

# ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE ZATVORENOG SPOJA PLASTIČNO DEFORMIRANE CIJEVI

---

**Vreš, Marko**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:920876>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

# ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE ZATVORENOG SPOJA PLASTIČNO DEFORMIRANE CIJEVI

---

**Vreš, Marko**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:920876>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-15**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MARKO VREŠ

**ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE ZAVARENOG  
SPOJA PLASTIČNO DEFORMIRANE  
CIJEVI**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2020. godina.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

MARKO VREŠ

**ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE ZAVARENOG  
SPOJA PLASTIČNO DEFORMIRANE  
CIJEVI**

**DETERMINATION OF WELDED JOINT  
STRENGTH FOR PLASTIC DEFORMED  
TUBE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
dr.sc. Josip Hoster, v.pred

Karlovac, 2020. godina.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija, navedenom literaturom te uz pomoć mentora dr.sc. Josipa Hostera v. pred.

Zahvaljujem se svim prijateljima koji su pomogli tokom studija, a posebno porodici koja me trpi; majka, otac, brat. Diplomski rad posvećujem baki.

Karlovac, 10.9.2020.

Marko Vreš

## SAŽETAK

Danas je sasvim normalno povezivati se mostovima, prijenositi električnu energiju dalekovodima, konstruirajući građevine (krovova) ili konstruirati umjetničke građevine. Sve te građevine imaju nešto zajedničko, a to je metalna podkonstrukcija, točnije rešetkasti nosači. Vođeni tom idejom, biti će prikazan jedan dio konstrukcije i na njemu izveden eksperiment.

Kroz proračun će se prikazati kako odabir materijala, geometrijska ograničenja ili zavareni spojevi ograničavaju konstruiranje. Proračun i eksperimenti će se izvesti na konzolnom nosaču.

## SUMMARY

Connecting with bridges, bringing electrical power with transmission lines, construction of buildings (roofs) or some construction of artist buildings are absolutely normal today. All of them had something in common, that is metal subconstruction, precisely lattice girders. Leading with this idea, it will be shown constructioning and over one part of construction it will be done testing experiments.

It will be shown over the calculation how can choising material, geometric shapes or welded joints limited ability of construction. Calculation and testing experiments will be done for console beam.

## KLJUČNE RIJEČI

Rešetkasti nosači, konzola, zavareni spoj, savijanje, plastična deformacija

## KEY WORDS

Lattice girders, console beams, welded joints, bending, plastic deformation

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	III
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS DIJAGRAMA .....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. POGLED IZ MAKRO U MIKRO SVIJET.....	4
2.1. Veza između napreznja i deformacija .....	4
2.2. Matrica tenzora napreznja .....	9
3. TEORIJE ČVRSTOĆE.....	10
3.1. Teorija najvećeg normalnog napreznja .....	10
3.2. Teorija najveće duljinske deformacije (deformacijske energije) .....	10
3.3. Teorija najvećeg posmičnog napreznja .....	10
3.4. Teorija najveće distorzijske energije (HMH teorija).....	11
4. REŠETKASTI NOSAČI .....	12
5. ZAVARIVANJE .....	15
5.1. Ručno elektroluni postupak zavarivanja (REL).....	16
5.2. Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj plinskoj atmosferi .....	17
5.3. Elektrolučno zavarivanje netaljivom žicom u zaštiti inertnog plina (TIG).....	18
6. TESTNA KONZOLA.....	20
6.1. Proračun konzole.....	23
6.2. Eksperiment savijanja konzole.....	29
6.2.1. Eksperiment 1; cijev promjera 17.2mm.....	30
6.2.2. Eksperiment 2; cijev promjera 21.3mm .....	32
6.2.3. Eksperiment 3; cijev promjera 26.9mm.....	34
7. PLASTIČNO DEFORMIRANA CIJEV .....	37
7.1. Teorija klizanja za statičko jednoosno opterećenje.....	38
7.2. Opterećenje zavarenog spoja.....	39
8. ZAKLJUČAK.....	40
PRILOZI.....	41
LITERATURA.....	42

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Eiffelov toranj u Parizu [16].....	1
Slika 2.	Skulptura „Atomium“ u Bruxelles-u [17] .....	2
Slika 3.	Partenon iz Atene sa elementom zlatnog reza .....	3
Slika 4.	Univerzalna kidalica [4] .....	5
Slika 5.	a) izgled standardne epruvete, b) dijagram naprezanje – deformacija [4] .....	6
Slika 6.	a) dijagram naprezanje – deformacija za niskougljični konstrukcijski čelik, b) izgled dijagrama za neke druge materijale [4] .....	7
Slika 7.	Kovercionalna granica razvlačenja $R_{p0.2}$ [4].....	7
Slika 8.	Komponenta tenzora naprezanja u pravokutnom koordinatnom sustavu, te kvadratna matrica .....	9
Slika 9.	Okvirna konstrukcija sa rešetkastom konstrukcijom krova [6].....	12
Slika 10.	Rešetkasti nosač krovne konstrukcije kinodvorane, 28.01.2016, Donja Stubica..	12
Slika 11.	Foriranje stabilne rešetkaste strukture [7] .....	13
Slika 12.	Različiti oblici statički određenih i geometrijski nepromjenjivih rešetkastih nosača, Pratt-ove rešetke [7] .....	14
Slika 13.	Rešetkaste konstrukcije; primjer Željezničkog mosta na rijeci Savi u Zagrebu, te dalekovoda u Varaždinu [21] .....	14
Slika 14.	Zavar i zavareni spoj elemenata 1 i 2 [15] .....	15
Slika 15.	Pojmovi opreme u REL zavarivanju, te primjer zavarivanja cijevi [9].....	16
Slika 16.	Pojmovi opreme u MIG/MAG zavarivanju, te primjer sučeonog zavarivanja [9]	17
Slika 17.	Pojmovi opreme u TIG zavarivanju, te primjer zavarivanja cijevne konstrukcije [9] .....	18
Slika 18.	Zavar konzole sa MAG postupkom.....	20
Slika 19.	Specifikacija dodatnog materijala, pobakrena žica za MAG postupak.....	21
Slika 20.	Plin UN1013, odnosno ugljični dioksid za MAG postupak zavarivanja .....	21
Slika 21.	Eksperiment; konzola opterećena silom na kraku.....	22
Slika 22.	Konzolni nosač opterećen silom na kraku, te dijagram sila moment [2] .....	23
Slika 23.	Lijevo naznačeni maksimalni progib i kut zaokreta, a desno je izdvojen dio štapa nadomješten protutežnim opterećenjima [2] .....	23
Slika 24.	Maksimalno savinut cijevni štاپ konzole, cijev promjera $17.2mm$ .....	31
Slika 25.	Maksimalno savinut cijevni štاپ konzole, cijev promjera $21.3mm$ .....	33
Slika 26.	Puknuće zavarenog spoja uslijed naprezanja, cijev promjera $26.9mm$ .....	35
Slika 27.	Odlomljeni zavar, eksperiment sa cijevi promjera $26.9mm$ .....	36
Slika 28.	Vlačna, tlačna naprezanja savojno opterećene cijevi .....	37
Slika 29.	Shematski prikaz deformiranja mono kristalne strukture klizanjem [13] .....	38
Slika 30.	Greške kompatibilnosti i dimenzionalne greške zavara [14] .....	39
Slika 31.	Presjek zavarenog spoja, homogenost osnovnog i dodatnog materijala .....	39



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti konstanta elastičnosti nekih izotropnih materijala [3].....	9
Tablica 2. Ekvivalentna naprezanja za različite teorije čvrstoće [5].....	11
Tablica 3. Momenti tromosti i momenti otpora poprečnog presjeka [5].....	25
Tablica 4. Lista izdvojenih materijala sa mehaničkim karakteristikama pri sobnoj temperaturi [Prilog III].....	26
Tablica 5. Dopuštena naprezanja zavarenih spojeva prema tipu, vrsti naprezanja, razredu kvaliteti zavara i vrsti opterećenja [11] .....	28
Tablica 6. Klasifikacija kvalitete zavarenog spoja [11] .....	28
Tablica 7. Među rezultati i konačni rezultati proračuna.....	29
Tablica 8. Korelacija starih i novih oznaka čelika [12].....	29
Tablica 9. Mjerenje vrijednosti odnosa sila – promjena progiba na cijevi promjera 17.2mm <sup>31</sup>	
Tablica 10. Mjerenje vrijednosti odnosa sila – promjena progiba na cijevi promjera 21.3mm <sup>32</sup>	
Tablica 11. Mjerenje vrijednosti odnosa sila – promjena progiba na cijevi promjera 16.9mm <sup>34</sup>	

## POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Odnos sila – progib za cijev promjera 17.2mm.....	30
Dijagram 2. Odnos sila – progib za cijev promjera 21.3mm.....	32
Dijagram 3. Odnos sila – progib za cijev promjera 26.9mm.....	34

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
2020091000-00	Montažni sklop konzolnog nosača

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\phi$	-	Zlatni rez
$d_0$	mm	Poprečni presijek epruvete
$A_0$	mm <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka epruvete
$\Delta l$	mm	Produljenje epruvete
$l_0$	mm	Početna duljina epruvete
$\sigma_0$	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalno naprezanje
$\varepsilon$	-	Prosječna duljinska deformacija
$\sigma_P$	N/mm <sup>2</sup>	Granica proporcionalnosti
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Young-ov modul elastičnosti
$\sigma_E$	N/mm <sup>2</sup>	Granica elastičnosti
$R_{eH}$	N/mm <sup>2</sup>	Gornja granica elastičnosti
$R_{eL}$	N/mm <sup>2</sup>	Donja granica elastičnosti
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća materijala
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Stvarno naprezanje
$R_{p0.2}$	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalna granica razvlačenja
$\varepsilon_q$	-	Prosječna poprečna duljinska deformacija
$\Delta d$	mm	Promjena promjera epruvete
$\nu$	-	Poisson-ov koeficijent
$G$	GPa	Modul smicanja
$\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Smično naprezanje
$\gamma$	rad	Kutna deformacija
$\sigma_{ekv}$	N/mm <sup>2</sup>	Ekvivalentno naprezanje
$\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	Najveće apsolutno naprezanje
$\sigma_{dop}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno naprezanje
$\varepsilon_{max}$	-	Najveća apsolutna vrijednost duljinske deformacije
$\varepsilon_{dop}$	-	Dopuštena duljinska deformacija
$\tau_{dop}$	N/mm <sup>2</sup>	Dopušteno smično naprezanje
$U_{0d}$	J	Gustoća distorzijske energije
$(U_{0d})_{dop}$	J	Dopuštena gustoća distorzijske energije
$n_{\bar{s}}$	-	Potreban broj štapova rešetkastog nosača
$n_{\bar{c}}$	-	Broj čvorova rešetkastog nosača
$n_{\bar{s}}'$	-	Svi štapovi rešetkastog nosača
$M_y$	Nm	Moment savijanja
$F$	N	Vlačna/tlačna sila
$l$	mm	Krak konzole
$w$	mm	Progib konzole
$I_y$	mm <sup>4</sup>	Moment tromosti

---

$W$	$mm^3$	Moment otpora
$\beta$	$^\circ$	Nagib konzole
$w_{max}$	$mm$	Maksimalni progib
$D$	$mm$	Vanjski promjer cijevi konzole
$d$	$mm$	Unutarnji promjer cijevi konzole
$S$	-	Koeficijent sigurnosti
$M_{max}$	$Nm$	Maksimalni savojni moment
$l_{max}$	$mm$	Maksimalna duljina kraka
$\sigma_{zav}$	$N/mm^2$	Naprezanje u zavarenom spoju
$M_{zav}$	$Nm$	Moment u zavarenom spoju
$W_{zav}$	$mm^3$	Moment otpora zavarenog spoja
$F_{zav}$	$N$	Sila zavarenog spoja
$\sigma_{dop,zav}$	$N/mm^2$	Dopušteno naprezanje u zavarenom spoju

## 1. UVOD

Industrijskom revolucijom, pa nadalje intezivno se primjenjuju, grade i usavršavaju metalne konstrukcije. Jedan aspekt tih konstrukcija sadrže rešetkaste konstrukcije. Svrha tih konstrukcija je razna; od praktične primjene do prestiža u svijetu. Jedan od najpoznatijih tornjeva, Eiffelov toranj u Parizu je izuzetan primjer metalne rešetkaste konstrukcije, od čega su rešetke povezane zakovičnim spojem.



*Slika 1. Eiffelov toranj u Parizu [16]*

Također, neizostavna je skulptura „Atomium“ izgrađena u svrhu Svjetske izložbe, koja je u međuvremenu postala simbol grada Bruxelles-a. Skulptura predstavlja devet atoma jednog alfa-željeznog kristala.



*Slika 2. Skulptura „Atomium“ u Bruxelles-u [17]*

Valja napomenuti da današnje konstrukcije predstavljaju izazov ne samo kao prestiž i ogledalo uspjeha, nego i izazov odoljenju profita na uštrb profesionalnog proračuna, kvalitetnog ispitivanja te uporabu „povoljnijih“ materijala.

Nije na odmet prisjetiti se konstrukcija antičkih Grka, Rimljana ili Egipćana gdje se nije težilo samo funkcionalnosti nego i umjetnosti. Preciznost tih konstrukcija je išla i više od milimetar točnosti, te je ujedno bila i stopljena sa prirodom. Tu do izražaja dolazi pojam „zlatni rez“, oznake grčkog slova  $\phi$ . Taj matematičko-strukturalni pojam opisuje prirodne omjere, stopljene s prirodom. Konkretno to je način podjele neke vrijednosti s djeliteljem od približno  $\phi=1,618033989$  koliko i iznosi. [18]



*Slika 3. Partenon iz Atene sa elementom zlatnog reza [19]*



## 2. POGLED IZ MAKRO U MIKRO SVIJET

Proračun stabilnosti konstrukcije odnosno računanje graničnih vrijednosti izdržljivosti bazira se na pojednostavljenju istih. Cilj je što točnije opisati problem, kako bi se iz njega moglo što više poznatih vrijednosti izvući. Također ako konstrukcija treba biti otporna na eksploziju, svakako će prioritet izračuna imati dinamičko opterećenje nad statičkim. S druge strane iz konstrukcije se raspoznaju koji su elementi noseći, a koji pomoćni ili služe u dekorativne svrhe, podkonstrukcija sekundarnih elemenata i tome slično.

