

**Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje  
Sveučilište u Splitu  
Katedra za konstrukcije**

**Podloge za predavanja iz Metalnih konstrukcija i  
Konstruiranja**

**NERECENZIRANI TEKST NAMIJENJEN ISKLJUČIVO  
ZA INTERNU UPOTREBU!**

**Ž. Domazet, L. Krstulović-Opara**

Split, veljača, 2006.

1. Uvod.....	5
1.1 Područje primjene .....	5
1.2 Tipovi konstrukcija .....	6
1.4 Konstruiranje i projektiranje .....	6
1.5 Tehnička dokumentacija .....	6
1.6 Dokazi pri dimenzioniranju metalnih konstrukcija.....	7
1.7 Osnovni konstrukcijski elementi.....	8
1.7 Prednosti i nedostaci metalnih konstrukcija .....	9
1.8 Povijesni razvoj.....	10
1.9 Standardi .....	14
1.10 Ugovaranje metalnih konstrukcija .....	15
1.10.1 Ugovor o djelu .....	17
1.10.2 Ugovor o građenju .....	18
1.11 Gradilište.....	19
1.12 Automatizacija procesa rezanja i zavarivanja.....	20
2. Materijali za metalne konstrukcije.....	23
2.1 Čelici .....	23
2.1.1 Obični konstrukcijski čelici .....	23
2.1.2 Legirani čelici .....	26
2.1.3 Izbor čelika za metalne konstrukcije.....	27
2.2 Aluminij i aluminijeve slitine .....	28
3. Opterećenje konstrukcija .....	33
3.1 Opterećenja prema našim propisima (HRN).....	33
3.1.1 Stalni teret .....	34
3.1.2 Korisno opterećenje .....	34
3.1.3 Opterećenje snijegom.....	34
3.1.4 Sile stalnog karaktera.....	35
3.1.5 Vjetar.....	35
3.1.6 Sile kočenja.....	36
3.1.7 Bočni udari.....	36
3.1.8 Sile temperaturnih razlika .....	36
3.1.9 Djelovanje potresa .....	36
3.2 Dinamička opterećenja.....	37
3.3 Opterećenja prema EUROCODE 3 .....	39
3.3.1 Granična stanja.....	39
3.3.2 Vanjski utjecaji (akcije) na konstrukciju .....	39
3.3.3 Unutrašnji utjecaji na konstrukciju (koeficijenti sigurnosti) .....	40
4. Oblikovanje metalnih konstrukcija .....	41
5. Spajanje elemenata.....	51
5.1 Zakovice.....	51
5.2 Vijčani spojevi .....	51
5.2.1 Proračun vijčanih spojeva .....	52
5.2.2 Klasifikacija mehaničkih svojstava i označavanje vijaka .....	54
5.2.3 Prednapregnuti vijčani spojevi.....	54
5.2.4 Raspored vijaka u konstrukciji.....	56
5.2.5 Proračun nastavaka opterećenih na savijanje.....	57
5.3 Zavareni spojevi.....	62
5.3.1 Statički opterećeni zavari.....	65
5.3.2 Dinamički opterećeni zavari .....	70
5.3.3 Utjecaj zavarenih spojeva na dinamičku izdržljivost.....	77

5.4. Oblikovanje vijčanih i zavarenih spojeva obzirom na zamor .....	88
5.4.1 Oblikovanje vijčanih spojeva obzirom na zamor.....	88
5.4.2. Oblikovanje zavarenih spojeva obzirom na zamor .....	90
6. Zaštita od korozije.....	97
6.1 Utjecaj okoline i opterećenje .....	97
6.2 Konstruktivne mjere.....	99
6.3 Izvođenje zaštite.....	100
6.4 Kompatibilnost.....	100
6.5 Kemijsko-fizikalna svojstva premaza i prevlaka .....	101
6.6 Uloga i izgled zaštite.....	102
6.7 Troškovi održavanja površinske zaštite .....	103
6.8 Izvođenje i ispitivanje .....	103
6.8.1 Priprema metalne površine .....	103
6.8.2 Nanošenje premaza i prevlaka .....	105
6.8.3 Debljina sloja, prionjivost i neporoznost .....	105
6.8.4 Popravci .....	107
6.9 Ugovaranje .....	107
6.10 Obnavljanje .....	108

## 1. Uvod

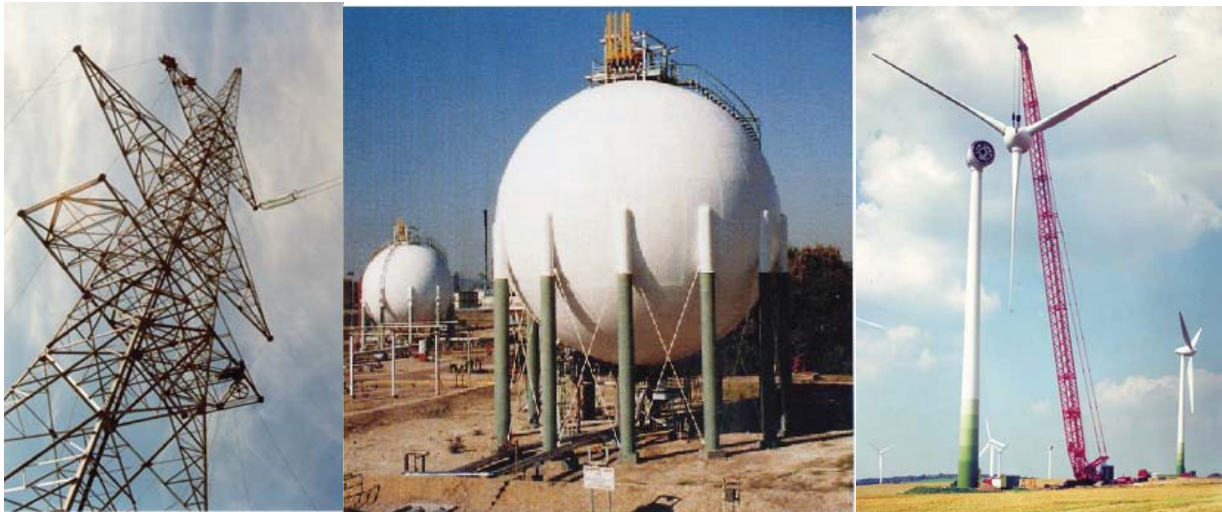
### 1.1 Područje primjene

Pod pojmom *metalne konstrukcije* podrazumijevaju se konstrukcije koje su pretežno ili potpuno izrađene od metala. Sama konstrukcija sastoji se od dijelova, koji ugrađeni u konstrukciju sačinjavaju funkcionalnu cjelinu. Konstrukcije se dijele prema konstruiranju, izradi i primjeni na:

- mostove
- zgrade
- transportna sredstva (brodovi, zrakoplovi, šinska vozila, cestovna vozila)
- konstrukcije industrijskih postrojenja (dizalice, pretovarni mostovi, transporteri, kopači, rezervoari, postolja i sl.)

Kao materijal izrade se u metalnim konstrukcijama u najvećoj mjeri primjenjuje čelik, pa onda aluminij.

Što se specifičnosti izrade tiče, metalne konstrukcije karakteriziraju vrlo mala strojna dorada (priprema bridova i bušenje rupa) te spajanje gotovih oblika dobivenih valjanjem (limovi kod limenih konstrukcija te štapni profili kod štapnih rešetkastih konstrukcija)



Slika 1.1.1 Dalekovodi, spremnici, dizalice



Slika 1.2.1 Platforme i zrakoplovi

## 1.2 Tipovi konstrukcija

Oblik presjeka upotrijebljenih dijelova (elemenata) konstrukcije i rješenje općeg oblika konstrukcije uvjetuju podjelu metalnih konstrukcija na:

- a) rešetkaste konstrukcije
- b) limene konstrukcije

U svakoj konstrukciji cilj je postići najekonomičnije iskorištenje materijala uz istovremenim zadovoljenjem namjene i prenošenja opterećenja.

Izbor konstrukcije ipak ovisi o nizu činioca kao što je vrsta napreznja koja se u konstrukciji javlja.

## 1.4 Konstruiranje i projektiranje

Osim namjene, projekt mora zadovoljiti i arhitektonske uvjete te estetske uvjete. Svako rješenje služi ujedno kao i izvor podataka i ideja za nova rješenja.

Projekt konstrukcije mora sadržati dovoljne podatke za konstrukcijsku razradu te detaljan proračun, usvojene tehnološke postupke i samo izvođenje konstrukcije. Treba osigurati lak pristup svim dijelovima (radi podmazivanja, zaštite od korozije), omogućiti otjecanje vode sa konstrukcije te zadovoljiti sve uvjete zaštite na radu (ograde, skele i sl.)

## 1.5 Tehnička dokumentacija

Tehničku dokumentaciju metalne konstrukcije čine:

- proračun
- crteži

- tehnički opis
- posebni tehnički uvjeti

Crtež treba pregledno sadržati sve o konstrukciji čime se omogućava izrada konstrukcije.

Tehnički opis sadržava:

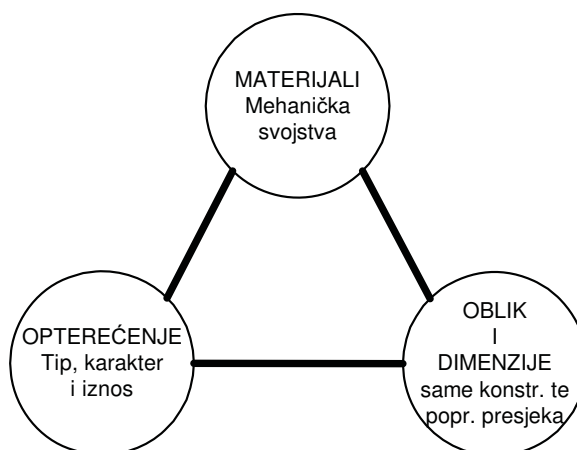
- opis namjene konstrukcije
- podatke o korištenju i transportu
- upute za montažu

Posebni tehnički uvjeti sadrže:

- posebne zahtjeve u vezi materijala
- plan zavarivanja
- kontrolu za vrijeme i nakon izrade

## 1.6 Dokazi pri dimenzioniranju metalnih konstrukcija

Osnovni zadaci čvrstoće, pa tako i proračuna metalnih konstrukcija, su određivanje jedne, na temelju preostale dvije veličine prikazane slikom 1.4.1.



Slika 1.4.1 Određivanje jedne nepoznate veličine

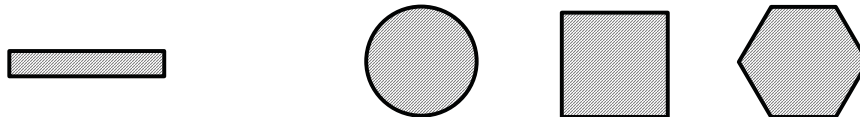
Svaki proračun mora sadržavati slijedeće podatke:

- podatke o opterećenju
- podatke o primijenjenom materijalu
- podatke o geometrijskim karakteristikama poprečnog presjeka elementa
- dokaze naprezanja (prema dopuštenom naprezanju  $\sigma$ )
- dokaze stabilnosti (izvijanje štapova, izvijanje limova)
- dokaze deformacija (funkcionalnost)
- dokaze sigurnosti veza
- dokaz sigurnosti protiv prevrtanja
- dokaz izdržljivosti na zamor

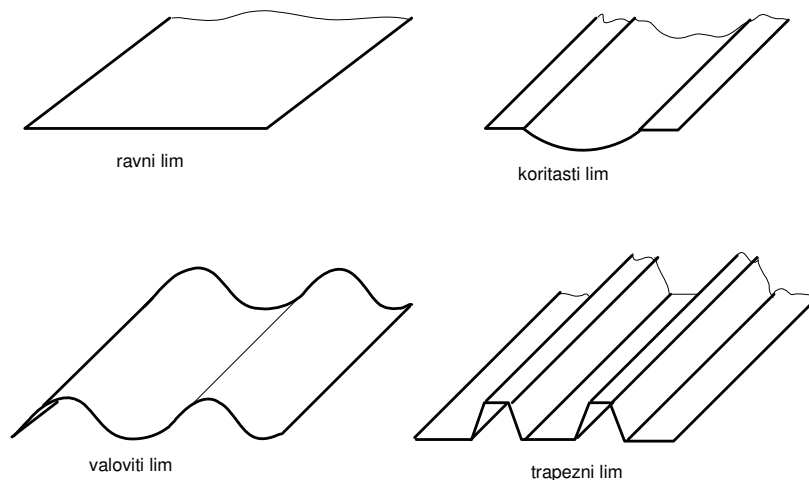
## 1.7 Osnovni konstrukcijski elementi

Ekonomičnost primjene čelika u metalnim konstrukcijama proizlazi upravo iz mogućnosti korištenja, oblikovanja i prerade gotovih osnovni konstrukcijskih elemenata koji se dijele na tri osnovne grupe:

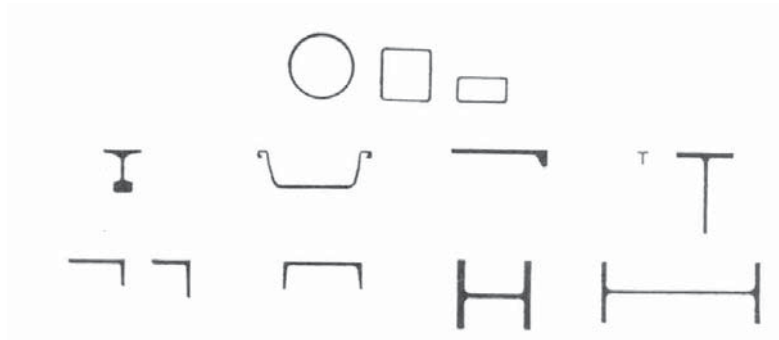
- a) trake (lamele) i puni profili (sl. 1.6.1)
- b) limovi (sl. 1.6.2)
- c) profilni nosači (sl. 1.6.3):
  - ┌ profil (prema EN označeni kao IPN, IPEA, IPEO, IPER, IPN)
  - ┐ profil (Pajner-ov ili prema EN označeni HEA, HEAA, HEB, HEM)
  - └ profil (prema EN označeni kao UPN)
  - └┐ profil - jednakokračni kutni profil (prema EN naziva "Equal angles", npr. L20×3)
  - └┐ profil - raznokračni kutni profil (prema EN naziva "Unequal angles", npr. L30×20×3),
  - └┐ profil - "T" profil (prema EN naziva "Tees" i oznake DEMI)
  - cijevi ( EN oznaka TUBE, npr. TUBE21.3×3.2)
  - kvadratna cijev (prema EN označeni kao TUBEC, npr. TUBEC22×2.3)
  - ▭ pravokutna cijev (prema EN označeni kao TUBEC, npr. TUBER50×252.7)
- d) složeni profili (sl. 1.6.4)
- e) hladno oblikovani profili (sl. 1.6.5)



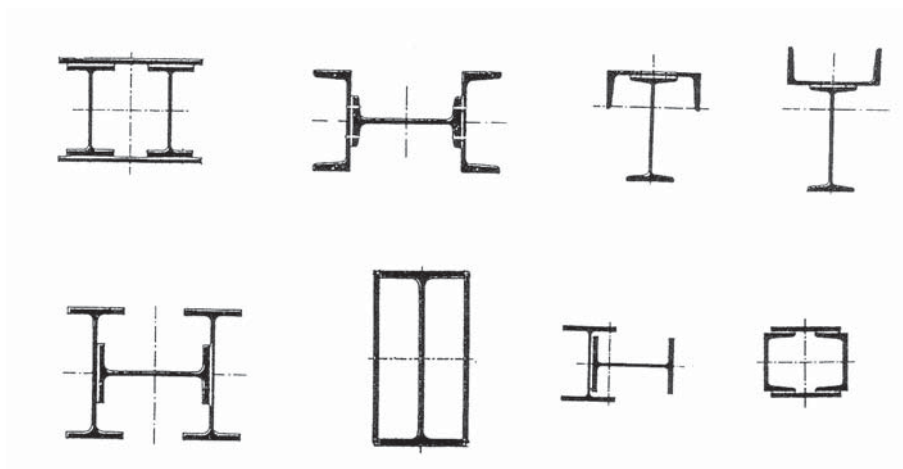
Slika 6.1.1 Trake i puni profili



Slika 6.1.2 Limovi



Slika 6.1.3 Profilni nosači\*



Slika 6.1.4 Složeni profili



Slika 6.1.5 Hladno oblikovani profili

## 1.7 Prednosti i nedostaci metalnih konstrukcija

Kao i sve, metalne konstrukcije imaju svoje prednosti i nedostatke. Glavne prednosti metalnih konstrukcija su:

- moguća potpuna tvornička izrada konstrukcije te samim time montaža gotovih dijelova

\* Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Džeba "Metalne konstrukcije I", IGH Zagreb, 1994.



- zahtijevaju vrlo malo strojne obrade (rupe, brušenje rubova, poprečni zavari na spojevima)
- laka adaptacija (prilagođavanje novoj funkciji)
- mogućnost demontaže i premještanja
- mogućnost kombiniranja različitih materijala

Nedostaci metalnih konstrukcija:

- potrebno održavanje radi zaštite od korozije
- neotpornost na požare (dobri vodiči topline te im porastom temperature bitno padaju mehanička svojstva)

## 1.8 Povijesni razvoj

Povijesni pregled važnijih datuma vezanih uz razvoj metalnih konstrukcija može se sagledati kroz slijedeće bitne povijesne prekretnice:

- 1676., Robert Hook formulirao zakon o ovisnosti naprezanja i deformacija  $\sigma = E\varepsilon$
- 1735., počinje industrijska proizvodnja čelika u redukcionim pećima
- 1744., Leonard Euler rješio izvijanje štapova,  $F_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 E^2}{\lambda^2}$
- 1779., izveden prvi željezni most preko rijeke Severin u Coalbrookdale-u dužine 31 m



Slika 1.8.1 Most u Coalbrookdale-u.

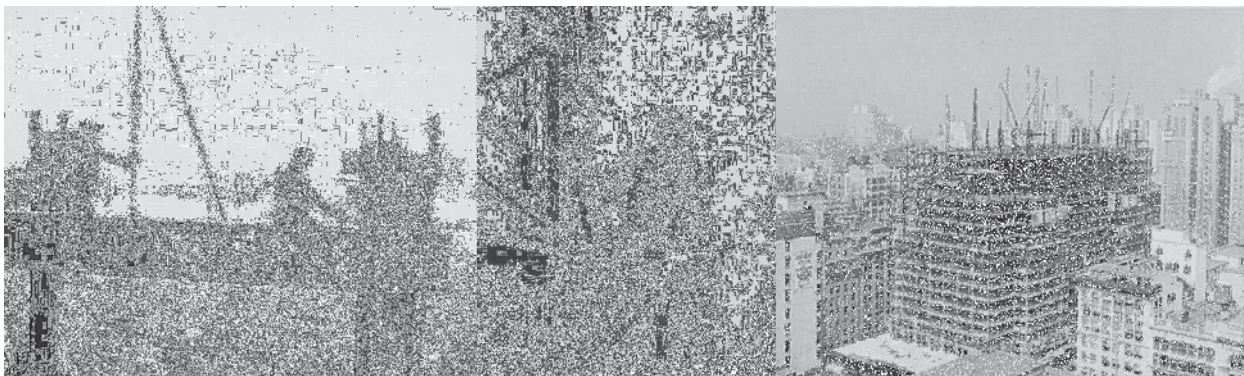
- 1823., Navier formulirao diferencijalnu jednadžbu izvijanja ploča
- 1826.-28., sagrađen viseći most Conway Bridge, projektant Thomas Telford (V. Britanija)
- 1828., prvi most iz kovanog željeza u Beču
- 1846.-50., sagrađen Britannia Bridge, raspon 17,9m+2×241,7m+91,9m projektant Robert Stephenson
- 1853.-58., sagrađena prva zgrada s okvirom iz kovanog čelika, Cooper Union (6 katova), SAD
- 1857., prvo putničko dizalu u robnoj kući New York što je otvorilo vrata izgradnji visokih zgrada

- 1870.-83., sagrađen Brooklyn Bridge, viseći most raspona 520 m, projektant J.A. Roebling (New York)
- 1873. sagrađen Albert bridge preko Temze, lančani most od kovanog željeza



Slika 1.8.2. Albert bridge preko Temze

- 1876., sagrađen Eiffelov toranj visine 300 m (drži rekord u visini punu 41 godinu)
- 1881., početak lučnog zavarivanja
- 1882.-90., izgrađen Forth Bridge (Škotska) raspona 210,4m+2×521,5m+210,4m, projektanti J. Folwer i B. Baker
- 1884., prva okvirna zgrada iz čelika (Chicago)
- 1886., Hall-Heroult proces elektrolize, početak masovne proizvodnje aluminija
- 1914., prvi eksperimentalni dokaz plastičnog zgloba (Gabor Kazinczy)
- 1930., Empire State Building, 102 kata, visina 384,3 m
- 



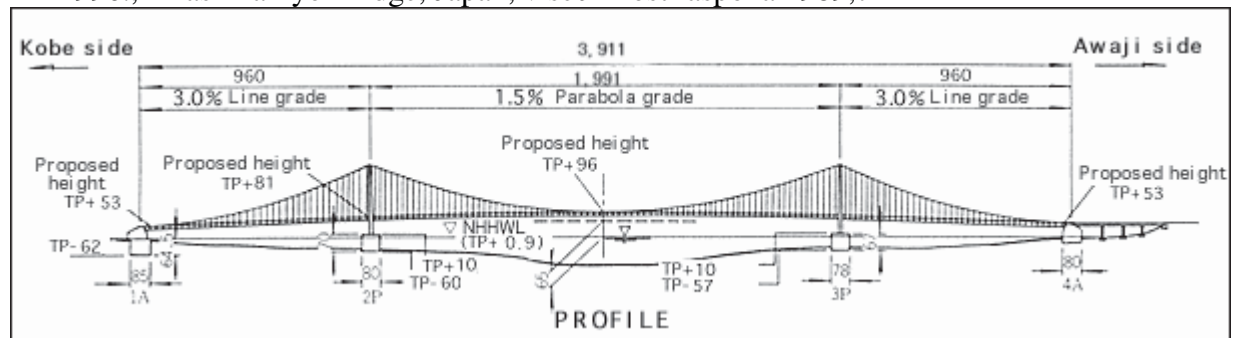
Slika 1.8.3 Izgradnja zgrada iz čelika

- 1937., Golden Gate, San Francisco, viseći most raspona 1281 m



Slika 1.8.4 Golden Gate u izgradnji

- 1970., World Trade Center, dva tornja s 110 katova i 411,8 m visine, srušeni u terorističkom napadu 11.9.2001.
- 1974., Sears Tower, Chicago, 109 katova, visine 442,3 m
- 1996., Akasi Kaikyo Bridge, Japan, viseći most raspona 1989,7 m



Slika 1.8.5 Akasi Kaikyo Bridge



Slika 1.8.6 Akasi Kaikyo Bridge

Dodajmo ovom da je kovano željezo početkom 18 stoljeća u potpunosti kao konstrukcijski materijal zamijenio čelik. U tablici 1.8.1 je prema [Andronić, Dujmović, Džeba, 1994] prikazano

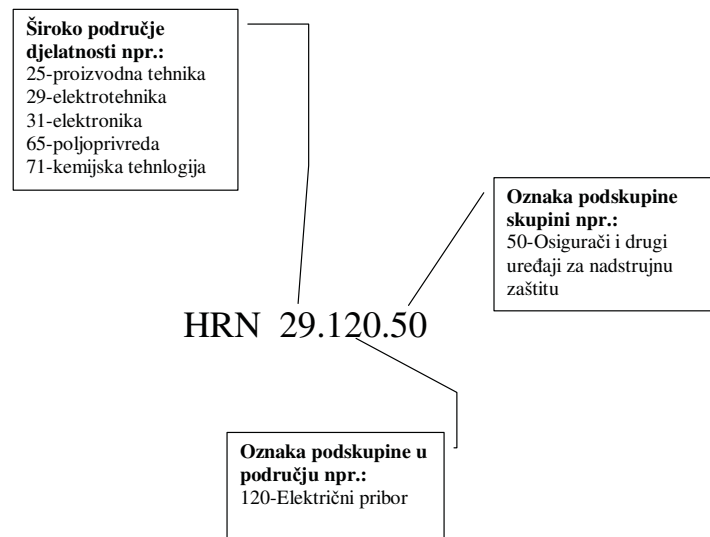
razdoblje primjene pojedinih vrsta konstrukcijskih materijala s pripadajućim rasponima vlačne čvrstoće  $R_m$ .

	Razdoblje pretežne primjene	Područje čvrstoće $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
		Tlak	Vlak
Lijevano željezo	1750. ÷ 1850.	400 ÷ 1000	100 ÷ 150
Kovano željezo	1850. ÷ 1900.	250 ÷ 400	250 ÷ 400
Čelik (zavarljiv)	1880. ÷ dalje	350 ÷ 700	350 ÷ 700

Tablica 1.8.1. Razdoblje primjene i čvrstoće lijevanog i kovanog željeza te čelika

## 1.9 Standardi

*Standardi (norme)* su propisi s kojima se određuje izvedba i kvaliteta proizvoda i materijala, propisuje postupak ispitivanja, kontrole, nazivlja, oznaka, mjera i preuzimanja. Propisuje se tehničko pismo, izgled tehničkog crteža i dr. Sve države članice Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO – International Standard Organisation) obavezale su se pridržavanju odredbi *Međunarodnog standarda* (ISO-a). U Republici Hrvatskoj na snazi je HRN (Hrvatska norma) koja je velikim dijelom nastala preuzimanjem iz JUS-a (Jugoslavenski standard) i DIN-a (Njemački standard), te kasnije nadograđivanja usvajanje vlastitih standarda poput EN-a (Euro norme). Primjenom standarda omogućava se jednoznačna izvedba proizvoda i zamjenjivost dijelova (kompatibilnost) te se omogućava smanjenje asortimana materijala, poluproizvoda, gotovih proizvoda, alata, alatnih strojeva. Standardima se omogućava masovnija, a samim time jeftinija i kvalitetnija proizvodnja i konstruiranje. Slikom 1.9.1 opisan je način označavanja standarda prema hrvatskoj normi. Prva dvoznamenkasta skupina brojeva označava široko područje djelatnosti poput tehnike cestovnih vozila, elektrotehnike, kemijske tehnologije i sl. (tablica 1.9.1). Druga troznamenkasta oznaka označava podskupinu u području, npr. za slučaj "71 kemijske tehnologije", tablica 1.9.2 prikazuje podskupine u području. Treća dvoznamenkasta oznaka označava podskupinu u samoj skupini (sl. 1.9.1). Svi ovi podaci dostupni su na Internet stranicama Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo (<http://www.dznm.hr/>).



Slika 1.9.1 Primjer označavanja propisanog standarda prema hrvatskoj normi

01 OPĆI POJMOVI, NAZIVLJE, NORMIZACIJA, DOKUMENTACIJA
03 SOCIOLOGIJA, USLUGE, USTROJSTVO PODUZEĆA I UPRAVLJANJE PODUZEĆEM, UPRAVA, PRIJEVOZ
07 MATEMATIKA, PRIRODNE ZNANOSTI
11 ZDRAVSTVENA SKRIB
13 ZAŠTITA ZDRAVLJA I OKOLIŠA, SIGURNOST
17 METROLOGIJA I MJERENJE, FIZIKALNE POJAVE
19 ISPITIVANJA
21 MEHANIČKI SUSTAVI I SASTAVNICE ZA OPĆU UPORABU
23 FLUIDIČKI SUSTAVI I SASTAVNICE ZA OPĆU UPORABU
25 PROIZVODNA TEHNIKA
27 TEHNIKA PRIJENOSA ENERGIJE I TOPLINE
29 ELEKTROTEHNIKA
31 ELEKTRONIKA
33 TELEKOMUNIKACIJE, AUDIOTEHNIKA I VIDEOTEHNIKA
35 INFORMACIJSKA TEHNIKA, UREDSKI STROJEVI
37 SLIKOVNA TEHNIKA
39 PRECIZNA MEHANIKA, NAKIT
43 TEHNIKA CESTOVNIH VOZILA
45 ŽELJEZNIČKA TEHNIKA
47 BRODOGRADNJA I POMORSKE KONSTRUKCIJE
49 ZRAKOPLOVNA I SVEMIROPLOVNA TEHNIKA
53 OPREMA ZA RUKOVANJE GRADIVIMA
55 PAKIRANJE I RAŠPAČAVANJE ROBA
59 TEKSTILNA I KOŽNA TEHNOLOGIJA
61 ODJEVNA INDUSTRIJA
65 POLJOPRIVREDA
67 PREHRAMBENA TEHNOLOGIJA
71 KEMIJSKA TEHNOLOGIJA
73 RUDARSTVO I RUDE
75 NAFTNA TEHNOLOGIJA I SRODNE TEHNOLOGIJE
77 METALURGIJA
79 DRVNA TEHNOLOGIJA
81 INDUSTRIJA STAKLA I KERAMIKE
83 INDUSTRIJA GUME I PLASTIKE
85 PAPIRINA TEHNOLOGIJA
87 INDUSTRIJA BOJA
91 GRAĐEVNA GRADIVA I GRADNJA
93 NISKOGRADNJA
95 VOJNA TEHNIKA
97 OPREMA ZA KUĆANSTVO I TRGOVINE, ZABAVA, ŠPORT

Tablica 1.9.1 Široko područje djelatnosti

#### 71 KEMIJSKA TEHNOLOGIJA

71.020 Proizvodnja u kemijskoj industriji  
 71.040 Analitička kemija  
 71.080 Organske kemikalije  
 71.100 Proizvodi kemijske industrije  
 71.120 Oprema za kemijsku industriju

Tablica 1.9.2 Podskupina u području kemijske tehnologije

## 1.10 Ugovaranje metalnih konstrukcija

Ugovaranje je prvi problem s kojim se susreće inženjer. Pri tome on se može naći u slijedećim ulogama:

- a) kao ponuđač (ponuditelj)
- b) kao naručilac (ponuđenik)

Ponuđač se javlja kod nadmetanja (licitiranja), koje se objavljuje u službenim listovima. Prilikom nadmetanja ponuđač dostavlja naručiocu ponudu objekta i cijene, zajedno s uvjetima

plaćanja. Razlikuju se dvije vrste poziva na nadmetanje, "poziv na nadmetanje o cijeni radova" i "poziv na nadmetanje za umjetničko ili tehničko rješenje".

Poziv na nadmetanje o cijeni radova upućen određenom ili neodređenom broju osoba na nadmetanje za izvršenje određenih radova, pod određenim uvjetima i uz određena jamstva, obvezuje pozivatelja da sklopi ugovor o tim radovima s onim koji ponudi najnižu cijenu, osim ako je tu obvezu isključio u pozivu na nadmetanje. U slučaju isključenja obveze da se sklopi ugovor, poziv na nadmetanje smatra se pozivom zainteresiranima da dostave ponude ugovora pod objavljenim uvjetima.

Poziv na nadmetanje za umjetničko ili tehničko rješenje je upućen određenom ili neodređenom broju osoba na nadmetanje za umjetničko ili tehničko rješenje namjeravanih radova, a obvezuje pozivatelja da pod uvjetima sadržanim u pozivu na nadmetanje sklopi ugovor sa sudionikom u nadmetanju čije rješenje prihvati povjerenstvo sastav kojega je unaprijed objavljen, osim ako je tu obvezu isključio u pozivu na nadmetanje.

Najčešće ponuđač traži tzv. "avans", tj. da mu se unaprijed isplati dio novca čime ovaj pokriva početne troškove proizvodnje. Ponuđač može tražiti i tzv. "isplatu po situacijama", naročito ako se objekti dulje grade (vremenski). Tada se nakon određenog vremena utvrđuje koliki je dio posla obavljen pa se prema tome vrši i isplata. Ponuđač mora imati potpuno definiran tehnički opis (na osnovu traženog).

Naručilac mora dati prilikom oglašavanja posla neki suvisli tehnički opis, tj. mora znati što hoće. Ovo posebno komplicira posao naručiocu jer je potrebno uzeti u obzir mnoge faktore, npr. oslanjanje na pouzdanog proizvođača, točna procjena kvantiteta (ne naručiti previše), problem razvijanja tehnologije (isplati li se kupovati skupe strojeve za malo posla), itd.

Ugovaranje je regulirano "Zakonom o obveznim odnosima". Pregovori koji prethode sklapanju ugovora ne obvezuju. Predugovor je ugovor kojim se preuzima obveza da se kasnije sklopi drugi, glavni ugovor.

*Ugovor* je osnovni oblik forme zaključivanja posla. Potpisivanjem ugovora preuzima se odgovornost za potpisano.

Svaki ugovor sadrži:

1. Ugovorne stranke.  
Ovlašteni predstavnici (najčešće direktor).
2. Objekt ugovora (samo osnovne dimenzije).
3. Tehnički opis (obično dodatak ugovoru, zove se i "aneks" ili "tender"), sadrži detalje i detaljne opise.
4. Rokove izrade (u pravilu od dana potpisivanja ugovora).  
Ukoliko je program obiman, predlažu se situacije ili faze.
5. Uvjeti plaćanja u što spada:
  - Avans (plaćanje unaprijed) se omogućava nabava materijalu iznosu od 10% do 60% ugovorene cijene.
  - Plaćanje po situacijama (fazama)
  - Plaćanje 5% do 10% ugovorene cijene nakon primopredaje objekata, obično u roku od 15 dana. Primopredaja se vrši zapisnikom (kontrola).
  - Kredit kojeg banka može dati ili naručiocu ili ponuđaču. Za slučaj da naručilac ostane bez novaca, naručilac dalje plaća mjenicama kojima se obvezuje da će novac vratiti banci, a koji je ponuđač podizao na osnovu iste.
  - Potrebno je utvrditi udio kooperanata.
  - Osiguravanje kvalitete (prilikom primopredaje, ako utvrdi grešku, naručilac ne preuzima objekt te se greška mora otkloniti)

- Cijena koja se formulira na osnovu troškova radne snage, energije i zarade a razliku se fiksna cijena i cijena sa kliznom skalom.
- Penali kojima se za svaki dan kršenja roka ponuđač kažnjava novcem u postocima i to nikada više od 2% do 5%.
- Utvrđuje se nadležni organ u slučaju spora, npr. Privredni sud.

Ponuđač mora imati uvjerenje o sposobnosti izvođenja zavarivačkih radova, što je normirano prema HRN-u, iako tu HRN nema snagu zakona. Ovakva ovlaštenja u Republici Hrvatskoj izdaje samo Zavod za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

### 1.10.1 Ugovor o djelu

Ugovorom o djelu izvođač se obvezuje obaviti određeni posao, kao što je izrada ili popravak neke stvari, izvršenje kakva fizičkog ili umnog rada i sl., a naručitelj se obvezuje platiti mu za to naknadu. Kod ugovora o djelu ugovaratelji moraju imati na umu osobitu vrijednost izvođačeva rada. Ugovor kojim se jedna strana obvezuje izraditi određenu pokretnu stvar od svog materijala smatra se kupoprodajom (u Zakonu sadržano pod "Ugovor o kupoprodaji"). Ali ugovor ostaje ugovor o djelu ako se naručitelj obvezao dati bitan dio materijala potreban za izradu stvari.

Obveze izvođača su:

- kad je ugovoreno da izvođač izradi stvar od svog materijala, a nije određena kakvoća, izvođač je dužan dati materijal najmanje srednje kakvoće te za kakvoću ugrađenog materijala odgovara
- nad obavljanjem posla naručilac ima pravo nadzora koji mu je izvođač dužan omogućiti
- izvođač je dužan naručitelju predati izrađenu ili popravljenu stvar
- izvođač je dužan upozoriti naručitelja na nedostatke materijala koji mu je naručitelj predao
- na inzistiranje naručitelja, dužan je ugraditi materijal s nedostatkom, osim ako bi time izvođač narušio svoj ugled, u kom slučaju ima pravo raskinuti ugovor
- izvođač je dužan upozoriti naručitelja na nedostatke u njegovu nalogu, u protivnom će snositi štetu za nedostatke
- izvođač je dužan izvršiti djelo kako je ugovoreno i po pravilima struke te u dogovorenom vremenu ili vremenu koje je razumno potrebno za takve poslove
- ukoliko se ne izvođač ne drži uvjeta ugovora i uopće da ne radi kako bi trebalo, izvođač je dužan u dogovorenom roku otkloniti nedostatke, u protivnom naručilac može raskinuti ugovor i tražiti odštetu za naknadu štete
- rok je bitan sastojak ugovora te ga se izvođač treba pridržavati, u protivnom naručilac ima pravo raskinuti ugovor i tražiti naknadu štete pa čak ako rok nema bitnog utjecaja na naručioca
- ako po naravi posla ili po ugovoru nije definirano, izvođač nije dužan posao obaviti osobno, no za propuste suradnika (kooperanta), izvođač odgovara kao da ih je napravio osobno
- za naplatu svojih tražbina prema izvođaču kooperanti se mogu obratiti neposredno naručitelju i zahtijevati od njega da im isplati te tražbine na teret iznosa koji u tom času duguje izvođaču
- nakon pregleda i primanja izvršenog djela izvođač više ne odgovara za nedostatke koji su se mogli opaziti uobičajenim pregledom, osim ako je znao za njih, a nije ih pokazao naručitelju



- naručitelj koji je uredno obavijestio izvođača o nedostacima može zahtijevati otklanjanje nedostatka u određenom roku te ima pravo na naknadu štete
- kad je izvođač dao materijal, a stvar bude oštećena ili propadne prije predaje naručitelju, rizik snosi izvođač, te nema pravo na naknadu za dani materijal i svoj rad
- ako je naručitelj pregledao obavljeno djelo i odobrio ga, smatra se da mu je stvar predana, a da je kod izvođača ostala na čuvanju

Ako se postoje skriveni nedostaci koji se nije mogao otkriti uobičajenim pregledom, naručitelj se ipak može pozvati na njega pod uvjetom da u roku od mjesec dana o nedostatku obavijesti izvođača.

Radi osiguranja naplate naknade za rad i naknade za utrošeni materijal te ostalih tražbina po osnovi ugovora o djelu, izvođač ima pravo zadržavanja na stvarima što ih je napravio ili popravio te na ostalim predmetima koje mu je predao naručitelj u vezi s njegovim radom.

