

5. Zavareni i zalemljeni spojevi

5.1 Osnove zavarenih spojeve	2
5.1.1 Uvod	2
5.1.2 Struktura i nazivlje zavarenih spojeva	4
5.1.3 Zavari	6
5.1.4 Vrste i označavanje zavarenih spojeva	9
5.1.5 Primjeri zavarenih spojeva	12
5.2 Oblikovanje zavarenih spojeva	13
5.2.1 Ispravno oblikovanje zavarenih spojeva	13
5.2.2 Pogreške u oblikovanju zavarenih spojeva	15
5.2.3 Primjeri oblikovanja zavarenih spojeva	16
5.3 Usvajanje zavarenih spojeva	18
5.3.1 Norme zavarenih spojeva	18
5.3.2 Proračun zavarenih spojeva	19
5.3.3 Primjeri usvajanja zavarenih spojeva	23
5.4 Primjena zavarenih spojeva	29
5.4.1 Zavarljivost materijala	29
5.4.2 Tehnologija zavarivanja	31
5.4.3 Korištenje i odlaganje zavarenih spojeva	35
5.4.4 Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva	35
5.5 Zalemljeni spojevi	35
5.5.1 Osnove zalemljenih spojeva	36
5.5.2 Materijali za lemljenje	37
5.5.3 Oblikovanje zalemljenih spojeva	38
5.5.4 Usvajanje zalemljenih spojeva	38
5.5.5 Primjena zalemljenih spojeva	39
Dodaci	41
Literatura	57

Ishodi učenja:

- Razumijevanje osnova zavarenih spojeva** (struktura, fizički temelji, vrste).
- Usvojena ispravnog oblikovanja zavarenih spojeva** (ispravno oblikovanje i pogreške).
- Savladano usvajanje zavarenih spojeva** (norme, proračun).
- Savladana primjena zavarenih spojeva** (zavarljivost, tehnologija, korištenje).

- (e) **Usvojena znanja iz zalemljenih spojeva** (osnove, materijali za lemljenje, oblikovanje i usvajanje, primjena).

5.1 Osnove zavarenih spojeve

5.1.1 Uvod



Slika 05.01 Danas (2013. godina) najveći brod za krstarenje "Oasis of the Seas"

Zavarivanjem se u području zavarenog spoja sjedinjavaju materijali spajanih strojnih elemenata u manje ili više kemijski i strukturno homogenu cjelinu. Pri spajanju zavarivanjem griju se dijelovi elemenata (S-05.02) u području spoja te formira zajednički fluid nakon čijeg hlađenja i skrućivanja elementi ostaju trajno spojeni (S-05.03).



Slika 05.02 Elektrolučno zavarivanje



Slika 05.03 Zavarivani spoj cjevovoda

Osnovna su svojstva zavarenog spoja:

1. nerastavljiv (ne mogu se rastaviti bez razaranja zavara i/ili dijelova elemenata),
2. nepomičan (spojeni elementi ne mogu se uzajamno pomicati),
3. neposredan (spojeni su materijali od kojih su izrađeni elementi),
4. tehnološko toplinski (uz dovođenje/odvođenje topline odvija se proces taljenja/skrućivanja) i mehanički u slučaju zavarivanja pritiskom.

Zavareni su spojevi pogodni za:

- prijenos mehaničkih opterećenja (*sile i momenti – zavarene konstrukcije, strojogradnja*),
- izvedbu nepropusnih spojeva (*energetika, procesna tehnika*),
- spajanje elemenata koji se izlažu višim i visokim pogonskim temperaturama (*energetika, procesna tehnika*),
- jeftinu izradu višedijelnih sustava (*zavarene konstrukcije*),
- ispunjavanje uvjeta lakog održavanja.

Međutim, manje ili veće greške pri zavarivanju su česte te u radu sa zavarenim spojevima stalno treba imati na umu da svaki zavareni spoj može biti najslabije mjesto sustava ("*Lanac je jak koliko mu je jaka najslabija karika*"), a otkazi nekih zavarenih spojeva mogu dovesti do katastrofalnih posljedica.

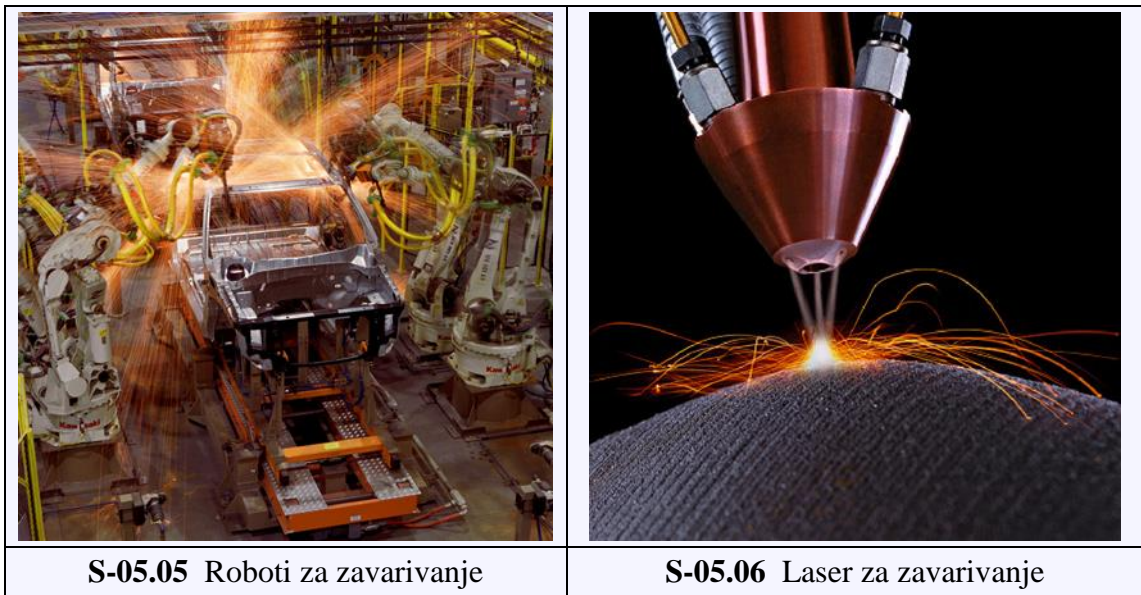
Rijetki su iole složeniji suvremeni strojarski proizvodi bez zavarenih spojeva. Danas su zavareni spojevi najčešće korišteni nerastavljivi spojevi opterećenih (*mehanički, toplinski*) strojarskih elemenata, u pravilu, u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Koriste se u strojarstvu (*industrije strojeva, vozila, brodova i zrakoplova, te termoenergetika i procesna tehnika*), u izvedbi građevinskih objekata (*mostovi, zgrade, komunalna infrastruktura*) te postrojenja kemijske naftne i petrokemijske industrije. Zavareni spojevi su posebno pogodni za sanaciju pukotina i lomova strojarskih elemenata nastalih tijekom pogona.