Ne postoji univerzalan način rješavanja nepoznanica i definiranja određenog krutog tijela. Zato se primjenjuje teorija elastičnosti, a u slučaju kada nema čistih analitičkih rješenja pristupa se eksperimentalnim te numeričkim metodama poput metodi konačnih elemenata.

Postupak analize naprezanja i deformacijama u nauci o čvrstoći olakšavaju se pomoću definiranja pretpostavki i određenih zakona:

- Pretpostavka deformiranja ili raspodjele naprezanja

Geometrijskom, odnosno kinematičkom analizom izvode se izrazi za raspodjelu deformacija. Nepoznati parametri koji se pojavljuju su konstante ili funkcije. Vrijedi za statički, ne i za dinamički proračun.

- Hook-ov zakon (vrijedi za linearno elastično tijelo)

Uz pomoć jednadžbi deformacija određuju se izrazi raspodjele naprezanja.

- Postavljanje jednadžbi ravnoteže ili jednadžbe gibanja sa naprezanjima

Tim jednadžbama se određuju nepoznati parametri, te konačni izrazi naprezanja i deformacija. Nepoznatih parametara smije biti koliko ima nezavisnih uvjeta ravnoteže.

Dozvoljava se da približnim pretpostavkama temeljenim na iskustvu, eksperimentima, uvjetima simetrije tijela i opterećenja, greška rješenja bude dozvoljena do 5%. [1]

### 2.1. Veza između naprezanja i deformacija

Između naprezanja i deformacija postoji odgovarajuća veza. Veća naprezanja izazivaju veće deformacije, ali isto tako deformacije uz naprezanja ovise i o materijalu od kojeg je tijelo izrađeno. Ovisnost naprezanja i deformacija za razne materijale određuje se laboratorijskim pokusima sukladno normama *ISO 6892-1:2016* i *EN ISO 6892-1:2016*, na uređajima kao što je univerzalna hidraulička kidalica prikazana na slici ispod. [2]



Slika 4. Univerzalna kidalica [4]

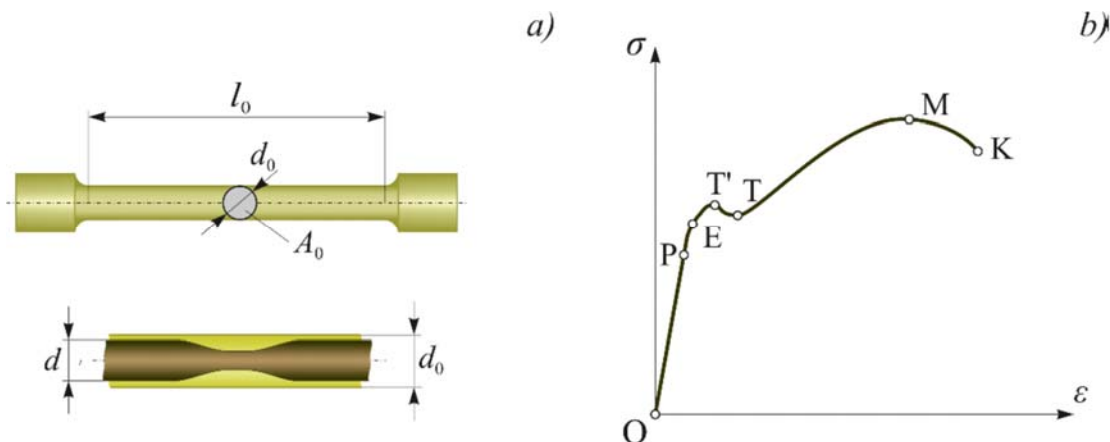
Najčešće se provodi pokus rastezanja na standardnoj epruveti koja obično ima kružni poprečni presjek promjera  $d_0$ . Epruveta se optereti vlačnom silom  $F$ , koja se postupno povećava, pri čemu se za svaku vrijednost sile mjeri produljenje  $\Delta l$  početno označene dužine na epruveti kojoj je duljina  $l_0$ . Dijeljenjem sile  $F$  s površinom poprečnog presjeka:  $A_0 = d_0^2 \cdot \pi/4$  dobije se konvencionalno naprezanje  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

a dijeljenjem produljenja  $\Delta l$  s početnom duljinom izračunava se prosječna duljinska deformacija  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Dobivene vrijednosti unose se u dijagram  $\sigma = f(\varepsilon)$ . Primjer tako dobivenog dijagrama za niskouglični konstrukcijski čelik prikazan je na slici ispod.



Slika 5. a) izgled standardne epruvete, b) dijagram naprezanje – deformacija [4]

Iz dijagrama se može vidjeti kako do neke vrijednosti iznosa naprezanja postoji linearna veza između naprezanja i deformacija (točka  $P$  na dijagramu), dok je pri većim iznosima naprezanja od tog veza naprezanja i deformacija nelinearna (krivulja od točke  $P$  do točke  $K$  na dijagramu).

Značenje označenih točaka na dijagramu je sljedeće:

- naprezanje koje odgovara točki  $P$  naziva se granica proporcionalnosti  $\sigma_p$ , i do tog iznosa naprezanja postoji linearna veza između naprezanja i deformacija koja se može prikazati jednadžbom:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.3)$$

koja predstavlja Hook-ov zakon za jednoosno stanje naprezanja; u jednadžbi  $E$  predstavlja konstantu elastičnosti koja se naziva Youngeov modul elastičnosti;

- točka  $E$  označava granicu elastičnosti  $\sigma_E$ ; ako se epruveta pri toj i nižim vrijednostima naprezanja rastereti, vraća se u početni oblik, tj. nakon rasterećenja nema deformacija;

- kada iznos naprezanja premaši granicu elastičnosti  $\sigma_E$ , materijal se počinje ponašati neelastično ili plastično što znači da u epruveti nakon rasterećenja ostaju trajne plastične deformacije; nakon što naprezanje dostigne gornju granicu razvlačenja  $R_{eH}$  (starija oznaka  $\sigma_{T'}$  – točka  $T'$  na slici iznad), naglo opada na vrijednost  $R_{eL}$ , što je donja granica razvlačenja (starija oznaka  $\sigma_T$  – točka  $T$  na slici gore), dakle deformacije rastu bez povećanja naprezanja;

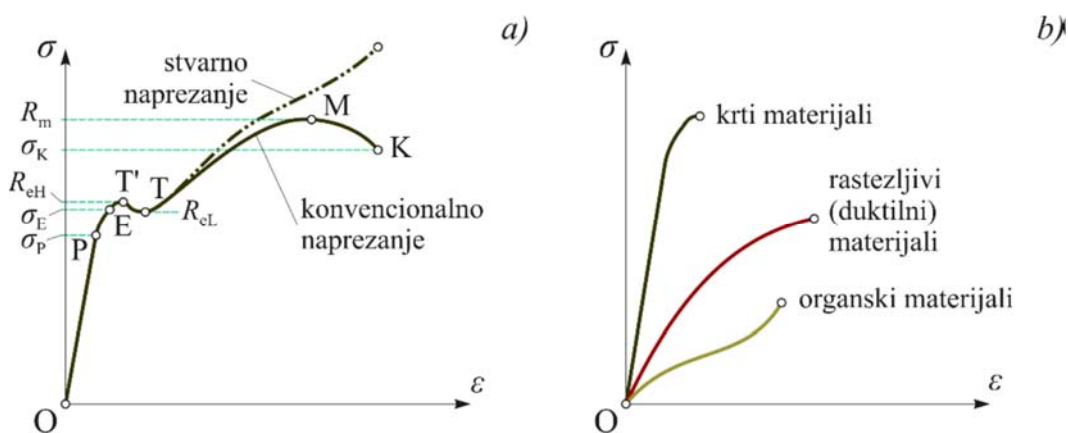
- nakon određene deformacije konvencionalno naprezanje  $\sigma_0$  ponovno raste do iznosa  $R_m$  (starija oznaka  $\sigma_M$  – točka  $M$  na slici iznad); ta vrijednost predstavlja vlačnu ili rasteznu čvrstoću materijala;

- nakon toga konvencionalno naprezanje opada dok se epruveta ne slomi (točka  $K$  na slici iznad).

Na slici iznad punom linijom prikazano je konvencionalno naprezanje gdje se sila stalno dijeli s početnom površinom poprečnog presjeka  $A_0$ .

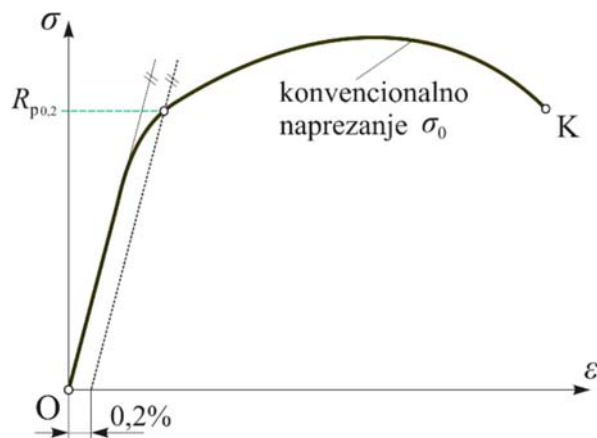
Kako se pri rastezanju približavanjem iznosa naprezanja granici tečenja epruveta naglo sužava – pojava vrata epruvete – smanjuje se početni promjer  $d_0$ , a time i površina stvarnog poprečnog presjeka  $A_0$  (slika iznad).

Ako se sila dijeli sa stvarnom površinom poprečnog presjeka  $A$ , dobiva se stvarno naprezanje  $\sigma$ . Do pojave vrata naprezanja i deformacije jednoliko su raspodijeljeni u epruveti. Nakon pojave vrata naprezanja i deformacije u blizini vrata veći su od naprezanja i deformacija u ostalom dijelu epruvete, a konvencionalno naprezanje  $\sigma_0$  i stvarno naprezanje  $\sigma$  sve se više razlikuju. Stvarno naprezanje prikazano je na slici ispod isprekidanom linijom.



Slika 6.: a) dijagram naprezanje – deformacija za niskouglični konstrukcijski čelik, b) izgled dijagrama za neke druge materijale [4]

Na slici iznad pod b) prikazan je izgled  $\sigma - \epsilon$  dijagrama za neke krte, duktilne i polimerne materijale.



Slika 7. Konvencionalna granica razvlačenja  $R_{p0,2}$  [4]

Kod materijala koji imaju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija (duktilni materijali kao npr. aluminij i njegove legure, bakar i njegove legure i dr.) utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja  $R_{p0,2}$ , slika iznad.

To je ono naprezanje koje će u materijalu nakon rasterećenja ostaviti plastičnu deformaciju od 0.2%.

Budući da se pri rastezanju epruvete mijenja i njen promjer, može se definirati i prosječna poprečna duljinska deformacija:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2.4)$$

Omjer poprečne i uzdužne duljinske deformacije daje novu konstantu elastičnosti koja se naziva Poissonov koeficijent:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Slično pokusu rastezanja na normiranoj epruveti laboratorijskim pokusima dobivena je veza posmičnog naprezanja i kutne deformacije koja se u elastičnom području može prikazati jednadžbom:

$$\tau = G * \gamma \quad (2.6)$$

gdje je  $G$  još jedna konstanta elastičnosti nazvana modulom smicanja.

Može se pokazati da su konstante elastičnosti Youngev modul elastičnosti  $E$ , Poissonov koeficijent  $\nu$  i modul smicanja  $G$  povezani izrazom:

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \quad (2.7)$$

Konstante elastičnosti  $E$  i  $G$  imaju dimenziju naprezanja, dok je konstanta elastičnosti  $\nu$  nedimenzionalna veličina.

