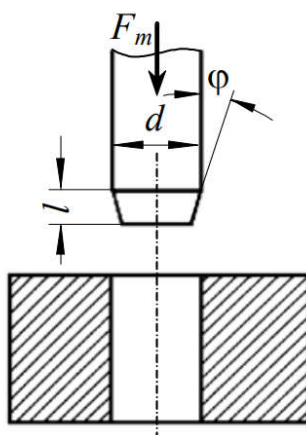
3.5.1 Vrste spajanja steznih spojeva

Prema načinu ostvarivanja spoja, stezni spojevi se dijele na [2]:

- Uzdužni spoj koji se postiže uprešavanjem pri temperaturi okoline. Uprešavanje se provodi na suho i zbog toga može doći do struganja površina ili hladnog zavarivanja. Zbog toga se preporučuje brzina uprešavanja do 2 mm/s. Prilikom razdvajanja uzdužnog spoja sila razdvajanja je oko 2,5 puta manja od potrebne sile za uprešavanje. Stezni spoj formiran na ovakav način smije se opteretiti tek nakon što prođu 24 sata od uprešavanja.
- Poprečni spoj koji može biti ostvaren skupljanjem ili rastezanjem. Skupljanje je postupak ostvarivanja spoja gdje se vanjski dio zagrijava na toliko visoku

temperaturu koja će ga dovoljno proširiti i omogućiti lagano navlačenje na unutarnji dio. Rastezanje je postupak kojim se osovina pothlađuje onoliko koliko je potrebno da se nesmetano može ugraditi u provrt glavine. Moguće je ostvariti i kombinirani spoj u kojem se istodobno zagrijava vanjski dio i hladi unutarnji.

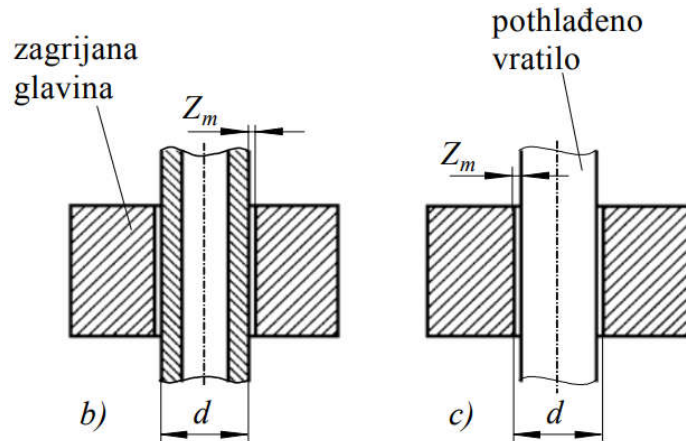
- Mehanički spoj koji pripada uzdužnom načinu spajanja dijelova. Mehanički spoj se ostvaruje u postupku u kojem se vratilo i glavina sastavljaju u hladnom stanju. Spoj se ostvaruje uz pomoć određene sile kojom se vrši uprešavanje vratila određenom brzinom u glavinu što je prikazano na slici 3.43. Postupak uprešavanja može se olakšati skošenjem od 5° u dužini od 2 do 5 mm na dijelu koji ima manju granicu tečenja čime se izbjegava neželjeno struganje površine. Lakše uprešavanje se postiže i nauljivanjem vratila prije samog uprešavanja koje će onemogućiti eventualno zaribavanje. Stezni spoj ostvaren na ovaj način može se opteretiti nakon što prođe 48 sati od ostvarivanja spoja [1, 10].



Slika 3.43: Mehanički način ostvarivanja steznog spoja [1]

- Termički spoj pripada poprečnom načinu spajanja dijelova. Temelji se na svojstvu materijala da se prilikom zagrijavanja oni šire, a prilikom hlađenja skupljaju. Postupak se može vršiti na način da se unutarnji dio rastegne (stezni spoj ostvaren rastezanjem) ili da se vanjski dio skupi (stezni spoj ostvaren skupljanjem). U slučaju steznog spoja skupljanjem, vanjski dio se toliko zagrijava da se dovoljno rastegne i omogući lako navlačenje na unutarnji dio. Postupnim ohlađivanjem se skuplja i snažno pritišće unutarnji dio. Zagrijavanje vanjskog dijela se provodi u uljnoj kupki u kojoj se mogu postići temperature do $350\text{ }^\circ\text{C}$ ili u peći na vrući zrak ako se zahtijevaju suhe dodirne površine. U steznom spoju ostvarenom rastezanjem provodi se pothlađivanje vratila onoliko koliko je potrebno da se nesmetano može

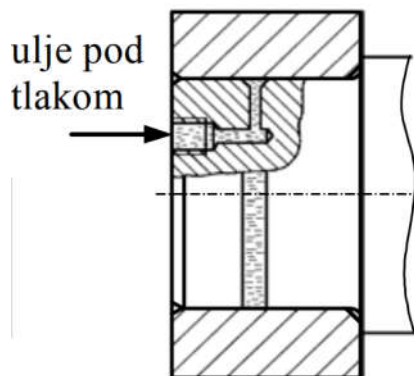
ugraditi u glavinu. Prilikom podizanja temperature i približavanja sobnoj, unutarnji dio se širi, naliže i pritišće vanjski dio ostvarivajući tako stezni spoj. Ohlađivanje se provodi suhim ledom koji može postići $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ili tekućim dušikom pri $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. U slučaju da se primjenom jednog od ova dva postupka ne može ostvariti spoj, koristi se kombinacija oba postupka tako da se istovremeno vanjski dio zagrijava, a unutarnji hladi. Slika 3.44 pokazuje stezni spoj skupljanjem i stezni spoj rastezanjem [1, 10].



Slika 3.44: Termički stezni spojevi

b) stezni spoj skupljanjem; c) stezni spoj rastezanjem [1]

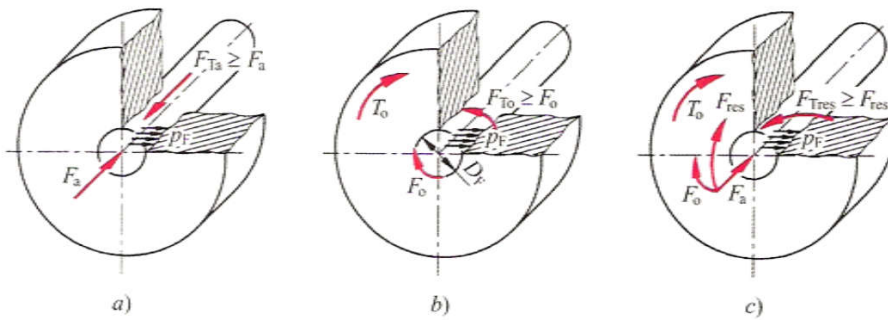
- Hidraulički spoj se koristi samo za spajanje dijelova s blago koničnim površinama. Postupak se vrši tako da je najprije potrebno utisnuti vratilo u glavinu do odgovarajuće dubine i tak onda se na plohe dodira glavine i vratila dovodi ulje koje je pod tlakom i to ulje širi glavinu, a stlačuje vratilo (prema slici 3.45) i tako se omogućuje postizanje određenog položaja vratila u odnosu na glavinu. Navedeni postupak primjenjuje se kod dodirnih ploha cilindričnog oblika te pri demontaži ležajeva koji su prvotno ugrađeni toplinskim ili mehaničkim postupkom.



Slika 3.45: Hidraulički stezni spoj [1]

3.5.2 Proračun

Posljedica nastalih deformacija u steznom spoju je tlak p_F na površinama spoja. Umnožak naležne površine $A_F = D_F \cdot \pi \cdot l_F$, tlaka koji djeluje na tu površinu p_F , te faktora prionjivosti ν daje otpor koji se odupire djelovanju opterećenja koje se prenosi, obodnoj sili F_o i aksijalnoj sili F_a . Kada djeluju u isto vrijeme, obodna i aksijalna sila daju rezultantnu silu F_{res} . Sile koje djeluju u steznom spoju prikazane su na slici 3.46.



Slika 3.46: Sile steznog spoja

a) aksijalna sila F_a ; b) obodna sila F_o ; c) rezultirajuća sila F_{res} [2]

Pogonska rezultirajuća sila koja se javlja u radu računa se prema relaciji (3.18):

$$F_{res} = \sqrt{F_a^2 + \left(\frac{2 \cdot T_o}{D_F}\right)^2} \quad (3.18)$$

Gdje je:

F_{res}	[N]	pogonska rezultirajuća sila
F_a	[N]	pogonska uzdužna sila
T_o	[Nmm]	pogonski moment vrtnje
D_F	[mm]	promjer steznog spoja

Potrebna sila prianjanja na naležnoj površini izražava se prema relaciji (3.19) [2]:

$$F_T \geq K_V \cdot S \cdot F_{res} \quad (3.19)$$

Gsje je

F_T	[N]	potrebna sila prianjanja spoja
K_V	-	pogonski faktor prema DIN 3990 T1
S	-	faktor sigurnosti

Potreban tlak na naležnoj površini steznog spoja računa se prema relaciji (3.20) [2]:

$$p_F = \frac{F_T}{A_F \cdot v} = \frac{F_T}{D_F \cdot \pi \cdot l_F \cdot v} \quad (3.20)$$

Gdje je:

F_T	[N]	potrebna sila prijanjanja
A_F	[mm ²]	naležna površina spoja = $D_F \cdot \pi \cdot l_F$
l_F	[mm]	duljina steznog spoja
v	-	faktor prijanjanja

Da bi se ostvario nerastavljiv stezni spoj potrebno je odrediti prijeklop kojima će se ostvariti čvrsti dosjed. Potrebni prijeklop određuje se prema relaciji (3.21), a prikazuje ga slika 3.47.

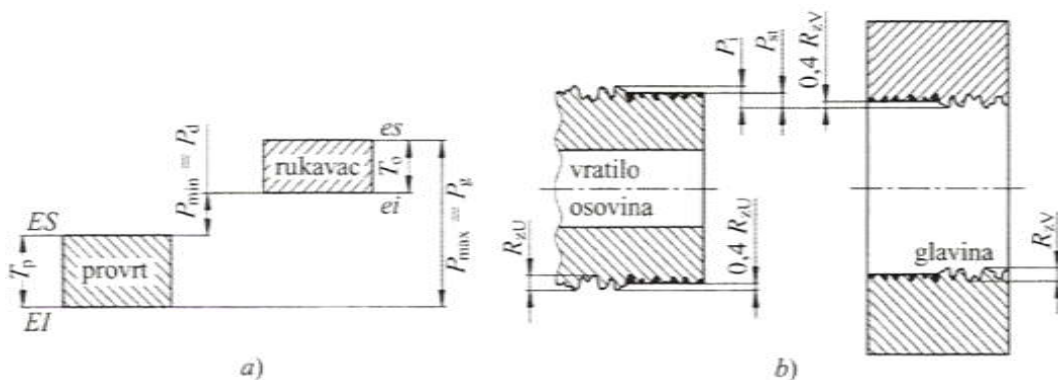
$$P_{min} = P_d = ei - ES \quad (3.21)$$

$$P_{max} = P_g = es - EI$$

$$P_d \leq P_i \leq P_g$$

Gdje je:

P_{min}, P_d	[mm]	najmanji prijeklop dosjeda spoja
P_{max}, P_g	[mm]	najveći prijeklop dosjeda spoja
ei	[mm]	donja granična vrijednost unutarnjeg dijela
ES	[mm]	gornja granična vrijednost vanjskog dijela
es	[mm]	gornja granična vrijednost unutarnjeg dijela
EI	[mm]	donja granična vrijednost vanjskog dijela
P_i	[mm]	izvedeni prijeklop



Slika 3.47: Shematski prikaz steznog dosjeda

a) tolerancijska polja steznog dosjeda; b) uglašavanje naležnih površina dosjeda [2]

4. RASTAVLJIVI SPOJEVI

Rastavljivi spojevi su takvi spojevi koji se mogu rastaviti bez razaranja ili oštećenja i ponovno sastaviti uz istu funkciju vezivnog elementa.

U rastavljive spojeve pripadaju:

- Vijčani spojevi
 - Pričvrtni vijci
 - Pokretni vijci
- Spojevi glavine
 - Klinovi
 - Pera
 - Klinasta vratila
 - Zupčasta vratila
 - Stezni elementi
 - Čeona ozubljenja
- Zatici
- Svornjaci
- Opruge.

4.1 Vijčani spoj

Vijčani spoj pripada rastavljivom načinu spajanja elemenata. Osim povezivanja, primjenu pronalaze u regulaciji, prijenosu gibanja, mjerenju, brtvljenju i zatezanju. Osnovni elementi kojima se ostvaruju vijčani spojevi su vijak i matica. Na tijelu vijka nalazi se vanjski navoj dok je na matici pripadajući unutarnji navoj. U spojevima vijcima, matica dolazi kao samostalni element ili se vijak može direktno spojiti sa spojnim strojnim dijelom u kojem se tada mora nalaziti unutarnji navoj. Vijak i matica su najkorišteniji elementi strojeva i zato su oblici, veličine i materijali vijaka i matica normirani [1].

Prednosti vijčanih spojeva [1]:

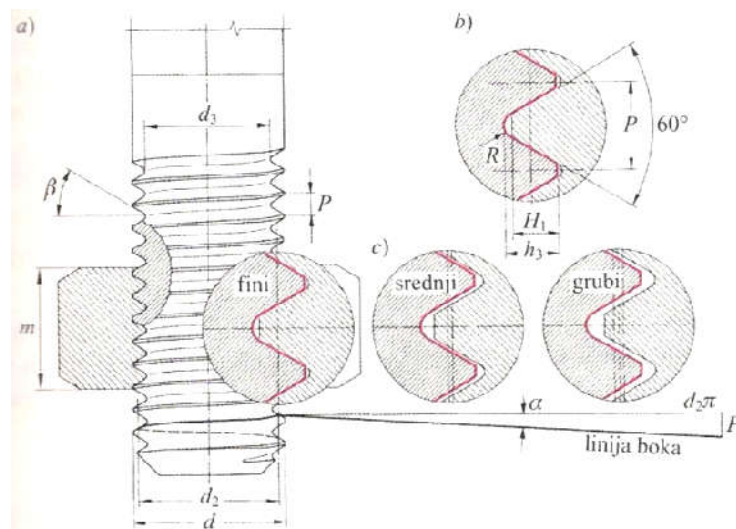
- Dobro podnošenje dinamičkih opterećenja
- Ekonomična i jednostavna zamjena spojnih elemenata
- Omogućuju spajanje svih vrsta materijala
- Sastavljanje i rastavljanje bez negativnog utjecaja na dijelove spoja.

Nedostaci vijčanih spojeva [1]:

- Veliko naprezanje površine spojnih dijelova na mjestu ostvarenog spoja zbog prednaprezanja vijka i matice
- Konstantno opterećenje u području prednapregnutog vijčanog spoja
- Značajno zarezno djelovanje i oslabljivanje presjeka spojnih dijelova uslijed izbušenih potrebnih provrta.

4.1.1 Navoj

Temeljni element svakog vijka je navoj. Navoj omogućuje prenošenje sila između vijaka i matice. Osnova navoja je zavojnica čiji se profil ovija oko cilindrične jezgre vijka promjera d_3 (prema slici 4.1) usponom P . Uspon P ili korak navoja je vrijednost za koju će se pomaknuti matica kada odradi jedan puni okretaj (360°). Razvije li se ploha navoja na promjeru d_2 dobiti će se trokut s kutom uspinjanja α koji je prikazan na slici 4.2. S obzirom na način nastajanja, zavojnica može biti lijeva ili desna. Lijeve zavojnice nastaju omotavanjem pravca oko valjkastog tijela u suprotnom smjeru od smjera kazaljke sata, a desne zavojnice nastaju omotavanjem pravca oko valjkastog tijela u smjeru kazaljke sata. Prema tome postoje lijevi i desni navoji. Osnovna karakteristika navoja je nazivni promjer. Nazivni promjer se označava s d za nazivni promjer vijaka i D za nazivni promjer matice, a mjeri se vanjski promjer.