Sve dok naručeno djelo nije dovršeno naručitelj može raskinuti ugovor kad god hoće, ali je u tom slučaju dužan isplatiti izvođaču ugovorenu naknadu, umanjenu za iznos troškova koje ovaj nije imao, a koje bi inače imao da ugovor nije raskinut, a i za iznos zarade što ju je ostvario na drugoj strani ili što ju je namjerno propustio ostvariti.

Obveze naručitelja su:

- naručitelj je dužan pregledati izvršeno djelo čim je to po redovitom tijeku stvari moguće i o nađenim nedostacima bez odgađanja obavijestiti izvođača, u suprotnom se djelo smatra primljenim
- naručitelj je dužan primiti djelo obavljeno prema odredbama ugovora i pravilima struke
- ako postoji skriven nedostatak koji se nije mogao otkriti uobičajenim pregledom, naručitelj se može pozvati na njega pod uvjetom da u roku od mjesec dana o nedostatku obavijesti izvođača
- naknada se određuje ugovorom, ako nije određena obvezatnom tarifom ili kojim drugim obvezatnim aktom, u protivnom je utvrđuje sud prema vrijednosti djela
- ako je naručitelj pao u zakašnjenje zbog neprimanja ponuđene stvari, rizik slučajne propasti ili oštećenja stvari prelazi na naručitelja
- rizik slučajne propasti ili oštećenja stvari snosi naručitelj ako je on dao materijal za njezinu izradu

Istekom dviju godina od primitka obavljenog posla, naručitelj se više ne može pozvati na nedostatke.

### **1.10.2 Ugovor o građenju**

Prema "Zakonu o gradnji" *građevina* jest sve što je nastalo građenjem i povezano je s tlom, a sastoji se od građevnog sklopa ili građevnog sklopa i ugrađenog postrojenja odnosno opreme koji zajedno čine tehničko-tehnološku cjelinu, kao i samostalna postrojenja povezana s tlom, te objekti povezani s tlom koji nisu nastali građenjem, ako se njime mijenja način korištenja prostora".

Iz ovog proizlazi da je većina metalnih konstrukcija građevna, te kako takva spada pod "Zakon o gradnji" i "Zakon o prostornom uređenju".

Ugovorom o građenju izvođač se obvezuje prema određenom projektu izgraditi u ugovorenom roku određenu građevinu, odnosno na postojećoj građevini izvesti druge građevinske radove, a naručitelj se obvezuje isplatiti mu za to određenu cijenu.

Izvođač je dužan omogućiti naručitelju stalan nadzor. Za svako odstupanje od projekta, odnosno ugovorenih radova izvođač mora imati pismenu suglasnost naručitelja, odnosno naručiteljevog nadzora. Svako potraživanje povećanja ugovorene cijene, bez ovakve suglasnosti, ništavno je. Bez suglasnosti izvođač može izvesti nužne radove poput osiguranja stabilnosti građevine, sprječavanja opasnosti za život i okolinu te veće materijalne štete, a za ovakve radove može tražiti naknadu. O svim nužnim radovima izvođač je dužan obavijestiti naručitelja.

Cijena radova može se ugovoriti kao *jedinična cijena* (po jedinici mjere ugovorenih radova) ili kao *ukupna ugovorena cijena*. Ukoliko se tijekom izvođenja radova ugovorena cijena radova povećala više od 2%, a da pritom nije narušen ugovor i rokovi, izvođač može tražiti povećanje ugovorene cijene. Isto vrijedi i obrnuto ukoliko se cijena radova smanjila za više od 2%, naručilac može tražiti smanjenje ugovorene cijene. Ukoliko rokovi nisu ispoštovani, izvođač može tražiti povećanje ugovorene cijene, ukoliko se cijena radova povećala više od 5%, ali samo za dio radova koji su izvedeni u dogovorenom roku. Za slučaj da u ugovoru postoji odredba o *nepromjenljivosti cijene*, izvođač također može tražiti povećanje cijene ukoliko se cijena radova povećala više od 10%.

Ako ugovor o građenju sadrži odredbu "*ključ u ruke*", izvođač se samostalno obvezuje izvesti sve radove potrebne za izgradnju i uporabu građevine, pri čemu ugovorena cijena obuhvaća i vrijednost svih nepredviđenih radova i viškova radova. Ukoliko više izvođača izvode radove, njihova odgovornost prema naručitelju je solidarna. Ako nije drukčije određeno, na odgovornost za nedostatke građevine primjenjuju se odgovarajuće odredbe ugovora o djelu.

Izvođač odgovara za nedostatke građevine i zemljišta koji se tiču ispunjavanja zakonom određenih bitnih zahtjeva u roku od deset godina od predaje radova. Isto vrijedi i za projektanta ako nedostaci potječu od nedostataka u projektu, odnosno nadzora za nedostatke u provođenju nadzora.

Izvođač se ne oslobađa odgovornosti ako je pri izvođenju određenih radova postupao po zahtjevima naručitelja.

## 1.11 Gradilište

Kako većina metalnih konstrukcija spada pod "građevine", tako i mjesto izvođenja radova, gradilište, spada pod Zakon o gradnji.

Investitor je dužan građevinskoj inspekciji i inspekciji rada u roku od osam dana prije početka građenja prijaviti gradilište. Isto vrijedi i za prekid radova duži od tri mjeseca, te za ponovno nastavljanje radova.

Izvođač na gradilištu treba imati slijedeće dokumente:

- rješenje o upisu u sudski registar, odnosno obrtnicu
- akt o imenovanju glavnog inženjera gradilišta, inženjera gradilišta odnosno voditelja radova
- akt o imenovanju nadzornog inženjera, odnosno glavnoga nadzornog inženjera
- građevinsku dozvolu s glavnim projektom, odnosno glavni projekt s potvrdom tijela graditeljstva
- izvedbene projekte ovjerene od revidenta

- građevni dnevnik
- dokaze o sukladnosti (ateste) za ugrađene građevne proizvode i opremu

Uz navedene, mogu biti traženi još neki dokazi i dokumenti.

*Građevni dnevnik*, čiji je izgled i sadržaj reguliran "Pravilnikom o uvjetima i načinu vođenja građevnog dnevnika", je dokument o tijeku gradnje kojim se dokazuje usklađenost uvjeta i načina gradnje odnosno izvođenja pojedinih radova s pretpostavkama i zahtjevima iz glavnog projekta, izvedbenog projekta, propisa i normi.

Građevni dnevnik se vodi od prvog dana početka pripremnih radova pa do primopredaje radova (popraćena pisanim dokumentom o primopredaji). Kod većih radova gdje sudjeluje više izvođača, izvođač može voditi zasebni dnevnik kao dio glavnog dnevnika. Građevni dnevnik svakodnevno vodi odgovorna osoba koja vodi gradnju (glavni inženjer gradilišta, inženjer gradilišta, voditelj gradilišta), a svakodnevno ga također supotpisuje i nadzorni inženjer uz uvođenje svojih zabilješki. Kako odgovorna osoba ne može uvijek osigurati da je prisutna na gradilištu, građevni dnevnik može voditi i osoba koju upisom u dnevnik odredi odgovorna osoba.

Sam izgled građevnog dnevnika propisan je zakonom, a dnevnik se može kupiti u Narodnim novinama. Građevni dnevnik se vodi u "paricama" (ima dvostruko numerirane stranice) te jedan primjerak zadržava za sebe nadzor, a drugi izvođač. Podaci koje osoba koja vodi dnevnik upisuje su: podaci o dospijeću i količini materijala i opreme skupa s dokazima o uporabljivosti (atestima), vremenski uvjeti, poduzete i predložene mjere za usklađivanje radova, obavljeni pregledi i ispitivanja. Nadzorni inženjer upisuje: usklađenost izvedenih radova s projektom i tehničkim propisima, određuje način otklanjanja neusklađenosti i nedostataka, zabranjuje odnosno odobrava daljnje radove. Uz svakodnevne upise odgovorne osobe od strane izvođača i investitora, u dnevnik revident i projektant upisuju podatke o obavljenim pregledima radova. Odgovorna osoba i nadzor svakodnevno potpisuju stranice dnevnika, a nadzor svakodnevno uzima i pohranjuje svoj primjerak lista dnevnika. Dnevnik se uvezuje na način da nije moguća kasnija zamjena stranica.

*Gradilište* je prostor na kojem se provode radovi duže od 5 dana. Gradilište je potrebno ograditi, kao bi se onemogućio ulaz nezaposlenima ili ugrožavanje prolaznika te na propisan način označiti (tabla s podacima o investitoru, projektantu, izvođaču, nadzoru, vrstu građevine, građevinskoj dozvoli, itd.).

Na gradilištu je potrebno provoditi mjere zaštite na radu (Zakon o zaštiti na radu) i zaštite od požara (Zakon o zaštiti od požara) te je potrebno provesti uređenje gradilišta te temelju plana o uređenju gradilišta (regulirano Pravilnikom o sadržaju plana uređenja privremenih i zajedničkih privremenih radilišta).

Plan uređenja gradilišta je sadržava shemu i opis gradilišta, način obilježavanja opasnih zona, mjesta rada s povećanom opasnošću, energetske instalacije, projekte skela, način pružanja prve pomoći i sl.

## 1.12 Automatizacija procesa rezanja i zavarivanja

Naša se tehnologija bazira na uvelike zastarjelim procesima. To npr. pokazuje činjenica da 80% proizvodnje otpada na REL (ručno elektrolučno zavarivanje), a 20% na EPP, MIG/MAG, TIG. REL zavarivanje je korisno pri pokretnim i vanjskim radovima, ali je primitivnije od drugih

automatskih i poluautomatskih postupaka (EPP, MIG/MAG, TIG). Na automatske postupke otpada jedva 5% proizvodnje.

Bez obzira na ove činjenice, javlja se problem radne snage, odnosno nestašica iste, a zbog štetnog djelovanja procesa (toplinsko odnosno infra-crveno i ultra-ljubičasto zračenje).

Rezanje komada kod nas se još uvijek u 90% slučajeva obavlja plinski, ostatak otpada većinom na plazma postupke. Kako se za metalne konstrukcije kod nas uglavnom koriste niskolegirani i ugljični čelici, a vrlo rijetko je riječ o obojenim metalima, ovih 10% u potpunosti zadovoljavaju potrebe. Automatizacija rezanja je danas na vrlo visokom numerički upravljanom nivou (CNC). Tu se radi o numerički upravljanim strojevima čiji su kapaciteti veći od potrebe proizvodnje te se zamjećuje nedovoljna iskorištenost ovih postupaka rezanja. CAD/CAM automatizacijom, odnosno numerički optimiranim načinom izrezivanja, količina otpada svodi se na minimum.

Kao bi se posao obavio valjano, prvenstveno je potrebno proučiti tehnički opis predmeta koji uključuje:

- oblik
- materijal
- tehničke propise ili zakone

Tehnički propisi ili zakoni služe za zaštitu korisnika od eventualne nesavijesti proizvođača. U Republici Hrvatskoj vrijede HRN-propisi, koji uglavnom definiraju poluproizvode (vijke, profile i sl.). Zakoni i propisi izlaze i mijenjaju se, a oglašavaju se službenim listovima. Uz ove, postoje i neki propisi kojima je domena razna ograničenja poput Hrvatskog registra brodova, propisi za željezničke transporte, itd. Općenito se u propisima (domaćim i stranim) velika pažnja posvećuje materijalima i procesima zavarivanja.

Neki važniji propisi u brodogradnji su: LR, DNV, BV, ABS, registar SSSR-a, GL,..

Ostali važniji propisi: API, ASME, ASTM,...

Od stručnjaka (inženjera) se zahtijeva dobro poznavanje engleskog jezika kako bi on bio u stanju pratiti novosti u zakonima i propisima.

## Literatura

B. Androić, D. Dumović, I. Džeba, *Metalne konstrukcije I*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 1994.

A. Vukov, *Uvod u metalne konstrukcije*, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Splitu, Split 1998.

*Zakon o obveznim odnosima*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/2005/0707.htm>, Narodne novine, **35**, 2005.

*Zakon o gradnji*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/2003/2552.htm>, Narodne novine, **175**, 2003.

*Zakon o prostornom uređenju*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/1994/0520.htm>, Narodne novine, **30**, 1994.

*Pravilnik o uvjetima i načinu vođenja građevnog dnevnika*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/2000/0068.htm>, Narodne novine, **6**, 2000.

*Pravilnik o sadržaju plana uređenja privremenih i zajedničkih privremenih radilišta*, Narodne novine, **45**, 1984.

*Zakon o zaštiti od požara*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/1993/1161.htm>, Narodne novine, **58**, 1993.

*Zakon o zaštiti na radu*, <http://www.nn.hr/clanci/sluzbeno/1996/1183.htm>, Narodne novine, **59**, 1996.



## 2. Materijali za metalne konstrukcije

Osnovni cilj pri odabiru materijala za metalne konstrukcije je da materijal bude čim jeftiniji, a da pri tom zadovolji tražena mehanička svojstva. Tako se kao materijali za metalne konstrukcije uglavnom koriste čelici (obični konstrukcijski, ugljični, legirani), aluminij (čisti aluminij i aluminijske slitine) i dr.

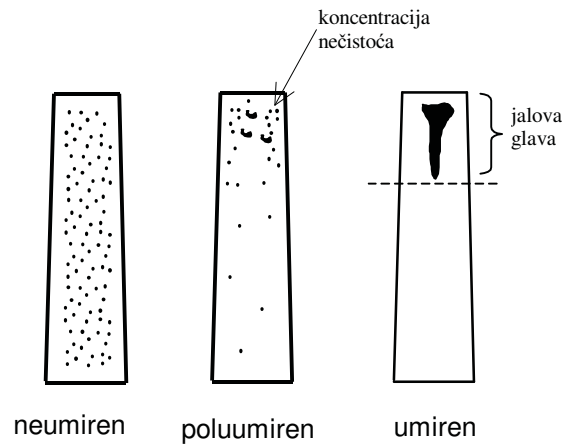
### 2.1 Čelici

Ukoliko je ugljik jedina primjesa, čelici su *ugljični čelici*. Ugljični čelici s manje od 0,9% ugljika se koriste kao *konstrukcijski čelici*, a povećanjem udjela ugljika povećava se čvrstoća i tvrdoća te smanjuje žilavost. Za *kaljenje* se koriste čelici s 0,3% ugljika, a povećavanjem udjela ugljika raste zakaljivost.

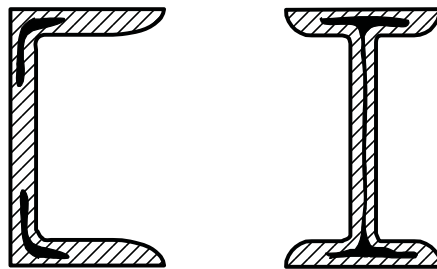
#### 2.1.1 Obični konstrukcijski čelici

Obični konstrukcijski čelici, koji se najčešće koriste za metalne konstrukcije, sadrže do 0,25% C (iznimno 0,3%), a preko ovog postotka ugljika raste samozakaljivost te se takvi čelici izbjegavaju. Obični konstrukcijski čelici nisu dodatno termički obrađeni osim normalizacije i žarenja radi popuštanja zaostalih naprezanja. Ovi čelici redovito sadrže nečistoće poput sumpora, fosfora i dušika. Sumpor i fosfor ne mogu se u potpunosti odstraniti. Udio fosfora od preko 0,045% čini čelik krutom pri niskim temperaturama (tzv. krti lom). Udio sumpora preko 0,055% čini čelik krutom na povišenim temperaturama (tzv. vrući lom) te smanjuje sposobnost zavarivanja. Dušik, ukoliko se u čeliku javlja kao nevezan, povećava mogućnost krtog loma i sklonost starenju (snižava se žilavost). Ukoliko je pak dušik u čeliku kemijski vezan u obliku nitrata, onda dušik djeluje povoljno, no problem je taj što se kemijskom analizom ne može utvrditi u kojem je dušik stanju, vezanom ili nevezanom. Čelik s niskim postotkom ugljika sadržava nakon pročišćavanja previše kisika koji povećava opasnost od tzv. crvenog loma te se čelik mora dezoksidirati te se pri kraju procesa pročišćavanja dodaje feromangan, po čemu se čelik lijeva u blokove kokilno lijeva ili pak dobiva kako kontinuirani bezdani ljev. Pri lijevanju u kokile, kako bi se spriječilo da čelik "kipi", tzv. *neumireni* čelik, dodaju se dezoksidacijska sredstva, silicij i aluminij, koji na sebe vezuju plinove stvarajući šljaku te se omogućava polagano hlađenje. Takav čelik naziva se *umireni* čelik kod kojeg, šljaka kao specifično lakša, ispliva (sl. 2.1.1) te se dio bloka sa povećanom koncentracijom šljake odstrani (tzv. jalova glava). Time se spriječilo formiranje plinovitih mjehurića u čeliku, oko kojih se mogu koncentrirati nečistoće (npr. sumpor) što za posljedicu ima štetni utjecaj pri valjanju čelika. Umireni čelik namijenjen je za zavarene konstrukcije i konstrukcije kod kojih se traži veća žilavost čelika, npr. elementi izloženi dinamičkim vibracijama ili niskim temperaturama. *Poluumireni* čelik je čelik koji nije u potpunosti dezoksidirao (sl. 2.1.1) te se takav čelik koristi

za nosive elemente konstrukcija. U ostalim slučajevima ako se elementi ne zavaruju, može se upotrijebiti i neumireni čelik. Sadržaj i raspored ovih primjesa ovisi o načinu dobivanja i postupku koji se primjenjuje. Tako npr. Thomesov postupak (taljenje čelika s velikim postotkom fosfora u pećima s dolomitnom oblogom) daje nizak postotak primjesa, no loš raspored te se u sredini presjeka javlja neumirena zona (sl. 2.1.2).



Slika 2.1.1 Stanje čelika pri lijevanju u kokile



Slika 2.1.2 Neumirena zona u presjeku

Mehanička svojstva čelika koja se garantiraju, moraju se i provjeravati. U tablici 2.1.1 dana su svojstva čelika. Čelici koji su najčešće primjenjuju za metalne konstrukcije, a spadaju u skupinu standardnih konstrukcijskih (građevinskih) čelika su prema EUROCODE 3 dani tablicom 2.1.2, dok su konstante za konstrukcijski čelik dane tablicom 2.1.3. Općenito se za čelike standardne kvalitete zahtijeva dovoljno velika "rezerva" plastičnosti, odnosno  $\sigma_m \geq 1,2 \cdot \sigma_v$ .

OZNAKA VRSTE ČELIKA			dezoksidacija (umirenost)	vlačna čvrstoća $\sigma_m$ [MPa]	granica razvlačenja $\sigma_v$ [MPa]	izduženje %	žilavost - ISO	
EURO- CODE3 ISO	HRN C.BO500	tehn. oznaka					Nm/mm <sup>2</sup>	pri 0°C
	Č.000	/	/	340-420	200	28	35	+20
	Č.0270	/	neumiren				35	+20
	Č.0261	/	umiren				35	+20
	Č.0271	/	neumiren				35	+20
Fe360B	Č.0370	ČN.24- A <sub>2</sub>	neumiren	370-450	230	25	35	+20
Fe360B	Č.0361	ČN.24- B <sub>1</sub>	umiren				35	+20
Fe360B	Č.0371	ČN.24- B <sub>2</sub>	neumiren				35	+20
Fe360C	Č.0362	ČN.24- C	spec. umiren				35	0
Fe300D	Č.0363	ČN.24- D	spec. umiren				35	-20
	Č.0460	ČN.26- A <sub>1</sub>	neumiren	420-540	270	22	35	+20
	Č.0461	ČN.26- B <sub>1</sub>	umiren				35	+20

Tablica 2.1.1 Mehanička svojstva čelika

EURO- CODE 3 ISO	HRN C.BO500	Debljina stjenke elementa t [mm]			
		t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 100 mm	
		$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_v$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Fe 360	Č.0361	235	360	215	340
Fe 430	Č.0451	275	430	255	410
Fe 510	Č.0551	355	510	335	490

Tablica 2.1.2 Mehanička svojstva konstrukcijski čelika prema EUROCODE 3

Modul elastičnosti	$E=210\ 000\ \text{N/mm}^2$
Modul smicanja	$G=81\ 000\ \text{N/mm}^2$
Poissonov koeficijent	$\nu = 0,3$
Koef. temp. produljenja	$\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\ 1/\text{K}$
Gustoća	$\rho = 7850\ \text{kg/m}^3$

Tablica 2.1.3 Materijalne konstante konstrukcijskih čelika

Prema preporuci MIZ-a (Međunarodni institut za zavarivanje), ovi se čelici dijele u skupine osjetljivosti prema krtom lomu. Skupine se označavaju slovima A, B, C, D i E uz postojanje podgrupa ovih skupina.

Preporuke za izbor pojedinog čelika za ove skupine su:

- skupina 0 (bez oznake) - za dijelove izložene slabom statičkom opterećenju.
- skupina A - za tanje, statički opterećene metalne konstrukcije koje nisu izložene velikim temperaturnim razlikama i temperaturama nižim od -10°C.
- skupina B - za odgovorne konstrukcije gdje ne postoji opasnost od krtog loma, a u slučaju manje odgovornih konstrukcija za sva opterećenja.
- skupina C - za odgovorne komplicirane konstrukcije izložene statičkim ili dinamičkim opterećenjima, ali ne i niskim temperaturama. Zbog oblika može biti i zaostalih naprezanja, koncentracije naprezanja i s tim u vezi opasnosti od krtog loma.
- skupina D - za odgovorne zavarene konstrukcije koje moraju biti sigurne od krtog loma, npr. konstrukcije s debelim i uklještenim dijelovima, dijelova s diskontinuitetima,



konstrukcije s jako izraženim prethodnim hladnim deformacijama (iznad 5%), sve konstrukcije izložene niskim temperaturama (do  $-30^{\circ}\text{C}$ ), dinamički opterećene konstrukcije s velikim stupnjem iskorištenja dopuštenog naprezanja, za dijelove čiji bi lom doveo u pitanje sigurnost i funkciju cijelog objekta.

- skupina E - za razne odgovorne oblike i druge elemente u strojarstvo kao osovine, vratila, klipove, zupčanike i sl.

Dodavanjem mangana čeliku, od 1,2 do 1,8%, povećava se čvrstoća ( $\sigma_m > 450 \text{ N/mm}^2$ ), pri čemu žilavost i zavarljivost ostaje ista. Ovi čelici nazivaju se manganski čelici.

### 2.1.2 Legirani čelici

Tendencija je, kako u svijetu, tako i kod nas, daljnje povećanje granice razvlačenja, no to ne ide samo sa ugljikom niskog postotka i manganom, već se koriste niskolegirani čelici s dodatkom legiranih elemenata koji utječu na poboljšanje mehaničkih svojstava.

Tu se razlikuju tri osnovne grupe čelika:

1. Feritno-perlitni čelici s dodacima Mn, Ni, Cu, Si.
2. Niskolegirani čelici s dodacima Mn, Cr, Mo, V. Ovi elementi s ugljikom stvaraju sitno raspršene karbide.
3. U treću skupinu visokolegiranih čelika spadaju čelici kod kojih se kao legirni elementi koriste Nb, V, ili Ti (0,06%) pri čemu se udio ugljika smanjuje na ispod 0,1%. Razlog ovakvog legiranja je u tome što udio ugljika bitno utječe na povećanje mehaničkih svojstava i usitnjenost zrna, dok smanjuje granicu razvlačenja i temperaturu prelaska u područje izražene krtosti (krti lom) te se ovim legirnim elementima bitno poboljšava otpornost prema krtom lomu.

Kod legiranih čelika, DIN razlikuje dvije skupine sitnozrnatih zavarljivih čelika:

- St E 47 (ČN 47) – normaliziran, gdje su legirni elementi:
  - Ni-V
  - Cu-Ni-V
  - Ni-Ti
- St E 70 (ČN 70) – poboljšan, gdje su legirni elementi:
  - Ni-Cr-Mo-B
  - Cr-Mo-Zr

Za ove dvije skupine izdane su smjernice za upotrebu, uvjeti proizvodnje, osnove za proračun te upute za proizvodnju i zavarivanje. Ovi visokočvrsti čelici se dijele u tri skupine, što ovisi o postupku koji je proveden (normalizacija, poboljšanje), tablica 2.1.4. Visokočvrsti se čelici najčešće upotrebljavaju kod spremnika i posuda pod tlakom, cjevovoda, platformi, prenosila i dizala te u mostogradnji.

Prednosti visokočvrstih čelika su:

- manje debljine stijenki nego li to bio slučaj kod izvedbe s običnim konstrukcijski čelikom, što ima za posljedicu manju težinu konstrukcije, manju cijenu koštanja, niži troškovi prijevoza
- veća opterećenja koje konstrukcija može podnijeti
- veća otpornost habanju

- dobra zavarljivost i sigurnost od krtog loma

### 2.1.3 Izbor čelika za metalne konstrukcije

Općenito se može reći da pri izboru materijala za zavarivanje na izbor utječe:

- postojanje zaostalih naprezanja od zavarivanja te zbog krutosti konstrukcije
- postojanje grešaka koje izazivaju koncentraciju naprezanja

Ove činjenice zahtijevaju ozbiljan pristup odabiru materijala, pri čemu najveću opasnost predstavlja krti lom koji se javlja kada materijal izgubi moć lokalne plastifikacije pa se ne može suprotstaviti širenju pukotine. Stoga je najvažniji kriterij klasifikacije čelika otpornost na krti lom.

Kako je proizvodnja čelika napredovala, konstruktor danas ima na raspolaganju više vrsta te mogućnosti izbora ekonomski najpovoljnijeg, a kvalitetom dovoljno dobrog čelika.

Također postoje klasifikacije konstrukcija i dijelova konstrukcija s obzirom na opasnost koju bi predstavljao lom i rušenje konstrukcije. Ovo govori u prilog tome da ne mora cijela konstrukcija biti napravljena od kvalitetnog i skupog materijala, već se manje odgovorni dijelovi mogu napraviti iz jeftinijeg materijala.

Prema DIN-u izbor materijala vrši se tako da se u obzir uzimaju slijedeći faktori:

- stanje naprezanja
- vrsta naprezanja
- vrsta zavara
- način izrade
- opasnost od loma
- debljina dijelova
- radna temperatura

Pri tom svaki od prethodno navedenih parametara ima određeni broj bodova, koji se zbrajaju i sa sumom se ulazi u standard te odabire prikladni čelik pri čemu treba imati na umu i cijenu koštanja odabranog čelika. Slične preporuke usvojio je i JUS 1988 (JUS U.E7.010/1988), koji je dalje preuzet u HRN-u te se prema tim preporukama odabir vrši na način da:

- Za nezavarene konstrukcije mjerodavna je vlačna čvrstoća  $\sigma_m$  i granica razvlačenja  $\sigma_v$  te produljenje.
- Za zavarene konstrukcije kao kriterij uzima se opasnost od loma izražena faktorom opasnosti o krtog loma  $L = K \cdot Z \cdot N$ , gdje faktor  $K$  uzima u obzir konstrukcijsko oblikovanje, faktor  $Z$  značenje dijela konstrukcije, a  $N$  faktor naprezanja. Uz to, u obzir se uzima i radna temperatura  $T$  za područja  $-25^{\circ}\text{C} \leq T \leq -10^{\circ}\text{C}$  i  $T > -10^{\circ}\text{C}$ .

Prema EUROCODE 3, kod računanja opasnosti na krti lom, pri zadanoj ili traženoj minimalnoj temperaturi eksploatacije, uzima se u obzir:

- čvrstoća materijala
- debljina dijela (stjenke)  $t$
- uvjeti eksploatacije (kategorije naprezanja S1, S2, S3, ovise o granici tečenja)
- karakter opterećenja (prirast opterećenja R1-statičko, R2-dinamičko)
- posljedice otkazivanja (kategorije C1-bez većih posljedica, C2-velike posljedice)

Princip proračuna se svodi, ili na određivanje minimalne temperature eksploatacije  $T_{min}$ , ili obzirom na zadanu minimalnu temperaturu eksploatacije, određivanje najveće dopuštene debljine stjenke. Računanje minimalne dozvoljene temperature za eksploatacije provodi se prema izrazu

$$T_{min} = 1,4 \cdot T_{CV} + 25 + 100(\ln K_{IC} - 8,06) + (83 - 0,08 \cdot R_{el}) \cdot \varepsilon^{0,17}, \quad (2.1)$$

gdje je  $\varepsilon$  prirast opterećenja (za R1 iznosi  $\varepsilon = 0,001$ , a za R2  $\varepsilon = 1,0$ ),  $T_{CV}$  temperatura ispitivanja žilavosti (ispituje se kod  $+20^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$ ), a  $K_{IC}$  žilavost loma.

Napomenimo da se žilavost ispituje Charpyevim batom i nužno je postići energiju od 17 J kod temperatura  $+20^\circ\text{C}$  (kvalitetna grupa čelika B, npr. Fe E 235 B),  $0^\circ\text{C}$  (grupa C, npr. Fe E 235 C),  $-20^\circ\text{C}$  (grupa D, npr. Fe E 235 D) i kod  $-30^\circ\text{C}$  (grupa DD, npr. Fe E 355 DD).

Žilavost loma računa se iz izraza

$$K_{IC} = \frac{(\gamma \cdot a)^{0,55} \cdot R_{el} \cdot t^{0,5}}{1,226}. \quad (2.2)$$

U prethodnom izrazu  $R_{el}$  predstavlja faktor redukcije granice tečenja, ovisi o debljini elementa  $t$  [mm] i kreće se od  $R_{el} = 0 \text{ N/mm}^2$  do  $R_{el} = 60 \text{ N/mm}^2$  za debljine od  $t = 0 \text{ mm}$  do  $t = 200 \text{ mm}$ . Za faktor posljedice otkazivanja  $\gamma$  uvrštava se  $\gamma = 1$  kod kategorije C1 i  $\gamma = 1,5$  kod kategorije C2. Faktor  $a$  računa se kao  $a = 2/\ln t$  za kategoriju napona S1,  $a = 3,8/\ln t$  za kategoriju napona S2 te za  $a = 6/\ln t$  kategoriju napona S3.

## 2.2 Aluminij i aluminijeve slitine

Aluminij je najrašireniji metal u Zemljinoj kori (8,13%). Do izdvajanja čistog aluminija došlo je tek početkom devetnaestog stoljeća elektrolizom glinice iz boksita. Industrijska proizvodnja aluminija datira od 1886. godine, Cherks Marint Hall (USA).

Čisti aluminij uglavnom se koristi u kemijskoj i prehrambenoj industriji, u elektronici te za opću namjenu (aluminijske folije i sl.). Čisti aluminij ima nisku čvrstoću ( $50\text{--}60 \text{ N/mm}^2$ ), nisko talište ( $658^\circ\text{C}$ ) te izduženje od 50%. Legiranjem bitno mu se poboljšavaju mehanička svojstva te se isključivo kao legiran koristi za metalne konstrukcije.

Legiranjem aluminija postižu se slijedeća svojstva:

- Mangan (Mn) povećava čvrstoću i otpornost na koroziju.
- Magnezij (Mg) povećava čvrstoću, otpornost na koroziju, zavarljivost i tvrdoću.
- Silicij (Si) povećava otpornost na koroziju te snižava talište.
- Bakar (Cu) povećava čvrstoću, tvrdoću i obradivost.
- Cink (Zn) povećava čvrstoću i tvrdoću.

Legure aluminija sa silicijem, "Al Si" povoljne su za lijevanje, otporne na koroziju, mogu se zavarivati i postižu srednju čvrstoću.

Legure "Al Si Mg", zbog 0,5% magnezija koji djeluje otvrdnjavajuće, imaju znatno veću tvrdoću.

Legure "Al Si Cu" su povoljne za tlačni ljev.

Legure "Al Zn 4 Mg 2" su nehrđajuće legure osobina sličnih čeliku te se koriste za noseće konstrukcije.

Kod nosećih metalnih konstrukcija najčešće se koriste slijedeće slitine:

- legure s magnezijem (3-5%):

- Al Mg 3
- Al Mg 4
- Al Mg 5
- legure s magnezijem i manganom:
  - Al Mg 2,5 Mn
  - Al Mg 4,5 Mn
- legure sa silicijem i magnezijem:
  - Al Mg Si 0,5
  - Al Mg Si 1
- legure s magnezijem i cinkom:
  - Al Zn 4 Mg 1
  - Al Zn 4 Mg 3

Osnovne prednosti metalnih konstrukcija iz aluminija su:

- znatna ušteda u težini bez smanjenja nosivosti (tzv. "lake metalne konstrukcije).
- neznatni troškovi održavanja.
- potpuna reciklaža aluminija nakon upotrebe što uvjetuje 30-40% niže cijene sekundarnog (recikliranog) aluminija od primarnog aluminija dobivenog iz boksita.

Nedostaci metalnih konstrukcija iz aluminija su:

- visoka cijena konstrukcije
- velike deformacije u odnosu na čelične konstrukcije (približno tri puta)
- velike temperaturne dilatacije u odnosu na čelične konstrukcije (približno dva puta)

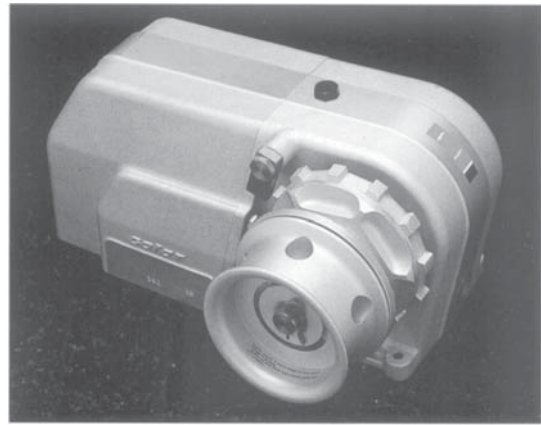
Ovdje je potrebno naglasiti posebnu važnost primjene aluminija u pomorskim konstrukcijama. Za korozijski otporne limove (slika 2.2.1) preporučuje se legura AlMgMn (AlMg4.5Mn, AlMg4Mn, AlMg2.7Mn), odnosno AlMg3 koji ima veću deformabilnost pa je povoljniji pri procesu valjanja od znatno čvršćeg AlMg4.5Mn. Za korozijski otporne profile (slika 2.2.2), dobivene uglavnom ekstrudiranjem, preporučuje se AlMgSi legura (AlMgSi0,7, AlMgSi0,5, AlMg1SiCu, AlMgSi1). Korozijski otporne proizvode dobivene lijevanjem (slika 2.2.3) preporučuj se AlMg legure (3% Mg i zanemarivo Ti, te 6% Mg uz dodatak Be).



Slika 2.2.1 Kočarica od Al legure, već xx godina u upotrebi bez ikakve površinske zaštite.

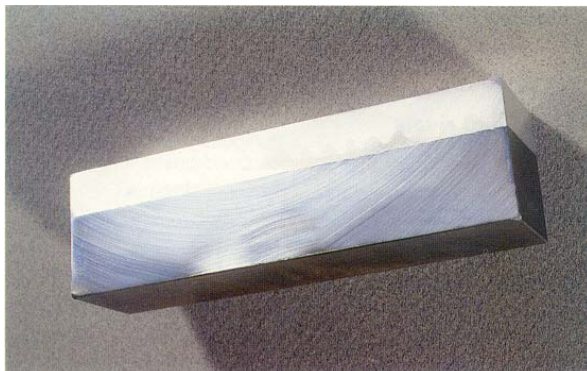


Slika 2.2.2 Prilaz plutajućem mulu



Slika 2.2.3 Vitlo izvedeno od lijevane Al legure

Sve se gore navedene legure mogu dobro međusobno zavarivati. Osim zavarivanja aluminij se povezuje zakovicama, lijepljenjem i uskočnim spojevima koji se lako daju projektirati u ekstrudiranim profilima. Aluminijske legure, osim što su dobro zavarljive, moguće ih je zavarivati s čelikom uz posredstvo traka koje su izrađene eksplozivnim spajanjem ("Nitro Metall") aluminija i čelika. Ova vrsta spojeva ima dobru korozivnu otpornost te otpornost na zamor materijala. Koristi se najčešće za spajanje aluminijskih nadgrađa na čeličnom trupu broda, čime se doprinosi stabilnosti broda.



Slika 2.2.4 Spajanje aluminija i čelika pomoću trake te aluminijsko nadgrađe na čeličnoj konstrukciji broda izvedeno ovakvim trakama

Iako navedene korozivno otporne legure nije potrebno posebno zaštićivati, često se koriste premazi iz estetskih razloga i antivegetativni premazi na uronjenim dijelovima. Tu se koriste razni premazi (boje) ili se površine podvrgavaju procesu eloksiranja, čime se doba tvrdi, korozivno otporan površinski sloj kojemu se mogu pridati različiti tonovi boja.

No često su kod pomorskih konstrukcija aluminijske legure u kontaktu s drugim metalima poput nehrđajućeg čelika, bronce i sl. gdje se javlja bimetalna korozija (elektrolitička korozija ili tzv.

"galvanska struja"). Tu aluminij, kao elektronegativniji, u prisustvu elektrolita (morska voda), predstavlja anodu te dolazi do nagrivanja aluminija do njegovog potpunog nestanka. U cilju sprječavanja ove korozije provodi se katodna zaštita (slika 2.2.5) gdje se koriste žrtvene anode iz cinka. Cink, kao elektronegativnije od čelika, bronce i samog aluminija, biva nagrizen i potrošen te ga je potrebno povremeno zamjenjivati.



Slika 2.2.5 Katodna zaštita

Kako se je na plovilima uvijek prisutan električni izvor, bilo kako istosmjerna, bilo kao izmjenična struja, potrebno je posebnu pažnju posvetiti na način spajanja elektroinstalacija kako aluminijaska konstrukcija trupa ne bi postala anodom. Tu postoje tri pravila kojih se treba pridržavati. Aluminijaski trup treba biti spojen kao uzemljenje, odnosno minus pol baterije, pri čemu treba obratiti pažnju da se za spoj koristi aluminijaski vodič (ne bakrena pletenica). Aluminijaski dijelovi i trup moraju biti električki spojeni sa svim ostalim metalnim dijelovima (npr motor, osovina, peraja propelera i sl.). Aluminijaski trup se ne smije koristiti kao povratna veza negativnog pola na bateriju (kao što je slučaj kod automobila).

Što se tiče otpornosti na požar, za aluminij se ponaša slično kao i čelik te vrijede ista pravila kao i za čelik.