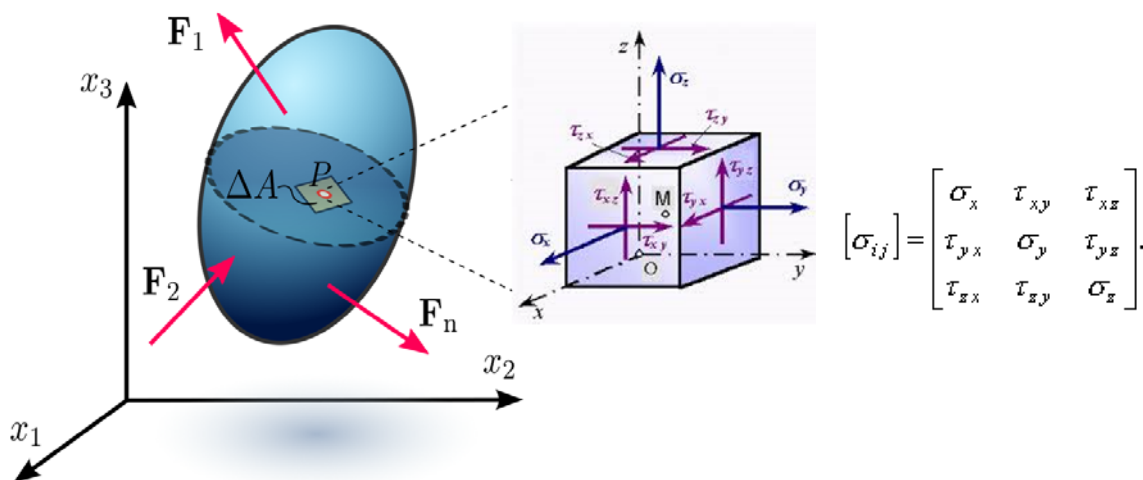
Vrijednosti ovih konstanta za neke izotropne materijale dane su u tablici ispod. Izotropni elastični materijali za razliku od anizotropnih imaju svojstvo da je deformacija (po Hook-ovom zakonu) jednaka u svim smjerovima. [2]

Tablica 1. Vrijednosti konstanta elastičnosti nekih izotropnih materijala [3]

MATERIJAL	$E$	$G$	$\nu$
	GPa	GPa	–
Ugljični čelik	200–210	80–81	0,24–0,28
Legirani čelik	210–220	80–81	0,25–0,30
Lijevano željezo	115–160	45	0,25–0,27
Bakar	84–130	40–49	0,31–0,34
Bronca	105–115	40–42	0,32–0,35
Mjed	90–120	35–37	0,32–0,42
Aluminij i legure	70–71	26–27	0,32–0,36
Magnezij i legure	45	17	–
Olovo	17	7	0,42
Staklo	56	22	0,25
Beton	15–40	–	0,08–0,18
Guma	0,01	–	0,47
Pluto	0,006	–	0,00

## 2.2. Matrica tenzora naprežanja

Svaku izdvojenu točku iz opterećenog tijela moguće je promatrati zasebno. Moguće je postaviti po volji mnogo presjeka te po volji broj vektora naprežanja, odnosno komponenta naprežanja. Slučaj je moguće predočiti u tri poznate ravnine Kartezijevog koordinatnog sustava. Prema tome stanje naprežanja u nekoj točki zadaje se sa 9 komponenta. Tih 9 komponenta naprežanja tvore kvadratnu matricu tenzora naprežanja. [1]



Slika 8. Komponenta tenzora naprežanja u pravokutnom koordinatnom sustavu, te kvadratna matrica

[20]

### 3. TEORIJE ČVRSTOĆE

Svojstva čvrstoće i elastičnosti tehničkih materijala utvrđuje se vlačnim, tlačnim i smičnim eksperimentima. Za jednoosno naprezanje ili čisto smicanje, čvrstoća se određuje usporedbom normalnog ili posmičnog opterećenja sa kritičnim naprezanjem ranije određeno eksperimentalno vlačnim, tlačnim ili smičnim eksperimentom. Kritično naprezanje krhkih materijala jednako je lomnom naprezanju, a kritično naprezanje rastezljivih materijala jednako je granici tečenja.

Gore spomenuti postupci su prihvatljivi za jednoosna naprezanja dok nije praktično za dvoosno i troosno naprezanje. Stoga bi ispitivanje kritičnog naprezanja za sve materijale i kombinacije bilo veoma skupo i dugotrajno, te bi neke kombinacije tehnički bilo teško izvedivo. Iz tog razloga se uvode teorije čvrstoće odnosno kriteriji loma. Tako postoji više teorija koje nisu primjenjive za sve materijale, te se pojedine koriste za elastično, a neke isključivo za plastično područje. [1]

#### 3.1. Teorija najvećeg normalnog naprezanja

Opasnost od loma nastaje kada najveće normalno naprezanje postigne kritičnu vrijednost. Od tri glavnih naprezanja najveće apsolutno naprezanje je mjerodavno. Uvjet čvrstoće je:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} \leq \sigma_{dop} \quad (3.1)$$

Vrijedi za materijale iste vlačne i tlačne čvrstoće, pri čemu je  $\sigma_{ekv}$  ekvivalentno naprezanje,  $\sigma_{max}$  najveća apsolutna vrijednost glavnih naprezanja, a  $\sigma_{dop}$  dopušteno naprezanje. [4]

#### 3.2. Teorija najveće duljinske deformacije (deformacijske energije)

Opasnost od loma nastaje kada najveća duljinska deformacija dostigne kritičnu vrijednost određenu eksperimentom rastezanja koja iznosi:

$$|\varepsilon_{max}| < \varepsilon_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{E} \quad (3.2)$$

Pri čemu je  $|\varepsilon_{max}|$  najveća apsolutna vrijednost duljinske deformacije. [4]

#### 3.3. Teorija najvećeg posmičnog naprezanja

Opasnost od plastičnog tečenja ili loma nastaje kad najveće posmično naprezanje dostigne kritičnu vrijednost. [4]

$$\tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2} \quad (3.3)$$

### 3.4. Teorija najveće distorzijske energije (HMH teorija)

Kada gustoća distorzijske energije dostigne kritičnu vrijednost, tada nastupa opasno stanje materijala. Uvjet čvrstoće je  $U_{0d} \leq (U_{0d})_{dop}$ , gdje  $U_{0d}$  predstavlja gustoću distorzijske energije ili energije promjene oblika, a  $(U_{0d})_{dop}$  dopuštenu gustoću distorzijske energije koja je određena eksperimentom rastezanja i iznosi za jednoosno stanje naprezanja [4]:

$$(U_{0d})_{dop} = \frac{1+\nu}{3 * E} * \sigma_{dop}^2 \quad (3.4)$$

U narednoj tablici dan je pregled teorija čvrstoća prema zadanom stanju naprezanja.

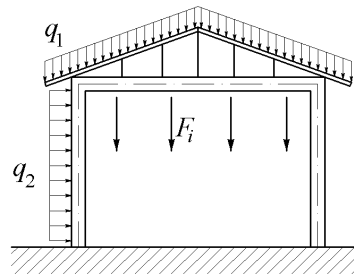
Tablica 2. Ekvivalentna naprezanja za različite teorije čvrstoće [5]

Teorija čvrstoće	Stanje naprezanja			n	Primjena
	zadano: $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	zadano: $\sigma_x = \sigma, \tau_{xy} = \tau$	zadano: $\tau_{xy} = \tau$		
Teorija najvećih normalnih naprezanja (Galilei, Lamé)	$\sigma_{ekv} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_{ekv} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$	$\sigma_{ekv} = \tau$	1	Za krhke materijale opterećene na vlak, savijanje i torziju
Teorija najvećih posmičnih naprezanja (Mohr, Tresca)	$\sigma_{ekv} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$	$\sigma_{ekv} = 2\tau$	2	Za krhke materijale pri statičkom tlačnom i vlačnom opterećenju te pri lomovima zbog umora.
Teorija najvećih normalnih deformacija (Bach, S. Venant)	$\sigma_{ekv} = (1-\nu) \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \pm \frac{1+\nu}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$	$\sigma_{ekv} = \frac{1-\nu}{2} \sigma \pm \frac{1+\nu}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$ za čelik: $\sigma_{ekv} = 0,35\sigma + 0,65\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$	$\sigma_{ekv} = (1+\nu)\tau$ za čelik: $\sigma_{ekv} = 1,3\tau$	1,3	Više se uglavnom ne primjenjuje.
Teorija najveće deformacijske energije (Beltrami, Haigh)	$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2 - 2\nu\sigma_y\sigma_x + 2(1+\nu)\tau_{xy}^2}$	$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 2(1+\nu)\tau^2}$ za čelik: $\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 2,6\tau^2}$	$\sigma_{ekv} = \sqrt{2(1+\nu)}\tau$ za čelik: $\sigma_{ekv} = 1,61\tau$	1,61	Najčešće kod čelika za opruge, lomova zbog umora i preoblikovanja.
Teorija najveće distorzijske energije (Huber, Hencky, von Mises)	$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2 - \sigma_y\sigma_x + 3\tau_{xy}^2}$	$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$	$\sigma_{ekv} = 1,73\tau$	1,73	Kod žilavih materijala, lomova zbog umora i preoblikovanja.



## 4. REŠETKASTI NOSAČI

Praktičnu primjenu rešetkastih nosača nalaze se u raznim konstrukcijama; od mostova, dalekovoda, krovnih konstrukcija, itd. Na slici ispod prikazana su glavna opterećenja objekta (vjetar, snijeg, vlastita težina), gdje se velika većina odnosi na krovna opterećenja, odnosno opterećenja u rešetkastim nosačima, a to su međuostalim vlastita težina i snijeg.



Slika 9. Okvirna konstrukcija sa rešetkastom konstrukcijom krova [6]

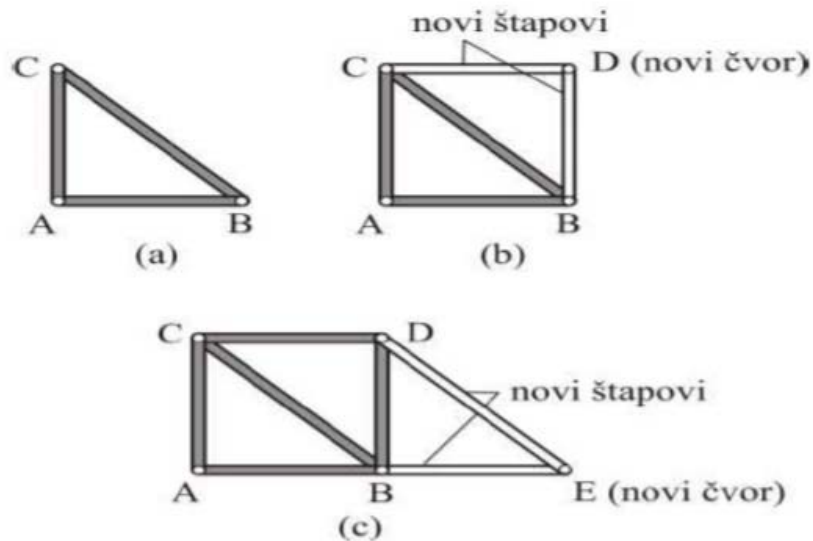
Nosači sastavljeni od štapova koji su međusobno spojeni zglobovima zovu se rešetkasti nosači. Rešetkasti nosači mogu biti statički određeni i statički neodređeni. Statički određeni i geometrijski nepromjenjivi rešetkasti nosači su oni koji imaju dovoljan broj ispravno raspoređenih štapova i dovoljan broj ispravno raspoređenih vanjskih veza. Statički neodređeni rešetkasti nosači imaju više od dovoljnog broja pravilno raspoređenih štapova, vanjskih veza ili jedno i drugo.



Slika 10. Rešetkasti nosač krovne konstrukciju kinodvorane, 28.01.2016, Donja Stubica

Geometrijski promjenjive rešetkaste strukture mogu biti i statički određene i statički neodređene, ako su im štapovi ili vanjske veze nepravilno raspoređene ili ih ima nedovoljno. Osnovni stabilni element svake ravninske rešetke je „trokut“ s tri štapa i tri čvora. Na tu čvrstu

figuru dodajemo po jedan čvor s dva štapa i tako gradimo stabilnu strukturu „rešetkasti disk“, slika ispod. [7]



Slika 11. Formiranje stabilne rešetkaste strukture [7]

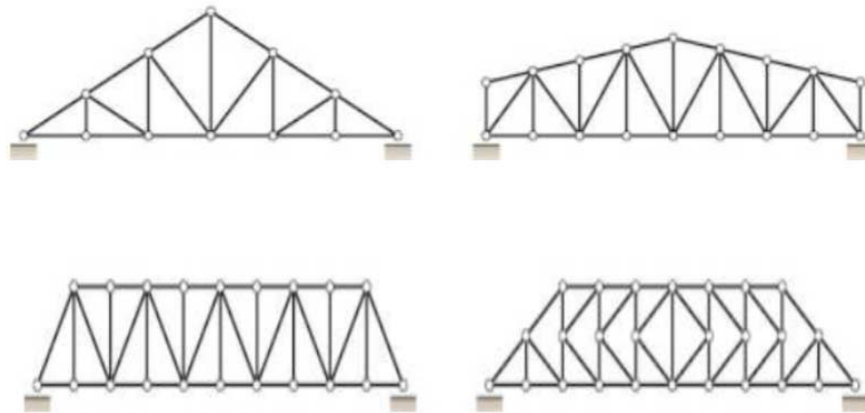
Čvrsti rešetkasti disk pomoću vanjskih veza povezujemo za nepomičnu podlogu i tako dobivamo stabilni rešetkasti nosač. Statičku određenost rešetkastih nosača u ravnini provjeravamo pomoću formule za broj potrebnih štapova.

$$nš=2*nč-3 \quad (4.1)$$

gdje je  $nš$  potreban broj štapova, a  $nč$  broj čvorova rešetke. Ako se u broj štapova uključe i vanjske veze, dobiva se nužan uvjet statičke određenosti i geometrijske nepromjenjivosti u obliku.

$$nš'=2*nč \quad (4.2)$$

gdje  $nš'$  predstavlja sve štapove uključujući i vanjske veze pretvorene u štapove. Rešetkasti nosači u ravnini mogu biti različitih oblika i statičkih sustava: obična rešetka na dva ležaja sa ili bez prepusta, konzolna rešetka, Gerberova rešetka i trozglozna rešetka. Rešetkasti nosač može biti sastavljen od kombinacije štapova i punostijenih diskova, itd. [7]



Slika 12. Različiti oblici statički određenih i geometrijski nepromjenjivih rešetkastih nosača, Pratt-ove rešetke [7]

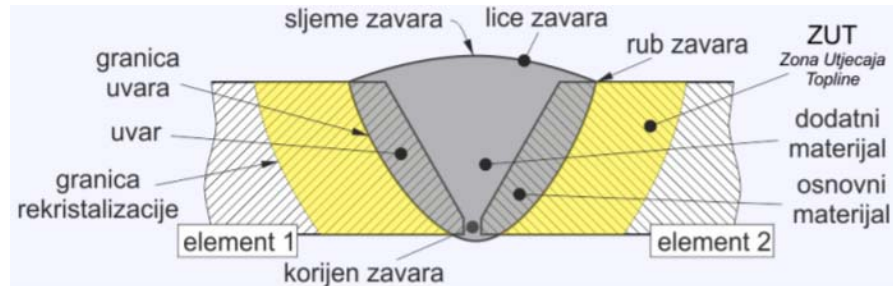
Primjeri primjene rešetkastih nosača su: krovne konstrukcije, dalekovodi, mostne konstrukcije u željezničke ili cestovne svrhe, pa sve do nekih umjetničkih konstrukcija poput ranije prikazanog u uvodu Eiffelovog tornja ili „Atomium“ skulpture u Bruxelles-u.