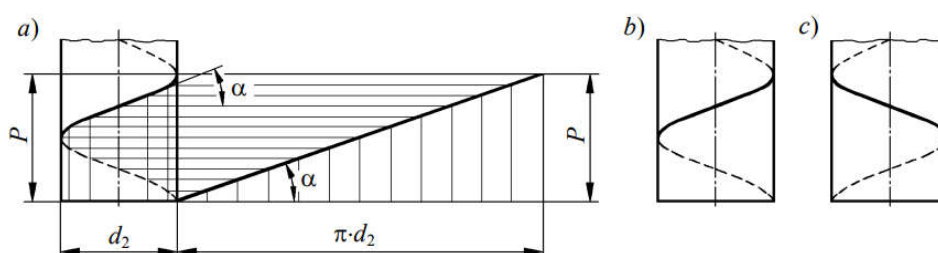


Slika 4.1: Navoj vijka za pritezanje

a) vijak i matica; b) metrički ISO profil; c) tolerancijski razredi ISO profila [2]

Značenje oznaka:

- d - vanjski nominalni promjer navoja (vijka)
- d_2 - srednji promjer na navoju
- d_3 - unutarnji promjer navoja (vijka)
- P - korak navoja
- H_1 - dubina u navoju koja prenosi silu
- h_3 - najveća dubina u navoju
- R - zaobljenje korijena u navoju
- m - visina matica
- β - kut profila zavojnice



Slika 4.2: Zavojnice u navoju

a) nastajanje zavojnice; b) desne zavojnice; c) lijeve zavojnice [1]

Oblici navoja [1, 2]:

- **Metrički ISO navoj** – profil metričkog navoja je jednakokračan trokut s kutom navoja $2\beta = 60^\circ$. Postoji normalni metrički navoj i fini metrički navoj. Metrički navoj normalnog tipa se najviše koristi kod vijaka i matica za pričvršćivanje. Metrički navoj finog tipa primjenjuje se u situacijama u kojima postoji velika potreba za sigurnošću protiv otpuštanja spoja ili kada se zahtijevaju precizni pomaci u uzdužnom smjeru vijka. Norma ISO 261 standardizira osnovne profile navoja vijaka koji imaju metrički navoj, a norma ISO 724 mjere navoja. Tablica 4.1 prikazuje neke vrijednosti navoja koje se koriste u strojogradnji. S obzirom na prioritete, navoj se može podijeliti u tri reda. Prednost uvijek ima navoj u prvom redu prioriteta, drugi red prioriteta koristi se u specijalnim slučajevima, a treći red samo u iznimnim slučajevima. Oznaka za metrički navoj normalnog tipa je slovo M i uz njega se piše nazivni promjer d u milimetrima, primjer: M16. Finom metričkom navoju se uz oznaku dopisuje još i uspon P u milimetrima, primjer M16×1,5. Budući da navoj može biti lijevi i desni, lijevom navoju se dodaje oznaka LH, primjer: M16×1,5 LH.

Tablica 4.1: Normalni metrički navoj [2]

Oznaka ¹⁾	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	1 045
M45	4,5	45	42,077	40,129	1 224
M48	5	48	44,752	42,587	1 377
M52	5	52	48,752	46,587	1 652
M56	5,5	56	52,428	50,046	1 905
M60	5,5	60	56,428	54,046	2 227
M64	6	64	60,103	57,505	2 520
M68	6	68	64,103	61,505	2 888

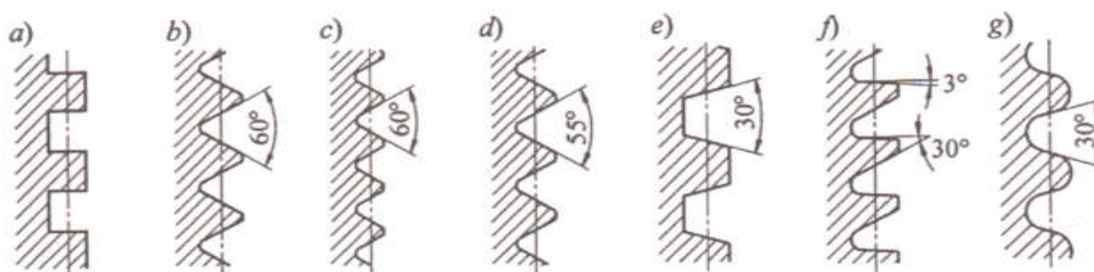
Oznake navoja koje su u tablici deblje tiskane imaju prvu prednost, obično tiskane oznake imaju drugu prednost, a oznake u zagradama imaju treću prednost.

- **Trapezni navoj** – temelji se na jednakokračnom trokutu s kutem profila $2\beta=30^\circ$, teorijski profil navoja je trapez prema slici 4.3 e. Prednost trapeznog navoja u odnosu na kvadratni navoj je lakše pomicanje vijka zbog automatskog

poravnavanja. Primjenu pronalazi u pokretnim navojnim spojevima kao što su vretena u škripcima, dizalima i prešama. Oznaka trapeznog navoja su slova Tr, nazivni promjer navoja d i uspon P izražen u milimetrima. Primjer označavanja trapeznog navoja: Tr 20×4.

- **Kosi navoj** – oznaka kosog navoja je slovo S, nazivnim promjerom d te uspon P izražen u milimetrima. Primjer označavanja: S 70×10.
- **Obli navoj** – osnovica je polukružni profil, označava se slovima Rd i nazivnim promjerom u mm i usponom u mm ili u colima (Rd dx1/z" ili Rd dxP). Primjer označavanja oblog navoja: Rd 40x¹/₁₆" ili Rd 44×22.
- **Whitworthov navoj** – temelji se na jednakokračnom trokutu s kutem $2\beta=55^\circ$. Nazivni promjer je u colima, primjer: 2".
- **Whitworthov cijevni navoj** - nema zračnosti između matice i vijka i zbog toga ima mogućnost dobrog brtvljenja. Zbog dobrog brtvljenja koristi se za spajanje cijevi plinskih i vodovodnih instalacija. Oznaka je slovo R i nazivni promjer izražen u colima. Primjer označavanja cijevnog navoja: R 1/2", fini: R 2¹/₂"x¹/₄".
- **Edisonov navoj**- označava se slovom E i nazivnim promjerom u mm. Primjer Edisonovog navoja: E 27.
- **Navoj za bicikle** – označava se slovima Bi i nazivnim promjerom u colima. Primjer zavoja za bicikle: Bi 3/8".
- **Navoji vijaka za lim** – označava se slovima Nl i nazivni promjer u mm. Primjer navoja vijka za lim: Nl 6,3.

S obzirom na profil, navoji mogu biti plosnati ili trokutasti. Primjer plosnatog oblika navoja je kvadratni navoj. Navoji s teorijskim profilom trokuta su cjevasti navoj, metrički navoj, trapezni navoj, pilasti navoj, obli itd. Slika 4.3. prikazuje temeljne profile navoja.

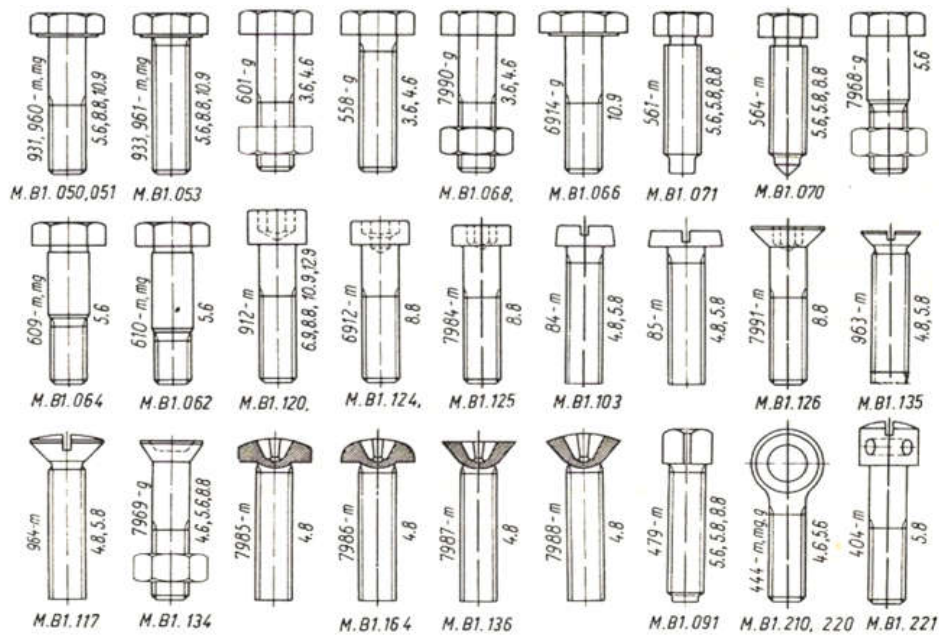


Slika 4.3: Temeljni profili

- a) navoj kvadratnog oblika; b) normalan metrički navoj; c) fini metrički navoj; d) cijevni navoj; e) trapezni navoj; f) pilasti navoj; g) obli navoj [2]

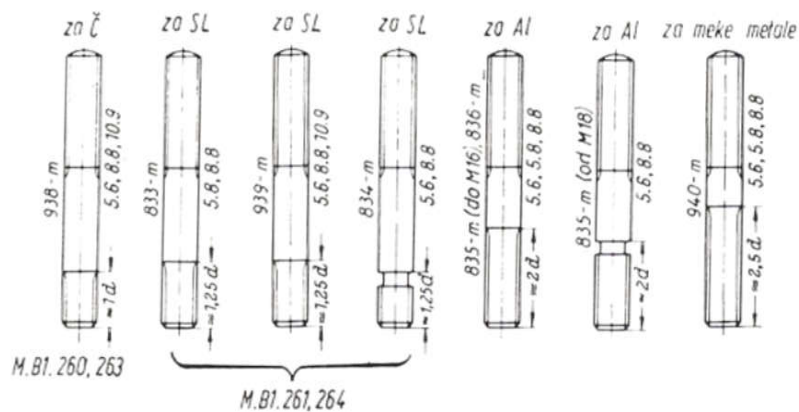
4.1.2 Vijak

Vijak je strojni dio koji omogućuje rastavljiv spoj. Valjkastog je oblika i sastoji se od glave vijka i svornjaka na kojem je izrađen navoj duž cijele vanjske strane ili samo jednog dijela. Navoj vijka je standardiziran i može biti raznih oblika kao što je opisano u poglavlju 4.1.1. Oblik glave vijka obično odgovara šesterostranoj prizmi, međutim glava vijka može biti i polukrugla, četverokutna, cilindrična s upuštenim ili ravnim križem, upuštena zvijezda ili šesterokut, krilna, lećasta, itd. Standardizirani oblici vijka s glavom prikazani su na slici 4.4 [10].



Slika 4.4: Standardni vijci [2]

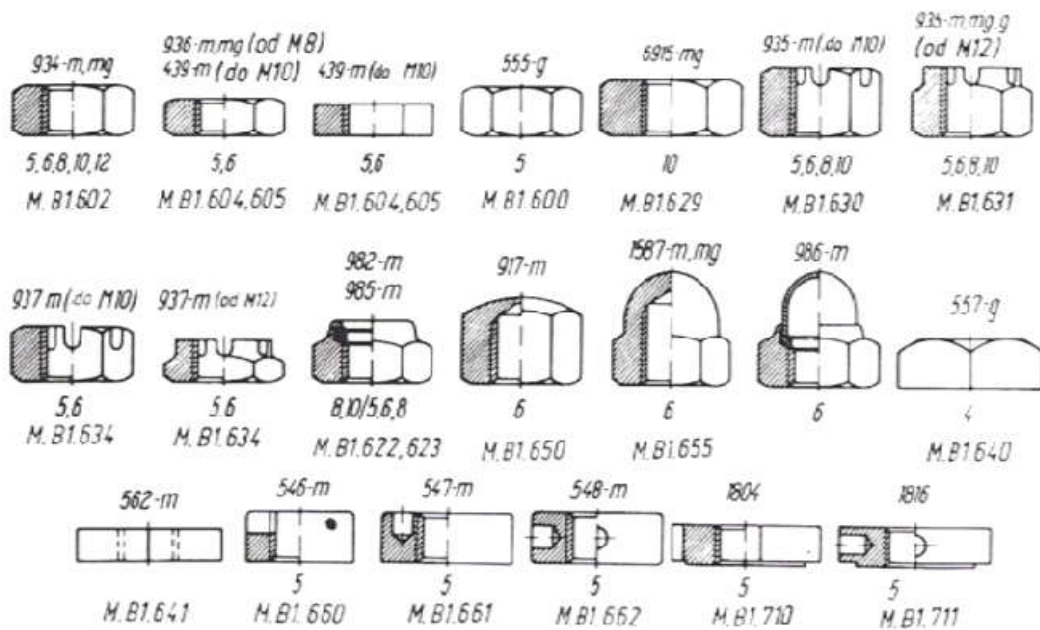
Nasuprot vijcima s glavom, postoje i utični vijci koje prikazuje slika 4.5. Utični vijci sastoje se od donjeg uvojnog dijela koji ima prijelazni dosjed i gornjeg dijela na kojem se nalazi navoj za maticu. Utični vijci se uvijaju pomoću posebnog ključa [10].



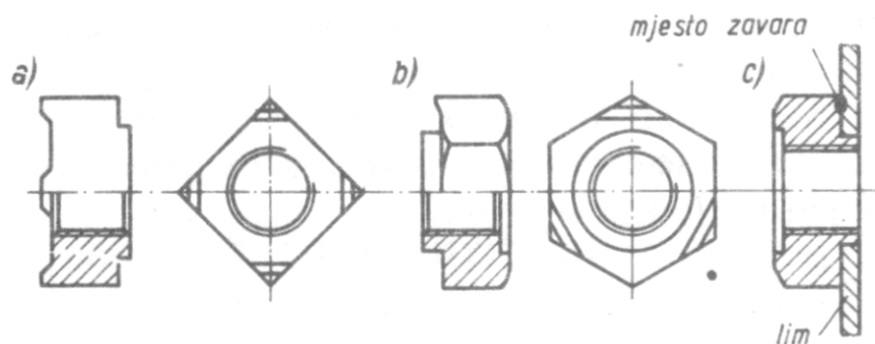
Slika 4.5: Utični vijci [2]

4.1.3 Matica

Matica je strojni element koji se sastoji od unutarnjeg navoja i zajedno s vijkom omogućuje ostvarivanje vijčanog spoja. Matice su najčešće šesterokutnog oblika i vanjski oblik matice često slijedi oblik glave vijka. Visina matice je obično 80 % njezinog nazivnog promjera. Standardne matice prikazuje slika 4.6. Postoje i matice za privarivanje koje prikazuje slika 4.7. Takve matice na čeonj strani imaju nekoliko izbočenja koja olakšavaju privarivanje na lim. Koriste se na teško pristupačnim mjestima te tako značajno olakšavaju radove [10].



Slika 4.6: Standardne matice [2]

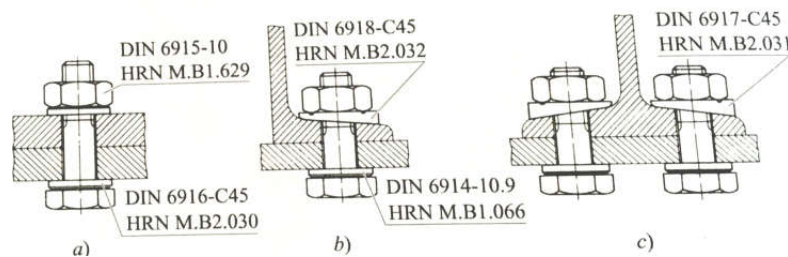


Slika 4.7: Matice s izbočenjima za privarivanje

a) četverostrane prema normi DIN 928; b) šesterostrane prema normi DIN 929; c) matice nakon privarivanja za lim [10]

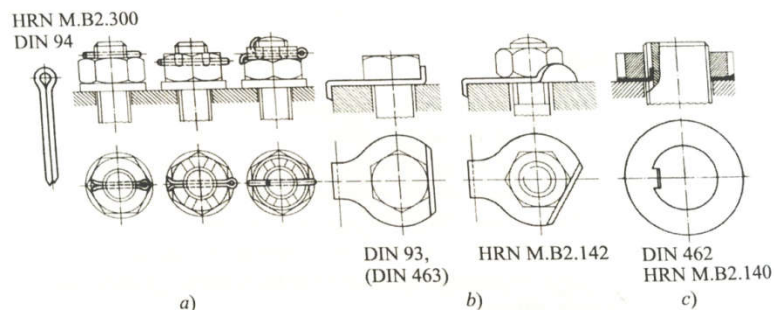
4.1.4 Podloške za osiguravanje

Podloška je strojni element koji se ulaže ispod glave vijka ili ispod matice i primjenjuje se u vijčanim spojevima kako bi se smanjio potrebni moment, također, upotrebljavaju se kada su neravne površine nalijeganja kao što je slučaj kod kovanih ili lijevanih dijelova. Primjenjuju se i na površinama koje su mekanije od vijka kojim se ostvaruje spoj, na kosim dosjednim površinama prema slici 4.8 ili kad se vijci nalaze u ovalnim provrtima. Podloške se u vijčanim spojevima koriste i za osiguranje spoja protiv odvijanja i to osiguranje može biti oblikom (prikazano na slici 4.9) ili silom. Osiguranje silom svojim aksijalnim opružnim djelovanjem sprečava popuštanje prednaprezanja što je prikazano na slici 4.10 [10].