Jedan tanker, izgrađen u hrvatskom brodogradilištu, obuhvatio je 261,6 km kutnih spojeva i 11,6 km sučelnih spojeva, a velika postrojenja termoenergetike i procesne tehnike (**S-05.04**) obuhvaćaju od deset do sto tisuća ($10\ 000 \div 100\ 000$) zavarenih spojeva cijevi i opreme.



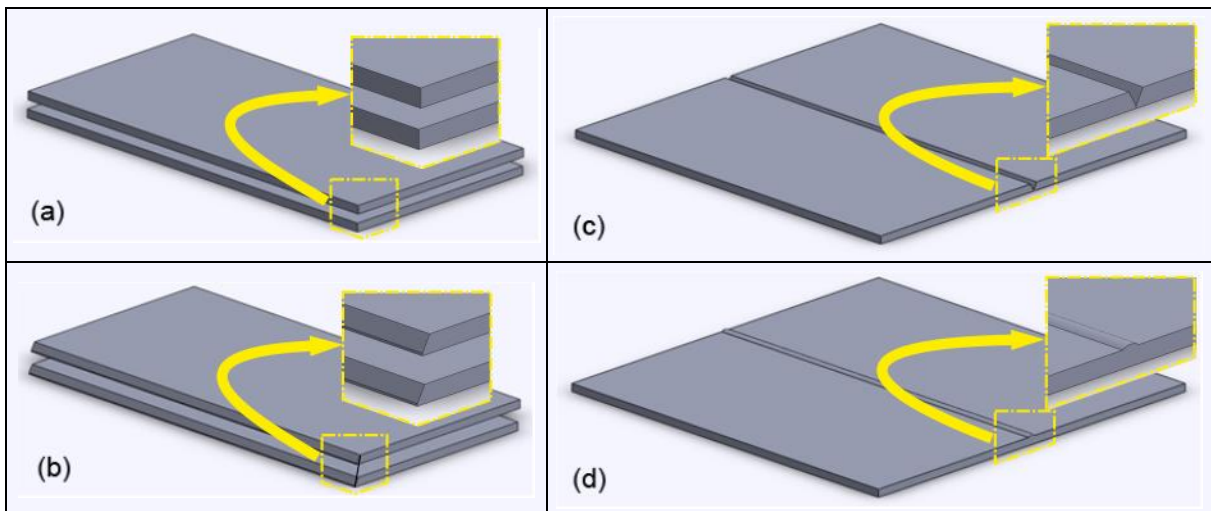
Slika 05.04 Rafinerija nafte

Danas se bez većih problema postižu mehanička svojstva zavara različitih materijala jednaka mehaničkim svojstvima osnovnog materijala, a primjena zavarenih spojeva se i na dalje širi. Na **S-05.05** je prikazan rad skupine specijaliziranih robota za zavarivanje u masovnoj proizvodnji automobilske industrije, a na **S-05.06** rad glave lasera u preciznoj industriji.



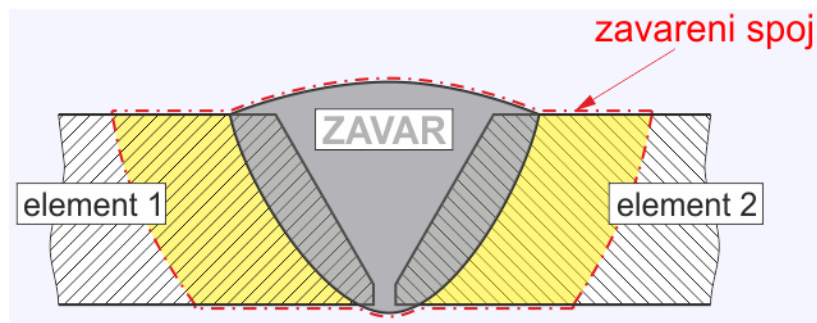
5.1.2 Struktura i nazivlje zavarenih spojeva

Zavarivanje – strojarska tehnologija spajanja metalnih (*čelik, bakar, aluminij*) ili nemetalnih (*polietilen, polipropilen*) materijala (*elemenata*) s taljenjem ili samo omekšavanjem osnovnog materijala na mjestu spoja, uz ili bez korištenja (1) dodatnog materijala i/ili (2) dodatnog pritiska.



Slika 05.07 Koraci spajanja dva lima postupkom zavarivanja

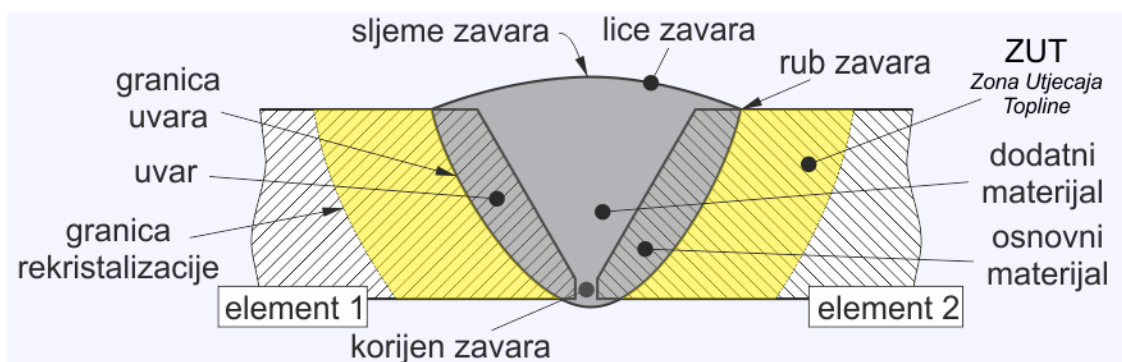
Zavar (*S-05.08*) – područje u kome je tijekom zavarivanja, uslijed djelovanja visokih temperatura i aprezanja u slučaju zavarivanja pod pritiskom, došlo do sjedinjavanja osnovnih (*i dodatnog*) materijala.