Slika 13. Rešetkaste konstrukcije; primjer Željezničkog mosta na rijeci Savi u Zagrebu, te dalekovoda u Varaždinu [21]

## 5. ZAVARIVANJE

Jedna od glavnih nedostataka spajanja materijala zavarivanjem su zaostala naprezanja. Unosom toplinske energije te hlađenjem utječe se na mikrostrukturu osnovnog materijala. Sam zavareni spoj obuhvaća zavar i dijelove spajanih elemenata te zonu utjecaja topline (ZUT) koji se nalaze neposredno uz zavar.

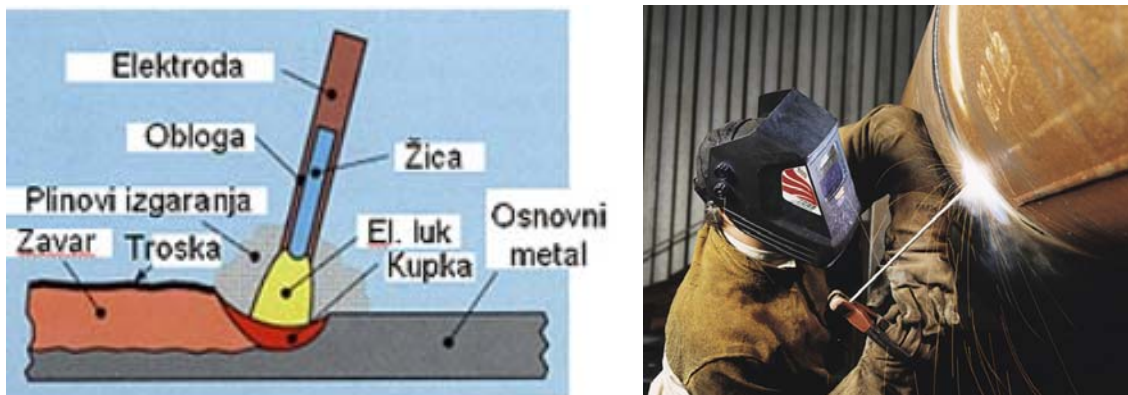


Slika 14. Zavar i zavareni spoj elemenata 1 i 2 [15]

Za vrijeme zagrijavanja najprije se pojavljuju zaostala tlačna naprezanja u području osnovnog materijala koji sprečava prirodno širenje i skupljanje materijala u zoni utjecaja topline. Nakon postizanja vršne vrijednosti, preostalo zaostalo tlačno naprezanje postupno se smanjuje zahvaljujući popuštanju materijala (zbog zagrijavanja). Da bi se prilagodila neprirudnoj duljini, za vrijeme hlađenja, zona taljenja kojoj je skupljanje onemogućeno mora se plastično deformirati, što stvara polje vlačnih zaostalih naprezanja (u vrhu zavora mogu imati iznos oko granice tečenja materijala) koje se povećava sve dok se ne postigne sobna temperatura. [8]

## 5.1. Ručno elektrolučni postupak zavarivanja (REL)

Postupak je jednostavan za rukovanje. Primjenjuje se za zavarivanje i navarivanje svih vrsta metala istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Električni luk se uspostavlja između vrha elektrode i radnog komada i postupak je ručni, što znači da je neophodan zavarivač.



Slika 15. Pojmovi i oprema u REL zavarivanju, te primjer zavarivanja cijevi [9]

### Prednosti:

- jeftina oprema,
- širok spektar elektroda,
- koristi se za sve konstrukcijske čelike, Cu, Ni, Ti i dr.,
- za sve debljine zavara (od 1mm do 100mm),
- izvedivo je višeslojno zavarivanje,
- zavarivanje u svim položajima.

### Nedostaci:

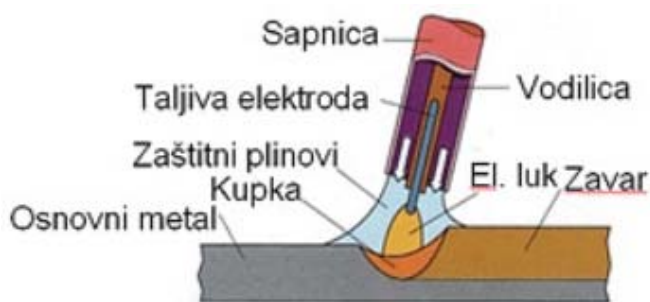
- postupak se obavlja ručno (mogućnost greške),
- puno dimova (potrebna ventilacija),
- stvaranje troske (opasnost troske u zavaru),
- otpad – moraju se ukloniti,
- prekidi i uspostavljanje luka – moguće pogreške.

Obloga elektrode služi za bi zaštitila talinu i to kroz električnu, fizikalnu i metaluršku funkciju, a to su stabilnost električnog luka, zaštita taline od okolnih plinova, obloga ima komponente koje legiraju metal zavara te utječu na deoksidaciju taline. Prema oblozi najčešće upotrebljavane su rutilne i bazične elektrode. Rutilna elektroda pruža stabilan električni luk, može zavarivati na istosmjernoj i izmjeničnoj struji, daje estetsko lijep zavar ali ima lošija

mehanička svojstva za razliku od bazičnih. Bazične elektrode daju dobru žilavost i čvrstoću, zavaruje se isključivo na plus polu, visina luka se mora održavati prema debljini elektrode, obloga oslobađa primjese jer na sebe veže kisik, vodik, sumpor i fosfor. [9]

## 5.2. Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj plinskoj atmosferi

Električni se luk, kod zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi, uspostavlja i održava između vrha taljive metalne elektrode, odnosno žice i zavarenog metala. Kada se kao zaštitni plinovi koriste neutralni inertni plinovi, npr. argon, helij ili mješavina plinova onda se ovaj postupak naziva MIG (elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u inertnom plinu). Kada se kao zaštitni plin koriste aktivni plinovi, najčešće CO<sub>2</sub> i njegove mješavine s drugim plinovima, onda se postupak naziva MAG (elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u neutralnom plinu).



!

Slika 16. Pojmovi i oprema u MIG/MAG zavarivanju, te primjer sučeonog zavarivanja [9]

Kao dodatni materijal se koristi žica punog presjeka promjera 0.6mm do 2.4 mm koja je zbog boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije pobakrena. Ovaj postupak se najčešće koristi za zavarivanje obojenih metala, visokolegiranih čelika i drugih metala koji se rado vežu s kisikom kao i zavarivanje tankih limova. [9]

### Prednosti MIG/MAG postupka:

- brzine zavarivanja (do 1m/min)
- mogu se zavarivati tanki, srednji i debeli komadi
- za sve vrste metala
- u svim položajima zavarivanja
- postupak se može automatizirati i robotizirati

### Nedostaci MIG/MAG postupka

- skupa oprema
- velika pozornost oko zaštite zbog plina
- opasnost od naljepljivanja

### 5.3. Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG)

Postupak se temelji na uspostavljanju i održavanju električnog luka između volframove netaljive elektrode i radnog komada uz zaštitu neutralnog ili inertnog plina, odnosno odgovarajuće mješavine plinova. Mali intenzivan električni luk nastaje iz usmjerene elektrode, idealan je za visoko kvalitetno i precizno zavarivanje. Toplina električnog luka tali i spaja rubne dijelove osnovnog metala, a ako je potrebno sa strane se dovodi i dodatni materijal.



Slika 17. Pojmovi i oprema u TIG zavarivanju, te primjer zavarivanja cijevne konstrukcije [9]

Postupak se može izvesti u bilo kojem radnom položaju i na radne komade debljine manjeg od milimetra. Glavne prednosti ovog tipa zavarivanja je mogućnost prijenosa dodanog materijala u kupku bez značajnog gubitka elemenata od kojih se sastoji. Za zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura koristi se izmjenična struja, a za ostale metale se koristi istosmjerna struja s minus polom na elektrodi. TIG postupak razvijen je za zavarivanje magnezija i njegovih legura, a danas se upotrebljava za zavarivanje različitih metala od aluminija, titana, nehrđajućih čelika, tankih čeličnih limova i drugih neželjeznih metala i legura. Kao zaštitni plin koristi se argon ili helij koji ima svrhu da stvori zaštitnu atmosferu koja se

može što lakše ionizirati i štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. [9]

**Prednosti:**

- luk je vrlo stabilan (osigurava visokokvalitetno zavarivanje)
- zavareni spojevi su homogeni, dobre estetike i dobrih mehaničkih svojstava
- koristi se za zahtjevne materijale (nehrđajući čelici, Al, Ti, Cu, itd)
- zavarivanje daje najkvalitetniji zavar

**Nedostaci:**

- mala brzina zavarivanja (*10 – 15cm u min*)
- ograničeno za tanke materijale (do *6mm*)
- oprema je vrlo skupa
- skup je plin (argon)
- skup je wolfram
- radi oksidacije je nužna sekundarna zaštita



## 6. TESTNA KONZOLA

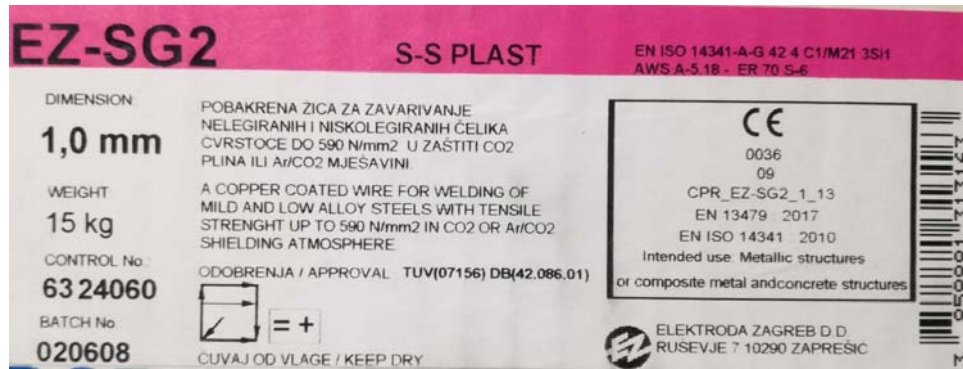
Temeljem izdvojenog dijela noseće konstrukcije, približit će se utjecaj te međusobni odnos nekolicina osnovnih veličina koje direktno utječu na konstrukciju. Prvenstveno konstrukciju definira namjena, a sekundarno vanjski utjecaji poput vjetra, snijega, same težine konstrukcije, geometrija, mogućnost izvedbe ili dobavljalivosti materijala. Računski, konstrukcija može zadovoljiti, ali ju nije moguće izvesti u tom obliku. Valja spomenuti da i doza estetike utječe na oblik konačne konstrukcije. Metalne konstrukcije se najčešće zavaruju, te je također važno predočiti kako var utječe na čvrstoću same konstrukcije.



Slika 18. Zavar konzole sa MAG postupkom

Izdvojen dio konstrukcije na kojem će se vršiti eksperiment je konzola. Ona se savojno opterećuje na kraku nekom masom konstantno do neke maksimalne vrijednosti. Krak konzole je u izvedbi okrugle cijevi, dok je sam oslonac „*IPE 100*“ profil. Parametri koji utječu na stabilnost konstrukcije su oblici oslonca, krakova, zatim materijal istih, način spajanja te dimenzije i debljine stijenki konstrukcije.

Konzola je zavarena na „*IPE 100*“ materijala *S355JR* za koji je pretpostavljeno da se ne deformira. Postupak zavarivanja je MAG sa dodatnim materijalom, žica 1mm promjera (izjava o svojstvu dodatnog materijala u prilogu), te plin UN1013 što je oznaka za CO<sub>2</sub>, specifikacija sa slike dolje.



Slika 19. Specifikacija dodatnog materijala, pobakrena žica za MAG postupak



Slika 20. Plin UN1013, odnosno ugljični dioksid za MAG postupak zavarivanja

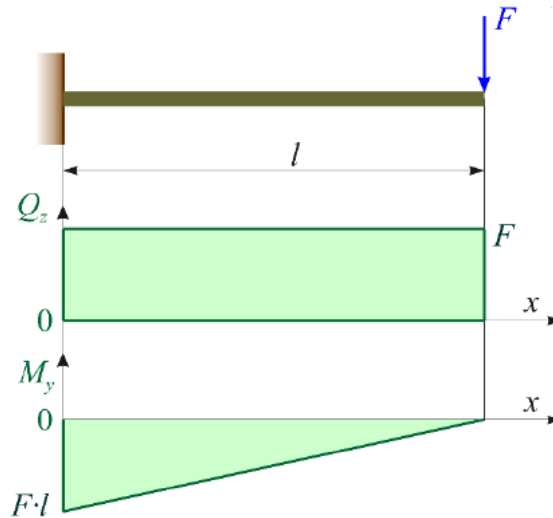
Kao konzola upotrebjene su tri različitog promjera okrugle šavne cijevi debljine 2mm, duljine kraka 750mm, materijala S235JR (tehnička specifikacija materijala u prilogu). Vanjski promjeri cijevi su 17.2mm, 21.3mm i 26.9mm. Visina zavara je  $a=3mm$ .



*Slika 21. Eksperiment; konzola opterećena silom na kraku*

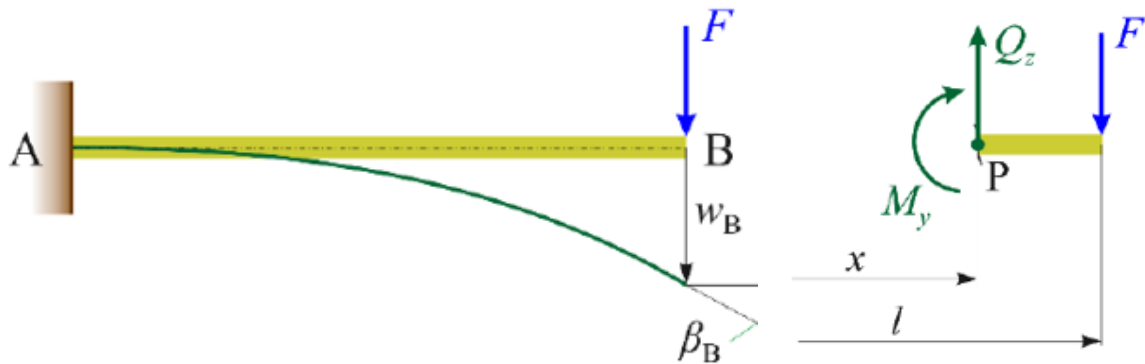
Konstantnim povećanjem opterećenja, mase na kraju konzole, kao posljedicu će konzolu savojno opteretiti. Tim opterećenjem će se konzola deformirati, prvo do granice elastičnosti, a kasnije u plastično područje sve dok do izražaja ne dođe čvrstoća zavarenog spoja odnosno kritični iznos pri kojem će zavar popustiti ili geometrijska ograničenja neće dozvoliti daljnja deformiranja. Deformacije će se bilježiti pomacima preko mjerne skale.