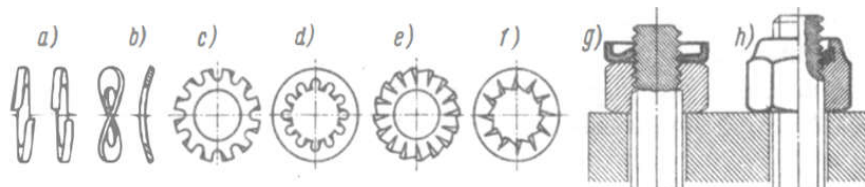
Slika 4.8: Spojevi vijcima u konstrukciji od čelika [10]

a) limovi; b) U-nosači; c) I-nosači



Slika 4.9 Osiguranje vijka oblikom

a) rascjepka; b) sigurnosni lim s vanjskim ispustom; c) sigurnosni lim s unutarnjim ispustom [10]



Slika 4.10 Osiguranje vijka silom

a) elastični prsteni; b) izvijeni i zakrivljeni elastični prsten; c) zupčasta podloška A s vanjskim ozubljenjem; d) podloška J s unutarnjim ozubljenjem; e) podloška lepezastog oblika A; f) podloška lepezastog oblika F; g) sigurnosna matica; h) šesterostrana matica sa samoosiguranjem

[10]

4.1.5 Materijali za vijke i matice

Vijci i matice se uglavnom izrađuju od žilavog čelika s raznim svojstvima rastezanja i čvrstoće. Dva broja označavaju kvalitetu čelika za izradu vijaka. Broj na prvom mjestu određuje najmanju čvrstoću materijala $[R_m(\sigma_m)/100]$, a broj na drugom mjestu označava deseterostruki odnos najmanje granice razvlačenja i najmanje čvrstoće $[(R_e/R_m) \times 10]$. Kvalitetu čelika za matice simbolizira samo jedan broj koji označava naprezanje ispitivanjem σ_{vL} . Naprezanje ispitivanjem podudara se s najmanjom vlačnom čvrstoćom vijka s kojim matica ostvaruje vijčani spoj $\frac{\sigma_{vL}}{100} \sim \frac{R_m(\sigma_m)}{100}$. U tablici 4.2 prikazane su oznake i svojstva čelika za vijke i matice.

Tablica 4.2: Karakteristike čelika od kojih se izrađuju vijci i matice [2]

Razred čvrstoće	Vijci				Tvrdoč	Matice	
	Naprezanje tečenja $\frac{R_e}{\text{N/mm}^2}$	$\frac{R_{p0.2}}{\text{N/mm}^2}$	Vlačna čvrstoća $\frac{R_m}{\text{N/mm}^2}$	Rastezljivost $A_5/\%$		Razred čvrstoće	Čvrstoća $\frac{R_m}{\text{N/mm}^2}$
4.6 4.8 ¹⁾	240 320		400 420	25 14	110...170 HB	4 ³⁾	400 302
5.6 5.8 ¹⁾	300 400		500 520	20 10	140...215 HB	5 ³⁾	500 302
6.6 6.8 ¹⁾ 6.9	- 480 -		- 600 -	16 8 12	170...245 HB	6 ³⁾	600 302
8.8 10.9 12.9 ²⁾ 14.9		640 940 1180 -	800 1040 1220 -	12 9 8 7	225...300 HV 280...370 HV 330...440 HV 400...510 HV	8 10 14 ⁴⁾ 14	800 1000 1200 1400 302 353 353 380

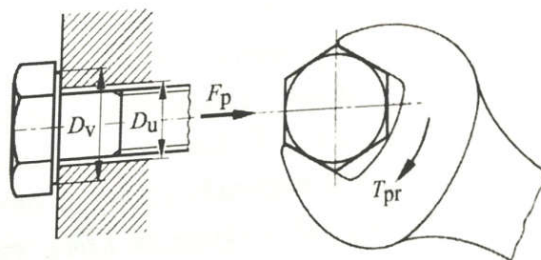
4.1.6 Proračun

Pritezanjem vijka u presjeku jezgre se stvara naprezanje od pritezanja σ_{pr} . Očekivana sila prednaprezanja računa se prema relaciji (4.1), a djelovanje sile prikazuje slika 4.11.

$$F_P = A_j \cdot \sigma_{pr} \quad (4.1)$$

Gdje je:

F_P	[N]	sila predzatezanja
A_j	[mm ²]	površina jezgre vijka prema tablici 4.1
σ_{pr}	[N/mm ²]	prednaprezanje



Slika 4.11: Sila predzatezanja F_p i moment pritezanja T_{pr} [10]

- Moment pritezanja prema slici 4.11 može se izračunati prema relaciji (4.2) [10]:

$$T_{pr} \approx F_p \left(0,16P + \mu \frac{d_2 + D_{sr}}{2} \right) \quad (4.2)$$

Gdje je:

T_{pr}	[Nmm]	moment pritezanja
F_p	[N]	potrebna sila prednaprezanja
P	[mm]	uspon navoja (tablica 4.1)
μ	-	koeficijent trenja koji djeluje na bok navoja i na glavu vijka, približno 0.2 za čelične vijke
d_2	[mm]	srednji promjer na navoju prema tablici 4.1
D_{sr}	[mm]	srednji promjer glave vijka = $0.5(D_v + D_u)$

- Vlačno naprezanje u presjeku vijka koji prenosi naprezanje računa se prema relaciji (4.3):

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_s} \leq 0,8\sigma_T \quad (4.3)$$

Gdje je:

σ	[N/mm ²]	naprezanje na vlak u opterećenom presjeku
F_{max}	[N]	maksimalna sila koju vijak može podnijeti
A_s	[mm ²]	površina opterećenog presjeka prema tablici 4.1
σ_T	[N/mm ²]	minimalna granica razvlačenja materijala od kojeg je vijak izrađen prema tablici 4.2

- Vlačno naprezanje u elastičnom struku vijka računa se prema relaciji (4.4):

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_f} \leq 0,8\sigma_T \quad (4.4)$$

Gdje je:

σ	[N/mm ²]	naprezanje elastičnog struka na vlak
A_f	[mm ²]	presjek elastičnog struka s promjerom d_f

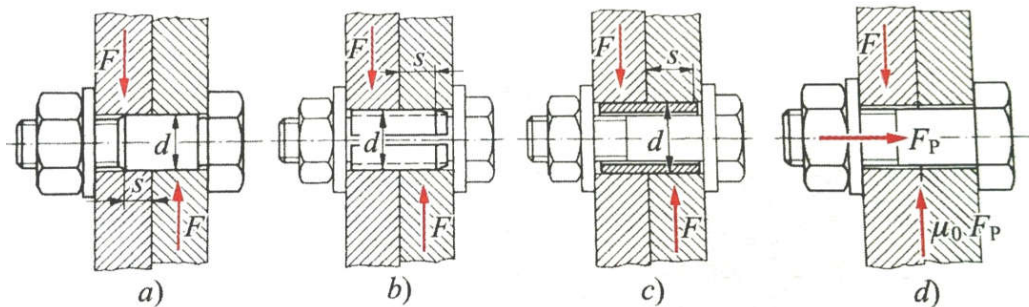
- Za vlačno naprezanje jezgre uzima se sama pogonska sila i računa se prema relaciji (4.5):

$$\sigma_v = \frac{F}{A_j} \quad (4.5)$$

Gdje je:

σ_v	[N/mm ²]	naprezanje jezgre na vlak zbog djelovanja pogonske sile
F	[N]	aksijalna sila koja djeluje na vijak
A_j	[mm ²]	površina jezgre vijka (tablica 4.1)

- Stezna ljuska, dosjedni vijak i elastični tuljak opterećeni su slično kao i zakovic na odrez i prema tome se javlja naprezanje na boku provrta prema slici 4.12, a računa se prema relaciji (4.6):



Slika 4.12: Bočno opterećenje na vijak

a) dosjedni vijak; b) stezna ljuska; c) elastični tuljak; d) prolazni vijak s maticom [10]

$$\tau_a = F/A \quad (4.6)$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{d \cdot s}$$

Gdje je:

τ_a	[N/mm ²]	naprezanje na odrez
F	[N]	bočna sila koja djeluje na jedan vijak
A	[mm ²]	presjek vijka opterećenog na odrez
σ_1	[N/mm ²]	naprezanje bokova provrta
d	[mm]	nazivni promjer navoja
s	[mm]	minimalna nosiva duljina nosećeg dijela vijka

4.1.7 Primjer proračuna

Izračunajte i odredite promjer vijka s metričkim navojem za spajanje poklopca na prirubnici. Unutarnji promjer na koji djeluje tlak od 1,6 MPa je 310 mm. Spajanje je predviđeno s 6 vijaka kvalitete 5.8 uz faktor sigurnosti 2. Silu prednaprezanja računati s faktorom sigurnosti protiv labavljenja 1,3.

Zadano:

$$p = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Pa} \quad S_V = 2$$

$$D = 310 \text{ mm} = 0,31 \text{ m} \quad S_L = 1,3$$

$$n = 6$$

$$\text{Vijci kvalitete 5.8} \Rightarrow R_m = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}; R_e = \frac{R_m \cdot 8}{10} = \frac{500 \cdot 8}{10} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Rješenje:

Površina poklopca:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{0,310^2 \cdot \pi}{4} = 0,0755 \text{ m}^2$$

Sila koja djeluje na poklopac:

$$F = p \cdot A = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,0755 = 120\,763 \text{ N}$$

Sila prednaprezanja:

$$F_P = S_L \cdot F = 1,3 \cdot 120\,763 = 156\,992 \text{ N}$$

Ukupna sila:

$$F_u = F + F_P = 120\,763 + 156\,992 = 277\,755 \text{ N}$$

Sila na jednom vijku:

$$F_1 = \frac{F_u}{n} = \frac{277\,755}{6} = 46\,292,5 \text{ N}$$

Dopušteno naprezanje u vijku:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{S_v} = \frac{400}{2} = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Površina jezgre vijka:

$$A_j \geq \left[\frac{F_1}{\sigma_{dop}} = \frac{46\,292,5}{200} = 231 \text{ mm} \right]$$

Izbor vijka prema tablici 4.1:

- za prvi red prioriteta izabran je vijak M 24 s površinom jezgre $A_j = 325 \text{ mm}^2$
- za drugi red prioriteta izabran je vijak M 22 s površinom jezgre $A_j = 282 \text{ mm}^2$.

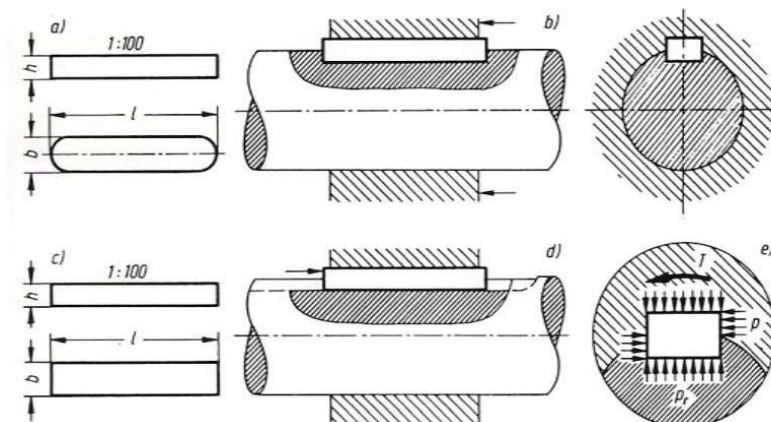
4.2 Spojevi glavine

Spojevi glavine pripadaju u rastavljive načine spajanja vratila i glavine. Vratilo je strojni dio koji na sebi nosi razne strojne dijelove s kojih može preuzeti ili na koje može prenositi gibanje i opterećenje. Strojni dijelovi koji se mogu nalaziti na vratilu i koji zajedno s njim rotiraju su remenice, spojke, lančanici, zupčanici, itd. Strojni dio koji priliježe na vratilo zove se glavina. Spoj glavine i vratila ostvaruje se elementom koji omogućava prenošenje zakretnog momenta s glavine na vratilo ili obrnuto, a u specijalnim slučajevima omogućuje i pomakivanje glavine u uzdužnom smjeru osi vratila. Prema elementima kojima se ostvaruje veza, spojevi glavine se dijele na [1, 2]:

- Spojeve uzdužnim klinom
- Spojeve perom
- Spojeve s klinastim vratilom
- Spojeve sa zupčastim vratilom
- Spojeve s poligonim profilima vratila
- Konične spojeve
- Spojeve sa steznom glavinom
- Spojeve sa steznim elementima
- Spojeve čeonim ozubljenjem.

4.2.1 Spojevi uzdužnim klinovima

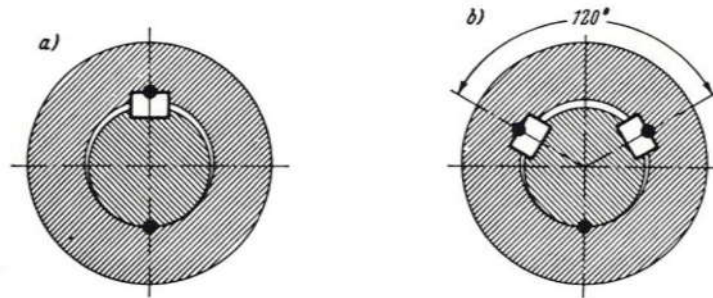
Uzdužni klin je element stroja koji prenosi okretno gibanje. Ulaže se uz prednaprezanje u utor između glavine i vratila te tako kreira spoj. Klin ostvaruje spoj oblikom i silom (slika 4.13).



Slika 4.13: Ostvarivanje spoja uzdužnim klinovima

- a) uložni klin; b) ostvarivanje spoja uložnim klinom; c) utjerni klin; d) spoj s utjernim klinom;
e) radijalni pritisak klina p_r i pritisak na bokove klina p [2]

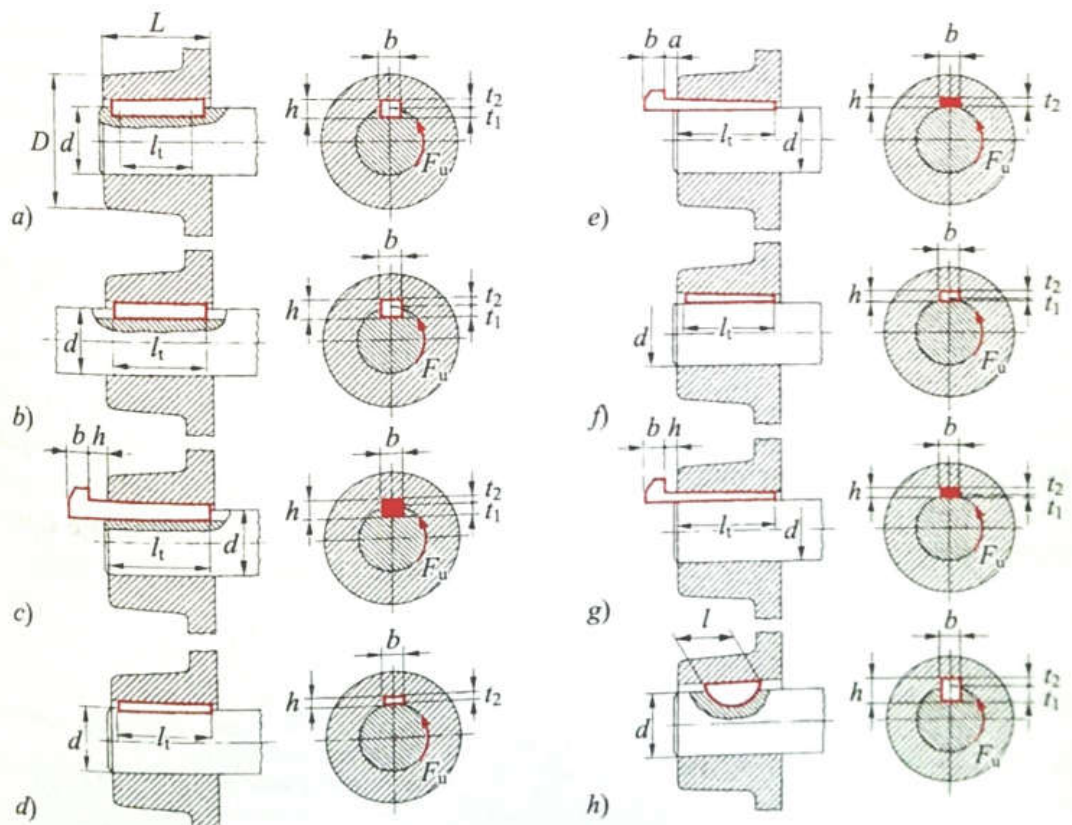
Zabijanjem klina tlači se vratilo, a rasteže osovina što dovodi do ekscentričnosti prikazanoj na slici 4.14. U spojevima klinom osovina i vratilo se na mjestu spoja dotiču indirektno preko klina, a na suprotnoj strani direktno te prema tome ostvareni spoj ima kontakt u dvjema točkama. Ako se umetnu dva klina dobit će se kontakt kroz tri dodirne točke [2, 10].



Slika 4.14: Ekscentrični spoj vratila i glavine

a) spoj ostvaren kroz dvije točke; b) spoj ostvaren kroz tri točke [2]

Uzdužni klinovi upotrebljavaju se pri manjim i srednjim brzinama vrtnje te zbog svoje otpornosti na onečišćenja primjenu pronalaze u građevinskim i poljoprivrednim strojevima te kod transportnih uređaja. Na standardiziranom uzdužnom klinu postoji nagib 1:100 što podrazumijeva smanjenje visine klina za 1 milimetar na dužini od 100 milimetara. Materijali od kojih se izrađuju klinovi su čelik Č0545.5 (St 50-1K) te čelik Č0645.5 (St 60-2K) za klinove kojima visina prekoračuje 25 milimetara. Slika 4.15 prikazuje standardizirane uzdužne klinove [10].