Kod pomorskih konstrukcija ova pravila uključuju:

- da onemoguće prolaz dimu i prenošenje požara za maksimum 1 sat (ovisi o požarnoj klasifikaciji)
- da su izolirani s nezapaljivim izolacijskim materijalima

## Literatura

B. Androić, D. Dumović, I. Džeba, *Metalne konstrukcije I*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 1994.

A. Vukov, *Uvod u metalne konstrukcije*, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Splitu, Split 1998.

*Aluminium and the sea*, Pechiney Rhenalu, Francuska.



### 3. Opterećenje konstrukcija

Opterećenja su specifična za svaku vrstu objekta i potrebno je razlikovati:

- klasifikaciju po vremenu trajanja:
  - o stalno
  - o promjenjivo:
    - opterećenje koje se rijetko pojavljuje
    - opterećenje koje se učestalo pojavljuje
- klasifikaciju po načinu nastupa:
  - o mirno ili statičko opterećenje
  - o opterećenje s dinamičkim djelovanjem

U propisima se za svaku vrstu metalnih konstrukcija navode opterećenja obzirom na uzrok te se razlikuju:

- opterećenja od vlastite težine (uključujući težinu konstrukcije)
- opterećenja od korisnog opterećenja
- snijeg
- vjetar
- temperaturne promjene
- horizontalne sile (bočne sile ili sile kočenja kod vozila, centrifugalne sile)
- sile deformacija kao posljedice rada konstrukcije (trenje na osloncima, zakretanje oslonaca i sl.)
- sile od neplaniranog djelovanja (udara vozila u konstrukciju)
- sile od potresa
- sile nuklearnih eksplozija

#### 3.1 Opterećenja prema našim propisima (HRN)

Prema HRN-u postoje tri grupe opterećenja:

- osnovna opterećenja
- dopunska opterećenja
- izvanredna opterećenja

U svaku od ovih grupa spadaju slijedeća opterećenja;

A) *Osnovno opterećenje:*

1. stalni teret (vlastita težina konstrukcije)
2. korisno opterećenje uključujući centrifugalne sile
3. snijeg
4. sve sile stalnog karaktera



**B) Dopunsko opterećenje:**

1. vjetar
2. sile kočenja
3. bočni udarci
4. sile od temperaturnih razlika
5. ostale sile s privremenim djelovanjem u većim vremenskim razmacima

**C) Izvanredno opterećenje:**

1. djelovanje potresa
2. slučajni udari
3. planski nepredviđena opterećenja
4. ekstremno rijetke sile (npr. nuklearne eksplozije)

### 3.1.1 Stalni teret

Stalni teret sastoji se od težine konstrukcije uključujući težinu svih ovisnih i neovisnih elemenata konstrukcije. Pretpostavka vlastite težine treba biti unutar određenih tolerancija pa se tako za mostove i brodove tolerira greška od 3%. Stalni se teret određuje tako da se volumen konstrukcije pomnoži s gustoćom materijala [ $\text{kg/m}^3$ ].

### 3.1.2 Korisno opterećenje

Korisno opterećenje je statički podatak koji se obično određuje propisima te se tako npr. uzima za stambene prostorije  $p = 2 \text{ kN/m}^2$ , za biblioteke  $p = 5 \text{ kN/m}^2$ , za urede  $p = 4 \text{ kN/m}^2$ , za parkirališta  $p = 2,5 \div 3,5 \text{ kN/m}^2$ , itd.

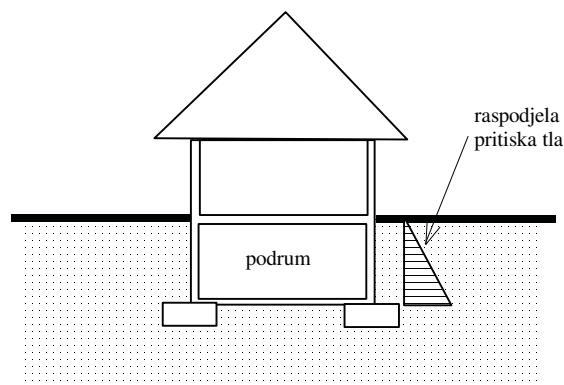
### 3.1.3 Opterećenje snijegom

Za važne objekte preporuča se koristiti statističke meteorološke podatke o količini snijega godišnje. Općenito kod nas vrijede slijedeće preporuke:

- za područja gdje nema snijega uzima se zamjensko opterećenje  $p_{sn} = 0,35 \text{ kN/m}^2$ .
- za područja gdje ima snijega uzima se  $p_{sn} = 0,75 \text{ kN/m}^2$ .
- za područja iznad 500 m nadmorske visine  $p_{sn} = 0,75 + (A - 500)/400 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ , gdje je A nadmorska visina u metrima.

### 3.1.4 Sile stalnog karaktera

Radi se o silama koje kontinuirano djeluju na konstrukciju, a tipičan primjer takve sile je aktivan pritisak tla na podrumne zidove zgrade (sl. 3.1.1).



Slika 3.1.1 Aktivni pritisak tla na podrumne zidove

### 3.1.5 Vjetar

Određivanje točno utjecaja vjetra na određenu konstrukciju vrlo je složeno i zahtijeva skupa modelska ispitivanja u zračnim tunelima ili pak modeliranje putem konačnih elemenata za analizu strujanja fluida. U propisima postoje pojednostavljene smjernice, koje su dobivene na temelju modelskih ispitivanja. Prvo je potrebno odrediti *osnovnu brzinu vjetra*, koja se određuje na visini od 10 m iznad tla, obično za 25, 50 ili 100-godišnjim ponavljanjem. Brzina vjetra raste s visinom iznad tla te se približno uzima da je

$$V_h = V_0 \left( \frac{h}{10} \right)^x, \quad (3.1)$$

gdje je  $V_0$  osnovna brzina vjetra u [km/h],  $h$  visina iznad tla u [m], a  $x$  ovisi o terenu i iznosi  $x = 1/3$  za centre gradova,  $x = 2/9$  za prigradska i šumovita područja,  $x = 1/7$  za ravninska nizinska područja,  $x = 1/10$  za ravno priobalje.

Na osnovu dobivene osnovne brzine vjetra određuje se *opterećenje vjetra* na konstrukciju. Pritisak vjetra, izražen u [N/m<sup>2</sup>] na jediničnu površinu u smjeru vjetra je

$$p = 0,047289 CV^2, \quad (3.2)$$

gdje je  $V$  brzina vjetra u [km/h], dok je  $C$  koeficijent oblika koji se za zgrade obično uzima  $C \approx 1,40$ . Ovaj pritisak predstavlja konstanti dio opterećenja vjetrom, dok je varirajući dio opterećenja vjetrom, koji nastaje od nalete vjetra ("refula"), teško odredit te se on računa samo za vitke konstrukcije.

### 3.1.6 Sile kočenja

Uslijed kočenja dolazi do akceleracije, koja zbog inercije djeluje u smjeru gibanja te je sila kočenja

$$P_k = -m a, \quad (3.1.3)$$

gdje je  $m$  masa vozila, a  $a$  akceleracija pri kočenju.

### 3.1.7 Bočni udari

Kod željeznica izraženo je opterećenje od bočnih udara, za što postoje propisi koji reguliraju način računanja ovih opterećenja.

### 3.1.8 Sile temperaturnih razlika

Ova sile ovise o temperaturi, temperaturnoj vodljivosti i upetosti konstrukcije ili nekog njenog dijela. Način računanja definiran je odgovarajućim propisima.

### 3.1.9 Djelovanje potresa

Potresu se mogu pojaviti u gotovo svakom dijelu svijeta, no najčešći su u pojasu gdje se tektonske ploče nalaze u međusobnom kontaktu i stalnom pomicanju (sl. 3.1.2). Seizmolozi razlikuju tri vrste potresa, a za objekte su najopasniji oni koji putuju površini zemljine kore. Utjecaj potresa na konstrukcije ovisi o mjestu objekta u odnosu na epicentar potresa, o orijentaciji potresnih valova, o masi konstrukcije, o vlastitim frekvencijama konstrukcije te o vrsti temeljnog tla.

Intenzitet potresa se najčešće izražava Richterovom ljestvicom, koja se zasniva na pomaku u mikronima standardnog seizmografa udaljenog 100 km od epicentra potresa. Richterova ljestvica ispisane je u logaritamskom mjerilu pa tako npr. Richter 6 izaziva 10 puta veću veličinu od Richtera 5, odnosno 100 puta veću veličinu od Richtera 4. Razni propisi na različite načine tretiraju potresne sile. Najjednostavniji se temelji na proporcionalnosti potresne sile  $V$  i težine objekta  $W$ , a dan je izrazom

$$V = C W, \quad (3.1)$$

gdje  $C$  predstavlja koeficijent ovisan o periodu vibriranja objekta. Obično se uzima da je  $0,22 \leq C \leq 0,06$ , odnosno

$$C = \frac{0,015}{3\sqrt{T}}, \quad (3.2)$$

gdje je  $T$  osnovni period titranja objekta izražen u [s]. Za određivanje ovog perioda koristi se empirijski izraz

$$T = 0,09 \frac{\sqrt{B}}{H}, \quad (3.3)$$

gdje je  $H$  visina objekta, a  $B$  dimenzija objekta u tlocrtu u smjeru djelovanja potresnih sila. Za okvirne konstrukcije preporuča se izraz

$$T = 0,1 N, \quad (3.4)$$

gdje je  $N$  broj katova objekta.



Slika 3.1.2 Područja najučestalijih potresa

## 3.2 Dinamička opterećenja

Dinamički se udari najčešće uzimaju u obzir tako da se određeno pokretno opterećenje pomnoži s dinamičkim faktorom, te se dalje računa kao statičko opterećenje. Tako npr. za kranske staze, dinamički faktor dan je tablicom 3.1.

	Vrsta kрана			Broj kranova u pogonu
	I	II	III	
Kranske staze	1,20	1,40	1,60	1
	1,20	1,40	1,60	2 i više
Konstrukcijski elementi koji nose staze (stupovi, okviri nosači)	1,10	1,20	1,40	1
	1,00	1,10	1,30	2 i više

Tablica 3.1 Dinamički faktor za kranske staze

Vrste promjenljivog opterećenja dane su tablicom 3.2.

Naziv	Značajke	$r$	Grafički prikaz
Čisto naizmjenično opterećenje (naprezanje)	$F_{sr} = 0$ $(\sigma_{sr} = 0)$ $F_{\max} = F_g$ $F_{\min} = F_d = -F_g$	$r = -1$ $r = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = \frac{F_d}{F_g}$	
Naizmjenično s prednatezanjem	$F_{sr} < F_a$ $F_{\min} = F_d$ $F_{\max} = F_g$ (vlak) $0 > F_d > -F_g$	$-1 > r > 0$ (vlak)	
Naizmjenično s predtlakom	$F_{sr} < F_a$ $F_{\max} = F_d$ (tlak) $F_{\min} = F_g$ $0 < F_g < -F_d$	$-1 > r > 0$ (tlak)	
Istosmjerno u području vlaka	$F_{sr} = F_a$ $F_{\min} = F_d = 0$ $F_{\max} = F_g = 2F_a$	$r = 0$ $r = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}$	
Istosmjerno u području tlaka	$F_{sr} = F_a$ $F_{\max} = F_d$ $F_{\min} = F_g = 0$	$r = 0$ $r = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = 0$	
Istosmjerno s prednatezanjem	$F_{sr} > F_a$ $F_{\max} = F_g$ $F_{\min} = F_d$ $F_g > F_d > 0$	$0 < r < 1$ $r = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = 0 \div 1$ (vlak)	
Istosmjerno promjenljivo s predtlakom	$F_{sr} > F_a$ $F_{\max} = F_d$ $F_{\min} = F_g$ $0 > F_g > F_d$	$0 < r < 1$ $r = \frac{F_g}{F_d} = 0 \div 1$ (tlak)	
Mirno (statičko)	$F_{sr} = F_{\max} = F_{\min}$ $F_a = 0$	$r = \pm 1$	

Tablica 3.2 Vrste promjenljivog opterećenja

### 3.3 Opterećenja prema EUROCODE 3

Osnovna razlika između dimenzioniranja po starim propisima (JUS U.E7 Nosivost i stabilnost čeličnih konstrukcija) je tu tome što se u JUSu dimenzioniranje provodilo prema dopuštenim napreznjima, koja su bila napreznja ispod granice tečenja (umanjena za koeficijent sigurnosti 1,5 za osnovno i 1,33 za dodatno opterećenje) računata prema teoriji elastičnosti. Prema EUROCODE 3 (EN 1993-1-1 "Design of steel structures"), odnosno pred normi ENV 1993-1-1, dimenzioniranje se vrši prema teoriji plastičnosti, dakle dozvoljava se plastifikacija poprečnog presjeka, uz korištenje probabilističkog pristupa utvrđivanja opterećenja.

#### 3.3.1 Granična stanja

Granično stanje konstrukcije je stanje čijim prekoračenjem konstrukcija na zadovoljava zahtjeve predviđenu projektom (npr. opterećenje veće od nosivosti ili progibi veći od dozvoljenih koji omogućavaju nesmetanu funkciju konstrukcije). Ovdje se razlikuju granična stanja nosivosti (djelomično ili potpuno rušenje konstrukcije) i granična stanja uporabljivosti (pomaci, vibracije, normalno funkcioniranje). Postoje dva pristupa pri projektiranju konstrukcija, klasični (deterministički) koji se temelji usporedbom poznatih veličina iz proračuna i propisa sa striktno određenim granicama dopušteni vrijednosti, te pristup temeljen na vjerojatnosti (probabilistički). Pristup temeljen na vjerojatnosti uključuje statističku obradu podataka te prosudbu parametara koji utiču na nosivost konstrukcije. Kako ovakav pristup zahtjeva opsežna ispitivanja, za uobičajene inženjerske pristupe koristi se semi-probabilistička metoda, koja se bitno ne razlikuje od determinističke, s razlikom što opterećenje (akcija) s kojim se računa sadrži i parcijalne koeficijente sigurnosti za akciju koji uzimaju u obzir vjerojatnost da sva opterećenja konstrukcije nastupe istovremeno.

#### 3.3.2 Vanjski utjecaji (akcije) na konstrukciju

Prema EUROCODE 3 djelovanja na konstrukciju, nazvana *akcije na konstrukciju* (vanjski utjecaji), obuhvaćaju sva ona djelovanja koja izazivaju napreznja nosivih dijelova konstrukcije.

Akcije na konstrukciju djeluju kao:

- neposredne (opterećenje koje neposredno djeluje na konstrukciju koja se nazivaju i mehaničke akcije)
- posredne (proizlaze iz prisilnih ili spriječenih deformacija, npr. toplinski utjecaji, slijezanje potpora te se nazivaju i geometrijske akcije)

Detalji proračuna akcija na konstrukciju sadržani su u EUROCODE 1, odnosno EN 1991 "Actions on structures", a sačinjavaju ga norme:

- EN 1991-1-1 "Gustoća, vlastita težina i opterećenja za zgrade"
- EN 1991-1-2 "Opterećenja na struktura pri požaru"
- EN 1991-1-3 "Opterećenje snijegom"

- EN 1991-1-4 "Opterećenje vjetrom"
- EN 1991-1-5 "Toplinska opterećenja"
- EN 1991-1-6 "Opterećenja pri izvođenju"
- EN 1991-1-7 "Izvanredna opterećenja zbog udara i eksplozija"
- EN 1991-2 "Opterećenja mostova uslijed prometa"
- EN 1991-3 "Opterećenja izazvana djelovanjem kranova i strojeva"
- EN 1991-4 "Opterećenja silosa i spremnika"

U trenutku pisanja skripte EUROCODE 1 je u procesu prihvaćanja te još nije objavljen u sklopu HRN.

Podjela akcija se vrši prema:

- promjeni intenziteta tijekom vremena:
  - o stalne akcije G (vlastita težina konstrukcije, obloga, instalacija, opreme, prednaprezanje, potpore)
  - o promjenljive akcije Q (korisno opterećenje, vjetar, snijeg, temperaturna opterećenja)
  - o izvanredne akcije A (eksplozije, udari vozila, požari)
  - o potres AE
- promjeni u prostoru
  - o nepomične akcije (vlastita težina)
  - o pomične akcije (pomično korisno opterećenje, snijeg, vjetar)
- odzivu konstrukcije:
  - o statičke akcije (prostorno određene, djeluju uvijek na istom mjestu)
  - o dinamičke akcije (prostorno neodređene ili slobodne akcije)

### 3.3.3 Unutrašnji utjecaji na konstrukciju (koeficijenti sigurnosti)

Unutrašnji utjecaji uključuju čvrstoću materijala (otpornost materijala) te faktor sigurnosti koji uzima u obzir pojavu neželjenih odstupanja od karakterističnih vrijednosti za određeni materijal. Uz ovo unutrašnji utjecaji uključuju odstupanje realne geometrije poprečnog presjeka nosača od proračunske, gdje se uključuje moguće nepoželjno odstupanje od geometrije profila. Proračunska nosivost konstrukcije zasniva se na čvrstoći materijala i geometriji, uz faktor sigurnosti koji uključuje nepouzdanost računskog modela i pretpostavljene geometrije.

## Literatura

B. Androić, D. Dumović, I. Džeba, *Metalne konstrukcije I*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 1994.

D. Beg, *Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1*

A. Vukov, *Uvod u metalne konstrukcije*, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Splitu, Split 1998.

## 4. Oblikovanje metalnih konstrukcija

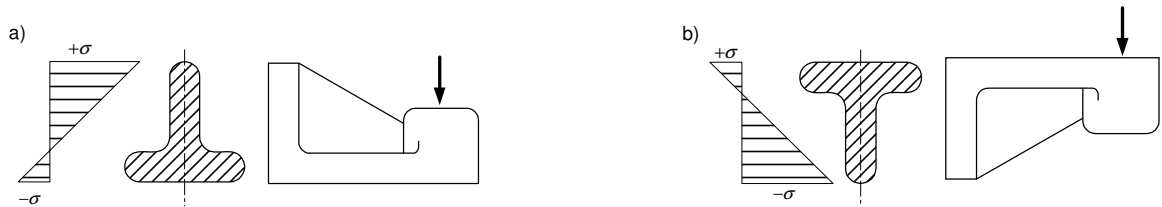
Pri konstruiranju se redovito vodi računa o cijeni i uštedi u količini materijala, posebno u slučaju većeg broja komada za proizvodnju. Do uštede u količini materijala može se doći na više načina:

1. Izbjegavanjem materijala koji se teško nabavlja ili je preskup te se vrši zamjena tzv. "adekvatnim materijalom".
2. Izradom elemenata od dvaju ili više dijelova različitog materijala. Npr. zupčanici od sivog ljeva (SL) i bronce, kombiniranje raznih ležanjih materijala i sl.
3. Iskorištenjem istaknutih osobina materijala. Npr., SL znatno boje podnosi tlak nego vlak te se obzirom na tlačno ili vlačno naprezanje dimenzionira poprečni presjek. Tako je rješenje na slici 4.1.1.b povoljnije je od rješenja na slici 4.1.1.a.
4. Smanjenjem otpada materijala, poput optimiranja rezanja (rješenje na sl. 4.1.2.b povoljnije je od onog na sl. 4.1.2.a)
5. Primjenom standarda (standardizacija) gdje god je to moguće.
6. Primjenom zavarenih konstrukcija pri tom vodeći računa o svim specifičnostima zavarivanja, kao što su:
  - a. ušteda materijala i troškovi zavara (sl. 4.1.3)
  - b. pravilna debljina i oblik šava te isprekidani zavari
  - c. izbjegavanje nagomilavanja zavara (slike 4.1.4 i 4.1.5, gdje su rješenja b i c povoljnija od a)
  - d. izbjegavati zavare u zoni maksimalnih naprezanja (slike 4.1.6 i 4.1.7, gdje su rješenja b povoljnija od a)
  - e. izbjegavati vlačna naprezanja u zoni korijena zavara (sl. 4.1.8, rješenje b povoljnije od a)
  - f. izbjegavati zavare na mjestima koncentracije naprezanja, tj. naglih prijelaza (slike 4.1.9 i 4.1.10, gdje su rješenja b povoljnija od a)
  - g. obratiti pozornost na pristupačnost zavaru (sl. 4.1.11)
7. Težiti idealno dimenzioniranim elementima, tj. težiti jednakom iznosu naprezanja (vlak, tlak, savijanje, torzija) u svim presjecima (sl. 4.1.12). Kloth-ov pregled težina konzolne grede za različite izvedbe prikazan je tablicom 4.1.1. Isijecanjem  $\mathbf{I}$  profila te spajanje na načine prikazane slikom 4.1.13, postiže se veći moment otpora pri savijanju te samim time i znatno veća nosivost za istu težinu nosača. Kod rešetkastih nosača izloženih savijanju i torziji potrebno je koristiti dijagonalna ukrućenja (sl. 4.1.14). Kod čiste torzije koristiti okrugle presjeke nosača te šuplje presjeka kojima se bitno smanjuje težina (sl. 4.1.15). Kut uvijanja za različite presjeke prikazan je tablicom 4.1.2. Za slučaj savijanja sa torzijom težiti zatvorenim profilima i zaobljenim rubovima (sl. 4.1.16). Limene plohe potrebno je ukrutiti s ciljem sprječavanja deformacija i izvijanja (sl. 4.1.17). Koristiti kutne ukrute (sl. 4.1.18). Kod hladno deformiranog profila zavar je potrebno postaviti čim dalje od mjesta deformiranja na udaljenosti većoj od dvostruke debljine lima. Pri oblikovanju postoje tri pravila kojima uvijek treba težiti:

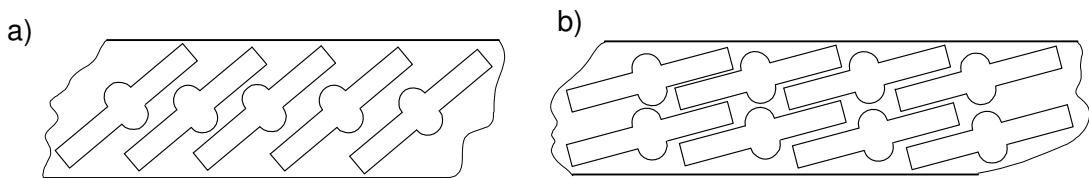
1. Pravilo: koristiti zatvorene presjeke gdje god je to moguće



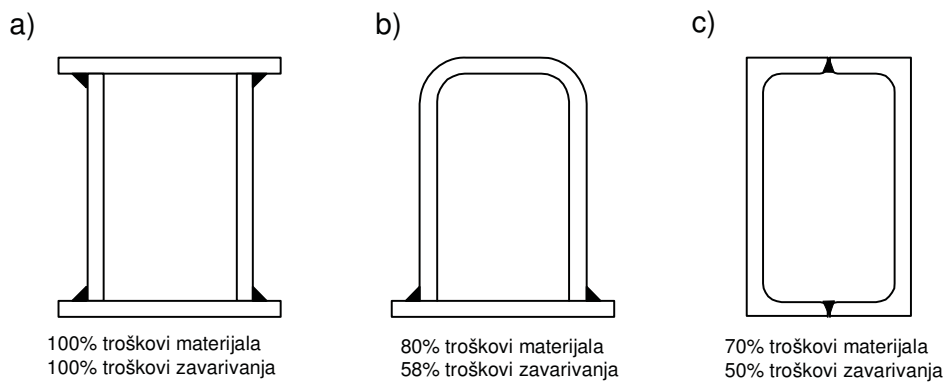
2. Pravilo: koristiti dijagonalna ukrućenja (na slici 4.1.19 dani su kutovi zakreta te je rješenje c 36 puta kruće uz 6% manje materijala od rješenja b)
3. Pravilo: ukrutiti završetke nosača opterećene na torziju (sl. 4.1.20)



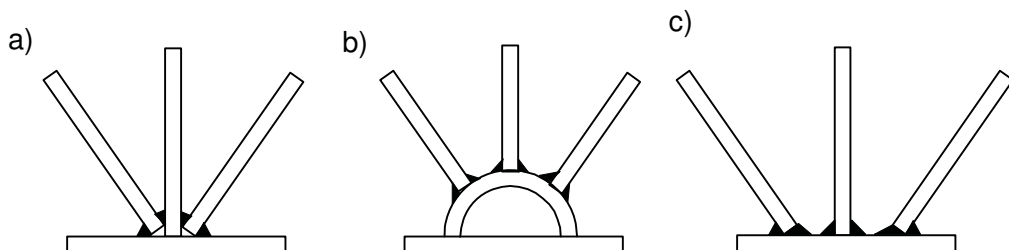
Slika 4.1.1 Preuzimanje tlačnog i vlačnog naprezanja kod SL-a



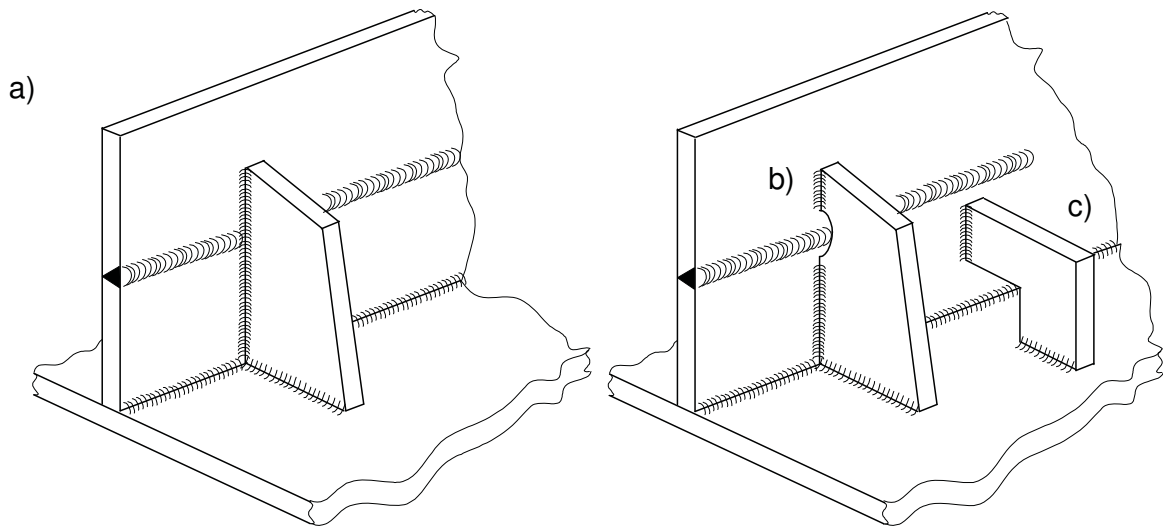
Slika 4.1.2 Smanjenje otpada pri rezanju



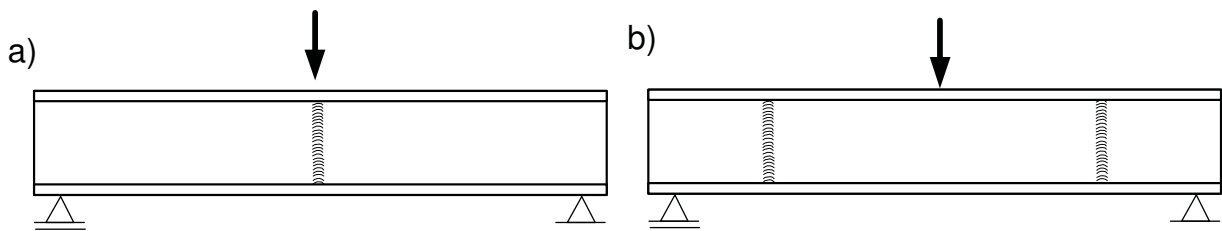
Slika 4.1.3 Troškovi materijala i troškovi zavora



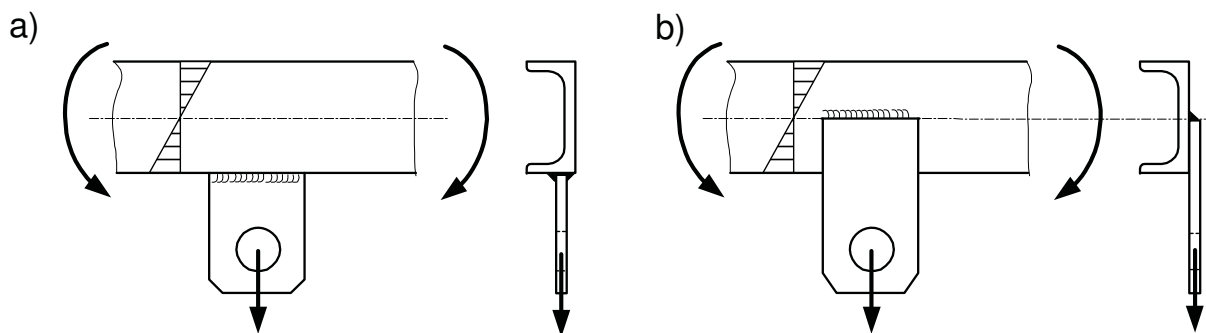
Slika 4.1.4 Izbjegavanje nagomilavanja zavara



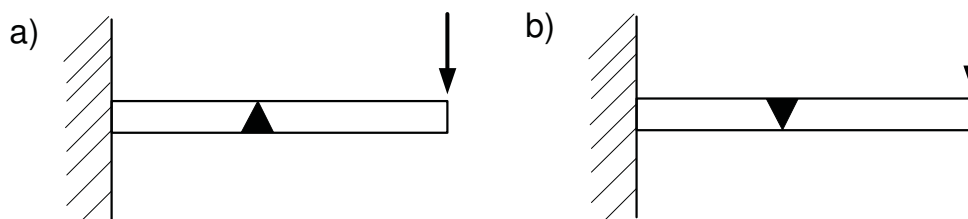
Slika 4.1.5 Izbjegavanje nagomilavanja zavara



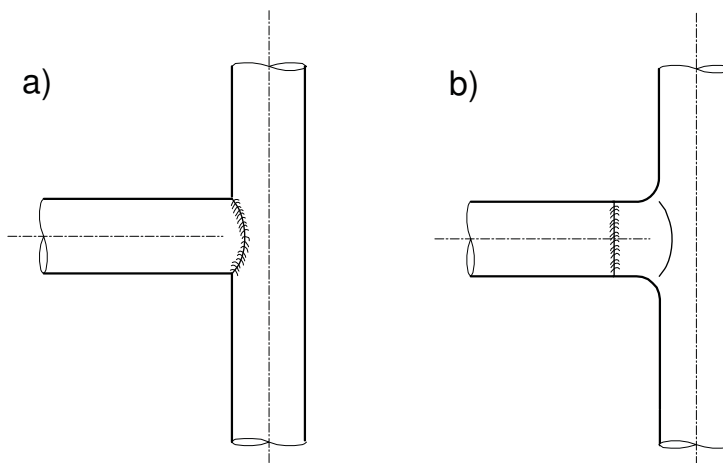
Slika 4.1.6 Izbjegavanje zavara u zonama maksimalnih naprezanja



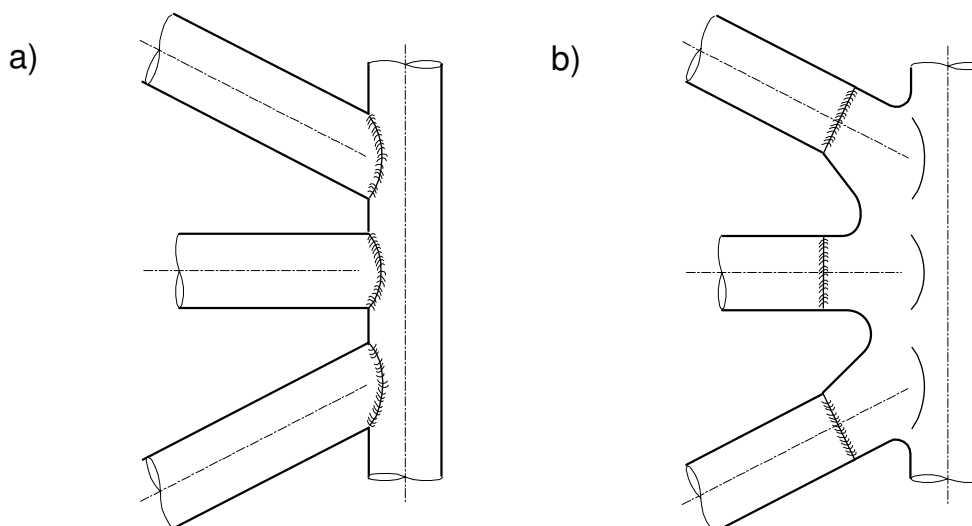
Slika 4.1.7 Izbjegavanje zavara u zonama maksimalnih naprezanja



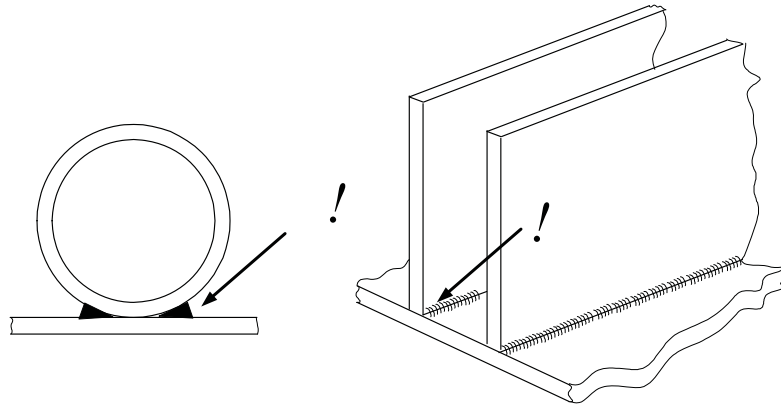
Slika 4.1.8 Izbjegavanje vlačnih napreznja u korijenu zavara



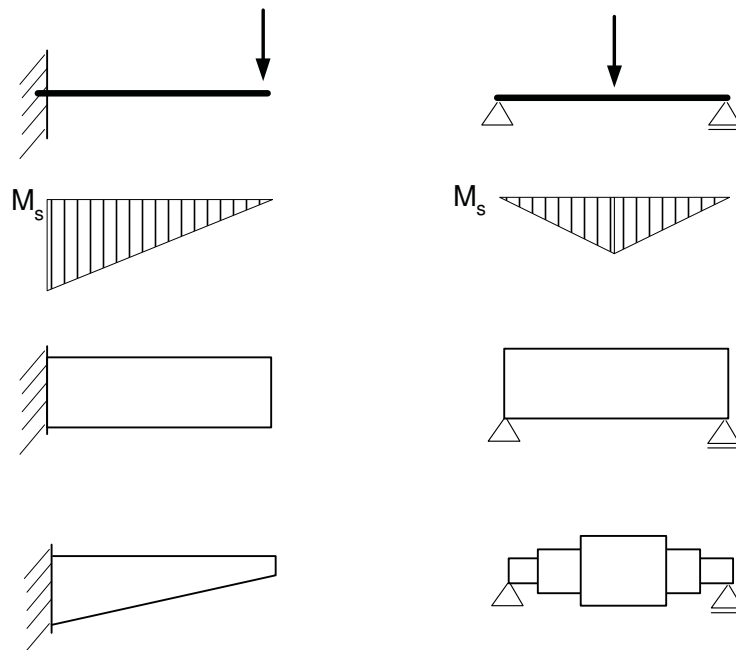
Slika 4.1.9 Izbjegavanje zavara u području koncentracije napreznja




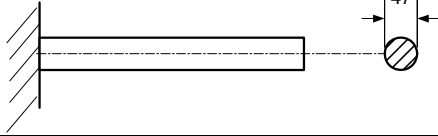
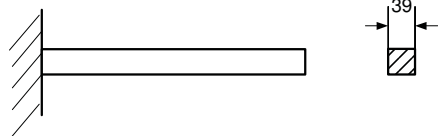
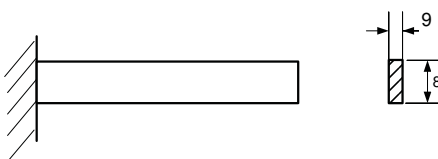
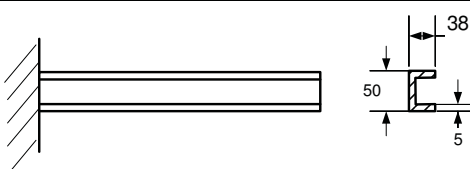
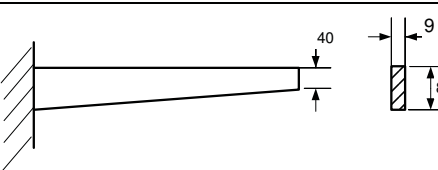
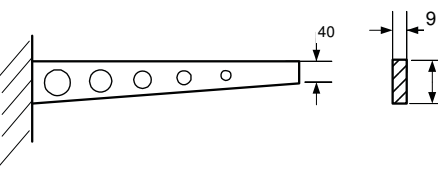
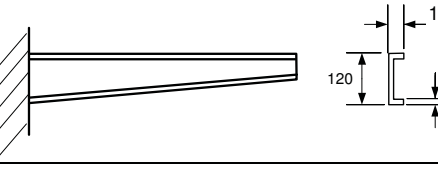
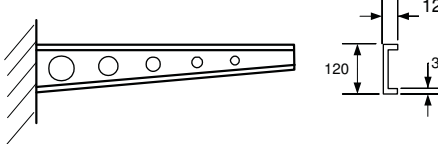
Slika 4.1.10 Izbjegavanje zavara u području koncentracije napreznja