## 6.1. Proračun konzole



Slika 22. Konzolni nosač opterećen silom na kraku te dijagram sila i momenta [2]

Prije rješavanja diferencijalne jednadžbe elastične linije potrebno je odrediti funkciju momenta savijanja  $M_y = M_y(x)$ .



Slika 23. Lijevo naznačeni maksimalni progib i kut zaokreta, a desno je izdvojen dio štapa nadomješten protutežnim opterećenjima [2]

Iz uvjeta ravnoteže odsječenog dijela štapa (slika iznad):

$$\Sigma M_p = 0: -M_y - F * (l - x) = 0 \quad (6.1)$$

Dobije se:

$$M_y = -F * (l - x) \quad (6.2)$$

Diferencijalna jednačba elastične linije koja integriranjem može dobiti funkciju progiba te drugim redom integriranja funkciju kuta nagiba.

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M_y}{E \cdot I_y} \quad (6.3)$$

Uvrštavanjem izraza za moment savijanja u jednačbu elastične linije dobije se diferencijalna jednačba:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{F}{E \cdot I_y} * (l - x) \quad (6.4)$$

Integriranjem se dobije:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{F}{E \cdot I_y} * (l * x - \frac{x^2}{2} + C_1) \quad (6.5)$$

$$w = \frac{F}{E \cdot I_y} * (l * \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + C_1 * x + C_2) \quad (6.6)$$

Pri čemu se konstante  $C_1$  i  $C_2$  mogu dobiti iz rubnih uvjeta:

$$w(0) = w_A = 0; C_2 = 0 \quad (6.7)$$

$$\beta(0) = \beta_A = (-\frac{dw}{dx})_A = 0; C_1 = 0 \quad (6.8)$$

Ubacivanjem konstanta integracije u izraze za  $w$  i  $\frac{dw}{dx}$  dobiju se funkcije nagiba i progiba:

$$\beta(x) = -\frac{dw}{dx} = -\frac{F}{E \cdot I_y} * (l * x - \frac{x^2}{2}) \quad (6.9)$$

$$w(x) = \frac{F}{E \cdot I_y} * (l * \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}) \quad (6.10)$$

Najveći progib  $w_{max}$  i najveći nagib  $\beta_{max}$  su na slobodnom kraju konzole, a opći izrazi najvećeg progiba i nagiba su [2]:

$$\beta_{max} = \beta_B = \beta(l) = -\frac{F * l^2}{2 * E * I_y} \quad (6.11)$$

$$w_{max} = w_B = w(l) = \frac{F * l^3}{3 * E * I_y} \quad (6.12)$$

Tablica 3. Momenti tromosti i momenti otpora poprečnog presjeka [5]

Presjek	Moment tromosti $I_x$	Moment otpora $W_x$
	$\frac{a h^3}{12}$	$\frac{a h^2}{6}$
	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a^3}{6}$
	$\frac{b h^3}{36}$	$\frac{b h^2}{24}$
	$\frac{5}{16} \sqrt{3} \cdot r^4 = 0,5413 r^4$	$\frac{5}{8} r^3$
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1 d^3$
	$\left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi}\right) \cdot \frac{d^4}{16} = 0,00686 d^4$	$0,0238 d^3$
	$\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$	$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \approx 0,1 \frac{D^4 - d^4}{D}$
Za tanke stijenke $s = (D - d)/2$ $r = (D + d)/2$	$\approx \pi s r^3$	$\approx \pi s r^2$
	$\frac{\pi a b^3}{4}$	$\frac{\pi a b^2}{4}$

Moment tromosti za cijevni kružni presjek jednak je po obje osi, te se formula uzme prema tablici iznad:

$$I_y = \frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4) \quad (6.13)$$

gdje je  $D$  vanjski promjer cijevi, a  $d$  unutarnji promjer cijevi.

Prema „Tablica 1. Vrijednosti konstanta elastičnosti nekih izotropnih materijala“, modul elastičnosti za čelik iznosi:

$$E = 2.1 * 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad (6.14)$$

Iz izraza za najveći progib uvrštavanjem vrijednosti  $w(0)=0\text{mm}$ , dobit će se maksimalna sila koja opterećuje konzolu, a da ne dođe do progiba:

$$w(0) = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} = 0; \quad F(w = 0) = \frac{3 \cdot E \cdot I_y}{l^3} \quad (6.15)$$

Tablica 4. Lista izdvojenih materijala sa mehaničkim karakteristikama pri sobnoj temperaturi [Prilog III]

Stahlsorte	Mindeststreckgrenze $R_{eH}^{11}$ [MPa] Nennicken [mm]								Zugfestigkeit $R_m^{11}$ [MPa] Nennicken [mm]					
	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 80$	$> 80$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 200$	$> 200$ $\leq 250$	$> 250$ $\leq 400^b$	$< 3$	$\geq 3$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 250$	$> 250$ $\leq 400^b$
S235JR									–					–
S235J0	235	225	215	215	215	195	185	175	–	360– 510	360– 510	350– 500	340– 490	–
S235J2									165					330– 480

Tablica iznad prikazuje vrijednosti granice tečenja ili granice elastičnosti  $R_{eH}$  i granice vlačne čvrstoće materijala  $R_M$  za određene skupine promjera cijevi, dok kompletni podaci o materijalu se nalaze u prilogu.

Stvarno naprezanje mora biti manje od čvrstoće materijala kako se ne bi narušio integritet konstrukcije. Nadalje, važno je da kod duktilnih materijala stvarno naprezanje bude manje od granice tečenja  $R_{eH}$ , a kod krhkih manje od granice čvrstoće  $R_M$  jer oni imaju strmiju  $\sigma$ - $\varepsilon$  karakteristiku. Duktilni materijal imaju izrazitu  $\sigma$ - $\varepsilon$  karakteristiku, odnosno izrazita područja elastičnih i plastičnih deformacija, te svojstvo da izdrži velike plastične deformacije prije loma. [1]

Koeficijent sigurnosti uvijek je veći od 1, a kreće se u granicama  $1.5 \leq S \leq 2.5$ , može biti i  $S > 10$ ; npr. uže lifta.

Odabrano:

$$S=1.5 \quad (6.16)$$

S obzirom da se radi o duktilnom materijalu *S235JR*, dopušteno naprezanje se računa prema granici plastičnog tečenja  $R_{eH}=225 \text{ N/mm}^2$  i iznosi:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{eH}}{S} \quad (6.17)$$

Proračun konzole opterećenom silom na kraju štapa vrši se prema savojnom opterećenju i iznosi:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{F_{max} * l_{max}}{W} \quad (6.18)$$

Stvarno naprezanje mora biti manje ili jednako dopuštenom naprezanju, pa vrijedi:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{dop} \quad (6.19)$$

Uvrštavanjem u jednadžbu dobije se:

$$\frac{F_{max} * l_{max}}{W} = \frac{R_{eH}}{S} \quad (6.20)$$

Pri čemu moment otpora cijevi prema Tablici 3. iznosi:

$$W = \frac{(D^4 - d^4) * \pi}{32 * D} \quad (6.21)$$

Maksimalna dopuštena sila kojom se opterećuje štap konzole iznosi:

$$F_{max} = \frac{R_{eH} * W}{S * l_{max}} \quad (6.22)$$

Drugi dio proračuna se odnosi na proračun zavarenog spoja. Preko štapa na kojeg djeluje sila stvara se savojni moment koji opterećuje zavareni spoj. Javlja se normalno naprezanje, koje za zavar na okrugloj cijevi iznosi [10]:

$$\sigma_{zav} = \frac{M_{zav}}{W_{zav}} = \frac{F_{zav} * l_{max}}{W_{zav}} \quad (6.23)$$

Moment otpora zavara cijevi izgleda isto kao i klasični, samo je zbog pojednostavljenja drugačije zapisan, gdje dolazi do izražaja širina zavara, iznosi:

$$W_{zav} = \frac{(D + 2 * a)^4 * \pi - D^4 * \pi}{32 * (D + 2 * a)} \quad (6.24)$$

Širina zavara iznosi:

$$a = 3mm \quad (6.25)$$

Stvarno naprezanje u zavarenom spoju mora biti manje ili jednako dopuštenom naprezanju zavarenog spoja, pa vrijedi:

$$\sigma_{zav} \leq \sigma_{dop,zav} \quad (6.26)$$

Prema dolje u tablicama, radi se o kutnom ravnom zavaru, statički savojno opterećenom, kvalitete zavara III, shodno time dopušteno naprezanje zavara iznosi:

$$\sigma_{dop,zav} = 60 \text{ N/mm}^2 \quad (6.27)$$



Tablica 5. Dopuštena naprezanja zavarenih spojeva prema tipu, vrsti naprezanja, razredu kvalitete zavara i vrsti opterećenja [11]

Šav	Naprezanje	Kvaliteta zavara	Opterećenje					
			Statičko		Ishodišno dinamičko		Izmjenično dinamičko	
			Materijal spojenih dijelova					
			S235 (Č0361)	S355 (Č0561)	S235 (Č0361)	S355 (Č0561)	S235 (Č0361)	S355 (Č0561)
Čelni sa zavarenim korijenom	Vlak, tlak, savijanje, ekvivalentno naprezanje	I	160	220	110	130	55	65
		II	130	175	85	105	45	50
		III	110	155	75	90	40	45
	Smicanje	I	100	140	70	80	35	40
		II	80	110	55	65	30	32
		III	70	100	50	55	25	28
Čelni bez zavarenog korijena	Vlak, tlak, savijanje, ekvivalentno naprezanje	I	140	180	95	100	45	50
		II	110	145	75	80	35	40
		III	100	125	65	70	32	35
Kutni ravni	Svako	I	90	110	60	70	30	35
		II	70	85	50	55	25	30
		III	60	75	40	50	20	25
Kutni udubljeni	Svako	I	120	150	75	90	40	45
		II	95	120	60	70	30	35
		III	85	100	50	60	25	30
Dvostruki kutni ravni	Svako	I	140	190	90	120	50	55
		II	110	150	70	95	40	45
		III	100	130	60	85	35	40

Tablica 6. Klasifikacija kvalitete zavarenog spoja [11]

		Razred kvalitete		
		I	II	III
Materijal	Zavarivost zajamčena	•	•	•
Priprema	Stručna	•	•	•
	Pod nadzorom	•	•	
Način zavarivanja	Prema svojstvima materijala te debljini i naprezanju dijelova zavarenog spoja	•	•	•
Materijal zavara	Dodatni materijal prilagođen osnovnom	•	•	•
	Ispitan, odnosno odobren za upotrebu	•	•	
Osoblje	atestirani zavarivači su za vrijeme rada pod nadzorom	•	•	
Ispitivanje	Dokaz da je zavar bez pogreške (npr. rendgensko ispitivanje)	•		

Maksimalna dopuštena sila kojom se opterećuje zavar konzole iznosi:

$$F_{zav} = \frac{\sigma_{dop,zav} * W_{zav}}{l_{max}} \quad (6.28)$$

Tablica 7. Međurezultati i konačni rezultati proračuna

	Šavna cijev: materijal S235JR, 2mm debljina stijenke, duljina štapa 750mm		
Vanjski promjer $D$ [mm]	17.2	21.3	26.9
Moment tromost cijevi $I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	2805.919762	5706.904903	12203.39807
$F(w=0)$ [N]	4,190173511	8.522311322	18.22374112
Moment otpora cijevi $W$ [mm <sup>3</sup> ]	326.2697397	535.8596153	907.3158415
Maksimalna dop. sila $F_{max}$ [N]	65.25394794	107.1719231	181.4631683
Moment otpora zavar $W_{zav}$ [mm <sup>3</sup> ]	855.5634687	1257.293603	1933.654981
Maksimalna dopuštena sila zavar $F_{zav}$ [N]	68.4450775	100.5834882	154.6923985

Tablica 8. Korelacija starih i novih oznaka čelika [12]

OZNAKE	HRN	EN	DIN
	Č.0361	S235JR	St37.2

## 6.2. Eksperiment savijanja konzole

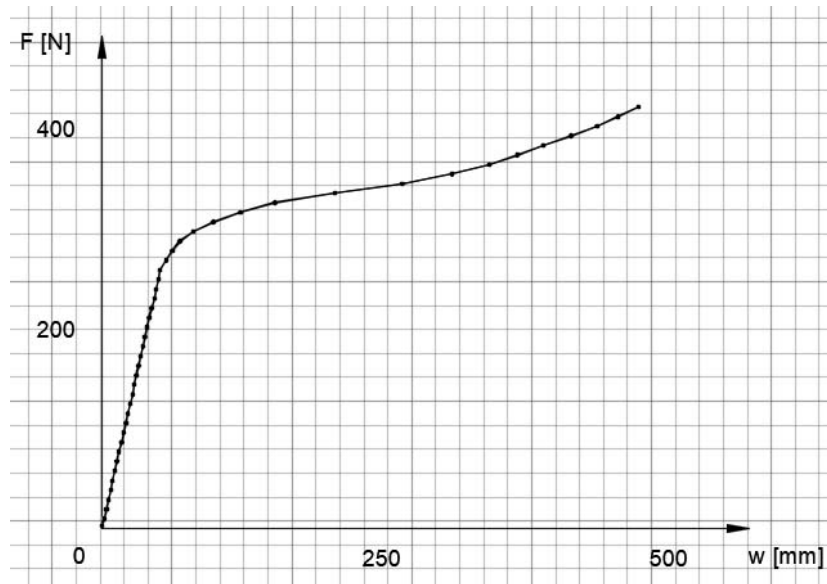
U samom startu treba utvrditi sposobnost ovog eksperimenta. Donekle realno je očekivati da se mogu međuostalim očitati vrijednost maksimalne sile kod progiba od 0mm, maksimalni progib i silu pri geometrijskim ograničenjima te vrijednosti maksimalne sile i progiba u slučaju pucanja zavar. Mjerena vrijednost sile će biti u točnosti od +/- 5N, a vrijednosti progiba u točnosti +/- 1mm za ručni metar ili točnosti +/- 0.05mm za pomično mjerilo.