Slika 05.08 Zavar i zavareni spoj elemenata 1 i 2

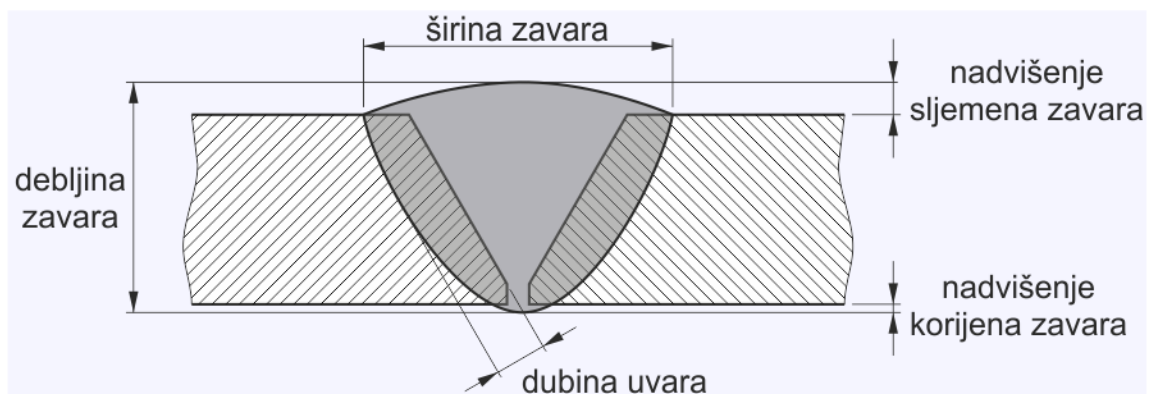
Zavareni spoj (S-05.08) obuhvaća sam zavar i dijelove spajanih elemenata (uključivo ZUT – zona utjecaja topline) koji se nalaze neposredno uz zavar.

Dijelovi su zavarenog spoja s nazivljem prikazani na slici S-05.09.



Slika 05.09 Nazivlje dijelova zavarenog spoja

Osnovne su dimenzije presjeka zavara prikazane na slici S-05.10.



Slika 05.10 Dimenzije zavara

Osnovni materijal – materijal od koga je izrađen element.

Dodatni materijal – materijal koji se dodaje tijekom procesa zavarivanja.

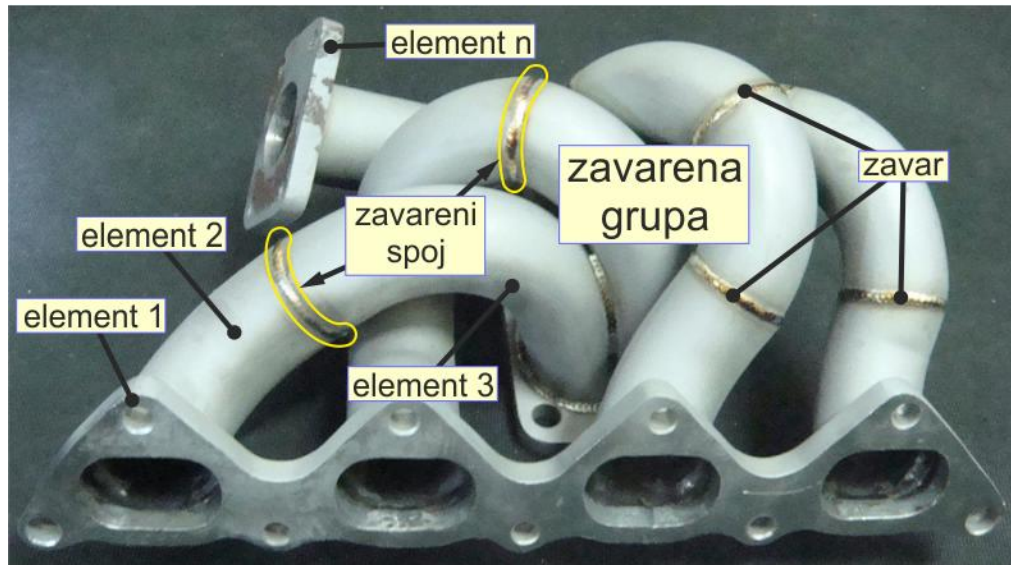
Uvar – područje zavarivanog elementa obuhvaćeno taljenjem.

Masa zavara jednaka je zbroju masa uvara i dodatnog materijala.

ZUT – zona utjecaja topline u kojoj se tijekom zavarivanja odvijaju fazne promjene.

Zavareni element (S-05.11) – element spojen zavarivanjem.

Zavarena grupa (S-05.11) – skup elemenata spojenih postupcima zavarivanja.

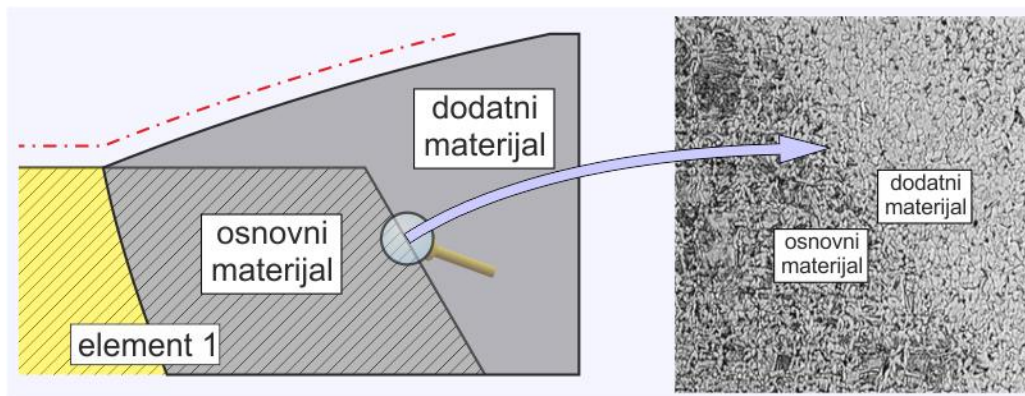


Slika 05.11 Zavarena grupa i dijelovi zavarene grupe (ispušna grana motora SUI)

Zavarena konstrukcija – skup zavarenih grupa spojenih postupcima zavarivanja.