Slika 4.15: Primjeri standardiziranih uzdužnih klinova

a) uložni klinovi tipa A prema normi DIN 6886 ; b) utjerni klinovi tipa B prema normi DIN 6886; c) klinovi s nosom prema normi DIN 6887; d) obli udubljeni klinovi prema normi DIN 6881; e) obli udubljeni klinovi s nosom prema normi DIN 6889; f) plosnati klinovi prema normi DIN 6883; g) plosnati klinovi s nosom po normi DIN 6884; h) segmentna pera po normi DIN 6888 [10]

4.2.2 Proračun uzdužnih klinova

Klinove je uvijek potrebno uložiti na najdeblje mjesto glavine zbog čvrstoće. Zbog odstupanja koja se javljaju pri izradi klinova te zbog velikih opterećenja koja se povremeno javljaju ne može se izvesti ispravan proračun čvrstoće te se prema tome proračun vezan za uzdužne klinove provodi na temelju bočnog tlaka p , a prednaprezanje se zanemaruje. Stoga se bočni tlak računa prema sljedećim relacijama [10]:

- u primjeni uložnih i utjernih klinova:

$$p \approx \frac{F_t}{0.5 \cdot h \cdot l_t \cdot i} \quad (4.7)$$

- za pločaste klinove:

$$p \approx \frac{F_t}{t_2 \cdot l} \quad (4.8)$$

- za tangencijalne klinove:

$$p \approx \frac{F_t}{t \cdot l_t} \quad (4.9)$$

- u primjeni udubljenih i plosnatih klinova:

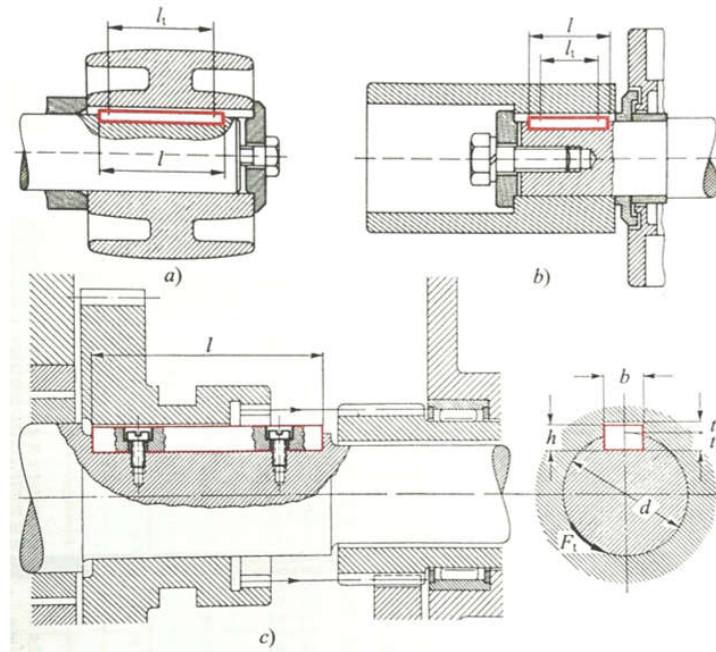
$$p \approx \frac{F_t}{0.1 \cdot b \cdot l_t \cdot i} \quad (4.10)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	bočni tlak klina, odnosno utora; kod oblog, plosnatog i udubljenog klina to je radijalni tlak p_r (slika 4.13)
F_t	[N]	predstavlja obodnu silu vratila = T / r , T je okretni moment koji je potrebno prenesti, a $r = d / 2$ je polumjer vratila
h	[mm]	visina klina
l_t	[mm]	nosiva duljina klina
i	-	broj klinova na obodu
t_2	[mm]	dubina utora glavine
l	[mm]	duljina segmentnih klinova
t	[mm]	dubina utora potrebna za tangencijalni klin
b	[mm]	širina plosnatog ili oblog klina

4.2.3 Spojevi perima

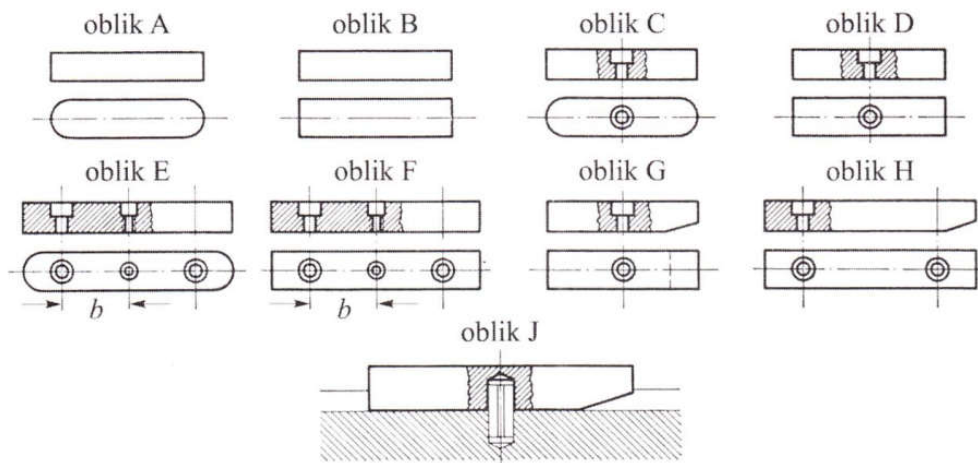
Pera su strojni elementi kojima se omogućuje prijenos okretnog gibanja bez klinastog nagiba. Primjenu pronalaze na mjestima u kojima je ekscentričnost koja se javlja kod klinastih spojeva nedopustiva. Bokovi pera moraju čvrsto priliježati u utoru kako ne bi prilikom rotacije bili deformirani. Između donje plohe utora glavine i pera obično ostaje zračnost prema slici 4.16 a i b. Pera prenose okretno gibanje samo pomoću veze oblikom. Pera koja omogućuju pomicanje glavine u vremenu gibanja, kao što je to potrebno kod pomičnih zupčanika, izrađuju se s laganim bočnim dosjedom i stoga ih je potrebno učvrstiti u vratilo cilindričnim vijcima prema slici 4.16 c [10].



Slika 4.16: Spojevi s perom

a) vratilo i remenica; b) vodeća remenica; c) vratilo s uzdužno pomičnim zupčanikom [10]

Prema DIN 6885 (HRN M.C2.060 do 062) standardna pera u obliku od A do J prikazana su na slici 4.17, a dimenzije standardnih pera prikazuje tablica 4.3. Prema slici 4.17 oblici E i F posjeduju provrte u kojima se nalazi navoj za vijke koji omogućavaju lakše vađenje iz utora, a oblici G i J posjeduju kosinu koja uz poseban alat olakšava uklanjanje. Oblik J se osigurava od pomakivanja uporabom naponskog zatika. Proračun pera vrši se prema relaciji (4.7) u poglavlju 4.2.2 na tlak koji slično utornim klinovima djeluje na bokove.



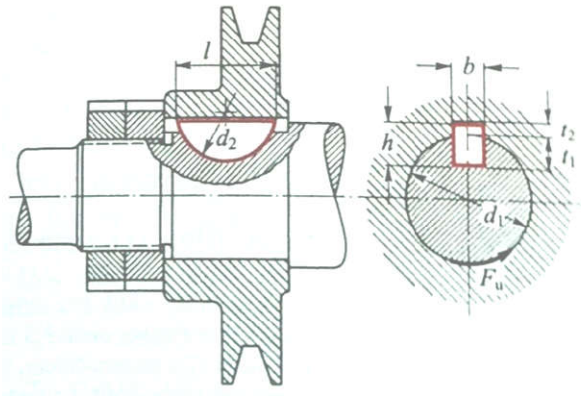
Slika 4.17: Prema DIN normi standardizirani oblici pera [2]

Na slici 4.17 prikazan je A oblik pera okruglog čela; B oblik pera ravnog čela; C oblik pera okruglog čela s mogućnošću priteznog vijka; D oblik pera ravnog čela s mogućnošću priteznog vijka; E oblik pera okruglog čela s mogućnošću primjene dva pritezna vijka i jednog ili dva vijak za vađenje; F oblik pera ravnog čela s mogućnošću primjene dva pritezna vijka i jednog ili dva vijak za vađenje; G oblik pera ravnog čela s vijkom za pritezanje i kosinom; H oblik pera ravnog čela s dva vijka za pritezanje i kosinom; J oblik pera ravnog čela s tuljcem za stezanje i kosinom [2].

Tablica 4.3: Mjere pera u milimetrima prema normi DIN 6885 [2]

$b \times h$	Za vratilo promjera d		Visok oblik			Visok oblik za alatne strojeve		Vijak za istiskivanje i učvršćenje DIN 84
	više od	do	r_1	s_a zračnošću	s prijelopom	r_1	r_2	
2 × 2	6	8	1,2+0,1	1,0+0,1	0,5+0,1			
3 × 3	8	10	1,8+0,1	1,4+0,1	0,9+0,1			
4 × 4	10	12	2,5+0,1	1,8+0,1	1,2+0,1	3 +0,1	1,1+0,1	
5 × 5	12	17	3,0+0,1	2,3+0,1	1,7+0,1	3,8+0,1	1,3+0,1	
6 × 6	17	22	3,5+0,1	2,8+0,1	2,2+0,1	4,4+0,1	1,7+0,1	
8 × 7	22	30	4,0+0,2	3,3+0,2	2,4+0,2	5,4+0,2	1,7+0,2	M 3 × 8
10 × 8	30	38	5,0+0,2	3,3+0,2	2,4+0,2	6 +0,2	2,1+0,2	M 3 × 10
12 × 8	38	44	5,0+0,2	3,3+0,2	2,4+0,2	6 +0,2	2,1+0,2	M 4 × 10
14 × 9	44	50	5,5+0,2	3,8+0,2	2,9+0,2	6,5+0,2	2,6+0,2	M 5 × 10
16 × 10	50	58	6,0+0,2	4,3+0,2	3,4+0,2	7,5+0,2	2,6+0,2	M 5 × 10
18 × 11	58	65	7,0+0,2	4,4+0,2	3,4+0,2	8 +0,2	3,1+0,2	M 6 × 12
20 × 12	65	75	7,5+0,2	4,9+0,2	3,9+0,2	8 +0,2	4,1+0,2	M 6+12
22 × 14	75	85	9,0+0,2	5,4+0,2	4,4+0,2	10 +0,2	4,1+0,2	M 6 × 15
25 × 14	85	95	9,0+0,2	5,4+0,2	4,4+0,2	10 +0,2	4,1+0,2	M 8 × 15
28 × 16	95	110	10,0+0,2	6,4+0,2	5,4+0,2	11 +0,2	5,1+0,2	M 10 × 18
32 × 18	110	130	11,0+0,2	7,4+0,2	6,4+0,2	13 +0,2	5,2+0,2	M 10 × 20
36 × 20	130	150	12,0+0,3	8,4+0,3	7,1+0,3	13,7+0,3	6,5+0,3	M 12 × 22
40 × 22	150	170	13,0+0,3	9,4+0,3	8,1+0,3	14 +0,3	8,2+0,3	M 12 × 25
45 × 25	170	200	15,0+0,3	10,4+0,3	9,1+0,3			M 12 × 28
50 × 28	200	230	17,0+0,3	11,4+0,3	10,1+0,3			M 12 × 30
56 × 32	230	260	20,0+0,3	12,4+0,3	11,1+0,3			M 12 × 35
63 × 32	260	290	20,0+0,3	12,4+0,3	11,1+0,3			M 12 × 35
70 × 36	290	330	22,0+0,3	14,4+0,3	13,1+0,3			M 16 × 40
80 × 40	330	380	25,0+0,3	15,4+0,3	14,1+0,3			M 16 × 45
90 × 45	380	440	28,0+0,3	17,4+0,3	16,1+0,3			M 20 × 50
100 × 50	440	500	31,0+0,3	19,5+0,3	18,1+0,3			M 20 × 55

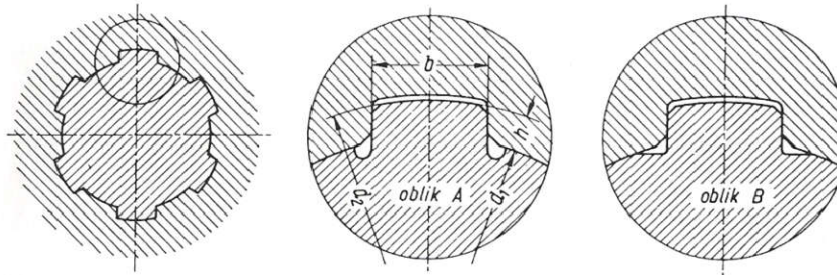
Postoji još i segmentno pero standardizirano normom DIN 6888 koje se primjenjuje u izgradnji alatnih strojeva i raznih motornih vozila, prikazuje ga slika 4.18. Proračun segmentnog pera provodi se prema relaciji (4.8) u poglavlju 4.2.2.



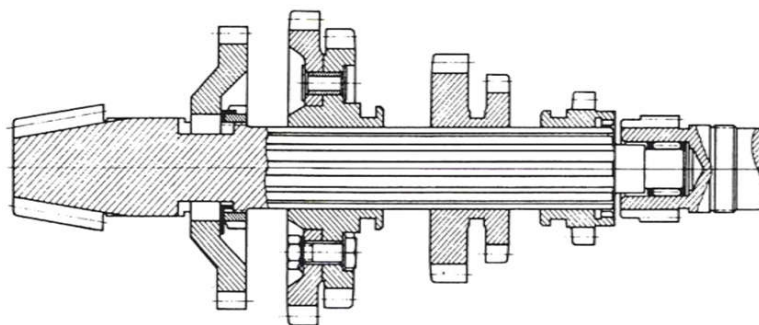
Slika 4.18: Spojevi segmentnim perom DIN 6888 (HRN M.C2.050) [10]

4.2.4 Spojevi s klinastim vratilima

Klinasto vratilo ima po obodu paran broj „klinova“, koje treba shvatiti kao pera što je prikazano na slici 4.19. Simetrični presjek klinastog vratila omogućava jednostrano pritezanje glavine. Klinasta vratila vrlo točno centriraju glavinu na vratilo i izmjenjiva su. Slika 4.20 prikazuje primjer klinastog vratila na kojem se nalaze zupčanici.



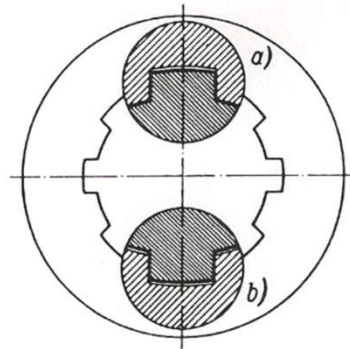
Slika 4.19: Profili klinaste glavine i vratila [10]



Slika 4.20: Primjena klinastog vratila kao vratila prijenosnika [10]

Centriranje glavine na vratilo može biti unutrašnje centriranje i bočno centriranje. Unutrašnje centriranje dolazi u obzir isključivo za alatne strojeve i prikazano je na slici 4.21 a. Bočno centriranje prema slici 4.21 b provodi se teže od unutarnjeg centriranja,

javlja se zračni raspor između vratila i provrta, ali zbog preciznog nalijeganja bočnih strana primjereno je za promjenjiva i udarna opterećenja.



Slika 4.21: Centriranje klinastog profila

a) centriranje s unutrašnje strane; b) centriranje bočnih strana [10]

4.2.5 Proračun spojeva s klinastim vratilima

Proračun klinastih vratila provodi se u odnosu na bočni tlak prema relaciji (4.11):

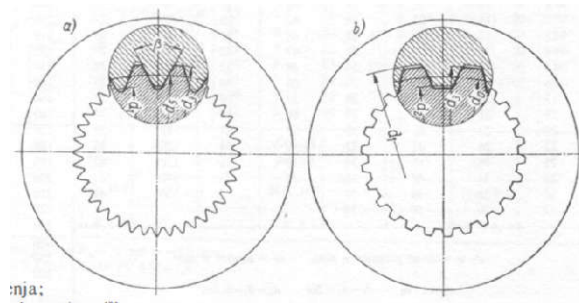
$$p \approx k \frac{F_t}{h \cdot l_t \cdot i} \quad (4.11)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak na bokove klina ili utore glavine
k	-	faktor nošenja; $\approx 1,35$ pri unutarnjem centriranju, $\approx 1,15$ pri bočnom centriranju
F_t	[N]	sila na obodu vratila = T / r_1 , T – moment okretanja koji vratilo prenosi, a $r_1 = d / 2$ je polumjer vratila
h	[mm]	korisna visina klina = $0,5 (d_2 - d_1)$
l_t	[mm]	korisna dužina ostvarenog spoja
i	-	broj obodnih klinova

4.2.6 Spojevi sa zupčastim vratilima

Na vratilima se umjesto klinova mogu nalaziti i drugi profili kao što su zubi. Velik broj zubi bolje podnosi udarne sile te postoji mogućnost premještanja glavine od zuba do zuba. Ozubljenja se ekonomično proizvode odvalnim glodanjem. Omogućavaju dobro bočno centriranje, a pri evolventnim profilima zuba omogućeno je unutrašnje i vanjsko centriranje. Uobičajeni profili zuba prikazani su na slici 4.22. Na slici 4.22 a prikazan je trokutasti zupčasti profil DIN 5481 (HRN M.C1.511) s trokutastim zubima, a na slici 4.22 b evolventni zupčasti profil DIN 5480 (HRN M.C1.511).