Opterećenje se vrši kontinuiranim povećanjem opterećenja od 110N. Posljedično će se postepeno konzola savijati i to linearno proporcionalno do granice tečenja, a zatim nelinearno do samog puknuća zavar ili cijevi. Kako bi se izbjegao utjecaj šava na cijevi, linija šava se stavlja u neutralnu liniju, da nema dodatni utjecaj na tlačno ili vlačno opterećenje.

### 6.2.1 Eksperiment 1; cijev promjera 17.2mm

Ispitivanjem konzole sa šavnom cijevi vanjskog promjera  $17.2\text{mm}$ , debljine stijenke  $2\text{mm}$ , materijala  $S235JR$  dobiven je:

- maksimalni moment od  $M_{w(0)}=2.25\text{Nm}$  pri progibu od  $w(0)=0\text{mm}$ ,
- nije ostvaren maksimalni moment čvrstoće zavara, nego maksimalni moment zbog ograničenja geometrije od  $M_{max}=330\text{Nm}$ , te progib od  $w_{max}=559.10\text{mm}$

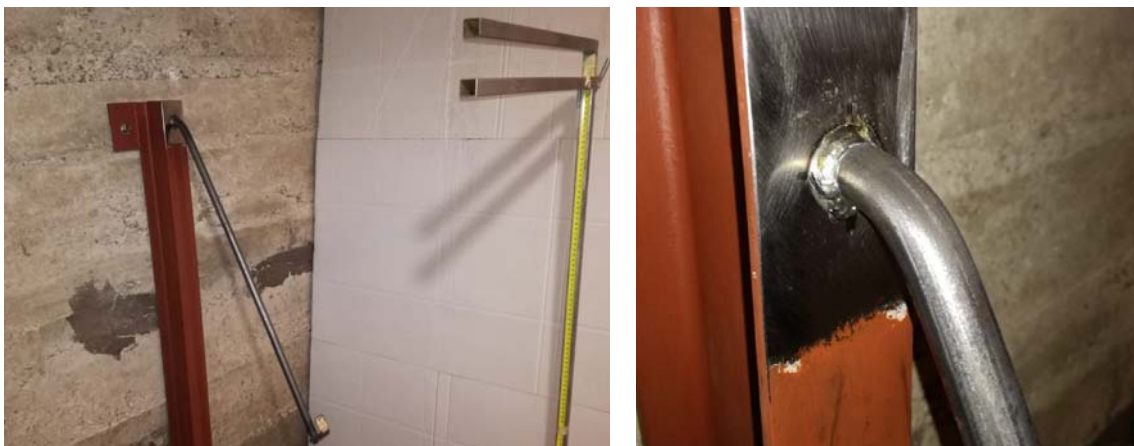


Dijagram 1. Odnos sila-progib za cijev promjera 17.2mm

Tablica 9. Mjerene vrijednosti odnosa sila-promjena progiba na cijevi promjera 17.2mm

No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]
1	3	0.00	17	160	2.20	33	320	21.00
2	10	2.15	18	170	2.35	34	330	28.00
3	20	2.25	19	180	2.05	35	340	36.00
4	30	2.35	20	190	2.40	36	350	63.00
5	40	2.30	21	200	2.25	37	360	70.00
6	50	1.50	22	210	2.20	38	370	52.00
7	60	2.55	23	220	2.15	39	380	39.00
8	70	2.15	24	230	2.55	40	390	29.00
9	80	2.25	25	240	3.10	41	400	27.00
10	90	2.90	26	250	1.65	42	410	29.00
11	100	1.75	27	260	2.50	43	420	27.00
12	110	2.55	28	270	1.80	44	430	22.00
13	120	2.20	29	280	6.50	45	440	21.00
14	130	2.10	30	290	6.00	46	450	-
15	140	2.60	31	300	8.00	47	460	-
16	150	1.70	32	310	14.00	48	470	-

Maksimalni moment čvrstoće materijala cijevi nije ostvaren jer je eksperiment ograničen geometrijom same konzole, odnosno štap se nije mogao niže savijati. Šav na cijevi se nije deformirao, odnosno nije se raspukao.

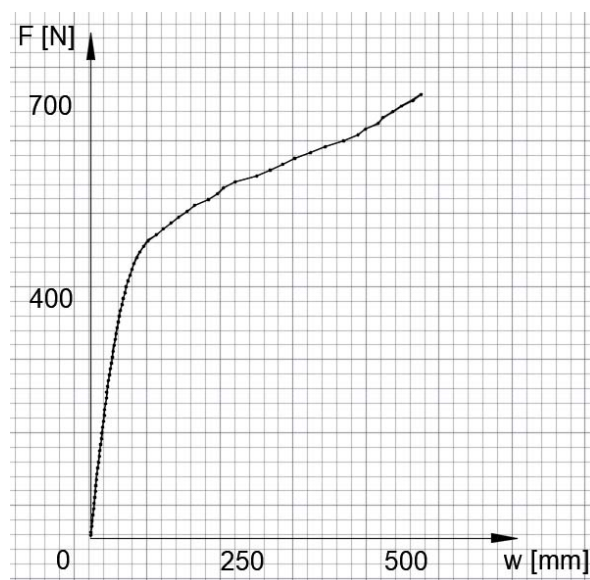


Slika 24. Maksimalno savinut cijevni štap konzole, cijev promjera 17.2mm

## 6.2.2 Eksperiment 2; cijev promjera 21.3mm

Ispitivanjem konzole sa šavnom cijevi vanjskog promjera 21.3mm, debljine stijenke 2mm, materijala S235JR dobiven je:

- maksimalni moment od  $M_{w(0)}=0.375Nm$  pri progibu od  $w(0)=0mm$ ,
- nije ostvaren maksimalni moment čvrstoće zavara zbog geometrijskih ograničenja



Dijagram 2. Odnos sila-progib za cijev promjera 21.3mm

Tablica 10. Mjerene vrijednosti odnosa sila-promjena progiba na cijevi promjera 21.3mm

No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]
1	5	0.00	28	270	1.70	55	540	15.00
2	10	0.30	29	280	1.30	56	550	12.00
3	20	1.10	30	290	2.10	57	560	24.00
4	30	0.95	31	300	1.75	58	570	16.00
5	40	1.15	32	310	0.85	59	580	10.00
6	50	1.15	33	320	1.80	60	590	20.00
7	60	1.20	34	330	1.80	61	600	37.00
8	70	0.80	35	340	1.50	62	610	23.00
9	80	0.75	36	350	1.85	63	620	21.00
10	90	0.95	37	360	1.90	64	630	21.00
11	100	1.15	38	370	2.00	65	640	27.00
12	110	1.20	39	380	2.20	66	650	25.00
13	120	1.15	40	390	2.25	67	660	31.00
14	130	1.45	41	400	2.25	68	670	25.00
15	140	1.05	42	410	2.85	69	680	13.00

16	150	1.30	43	420	2.00	70	690	22.00
17	160	1.20	44	430	2.95	71	700	8.00
18	170	1.20	45	440	4.00	72	710	17.00
19	180	1.10	46	450	3.00	73	720	14.00
20	190	1.20	47	460	3.50	74	730	20.00
21	200	1.30	48	470	4.50	75	740	14.00
22	210	1.00	49	480	6.00	76	750	-
23	220	1.35	50	490	6.00	77	760	-
24	230	1.25	51	500	8.00	78	770	-
25	240	1.10	52	510	14.00	79	780	-
26	250	1.40	53	520	12.00	80	790	-
27	260	1.25	54	530	13.00	81	800	-

Maksimalni moment čvrstoće materijala cijevi kao i za cijev promjera  $17.2\text{mm}$  nije ostvaren jer je eksperiment također ograničen geometrijom same konzole, odnosno štap se nije mogao dalje savijati. Zbog toga ograničenja ostvaren je maksimalni progib od  $w_{max}=553.10\text{mm}$ , pri djelovanju momenta od  $M_{max}=555\text{Nm}$ . Kod toga opterećenja zavareni spoj je izdržao, a cijev se nepovratno plastično deformirala.



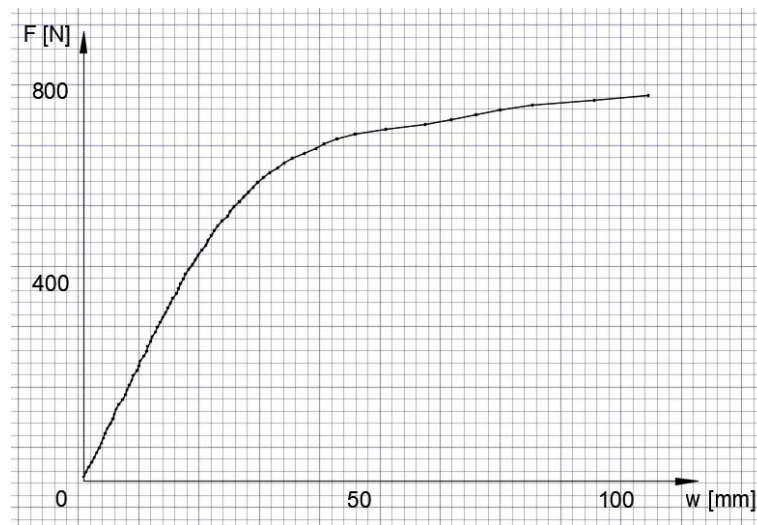
Slika 25. Maksimalno savinut cijevni štap konzole, cijev promjera  $21.3\text{mm}$

Iz ovog eksperimenta vidljivo je kako se cijev u okviru ovog opterećenja lijepo savijala, te lagano počela gnjiječiti. Daljnim opterećenjem cijev bi se krenula istezati, te bi čak trebalo provesti proračun zavara na smik. Iz slike desno vidljivo je kako je šav (crveno zaokruženo) popucao uslijed naprezanja.

### 6.2.1 Eksperiment 3; cijev promjera 26.9mm

Ispitivanjem konzole sa šavnom cijevi vanjskog promjera 26.9mm, debljine stijenke 2mm, materijala S235JR dobiven je:

- maksimalni moment od  $M_{w(0)}=15Nm$  pri progibu od  $w(0)=0mm$ ,
- maksimalni moment čvrstoće zavara pri kojem zavar puca iznosi  $M_{max}=600Nm$ , uz progib od  $w_{max}=115.40mm$



Dijagram 3. Odnos sila-progib za cijev promjera 26.9mm

Tablica 11. Mjerene vrijednosti odnosa sila-promjena progiba na cijevi promjera 26.9mm

No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]	No.	F [N]	$\Delta w$ [mm]
1	10	0.00	28	280	0.20	55	550	1.15
2	20	0.55	29	290	0.60	56	560	0.55
3	30	0.55	30	300	0.30	57	570	0.80
4	40	0.55	31	310	0.75	58	580	1.15
5	50	0.55	32	320	0.35	59	590	0.85
6	60	0.55	33	330	0.55	60	600	1.00
7	70	0.55	34	340	0.55	61	610	1.00
8	80	0.45	35	350	0.60	62	620	0.90
9	90	0.40	36	360	0.45	63	630	1.20
10	100	0.30	37	370	0.55	64	640	1.30
11	110	0.50	38	380	0.50	65	650	1.65
12	120	0.65	39	390	0.75	66	660	1.35
13	130	0.50	40	400	0.45	67	670	1.70
14	140	0.30	41	410	0.40	68	680	2.50
15	150	0.35	42	420	0.60	69	690	2.40

16	160	0.50	43	430	0.40	70	700	1.70
17	170	0.80	44	440	0.70	71	710	2.65
18	180	0.60	45	450	0.80	72	720	3.80
19	190	0.35	46	460	0.60	73	730	6.35
20	200	0.50	47	470	0.60	74	740	8.20
21	210	0.50	48	480	0.75	75	750	5.40
22	220	0.30	49	490	0.85	76	760	5.10
23	230	0.75	50	500	0.40	77	770	5.00
24	240	0.40	51	510	0.70	78	780	6.70
25	250	0.30	52	520	0.60	79	790	13.10
26	260	0.75	53	530	0.70	80	800	11.20
27	270	0.60	54	540	0.90	81	810	-

Shodno provedenog eksperimenta, može se zaključiti da koeficijenti sigurnosti daleko snizuju granicu dopuštenog maksimalnog opterećenja. To je i opravdano iz razloga što se podvrgavanjem ekstremnim uvjetima kao u ovom primjeru mogu vidjeti velike deformacije koje ne mogu zadovoljavati funkcionalnost neke konstrukcije ako bi se proračunski dopustile. S obzirom da je pukao sam zavar, a ne cijev odnosno dio cijevi koji je oslabljen postupkom zavarivanja, a nalazi se u zoni utjecaja topline (ZUT), riječ je o nekoj nepravilnosti samog zavara.



Slika 26. Puknuće zavarenog spoja uslijed naprezanja, cijev promjera 26.9mm

Analizom zavara može se utvrditi da je zavar pukao zbog nekvalitetno izvedenog postupka zavarivanja. Detaljnijom analizom, mogu se uočiti na slici dolje; crveno zaokruženo, područja naljepljivanja zavara. Drugim riječima, na tome mjestu zavar nije pravilno odrađen. Naime problem je nastao u regulatoru motora dozatora žice koji je prilikom zavarivanja zakazao, odnosno poremetio kontinuitet dodavanja žice. Taj problem se mogao uočiti rendgenskim snimanjem.