5.1.3 Zavarivanje

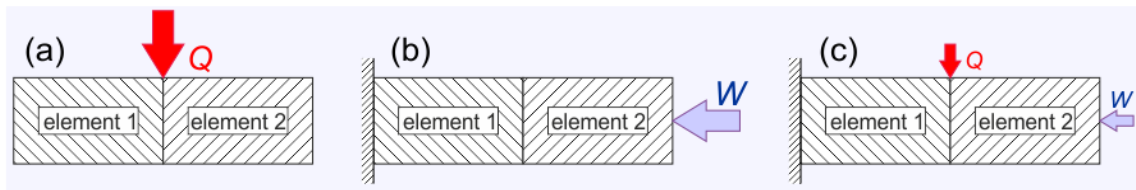
Zavari imaju manje ili više homogenu građu – provedbom procesa zavarivanja sjedinjeni su materijali spajanih elemenata (S-05.12).



Slika 05.12 Spojeni materijali elemenata

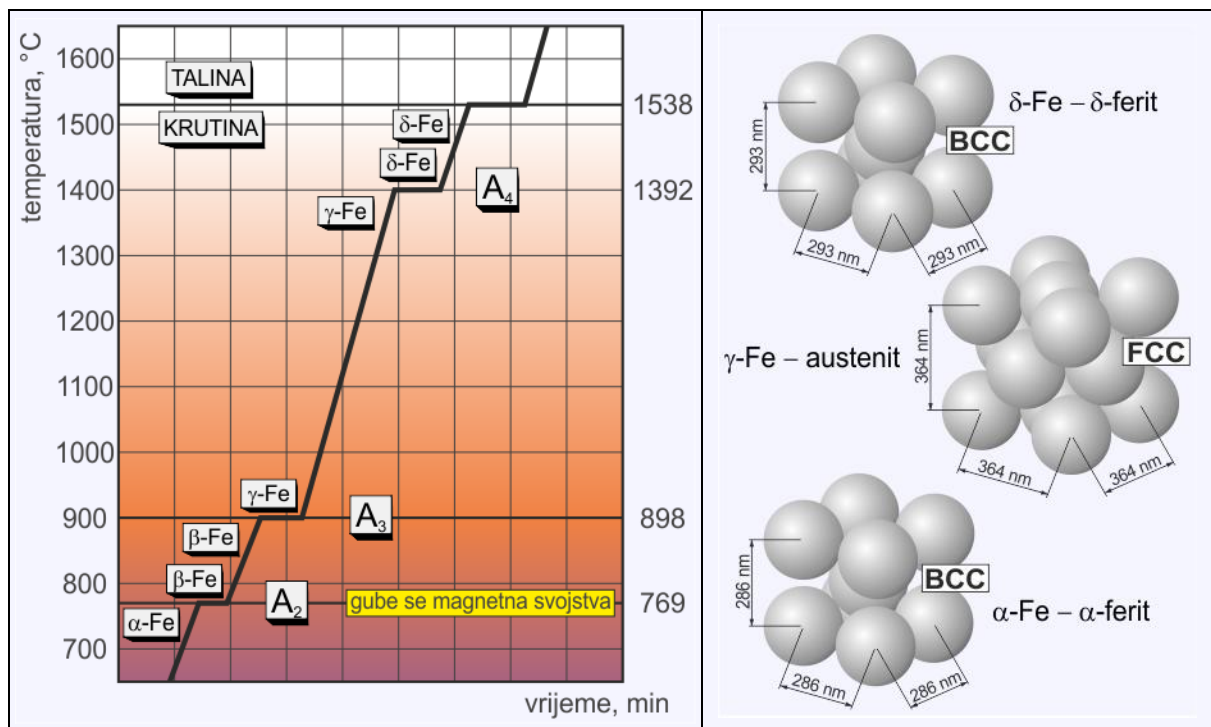
Načelno se materijali spajanih elemenata mogu objediniti (S-05.13):

- (f) dovođenjem topline (zavarivanje taljenjem),
- (g) obavljanjem rada (zavarivanje pritiskom) ili
- (h) kombiniranjem dovođenja topline i obavljanja rada.



Slika 05.13 Postupci spajanja zavarivanjem

Pri dovođenju topline tali se dio materijala (*elementi 1/2 i dodatni materijal*) za što je potrebno dostići visoke temperature (*S-05.14*).



Slika 05.14 Fazne promjene pri grijanju željeza

Za sjedinjavanje materijala spajanih elemenata dovoljno je rastaliti u zoni dodira samo tanki površinski sloj materijala, što je u većini praktičnih slučajeva praktično nemoguće (*geometrije temperaturnih polja izvora topline i spajanih površina elemenata*). Optimalni rezultati procesa zavarivanja se postižu pripremom spajanih elemenata – izradom prikladnih žljebova (*S-05.07 – b*).

Prema osnovnoj geometriji, oblikovanom pripremom za zavarivanje i zavarivanjem, razlikuje se više vrsta zavara. Osnovne normirane oznake (*označavanje zavara na tehničkim crtežima*) i nazivi geometrija zavara su prikazani u **T-05.01** (*obrada norme DIN EN 22553*).