Slika 4.22: Profili ozubljenja
a) trokutasti profil; b) evolventni profil [10]

4.2.7 Proračun spojeva sa zupčastim vratilima

Proračun spojeva zupčastim vratilima vrši se kao kod spojeva klinovima prema relaciji (4.12):

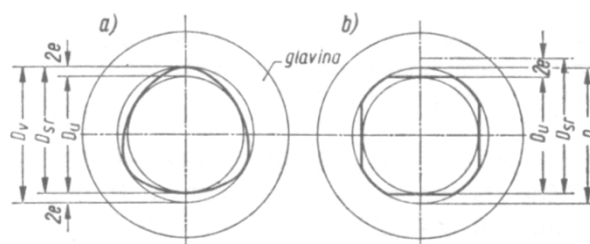
$$p \approx k \frac{F_t}{h \cdot l_t \cdot z} \quad (4.12)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak koji djeluje na bočnu stranu zuba
k	-	faktor nosivosti; ≈ 2 za trokutasto ozubljenje, $\approx 1,35$ za evolventno ozubljenje
F_t	[N]	sila koja djeluje na obodu vratila
h	[mm]	nosiva visina zuba = $0,5 (d_3 - d_1)$ kod trokutastog profila, = $0,5 (d_3 - d_2)$ kod evolventnog profila zuba
l_t	[mm]	nosiva duljina spoja
z	-	broj zubi

4.2.8 Spojevi s poligonim profilima vratila

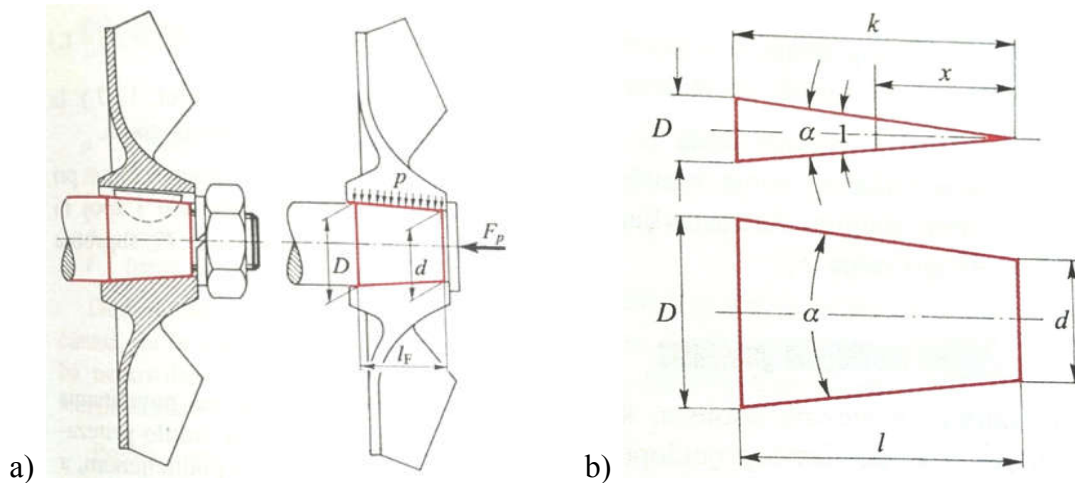
Kod spojeva s poligonim profilima prenosivost raste kontinuirano. Profili se izrađuju u kvaliteti dosjeda 6 koja osigurava točno centriranje. Budući da na površini nema nikakvih izbočina, teško može doći do zareznih djelovanja. Poligone profile prikazuje slika 4.23 [10].



Slika 4.23: Poligoni profil
a) naliježni čvrsti dosjedi; b) klizni čvrsti dosjedi [10]

4.2.9 Konični spojevi

U koničnim spojevima konusi sami od sebe centriraju glavine prema slici 4.24 a. Prema normi DIN 254 konus $l:x = D:k$ označava smanjivanje promjera konusa na određenoj dužini x za 1 milimetar što prikazuje slika 4.24 b. Kut α je kut konusa. Pod nagibom konusa podrazumijeva se nagib $1 : 2x$ konusa, a $\alpha/2$ označava nagibni kut [10].



Slika 4.24: Konus

a) konusni spoj; b) koničnost [10]

4.2.10 Proračun koničnih spojeva

Tlak naležnih površina u koničnim spojevima računa se prema relaciji (4.13)

$$p \approx \frac{F_P}{\pi \cdot D_F \cdot l_F \cdot \tan\left(\varrho + \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.13)$$

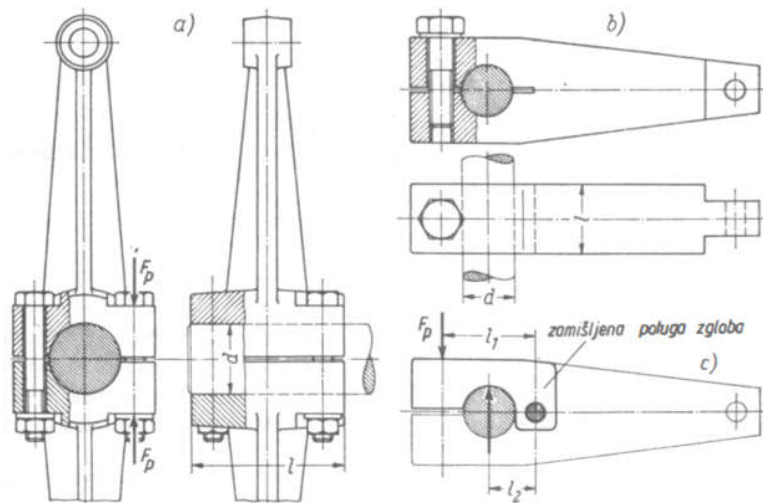
Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak površina nalijeganja u konusu
F_P	[N]	sila prednaprezanja prema jednadžbi 4.1
D_F	[mm]	srednji promjer površina nalijeganja = $0,5(D + d)$
l_F	[mm]	uzdužna duljina ploha nalijeganja
ϱ		kut trenja $\approx 6^\circ$ pri određenim površinama koje naliježu
α		Konusni kut $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{D-d}{2l}$

4.2.11 Spojevi ostvareni steznom glavinom

Kod spojeva ostvarenih steznom glavinom, potrebni tlak p među površinama koje naliježu jedna na drugu postiže se pritezanjem steznog vijka koji pritišće glavinu na vratilo

i tako ostvaruje stezni spoj. Slika 4.25 prikazuje stezne spojeve od kojih je jedan s razrezanom, a drugi s podijeljenom glavinom. Stezni spojevi su prikladni za kontinuirano poprečno i uzdužno podešavanje glavine. Ovakvi spojevi primjenu pronalaze pri relativno jednoličnim i malim opterećenjima [2, 10].



Slika 4.25: Spojevi ostvareni steznim glavinama
a) podijeljena glavina; b) zarezana glavina [10]

4.2.12 Proračun spojeva sa steznim glavinama

Tlak naležnih površina kod dijeljene glavine računa se prema relaciji (4.14):

$$p \approx \frac{F_p \cdot i}{d \cdot l} \quad (4.14)$$

Tlak površina nalijeganja razrezane glavine računa se prema relaciji (4.15):

$$p \approx \frac{F_p \cdot i}{d \cdot l} \cdot \frac{l_1}{l_2} \quad (4.15)$$

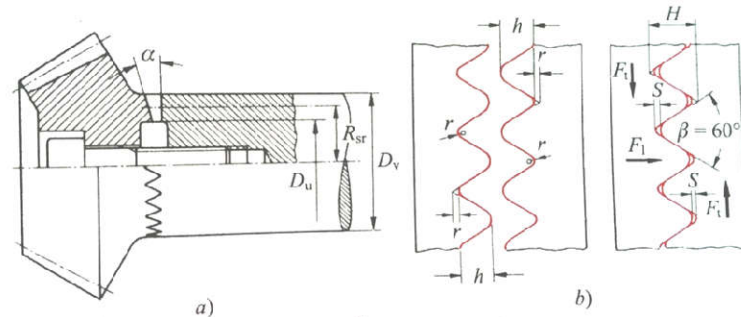
Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak naležnih površina
F_p	[N]	prednaprežna sila vijka
i	-	broj priteznih vijaka
d	[mm]	promjer vratila
l	[mm]	stegnuta duljina
l_1, l_2	[mm]	poluge prema slici 4.25c

4.2.13 Spojevi s čeonim ozubljenjem

Spoj čeonim ozubljenjem poznat je i pod nazivom Hirth-ozubljenje (prema tvornici koja ga proizvodi). Upotrebljava se kod uzdužnih spojeva za prijenos okretnog momenta.

Ozubljenje je izdržljivo i robusno te omogućuje prenošenje udarnih i dinamičkih opterećenja. Dijelovi spoja posjeduju radijalno ozubljenje trokutastim zubima na čeonj strani elemenata. Navedeni zubi spajaju se na način da ulaze jedan između drugog te tako centriraju spojne dijelove. Primjer čeonog ozubljenja prikazuje slika 4.26.



Slika 4.26: Čeono ozubljenje

a) stožnik spojen s vratilom; b) oblik zuba na vanjskom obodu [10]

4.2.14 Proračun spojeva s čeonim ozubljenjem

Naprezanje čeonih zubi u spojevima s čeonim ozubljenjem računa se prema relaciji (4.16):

$$\sigma_{rez} = \sigma_t + \sigma_f = \frac{F_1}{A} + \frac{M}{W} \quad (4.16)$$

Gdje je:

σ_{rez}	[N/mm ²]	naprezanje u korijenu zuba
F_1	[N]	uzdužna zatezna sila
A	[mm ²]	površina korijena svih zubi u spoju $\approx \frac{\pi}{2}(D_v^2 - D_u^2) - r(D_v - D_u)z$, z je broj spojnih zubi
M	[Nmm]	savojni moment koji djeluje na zube $\approx F_t \cdot \frac{h}{2}$; gdje je $F_t = \frac{T}{R_{sr}} \cdot T$ obodna sila; $R_{sr} = 0,25(D_v + D_u)$ je srednji polumjer ozubljenja, a $h = H - (S + 2r)$ je visina zubaca u ozubljenju
W	[mm ³]	moment otpora izvijanja zubi u ozubljenju

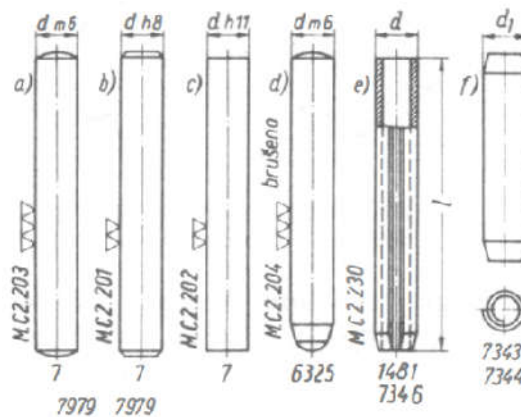
$$\approx 0,0835z(D_v - D_u) \left(\frac{2R_{sr} \cdot \pi}{z} - 2r \right)^2$$

4.3 Spojevi sa zaticima i svornjacima

4.3.1 Zatik

Zatici su strojni elementi koji se primjenjuju za držanje, centriranje, potezanje, spajanje, učvršćivanje, osiguranje, zatvaranje, fiksiranje i sl. strojnih dijelova. Prema obliku razlikuju se cilindrični zatici, konični zatici, zasječeni zatici, naponski (elastični) zatici i spiralni naponski zatici [2].

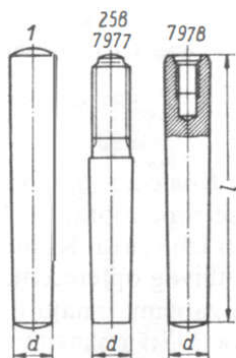
Cilindričan zatic oznake m6 pripada u skupinu dosjednih zatika i primjenu pronalazi u osiguravanju međusobnog položaja dijelova u spoju. U jednom dijelu zatic ima čvrsti dosjed, a u drugom klizni koji omogućava razdvajanje. Cilindrični zatici oznake h8 koriste se za učvršćivanje ili spajanje. Zatici h11 primjenjuju se u zglobovima pri kliznom dosjedu ili imaju funkciju zakovice. Slika 4.27 prikazuje cilindrične zaticke [10].



Slika 4.27: Cilindrični zatici

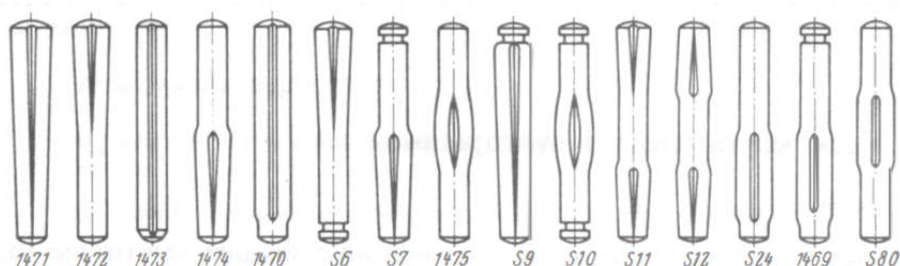
- a) zatic m6; b) zatic h8; c) zatic h11; d) zakaljen cilindrični zatic m6;
e) naponski zatic; f) zatic u obliku spirale s naponskim djelovanjem [10]

Konični zatici izvanredno dobro fiksiraju spojne dijelove. Ovakav način spajanja je skup zato što se rupe moraju razvrtati. Primjena koničnih zatika se ne preporučuje u okolini u kojoj se javljaju jače vibracije, a pri promjenjivom opterećenju potrebno ih je osigurati. Prednost koničnih zatika je neograničeni broj spajanja i razdvajanja.. Postoje i konični zatici koji na sebi imaju navoj, a pogodni su za slijepe uvrte jer imaju mogućnost lakog izvlačenja primjenom matice koja ih izvlači. Konični zatici su prikazani na slici 4.28 [10].



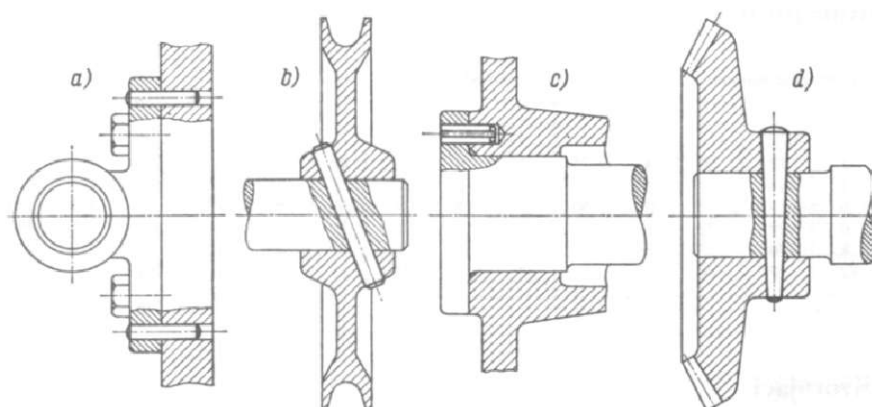
Slika 4.28: Konusni zatici s konusnim omjerom 1:50 [10]

Kod zasječenih zatika nije potrebno razvrtnanje provrta već su dovoljni bušeni provrti. Dosjed se osigurava protiv vibracija izbočenjima na zatiku koja ujedno pružaju mogućnost vađenja i zabijanja zatika do 30 puta. Zatici sa zarezima imaju manju izdržljivost od glatkih zatika zbog naprezanja koje se javlja kao posljedica zareza. Zatici sa zarezom koji posjeduju vrat primjenjuju se pri navlačenju uskočnika ili osiguravajućih pločica te pri učvršćivanju opruga. Slika 4.29 prikazuje zasječene zatike [10].



Slika 4.29: Zasječeni zatici [10]

Primjeri korištenja cilindričnih i konusnih zatika prikazani su na slici 4.30.