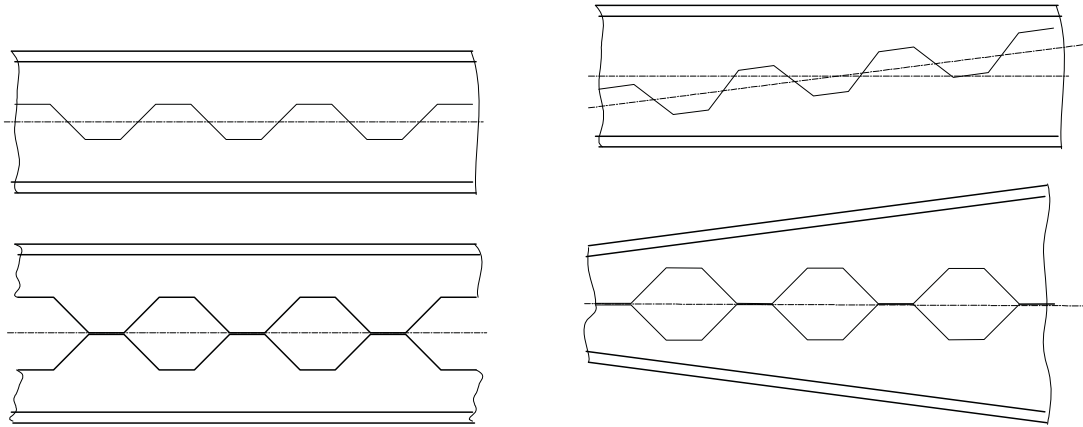
Slika 4.1.11 Pristupačnost zavora



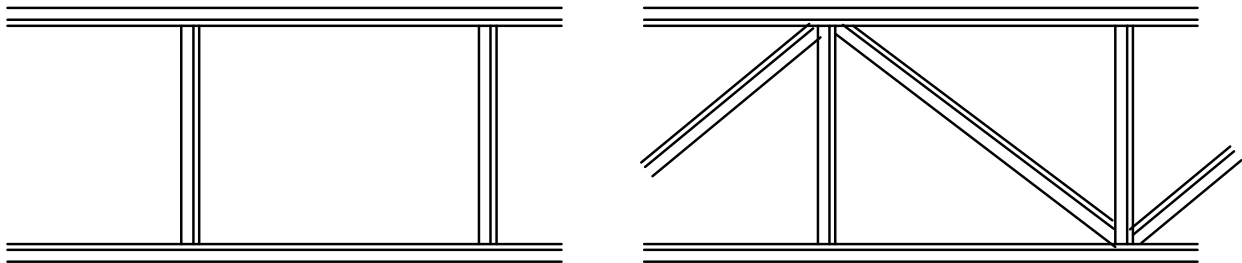
Slika 4.1.12 Idealno dimenzioniranje elemenata

		Težina G		f [mm]
		[N]	[%]	
1		136	100	6,6
2		120	88	8,25
3		59	43	4,16
4		56	41	6,0
5		44	32	6,95
6		40	29	7,1
7		25	18	9,5
8		17	17,5	9,6

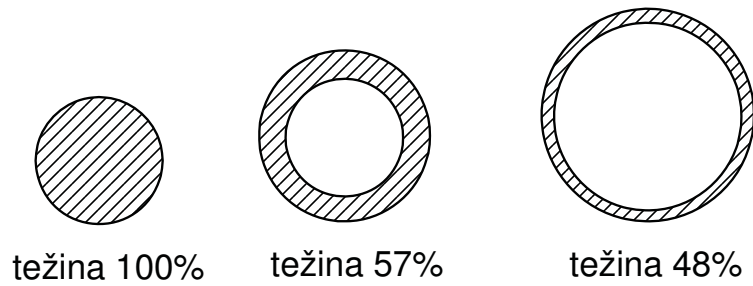
Tablica 4.1.1 Kloth-ov pregled dežine uklještenih greda po veličini



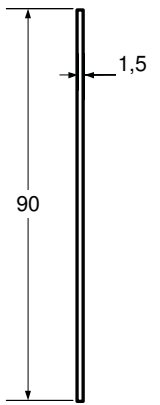
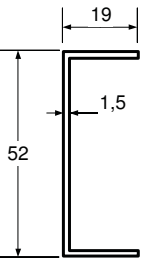
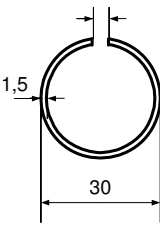
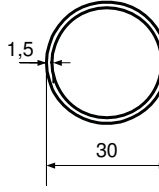
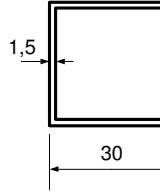
Slika 4.1.13 Isijecanje i preoblikovanje I profila



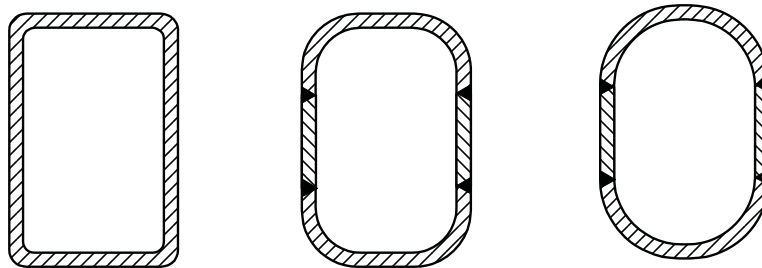
Slika 4.1.14 Dijagonalne ukrute kod rešetkastih konstrukcija



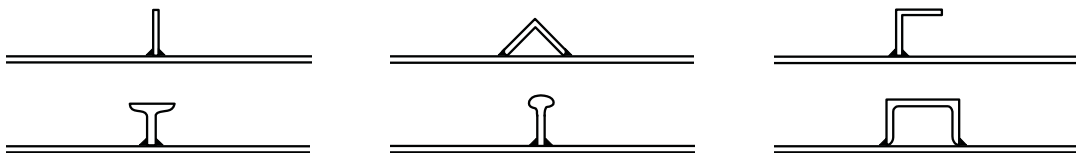
Slika 4.1.15 Smanjene težine korištenjem šupljih nosača

Opterećenje torzijom za sve profile isto					
Kut uvijanja	9°	9,5°	11°	premalo za mjerenje	premalo za mjerenje

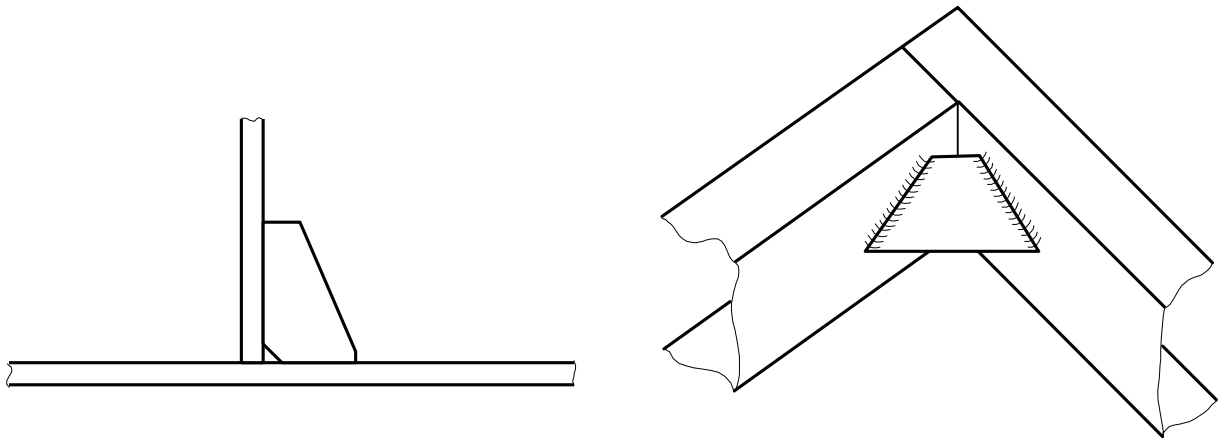
Tablica 4.1.2 Kut uvijanja kod torzije



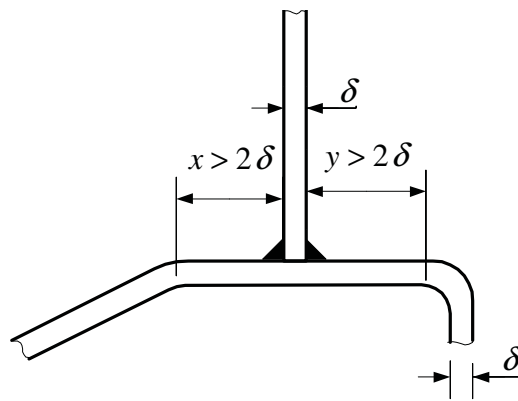
Slika 4.1.16 Zatvoreni profili s zaobljenim rubovima



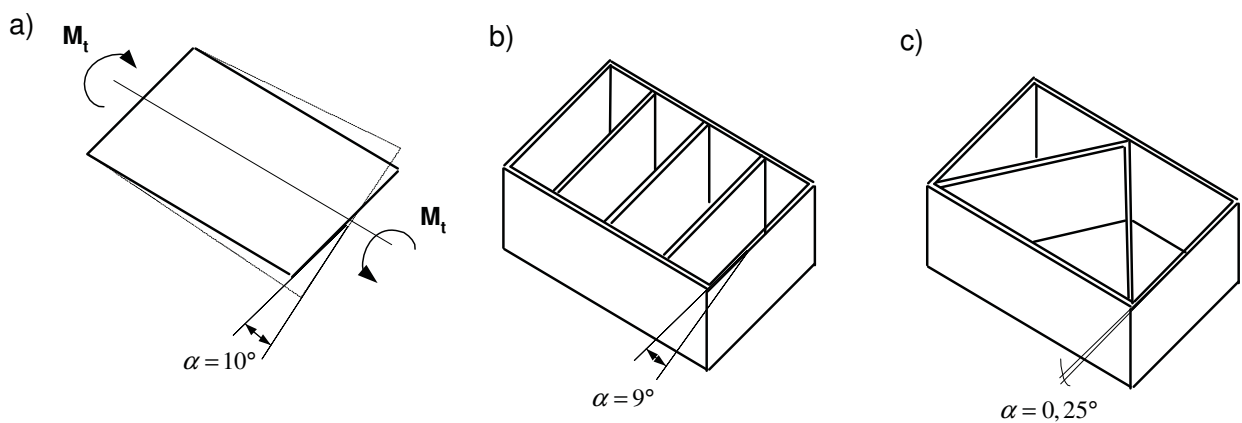
Slika 4.1.17 Ukrucivanje limenih ploča



Slika 4.1.18 Kutne ukrute

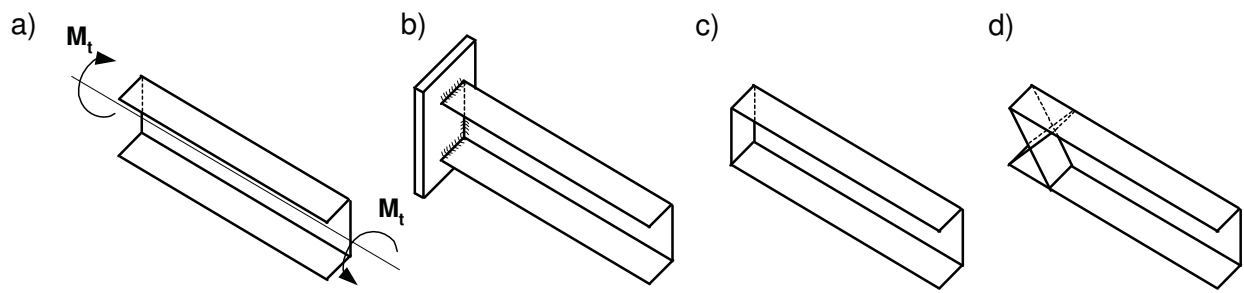


Slika 4.1.19 Minimalna udaljenost zavora od mjesta hladnog deformiranja



Slika 4.1.20 Uvijanje za lim bez ukrucenja i za limove s ukrucenjima





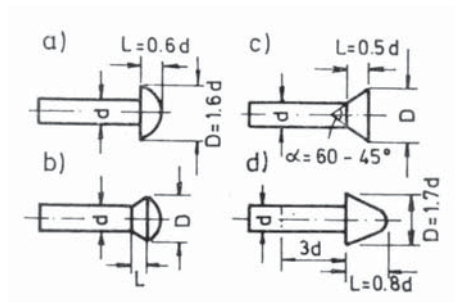
Slika 4.1.21 Ukrute završetaka nosača

## 5. Spajanje elemenata

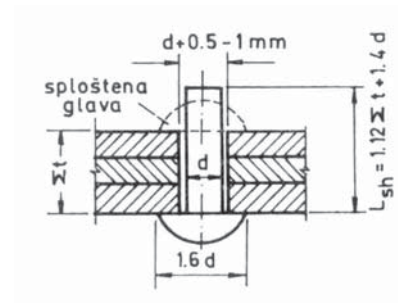
Spajanje elemenata metalnih konstrukcija vrši se pomoću zakovica, vijaka ili zavarivanjem. Pri tom razlikuju se rastavljivi i nerastavljivi spojevi.

### 5.1 Zakovice

S upotrebom zakovica započeto je tridesetih godina devetnaestog stoljeća, gdje su se čelične zakovice koristile za spajanje limova, nosača, kotlova i sl. Spajanje zakovicama danas su u potpunosti istisnuto spajanjem zavarivanjem te se jedino zadržalo kod nekih specifičnih područja poput zrakoplovstva i sličnih dinamički opterećenih konstrukcija. Pri proizvodnji zakovica se radi iz cilindričnog profila na stroju koji formira glavu zakovice. Glava može biti poluokrugla, poluupuštena i upuštena (sl. 5.1.1). Spajanje zakovica se vrši na način da se na limovima izbuši provrt u koji se, za slučaj čelične zakovice, umeće zakovica zagrijana na  $1000^{\circ}\text{C}$ . Zakovica se sa strane glave pridržava, te se pneumatskim čekićima formira glava na drugoj strani lima. Pri hlađenju zakovica se steže, pri čemu u njoj nastaju velika vlačna naprezanja koja ostvaruju nepropustan spoj limova (sl. 5.1.2).



Slika 5.1.1 Nekoliko vrsti zakovica

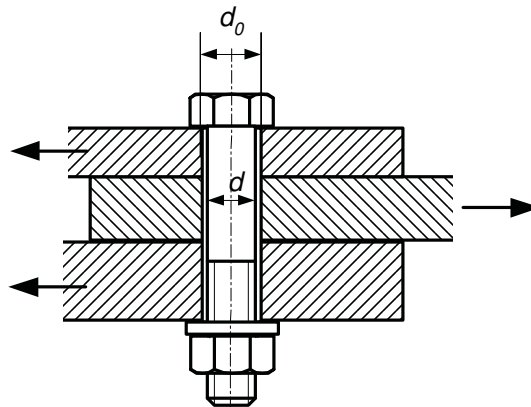


Slika 5.1.2 Spajanje limova zakovicom

### 5.2 Vijčani spojevi

Vijčani spojevi su povijesno bili prva sredstava za spajanje elemenata, no njih su kasnije potisnuli spojevi zakovicama. Danas, kada su zavareni spojevi velikim dijelom istisnuli spojeve zakovicama, vijci su ponovno našli svoju široku primjenu za potrebe rastavljivih spojeva te u potpunosti prevladali nad zakovicama. Cijena samog vijka veća je od cijene zakovice, međutim ostvarivanje vijčanog spoja jeftinije je od spoja zakovicama. Uz to, rad s vijcima je brzi i

jednostavan te ne zahtijeva posebnu stručnost radnika, što onda samo po sebi dodatno smanjuje cijenu vijčanog spoja. Ako je opterećenje takvo da je vijak, osim na smicanje, opterećen i na vlak, tada se obavezno koristi vijčani spoj, a ne spoj zakovicama. Za metalne konstrukcije danas se isključivo koriste vijci s metričkim navojem kojem je oznaka "M" uz numerički dio oznake koji označava nazivni (vanjski) promjer vijka, npr. vijci koji se najčešće koriste u vijčanim spojevima su: M12, M14, M16, M18, M20, M22, M24, M27, M30, M36, M42, M48. U vijčanom spoju postoji jedna ili dvije ravnine smicanja. Na slici 5.2.1 prikazan je vijčani spoj s dvije ravnine smicanja. Pri tom kod vijčanih spojeva treba paziti da ravnina smicanja ne prelazi preko navoja.



Slika 5.2.1 Vijčani spoj (dvosječni)

Prema točnosti vijci se dijele na:

- obrađeni vijci kod kojih je rupa 0,2 mm veća od tijela vijka, tj.  $d_0 = d + \max 0,2\text{mm}$
- neobrađeni vijci kod kojih je rupa 2 mm veća od tijela vijka,  $d_0 = d + 2\text{mm}$

Neobrađeni vijci, obzirom da uključuju i veće rupe, omogućuju lakšu ugradbu, dok obrađeni vijci najčešće iziskuju utiskivanje vijaka čekićem.

Prema HRN, vijčani spojevi su obuhvaćeni slijedećim standardima:

- HRN M.B1.050, HRN M.B1.051, HRN M.B1.052 – za vijke
- HRN M.B1.600, HRN M.B1.601 – za matice
- HRN M.B2.011, HRN M.B2.012 – za podloške

### 5.2.1 Proračun vijčanih spojeva

Proračun vijčanih spojeva vrši se na smicanje (odrez) i na površinski pritisak na plaštu valjka. Proračun zakovica skoro je istovjetan (razlika u dop. naprezanjima) proračunu vijčanih spojeva te se taj proračun neće posebno obrađivati. Smično tangencijalno naprezanje definirano je kao

$$\tau_s = \frac{F}{n A} \quad (5.2.1)$$

gdje  $n$  predstavlja broj vijaka u spoju, dok je  $A$  površina poprečnog presjeka tijela vijka koja je za jednosječni spoj (sl. 5.2.2) definirana kao

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (5.2.2)$$

dok je za dvosječni spoj (sl. 5.2.1)

$$A = 2 \frac{d^2 \pi}{4} . \quad (5.2.3)$$

Tangencijalno naprezanje mora biti manje od dopuštenog naprezanja, dakle izraz (5.2.1) treba zadovoljavati uvjet

$$\tau_s \leq \sigma_{dop} . \quad (5.2.4)$$

Površinski pritisak na plaštu vijka iznosi

$$p = \frac{F}{n A'} , \quad (5.2.5)$$

gdje je površina plašta

$$A' = d \delta_{\min} , \quad (5.2.6)$$

dok je  $\delta_{\min}$  debljina najtanjeg lima u spoju. Površinski pritisak treba biti manji od dopuštenog koji za vijke kod jednosječnog spoja iznosi

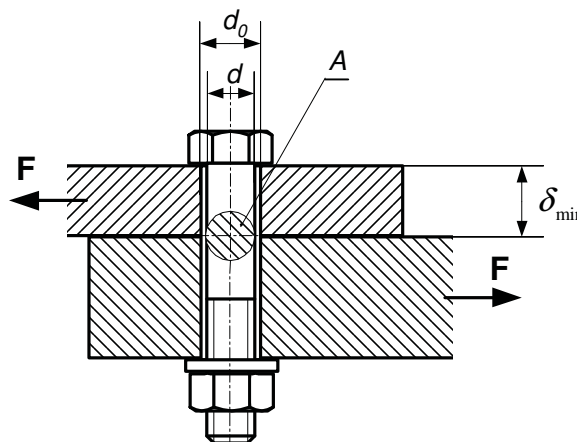
$$p' \leq 1,3 \sigma_{dop} , \quad (5.2.7)$$

dok za vijke kod dvosječnog spoja iznosi

$$p'' \leq 1,6 \sigma_{dop} . \quad (5.2.8)$$

Vrijednosti dopuštenih naprezanja razlikuju se za obrađene i neobrađene vijke, te se te vrijednosti mogu očitati iz tablica standarda. Za koeficijente sigurnosti, u ovisnosti o vrsti opterećenja, uzimaju se slijedeće vrijednosti:

- $S=1,50$  za I slučaj opterećenja (osnovno opterećenje)
- $S=1,33$  za II slučaj opterećenja (osnovno + dopunsko opterećenje)
- $S=1,2$  za III slučaj opterećenja (izuzetno opterećenje)



Slika 5.2.2 Jednosječni vijčani spoj

### 5.2.2 Klasifikacija mehaničkih svojstava i označavanje vijaka

Pri izradi vijčanog spoja od prvenstvenog značenja su mehanička svojstva gotovih vijaka. U tom cilju standardima su propisana mehanička svojstva čeličnih vijaka. To su najčešće kombinacije brojeva koji označavaju vlačnu čvrstoću, granicu tečenja ili pak produljenje kod loma. Tako se prema DIN 267 klasa mehaničkih svojstava određuje dvjema skupinama brojeva međusobno odvojenih točkom. Prvi broj (tablica 5.2.1) označava najmanju vlačnu čvrstoću, dok drugi broj (tablica 5.2.2) označava deseterostruki odnos između donje granice tečenja i vlačne čvrstoće. Dakle, umnožak obaju brojeva daje najmanju granicu tečenja, što je od praktičnog značenja pri korištenju tablica. Tako npr. oznaka "4.6" označava vlačnu čvrstoću vijka  $\sigma_M = 400 \text{ N/mm}^2$ , dok se iz drugog broja može očitati da je donja granica tečenja  $\sigma_T = (400 \cdot 6)/10 = 240 \text{ N/mm}^2$ .

Prvi broj	3	4	5	6	8	10	12	14
Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	340	400	500	600	800	1000	1200	1400

Tablica 5.2.1 Prvi broj pri označavanju mehaničkih svojstava vijaka

Drugi broj	.6	.7	.8	.9
$\frac{\text{donja granica tečenja}}{\text{vlačna čvrstoća}} \cdot 10$ [N/mm <sup>2</sup> ]	6	7	8	9

Tablica 5.2.2 Drugi broj pri označavanju mehaničkih svojstava vijaka

### 5.2.3 Prednapregnuti vijčani spojevi

Osnovni nedostatak spoja s običnim vijcima su relativno velike deformacije koje se u vijcima pri pritezanju javljaju. Kako vijčani spoj prenosi silu trenjem između limova, a ne oslanjanje limova na bokove tijela vijka, kao bi se ostvarilo potrebno trenje potrebno je ostvariti veliku silu u tijelu vijka. Uz to, postoji i opasnost od odvijanja vijaka, što je naročito naglašeno kod dinamički opterećenih konstrukcija. U tom cilju koriste se visoko vrijedni vici od specijalnog čelika čvrstoće 800 do 1100 MPa (oznaka 10.9 i 12.9) kojima se ostvaruju prednapregnuti vijčani spojevi. Proračun ovakvih prenapretnutih vijčanih spojeva sastoji se od:

- proračuna na smicanje i površinski pritisak (isto kao kod običnih vijaka)
- proračuna na trenjem među površinama

Uz vlačno naprezanje koje se uvijek javlja u vijčanom spoju, kod ovih visokoopterećenih vijaka za prednaprezanje javlja se i torzija uslijed pritezanja vijka i matice. Oblik i dimenzije vijaka i matice za prednaprezanje dani su standardom HRN M.B1.051 (vijci) i HRN M.B2.912 (matice). Provrt se izrađuje na način da je rupa 2 mm veća od tijela vijka,  $d_0 = d + 2 \text{ mm}$ . Ovime se

osigurava da ne dođe do kontakta između plašta vijka i limova, odnosno da se prenošenje sile ostvaruje trenjem, a ne oblikom.

Za pritezanje vijaka za prednaprezanje obavezno je korištenje alata (bilo ručni ili pneumatski) s očitavanjem momenta pritezanja (tzv. moment ključ).

Ostvarena sila trenja ovisi o sili pritezanja  $F_p$  te koeficijentu trenja između površina koji obično iznosi od 0,15 do 0,55. Naprezanja ovakvih vijaka moraju biti manja od donje granice tečenja  $\sigma_T$ . Kod vijaka za prednaprezanje potrebno je uvesti pojam dopuštene sile prednaprezanja koja je definirana kao

$$F_{p\text{ dop}} = \frac{\sigma_T A_j}{K v_1} \quad (5.2.9)$$

gdje je  $\sigma_T$  donja granica tečenja materijala vijka,  $A_j$  idealni presjek jezgre vijka,  $K$  koeficijent koji uzima u obzir istovremeno naprezanje na vlak i torziju te iznosi  $K=1,2$ ,  $v_1$  koeficijent sigurnosti u odnosu na granicu tečenja koji iznosi  $v_1=1,25$ .

Moment pritezanja matice, kojim se ostvaruje sila pritezanja  $F_p$ , iznosi

$$M_{p\text{ dop}} = d K_1 F_{p\text{ dop}}, \quad (5.2.10)$$

gdje je  $K_1$  koeficijent trenja u navoju i podlozi između matice i limove te iznosi  $K_1=0,2$ .

Vrijednosti dopuštenih sila i momenata uspoređuju se s vrijednostima iz tablica danih standardom. Ukupna sila trenja koju ostvaruju svi vijci u spoju, a kojom se ujedno i prenosi sila vijčanim spojem, iznosi

$$F_K = \frac{\mu m n F_{p\text{ dop}}}{v_2} \quad (5.2.11)$$

gdje je  $\mu$  koeficijent trenja površina u spoju,  $m$  broj spojenih površina,  $n$  broj vijaka u vezi, a  $v_2$  sigurnost u odnosu na proklizavanje. Koeficijent  $v_2$  za pojedine slučajeve opterećenja iznosi:

- $v_2=1,4$  za I slučaj opterećenja
- $v_2=1,2$  za II i III slučaj opterećenja

Sila trenja koju ostvaruje samo jedan vijak u spoju je

$$F_{K1} = \frac{F_K}{n} = \frac{\mu m F_{p\text{ dop}}}{v_2} \quad (5.2.12)$$

Ako je su prednapregnuti vijci opterećeni još i aksijalnom silom  $F_a$ , aksijalna sila smanjuje silu  $F_{K1}$  te je onda uzima modificirana sila trenja

$$F_{K1}^* = F_{K1} \frac{F_{p\text{ dop}} - F_a}{F_{p\text{ dop}}}. \quad (5.2.13).$$

Iz ovog razloga aksijalno opterećenje vijka može maksimalno iznositi  $F_a = 0,8 F_{p\text{ dop}}$ .

Pri proračunu vijčanog prednapregnutog spoja potrebno je naglasiti da:

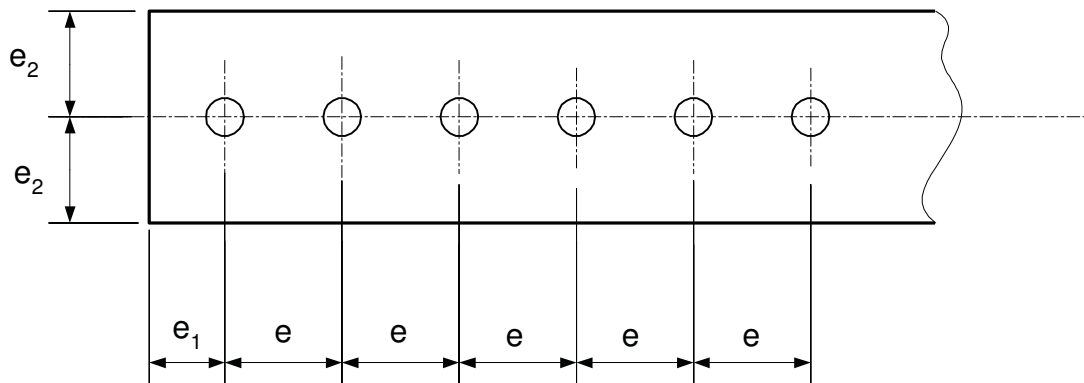
- a) u slučaju da je veza opterećena na tlak, poprečnom presjeku elemenata u spoju se ne odbijaju otvori za vijke
- b) u slučaju vlaka, svi otvori se oduzimaju jer oni u vlačnom smislu predstavljaju oslabljenje presjeka

Za slučaj promjenljivog opterećenja spoj se redovito kontrolira na površinski pritisak omotača (popuštanje veze) te se za takav slučaj uzima da je  $p_{dop} = 3 \sigma_{dop}$ .

Uvijek treba nastojati da na jednoj konstrukciji bude čim manje različitih vijaka. Kombinacije zakovica i vijaka izbjegavati, a za slučaj dinamičkih opterećenja te kombinacije nisu ni dopuštene.

### 5.2.4 Raspored vijaka u konstrukciji

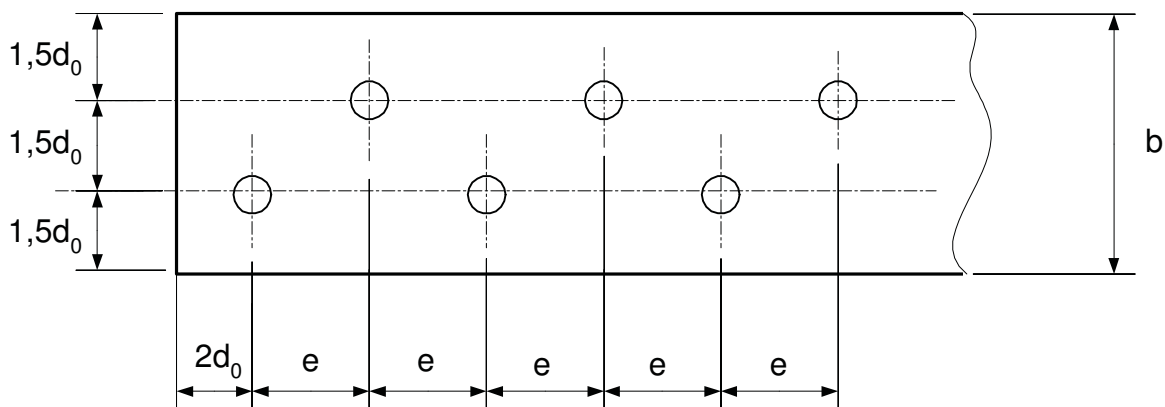
Nije preporučljivo da broj vijaka u spoju prijeđe šest iz razloga što time dolazi do izrazito neravnomjernog prenošenja opterećenja od vijaka do vijaka. Minimalni međusobni razmak vijaka u smjeru prenošenja sile iznosi  $e_{\min} = 3d_0$ , dok maksimalni međusobni razmak iznosi  $e_{\max} = 6d_0$ . Minimalne i maksimalne udaljenosti središta vijaka od rubova prikazane su slikom 5.2.3.



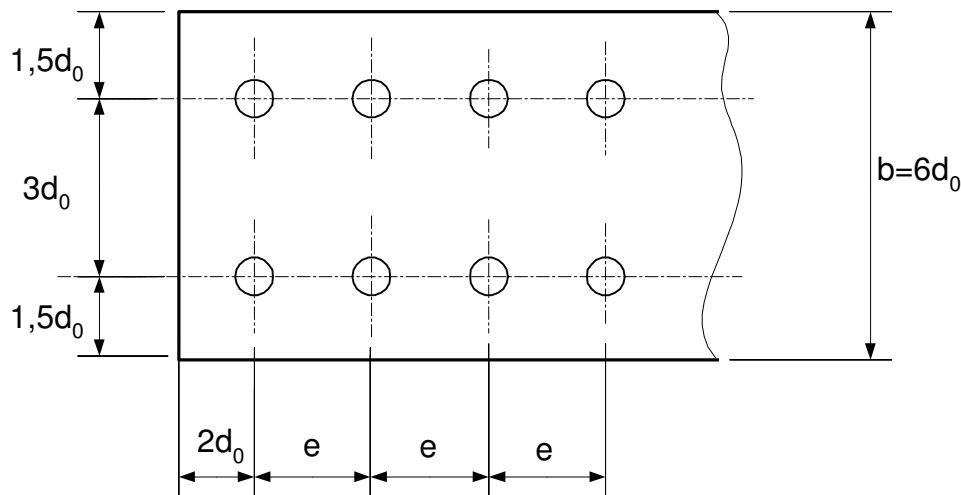
Slika 5.2.3 Minimalni razmak za jedan red vijaka

Vijci se mogu postavljati u jednom redu, kao što je to prikazano slikom 5.2.3, odnosno u dva (sl. 5.2.5) ili više redova te naizmjenično (sl. 5.2.4), što sve ovisi o širini elemenata koji se spajaju i to na način:

- ako je  $b < 4,5 d_0 \rightarrow$  jedan red (sl. 5.2.3)
- ako je  $4,5 d_0 < b < 6 d_0 \rightarrow$  naizmjenično (sl. 5.2.4)
- ako je  $b \geq 6 d_0 \rightarrow$  dva ili više redova (sl. 5.2.5)



Slika 5.2.4 Naizmjenično postavljanje vijaka



Slika 5.2.5 Postavljanje vijaka u dva reda

### 5.2.5 Proračun nastavaka opterećenih na savijanje

Načini na koje štap može biti napregnut na savijanje su:

- ako sila djeluje normalno na uzdužnu os štapa
- ako je štap opterećen čistim momentom
- ako se uzdužna os štapa ne podudara s pravcem sile

Ako je štap napregnut na savijanje, onda i veza u njegovom nastavku prima savijanje. Općenito spoj kod savijanog štapa može biti opterećen:

- samo momentom
- momentom i aksijalnom (uzdužnom) silom
- momentom i poprečnom silom
- momentom, uzdužnom i poprečnom silom

Ako je spoj opterećen samo momentom, tada on teži da se pod djelovanjem momenta okreće oko težišta spoja (težišta veze).

U svakom vijku, isto vrijedi i za zakovice, javlja se sila okomita na spojnicu vijka i težišta veze (sl. 5.2.6). Pri tom ukupni moment koji se spojem prenosi,  $M_S$  mora biti jednak sumi svih momenata sila na vijke  $F_i$  obzirom na težište veze  $c$ ,

$$M_S = \sum_{i=1}^{m \cdot n} F_i \cdot r_i \quad (5.2.14)$$

gdje  $r_i$  predstavlja udaljenost pojedinog vijka od težišta veze,  $n$  je broj vijaka u jednom redu, dok je  $m$  broj redova vijaka. Pri dimenzioniranju vijaka mjerodavna je maksimalna sila u jednom vijku i to onom najopterećenijem. Najopterećeniji vijak je onda najudaljeniji od težišta veze  $c$ . Pri tome postoji proporcionalnost između sila i udaljenost,

$$F_{\max} : F_i = r_{\max} : r_i, \quad (5.2.15)$$

$$F_i = F_{\max} \frac{r_i}{r_{\max}}. \quad (5.2.16)$$



Uvrštavanjem izraza (5.2.16) u (5.2.14) slijedi

$$M_S = \sum_{i=1}^{m-n} \frac{r_i}{r_{\max}} F_{\max} \cdot r_i, \quad (5.2.17)$$

$$M_S = \frac{F_{\max}}{r_{\max}} \sum_{i=1}^{m-n} r_i^2, \quad (5.2.18)$$

te najveća sila u vijku na osnovi prethodnog izraza iznosi

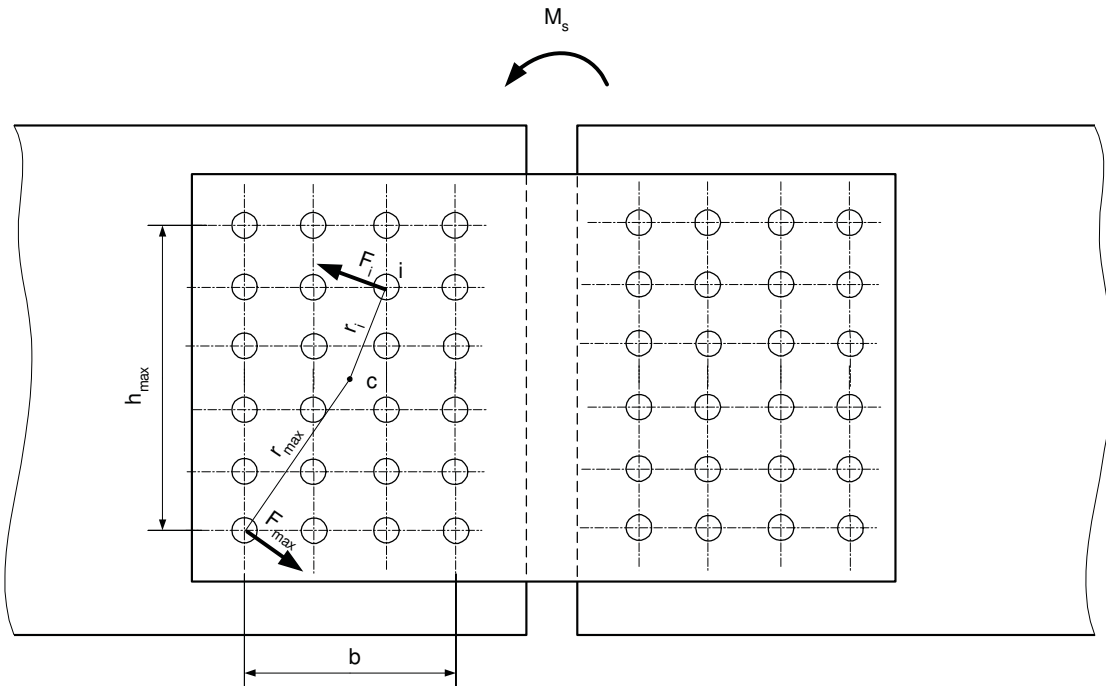
$$F_{\max} = M_S \frac{r_{\max}}{\sum_{i=1}^{m-n} r_i^2}. \quad (5.2.19)$$

Maksimalna sila uspoređuje se sa nosivošću vijka na odrez i površinski pritisak prema

$$F_{\max} > F_{\tau}, F_{p'}, F_{p''}. \quad (5.2.20)$$

Svi prethodno navedeni izrazi vrijede uz uvjet da je

$$\frac{h_{\max}}{2} \leq b. \quad (5.2.21)$$



Slika 5.2.6 Sile u vijčanom spoju pri savijanju momentom

U slučaju da je  $(h_{\max}/b) > 2$ , što je čest slučaj kod limenih nosača, vertikalna komponenta sile u vijku je mala te se može zanemariti. Za ovaj slučaj smatra se da postoji samo horizontalna komponenta sile (sl. 5.2.7) te je kao i prije vanjski moment  $M_S$  jednak sumi horizontalnih komponenti sila u vijcima,

$$M_S = (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + \dots + F_n \cdot l_n) \cdot m, \quad (5.2.22)$$

$$\frac{1}{m} M_S = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + \dots + F_n \cdot l_n. \quad (5.2.23)$$

Iz trokuta na slici 5.2.7 slijedi odnos

$$F_1 : F_n = \frac{l_1}{2} : \frac{l_n}{2}, \quad (5.2.24)$$

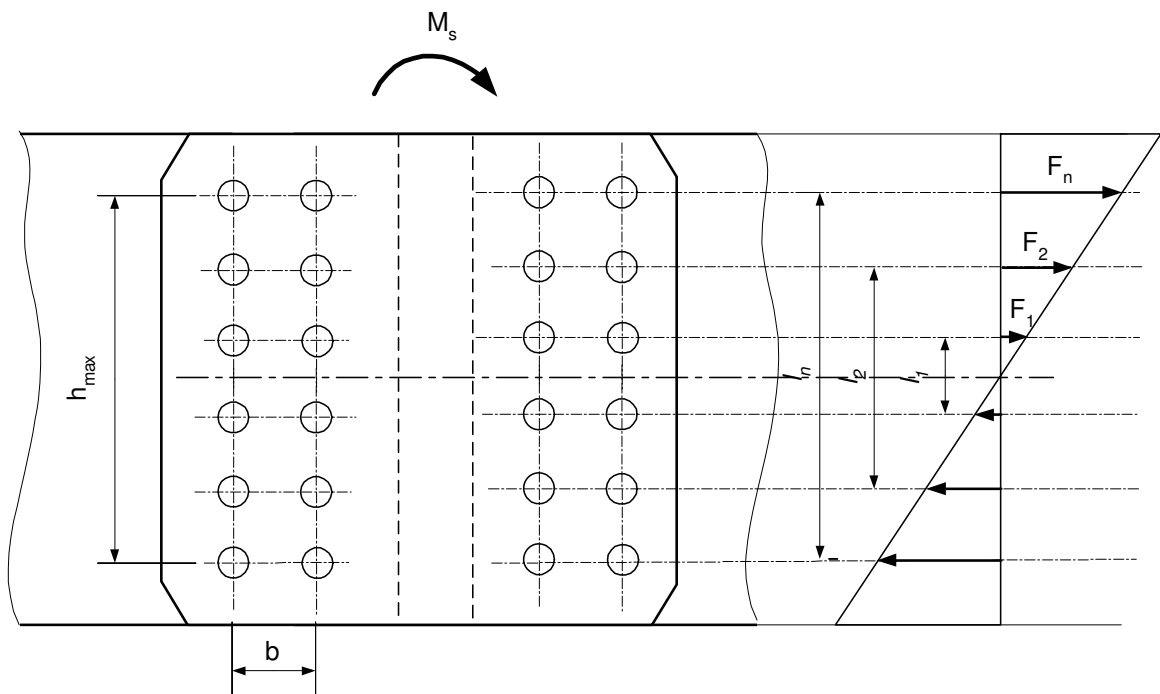
$$F_1 = \frac{F_n \cdot l_1}{l_n}. \quad (5.2.25)$$

Nakon uvrštavanja u izraz (5.2.23) slijedi

$$\frac{1}{m} M_S = \frac{F_n \cdot l_1^2}{l_n} + \frac{F_n \cdot l_2^2}{l_n} + \dots + F_n \cdot l_n, \quad (5.2.26)$$

$$\frac{1}{m} M_S = \frac{F_n}{l_n} (l_1^2 + l_2^2 + \dots + l_n^2), \quad (5.2.27)$$

$$F_n = \frac{M_S \cdot l_n}{m \sum l_i^2}. \quad (5.2.28)$$

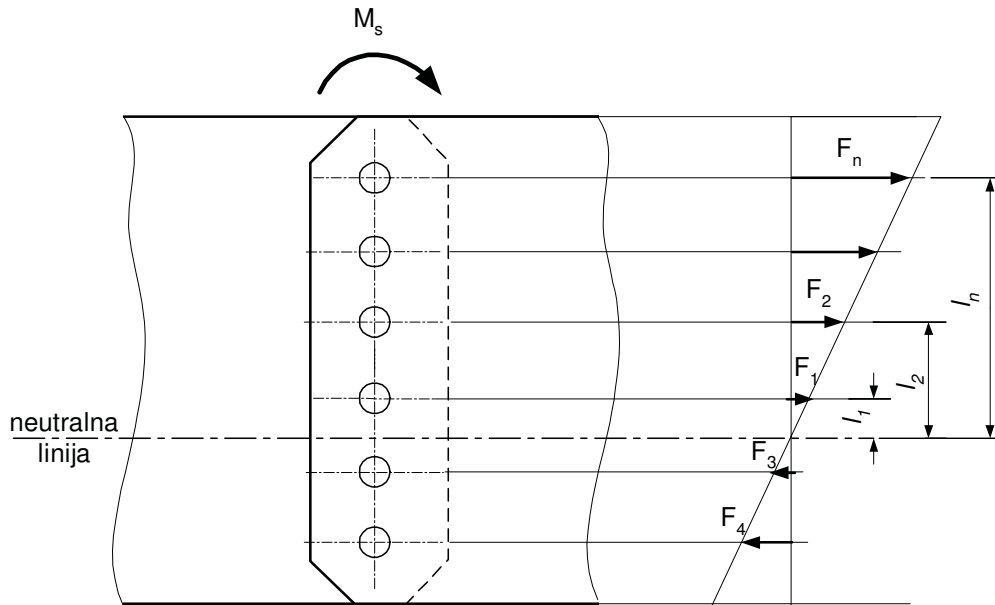


Slika 5.2.7 Sile u vijčanom spoju za slučaj kada je  $(h_{\max}/b) > 2$

Izraz (5.2.28) vrijedi za slučaj kada je spoj simetričan s obzirom na težište štapa (uzdužnu os), što je i najčešći slučaj. Za slučaj nesimetrične raspodjele vijaka, odnosno nesimetričnog položaja neutralne osi (slika 5.2.8), suma kvadrata udaljenosti od neutralne osi je kao i prije

$$\sum l_i^2 = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + \dots + l_n^2. \quad (5.2.29)$$

Sila  $F_n$  uspoređuje se i ovdje uspoređuje s nosivošću vijka na odrez i površinski pritisak.