Plavo zaokruženo je dobar zavar koji se zbog smanjene ukupne površine zavara, a uslijed djelovanja opterećenja, odlomio.



*Slika 27. Odlomljeni zavar, eksperiment sa cijevi promjera 26.9mm*

Veoma je važno preventivno kontrolirati zavarivačku opremu te same zavarivače (a-test), te imati dosljednost u kvaliteti, odnosno biti svjestan što očekivati od kojeg nivoa kvalitete konstrukcijskog materijala te dodatnog materijala kao i vrsti zaštitne atmosfere u kojima se postupak odvija.

## 7. PLASTIČNO DEFORMIRANA CIJEV

Mehanizam elastičnih deformacija sastoji se u pomicanju atoma iz njihovih stabilnih položaja u kojima oni sadrže minimum potencijalne energije. Veličina pomaka atoma određuje porast potencijalne energije tijela koja raste proporcionalno s povećanjem vanjske sile. Udaljavanje atoma kod elastične deformacije znači uvijek i neku reverzibilnu promjenu volumena, no iznos udaljavanja ne prelazi iznos razmaka između susjednih atoma u kristalnoj rešetci. Ukoliko je udaljavanje atoma veće, riječ je o plastičnoj deformaciji gdje dolazi do prisilnog smještaja atoma u nove stabilne položaje u kristalnoj rešetci. [13]

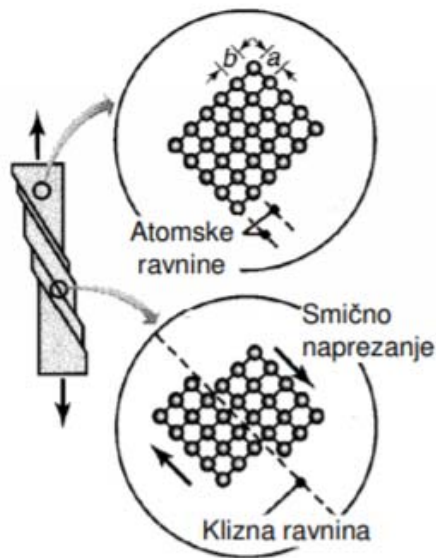


Slika 28. Vlačna i tlačna naprezanja savojno opterećene cijevi

Na provedenom eksperimentu uočljive su trajne deformacije, odnosno dislokacije atoma. Djelovanjem momenta savijanja javljaju se normalna naprezanja u smjeru osi štapa i to na način da se u ovom konkretnom primjeru neutralna linija nalazi u samoj sredini cijevi. Neutralna linija se nalazi u težištu presjeka lika. Tom linijom dijele se tlačna i vlačna naprezanja. S obzirom da sila, time moment savija cijev prema dolje, u gornjoj zoni javljaju se vlačna naprezanja, a u donjoj polovici tlačna naprezanja.

## 7.1. Teorija klizanja za statičko jednoosno opterećenje

Monokristalom strukturom metala smatra se struktura kod koje u svim zonama metala, neovisno o vanjskom obliku, postoji jedinstvena kristalna rešetka. Plastično deformiranje nekog monokristala statičkim opterećenjem izvršava se klizanjem. Kod klizanja se dijelovi kristala pomiču u određenom smjeru.

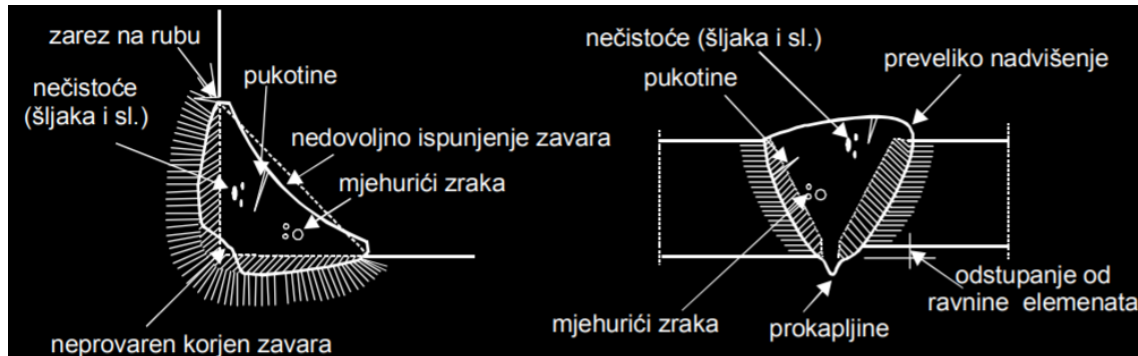


Slika 29. Shematski prikaz deformiranja mono kristalne strukture klizanjem [13]

Kod klizanja materijal klizi po ravninama koje se nazivaju ravnine klizanja. Osim ravnina klizanja moguće je razlikovati i smjer klizanja, a ravnina klizanja i smjer klizanja zajedno čine klizni sustav. Ravnine klizanja su one ravnine u kojima su atomi najgušće raspoređeni, a smjer klizanja je određen pravcima u smjeru kojih je među atomski razmak najmanji. [13]

## 7.2. Opterećenja zavarenog spoja

Kako bi se minimalizirala nehomogenost strukture zavarenog spoja potrebno je preventivno spriječiti dimenzionalne i kompatibilne greške. Smanjivanjem tih grešaka na minimum omogućuje se kvalitetan prijenos opterećenja. Na slici ispod prikazane su greške.



Slika 30. Greške kompatibilnosti i dimenzionalne greške zavara [14]

Jedan od načina da se uvjerimo kako je zavareni spoj dobar, prikazan je na slici ispod. Prerezan je zavareni spoj cijevi koja je zavarena na oslonac. Brušenjem i poliranjem izgadi se odrezana površina, te već nakon vizualnog pregleda uočljiva je homogenost između osnovnog i dodatnog materijala, što je jedna od garancija kvalitete zavarenog spoja.



Slika 31. Presjek zavarenog spoja, homogenost osnovnog i dodatnog materijala

## 8. ZAKLJUČAK

Metalne konstrukcije čine najveći postotak u graditeljstvu i strojarstvu te je stoga opravdano zašto se daje velika pažnja u konstruiranju. Rešetkaste konstrukcije koje su pobliže predstavljene nose važnu ulogu te je bilo smisleno ispitati ih.

Ideja zadatka je bila pobliže predočiti većinu segmenata koji se obuhvaćaju konstruiranjem jednog konzolnog nosača. Proces od namjene, odabira materijala, geometrije nosača, međusobnih odnosa, međusobnih opterećenja, načina spajanja do ispitivanja testnih modela.

U samom tom procesu postoji puno mjesta za potencijalnu grešku. Stoga je veoma važno osmisliti dosljednost procesa proizvodnje, kao i same kontrole. Također je važno definirati što će se mjeriti, te da li za postojeću metodu testiranja možemo postići određenu točnost očitavanja vrijednosti. Eksperimentalnim modelom uočene su određene nepravilnosti koje naizgled na oko nisu bile vidljive, a komplet su promjenile tijekom eksperimenta. Riječ je bila o trećem eksperimentu i nepravilnosti zavarenog spoja, naljepljivanja zbog čega je zavareni spoj pukao.

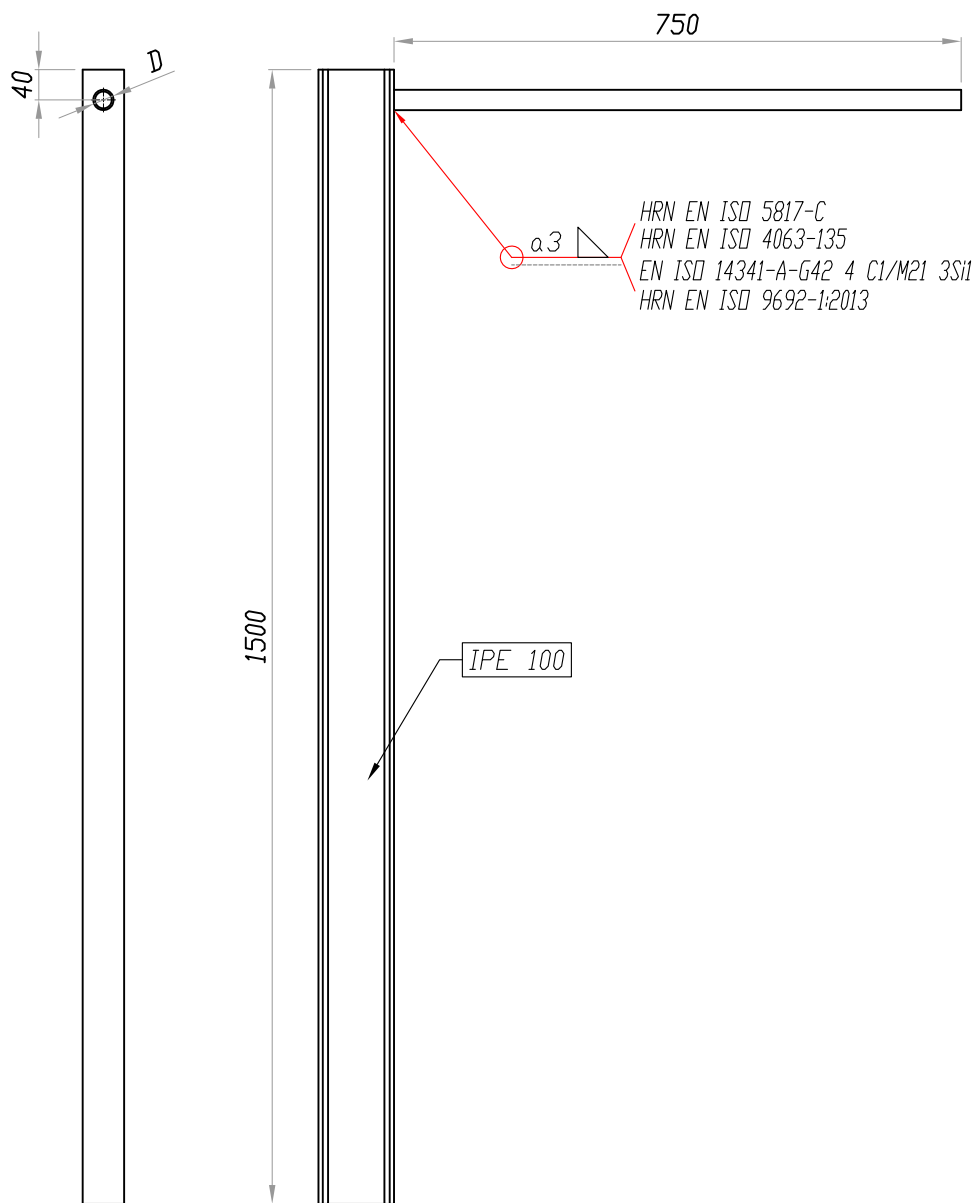
Iz prva dva eksperimenta pokazano je da plastično deformirana cijev ne gubi lokalno stabilnost presjeka, nego nastupa plastično tečenje materijala za velike pomake kraja konzole. Iz toga se može zaključiti da ovako korištene cijevi upotrebljenih odnosa debljine stijenke i promjera imaju dovoljnu otpornost gubitku oblika poprečnog presjeka, odnosno gužvanja.


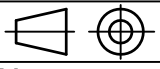
## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija
- III. Tehnička specifikacija proizvođača materijala; *S235JR*
- IV. Izjava proizvođača o svojstvu dodatnog materijala za zavarivanje; žica promjera *1mm*

## LITERATURA

- [1] Grupa autora: *Inženjerski priručnik IPI*, Školska knjiga, ISBN 953-0-31662-3, Zagreb, (1996)
- [2] Plazibat B., Matoković A., Vetma V.: *Nauka o čvrstoći*, FESB, ISBN 978-953-7220-41-9, Split (2019)
- [3] Alfirević, I.: *Nauka o čvrstoći I*, Tehnička knjiga d.d., ISBN 953-172-010-X, Zagreb, (1995)
- [4] Hoster, J.: *Čvrstoća II*, VUKA, ISBN 978-953-7343-95-8, Karlovac, (2017)
- [5] Kraut, B.: *Strojarski priručnik*, Sajema d.o.o, ISBN 987-953-7370-02-2, Zagreb, (2009)
- [6] Hoster, J. & Vreš, M. *Sigurnost stupova s geometrijskim nesavršenostima u okvirnim konstrukcijama*, VII. međunarodni stručno-znanstveni skup ZAŠTITA NA RADU I ZAŠTITA ZDRAVLJA, Zadar, (2018), Dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/1025062>
- [7] Rak, M., Gelo D., *Proračun konstrukcija*, TVZ, ISBN 978-953-7048-60-0, Zagreb, (2016)
- [8] Pižeta, M., *Procjena zamora konstrukcije hidrogeneratora*, Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:499419>, Pristupljeno:03.09.2020
- [9] <https://www.zavarivanje.info/cd/2689/osnovni-postupci-zavarivanja>, Pristupljeno:03.09.2020
- [10] Decker, K. H.: *Elementi strojeva*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb (1975)
- [11] <https://www.scribd.com/document/408524226/Zavareni-spojevi>, Pristupljeno: 06.09.2020
- [12] <https://omnimerkur.hr/prodajni-program-en/crna-metalurgija-en/konstrukcijski-celici-en/>, Pristupljeno: 06.09.2020
- [13] Piljek, P., *Model plitkog gravurnog kovanja temeljen na veličini kristalnog zrna*, doktorska disertacija, FSB, UDK:621.983.5:621.73 Zagreb, (2017)
- [14] [http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/metalne-konstrukcije/10\\_spojevi.pdf](http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/metalne-konstrukcije/10_spojevi.pdf), Pristupljeno: 07.09.2020
- [15] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIzalemljeniSpojevi.pdf>, Pristupljeno: 08.09.2020
- [16] <https://theplanetworld.com/2769-true-story-the-colour-of-love-may-soon-be-the-colour-of-the-eiffel-tower-story-de>, Pristupljeno: 31.08.2020
- [17] <https://www.presidentbrusselshotel.be/discover/atomium-brussels/>, Pristupljeno: 31.08.2020
- [18] Katušić, Kristina: *Geometrija zlatnog reza*, Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:126:660998>, Pristupljeno: 01.09.2020
- [19] <https://www.creativebloq.com/design/designers-guide-golden-ratio-12121546>, Pristupljeno: 01.09.2020
- [20] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Naprezanje>, Pristupljeno: 10.09.2020
- [21] <https://www.wikipedia.org>, Pristupljeno: 11.09.2020



Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 Veleučilište u Karlovcu	
	Projektirao	10.9.2020	Marko Vreš		
	Razradio	10.9.2020	Marko Vreš		
	Crtao	10.9.2020	Marko Vreš		
	Pregledao				
ISO - tolerancije	Objekt: Konzolni nosač		Objekt broj: 2020091000		
			R. N. broj:		
	Napomena: Promjer D je varijabilni			Kopija	
	Materijal: EPDM	Masa:			
	 Naziv: Montažni sklop konzolnog nosača		Pozicija:	Format: A4	
	Mjerilo originala			Listova: 1	
	M1:10	Crtež broj: 2020091000-00		List: 1	



# Werkstoffdatenblatt

## Warmgewalzter unlegierter Baustahl

Materials Services  
Materials Germany

Seite 1/4

Werkstoffbezeichnung	Kurzname	Werkstoff-Nr.
	S235JR	1.0038
	S235JRC	1.0122
	S235J2	1.0117
	S235J2C	1.0119

### Geltungsbereich

Dieses Datenblatt gilt für warmgewalzte Flach- und Langerzeugnisse aus unlegierten Grund- und Qualitätsstählen.