Tabela 05.01 Osnovne oznake i nazivi zavara

	sučelni rubni zavar		HY zavar		zavar otvora		ravni rubni zavar
	I zavar		U zavar		točkasti zavar		navar
	V zavar		HU zavar		šavni zavar		ravni zavar

∇	HV zavar	∩	suprotni zavar	∇	zavar strmih bokova	≡	kosi zavar
Y	Y zavar	△	kutni zavar	∇	H zavar strmih bokova	≡	preklopni zavar

gdje je: H – kratica prefiksa "polu" (nj. – Halbe)

Zavari se mogu označavati kombiniranjem osnovnih oznaka:

X	DV zavar (X zavar)	K	DHV zavar (K zavar)	X	DY zavar
K	DHY zavar	X	DU zavar	Y	Y sa suprotnim zavarom

gdje je: D – kratica prefiksa "dvostruki" (nj. – Doppel)

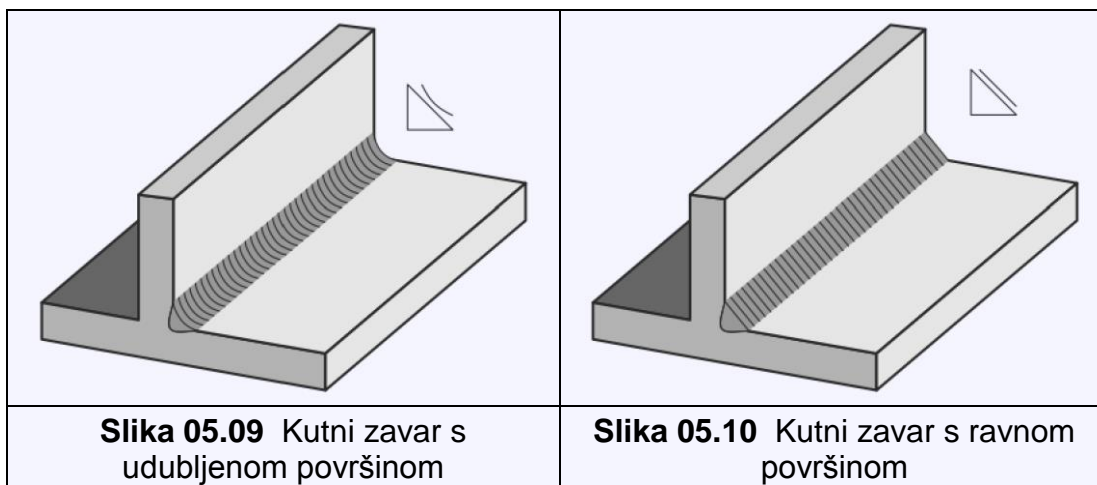
Dopunske su normirane oznake za površine zavara (obrada norme DIN EN 22553):

—	ravna površina	—	nadvišena površina	—	udubljena površina
---	----------------	---	--------------------	---	--------------------

Različite vrste zavara mogu se označiti kombiniranjem oznaka osnovnih geometrija zavara i dopunskih oznaka.

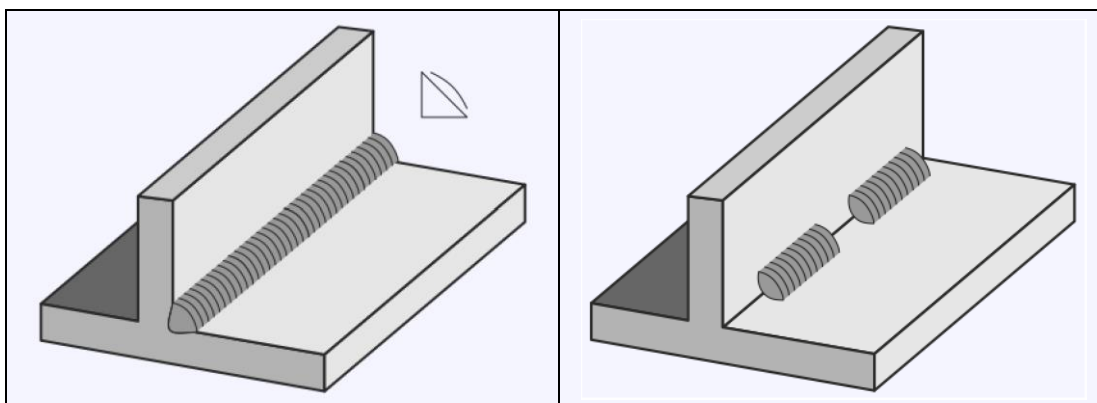
△	kutni zavar s ravnom površinom	△	kutni zavar s nadvišenom površinom
△	kutni zavar s udubljenom površinom	∇	V zavar s ravnom površinom

Dva su primjera označenih kutnih zavara data na S-05.09 i S-05.10.



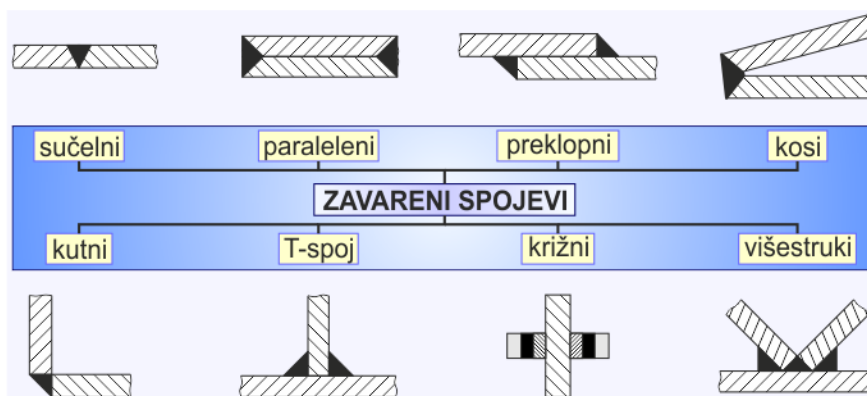
Prema kontinuiranosti zavara razlikuju se:





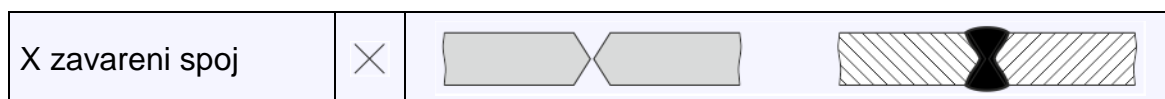
5.1.4 Vrste i označavanje zavarenih spojeva