Slika 5.2.8 Sile u nesimetričnom vijčanom spoju opterećenim momentom savijanja

Za slučaj veze opterećene istovremenom momentom savijanja  $M_S$ , uzdužnom silom  $F_a$  i poprečnom silom  $F_t$ , kao što je prikazano slikom 5.2.9, maksimalna sila u jednom (najudaljenijem) vijku dobije se kao rezultanta komponenti vanjskog opterećenja, odnosno rezultanta sile koja nastaje kao posljedica djelovanja momenta:

$$F_n = \frac{M_S \cdot l_n}{m \sum l_i^2}, \quad (5.2.30)$$

sile koja nastaje u vijku kao posljedica aksijalne sile:

$$F_{a1} = \frac{F_a}{m \cdot n} \quad (5.2.31)$$

te sile koja nastaje u vijku kao posljedica djelovanja poprečne sile:

$$F_{t1} = \frac{F_t}{m \cdot n}. \quad (5.2.32)$$

Rezultirajuća sile na jednom vijku je dakle

$$F_r = \sqrt{F_{t1}^2 + (F_{a1} + F_n)^2}. \quad (5.2.33)$$

Kao i u prethodnim slučajevima, ova rezultirajuća sila na jednom vijku mora biti manja od nosivosti vijka na odrez i površinski pritisak.

## Nastavci složenog presjeka

Štap može biti sastavljen iz više elemenata (profila  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{T}$ ) te u slučaju nastavka štapa potrebno je svaki od ovih pojedinih dijelova prekinuti i nastaviti. Obzirom da takav štap mora

biti u stanju prenositi momente te poprečne i uzdužne sile, potrebno je odrediti koliki dio opterećenja prenosi pojedini dio štapa. Moment savijanja  $M_S$  se tako dijeli na pojedine dijelove štapa proporcionalno momentu tromosti tih dijelova prema

$$M_d = M_S \frac{I_d}{I_x}, \quad (5.2.34)$$

gdje  $M_d$  predstavlja moment koji preuzima određeni dio čija je tromost  $I_d$ , dok je ukupni moment tromosti složenog presjeka  $I_x$ .

Poprečna sila  $F_t$  koja se prenosi, dijeli se na pojedine elemente presjeka štapa u slijedećem odnosu

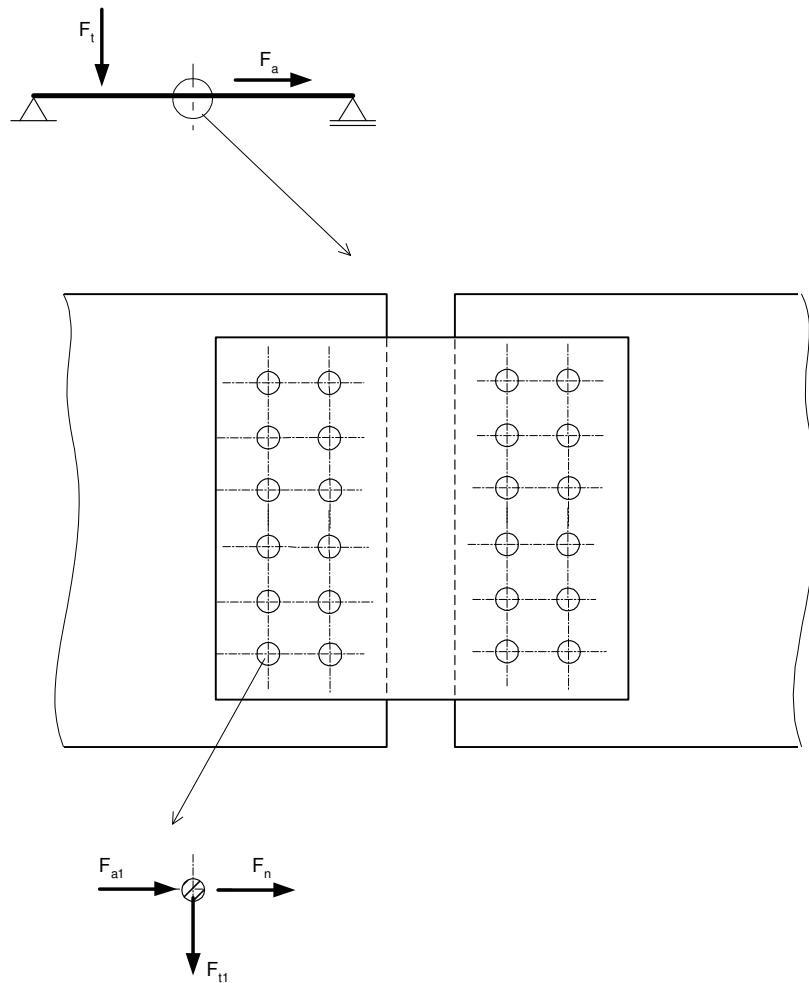
$$F_t : F_t^d = \frac{I_x}{S_x} : \frac{I_d}{S_d}, \quad (5.2.35)$$

gdje je  $F_t^d$  poprečna sila koju prenosi pojedini dio, dok je  $S_d$  statički moment polovine promatranog dijela štapa, odnosno  $S_x$  statički moment polovine presjeka ukupnog štapa.

Aksijalna sila  $F_a$  se također dijeli po pojedinim elementima, proporcionalno prema površini tih elemenata prema

$$F_a^d = F_a \frac{A_d}{A_x}, \quad (5.2.36)$$

gdje je  $A_d$  površina presjeka promatranog dijela, dok je  $A_x$  ukupna površina presjeka štapa.



Slika 5.2.9 Veza opterećena momentom, uzdužnom i poprečnom silom

### 5.3 Zavareni spojevi

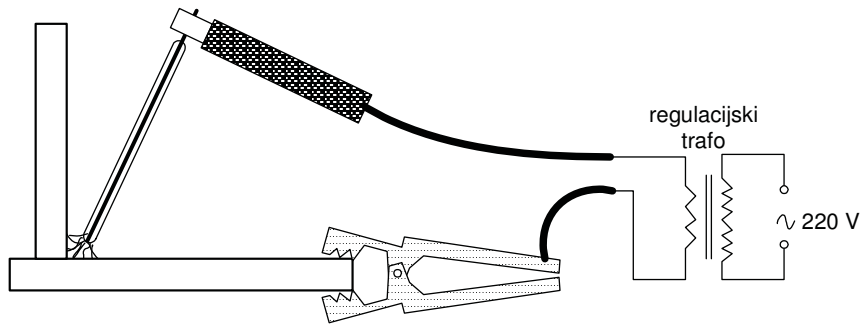
Zavarivanje predstavlja postupak spajanja metala njihovim lokalnim zagrijavanjem iznad temperature taljenja, sa ili bez nanošenja dodatnog materijala. Zavareni spojevi spadaju u nerastavljive spojeve.

Zavareni sklopovi su u odnosu na lijevane ili kovane spojeve i do 50% lakši (uz jednaku čvrstoću i krutost), dok je njihovo oblikovanje jednostavnije. Iz ovih razloga je zavarivanje postalo jedan od najvažnijih načina spajanja metalnih konstrukcija. Zavarivanje se široko primjenjuje u gradnji čeličnih konstrukcija poput mostova, dizalica, krovnih konstrukcija, zgrada, spremnika, elemenata strojeva (zupčanici, remenice,..) te u brodograđevnoj industriji. Tehnologija zavarivanja se naglo razvila u posljednjih pedesetak godina. Ima mnogo različitih zavarivačkih postupaka. U praksi najčešće susreću slijedeći postupci:

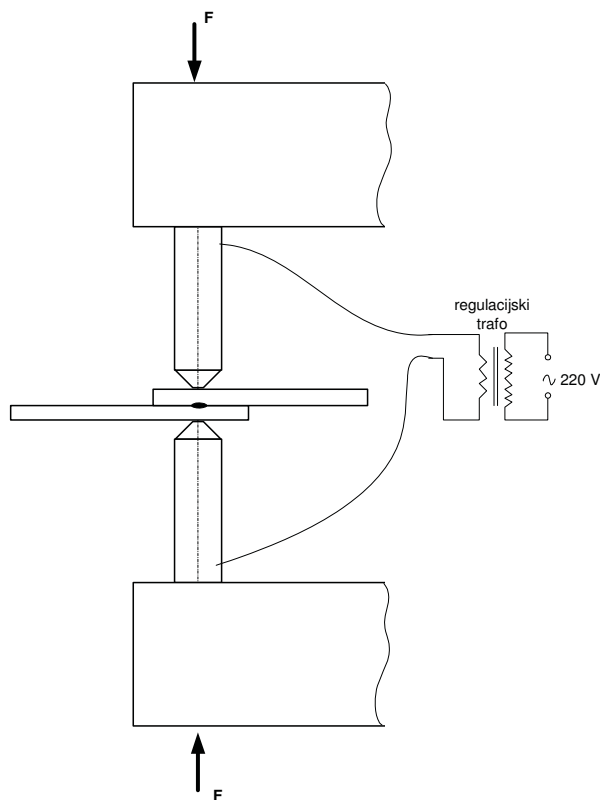
- postupci u kojima se taljenje metala vrši u električnom luku (sl. 5.3.1): REL (ručno elektrolučno), MIG (metal inert gas), MAG (metal active gas), TIG (thangstem inert gas). Kod MIG, MAG i TIG zavarivanja stvaranje nepoželjnih oksida izbjegava se

zavarivanjem u atmosferi zaštitnih plinova). Kod REL zavarivanja zaštitna atmosfera se stvara izgaranjem obloge elektrode.

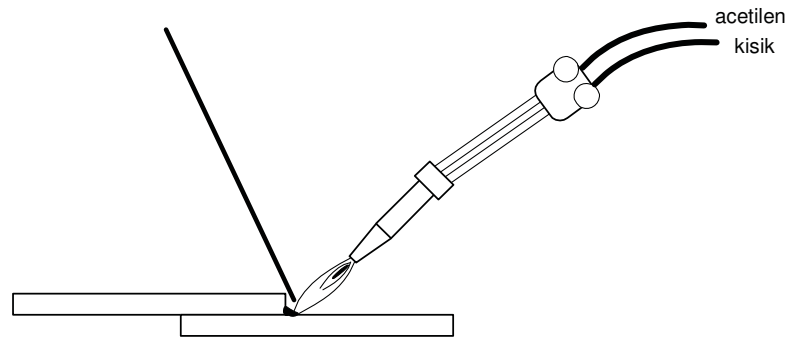
- elektrootporni postupci (sl. 5.3.2): dijelovi koji se zavaruju priključe se na izvor istosmjerne struje te zbog otpora prolasku struje dolazi do lokalnog zagrijavanja u točkama dodira i taljenja materijala. Primjer ovakvog spajanja je točkasto zavarivanje u autoindustriji.
- plinsko zavarivanje (sl. 5.3.3): dijelovi spoja i dodatni materijal se lokalno tale plinskim plamenom (acetilen koji izgara u struji kisika).



Slika 5.3.1 Elektrolučno zavarivanje

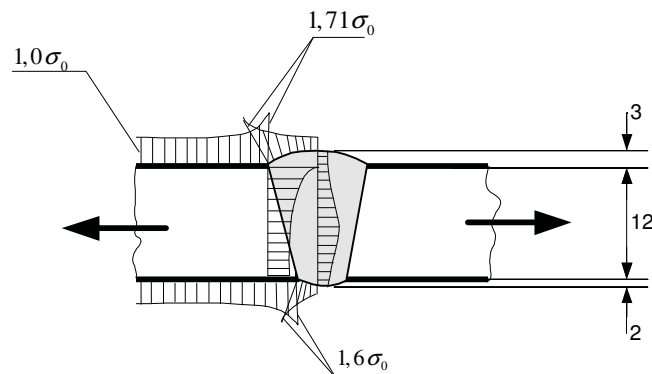


Slika 5.3.2 Elektrootporno (točkasto) zavarivanje

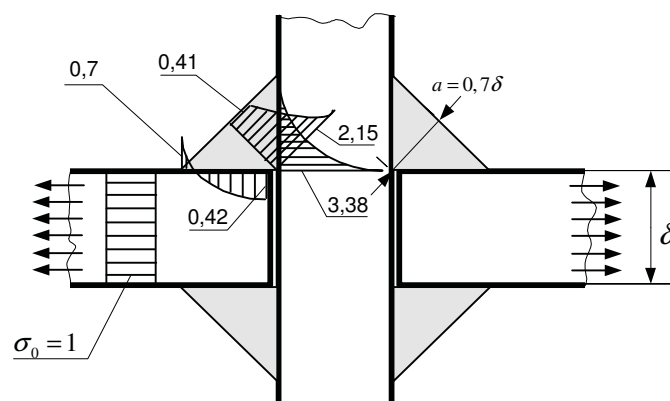


Slika 5.3.3 Plinsko zavarivanje

Zavar predstavlja diskontinuitet u osnovnom materijalu konstrukcije. Iako tok silnica nema skokovitih promjena, kao što je to slučaj kod vijčanih i zakovičnih spojeva, prisutne su koncentracije naprezanja u zoni zavara, kao što pokazuje slika 5.3.4 kod sučeonog spoja, odnosno slika 5.3.5 kod križnog spoja.



Slika 5.3.4 Raspored naprezanja u zavaru sučeonog spoja



Slika 5.3.5 Raspored naprezana u križnom zavarenom spoju

Koncentracija naprezanja izražava se koeficijentom naprezanja

$$\alpha_K = \frac{\sigma_{i\max}}{\sigma_0}, \quad (5.3.1)$$

gdje  $\sigma_{i\max}$  predstavlja najveće naprezanje pri idealno elastičnom ponašanju, dok  $\sigma_0$  predstavlja srednje računsko naprezanje.

Koncentracija naprezanje nije toliko nepovoljna kod statičnog opterećenja jer se lokalni vrhovi naprezanja uslijed lokalne plastifikacije istupljaju te na kraju, pri povećavanju opterećenja i prelasku cijelog presjeka u stanje plastičnog tečenja, izjednačavaju sa srednjim naprezanjem u presjeku.

Kod dinamičkog opterećenja konstrukcija materijal nema mogućnost da izvrši adaptaciju te na mjestu koncentracije naprezanja dolazi do početka loma. Iz ovog se razloga značajno razlikuju načini proračuna statički i dinamički opterećenih zavarenih konstrukcija. U oba se slučaja koriste saznanja iz nauke o čvrstoći.

### 5.3.1 Statički opterećeni zavari

#### Proračun čeonih zavora

Za slučaj statičkog opterećenja kod čeonih zavora ne traži se posebno provođenje dokaza čvrstoće. U slučaju kada se i vrši kontrola moći nošenja, važno je jedino pravilno definirati dopušteno naprezanje u zavaru iz razloga što u ovom slučaju spoj puca u osnovnom materijalu. Za ovakav slučaj opterećenja uvodi se koeficijent

$$k = \frac{\sigma_{\text{loma šava}}}{\sigma_{\text{loma osnovnog materijala}}}, \quad (5.3.2)$$

pa je zahtjev za računsko naprezanje

$$\sigma_{\text{rač}} \leq \sigma_{z,dop} = k \cdot \sigma_{dop}. \quad (5.3.3)$$

Dopuštena naprezanja čelika koji se često koriste kod metalnih konstrukcija dana su tablicom 5.3.1, dok su vrijednosti koeficijenta  $k$  za te iste materijale u ovisnosti o kvaliteti zavora dani tablicom 5.3.2.

Materijal i strojni dijelovi	Dopušteno ekvivalentno naprezanje $\sigma_{\text{ekv dop}} [MPa]$	Dopušteno vlačno naprezanje $\sigma_{\text{v dop}} [MPa]$	Dopušteno tlačno naprezanje $\sigma_{\text{T dop}} [MPa]$	Dopušteno smično naprezanje $\tau_{\text{dop}} [MPa]$
Č.0362	180		160	104
Č.0563	270		240	156

Tablica 5.3.1 Dopušteno naprezanje osnovnog materijal



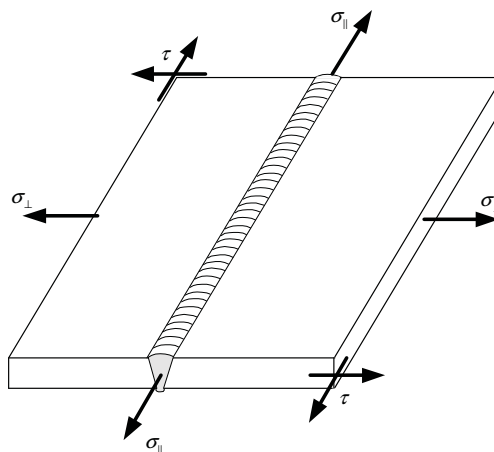
Kvaliteta zavara	Vrsta naprezanja	Vrijednos koeficijenta $k$	
		ČN 24 (Č.0362)	ČN 36 (Č.0563)
Specijalni kvalitet S	vlak ili savijanje	1,0	1,0
	tlak	1,0	1,0
	smik	0,6	0,6
kvalitet I	vlak ili savijanje	0,8	0,8
	tlak	1,0	1,0
	smik	0,6	0,6
kvalitet II	vlak ili savijanje	0,72	0,65
	tlak	1,0	0,8
	smik	0,55	0,5

Tablica 5.3.2 Koeficijent  $k$ 

Proračun se dalje provodi prema izrazima iz nauke o čvrstoći, pri tom poštujući slijedeće napomene:

1. Lokalni vrhovi naprezanja koji proističu iz uobičajenih konstrukcijskih oblika ne uzimaju se u obzir.
2. Zaostala naprezanja ne uzimaju se u obzir.
3. Ekvivalentno (reducirajuće, usporedno) naprezanje  $\sigma_{ekv}$  određuje se po hipotezi maksimalnog deformacijskog rada (HMH – Huber, Mises, Henkijeva teorija).

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq k \sigma_{dop} \quad (5.3.4)$$



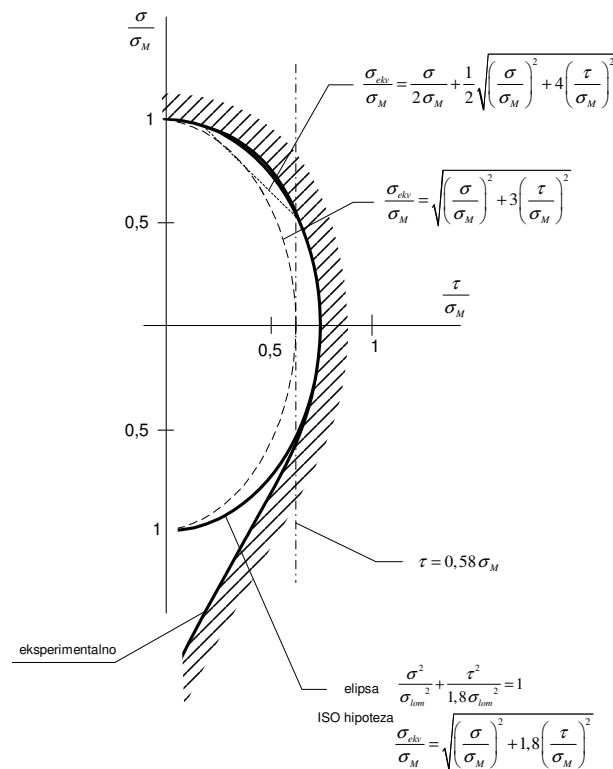
Slika 5.3.6 Naprezanja u spoju

## Proračun kutnih zavora

Pokusi su pokazali veliku složenost stanja naprezanja kod kutnih spojeva:

- u kutnim spojevima vladaju višeosna stanja naprezanja
- naprezanja su neravnomjerno raspodjela po presjeku i po dužini zavora
- u zavarima postoje, i pored svih naprezanja, vrlo visoka i različita zaostala naprezanja
- u raznim stupnjevima opterećenja vrši se pregrupiranje stanja naprezanja

Novija istraživanja (Univerzitet u Delftu – Nizozemska) su pokazala da teorija HMH ne odgovara kod kutnih spojeva iz razloga što postoje još druga maksimalna normalna naprezanja i maksimalna tangencijalna naprezanja. Slikom 5.3.7 prikazani su ekvivalentna naprezanja prema pojedinim hipotezama te usporedba sa pokusima statičkog opterećenja zavarenih spojeva.



Slika 5.3.7 Ekvivalentna naprezanja i eksperimentalni rezultati

Najbolje rezultate daje ISO-ova empirijska preporuka bazirana i na spomenutim Nizozemskim pokusima:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + k \tau^2}, \quad (5.3.5)$$

odnosno

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + k (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}, \quad (5.3.6)$$

gdje se uzima da je  $k=1,8$ , za razliku od HMH teorije gdje je  $k=3$ . Ovu preporuku usvojili su i naši propisi za zavarene čelične konstrukcije.

Točniji proračun kutnih zavora ne bi imao ni smisla pa su:

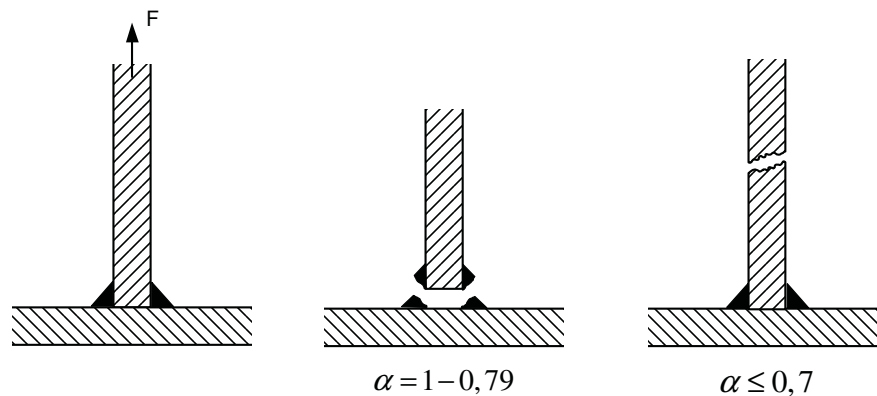
- pri mnogim pojednostavljenim pretpostavkama male šanse za točan rezultat
- ekonomski značaji mali, pošto su dimenzije ovih zavora često diktirane tehnološkim razlozima

Neki su pokusi (Čehoslovačka, Istočna Njemačka) pokazali da naprezanje  $\sigma_{\parallel}$  ne utječe na moć nošenja te ostaje dilema dali uopće ekvivalentno naprezanje računati s  $\sigma_{\parallel}$  ili ne.

Dok je kod sučeonog zavora jačina zavora jednaka jačini osnovnog materijala, kod kutnih zavora postoji odnos:

$$\alpha = \frac{F_{mat}}{F_{zav}}. \quad (5.3.7)$$

Slika 5.3.8 prikazuje iznos odnosa  $\alpha$  za slučaj kada nastaje lom u zavori, odnosno lom u osnovnom materijalu. Kad je ovaj odnos otprilike  $\alpha \approx 0,75$  tada postoji ekvivalentno naprezanje zavora i presjeka štapa.



Slika 5.3.8 Odnos  $\alpha$  za slučaj loma u zavori i materijalu

Oznake prilikom proračuna kutnih zavora prikazane su slikom 5.3.9. Radi pojednostavljenja naprezanja u ravnini AB projiciraju se na ravninu AC, odnosno AB'. Oznake za naprezanja su:

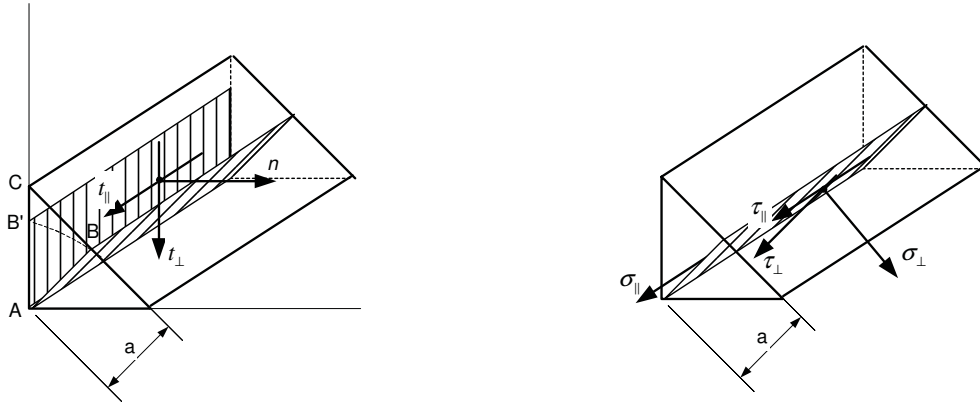
- $n$  – vlačno ili tlačno naprezanje u ravnini gdje je mjerodavni presjek zakrenut
- $t_{\perp}$  - smična naprezanja okomito na dužinu zavora u ravnini AB'
- $t_{\parallel}$  - smična naprezanja u pravcu dužine zavora u ravnini AB'
- $\sigma_{\perp}$  - vlačno ili tlačno naprezanje na zavar okomito na presjek u svom pravom položaju
- $\tau_{\perp}$  - smično naprezanje okomito na dužinu zavora u ravnini pravog položaja AB
- $\tau_{\parallel}$  - smično naprezanje paralelno s dužinom zavora u ravnini pravog položaja AB
- $\sigma_{\parallel}$  - normalno naprezanje koje djeluje uzduž zavora
- $\sigma_{ekv}$  - ekvivalentno naprezanje
- $\sigma_{z,dop}$  - dopušteno naprezanje zavora

Između veličina u ravnini pravog položaja AB i zakrenutoj ravnini AC (odnosno AB') vrijede slijedeće jednakosti:

$$\sigma_{\perp} = \frac{1}{2}n = \tau_{\perp}, \quad (5.3.8)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} t_{\perp} = \sigma_{\perp} \quad (5.3.9)$$

$$\tau_{\parallel} = t_{\parallel} \quad (5.3.10)$$



Slika 5.3.9 Naprezanja u zavaru

Nosivost kutnog zavara ovisi i o debljini kutnog zavara  $a$  (sl. 5.3.9). Nosivost zavara različite debljine obuhvaćeno je u propisima za zavarene čelične konstrukcije koeficijentom

$$\beta = 0,8 \left( 1 + \frac{1}{a} \right), \quad (5.3.11)$$

gdje se za  $a < 4 \text{ mm}$  uzima da je koeficijent  $\beta = 1$ . Iz ovog slijedi da je dopušteno naprezanje u kutnom zavaru

$$\sigma_{z,dop} = \beta \sigma_{dop} \quad (5.3.12)$$

pri čemu treba biti zadovoljeno

$$\sigma_{ekv} < \sigma_{z,dop} \quad (5.3.13)$$

Propisima je također regulirana debljina nosećeg kutnog zavara i ona iznosi od  $a = 3 \text{ mm}$  do najviše  $a_{\max} = 0,7 \delta_{\min}$  (samo iznimno se odobrava i  $a_{\max} = \delta_{\min}$ ).

Kako je u praksi moguć velik broj kombinacija naprezanja kutnih zavara, u tablicama su dani izrazi za najčešće slučajeve, i to (vidi prilog):

- aksijalno napregnuti štapovi (Tabela IV,4)
- spojevi izloženi normalnim i smičnim naprezanjima (Tabela IV,5)
- spojevi izloženi smičnim naprezanjima uslijed torzije (Tabela IV,6)

Kada se vrši dimenzioniranje, ovi tabelarni izrazi iz nauke o čvrstoći dovoljno su složeni da bi se iz njih dokučila jedinstvena veza svih naprezanja te debljine i dužine zavara. Iz tog su razloga u Tabelama IV,4 i IV,5 uokvireni izrazi koji na jedinstven način brzo vode do rješenja, tj. dimenzioniranja zavara.

Za ekstremno aksijalno napregnute zavare to se svodi na izraz

$$\frac{F}{\alpha \sum a \cdot l} \leq \sigma_{z,dop}, \quad (5.3.14)$$

gdje  $l$  predstavlja dužinu zavora, dok je sila  $F$  u Tabelama označena oznakom  $S$ . Kod kombinacija bočnih i čeonih zavora razlikuju se tri slučaja:

1.  $l_B > 1,5l_C$  - računa se kao da nema čeonog zavora
2.  $1,5l_C > l_B > 0,5l_C$  - ovisno o položaju čeonog zavora uzima se da bočni zavori prenose 1/3 opterećenja ili pak čeon na suprotnoj strani 1/3 opterećenja
3.  $l_B < 0,5l_C$  bočni zavori prenose samo 1/3 sile, dok ostatak prenose čeon

Za veze izložene normalnim i smičnim naprezanjima ti izrazi se svode na

$$\frac{M}{\alpha W} \leq \sigma_{z,dop}, \quad (5.3.15)$$

gdje je  $W = I/y$  aksijalni moment tromosti presjeka, dok koeficijent  $\alpha$  iznosi  $\alpha = 1,8$ . Ovi izrazi ne vrijedi za kratke konzole gdje je utjecaj poprečne sile velik u odnosu na moment ili je općenito veza osjetljiva prema smičnim naprezanjima.

### 5.3.2 Dinamički opterećeni zavori

Zavareni spojevi izloženi promjenljivom opterećenju posebno su osjetljivi na djelovanje zareza. Čeon zavareni spojevi su pri tome mnogo povoljniji od kutnih zavora. Dimenzioniranje ili samo kontrola promjenljivo opterećenog zavora se vrši na način da se izračuna vrijednosti naprezanja usporede s dopuštenim naprezanjem na zamor  $\sigma_{Ddop}$ .

Na veličinu dopuštenog naprezanja na zamor utječu:

- materijal
- odnos  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$
- vrsta spoja

Naprezanja mogu biti normalna, tangencijalna ili ekvivalentna, pri čemu sva ta naprezanja moraju biti manja od dopuštenog, dakle potrebno je zadovoljiti:

$$\sigma < \sigma_{Ddop}, \quad (5.3.16)$$

$$\sigma_{ekv} < \sigma_{Ddop}, \quad (5.3.17)$$

$$\tau < \tau_{Ddop}. \quad (5.3.18)$$

Podaci za  $\sigma_{Ddop}$  u ovisnosti o gornja tri parametra nalaze se u tabelama propisa i standarda.

### Ponašanje čelika pri promjenljivom opterećenju – zamor

Do loma na konstrukcijskom elementu može doći ako je naprezanje manje od dopuštene statičke granice izdržljivosti u slučaju da se konstrukcijski elemente opterećuje dovoljno puta pri naprezanju između  $\sigma_d$  i  $\sigma_g = \sigma_{\max} < \sigma_M$ , pri čemu  $\sigma_M$  predstavlja lomnu čvrstoću materijala pri zavaru. Karakteristične veličine koje utječu na ovaj broj potrebnih opterećenja da dođe do loma su:

- razlika naprezanja  $(\sigma_g - \sigma_d)$
- srednje naprezanje  $\sigma_{sr}$

Naprezanje  $\sigma_{\max}$  je ono naprezanje koje materijal može izdržati bezbroj puta, a da se ne slomi te se naziva *dinamička čvrstoća* i označava sa  $\sigma_D$ .

Lom izazvan višestrukim opterećenjem ispod njegove lomne čvrstoće (statičke) naziva se *lom od zamora* i bitno se razlikuje od statičkog loma (po karakterističnoj prijelomnoj površini i odsutnosti velikih plastičnih deformacija).

Lom nastaje od mjesta *unutrašnje* ili *vanjske greške*, gdje dolazi do *velike lokalne koncentracije* naprezanja te zbog nedostatka vremena za plastifikaciju, ista se širi, što izaziva lom u trenutku kada preostali dio presjeka više ne može izdržati ni statičku silu (silu prednapona). Iz ovoga proizlazi da na dinamičku čvrstoću presudan utjecaj imaju greške, prvenstveno *zarezi* odnosno *vanjski oblik konstrukcije elementa i kvaliteta izrade*.

Vrste promjenljivog opterećenja u ovisnosti o minimalnom i maksimalnom opterećenju, te srednjeg opterećenja, pri čemu je odnos naprezanja

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (5.3.19)$$

odnosno

$$r = \frac{F_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (5.3.20)$$

Iz velikog broja pokusa i analiza nije pronađeno precizno fizičko objašnjenje uzroka loma (energetski temelji) niti zakonitosti među ovim naprezanjima i brojeva promjena opterećenja. Sve što se sa sigurnošću može konstatirati su grafički prikazi odnosa naprezanja i broja opterećenja do loma.

Pri tom se postavljaju dva ključna pitanja:

- koje su to vrijednosti  $\sigma_{\max}$  i  $\sigma_{\min}$  koje pri određenom broju ciklusa  $n$  izazivaju lom ?
- koliki je broj opterećenja potreban da pri zadanom naprezanju  $\sigma_{\max}$  i odnosu  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  dođe do loma?