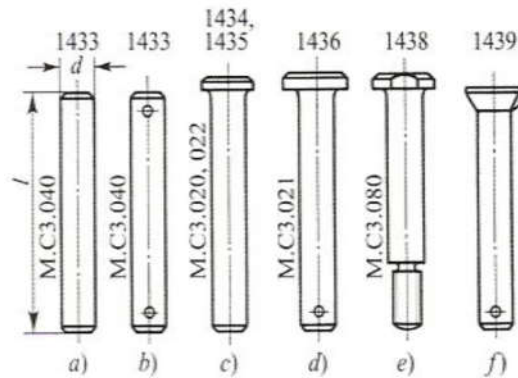


Slika 4.30: Primjena konusnog i cilindričnog zatika

- a) dosjedni zatic oznake m6; b) vezni zatic oznake h8;
 c) osiguravanje naponskim zaticom; d) povezivanje i učvršćivanje konusnim zaticom [10]

4.3.2 Svornjak

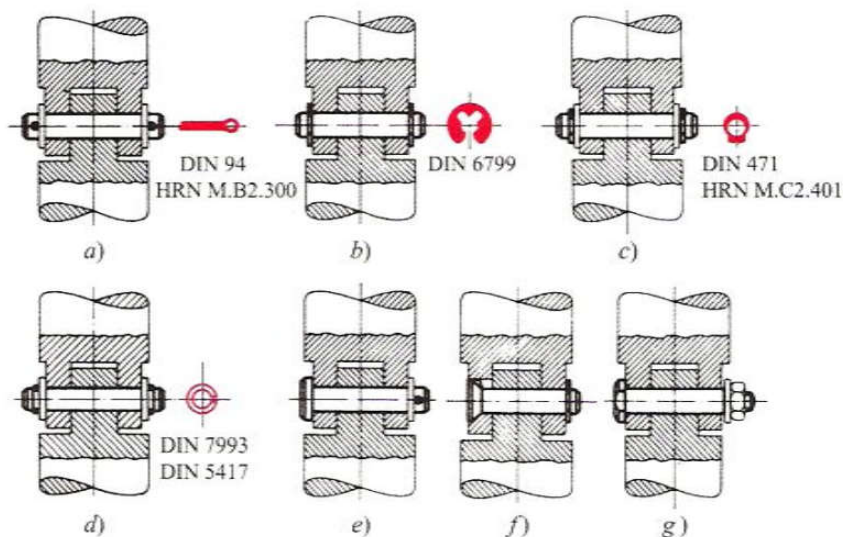
Svornjak je strojni element kojim se ostvaruje zglobni spoj s kliznim dosjedom. Budući da je prisutan klizni dosjed, potrebno ih je osigurati protiv ispadanja. Osigurati ih se može rascjepkom, uskočnikom, sigurnosnom pločicom ili elastičnim prstenom. Za osiguravanje rascjepkom potrebno je izraditi poprečne utore, a za osiguravanje sigurnosnim pločicama i uskočnicima istokarene utore. Standardni svornjaci prikazani su na slici 4.31.



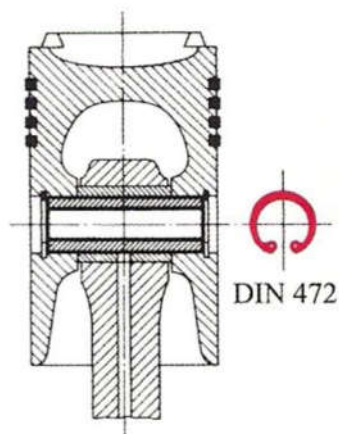
Slika 4.31: Svornjaci standardizirani prema DIN normi
(brojke ispod svornjaka označavaju broj DIN norme)

- a) bezglavi svornjak; b) svornjak bez glave, osiguravanje rascjepkom; c) mala glava svornjaka; d) velika glava svornjaka, osiguravanje rascjepkom; e) svornjak s navojem na jednoj strani; f) svornjak s glavom za upuštanje i nosom [10]

Prednost svornjaka bez glave je njihova cijena. Svornjaci s glavom koriste se na mjestima gdje to montaža traži i dopušta zbog pristupačnosti. Svornjaci koji ne smiju nigdje izviriti dobivaju uskočnike DIN 472 s obje strane prema slici 4.33. Tolerancijsko polje svornjaka je h11, a provrti za svornjake izrađuju se prema dopuštenoj zračnosti. Na slici 4.32 prikazani su primjeri spojeva sa svornjakom: a) svornjak prema normi DIN 1433 osiguran s dvije rascjepke; b) svornjak prema normi DIN 1433 osiguran s dvije sigurnosne pločice; c) svornjak prema normi DIN 1433 osiguran s dva uskočnika; d) svornjak prema normi DIN 1433 osiguran elastičnim prstenom; e) svornjak s glavom po normi DIN 1436 osiguran rascjepkom; f) svornjak s glavom za upuštanje po normi DIN 1439 osiguran uskočnikom; g) svornjak s izrađenim navojem na jednoj strani i šesterostranom maticom [10].



Slika 4.32: Spojevi ostvareni svornjacima [10]

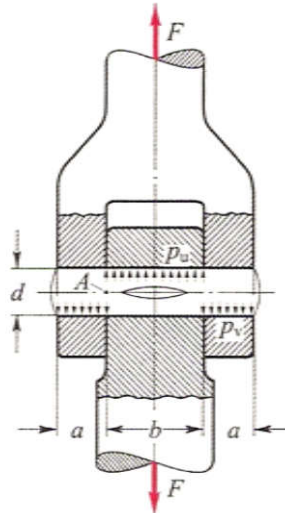


Slika 4.33 Svornjak klipa osiguran uskočnicima DIN 472 [10]

4.3.3 Proračun svornjaka i zatika

Budući da se prednaprezanje ne može obraditi računskim putem, potrebno je usporediti dopuštena naprezanja s preostalim naprezanjima koja se javljaju u spoju.

- Svornjak ili zatik zgloba u kojem djeluje sila F opterećen je na odrez i savijanje u kliznom dosjedu na presjeku A prema slici 4.34, a naležne površine su opterećene na tlak [10].



Slika 4.34: Zglobni spoj ostvaren svornjakom ili zatikom [10]

Tlakovi:

$$p_v = \frac{F}{2a \cdot d} \quad (4.17)$$

$$p_u = \frac{F}{b \cdot d} \quad (4.18)$$

Naprežanje na savijanje:

$$\sigma_f = \frac{0,5F \cdot 0,5a}{0,1d^3} \quad (4.19)$$

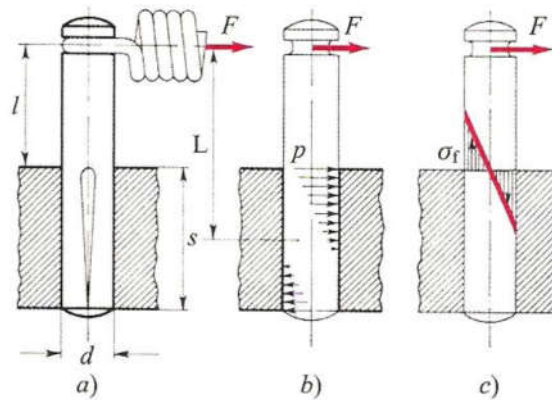
Naprežanje na odrez:

$$\tau_a = \frac{F}{2A} \quad (4.20)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak koji djeluje na površine dijelova u spoju
σ_f	[N/mm ²]	savojno naprežanje zatika ili svornjaka
τ_a	[N/mm ²]	odrežno naprežanje zatika ili svornjaka
F	[N]	pogonska sila
d	[mm]	promjer zatika ili svornjaka
A	[mm ²]	presjek zatika ili svornjaka
a, b	[mm]	širina dijelova u spoju

- Strojni zatici opterećeni su (prema slici 4.35) na savijanje. Budući da sila F opterećuje zatic na jednoj strani, u zatiku se javlja savojno opterećenje u presjeku A . [10]



Slika 4.35: Opterećenja zatika savijanjem

- a) zatic opterećen djelovanjem vlačne opruge; b) tlak koji se javlja na površini strojnog dijela;
c) savojno napregnut zatic [10]

Tlak:

$$p = \frac{F}{d \cdot s} \left(1 + 6 \frac{L}{s} \right) \quad (4.21)$$

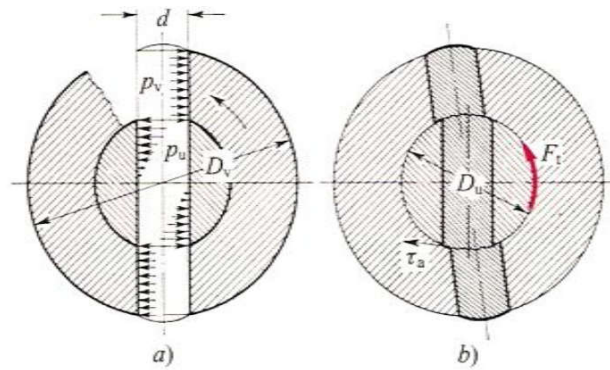
Naprežanje na savijanje:

$$\sigma_f = \frac{F \cdot l}{0,1d^3} \quad (4.22)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak u strojnom dijelu i na površini zatika
σ_f	[N/mm ²]	naprežanje na savijanje u zatiku na presjeku A
F	[N]	pogonska sila
L, l	[mm]	krak sile F
s	[mm]	duljina nalijeganja zatika
d	[mm]	promjer zatika

- Poprečni zatici opterećeni su okretnim momentom prema slici 4.36. Kao posljedica djelovanja obodne sile F_t na površinama nalijeganja glavine i vratila javlja se tlak, a u zatiku odrezno opterećenje [10].



Slika 4.36: Opterećenje poprečnog zatika okretnim momentom
a) tlak na površini glavine i vratila; b) odrez zatika [10]

Tlakovi:

$$p_U = \frac{3F_t}{D_U \cdot d} \quad (4.23)$$

$$p_V = \frac{F_t}{(D_V - D_U) \cdot d} \quad (4.24)$$

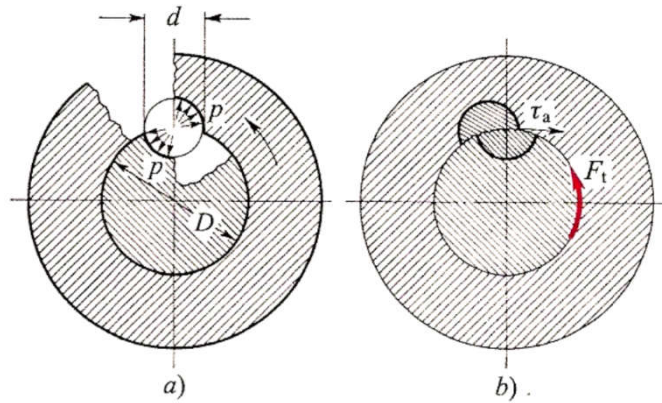
Naprezanje na odrez:

$$\tau_a = \frac{F_t}{2A} \quad (4.25)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	tlak u strojnom dijelu i na površini zatika
τ_a	[N/mm ²]	naprezanje na odrez u zatiku
F_t	[N]	obodna sila na vratilu = T/R_u , T je okretni moment, a $R_u = D_u/2$ polumjer vratila
D_V	[mm]	vanjski promjer glavine
D_U	[mm]	unutrašnji promjer glavine
d	[mm]	promjer zatika
A	[mm ²]	površina presjeka zatika

- Uzdužni zatic opterećen okretnim momentom prema slici 4.37 vrši funkciju uzdužnog klina. Naziva se još i okrugao klin zbog svog oblika. Zatic je opterećen na odrez, a vratilo i glavina na površinski tlak [10].



Slika 4.37: Opterećenje uzdužnog zatika ili okruglog klina okretnim momentom
a) tlak na površini glavine i vratila; b) odrez zatika [10]

Tlak:

$$p \approx \frac{F_t}{0,5d \cdot l} \quad (4.26)$$

Naprezanje na odrez:

$$\tau_a = \frac{F_t}{d \cdot l} \quad (4.27)$$

Gdje je:

p	[N/mm ²]	površinski tlak vratila i glavine
τ_a	[N/mm ²]	odrežno naprezanje u aksijalnom presjeku zatika
F_t	[N]	sila na obodu vratila = T/R , T je oznaka okretnog momenta, R je oznaka polumjera vratila
d	[mm]	promjer zatika
l	[mm]	nosiva duljina zatika

4.3.4 Primjer proračuna zatika i svornjaka

Primjer 1.

Potrebno je odrediti najmanji promjer poprečnog valjkastog zatika koji prenosi okretni moment od 20 000 Nmm, ako je promjer vratila 20 mm, a materijal zatika je čelik dopuštenog naprezanja na odrez 60 N/mm².

Zadano:

$$T = 20\,000 \text{ Nmm}$$

$$D = 20 \text{ mm}$$

$$\tau_{dop} = 60 \text{ N/mm}^2$$

Rješenje:

Naprezanje prema relaciji (4.25):

$$\left(\tau_a = \frac{F_t}{2A} = \frac{F_t}{\frac{d^2 \cdot \pi}{2}} \right) \leq \tau_{dop}$$

Obodna sila na vratilu:

$$F_t = \frac{T}{R_u} = \frac{T}{\frac{D}{2}} = \frac{2T}{D} = \frac{2 \cdot 20\,000}{20} = 2\,000 \text{ N}$$

Promjer poprečnog valjkastog zatika:

$$d \geq \sqrt{\frac{2F}{\pi \cdot \tau_{dop}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2\,000}{\pi \cdot 60}} = 4,61 \text{ mm}$$

Usvojeni promjer zatika je $d = 5 \text{ mm}$.

Primjer 2.

Kolika mora biti najmanja dužina uzdužnog valjkastog zatika promjera 8 mm, ako je okretni moment 12 000 Nmm, promjer vratila 18 mm, a dopušteni tlak na glavinu od sivog lijeva je 30 N/mm²? Koliko je stvarno naprezanje na odrez u zatiku?

Zadano:

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$T = 12\,000 \text{ Nmm}$$

$$D = 18 \text{ mm}$$

$$p_{dop} = 30 \text{ N/mm}^2$$

Rješenje:

Sila na obodu:

$$F_t = \frac{T}{R_u} = \frac{T}{\frac{D}{2}} = \frac{2T}{D} = \frac{2 \cdot 12\,000}{18} = 1333,33 \text{ N}$$

Prema relaciji (4.26) slijedi:

$$\left(p \approx \frac{F_t}{0,5d \cdot l} \right) \leq p_{dop} \rightarrow l = \frac{2F}{p_{dop} \cdot d} = \frac{2 \cdot 1333,33}{30 \cdot 8} = 11,11 \text{ mm}$$

Usvojeni promjer uzdužnog valjkastog zatika je 12 mm.

Stvarno naprezanje na odrez u zatiku prema relaciji (4.27):

$$\tau_a = \frac{F_t}{d \cdot l} = \frac{1333,33}{8 \cdot 12} = 13,89 \text{ N/mm}^2$$

4.4 Opruge

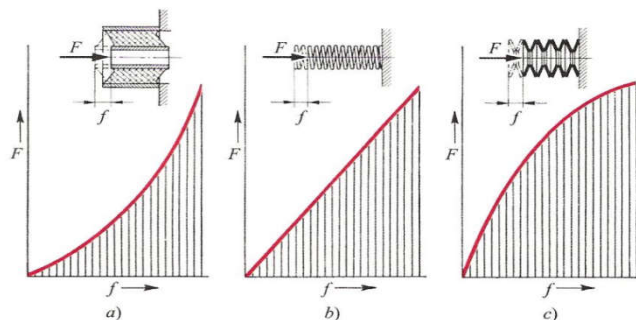
Opruge su strojni elementi koji omogućavaju elastično povezivanje strojnih dijelova te imaju izrazitu sposobnost elastičnog deformiranja koja se ostvaruje odabirom određenog oblika i materijala. Kod opruga se jedan dio deformacijskog rada troši na savladavanje trenja među česticama u materijalu, a drugi, veći dio se akumulira u opruzi kao potencijalna energija. Opruge imaju širok spektar primjene, a neki od najčešćih primjera upotrebe su [1, 2]:

- Ravnomjerna podjela opterećenja (cestovna vozila)
- Prigušivanje (amortizacija) vibracije i udara (elastične spojke)
- Akumulacija energije (satni mehanizam)
- Mjerenje sile (dinamometri)
- Regulacija (regulacijski ventili)
- Povratni elementi (kod sklopki)
- Ograničenje sile.

S obzirom na oblik najkorištenije su zavojne, lisnate, tanjuraste i šipkaste opruge, a s obzirom na materijal to su opruge od gume i opruge od metala. Osnovna podjela opruga je prema vrsti naprezanja i prema tome se dijele na vlačne, tlačne, savojne i torzijske. Prema obliku, razlikuju se cilindrične opruge, lisnate opruge, zavojne opruge, tanjuraste opruge, ravne torzijske opruge, konične opruge, spiralne opruge, bimetalne opruge, prstenaste opruge, membrane i cijevne opruge [1, 2, 19].

4.4.1 Karakteristika opruga

Svojstva opruge određuju se prema njihovoj karakteristici. Karakteristika opruge pokazuje ovisnost puta f o sili opruge F . Karakteristika opruge može biti progresivna (rastuća zakrivljena), ravna ili regresivna (opadajuća zakrivljena) prema slici 4.38 [10].



Slika 4.38: Karakteristike opruga

- a) progresivnu karakteristiku ima gumena opruga; b) ravnu karakteristiku ima cilindrična zavojna opruga; c) regresivna karakteristika javlja se kod tanjurastih opruga [10]

Specifična sila, specifični pregib, krutost ili pri ravnoj karakteristici konstanta opruge označava silu koja je dostatna za tlačenje ili razvlačenje opruge za 1 milimetar ili moment koji izaziva radijalnu deformaciju od 1 radijana [10].

- Specifična sila savojne, tlačne i vlačne opruge izražava se relacijom (4.28) :

$$c = \frac{F}{f} \quad (4.28)$$

- Specifična sila torzijskih opruga:

$$c = \frac{T}{\alpha} \quad (4.29)$$

Gdje je:

c	[N/mm], [N/mm/rad]	specifična sila opruge
F	[N]	sila kojom se opterećuje opruga
f	[mm]	progib opruge pod djelovanjem sile F
T	[Nmm]	okretni moment
α	[rad]	kut savijanja nastao zbog djelovanja okretnog momenta T

Usljed napinjanja opruga obavlja određeni rad koji nakon otpuštanja vraća oprugu u prvobitno stanje. Kod opruga s ravnom karakteristikom rad opruge jednak je produktu sile i puta [10].