Prema uzajamnom položaju spajanih elemenata razlikuju se:

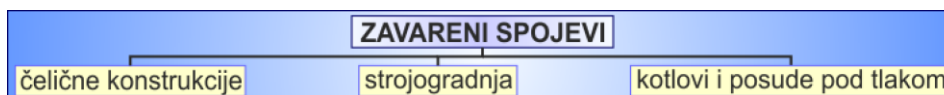


Primjeri su različitih zavarenih spojeva:

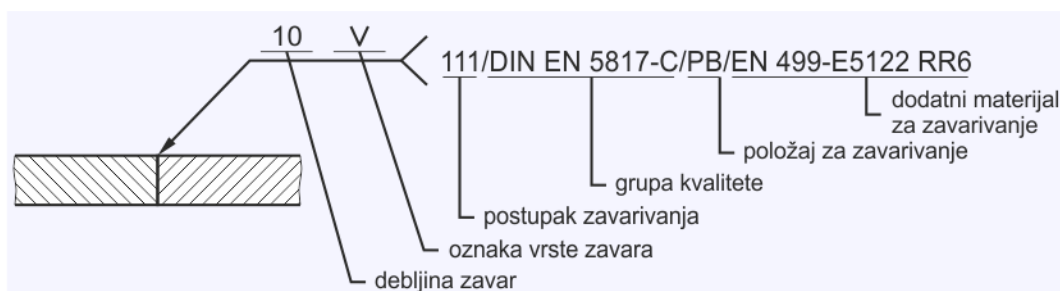
Vrsta i oznaka zavora		Pripremljeni i zavareni elementi	
sučelni rubni zavareni spoj			
I zavareni spoj			
V zavareni spoj			
HV zavareni spoj			
Y zavareni spoj			
HY zavar			
zavareni spoj sa strmim bokovima			



Prema području primjene razlikju se:



Zavareni spojevi se na tehničkim crtežima označavaju nizom oznaka – **S-05.11.** [Haberhauer (2011), str. 76]



Slika 05.11 Oznaka zavarenog spoja

Prva brojučana vrijednost u nizu (*iza <*) označava postupak zavarivanja. Brojčane oznake pojedinih postupaka zavarivanja su utvrđene u normama (*HRN EN ISO 4063*). Dio je brojčanih oznaka zavarenih spojeva obuhvaćenih u normi:

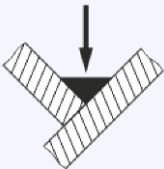
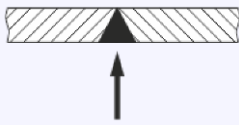
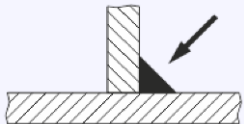
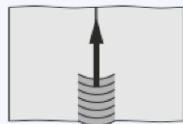
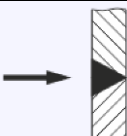
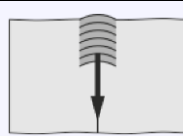
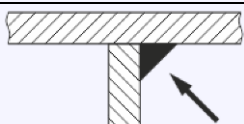
- 1 – elektrolučno zavarivanje,
- 11 – elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom bez zaštitnog plina,
- 111 – elektrolučno zavarivanje obloženom metalnom elektrodom,
- 114 – elektrolučno zavarivanje praškom punjenom metalnom žicom
- 12 – elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom pod zaštinim praška,
- 13 – elektrolučno zavarivanje taljivom metalnom elektrodom sa zaštitnim plinom,
- 131 – elektrolučno zavarivanje metalnom elektrodom pod zaštitom inertnog plina,
- 132 – elektrolučno zavarivanje metalnom elektrodom pod zaštitom aktivnog plina,
- 14 – elektrolučno zavarivanje netaljivom metalnom elektrodom sa zaštitnim plinom,
- 141 – elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom pod zaštitom inertnog plina,
- 15 – zavarivanje mlazom plazme,
- 18 – ostali postupci elektrolučnog zavarivanja,
- 2 – elektrootporno zavarivanje,
- 3 – plinsko zavarivanje,
- 4 – zavarivanje u krutom stanju,
- 5 – zavarivanje zrakama,
- 7. – ostali postupci zavarivanja,

U oznakama zavarenih spojeva, između ostalih podataka, navode se ocjene zavara. U normi DIN EN 5817 utvrđene su tri ocjene zavara.

Ocjena	Preporuke za korištenje
B – visoki zahtjevi	<ul style="list-style-type: none"> – titrajući visoko opterećeni elementi – potpuno iskorištenje dinamičke čvrstoće materijala – lake konstrukcije – visoko opterećeni elementi koji se kreću – primjeri: okviri, poluge, osovine, vratila, vučne auto kuk, rotori turbina, tlačni spremnici, cjevovodi za visoke tlakove
C – srednji zahtjevi	<ul style="list-style-type: none"> – titrajući srednje opterećeni elementi – primjeri: stalci, okviri, kućišta, noseće konstrukcije strojeva, elementi karoserije, tlačni cilindri, cjevovodi za niske tlakove
D – niski zahtjevi	<ul style="list-style-type: none"> – titrajući nisko opterećeni elementi – primjeri: stalci, kruti kosnici, rebra, temeljne ploče, regali, obloge, uređaji, isprekidani zavari