Zamisli li se slučaj naizmjeničnog naprezanja kada je maksimalno vlačno naprezanje jednako maksimalno tlačnom, amplituda je definirana kao polovina razlike između  $\sigma_{\max}$  i  $\sigma_{\min}$  te se takvo naprezanje naziva čisto naizmjenično naprezanje

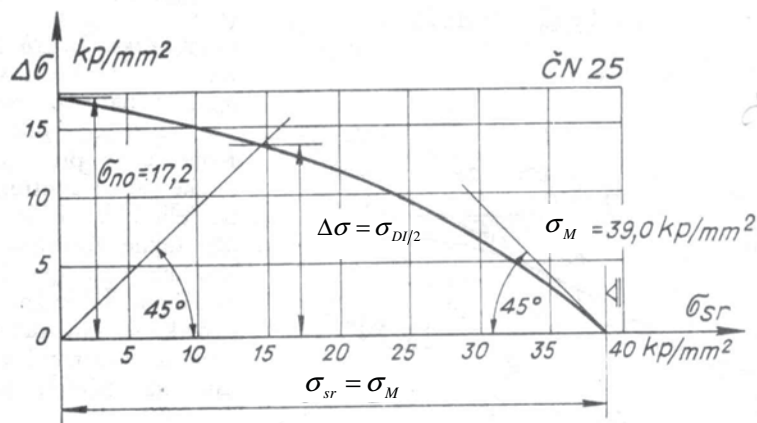
$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad (5.3.21)$$

dok je srednje naprezanje nekog promjenljivog naprezanja

$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}. \quad (5.3.22)$$

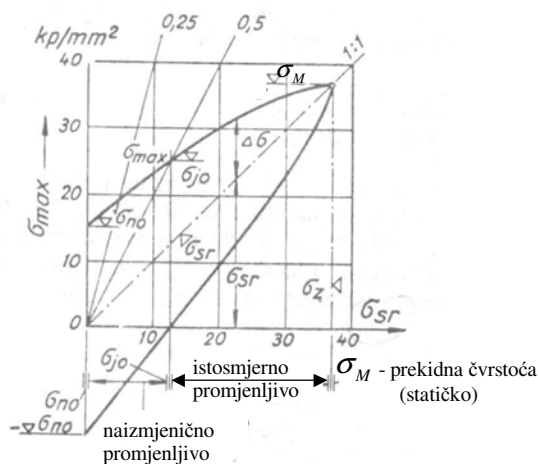
Odgovor na prvo gore postavljeno pitanje dao je Stüssi (1958) po kome je osnovna veličina pri naprezanju na zamor čisto naizmjenično naprezanje  $\Delta\sigma$ , kao što je prikazano slikom 5.3.10 gdje su dani odnosi pri promjenljivom naprezanju pri čemu je bitno naglasiti da:

- za  $\sigma_{sr} = 0$  vrijedi  $\Delta\sigma = \sigma_{DN(-1)} = \sigma_{n0}$
- za pravac  $\alpha = 45^\circ$  vrijedi  $\Delta\sigma = \sigma_{Dl/2}$
- za  $\sigma_{sr} = \sigma_M$  vrijedi  $\Delta\sigma = 0$

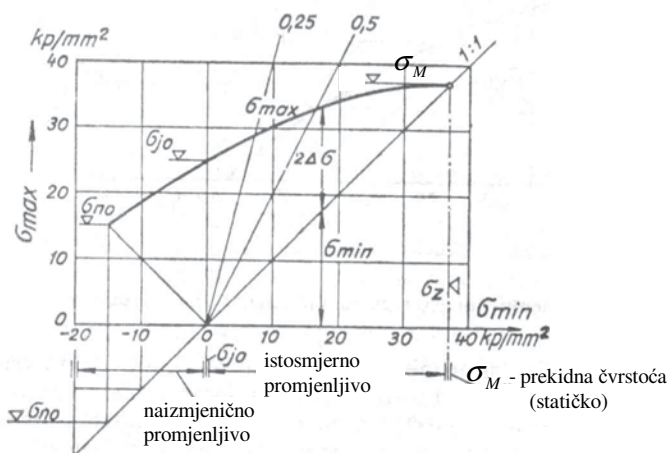


Slika 5.3.10 Odnosi pri promjenljivom naprezanja prema Stüssi-ju (1958)

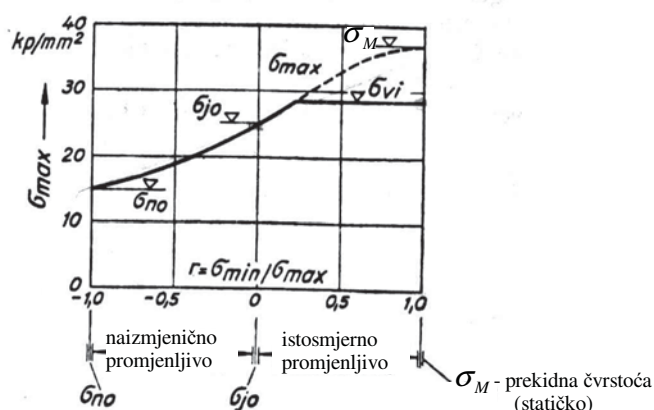
Također odgovor na prvo pitanje dobiveni su nizom pokusa, te obzirom što se nanosi u dijagramima postoje različiti grafički prikazi (sl. 5.3.11, 5.3.12 i 5.3.13).



Slika 5.3.11 Smith-ov dijagram



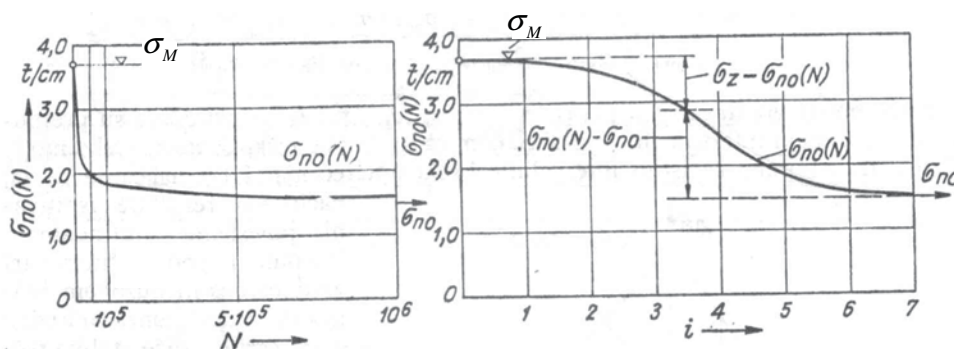
Slika 5.3.12 Gerber-Lourhard-ov dijagram



Slika 5.3.13 Moore-Jaspers-ov dijagram

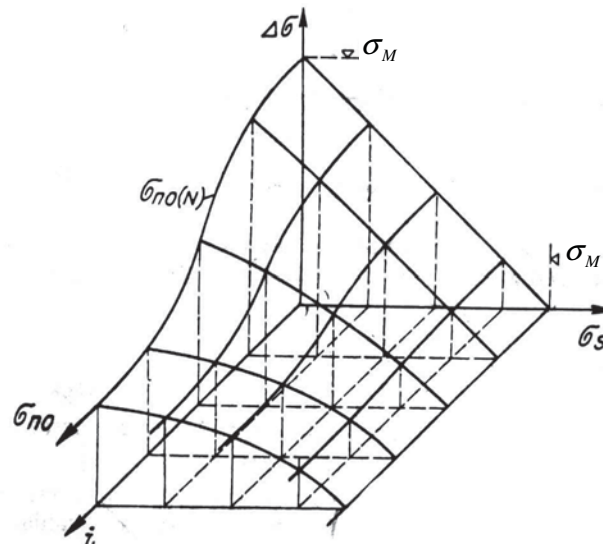
Koji će se od prethodnih dijagrama koristiti ovisi o želji da se neka veličina posebno istakne. Kod nas je najčešće u upotrebi Smithov dijagram.

Odgovor na drugo gore postavljeno pitanje daje predstavlja Wöhlerova krivulja (slika 5.3.14) koja predstavlja prekidnu čvrstoću neizbrušenog elementa iz ČN24 za čisto naizmjenično naprezanje kao funkciju broja promjena opterećenja  $N$ , odnosno  $i = \log N$ . Za razne vrijednosti srednjih naprezanja slika 5.3.15 prikazuje grafički prikaz čitavog područja zamora.



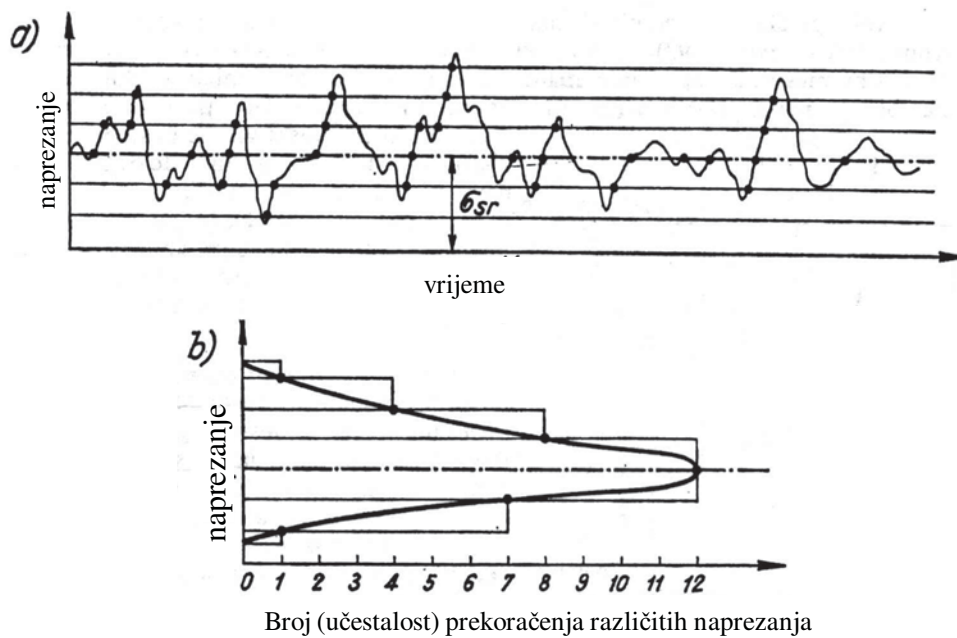
Slika 5.3.14 Wöhlerova krivulja





Slika 5.3.16 Grafički prikaz cijelog područja zamora

U stvarnosti se dinamička opterećenja nemaju sinusoidni karakter, kako što je to bio slučaj kod prethodnih dijagrama, dakle nisu pravilna ni po frekvenciji ni po amplitudi već se radi o stohastičkom karakteru napreznja (slika 5.3.17a). Radi toga je potreban pokazatelj učestalosti opterećenja (slika 5.4.17b) gdje sumarna linija učestalosti pokazuje koliko će puta određeni nivo (razina) napreznja biti zastupljen u određenom vremenu ili u cijelom vijeku trajanja konstrukcije.



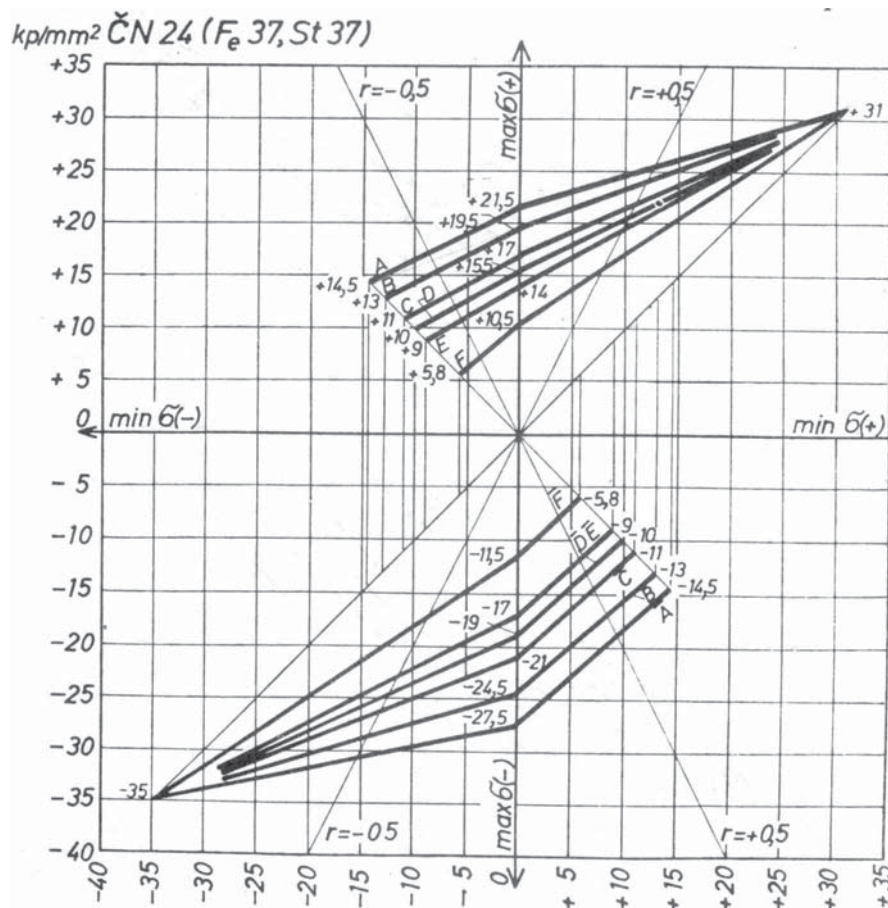
Slika 5.3.17 Stohastički karakter opterećenja i učestalost opterećenja

Naprezanje koje materijal može izdržati pod ovakvim stalno promjenljivim opterećenjem naziva se *radna čvrstoća zamora*. Poznavanje ove čvrstoće važno je radi povećanja ekonomičnosti konstrukcije jer ista može podnijeti manji broj većih naprezanja u radnom vijeku bez štete. Uobičajeno je da se predvidi ukupni broj ciklusa  $N$  s minimalnim gornjim opterećenjem  $F_g$ , koji će u toku vijeka trajanja biti dosegnut ili prekoračen i to u jednom od četiri područja:

- $N_1$  od  $2 \cdot 10^4$  do  $2 \cdot 10^5$
- $N_2$  od  $2 \cdot 10^5$  do  $6 \cdot 10^5$
- $N_3$  od  $6 \cdot 10^5$  do  $2 \cdot 10^6$
- $N_4$  preko  $2 \cdot 10^6$

## Čvrstoća na zamor zavarenih spojeva

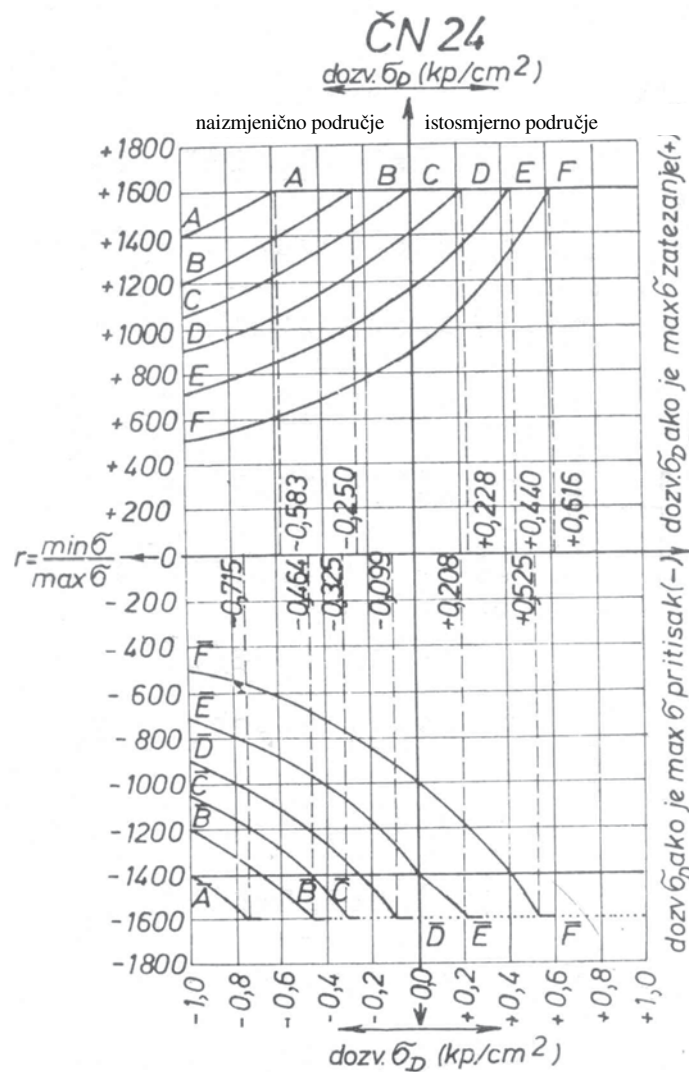
Prije je istaknuto da najveći utjecaj na zamornu čvrstoću, tj. dinamičku izdržljivost zavora imaju zarezi, odnosno koncentracije naprezanja. Stoga je i logična ovisnost dinamičke čvrstoće zavora o materijalu i obliku samog zavarenog mjesta. Ove čvrstoće prikazane su za ČN24 na slici 5.3.18.



Slika 5.3.18 Dinamička čvrstoća za ČN24

Proračun zavarenih konstrukcija pri dinamičkom (dakle promjenljivom) opterećenju vrši se u odnosu na zamor na način da se izračunata naprezanja (prema nauci o čvrstoći) usporede s dopuštenim naprezanjem na zamor  $\sigma_{Ddop}$ .

Način određivanja  $\sigma_{D dop}$  u ovisnosti o vrste spoja, graničnih vrijednosti napreznja i odnosa  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  prikazan je za ČN24 na slici 5.3.19.



Slika 5.3.19  $\sigma_{D dop}$  u ovisnosti o  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  i obliku zavarenog mjesta

Kada se odredi  $\sigma_{D dop}$ , onda se najveće izračunate vrijednosti normalnih, tangencijalnih i ekvivalentnih napreznja uspoređuju s dopuštenim, tj. mora biti zadovoljeno:

$$\sigma_{\max} < \sigma_{D dop}, \quad (5.3.23)$$

$$\tau_{\max} < \tau_{D dop}, \quad (5.3.24)$$

$$\sigma_{ekv \max} < \sigma_{D dop}. \quad (5.3.25)$$

Dopuštena napreznja odnose se kako na sam zavar, tako i na okolni materija koji je uslijed zavarivanja pretrpio promjene.

Praktički se  $\sigma_{D dop}$  sasvim približava dinamičkoj čvrstoći  $\sigma_D$  iz razloga:

1. način dobivanja  $\sigma_D$  je zasnovan na pokusima gdje se epruveta opterećuje neprekidno s istom frekvencijom i amplitudom, što u stvarnosti nije slučaj
2. teško da će se maksimalna naprezanja javiti  $2 \cdot 10^6$  puta

Može se reći da za oblik zavarenog mjesta A, B, C, D razlika između  $\sigma_D$  i  $\sigma_{D dop}$  je oko 10%, dok je za oblik zavarenog mjesta E i F razlika oko 25%.

Kako najviša dozvoljena vrijednost naprezanja mora biti manja od dopuštenog naprezanja na zamor, koje je uvijek manje od dopuštenog statičkog naprezanja, općenito vrijedi za maksimalne vrijednosti vlačnog, tlačnog i ekvivalentnog naprezanja

$$\max \sigma < \sigma_{D dop} < \sigma_{dop}, \quad (5.3.26)$$

$$\max \tau < \tau_{D dop} < \tau_{dop}, \quad (5.3.27)$$

$$\max \sigma_{ekv} < \sigma_{D dop} < \sigma_{dop}. \quad (5.3.28)$$

## Suvremene tendencije u oblasti zavarenih spojeva izloženih zamoru

U nisu zemalja vrše se pokusi zamaranjem zavarenih spoja iz više razloga, od kojih su najvažniji:

- ponašanje malih epruveta u odnosu na velike konstrukcije nije jednako
- zaostala naprezanja se ne mogu zanemariti
- konstrukcija se može srušiti i sa manje od  $10^5$  opterećenja ako je broj velikih opterećenja velik prema Miner-ovoj hipotezi "kumulativnog oštećenja", tj. neoštećena ako je  $\sum n/N \leq 1$ , gdje je  $n$  broj promjena opterećenja sa određenom vrijednošću  $\sigma_a$ , dok je  $N$  broj ciklusa kod kojeg pri određenom opterećenju  $\sigma_a$  nastupa lom (Wöhlerova krivulja)
- ustanovljeno je da za lom nije toliko mjerodavan odnos  $r = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  koliko  $\sigma_a$ , tj.  $\Delta\sigma$  koji u superpoziciji sa zaostalim naprezanjima izaziva lom
- proučava se širenje pukotina (mehanika loma)
- nakon niza eksperimenata provedenih u SAD, mijenjali su se i popisi o određivanju  $\sigma_{D dop}$  (SAD, Švicarska i dr.), na način da se konstrukcije kategoriziraju prema broju učestalosti određenog opterećenja, oblika zavarenog mjesta (A, B, C, D, E, F), utjecaja zarezova ili dinamičke izdržljivosti
- uvodi se pojam relativne čvrstoće zavara  $\sigma_{D(N)}$  kao i pojam *pogonske čvrstoće* ili *pogonske izdržljivosti*

### 5.3.3 Utjecaj zavarenih spojeva na dinamičku izdržljivost

Dinamička izdržljivost zavarenih spojeva od presudne je važnosti za pouzdanost konstrukcije u eksploataciji. Rezultati pokusa za različite materijale i vrste naprezanja, prvenstveno vlačne-tlačne odnose se na relativno male ispitne uzorke ili epruvete te se prikazuju Smithovim dijagramima dobivenim iz većeg broja Wöhlerovih krivulja. Stvarno ponašanje zavara i s tim u

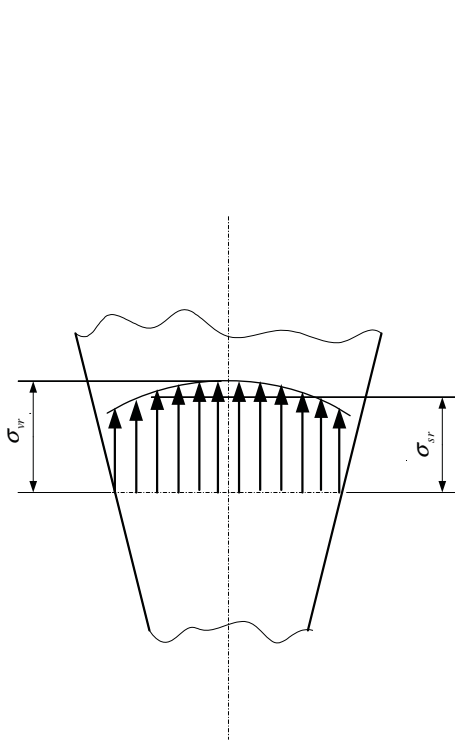
vezi cijele konstrukcije, u realnim uvjetima korištenja ovisno je o nizu drugih činioca osim materijala i opterećenja.

Najvažniji od utjecaja na pojavu zamora su:

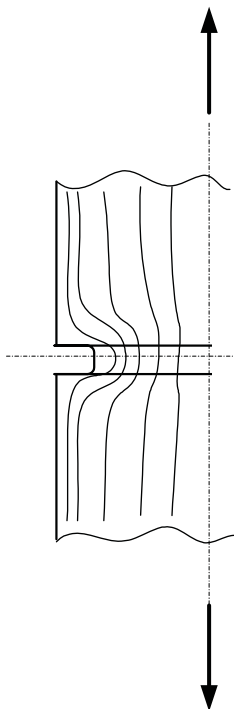
- utjecaj zarez
- utjecaj tehnologije zavarivanja
- utjecaj oblikovanja zavarenog spoja
- utjecaj vrste materijala
- utjecaj grešaka pri zavarivanju
- utjecaj temperature okoline
- utjecaj zaostalih naprezanja
- utjecaj krutosti konstrukcije i dr.

## Utjecaj zarez na dinamičku izdržljivost

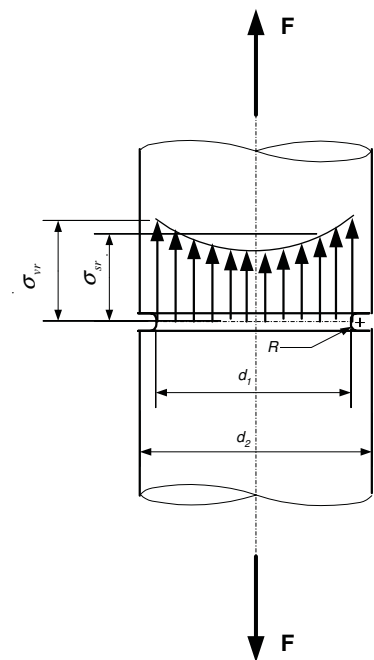
Općenito kod statički opterećenih konstrukcija, a za razliku od nosača kontinuiranog poprečnog presjeka s jednolikom raspodjelom naprezanja, kod nosača promjenljivog poprečnog presjeka uz mjesta promjena presjeka javlja se nejednolika raspodjela naprezanja i vršna naprezanja. Kod koničnog štapa sa slike 5.3.20, povećanjem kuta konusa raste i vršno naprezanje koje je veće od srednjeg naprezanja. Srednje naprezanje bi bilo naprezanje koje se javlja kod idealnog glatkog cilindričnog štapa. U cilju dobivanja jasne slike o koncentraciji naprezanja, crta se *silocrt* (sl. 5.3.21), kod kojeg gustoća pokazuje intenzitet polja naprezanja, a tangente na silocrt smjer. Iz silocrt na slici 5.3.21 vidljivo je da je naprezanje najveće u području utora, dok se podalje od utora gubi utjecaj utora te naprezanje postaje konstanto i jednako srednjem naprezanju. Slikom 5.3.22 prikazana je razdioba naprezanja u području utora za vlačno opterećeni okrugli štap sa zaobljenim utorom.



Slika 5.3.20 Konični štap



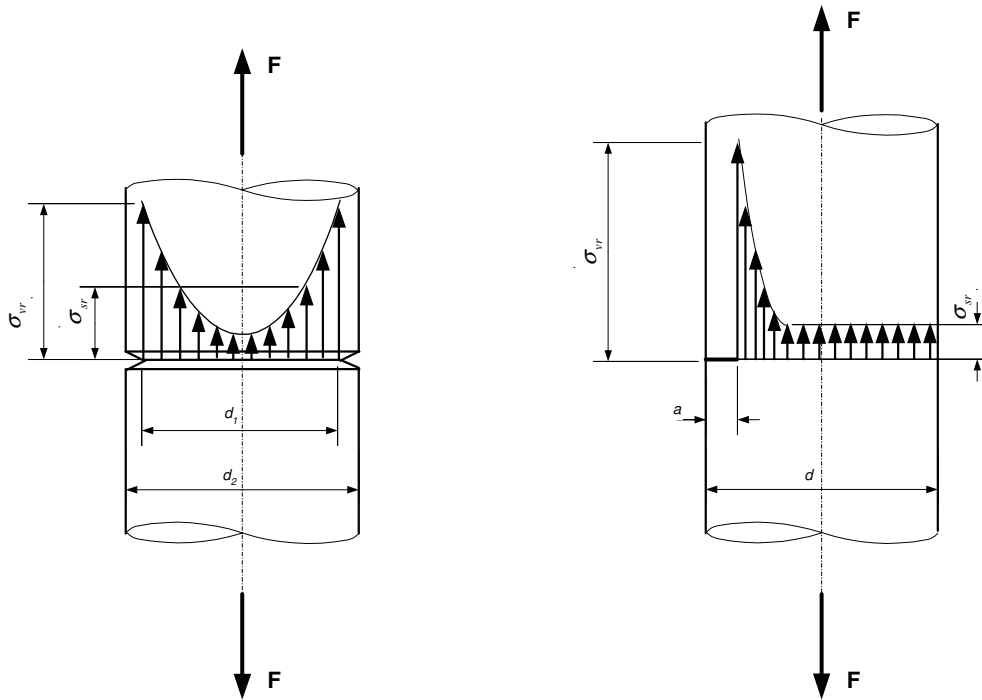
Slika 5.3.21 Silocrt



Slika 5.3.22 Okrugli štap sa

zaobljenim utorom

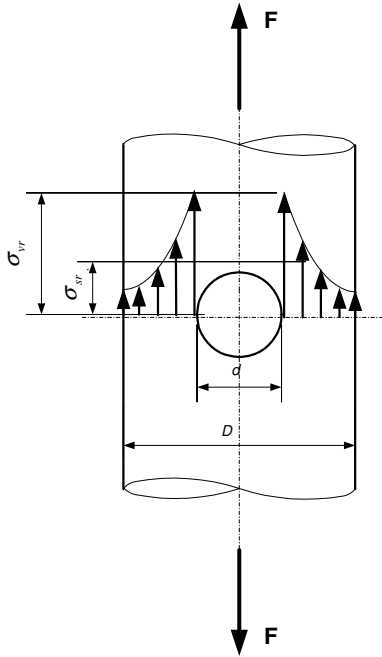
Za slučaj vlačno opterećenog okruglog štapa s oštrim utorom (sl. 5.3.23), vršna napreznja su veća od onih kod štapa s oblim utorom (sl. 5.3.22). U slučaju nastanka male površinske pukotine (sl. 5.3.24), vršno napreznje znatno je veće od prethodna dva slučaja kad postoje utori. Ovo je razlog zbog kojeg dolazi do širenja pukotina i loma štapa, što je naročito naglašeno kod dinamičkih opterećenja.



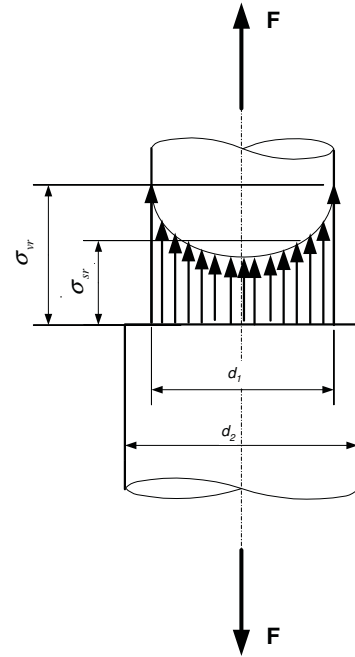
Slika 5.3.23 Okrugli štap s oštrim utorom

Slika 5.3.24 Okrugli štap s površinskom pukotinom

Razni provrti, potrebni zbog konstrukcijske izvedbe štapa, imaju također negativan utjecaj te izazivaju veliko vršno napreznje u području oko provrta (sl. 5.3.25). Aksijalno opterećena vratila kod kojih postoji smanjenje/povećanje (redukcija) presjeka također imaju znatna vršna napreznja (sl. 5.3.26).



Slika 5.3.25 Okrugli štap s poprečnom rupom



Slika 5.3.26 Okrugli štap s redukcijom presjeka

Prilikom opterećenja na savijanje (sl. 5.3.27) i uvijanje (sl. 5.3.28), također dolazi do znatnih vršnih napreznja. Čvrstoća ravnih profila, npr. limova, ploča, traka ili valjanih profila, bitno je smanjena u područjima u kojima postoje provrti (sl. 5.3.29).

Na slici 5.3.29 vidljiv je veliki utjecaj vršnih napreznja. U praksi se vršna napreznja definiraju preko faktora oblika

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{vr}}{\sigma_{sr}}. \quad (5.3.29)$$

Faktori oblika za karakteristične presjeke mogu se očitati iz tablica, odrediti eksperimentalno ili pak numerički.

Kod dinamički opterećenih konstrukcija, utjecaj koncentracije napreznja uzima se kroz koeficijent ureza definiran kao

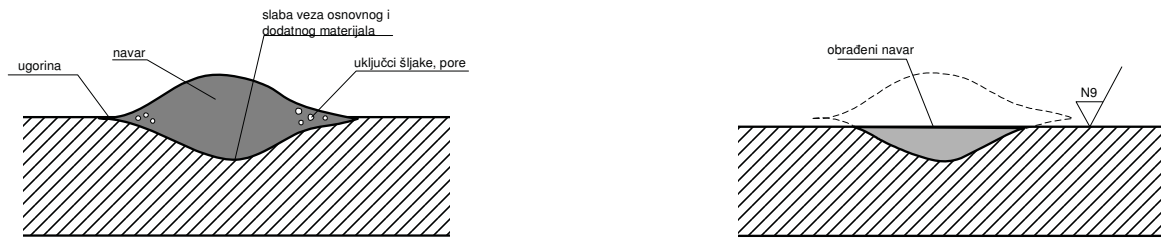
$$\beta_K = 1 + \eta_K (\alpha_K - 1), \quad (5.3.30)$$

gdje koeficijent  $\eta_K$ , koji se kreće u granicama  $\eta_K = [0.2, \dots, 1]$ , ovisi o materijalu. Koeficijent ureza određuje odnos dinamičke čvrstoće između glatkog uzorka i uzorka s zarezom,

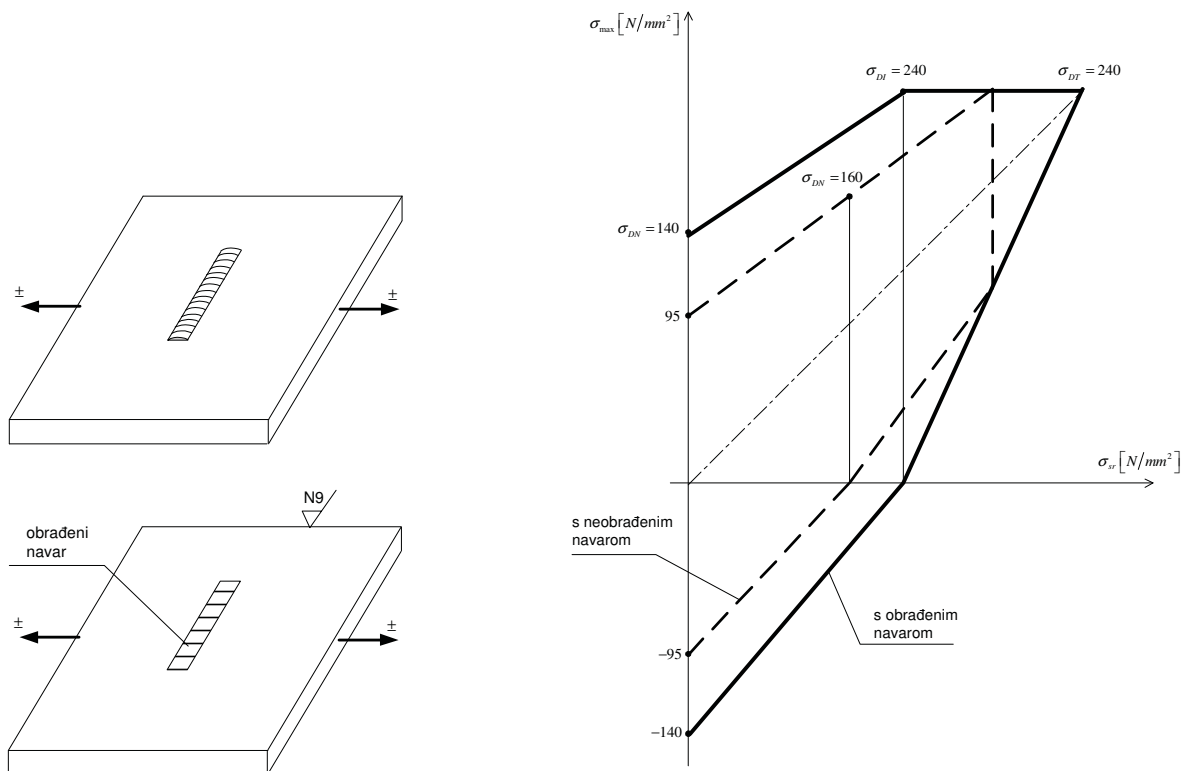
$$\beta_K = \frac{\sigma_{D, \text{glatki}}}{\sigma_{D, \text{sa zarezom}}}. \quad (5.3.31)$$

Dinamička izdržljivost zavarene probne palice niža je od izdržljivosti nezavarene probne palice. Sniženje dinamičke izdržljivosti je izazvano zareznom djelovanjem samog zavara. Zarezi (sl. 5.3.27) koji se u zavaru javljaju mogu biti unutrašnji (npr. pore, krajevi zavara, mjehurići plina i razni uključci) ili vanjski (krajnji krateri, ugorine, prijelazi i dr.). Obrađivanjem zavara bitno se povećava dinamička izdržljivost. Na slici 5.3.28 prikazan je Smitnov dijagram neobrađenog i obrađenog navara. Sam navar uzrokuje značajan pad  $\sigma_{DI}$  i  $\sigma_{DN}$  do čega ne dolazi iz razloga promjene toka sila već uslijed zarezno djelovanja koje nastaje bržim hlađenjem krajeva navara

što uzrokuje ugorine te "zamrzavanje" mjehurića plinova i šljake. Obradom navara odstranjuje se ovo loše područje navara te se bitno poboljšava dinamička izdržljivost.




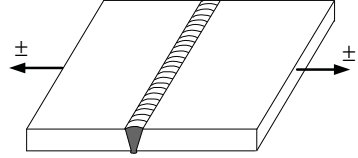
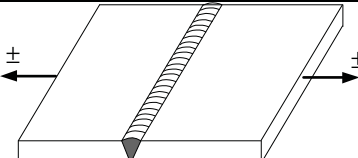
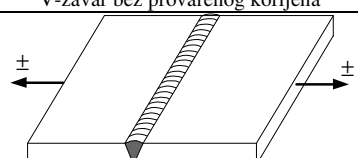
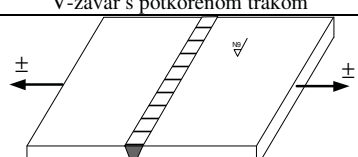
Slika 5.3.27 Neobrađeni i obrađeni navar



Slika 5.3.28 Smithov dijagram za neobrađeni i obrađeni navar

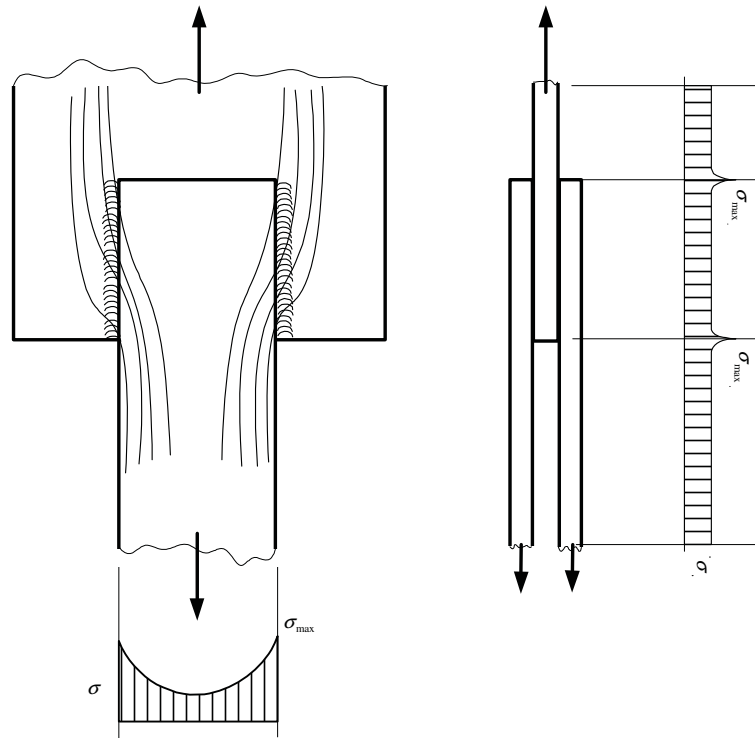
Slično navaru, obrada kod V zavara pri spajanju dvaju limova bitno utječe na dinamičku izdržljivost, kao što pokazuje tablica 5.3.3.