Obavljeni rad kod savojne, tlačne i vlačne opruge izražava se relacijom (4.30).

$$W = \frac{F}{2} f \quad (4.30)$$

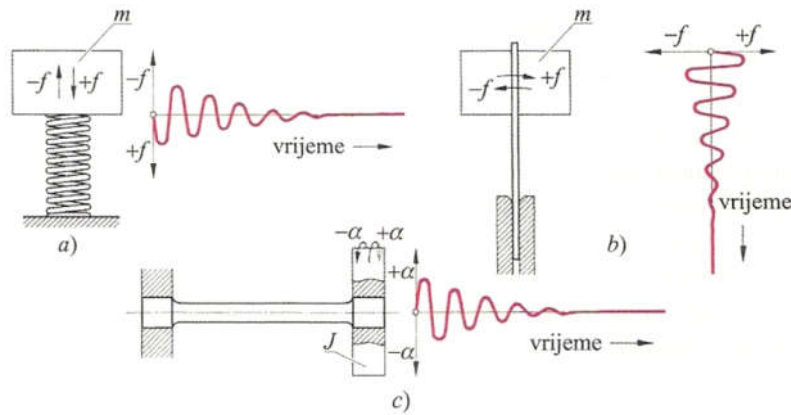
Rad kod torzijskih opruga izražava se relacijom (4.31).

$$W = \frac{T}{2} \alpha \quad (4.31)$$

Gdje je:

W	[Nmm]	rad opruge
-----	-------	------------

Opruge mogu početi vibrirati vlastitim prigušenim titrajima pod djelovanjem sile ili kad se uzbude nekim impulsom što je prikazano na slici 4.39. Vlastita frekvencija savojne, vlačne i tlačne opruge računa se prema relaciji (4.32) [10].



Slika 4.39: Titranje opruga

a) tlačna opruga; b) savojna opruga; c) torzijska opruga [2]

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (4.32)$$

Vlastita frekvencija torzijskih opruga:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J}} \quad (4.33)$$

Gdje je:

ν	[1/s=Hz]	frekvencija titranja
c	[N/m, Nm/rad]	specifična sila opruge
m	[kg]	masa tijela koje je podvrgnuto titranju
J	[kg·m ²]	moment inercnosi mase tijela podvrgnutog kružnom titranju prema osi vrtnje

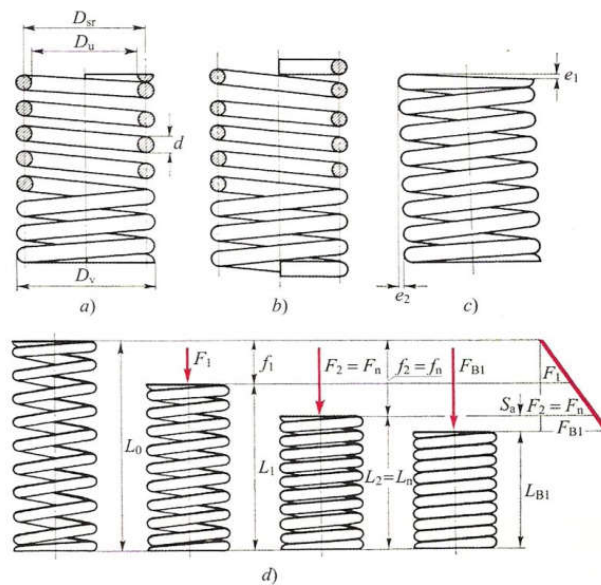
4.4.2 Materijali za opruge

Uobičajeni čelici od kojih se izrađuju opruge su ugljični čelici (za kaljenje), čelici legirani sa silicijem, čelici legirani s kromom, čelici legirani s manganom i silicijem, čelici povećane otpornosti na koroziju i čelici legirani s kromom i vanadijem. Osim od čelika, opruge se mogu izrađivati i od mjedi, silicijske bronce, fosforne bronce i novog srebra. Povećanje čvrstoće kod čelika za opruge postiže se kaljenjem na niskim ili visokim temperaturama popuštanja, sačmarenjem, poliranjem ili prebrušivanjem nakon kaljenja. S porastom debljine materijala opada dinamička izdržljivost. Dopuštena naprezanja ovise o vrsti materijala od kojeg je opruga napravljena, o obliku opruge i o opasnosti koju nosi lom

opruge. Pri konstantnoj sili je $\sigma_{dop} = \tau_{dop} \sim 0,4 \text{ do } 0,7 R_m$, pri jednosmjerno promjenjivoj sili $\sigma_{dop} = 0,3 \text{ do } 0,4 R_m$, a pri izmjenično promjenjivoj sili $\sigma_{dop} = 0,2 \text{ do } 0,25 R_m$ [10].

4.4.3 Cilindrične vlačne i tlačne opruge

Cilindrične tlačne opruge najčešće se izrađuju od okrugle žice. Primjenjuju se za povrat ventila, mjerenje sile, ograničavanje sile, itd. Sve opruge koje imaju promjer žice manji od 10 milimetara oblikuju se u hladnom stanju, a one s promjerom žice od 10 do 17 milimetara oblikuju se u hladnom ili toplom stanju. Slika 4.40 prikazuje tlačne opruge oblikovane na hladno [2, 10].



Slika 4.40: Primjer hladno oblikovanih tlačnih opruga

- a) prilignuti i brušeni vanjski navoji; b) prilignuti vanjski navoji; c) odstupanja oblika;
d) prikaz utjecaja sile na duljinu opruge [10]

U slučaju prema slici 4.40 d kad djeluje tolika sila koja stlači sve navoje tako da oni naližežu jedan na drugog, može se odrediti stisnuta duljina bloka L_{B1} tlačne opruge:

- pri brušenim i prislonjenim krajnjim navojima prema relaciji (4.34):

$$L_{B1} = i_{uk} \cdot d \quad (4.34)$$

- pri prislonjenim krajnjim navojima prema relaciji (4.35):

$$L_{B1} = (i_{uk} + 1,5) \cdot d \quad (4.35)$$

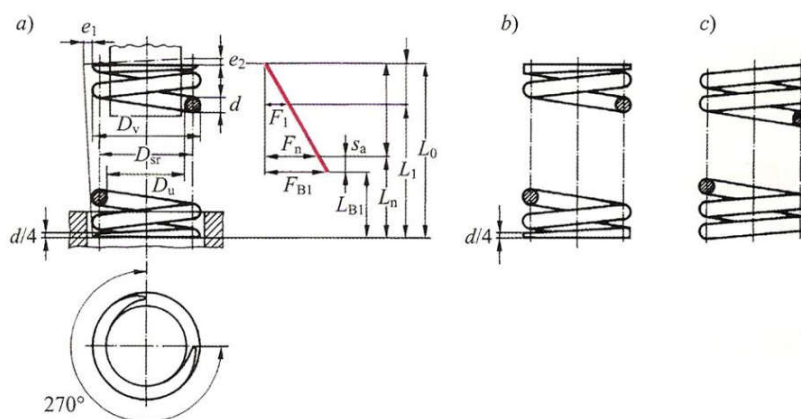
Gdje je:

L_{B1}	[mm]	duljina stisnutog bloka opruge
i_{uk}	-	cjelokupan broj navoja $=i_f + 1,5$, (kod hladno oblikovanih opruga s obrađenim krajevima)

i_f - broj navoja koji imaju opružno djelovanje
 d [mm] promjer žice

Krajevi šipki mogu se oblikovati brušenjem, kod većih promjera kovanjem, a mogu ostati i neobrađeni što je prikazano na slici 4.41. U slučaju da krajevi opruga nisu obrađeni, tada će ukupan broj navoja biti [2]:

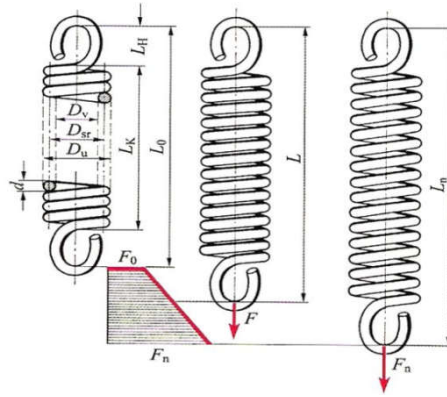
$$i_{uk} = i_f + 2 \quad (4.36)$$



Slika 4.41: Tlačna opruga izrađena od okrugle šipke

- a) brušeni i prilignuti krajevi; b) prilignuti, brušeni i kovani krajevi;
 c) opruga s neobrađenim krajevima [2]

Vlačne opruge namotane su navoj uz navoj s predopterećenjem F_0 . Optereti li se vlačna opruga nekom silom javit će se zračnost između navoja opruge samo ako ta sila bude veća od sile kojom je opruga predopterećena. Vlačne opruge proizvedene od čelične žice, predviđene za izradu opruga koje imaju promjer žice manji od 17 milimetara, izrađuju se na hladno. Pri većem opterećenju i promjeru žice većem od 10 milimetara opruge se izrađuju u toplom stanju i nakon izrade se poboljšavaju. Vlačnu oprugu koja ima savinute ušice prikazuje slika 4.42 [10].



Slika 4.42: Vlačna opruga namotana s predopterećenjem [10]

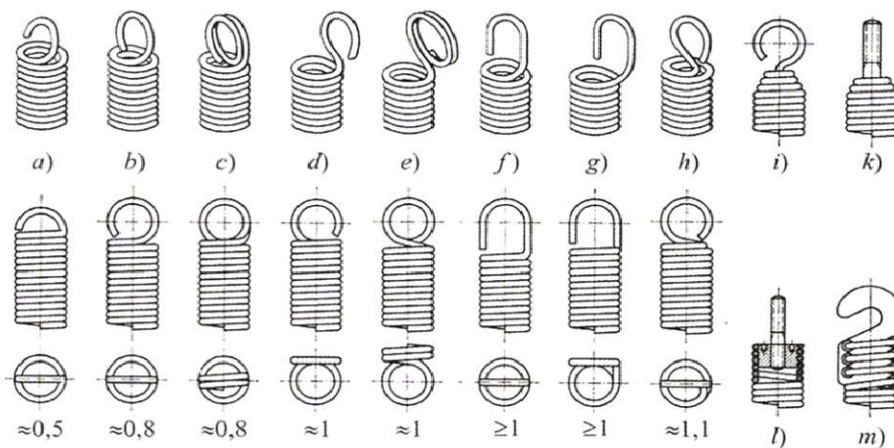
Duljina tijela neopterećene opruge računa se prema relaciji (4.37):

$$L_K \approx (i_f + 1)d \quad (4.37)$$

Gdje je:

L_K	[mm]	duljina tijela neopterećene opruge (bez ušica)
i_f	-	broj navoja koji ima opružno djelovanje
d	[mm]	promjer žice

Ušice opruge mogu biti u istoj ravnini ili međusobno zakrenute za 90°. Navoji s opružnim djelovanjem počinju na mjestu gdje završava ušica. Slika 4.43 prikazuje razne oblike ušica [10].



Slika 4.43: Vlačne opruge s različitim oblikom ušica po normi DIN 2097 (brojevi ispod označavaju omjer L_H/D_u)

„a) polovična njemačka ušica; b) cijela njemačka ušica; c) dvostruka njemačka ušica; d) cijela njemačka ušica sa strane dignuta; e) njemačka dvostruka ušica sa strane dignuta; f) kuglasta ušica; g) kukasta ušica sa strane dignuta; h) engleska ušica; i) kuka uvaljana; k) svornjak s navojem uvaljan; l) čep s navojem uvijen; m) plosnata ušica uvijena“ [2]

4.4.4 Proračun vlačne i tlačne opruge

Presjek šipke ili žice kod vlačnih i tlačnih opruga obično je opterećen na uvijanje. Proračun vlačne i tlačne opruge određen je normom DIN 2089 [10]:

- idealno torziono naprezanje:

$$\tau_i = \frac{8D_{sr}}{\pi d^3} F = \frac{G \cdot d}{\pi \cdot i_f \cdot D_{sr}^2} f \quad (4.38)$$

- maksimalno torziono naprezanje:

$$\tau_k = k \cdot \tau_i \quad (4.39)$$

- promjer žice:

$$d = \sqrt[3]{\frac{8F \cdot D_{sr}}{\pi \cdot \tau_{idop}}} \quad (4.40)$$

- opruženje, hod opruge:

$$f = \frac{8D_{sr}^3 \cdot i_f}{G \cdot d^4} F \quad (4.41)$$

- broj navoja koji ima opružno djelovanje:

$$i_f = \frac{G \cdot d^4 \cdot f}{8D_{sr}^3 \cdot F} \quad (4.42)$$

- sile na opruzi:

$$F = \frac{G \cdot d^4 \cdot f}{8D_{sr}^3 \cdot i_f} \quad (4.43)$$

- specifična sila:

$$c = \frac{F}{f} = \frac{G \cdot d^4}{8D_{sr}^3 \cdot i_f} \quad (4.44)$$

Gdje je:

τ_i	[N/mm ²]	idealno naprezanje na uvijanje, ne uzima se u obzir zakrivljenje žice
τ_k	[N/mm ²]	uvojno naprezanje, u obzir uzeto zakrivljenje žice
k	-	faktor koji prikazuje tablica 4.4
F	[N]	sila kojom je opruga opterećena
G	[N/mm ²]	modul klizanja
d	[mm]	promjer šipke ili žice opruge
D_{sr}	[mm]	srednji promjer navoja opruge

i_f	-	broj navoja koji ima opružno djelovanje
f	[mm]	opruženje, hod opruge
c	[N/mm]	specifična sila opruge

Tablica 4.4: Faktor k tlačnih i vlačnih opruga prema normi DIN 2089 [10]

D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k	D_{sr}/d	k
3	1,55	4	1,38	5	1,29	6	1,24	8,5	1,16	12	1,11	18	1,07
3,2	1,51	4,2	1,36	5,2	1,28	6,5	1,22	9	1,15	13	1,10	20	1,06
3,4	1,47	4,4	1,34	5,4	1,27	7	1,20	9,5	1,14	14	1,09	25	1,05
3,6	1,44	4,6	1,32	5,6	1,26	7,5	1,19	10	1,13	15	1,09	30	1,04
3,8	1,41	4,8	1,31	5,8	1,25	8	1,17	11	1,12	16	1,08		

4.4.5 Primjer proračuna vlačne opruge

Vlačna opruga kod opterećenja silom od 300 N ima progib 50 mm i dužinu kod tog progiba 190 mm. Oprugu je potrebno navući za još 70 mm, a sila ne smije biti veća od 620 N/mm². Potrebno je izračunati promjer žice, broj navoja s opružnim djelovanjem, krutost opruge i duljinu žice ako je za jedan završetak potrebna duljina žice od 35 mm.

Zadano:

$$\begin{array}{lll}
 F_1 = 300 \text{ N} & F_2 = 620 \text{ N} & \tau_{sr} = 660 \text{ N/mm}^2 \\
 f_1 = 50 \text{ mm} & f_2 = 120 \text{ mm} & l_k = 35 \text{ mm} \\
 L_1 = 190 \text{ mm} & D_{sr} = 32 \text{ mm} & G = 82\,000 \text{ N/mm}^2
 \end{array}$$

Rješenje:

Promjer žice prema relaciji (4.40):

$$d = \sqrt[3]{\frac{8F_2 \cdot D_{sr}}{\pi \cdot \tau_{idop}}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 620 \cdot 32}{\pi \cdot 660}} = 4,25 \text{ mm}$$

Broj navoj s opružnim djelovanjem prema relaciji (4.42):

$$i_f = \frac{G \cdot d^4 \cdot f}{8D_{sr}^3 \cdot F} = \frac{82\,000 \cdot 4,25^4 \cdot 120}{8 \cdot 32^3 \cdot 620} = 19,75$$

Usvojen broj navoja s opružnim djelovanjem je $i_f = 20$

Duljina žice:

$$L_{uk} = i_f \cdot D_{sr} \cdot \pi + 2 \cdot l_k = 20 \cdot 32 \cdot \pi + 2 \cdot 35 = 2080,62 \text{ mm}$$

Krutost opruge prema relaciji (4.44):

$$c = \frac{F_2}{f_2} = \frac{620}{120} = 5,167 \text{ N/mm}^2$$

5. ZAKLJUČAK

Funkcioniranje svega što nas okružuje neostvarivo je bez uspostavljanja veza. Osvrnemo li se oko sebe, vidjet ćemo razne stvari, predmete, strojeve i uređaje koji su nastali povezivanjem više dijelova u funkcionalnu cjelinu. Povezivanje dijelova može se ostvariti na više načina. U osnovi, spojevi koji se ostvaruju mogu se podijeliti na nerastavljive spojeve i rastavljive spojeve. Nerastavljivi spojevi se ne mogu rastaviti bez razaranja vezivnog sredstva, a u slučaju da dođe do razaranja spoja, spoj nije moguće ponovno uspostaviti istim vezivnim sredstvom. Nerastavljivi spojevi ostvaruju se zavarivanjem, lemljenjem, lijepljenjem, presavijanjem, pregibanjem, utiskivanjem, steznim spojevima i uporabom zakovica. Za razliku od nerastavljivih spojeva, rastavljivi spojevi se mogu rastaviti bez razaranja i oštećenja te ih je moguće ponovno ostvariti istim vezivnim sredstvom. U rastavljive spojeve ubrajaju se vijčani spojevi koji se ostvaruju vijcima i maticama, spojevi glavine u koje pripadaju spojevi klinovima, perima, klinastim vratilima, zupčastim vratilima, steznim elementima i čeonim ozubljenjem. Također, rastavljive spojeve moguće je ostvariti zaticima i svornjacima, a za elastično povezivanje u rastavljivim spojevima koriste se opruge. Svaki od navedenih načina ostvarivanja spoja ima određene prednosti i nedostatke koji su navedeni u ovom radu. Ovisno o tim prednostima i nedostacima odabire se optimalan način ostvarivanja spoja koji će dati potrebnu čvrstoću i ispuniti postavljene zahtjeve.