### Anwendung

Diese Stähle sind die Standardstähle für den allgemeinen Metall-, Hoch-, Tief- und Brückenbau sowie für den Wasser-, Fahrzeug- und Maschinenbau.

### Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse in %)

Stahlsorte	C Erzeugnis-Nennstärken in mm			Si	Mn	P	S	N	Cu
	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40						
S235JR	0,17	0,17	0,20	–	≤ 1,40	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,012	≤ 0,55
S235J0			0,17	–	≤ 1,40	≤ 0,030	≤ 0,030	≤ 0,012	≤ 0,55
S235J2			0,17	–	≤ 1,40	≤ 0,025	≤ 0,025	–	≤ 0,55

### Kohlenstoffäquivalent (CEV) (nach der Schmelzenanalyse in %)

Stahlsorte	Kohlenstoffäquivalent in %, max. für Nennstärke in mm				
	≤ 30	> 30 bis ≤ 40	> 40 bis ≤ 150	> 150 bis ≤ 250	> 250 bis ≤ 400
S235JR	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,38	≤ 0,40	-
S235J0	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,38	≤ 0,40	-
S235J2	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,38	≤ 0,40	≤ 0,40

Zur Bestimmung des Kohlenstoffäquivalents sollte folgende Formel angewendet werden:  $CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$

### Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur

Stahlsorte	Mindeststreckgrenze $R_{eH}^{1)}$ [MPa] Nennicken [mm]									Zugfestigkeit $R_m^{1)}$ [MPa] Nennicken [mm]				
	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 80$	$> 80$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 200$	$> 200$ $\leq 250$	$> 250$ $\leq 400^b$	$< 3$	$\geq 3$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 250$	$> 250$ $\leq 400^b$
S235JR									–					–
S235J0	235	225	215	215	215	195	185	175	–	360– 510	360– 510	350– 500	340– 490	–
S235J2									165					330– 480

Stahlsorte	Probenlage	Mindestbruchdehnung $A^{1)}$ [%] $L_0 = 80$ mm					Mindestbruchdehnung $A^{1)}$ [%] $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$					
		Nennicken [mm]					Nennicken [mm]					
		$\leq 1$	$> 1$ $\leq 1,5$	$> 1,5$ $\leq 2$	$> 2$ $\leq 2,5$	$> 2,5$ $\leq 3$	$\geq 3$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 150$ $\leq 250$	$> 250$ $\leq 400^{2)}$
S235JR	l	17	18	19	20	21	26	25	24	22	21	–
S235J0												–
S235J2	t	15	16	17	18	19	24	23	22	22	21	21

t = quer zur Walzrichtung; l = längs zur Walzrichtung

<sup>1)</sup> Für Blech, Band und Breitflachstahl in Breiten  $\geq 600$  mm ist die Prüfung des Zugversuchs quer (t) zur Walzrichtung durchzuführen. Alle anderen Erzeugnisse werden in Walzrichtung (l) geprüft.<sup>2)</sup> Diese Werte gelten nur für J2 und Flacherzeugnisse.

### Kerbschlagarbeit (Spitzkerb-Längsprobe)

Stahlsorte	Temperatur °C	Kerbschlagarbeit (KV) in [J] Nennicken [mm]		
		$\leq 150^{1)}$	$> 150 \leq 250^{1)}$	$> 250 \leq 400^{2)}$
S235JR	20	$\geq 27$	$\geq 27$	–
S235J0	0	$\geq 27$	$\geq 27$	–
S235J2	-20	$\geq 27$	$\geq 27$	$\geq 27$

KV: Kerbschlagarbeit für Charpy-V-Längsproben (Mittel aus 3 Einzelwerten; kein Einzelwert darf kleiner sein als 70 % des Mindestmittelwertes)

<sup>1)</sup> Bei Profilen mit einer Nennicke  $> 100$  mm sind die Werte zu vereinbaren.<sup>2)</sup> Diese Werte gelten nur für Flacherzeugnisse.

### Empfohlene Mindestwerte für die Biegehalbmesser beim Abkanten von Flacherzeugnissen

Stahlsorte	Richtung der Biegekante	Empfohlener kleinster innerer Biegehalbmesser <sup>1)</sup> [mm]															
		Nennicken in mm															
		$> 1$ $\leq 1,5$	$> 1,5$ $\leq 2,5$	$> 2,5$ $\leq 3$	$> 3$ $\leq 4$	$> 4$ $\leq 5$	$> 5$ $\leq 6$	$> 6$ $\leq 7$	$> 7$ $\leq 8$	$> 8$ $\leq 10$	$> 10$ $\leq 12$	$> 12$ $\leq 14$	$> 14$ $\leq 16$	$> 16$ $\leq 18$	$> 18$ $\leq 20$	$> 20$ $\leq 25$	$> 25$ $\leq 30$
S235JRC	t	1,6	2,5	3	5	6	8	10	12	16	20	25	28	36	40	50	60
S235J0C																	
S235J2C	l	1,6	2,5	3	6	8	10	12	16	20	25	28	32	40	45	55	70

t = quer zur Walzrichtung; l = längs zur Walzrichtung

<sup>1)</sup> Werte gelten für Biegewinkel  $\leq 90^\circ$

### Walzprofilieren von Flacherzeugnissen

Stahlsorte	Empfohlener kleinster innerer Biegehalbmesser <sup>1)</sup> [mm]		
	Nennicken t [mm]		
	t ≤ 4	4 < t ≤ 6	6 < t ≤ 8
S235JRC S235JOC S235J2C	1 t	1 t	1,5 t

<sup>1)</sup> Werte gelten für Biegewinkel ≤ 90°

### Anhaltsangaben für einige physikalische Eigenschaften

Dichte bei 20 °C kg/dm <sup>3</sup>	Elastizitätsmodul kN/mm <sup>2</sup> bei				Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C W/m K	spez. Wärmekapazität bei 20 °C J/kg K	spez. elektrischer Widerstand bei 20 °C Ω mm <sup>2</sup> /m
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C			
7,85	212	207	199	192	54	461	0,15

#### Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> zwischen 20 °C und

100 °C	200 °C	300 °C
11,1	12,1	12,9

### Kennwerte für die Bemessung bei höheren Temperaturen (nach AD 2000 Merkblatt W1)

Nenndicke mm	Kennwerte K in N/mm <sup>2</sup> bei Berechnungstemperatur			
	100 °C	200 °C	250 °C	300 °C
≤ 16	187	161	143	122
>16 ≤ 40	180	155	136	117

### Warmformgebung/Wärmebehandlung

Warmformgebung		Wärmebehandlung		
Temperatur °C	Abkühlungsart	Normalglühen <sup>1)</sup>	Spannungsarmglühen <sup>2)</sup>	Abkühlungsart
950–1100	Luft	850–950 °C	580–630 °C	Luft

<sup>1)</sup> Normalglühen: Haltezeit 1 min. je mm Blechdicke, mindestens 30 min.

<sup>2)</sup> Spannungsarmglühen: Haltezeit 1–2 min. je mm Blechdicke, mindestens 30 min.

## Verarbeitung/Schweißen

Als Standardschweißverfahren für diese Stahlsorte kommen in Frage:

WIG-Schweißen  
MAG-Schweißen Massiv-Draht  
MAG-Schweißen Fülldraht

Lichtbogenschweißen (E)  
UP-Schweißen

Verfahren	Schweißzusatz	
WIG	Union I 52	
MAG Massiv Draht	Union K 52 Union K56	
MAG Fülldraht	Union MV 70 Union BA 70 (Union RV 71)	
Lichtbogenhand (E)	Phoenix 120K Phoenix Spezial D	
UP	Draht	Pulver
	Union S 2 (Union S 2)	UV 400 (UV 306)

Die Stähle lassen sich nach den genannten Schweißverfahren in allen Dicken unter Beachtung der allgemeinen Regeln der Technik von Hand und automatisch verschweißen.

Die angegebenen Schweißzusatzwerkstoffe gelten für die höchsten Anforderungen. Geklammerte Angaben sind für geringe Anforderungen gedacht.

Das Brennen, Vorwärmen, Schweißen und Spannungsarmglühen, sollte unter Beachtung des Stahl-Eisen-Werkstoffblattes 088 erfolgen.

Hinsichtlich des Spannungsarmglühens sind Spezifikationen und Regelwerke zu beachten.

## Bemerkung

Der Werkstoff ist magnetisierbar.

## Herausgeber

thyssenkrupp Materials Services GmbH  
Technology, Innovation & Sustainability (TIS)  
thyssenkrupp Allee 1  
45143 Essen

## Literaturhinweis

DIN EN 10025-1:2005-02	Beuth Verlag GmbH, Postfach, D-10772 Berlin
STAHL-EISEN-Werkstoffblätter	Verlag Stahleisen GmbH, Postfach 10 51 64, D-40042 Düsseldorf
AD 2000 Merkblatt W1	Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Straße 449, 50839 Köln
Schweißzusatzwerkstoffe	Böhler Schweißtechnik Deutschland GmbH, Hamm

## Wichtiger Hinweis

Die in diesem Datenblatt enthaltenen Angaben über die Beschaffenheit oder Verwendbarkeit von Materialien bzw. Erzeugnissen sind keine Eigenschaftszusicherungen, sondern dienen der Beschreibung.

Die Angaben, mit denen wir Sie beraten wollen, entsprechen den Erfahrungen des Herstellers und unseren eigenen. Eine Gewähr für die Ergebnisse bei der Verarbeitung und Anwendung der Produkte können wir nicht übernehmen.

**DECLARATION OF PERFORMANCE**  
**CPR\_EZ-SG2\_1\_2013**

1. Unique identification code of the product-type:  
**EZ – SG 2 (EN ISO 14341-A – G 42 4 C1/M21 3Si1)**
2. Type, batch or serial number or any other element allowing identification of the construction product as required under Article 11(4):  
**Batch number and Control number: see the packaging and accompanying documents**
3. Intended use or uses of the construction product, in accordance with the applicable harmonised technical specification, as foreseen by the manufacturer:

**Metallic structures or composite metal and concrete structures.**

4. Name, registered trade name or registered trade mark and contact address of the manufacturer as required under Article 11(5):

**ELEKTRODA ZAGREB d.d.**  
**RUŠEVJE 7, HR-10290 ZAPREŠIĆ**  
Tel: +385 1 3477 444 / Fax: +385 1 3477 492  
E-mail: [elektroda@elektroda-zagreb.hr](mailto:elektroda@elektroda-zagreb.hr)  
[www.elektroda-zagreb.hr](http://www.elektroda-zagreb.hr)



5. System or systems of assessment and verification of constancy of performance of the construction product as set out in REGULATION (EU) No 305/2011, Annex V:

**System 2+**

6. In case of the declaration of performance concerning a construction product covered by a harmonised standard:

**Notified factory production control certification body – TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstraße 199, D-80686 München, identification No. 0036 – performed initial inspection of the manufacturing plant and factory production control and continuous surveillance, assessment and evaluation of factory production control under system 2+ and issued: Certificate of conformity of the factory production control No. 0036 – CPR – S 039.**

7. Declared performance

Essential characteristics	Performance	Harmonised technical specification
Tolerances on dimensions	$\varnothing 0,6 + 0,01 \text{ mm} / - 0,03 \text{ mm}$ $\varnothing 0,8 - \varnothing 1,6 + 0,01 \text{ mm} / - 0,04 \text{ mm}$	EN 13479:2004, EN ISO 544:2011
Elongation	> 20 %	EN 13479:2004, EN ISO 14341:2011
Tensile strength	500 – 640 MPa	EN 13479:2004, EN ISO 14341:2011
Yield strength	> 420 MPa	EN 13479:2004, EN ISO 14341:2011
Impact strength	> 47 J (-40 °C)	EN 13479:2004, EN ISO 14341:2011
Chemical composition	conform EN ISO 14341:2010	EN 13479:2004, EN ISO 14341:2011
Durability	conform EN ISO 14341:2010	EN 13479:2004
Dangerous substances	NPD	EN 13479:2004
Emission of radioactivity	NPD	EN 13479:2004

8. The performance of the product identified in points 1 and 2 is in conformity with the declared performance in point 7. This declaration of performance is issued under the sole responsibility of the manufacturer identified in point 4.

Signed for and on behalf of the manufacturer by:

VLADIMIR PANJKOVIĆ, Technical Manager

(name and function)

Zaprešić / first issue 26.02.2009. / current issue 25.03.2016. (Rev.4)

(place and date of issue)

(signature)