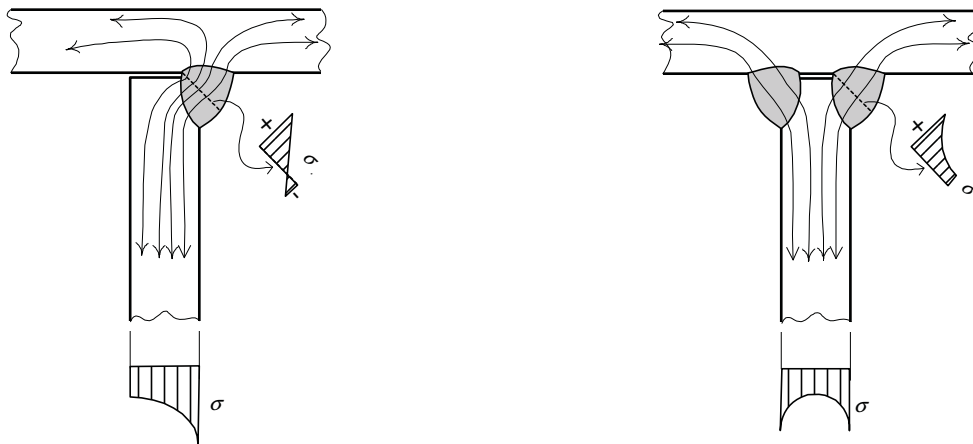
	Materijal	Mehanička svojstva [N/mm <sup>2</sup> ]		
		$\sigma_T$	$\sigma_{DI}$	$\sigma_{DN}$
 nezavareni limovi	Č.0562	360	310	180
	Č.0362	340	240	140
 V-zavara, žlijebljen uz provaren korijen	Č.0562	360	170	100
	Č.0362	240	160	95
 V-zavar bez provarenog korijena	Č.0562	-	-	-
	Č.0362	240	120	70
 V-zavar s potkorenom trakom	Č.0562	360	170	100
	Č.0362	240	150	95
 obrađeni V-zavar s provarenim korjenom i žlijebom za izvođenje kraja zavora	Č.0562	360	280	160
	Č.0362	240	220	130

Tablica 5.3.3 Mehanička svojstva V-zavora

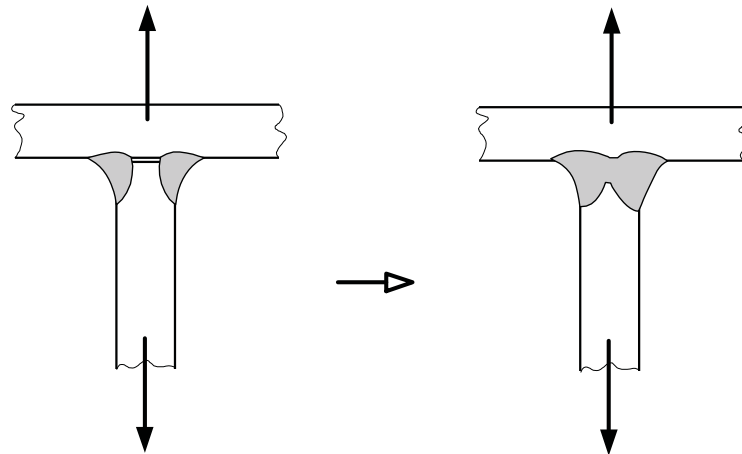
Kod kutnih se zavora, za razliku od sučeonih, lomi tok sila dva puta (sl. 5.3.29). Kao što se vidi na slici (5.3.29) krajevi kutnih zavora izazivaju koncentraciju naprezanje te obrada krajnjih kratera kutnog zavora povećava dinamičku izdržljivost. Oblikovanje samog zavora od bitnog je utjecaja, naročito kod T spoja (sl. 5.3.30) gdje uvijek treba nastojati ostvariti obostrani kutni zavar (slika 5.3.30) te međusobno spajanje korijena kutnih zavora (sl. 5.3.31).



Slika 5.3.29 Lom toka silnica kod kutnih zavara



Slika 5.3.30 Tok silnica kod jednostrukog i dvostrukog kutnog zavara



Slika 5.3.31 Međusobno spajanje korijena kutnih zavora

## Utjecaj temperature na zavarene spojeve

Svi podaci o mehaničkim svojstvima, osim iznimno žilavost materijala, daju se pri sobnoj temperaturi. Čest je slučaj da zavarena konstrukcija biva korištena pri temperaturama znatno nižim ili višim od sobne.

Poznavanje utjecaja eksploatacije na materijal i zavare pri višim temperaturama osnova je za pouzdan rad energetske i procesne opreme. Praćenje pojava u materijalu i zavaru vrši se analizom i ostalih parametara (radni tlak, naprezanje, radni medij, trajanje eksploatacije) uz istovremeno praćenje radne temperature. Pod višim temperaturama podrazumijeva se temperatura do 600°C. Promjene koje nastaju u materijalu, posebno u zavaru, su prvenstveno negativne i to:

- promjena mehaničkih svojstava
- promjena strukture
- pouzdanost
- toplinska krutost
- toplinski zamor i termošokovi
- korozija
- erozija

*Mehanička svojstva* se u principu smanjuju, a postotak ovisi o temperaturi i sastavu (strukтури) čelika.

*Pouzdanost* je svojstvo metala da se pod utjecajem dugotrajnog naprezanja na višim temperaturama neprekidno plastično deformira (redovita pojava iznad 450°C). Ako materijal dugo "radi" u uvjetima pouzdanosti doći će do njegovog razaranja i pri znatno nižim temperaturama od vlačne čvrstoće za određene temperature.

*Toplinska krutost* se javlja kod fero-perlitnih čelika kod 400°-500°C gdje nakon dugog zadržavanja naglo pada udarna žilavost dobivena kod sobne temperature. Upravo su mjesta zavora najopasnija te se obično tu inicira lom.

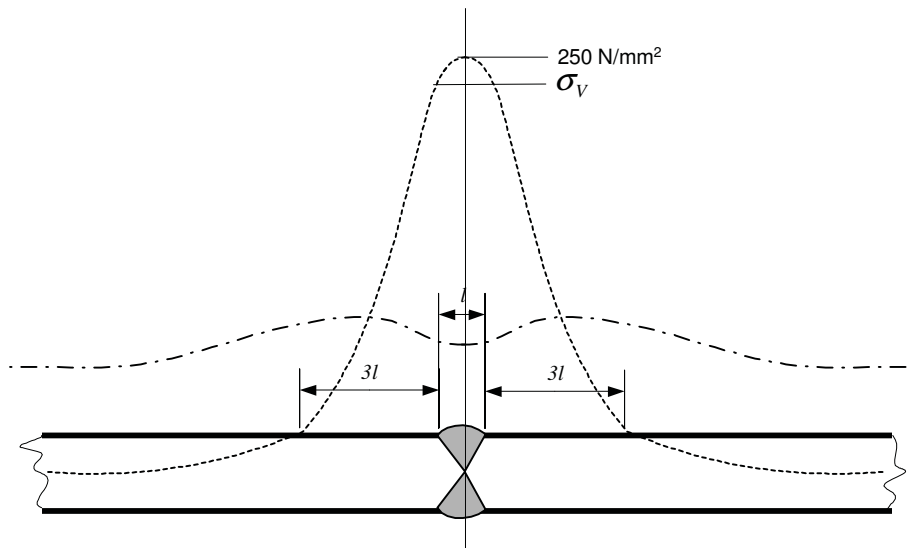
*Toplinskim zamorom* naziva se razaranje metala pod djelovanjem toplinskih naprezanja uvjetovanih naizmjeničnim zagrijavanjem i hlađenjem. Teoretska objašnjenja pojave toplinskog zamora su vrlo štura.

## Utjecaj zaostalih naprezanja

Pri formiranju zavara, kao rezultat metalurških procesa, dolazi do unutrašnjih naprezanja. Ova naprezanja mogu dovesti do deformacije konstrukcije pa čak i hladnih pukotina. Naprezanja mogu biti tlačna i vlačna, a zakonitosti im je teško dokučiti, osim mjerenjem na površini. Iznos može doseći, odmah nakon zavarivanja i granicu razvlačenja. Postupkom popuštanja, odžarivanja, mogu se ove napetosti znatno smanjiti, kao i metodom vibriranja.

U procesima eksploatacije, posebno pri višim i visokim temperaturama, ova se naprezanja brzo relaksiraju.

Sama zaostala naprezanja ne dovode do oštećenja, ukoliko nisu kombinirana s vanjskim opterećenjem. Iznimka je slučaj zaostalih naprezanja u zoni zavara s inicijalnim opterećenjima (sl. 5.3.32).



5.3.32 Naprezanja u zoni korijena X zavara

## Krti lom

Lomovi sa malom kontrakcijom ili bez nje, lomovi bez izduženja, zbog izgleda prijeloma sličnog lomu krtog materijala (dekoheziji) nazivaju se krti lom.

Ove pojave loma zbog naglog širenja pukotine, a bez velikog naprezanja, poznate su odavno. Krti lomovi su redovito inicirani malim pukotinama ili oštećenjima koje su rasle do neke kritične veličine, nakon koje je nastupio lom.

Ako se greške otkriju na vrijeme moguće je pratiti cijeli rast pukotine i predvidjeti lom. Pri tom svakako je potrebno preispitati kriterije o prihvatljivosti ovih grešaka.

Visokim naprezanjima u vrhu pukotine, te raspodjelom naprezanja u njenoj okolini, potrebno je posvetiti posebnu pažnju.

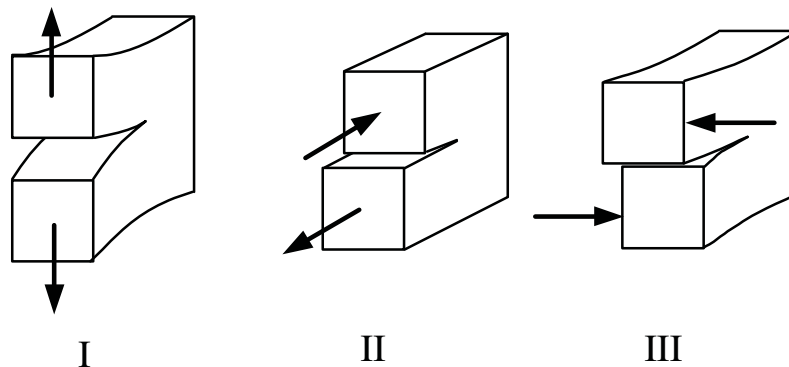
Na lom (proučava se u mehanici loma) utječu:

- osnovno materijal
- radna temperatura
- koncepcija konstrukcije:
  - razina radnih opterećenja
  - debljina elementa
  - krutost konstrukcije
- način naprezanja
- način hladne obrade pri izvedbi konstrukcije

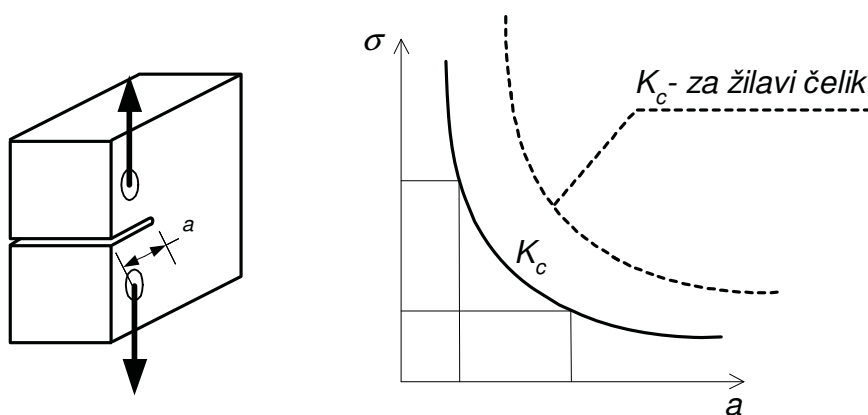
Pri proučavanju loma uvodi se faktor intenziteta naprezanja  $K_C$  koji se razlikuje za tri osnovna slučaja otvaranja pukotine (sl. 5.3.33), te za prvi način faktor intenziteta je

$$K_{IC} = c \sigma \sqrt{a}, \quad (5.3.32)$$

gdje je  $a$  veličina polovine pukotine (sl. 5.3.34),  $\sigma$  naprezanje, a  $c$  konstanta. Odnos naprezanja i veličine pukotine prikazan je slikom 5.3.34.



Slika 5.3.33 Tri osnovna načina otvaranja pukotine



Slika 5.3.34 Faktor intenziteta naprezanja u ovisnosti o pukotini i naprezanju

Prilikom praćenja širenja pukotine primijećeno je da se za lom epruvete mora utrošiti znatno manje rada pri nižim temperaturama, tj. materijal pri nižim temperaturama postaje krt pa postoji tzv. temperatura prelaska u krtost.

Krti lom se javlja ako su ispunjena slijedeća četiri uvjeta:

- sklonost materijala prema krtom lomu
- velika zaostala naprezanja
- određena temperatura
- postojanje greške koja izaziva koncentraciju naprezanja i početak loma

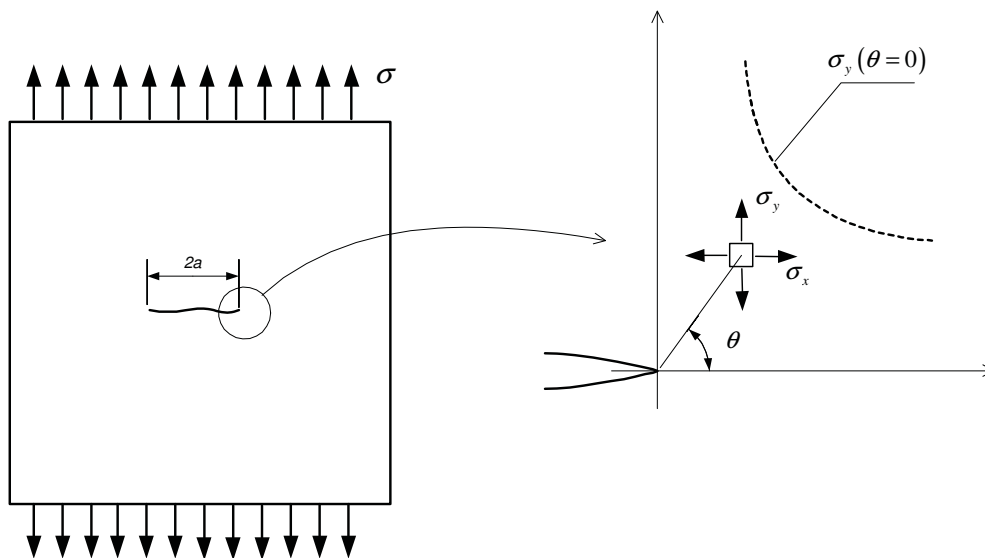
Naprezanje i deformacija oko pukotine proučavana je od strane mnogih znanstvenika među, a među prvima su Grifiz, Irwin i Vestergard. Za beskonačnu traku s otvorom pukotine dužine  $2a$  i opterećenu vlačno, raspodjela naprezanja oko vrška pukotine (sl. 5.3.35) dana je izrazima

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (5.3.33)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (5.3.34)$$

gdje obzirom da se pri opterećenju trake s pukotinom radi o prvom slučaju otvaranja, faktor intenziteta naprezanja računa prema izrazu (5.3.32). Za kut  $\theta = 0$  (sl. 5.3.35) izraz (5.3.34) se svodi na

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}. \quad (5.4.35)$$



Slika 5.3.35 Naprezanja vrška pukotine ploče

## 5.4. Oblikovanje vijčanih i zavarenih spojeva obzirom na zamor

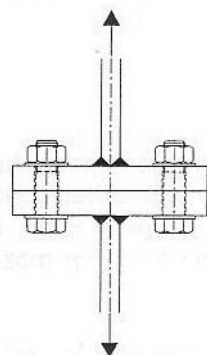
Pošto je zamor materijala jedan od čestih razloga lomova koji nastaju u eksploataciji, spojevi, bilo rastavljivi, bilo nerastavljivi, zahtijevaju posebnu pažnju prilikom pravilnog oblikovanja.

### 5.4.1 Oblikovanje vijčanih spojeva obzirom na zamor

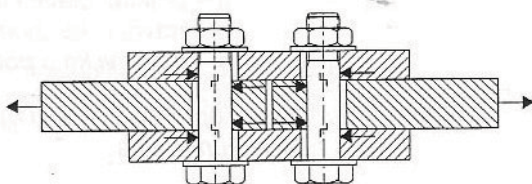
Obzirom na način izrade navoja, valjanjem odnosno narezivanjem, prednost treba dati navoju napravljenom vajanjem, odnosno navoj izrađen narezivanjem treba izbjegavati.

Kod vijčanog spoja razlikujemo tri osnovna slučaja:

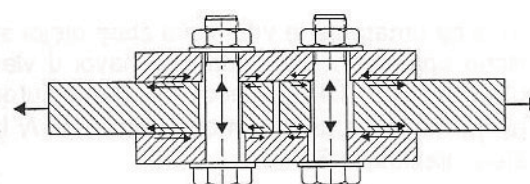
- vijčani spoj opterećen na vlak (slika 5.4.1)
- prednapregnuti vijci u spoju opterećenom smično (slika 5.4.2)
- vijci koji nisu prednapregnuti u spoju opterećenom smično (slika 5.4.3)



Slika 5.4.1. Vlačni spoj<sup>†</sup>



Slika 5.4.2. Bez prednapreznja<sup>‡</sup>

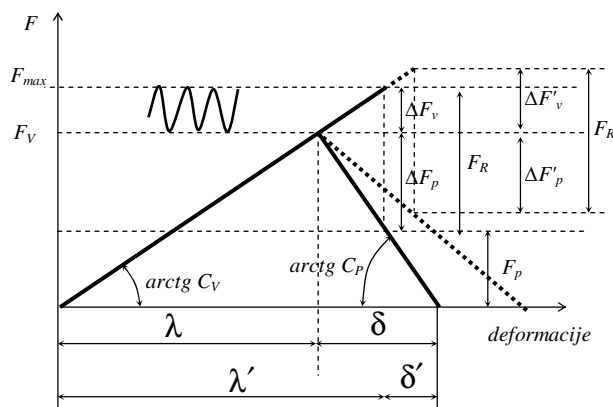


Slika 5.4.3. Prednapregnuti

Kod vlačnog spoja, najčešće je riječ o spoju kod kojeg su vijci prednapregnuti. Odnos sile prednapreznja u vijcima  $F_v$  i podlozi  $F_p$ , uslijed djelovanja radne sile  $F_R$  prikazano je dijagramom na slici 5.4.4. Opterećivanjem spoja, raste sila u vijku za  $\Delta F_v$  i pada sila u podlozi za  $\Delta F_p$ . Ukoliko radna sila postane veća od sile prednapreznja, rasterećenja podloge i odvajanja te vijci u potpunosti preuzimaju opterećenje, što je krajnje nepovoljno. Nadalje iz dijagrama se vidi da je povoljnije da vijci budu manje krutosti  $C_v$  (manji nagib pravca) a podloga čim kruća (strmiji pravac). Ovime pri istoj radnoj sili je prirast sila vijku  $\Delta F_v$  manji od prirasta  $\Delta F'_v$  za slučaj podloge manje krutosti. Dakle treba težiti čim krućim i debljim podlogama kod ovakvih spojeva kao ne bi došlo do elastičnog savijanja podloge (smanjenje krutosti). Postavljanje mekih brtvi među podlogama djeluje nepovoljno.

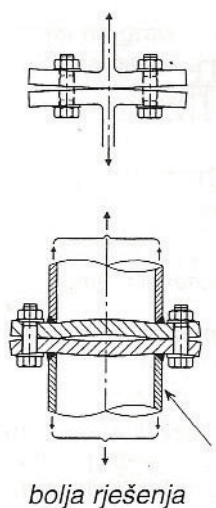
<sup>†</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

<sup>‡</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.



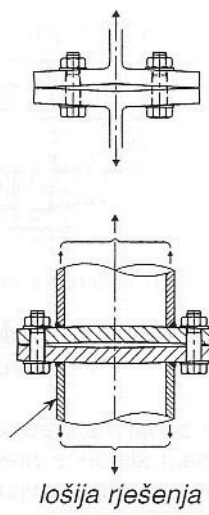
Slika 5.4.4. Sile i deformacije u prednapregnutim vijcima i podlozi

Obzirom na oblik samo kontaktne površine, oblik prikazan slikom 5.4.5 predstavlja povoljniji slučaj od oblika prikazanog slikom 5.4.6 iz razloga što je kod prvog kontaktna površina bliža mjestu djelovanja sile te je time savijanje površine manje. Kod slučaja prikazanog slikom 5.4.6 podloga je fleksibilnija. Dakle vrijedi pravilo da obzirom na otpornost vijčanog spoja na zamor, treba nastojati da kontaktna površina bude čim bliže dijelovima na koje djeluje opterećenje.



bolja rješenja

Slika 5.4.5.



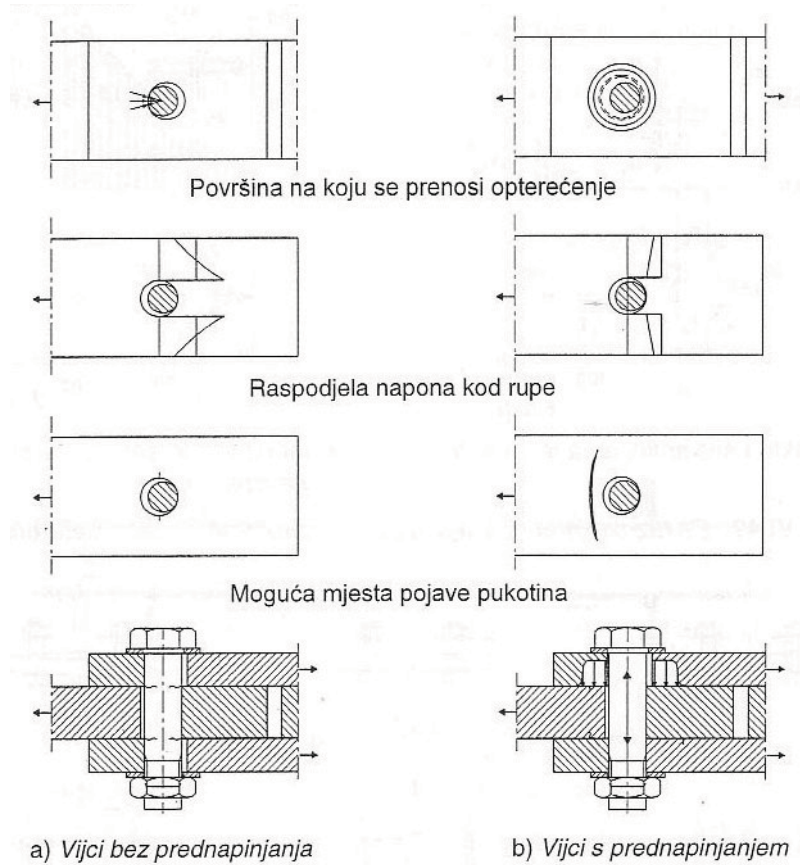
lošija rješenja

Slika 5.4.6. §

Kod spojeva opterećenih smično (slika 5.4.2 i 5.4.3) površina na koju se prenosi opterećenje, raspodjela opterećenja oko rupe i moguća mjesta pojave pukotina kod zamora prikazana su slika 5.4.7 za slučaj vijaka sa i bez prednaprezanja. Prednost za slučaj opterećenja kod kojeg postoji opasnost od zamora treba dati vijcima s prednaprezanjem iz razloga što je vijak, a samim time i vijčani spoj, manje podložan pojavi pukotina.

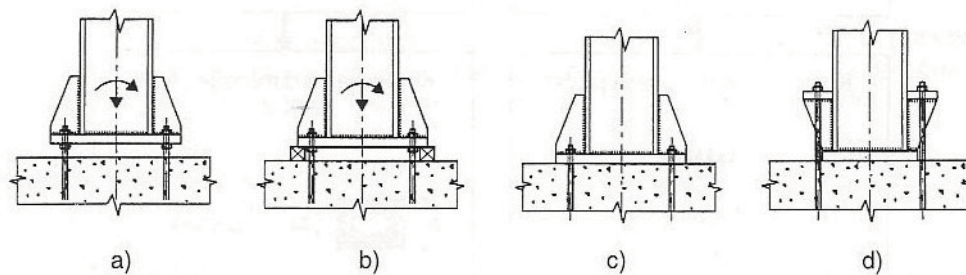
§ Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.





Slika 5.4.7. Usporedba smično opterećenih vijčanih spojeva\*\*

Kod sidrenih (anker) vijaka, osim što treba težiti izvedbi navoja valjanjem, pričvršćivanjem dvjema maticama pokazalo se povoljnije obzirom na zamor. Ispitivanjem je utvrđeno da varijante pričvršćivanja stopa b) i d) na slici 5.4.8 pokazuju boju otpornost na zamor.



Slika 5.4.8. Otpornost na zamor kod sidrenih vijaka††

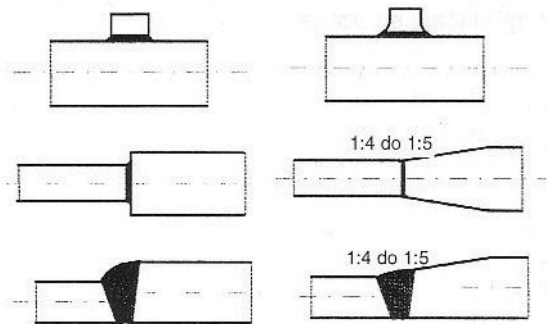
### 5.4.2. Oblikovanje zavarenih spojeva obzirom na zamor

Općenito strojne elemente podložne zamoru potrebno je oblikovati na način da se izbjegne koncentracija naprezanja odnosno lom silnica u siloertu naprezanja. Zavari, kao spojevi dijelova,

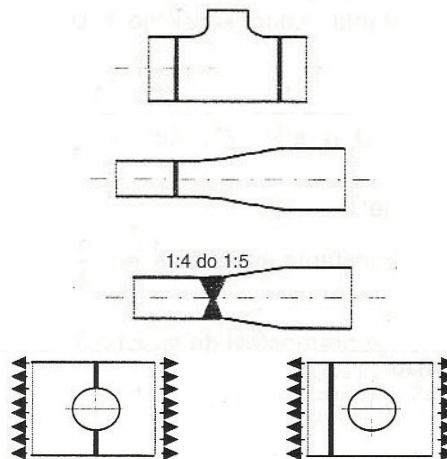
\*\* Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

†† Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

upravo se nalaze u zonama najvećih koncentracija naprezanja. Dakle, potrebno je preoblikovati strojni dio da se čim više smanji koncentracija naprezanja (slika 5.4.9.), te ukoliko je moguće, sam zavar pomaknuti iz područja najveće koncentracije naprezanja (slika 5.4.10.).

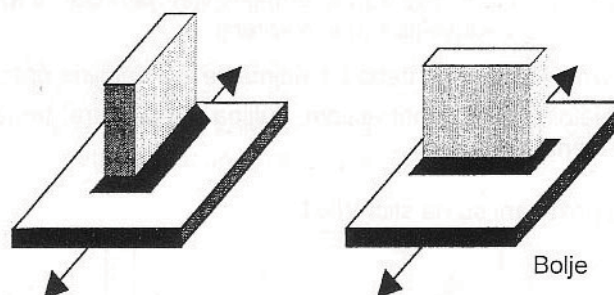


Slika 5.4.9. Smanjenje koncentracije naprezanja pravilnim oblikovanjem<sup>‡‡</sup>



Slika 5.4.10. Pomicanje zavora iz područja velike koncentracije naprezanja

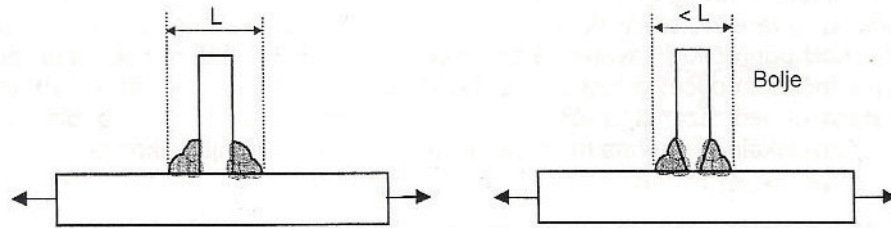
Za slučaj kada je neki neopterećeni dio konstrukcije zavaren na opterećeni dio konstrukcije, sama geometrija neopterećenog dijela izaziva lom silnica u silocrtu (koncentraciju naprezanja). Što je taj neopterećeni dio kraći u smjeru djelovanja sile na opterećenom dijelu, to je manji lom silnica (koncentracija naprezanja) (slika 5.4.11).



Slika 5.4.11. Postavljanje neopterećenog dijela obzirom na smjer opterećenja

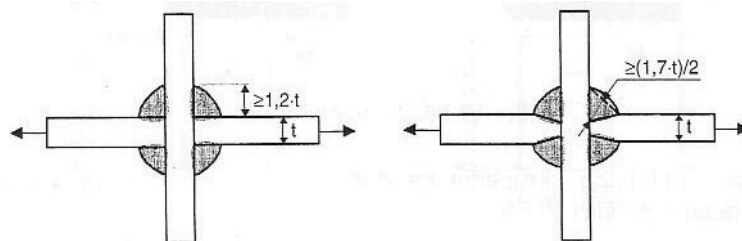
<sup>‡‡</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

Smanjenje dimenzija kutnog zavora moguće je postići i djelomičnim provarivanjem korijena zavora (slika 5.4.12.).



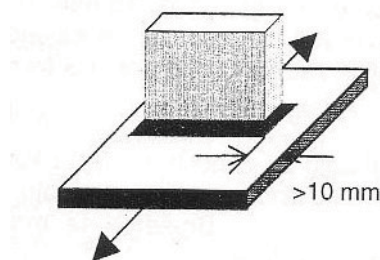
Slika 5.4.12. Smanjenje dimenzija poprečnog presjeka kutnog zavora<sup>§§</sup>

Za slučaj kad kutni zavar povezuje nosive dijelove u cjelinu, kao što je to slučaj na slici 5.4.13., potrebno je osigurati dovoljnu nosivost kutnog zavora.



Slika 5.4.13. Minimalne dimenzije kutnog zavora i djelomično provarenog kutnog zavora.

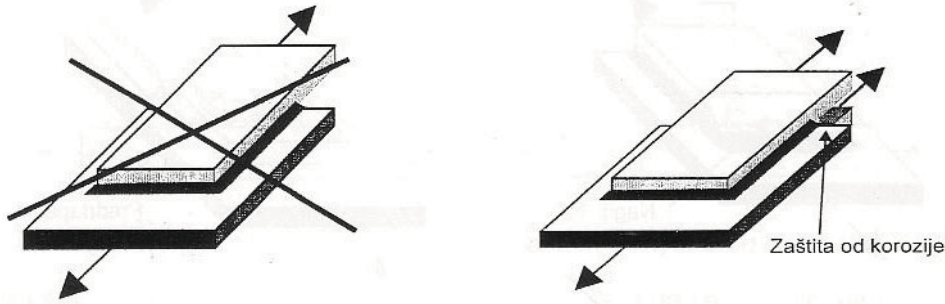
Zavar u području ruba opterećenih konstrukcija smanjuje otpornost na zamor te je potrebno težiti preporuci da se zavar nalazi na udaljenosti većoj od 10 mm od ruba (slika 5.4.14).



Slika 5.4.14. Preporuka o udaljenosti zavora od ruba nosivog dijela

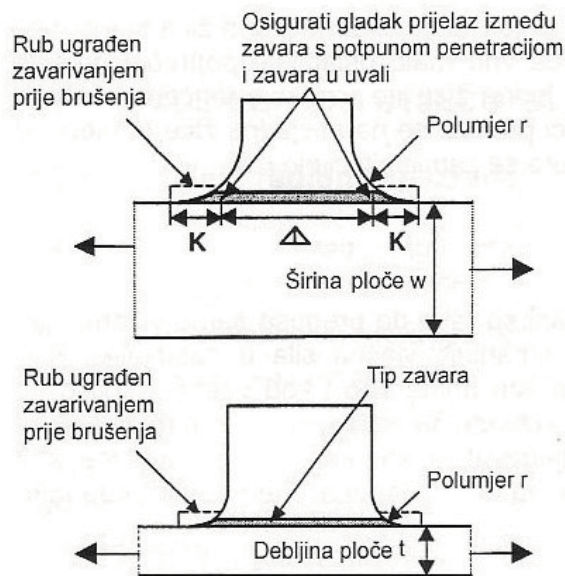
Pri oblikovanju treba težiti izvedbama bez sekundarnih naprezanja koji nastaju uslijed momenata savijanja u samom spoju. Tako je kod čvorište rešetkaste konstrukcije potrebno postići da se neutralne osi sijeku u jednoj točki. Slično je i kod nesimetričnih priključaka koje je potrebno zamijenit simetričnim kao što je to ilustrirano slikom 5.4.15.

<sup>§§</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.



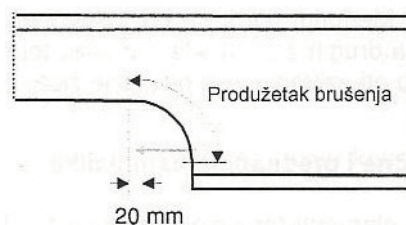
Slika 5.4.15. Zamjena nesimetričnog priključka simetričnim

Oštri prelazi i oštri kutovi izazivaju veliku koncentraciju naprezanja, a samim time i neotpornost na zamor. Rješenja sa slike 5.4.9. moguće je postići naknadnom obradom zavara, kao što je prikazano slikom 5.4.15. gdje se brušenjem izbjegavaju oštri prijelazi spojeva. Pri tom treba izbjegavati radijuse zaobljenja manje od 15 mm odnosno radijusom zaobljenja većim od  $1/3$  širine priključka.



Slika 5.4.15. Naknadna obrada zavara \*\*\*

Oštre rubove potrebno je izvesti zaobljene, a samo zaobljenje potrebno je obraditi brušenjem te brušenu površinu produžiti 20 mm izvan zaobljenja (slika 5.4.16).



Slika 5.4.16. Brušenje zaobljenja i područja oko zaobljenja

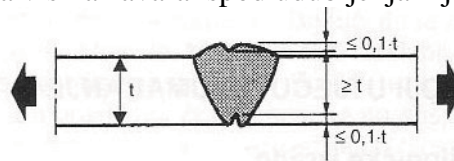
\*\*\* Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

Uz navedene konstrukcijske uzroke neotpornosti na zamor, velik utjecaj ima i samo zavarivanje. Najčešće greške koje pri zavarivanju nastaju, a bitno smanjuju otpornost na zamor su:

- prskanje pri zavarivanju
- diskontinuitet u varu uzrokovan slučajnim zastojsima luka
- nedopušteno pripajanje dijelova koji nisu predviđeni za zavarivanje
- korozijska gnijezda
- pukotine u varu
- loše namještanje dijelova koji se zavaruju
- zarez
- oštri bridovi
- ekscentričnosti i krivo međusobno pozicioniranje dijelova
- iskrivljenje dijelova priključaka

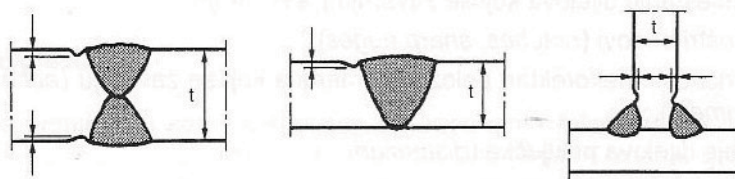
Greške u varovima do određenog nivoa se toleriraju. Pri tome vrijede sljedeća pravila:

- čeonog zavara s djelomičnom penetracijom tretiraju se kao da je riječ o kutnim varovima
- debljina čeonog zavara ne smije biti manja od debljine dijelova koji se spajaju
- krak (širina) kutnog zavara ne smije varirati više od 10%
- udubljenja čeonog zavara se toleriraju ako:
  - duljina udubljenja nije veća od debljine elementa  $t$
  - visina udubljenja nije veća od  $0,1t$
  - preostala visina zavara ispod udubljenja nije manja od debljine elementa  $t$



Slika 5.4.17. Zahtjevi obzirom na dopustive dimenzije udubljenja zavara<sup>†††</sup>

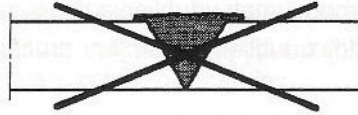
- uleknuća osnovnog materijala u zoni utjecaja topline, a nastala zbog taljenja osnovnog materijala se toleriraju ukoliko su ona manja od  $0,05t$  (ili 5 mm) kod poprečnih varova, odnosno  $0,1t$  (ili 1 mm) kod uzdužnih



Slika 5.4.18. Uleknuća osnovnog materijala

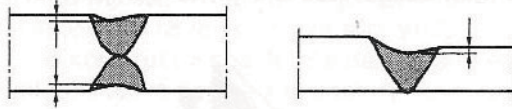
- troska na varu se tretira kao ulegnuće
- pukotine detektirane nerazornim metodama ne toleriraju se
- ne tolerira se kod čeonog vara s zahtijevanom punom penetracijom da dolazi do nepotpunog taljenja osnovnog materijala koje je karakterizirano prelijevanjem zavara

<sup>†††</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba "Metalne konstrukcije 4", IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.



Slika 5.4.19. Nepotpuna penetracija i prelijevanje zavora

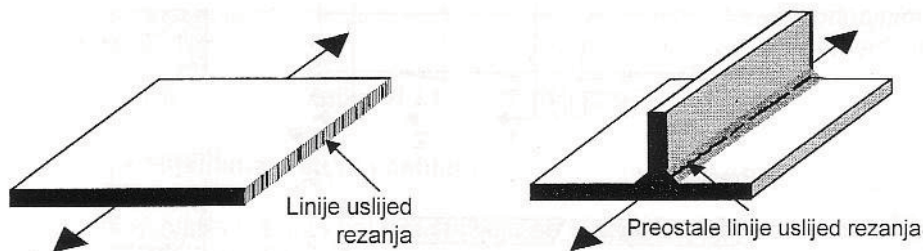
- ne toleriraju se ulegnuća zavora



Slika 5.4.20. Nedopustiva ulegnuća zavora

- Pore uslijed plinova u zavoru, ravnomjerno raspoređeni, mogu se tolerirati te ih nije potrebno popravljati ukoliko je najveći promjer manji od 0,25t ili 3 mm. Dopušteni postotak ukupne veličine pora obzirom na površinu projekcije zavora iznosi se kreće od 3% do 5%, a ovisi o kategoriji detalja.