6. LITERATURA

- [1] Prof. dr. Sc. Jelaska D. ELEMENTI STROJEVA [Online]. 2005. Dostupno na:
<https://bib.irb.hr/datoteka/321780.ES-skripta-760-kon.pdf>
- [2] Golubić S. Bilješke i predavanja s predmeta „Elementi precizne Mehanike“. Bjelovar: Veleučilište u Bjelovaru; 2020.
- [3] <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/standardizacija.pdf>
- [4] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_strojni_dijelovi.pdf
- [5] <https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/tolerancije.pdf>
- [6] https://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/os_7_tolerancije.pdf
- [7] <https://element.hr/artikli/file/2559/elementi-strojeva-i-konstruiranje-udzbenik/52088>
- [8] <https://element.hr/artikli/file/2521/strojarstvo-i-osnove-strojarstva-2-dio-udzbenik/52064>
- [9] Podrug S. ELEMENTI STROJEVA. Predavanja za stručni i preddiplomski studij BRODOGRADNJE. Split 2008. Dostupno na:
<http://marjan.fesb.hr/~spodrug/Elementi-640-predavanja/Predavanja%20es%20bgd%202007-2008.pdf>
- [10] Karl-Heinz Decker. Elementi strojeva. Treće izmijenjeno i dopunjeno izdanje. Tehnička knjiga Zagreb. 2006.
- [11] Matušin V. Tehnologija spajanja materijala lemljenjem. Završni rad. Varaždin: Sveučilište Sjever; 2016. Dostupno na:
<https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A701/datastream/PDF/view>
- [12] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/lemljeni_spojevi.pdf
- [13] Energetika-net. Lijepljenje – tehnologija spajanja za budućnost. Dostupno na:
<http://www.energetika-net.com/specijali/nove-tehnologije/lijepljenje-tehnologija-spajanja-za-buducnost-20603>
- [14] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/lijepljeni_spojevi.pdf
- [15] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/04-NerastavljiviSpojevi.pdf>
- [16] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/EMS_PREDAVANJA.pdf
- [17] <https://www.wikiwand.com/sh/Zakovica>
- [18] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_1_zakovice.pdf
- [19] Buljan M. Opruge u mehatronici. Završni rad. Bjelovar: Veleučilište u Bjelovaru; 2019. Dostupno na:

<https://repozitorij.vub.hr/islandora/object/vtsbj%3A454/datastream/PDF/view>

Svi navedeni linkovi dostupni su na dan 08.09.2020.

7. OZNAKE I KRATICE

- A_1 , mm² – površina presjeka zakovane zakovice
- A_F , mm² – površina nalijeganja u steznim spojevima
- A_f , mm² – presjek elastičnog struka vijka s promjerom d_f
- A_j , mm² – površina jezgre vijka prikazana tablicom 4.1
- A_s , mm² – površina opterećenog presjeka vijka prema tablici 4.1
- a , mm – računaska debljina zavara
- A_L , mm² – površina lemljenog spoja, površina lijepljenog spoja
- A_{zv} , mm – nosiva površina zavara
- A , mm² – presjek zubi u korijenu
- A , mm² – presjek vijka opterećenog na odrez
- A , mm² – presjek zatika ili svornjaka
- a, b , mm – širina elemenata u spoju
- b , mm – širina plosnatog ili zaobljenog klina
- b , mm – širina spoja
- Bi – oznaka za navoj za bicikle
- c , N/mm – specifična sila u opruzi
- D_F , mm – promjer steznog spoja
- D_F , mm – srednji promjer površine nalijeganja
- D_U , mm – unutrašnji promjer glavine
- D_V , mm – vanjski promjer na glavini
- D_{sr} , mm – srednji promjer navoja opruge
- D_{sr} , mm – srednji promjer glave vijka
- d_1 , mm – promjer provrta za zakovicu
- D , mm – nazivni promjer matice
- d , mm – nazivni promjer vijka
- d_2 , mm – srednji promjer vijka
- d_3 , mm – promjer jezgre vijka
- d_f , mm – promjer elastičnog struka vijka
- DIN - Deutsches Institut für Normung (Njemački institut za standardizaciju)
- D_{max} , d_{max} , D_g , d_g - gornja granična mjera
- D_{min} , d_{min} , D_d , d_d - donja granična mjera
- D_s , d_s , N_s – stvarna mjera

d , mm – promjer spoja
 d , mm – promjer vratila
 d , mm – promjer zatika ili svornjaka
 d , mm – promjer žice za oprugu
E – oznaka za Edisonov navoj
EI – donje odstupanje unutarnjih mjera
ei – donje odstupanje vanjskih mjera
EN - European Standards (Europski standardi)
ES – gornje odstupanje unutarnjih mjera
es – gornje odstupanje vanjskih mjera
 F_1 , N – aksijalna sila zatezanja
 F_p , N – sila predzatezanja
 F_T , N – potrebna sila prijanjanja u steznom spoju
 F_{max} , N – maksimalna vlačna ili smična sila kojom je spoj opterećen
 F_{max} , N – maksimalna sila u vijku
 F_t , N – sila na obodu vratila
 F_u , N – ukupna sila u spoju vijcima
 F , N – sila smicanja u zavaru
 F , N – vlačna ili tlačna sila
 F_0 , N – predopterećenje vlačne opruge
 F_a , N – uzdužna sila
 F_o , N – obodna sila
 F_{res} , N – rezultatna sila
 F , N – pogonska sila
 F , N – pogonska aksijalna sila vijka
 F , N – poprečna pogonska sila na jednom vijku
 F , N - sila kojom je opruga opterećena
 F , N – sila koja opterećuje oprugu
 F , N – smična sila
 f , mm – produljenje opruge pod djelovanjem sile F
G - granična mjera
Gd - donja granična mjera
Gg - gornja granična mjera

G , N/mm² – modul klizanja
 H – tolerancijsko polje
 HRN – Hrvatske norme
 h , mm – nosiva visina klina ili zuba
 h , mm – zračnost kod lemljenja
 H_1 , mm – nosiva dubina navoja
 h_3 , mm – dubina navoja
 I_{zav} , mm - moment inercije površine zavarenog šava
 i_f – broj navoja koji ima opružno djelovanje
 i_{uk} – cjelokupan broj navoja
 I - stvarna mjera
 IEC - International Electrotechnical Commission, (međunarodna tehnička komisija)
 ISO - International Standardizing Organization (međunarodna organizacija za standardizaciju)
 itd – i tako dalje
 i - broj klinova po obodu
 i – broj vijaka u steznom spoju
 JUS – Jugoslavenski standard
 J , kg·m² – moment inercije mase tijela podvrgnutog kružnom titranju prema osi vrtnje
 K_A – faktor primjene (udara)
 K_V - pogonski faktor prema normi DIN 3990 T1
 k – faktor nošenja u spojevima s klinastim vratilom ili zupčastim vratilima
 k – faktor prema tablici 4.4
 L_{B1} , mm – duljina stisnutog bloka opruge
 L_K , mm - duljina tijela neopterećene opruge (bez ušica)
 L_{uk} , mm – ukupna duljina žice za oprugu
 l_1, l_2 , mm – poluge prikazane slikom 4.25c
 l_F , mm – uzdužna duljina nosive površine
 l_F , mm – duljina steznog spoja
 l_t , mm – nosiva duljina klina (spoja)
 l, l_p mm – korisna duljina preklopa kod lemljenja ili lijepljenja
 LH – oznaka za lijevi navoj
 l_{zv}, l , mm – nosiva dužina pojedinog zavara

L, l , mm – krak sile F
 l , mm – duljina segmentnih klinova
 l , mm – stegnuta duljina
 M – oznaka za metrički navoj
 m , mm – visina matice
 M , mm⁴ – moment savijanja na površini šava
 $m6, h8, h11$ – vrsta zatika
 mm – milimetri
 M, Nmm – moment savijanja zubi
 m – broj rezova spoja
 m , kg – masa tijela koje je podvrgnuto titranju
 N – broj ciklusa
 N - neodređena mjera
 N - nominalna (nazivna) mjera
 $N1$ – oznaka navoja vijka za lim
 n – broj vijaka
 n – broj zakovica
 P_i , mm – izvedeni preklop
 P_{max}, P_g , mm – najveći preklop dosjeda spoja
 P_{min}, P_d , mm – najmanji preklop dosjeda spoja
 p_V, p_U , N/mm² – tlak koji djeluje na površine dijelova u spoju
 p_{dop} , N/mm² – dopušteni tlak na zatiku
 P , mm – uspon ili korak navoja
 p_F , N/mm² – tlak na naležnoj površini
 p_r , N/mm² – radijalni tlak na klin
 P , N/mm² – tlak na bočnoj strani provrta
 p , N/mm² – tlak
 p , N/mm² – bočni tlak klina, odnosno utora
 p , N/mm² – tlak na površini nalijeganja u konusu
 R – oznaka za Whitworthov cijevni navoj
 R , mm – zaobljenje korijena u navoju
 Rd – oznaka za obli navoj
 R_d – trajna dinamička čvrstoća

R_e – granica tečenja
 R_m – granica elastičnosti, vlačna čvrstoća materijala
 $R_{p0.2}$ – tehnička granica tečenja
 S – oznaka za kosi navoj
 s , mm – debljina materijala koji se leme ili lijepe
 S_L - faktor sigurnosti protiv labavljenja
 S_V – faktor sigurnosti
 S – faktor sigurnosti; kreće se u granicama od 2 do 4
 s , mm – duljina nalijeganja zatika
 s , mm – minimalna nosiva duljina vijka
 T_{max} , Nm – maksimalni moment uvijanja
 T_{naz} , Nm – nazivni okretni moment
 T_o , Nmm – pogonski moment vrtnje
 t_2 , mm – dubina utora glavine
 T - tolerancija mjera
 T , Nmm – torzioni ili uvojni okretni moment
 TC - Technical Committee (Tehnički odbori)
 T_{pr} , Nmm - moment pritezanja
 Tr – oznaka za trapezni navoj
 t , mm – dubina utora potrebna za tangencijalni klin
 t , mm – mjerodavna debljina lima
 U - unutarnja mjera
 V - vanjska mjera
 W , mm³ – moment otpora izvijanja zubi u ozubljenju
 W , Nmm – rad opruge
 y , N/mm² – udaljenost naprezanja na savijanje od težišnice površine zavarenog šava
 z – broj zubi nazupčastim vratilima
 α - kut konusa u koničnim spojevima
 α , ° - kut uspona
 α , rad – kut uvijanja pri djelovanju okretnog momenta
 β , ° - kut profila zavojnice
 μ - koeficijent trenja na glavi vijka i na boku navoja
 v – faktor prijanjanja

v – faktor sigurnosti

ν , 1/s=Hz – frekvencija titranja

$\sigma_{\perp f}$, N/mm – tlačno ili vlačno naprezanje od savijanja zavarenog spoja

$\sigma_{\perp v, t}$, N/mm² – tlačno ili vlačno naprezanje zavarenog spoja

σ_1 , N/mm² – naprezanje bočne strane provrta

σ_L , N/mm² – normalno naprezanje u materijalu lema

σ_{LB} , N/mm² – vlačna čvrstoća materijala lema

σ_T , N/mm² – najmanja granica razvlačenja materijala vijka (tablica 4.2)

σ_{dopM} , N/mm² – dopušteno naprezanje osnovnog materijala kod lemljenja

σ_f , N/mm² – savojno naprezanje u presjeku svornjaka ili zatika

σ_{IB} , N/mm² – vlačna čvrstoća lijepljenog spoja

σ_{pr} , N/mm² – naprezanje od pritezanja (prednaprezanje)

σ_{red} , N/mm² – reducirano naprezanje u zavarenu šavu

σ_{rez} , N/mm² – naprezanje u korijenu zuba

σ_v , N/mm² – naprezanje jezgre na vlak pogonskom silom

σ_{vL} , N/mm² – naprezanje ispitivanjem

σ – dopušteno naprezanje

$-\sigma_{dop}$ – dopušteno tlačno naprezanje

σ_{dop} – dopušteno vlačno naprezanje

$\sigma_{f dop}$ – dopušteno naprezanje na savijanje

σ_{gr} – granično naprezanje

σ_k – zarezno naprezanje

σ , N/mm² – normalno naprezanje u zavaru

σ , N/mm² – naprezanje elastičnog struka vijka na vlak

σ , N/mm² – naprezanje na vlak u opterećenom presjeku

τ_{\parallel} , N/mm² – naprezanje na smik u zavaru

τ_L , N/mm² – srednje tangencijalno naprezanje u spoju

τ_{LB} , N/mm² – odrezna čvrstoća lema

τ_{LB} , N/mm² – smična čvrstoća u spoju

τ_a , N/mm² – odrezno naprezanje u presjeku zatika ili svornjaka

τ_a , N/mm² – naprezanje vijka na odrez

τ_{dopL} , N/mm² – dopušteno naprezanje materijala lema

τ_i , N/mm² – idealno naprezanje na uvijanje, ne uzima se u obzir zakrivljenje žice

$\tau_k, \text{N/mm}^2$ – uvojno naprezanje, u obzir uzeto zakrivljenje žice

$\tau_s, \text{N/mm}^2$ – odrezno naprezanje u presjeku zakovice

$\tau_{s \text{ dop}}$ – dopušteno smično naprezanje

$\tau_{t \text{ dop}}$ – dopušteno torzijsko naprezanje

$\tau, \text{N/mm}^2$ – smično naprezanje u ljepilu

$\tau, \text{N/mm}^2$ – smično naprezanje u zavaru vertikalno ili uzdužno na smjer zavora

ϱ – kut trenja $\approx 6^\circ$ kod određenih naležnih površina

8. SAŽETAK

Naslov: Sredstva za spajanje u mehatronici

U ovom završnom radu obrađena je tema iz područja proizvodnog strojarstva. Rad je podijeljen u nekoliko poglavlja. U prvom poglavlju rada napravljen je uvod u temu. U drugom poglavlju opisuju se općenito elementi precizne mehanike. Navedena je podjela elemenata strojeva kako bi se dobila šira slika područja iz kojeg dolazi navedena tema. Općenito su prikazane norme (standardi) te je navedena važnost primjene istih u elementima precizne mehanike. Nadalje, opisana je važnost dopuštenih odstupanja i navedena su dopuštena naprezanja i čvrstoća. U trećem poglavlju rada opisani su nerastavljivi spojevi. Od nerastavljivih spojeva opisani su zavareni spojevi, lemljeni spojevi, lijepljeni spojevi, zakovični spojevi i stezni spojevi. Za svaki od navedenih nerastavljivih spojeva općenito je opisano sredstvo kojim se ostvaruje spoj, navedene su osnove proračuna i prikazan je primjer proračuna. U četvrtom poglavlju rada opisani su rastavljivi spojevi. Od rastavljivih spojeva opisani su vijčani spojevi, spojevi glavine, spojevi sa zaticima i svornjacima te spojevi oprugama. Kao i u trećem poglavlju, ovdje se također opisuje sredstvo kojim se ostvaruje spoj, prikazane su osnove proračuna i navedeni su primjeri proračuna. Zaključak cjelokupnog rada nalazi se u petom poglavlju.

Ključne riječi: elementi precizne mehanike, elementi strojeva, nerastavljivi spojevi, rastavljivi spojevi, načini spajanja u mehatronici.

9. ABSTRACT

Title: Coupling means in mechatronics

In this final paper, a topic from the field of production engineering is described. The paper is divided into several chapters. An introduction to the topic was made in the first chapter of the paper. The second chapter describe the elements of precision mechanics in general. Machine elements are sorted in groups to better the understanding of the topic. Norms (standards) are presented along with their importance when applied to precision mechanics elements. Furthermore, the importance of tolerances and allowable stresses as well as strengths are stated and described. The third chapter describes inseparable joints. Of the inseparable joints, welded, soldered, glued, riveted and clamped joints are described. For each of these inseparable joints, the medium used to make the joint is described, basic calculations are presented and an example of the calculation is given. In the fourth chapter of the paper, detachable joints are described. Of the detachable joints screw, hub, pin, bolt, and spring joints are described. As in the third chapter, the medium used to make the joints is described, basics of the calculation process are presented, along with some calculation examples. The conclusion of the final paper can be found in the fifth chapter.

Keywords: elements of precision mechanics, elements of machines, inseparable joints, detachable joints, coupling means in mechatronics.

IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>11.09.2020.</u>	NEVEN KRŠNIK	Neven Kršnik

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

NEVEN KRŠNIK

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 11.09.2020.

Novem Kršnik

potpis studenta/ice