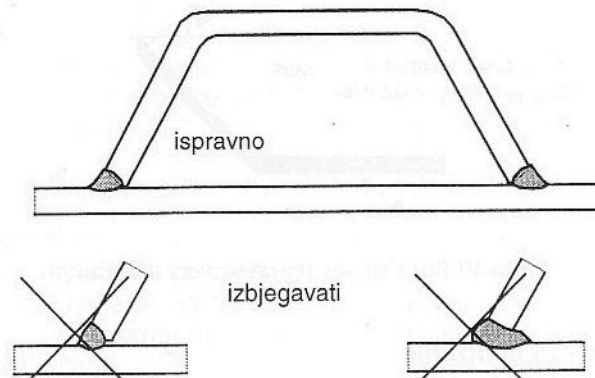
Hrapavost rubova nastalih plinskim rezanjem (slika 5.4.21) veća od 0,3 mm smanjuje otpornost na zamor te se preporuča brušenje takvih rubova.



Slika 5.4.21. Hrapavost rubova uslijed plinskog rezanja čeličnih ploča

Prekid kontinuiranog zavora tolerira se samo ako je na mjestu prekida postignuta dobra penetracija te ukoliko se prekid ne nalazi u zoni visoke koncentracije naprezanja.

Varovi koji se izvode samo s jedne strane, dakle kod kojih nije moguće provarivanje korijena, moraju biti izvedeni na način da se osigura 80% stapanja. Djelomična penetracija i nepotpuna provarenost nisu dopušteni.



Slika 5.4.22. Izvođenje jednostranih zavara<sup>\*\*\*</sup>

Pri zavarivanju dolazi do stvaranja zaostalih naprezanja koja bitno utječu na pojavu zamora. U cilju izbjegavanja ili snižavanja zaostalih naprezanja potrebno je voditi računa o slijedu i smjeru zavarivanja, predgrijavanju, odžarivanju, samčarenju ili čekićanju (ručno, ultrazvučnim ili pneumatskim iglama).

Oštećenja nastala rukovanjem, zarezi, ulegnuća, oštećenje nastalo paljenjem elektrode treba otkloniti brušenjem. Ovakva oštećenja se ne dopuštaju.

**Literatura**

B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba “*Metalne konstrukcije 4*”, IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

---

<sup>\*\*\*</sup> Skenirano iz B. Andronić, D. Dujmović, I. Dežba “*Metalne konstrukcije 4*”, IA PROJEKTIRANJE, Zagreb, 2004.

## 6. Zaštita od korozije

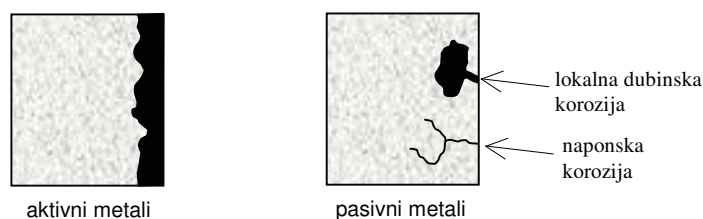
Pravilno izvođenje zaštite od korozije jedno je od presudnih faktora koji utječu na vijek trajanja konstrukcije. Kako se metalne konstrukcije uglavnom izvode iz konstrukcijskih čelika podložnih koroziji, zaštiti od korozije potrebno je posvetiti posebnu pažnju. Prilikom konstruiranja konstrukcije potrebno je definirati i način zaštite od korozije. Ovaj tekst temelji se na nacionalnoj normi Švicarske središnjice za čelične konstrukcije, a ista se preporučuje od strane Instituta građevinarstva Hrvatske (IGH), Zavod za metalne konstrukcije Zagreb (vidi literaturu).

Područje na koje se odnosi preporuka o zaštiti od korozije obuhvaća sve čelične konstrukcije sačinjene od elemenata debljine stjenke veće od 3 mm. Rjeđe korišteni postupci površinske zaštite poput kontinuiranog postupka izvođenja metalnih prevlaka, elektronskog postupka nanošenja, elektrostatskog prekivanja prahom, postupak pečenja (emajliranja), postupak vrućeg štrcanja i sl., ovdje neće biti obrađivani.

### 6.1 Utjecaj okoline i opterećenje

Koroziju čeličnih konstrukcija uzrokuju voda i oksidacijska sredstva pri čemu presudan utjecaj ima kisik iz atmosfere te u odsutnosti kisika nema ni korozije. Iznimku čine kiseli agresivni mediji gdje je korozija moguća i bez utjecaja atmosferskog kisika. Korozija čelika počinje kod relativne vlažnosti zraka od oko 60% (sl. 1.7.2, poglavlje 1). Za razvoj korozije u pravilu je dovoljan vlažni film na površini metala, npr. kondenzat ili kapljice rose. Aktivni metali poput čelika i pocinčanog čelika korodiraju po čitavoj izloženoj površini te im se gubitak materijala razvija uglavnom površinski. Pasivni materijali poput krom-nikal čelika i aluminijski zaštićeni su od korozije pomoću pasiviziranog površinskog sloja. Do korozije nastupa tek kad se taj sloj ošteti, npr. djelovanjem klorida te se korozijsko nagrizanje javlja na manjim dijelovima površine (sl. 6.1.1). Ovakva korozija opasnija je od površinske jer može doći do neopaženog otkazivanja nosivosti elementa uslijed napredovanja korozije u dubini materijala.

Uz naveden oblik korozije moguća je i korozija uslijed mehaničkih i toplinskih opterećenja te je pri odabiru premaza potrebno i na ovo obratiti pažnju.



Slika 6.1.1 Korozija kod aktivnih i pasivnih materijala



Pri definiranju utjecaja okoline potrebno je razlikovati *mjesnu (makroklimu)* i strogo *lokalnu klimu (mikroklimu)*.

Utjecaj makroklimе određen je po DIN-u prema kojem se za željezo i cink (tablica 6.1.1) navodi godišnji iznos gubitka materijala u ovisnosti o razredu korozivnosti (mjeri se na metalnoj zavojnici slobodno izloženoj atmosferilijama, tablica 6.1.2).

Razred korozivnosti		1	2	3	4	5
Gubitak [µm/god.]	željezo	≤ 20	≤ 40	≤ 60	≤ 80	> 80
	cink	≤ 1.25	≤ 2.25	≤ 3.25	≤ 4.25	> 4.25

Tablica 6.1.1 Određivanje razreda korozivnosti makroklimе

Osnovna vrsta	Razred korozivnosti	Opis	Dosadašnja vrsta atmosfere
Normalna atmosfera	1 i 2	Malo korozivno opterećenje: Atmosfera bez spomena vrijedne količine sumpornog dioksida i drugih štetin materija: npr. seoska područja i mali gradovi.	Selo
	2 i 3	Umjereno korozivno opterećenje: Atmosfera s umjerenim sadržajem sumpornog dioksida i drugih štetnih materija: npr. gusto naseljena područja bez jake koncentracije industrije.	Grad
Agresivna atmosfera	3 do 5	Jako korozivno opterećenje: Atmosfera s visokim sadržajem sumpornog dioksida i drugih štetnih materija: npr. područje s nagomilanom industrijom i zone koje leže u smjeru glavnih vjetrova tih područja.	Industrija
	4 do 5	Vrlo jako korozivno opterećenje: Atmosfera onečišćena korozivno posebn štetnim materijama: npr. kloridima i/ili sa slanom visokom relativnom vlagom u zraku (nad	More

Tablica 6.1.2 Sprega makroklimе i vrste atmosfere

Pod mikroklimom podrazumijevaju se utjecaji u neposrednoj blizini čelične konstrukcije ili utjecaji koji neposredno djeluju na pojedine dijelove konstrukcije.

Mikroklimu određuju slijedeći faktori:

- relativna vlažnost zraka, temperatura zraka i povišena temperatura
- izloženost atmosferilijama (direktno izloženo ili zaštićeno od atmosferilija)

- mjestimično povećani agresivni utjecaji, npr.:
  - o podvoz mosta iznad vode
  - o područje stvaranja kondenzata na toplovodima
  - o područja prskanja vode
  - o područja na betonskim dijelovima koja su oblivena kišom
  - o građevine izložene utjecaju soli
  - o zone u području otapanja solju (poledice)
  - o područja u blizini radionica za luženje ili dekapiranje
  - o zone taloženja štetnih materijala (zagađenje zraka, kemikalije, fekalije i sl.)
  - o mjesta pod elektrokemijskim utjecajem (razlike u potencijalu, galvanske struje)

## 6.2 Konstruktivne mjere

Pretpostavke za djelotvornu zaštitu od korozije moraju se ostvariti već pri samom konstruiranju. Dijelovi koji se površinski zaštićuju moraju biti pristupačni za izvođenje, ispitivanje, kontrolu, održavanje i obnovu korozivne zaštite. Ako pak neka mjesta nisu pristupačna, potrebno je na tim mjestima prije spajana provesti ugovorenu površinsku zaštitu, npr. površine kontakta kod vijčanih spojeva.

Voda mora nesmetano otjecati sa svih mjesta na konstrukciji (sl. 1.7.2, poglavlje 1). Treba izbjegavati veće horizontalne plohe te konkavne profile, uske raspone, uglove i kutove. Izrezima i rupama potrebno je omogućiti istjecanje vode (kiša i kondenzat), npr. kod rebara iz zatvorenog profila. Izradom okapnica smanjiti direktno slijevanje vode preko površine elementa konstrukcije.

Betonske temelje čeličnih konstrukcija treba izvesti 20 do 30 centimetara iznad tla. Čelični elementi koji se ubetoniravaju trebaju se očistiti od hrđe te se temeljni premaz mora izvesti najmanje 10 do 15 centimetara duboko u beton. Kod ubetoniranih čeličnih dijelova trajno vlaženih vodom treba izbjegavati kontakt s armaturnim metalom kao se ne bi stvorio galvanski članak.

Kod povećanog korozijskog opterećenja treba izbjegavati isprekidane zavare, točkaste zavare i oštre broдове koji predstavljaju mjesta lakog oštećivanja premaza pri udaru. Pri tom nezaštićene šupljine konstrukcije treba temeljito zabrtviti od prodora zraka i vlage.

Zaštita od korozije svih spojnih elemenata treba po kvaliteti odgovarati kvaliteti zaštite od korozije cijele konstrukcije. Kod vijaka, preporučuje se korištenje vijaka koje je proizvođač već površinski zaštitio. Elektrolitski pocinčani vijci i spojni elementi moraju se dodatno premazati! Vruće pocinčane elemente, u ovisnosti o konkretnog slučaja, u principu nije potrebno dodatno zaštićivati. Moguće je korištenje i elemenata iz nehrđajućeg čelika.

Kod čeličnih konstrukcija koje će se vruće pocinčati (uranjanjem na približno 450°C) treba se pridržavati slijedećih preporuka:

- površinu je prije cinčanja potrebno pripremiti jetkanjem (nagrivanje i čišćenje kiselinom)
- pri konstruiranju uzeti u obzir dimenzije raspoloživih kupki za pocinčavanje
- na šupljim elementima obavezno ostaviti dovoljno velike otvore za dotok i otjecanje cinka jer je bitno da unutrašnje površine budu vruće pocinčane
- izbjegavati velike razlike u debljini stijenki jednog te istog elementa
- izbjegavati prekidne zavare
- nalježuće površine i uske raspore treba zatvoriti neprekinutim zavarima
- izraditi otvore u "mrtvim" uglovima
- uzeti u obzir smanjivanje promjera rupa pocinčavanjem
- pravilnim postupkom i redoslijedom zavarivanja održati zaostala naprezanja čim nižima

- pri odabiru materijala provjeriti podobnost materijala za vruće pocinčavanje (prionjivost prevlake i izgled ovisi o sadržaju silicija u čeliku)

### 6.3 Izvođenje zaštite

Pri izvođenju zaštite, osim stvarnog vremena nanošenja prevlake, uzeti u obzir i minimalno te maksimalno vrijeme za nanošenje zaštitnih prevlaka.

Minimalno potrebni i maksimalno dozvoljeni interval između pripreme površine i nanošenja pokrivnog premaza ovisi o zaštitnom sustavu te utjecaju atmosferilija. Svi premazi i prevlake se tijekom vremena izlaganja atmosferilima razgrađuju te se ne smije prekoračiti orijentaciono vrijeme navedeno u tablicama. Pri dugotrajnoj izgradnji ili dugotrajnom transportu (posebno prekomorskom) preporuča se nanošenje dodatnog zaštitnog premaza.

Temperatura zraka i temperatura objekta mogu značajno varirati te tako bitno utjecati na vrijeme izvođenja površinske zaštite. Pri tom treba obratiti pažnju na minimalnu razliku temperature objekta i okoline kako bi se izbjeglo orošavanje. Vrijeme sušenja ovisi o temperaturi i vlažnosti zraka, a navedeno je od strane proizvođača premaza.

Pokrivne premaze unutar građevina, ukoliko je to moguće, nanositi nakon završetka građevinskih radova kako bi se izbjeglo oštećivanje premaza.

### 6.4 Kompatibilnost

Temeljni premazi, odnosno prevlake i pokrivni premazi moraju međusobno biti kompatibilni (snošljivi). Za kompatibilnost su u prvom redu mjerodavna vezivna sredstva (veziva premaza). Preporuča se cijeli premazni sustav izvesti sredstvima istog proizvođača. Kod nepoznatog kemijskog sastava postojećeg premaza kompatibilnost je potrebno unaprijed ispitati. Na ovo treba naročito obratiti pažnju pri obnovi starog premaza.

Osim kemijske kompatibilnosti, uzeti u obzir minimalno i maksimalno vrijeme međusušenja premaza pri nanošenju slijedećeg premaza.

Na dvokomponentne (2-K) premaze moguće je nanositi jednokomponentne ili dvokomponentne premaze. Na jednokomponentne (1-K) premaze treba u načelu nastaviti s nanošenjem jedino jednokomponentnih premaza (izuzetak čini 1-K poliuretanski premaz koji otvrđuje na bazi vlage).

Vezivno sredstvo prethodnog premaza	Vezivno sredstvo narednog premaza											
	Alkid	Epoksidester	Uretanalkid	Poliakrilat	Polivinil	Klorkaučuk	Silikon	2-K Epoksid	2-K Poliuretan	1-K Poliuretan FH	2-K Katran/Epoksid	1K Katran/Poliuretan
Alkid	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Epoksidester	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Uretanalkid	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Poliakrilat	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Polivinil	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Klorkaučuk	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□
Polistirol	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
2-K Epoksid	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	■	□
2-K Poliuretan	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□
1-K Poliuretan FH	□	□	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□
2K-Katran/Epoksid	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
1K Katran/Poliuretan FH	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Silikat	□	□	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□
<b>PREVLAKE</b>												
Vruće pocinčano	□	□	□	■	□	□	□	■	■	□	□	□
Pocinčano prskanjem	□	□	□	□	□	□	□	■	■	□	■	■

■ - uobičajene kombinacije (standardni sustavi)  
 □ - kompatibilno (snošljivo)  
 □ – nekompatibilno

Tablica 6.3.1 Pregled kompatibilnosti (snošljivosti)

## 6.5 Kemijsko-fizikalna svojstva premaza i prevlaka

Skruceni premaz se u osnovi sastoji od pigmenta i veziva. Kemijsko-fizikalna svojstva premaza određena su njihovim međudjelovanjem. Kemijsko-fizikalna svojstva navedena su u tablici 6.5.1.

Vruće pocinčana prevlaka sastoji se od različitih legiranih slojeva od kojih je prvi metalurški povezan s čelikom. Ovi su slojevi prevučeni kompaktnim slojem čistog cinka. Kod čelika sa sadržajem silicija (od 0,03 do 0,12%) ovi se legirani slojevi protežu duž čitave debljine prevlake te se na površini očituju kao mat-sivi tvrdi cink osjetljiv na udarce.

Štrcano pocinčavanje karakterizira porozan sloj cinka te se veza s čelikom ostvaruje isključivo mehanički, a ne i metalurški (ne nastaje legura!).

Isto vrijedi i za elektrolitičko pocinčavanje.

Vezivno sredstvo	Svojstva						Kemijska postojanost		
	Postojanost nijanse i sjaja u atmosferijama	Mehanička postojanost	Toplinska postojanost	Otpornost na vodu	Otpornost na sol za otapanje leda (poledica)				
						na kiseline	na lužine	na pare otapala	
Alkid	□	□	□	□	□	□	□	□	
Epoksidester	□	□	□	□	□	□	□	□	
Uretanalkid	□	□	□	□	□	□	□	□	
Poliakrilat	■	□	□	□	□	□	□	□	
Polivinil	□	□	□	■	□	■	■	□	
Klorkaučuk	□	□	■	■	■	■	■	□	
Silikon	■	□	■	■	■	□	□	□	
Silikat	□	■	■	■	■	□	□	■	
2-K Epoksid	□	■	□	■	■	□	■	■	
2-K Poliuretan	■	□	■	■	■	■	□	■	
1-K Poliuretan FH	□	■	□	■	■	■	□	■	
2K-Katran/Epoksid	□	□	□	■	■	■	■	□	
1K Katran/Poliuretan FH	□	■	□	■	■	■	□	■	
<b>PREVLAKE</b>									
Vruće pocinčano	□	■	■	■	□	□	□	■	
Pocinčano prskanjem	□	□	□	□	□	□	□	□	

- - visoka toplinska postojanost (podnosi temperaturu preko 140°C)  
 □ - srednja toplinska postojanost (podnosi temperaturu do 140°C)  
 □ - mala toplinska postojanost (podnosi temperaturu do 70°C)

Tablica 6.5.1 Kemijsko-fizikalna svojstva premaza i prevlaka

## 6.6 Uloga i izgled zaštite

Ispunjenje funkcije površinske zaštite ovisi o zadaći koju treba ispuniti pri zaštiti konstrukcije. Ovdje treba razlikovati trajnost zaštite od trajnosti estetskog izgleda te se obzirom na to vrši obnavljanje zaštite. Pri zaštiti konstrukcije mjerodavna je činjenica dali je zbog korozije narušena nosivost. Kod estetskog izgleda mjerodavne su promjene vidljive golim okom. Trajnost pri zaštiti konstrukcije često je veća od trajnosti konstrukcije, dok kod estetskog izgleda često je potrebno obnavljanje premaza.

Posebni zahtjevi na estetski izgled proističu iz tenderske dokumentacije.

Na izgled premaza i prevlaka utječe struktura, veličina i oblik čelične površine. Ovdje spadaju mjestimične neravnine nastale proizvodnom (valjanje), manje deformacije i neravnine nekog elementa nastale proizvodnjom te neravnine nastale postupkom izrade (posljedica zavarivanja). Ovakve se greške površine uobičajenim premazima ne otklanjaju.

Na izgled površine (nijansa i boja) utječe se pravilnim izborom premaznog sredstava te načinom nanošenja i to:

- pri odabiru nijanse koristiti postojeće kolekcije i sustave nijansi (NCS, RAL, VSLF, DB)
- svjetleći i zasićeni (zagasiti) tonovi teško se usklađuju
- boje na bazi organskih i kromatskih pigmenata te titanovog dioksida (bijela), na otvorenom prostoru sklone su blijedeđu i kredanju
- svjetlucave boje nisu obuhvaćene NCS, RAL i VSLF sustavom
- nedovoljno dispergirani pigmenti boje u vezivu dovode do pojave mrlja ili crta
- što je glađa i sjajnija površina premaza sitne neravnine bit će vidljivije te je u tom slučaju povoljno koristiti mat premaze (npr. cinkovi premazi). Štrcanjem se postiže glatka, a nanošenjem valjkom hrapava površina

Izgled površine mijenja se pod vanjskim utjecajima te dolazi do:

- gubitka sjaja (matiranje): urok može biti prljavi zrak te utjecaj okoline poput vlage, UV-zračenja i svjetlosti
- izmjene nijanse boje: uzrok mogu biti agresivne čestice iz zraka te UV-zračenje i svjetlo
- pojave mrlja: uzrok može biti neravnomjerno otjecanje kišnice, čađa, prašina, hrđa i dimni plinovi

## 6.7 Troškovi održavanja površinske zaštite

Troškove za prvo izvođenje zaštite na čeličnoj konstrukciji treba usporediti s kasnijim izdacima za održavanje i obnovu. Često "jeftina" prva zaštita za sobom implicira učestaliju potrebu skupog održavanja, no pri tom ne treba da površinska zaštita "nadživi" vijek upotrebe konstrukcije.

U osnovi troškovi zaštite se sastoje od:

- troškova pripreme površine
- troškova materijala
- usputnih troškova pripreme radilišta, skele, zaštite okoliša i ispitivanja kvalitete
- posrednih troškova od zaustavljanja pogona

Sustavno održavanje znatno produžuje trajnost zaštite od korozije. Tako je već u fazi planiranja potrebno predvidjeti način i učestalost budućeg održavanja. Uz to, pri konstruiranju potrebno je voditi računa o načinu budućeg održavanja, npr. predvidjeti pomične ili fiksne radne podeste i ljestve, sidrene elemente i stope za postavljanje nosača skela i sl.

## 6.8 Izvođenje i ispitivanje

### 6.8.1 Priprema metalne površine

Pažljiva predobrada i priprema čelične površine pretpostavka je kvalitetnoj i trajnoj površinskoj zaštiti.

U okviru radioničke predobrade potrebno je voditi računa o:

- uklanjanju prskotina i šljake pri zavarivanju
- uklanjanju valjaoničkih grešaka brušenjem
- zavarivanju šupljina, gnijezda s ukljućcima pijeska i poroznih mjesta na odljevcima
- sveobuhvatnom skidanju rubova

Priprema površine obuhvaća čišćenje uklanjanjem vlastitih ili stranih naslaga te hrapavljenje površine.

Stupanj pripreme i topografija površine mora biti usklađeni s predviđenim premazom ili prevlakom. Hrapavost, topografija i struktura površine utječu na prionjivost premaza, utrošak premaznog sredstva te zaštitno djelovanje premaza (potrebno je prekriti vrhove hrapavosti). Hrapavost i struktura površine čišćene mlazom abraziva ispituje se uspoređivanjem s uzorcima. Pri pripremi površine treba težiti hrapavosti između "2" i "3" (tablica 6.8.1).

<b>Priprema površine mlazom abraziva</b>		
Oznaka	Naziv-pojam	Definicija
Sa 2	Temeljito čišćenje mlazom	Površina mora biti (gledano bez povećala) čista vidljivih tragova ulja, masti i prljavštine te skoro potpuno bez okuine, hrđe, premaza i stranih nečistoća. Svi preostali ostaci moraju čvrsto prijanjati. Vidi usporedne uzorke: B Sa 2, C Sa 2 i D Sa 2 u ISO 8501-1.
Sa 2½	Vrlo temeljito čišćenje mlazom	Površina mora biti (gledano bez povećala) čista vidljivih tragova ulja, masti i prljavštine te skoro potpuno bez okuine, hrđe, premaza i stranih nečistoća tako da možda preostali tragovi mogu izgledati kao blage mrlje ili sjene. Vidi usporedne uzorke: A Sa 2½, B Sa 2½, C Sa 2½ i D Sa 2½ u ISO 8501-1.
Sa 3	Čišćenje mlazom, do odstranjivanja svih nečistoća s čelika	Površina mora biti (gledano bez povećala) čista vidljivih tragova ulja, masti i prljavštine te potpuno bez okuine, hrđe, premaza i stranih nečistoća. Površina mora biti jednoličnog metalnog izgleda. Vidi usporedne uzorke: A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3 i D Sa 3 u ISO 8501-1.
<b>Priprema površine ručnim skidanjem hrđe</b>		
St 3	Ručno uklanjanje hrđe ručnim ili	Površina mora biti (gledano bez povećala) čista od vidljivih tragova ulja, masti i prljavštine, te bez okuine, hrđe, premaza i stranih onečišćenja, tako da pokazuje slabi

Tablica 6.8.1 Priprema površine prema ISO 8501-1

U gradnji čeličnih konstrukcija preporuča se čišćenje mlazom abraziva jer se time postiže optimalna površina za dobru površinsku zaštitu. Pri tom se primjenjuju slijedeće tehnike čišćenja mlazom:

- centrifugalno čišćenje: isključivo u radionici, kod relativno jednostavnih dijelova s dobrom pristupnošću abraziva
- čišćenje tlačnim zrakom (pjeskarenje): u radionici i na gradilištu, za jednostavne i komplicirane dijelove

Kao abrazivi koriste se metalni ili mineralni proizvodi. Pri korištenju metalnih sredstava poput čelične sačme, žičanih zrnaca ili čeličnog pijeska (glatka i oštrobriđna zrna) nužno je sačmi dodati čelični pijesak kako bi se ostvarila kvalitetna površina. Mineralna sredstva poput kvarcnog pijeska, šljake iz visokih peći te korund pijeska, kod uporabe zahtijevaju posebne mjere za zaštitu zdravlja!

U posebnim slučajevima primjenjuju se još slijedeći postupci za čišćenje i skidanje hrđe:

- ručno skidanje hrđe: potrebno postići stupanj površine St 3 (tablica 6.8.1)
- fino pjeskarenje (čišćenje mlazom)
- čišćenje bez prašine
- čišćene tlačnom tekućinom (vodeni mlaz) se eventualnim dodatkom pijeska
- čišćenje tlačnim zrakom uz dodavanje vode za vezivanje prašine
- čišćenje mlazom pare
- čišćenje plamenom
- kemijsko odmašćivanje
- kemijsko skidanje hrđe jetkanjem (nagrizanjem)

Pri čišćenju površine treba izbjegavati primjenu rastvarača hrđe i stabilizator hrđe zbog nemogućnosti potpunog odstranjivanja agresivnog sredstva te zbog loše prionjivosti takve površine.

Preporuča se da priprema površine uslijedi u radionici nakon završetka radova, neposredno prije nanošenja premaza ili prevlake.

Da bi se spriječila pojava mjehura i ljuštenja premaza, prethodno vruće pocinčane površine potrebno je mehanički očistiti primjenom finog pijeska, a samo u iznimnim slučajevima primjenjuje se brusni papir ili čelične četke.

### 6.8.2 Nanošenje premaza i prevlaka

Premazna sredstva treba ispravno skladištiti, u principu na temperaturi ne nižoj od 0°C i ne višoj od 30°C. Nužno je pridržavati se uputa za izvođenje izdanih od strane proizvođača premaza. Za vrijeme izvođenja premaznih sredstava mora se prikloniti klimatskim uvjetima kao što su temperatura, relativna vlažnost i točka rošenja (izbjegavanje kondenziranje vlage na površini). Točka rošenja ovisi o vremenskim uvjetima te je potrebno osigurati minimalnu razliku u temperaturi površine i točke rošenja od 3°C (za zatvorene prostore), odnosno 4°C (za rad na otvorenom). Premaze na otvorenom potrebno je nanositi po suhom vremenu! Ukoliko to nije moguće, nanošenje premaza nužno je odgoditi, osim ukoliko se ne radi o sredstvima koja očvršćavaju uz pomoć vlage (npr. 1-K poliuretanska premazna sredstva).

Minimalne i maksimalne temperature za vrijeme nanošenja te za prvih 48 sati sušenja moraju se održavati prema preporuci.

Sam premaz posebno je ugrožen na bridovima te se za konstrukcije izložene agresivnim utjecajima preporuča dodatna zaštita bridova.

Prvi temeljni premaz potrebno je nanijeti odmah nakon površinske pripreme, odnosno još isti dan kad je priprema izvršena.

Prije nanošenja svakog pojedinog sloja, površina se mora očistiti od nečistoća poput prašine, korozijskih produkata, ulja masti i sl.

Potrebno se pridržavati minimalnih i maksimalnih vremena međusušenja jer u protivnom može doći do zadržavanja otapala, odvajanja slojeva, smanjenja postojanosti i sl.

Kod vrućeg pocinčavanja prethodno izjetkani elementi se uranjaju u rastaljeni cink pri temperaturi od 450°C. Kod pocinčava štrcanjem (metalizacija), cinkova se žica tali u plamenom pištolju i štrca po čeličnoj površini prethodno očišćenom mlazom mineralnog sredstva.

Pri proizvodnji metalnih limova i profila koristi se konzervacija shopprimer-premazima. Ovakvi premazi zahtijevaju nanošenje temeljnog premaza, a limove je potrebno ponovo očistiti prije nanošenja temeljnog premaza.

### 6.8.3 Debljina sloja, prionjivost i neporoznost

Debljina sloja mjerodavna je za zaštitno djelovanje, trajnost, učestalost pora, elastičnost i tvrdoću premaza. Dok pretanki sloj premaza ne pruža dovoljnu zaštitu, predebeli sloj može dovesti do grešaka u premazu poput curenja, naboranosti, nepotpunog sušenja, nedovoljne prionjivosti i odvajanja sloja.

Za premaz navode se minimalne debljine sloja koje osiguravaju dobro prekrivanje. Iskustveno je utvrđeno da je odnos između minimalne, srednje i maksimalne debljine sloja:

$$\text{minimalna:srednja:maksimalna}=1:2:4, \quad (6.8.1)$$

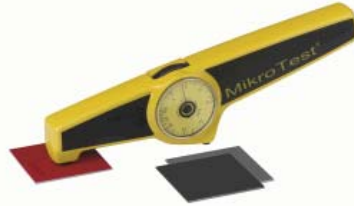


što bi značilo da za neku zahtijevanu minimalnu debljinu sloja od  $x \mu\text{m}$ , srednja debljina sloja iznosi  $2x \mu\text{m}$ , dok je maksimalna debljina sloja  $4x \mu\text{m}$ . Debljina sloja računa se kao ukupna debljina svih slojeva koji se nanose uključujući i temeljni sloj.

Kod vruće pocinčanih dijelova debljina prevlake ovisi o debljini stijenke elementa te se kreće u granicama od 5 do 8 mm, dok je minimalna debljina prevlake  $60 \mu\text{m}$ .

Veliki presjeci uobičajeno dobivaju debele prevlake.

*Debljina prevlake* se mjeri bezrazorno elektronskim mjernim instrumentima, pri čemu kod tanjih prevlaka treba uzeti u obzir i hrapavost. Također se debljina prevlake može mjeriti magnetnom metodom (samo za prevlake magnetskih metala).

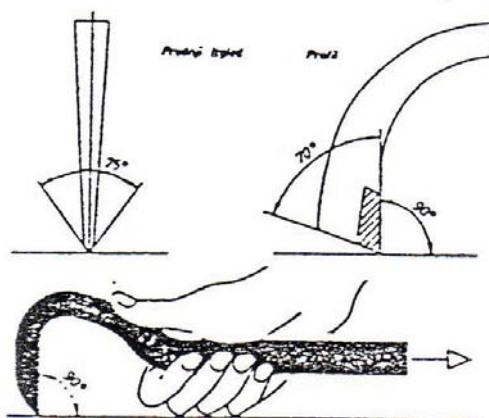


Slika 6.8.1 Mjerenje debljine prevlaka magnetnom metodom

*Prionjivost* je jedno od najvažnijih svojstava premaza i prevlaka. Prionjivost ovisi o kvaliteti pripreme površine i o kompatibilnosti premaznih sredstava, te za slučaj 2-K premaza, ovisi o korištenom odnosu komponenti. Prionjivost se utvrđuje razornim metodama, kao što je urezivanje mrežnice, odnosno kvadrata prema tablici 6.8.2. Alat koji se pri tom koristi ima vrh iz mangankarbida i oblik prikazan slikom 6.8.2. Postupak se sastoji u usijecanju dva niza, međusobno okomitih linija, tako da se dobiju kvadratići koji prekrivaju površine prema tablici 6.8.2. Dubina linija mora biti takva da prolazi kroz prevlaku do metalne podloge. Pri tome ne smije se pojaviti nikakvo odljepljivanje prevlake od metalne podloge.

debljina prevlake koja se ispituje	dimenzije površine prekrivene kvadratima	međusobni razmak paralelni linija
do $200 \mu\text{m}$	$15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$	3 mm
200 do $500 \mu\text{m}$	$25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$	5 mm
iznad $500 \mu\text{m}$	$50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$	10 mm

Tablica 6.8.2



Slika 6.8.2 Alat za urezivanje mrežnice

*Neporoznost* bitno utječe na zaštitno djelovanje nekog premaza. Neporoznost je nužno potrebna kod agresivnih medija poput soli, kiselih para ili pri visokoj vlažnosti. Neporoznost se utvrđuje

nerazornim visokonaponskim mjernim uređajima. Greške zavarenog spoja poput pora, ostataka šljake i zavarivačkih prskotina, uzrokuju mjestimične poroznosti na vruće pocinčanim površinama.

### 6.8.4 Popravci

Pri okončanju svih montažnih radova potrebno je transportna i montažna oštećenja, te mjesta montažnih zavara, pažljivo popraviti. Pri tom treba paziti na pravilno čišćenje te hrapavljenje čelične površine i postojećeg premaza.

Prijelazna zona između očišćene metalne površine i neočišćenog premaza mora biti čim uža.

Površine se pripremaju čišćenjem mlazom, a ukoliko to nije moguće, podloga se priprema rotirajućim četkama ili pištoljem s iglom uz nanošenje temeljnog premaza kistom.

Popravci na vruće pocinčanim površinama vrše se lokalnim zagrijavanjem plamenikom i taljenjem žice iz cinkovog lema. Kod većih površina s greškama potrebno je cijeli element izjetkati i ponovo vruće pocinčati. Po mogućnosti treba izbjegavati popravak vruće pocinčanih površina premaznim sredstvima s cinkovim prahom, osim ukoliko se radi o vrlo malim površinama. Popravke je u tom slučaju preporučljivo vršiti temeljnim ručnim uklanjanjem hrđe i primjenom pogodnog 2-K epoksidnog temeljnog premaza pigmentiranog olovnim minijem te potom zaštititi nekim pogodnim optički prilagođenim zaštitnim premazom.

### 6.9 Ugovaranje

Ugovorom treba definirati svojstva koja naručitelj očekuje od temeljnog premaza, metalne prevlake ili ako je potrebno cijelog premaznog sustava. Posebno je važno ugovoriti pripremu površina, vrst premaznog sredstva, debljinu sloja, te dozvoljeno trajanje izlaganja atmosferilijama (vrijeme u kojem neki premaz treba ostati u dobrom stanju i biti dobra podloga za daljnje premaze).

Najvažnije pretpostavke i svojstva koje treba unijeti u uvjete isporuke i ugovor su:

- definicija makroklimе i mikroklimе
- predobrada
- vrsta pripreme površine
- premaz (vrst, broj slojeva, program nanošenja, debljina, prionjivost, veziva i pigmenti)
- dozvoljeno trajanje izlaganja atmosferilijama
- definiranje ispitivanja kvalitete, uključujući i određivanje kontrolnih polja
- jednakovrijedna površinska zaštita za vijke i montažne zavarene spojeve
- tko popravlja transportna i montažna oštećenja te oštećenja prouzrokovana od treće strane nakon završetka montaže konstrukcije
- tko čisti temeljni premaz prije nanošenja narednih premaza (npr., čišćenje od prašine)
- dozvoljeni stupanj zahđalosti u trenutku radioničkog preuzimanja
- dozvoljeni stupanj zahrđalosti nakon isteka jamstvenog roka

Preuzimanje premaza i prevlaka obavlja se na ugovorom dogovorenim načinima, specifikacijama i traženim karakteristikama. Rezultati se unose u zapisnik o preuzimanju.

Jamstveni rok je uglavnom isti za premaze i za samu konstrukcije te iznosi 2 godine, a započinje trenutkom preuzimanja.

## 6.10 Obnavljanje

Površinsku zaštitu, posebno onih konstrukcija koje su na otvorenom ili izložene agresivnoj okolini, potrebno je periodički kontrolirati i održavati. Ovi periodi su približno svakih 5 do 6 godina. Iskustvo je pokazalo da je obnavljanje potrebno vršiti svakih 24 do 40 godina, odnosno i dulje ukoliko je konstrukcija u zatvorenom.

Prije obnavljanja treba snimiti stvarno stanje postojeće korozijske zaštite i usporediti ga sa željenim stanjem.

Pri tom vizualno može se provjeriti:

- stanje onečišćenja (moguće kemijski isprati)
- stupanj razgradnje pokrivnog premaza
- guljenje pokrivnog premaza ili čitavog sustava
- hrđa (točkasta ili površinska)
- stvaranje nabora ili usko isprepletenih pukotina uslijed stezanja

Nadalje se uređajima mogu ispitati:

- preostala debljina sloja
- prionjivost (provjeriti urezivanjem mrežnice)
- veza među pojedinim slojevima (urezivanjem mrežnice)
- krutost premaza (provjeriti naponskim urezivanjem)
- hrđanje podloge ispod premaza (provjeriti urezivanjem mrežnice)

Vrsta postojećeg sustava površinske zaštite utvrđuje se na temelju arhivirane dokumentacije i zapisnika. Ukoliko to nije moguće potrebno je laboratorijski utvrditi kemijski sastav premaza.

Odluka o ponovnom premazivanju uvjetovana je pažljivom procjenom te se tu razlikuje ponovno premazivanje od obnove površinske zaštite. Kod ponovnog premazivanja na postojeće premaze nanose se novi. Kod obnove je potrebno stari premaz u potpunosti ukloniti. Pri tom, a naročito pri obnovi, potrebno je voditi računa o kompatibilnosti. Pri ponovnom premazivanju stare premaze potrebno je ohrapaviti.

Bitumenski premazi skloni su probijanju ("cvjetanju") kod naknadnih pokrivnih premaza te je moguće naknadno premazivanje samo s istovjetnim premazima.

Treba izbjegavati primjenu rastvarača i stabilizatora hrđe.

Prilikom površinske zaštite, kao i prilikom obnove treba poštovati državne odredbe i propise o zaštiti na radu te zaštititi okoliša.

## Literatura

"B3 Površinska zaštita čeličnih konstrukcije. Zaštita od korozije premazima i prevlakama", TK-SZS Die Technische Kommission der Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau, Zürich, 1990., prijevod: Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za metalne konstrukcije Zagreb, Zagreb, 1994.