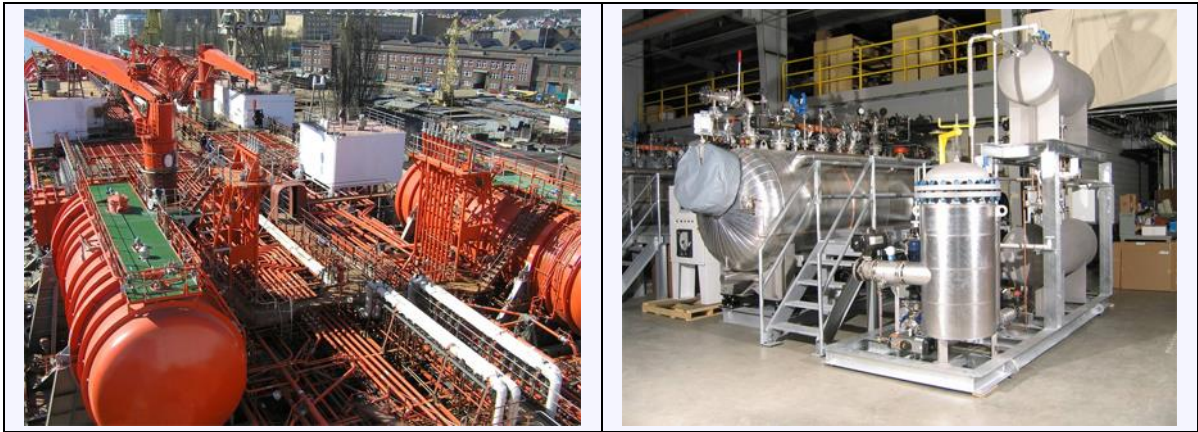
Zavareni spojevi s ocjenom A su obavezni kada otkaz zavarenog spoja elemenata uzrokuje otkaz funkcije sustava. Kada otkaz zavarenog spoja umanjuje učinku, ali ne dovodi do otkaza funkcije sustava, dovoljni su zavareni spojevi s ocjenom B.

Položaj zavora u odnosu na zavarivača se označava dvoslovnom kraticom:

Zavar u odnosu na zavarivača		Oznaka	Zavar u odnosu na zavarivača		Oznaka
položaj kupke		PA	nad glavom		PE
horizontalno - vertikalno		PB	uzlazno		PF
poprečno		PC	silazno		PG
horizontalno nad glavom		PD			

5.1.5 Primjeri zavarenih spojeva





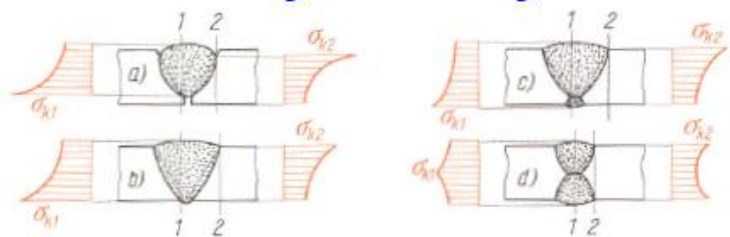
5.2 Oblikovanje zavarenih spojeva

5.2.1 Ispravno oblikovanje zavarenih spojeva

Pri oblikovanju zavarenih spojeva treba § Decker 17:

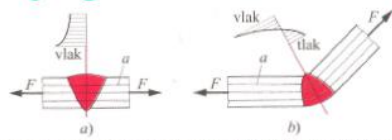
- koristiti normirane poluproizvode (*ploče, trake, profili, cijevi*)
- izbjegavati skupe pripremne radove i
- omogućiti laku pristupačnost zavarenim spojevima.

1. Izbjegavati zarezno djelovanje:

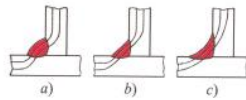


Slika 1.1. Podjela naprezanja u tupom spoju (σ_k zarezno naprezanje)
 a) V-zavar s lošim provarom korijena; b) V-zavar s dobrim provarom korijena;
 c) V-zavar s pročišćenim i zavarenim korijenom; d) dvostrani V-zavar

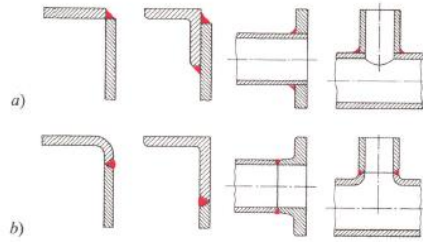
2. Izbjegavati skretanje toka sile :



Slika 1.2. Podjela napreznja u zavaru pri skretanju toka sile (a je tok sile)
a) u tupom spoju; *b)* u kutnom spoju

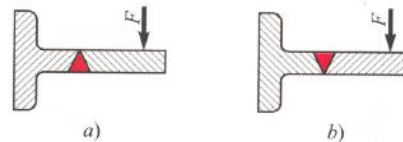


Slika 1.4. Tok sile u kutnim zavarima
a) izbočen kutni zavar; *b)* plosnat kutni zavar; *c)* udubljen kutni zavar



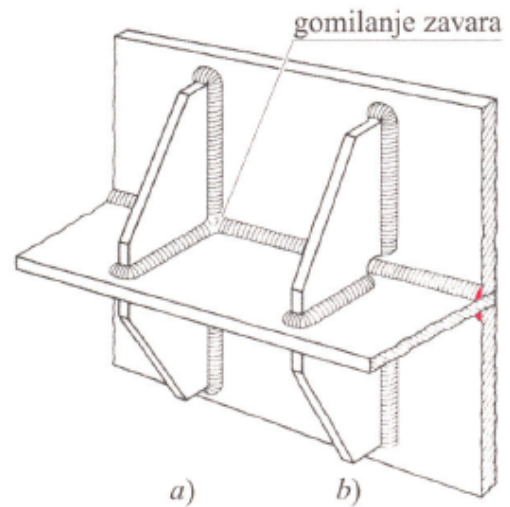
Slika 1.3. Oblikovanje zavarenih dijelova pri dinamičkom opterećenju
a) nepravilno; *b)* pravilno

3. Izbjegavati vlačna napreznja u korijenu zavara:



Slika 1.5. Zavareni šavovi opterećeni na savijanje
a) nepovoljno zbog vlačnog napreznja u korijenu zavara; *b)* povoljno zbog tlačnog napreznja u korijenu zavara

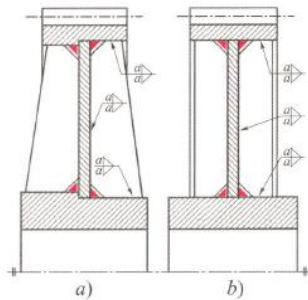
4. Izbjegavati gomilanje zavara:



Slika 1.6. Privarena rebra
a) nepravilno zbog gomilanja zavara;
b) pravilno

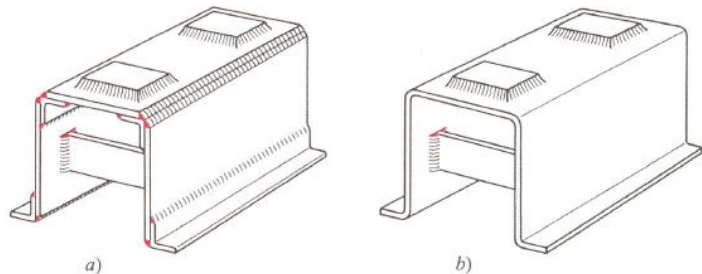
5. Dati prednost poluproizvodima

6. Izbjegavati skupe pripremne radove:



Slika 1.7. Zavareni zupčanik

- a) nepravilno radi tokarskih radova na glavi i vijencu, te potrebe krojenja rebara;
b) pravilno



Slika 1.8. Zavareno podnožje

- a) nepravilno zbog mnogih pojedinačnih dijelova i mnogih zavarenih šavova;
b) pravilno

7. Paziti na pristupačnost šavova

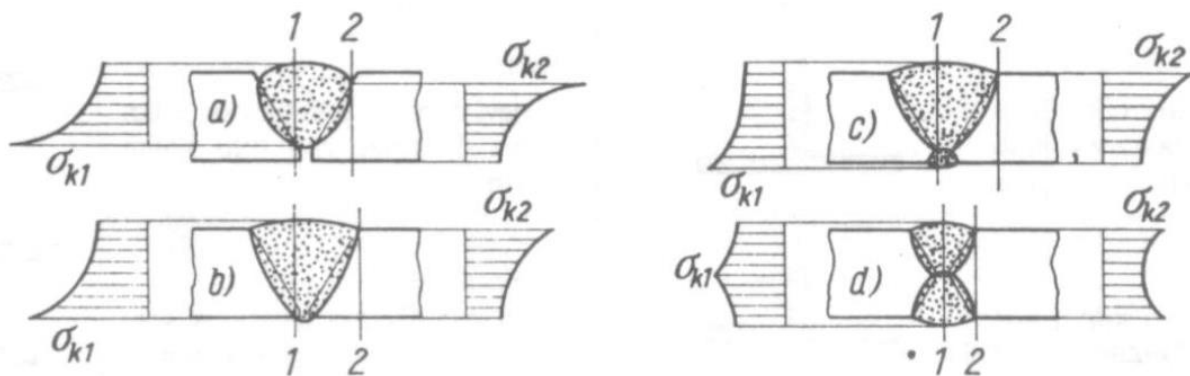
5.2.2 Pogreške u oblikovanju zavarenih spojeva

Prikladnim oblikovanjem i izradom kod zavarenih spojeva se izbjegavaju pojave **Decker**

14:

- zareznog djelovanja,
- skretanja toka sila u zavarenom spoju,
- vlačnih naprezanja u korijenu zavora i
- gomilanje zavora.

Zarežno djelovanje



- (a) V zavar s loše provarenim korijenom

- (b) V zavar s dobro provarenim korijenom
- (c) V zavar s pročišćenim i zavarenim korijenom
- (d) X zavar

5.2.3 Primjeri oblikovanja zavarenih spojeva

[Haberhauer (2011), str. 85 ÷ 89]

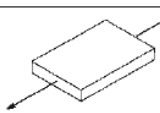
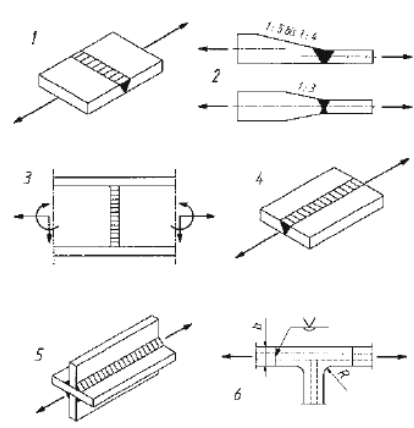
Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung	mögliche Bewertungsgruppe
A		-
B		B

Abb. 2.10. Beispiele für die Ausführung von Schweißverbindungen im Maschinenbau nach DV 95201 (zugehörige Spannungslinien s. Abb. 2.11)

Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung		mögliche Bewertungsgruppe
	Darstellung	Beschreibung	
C		<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit nicht belasteten Querversteifungen. DHV-(K-)Nähte kerbfrei bearbeitet und auf Risse geprüft. 2. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit angeschweißten Scheiben. DHV-(K-)Nähte kerbfrei bearbeitet und auf Risse geprüft. 	C
D		<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Bauteil mit quer zur Krafrichtung beanspruchter Stumpfnaht</i>. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt. 2. <i>Bauteile mit längs zur Krafrichtung beanspruchter Stumpfnaht</i>. Wurzel gegengeschweißt. Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt. 3. <i>Trägerstegblech</i>: Querkraftbiegung mit überlagerter Längskraft. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt. 4. <i>Rohrverbindungen</i> mit unterlegten Stumpfnahten. Schweißnähte stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt. 5. <i>Blechkonstruktionen</i> mit Stumpfstoßen in Eckverbindungen ($R \geq 0,5 b$). Wurzeln gegengeschweißt, Schweißnähte stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt. 	B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

E1		<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Bauteil mit quer zur Krafrichtung beanspruchter Stumpfnaht</i>. Abhängig von den Anforderungen: Wurzel gegengeschweißt. Schweißnähte nicht bearbeitet. 2. <i>Bauteile mit längs zur Krafrichtung beanspruchter Stumpfnaht</i>. Schweißnaht nicht bearbeitet. 3. <i>Trägerstegbleche</i>: Querkraftbiegung mit überlagerter Längskraft. Abhängig von den Anforderungen: Wurzel gegengeschweißt, nicht gegengeschweißt. Schweißnaht nicht bearbeitet. 4. <i>Eckverbindungen</i> mit Stumpfstoßen und Eckblechen. Schweißnähte nicht bearbeitet. 5. <i>Rohrverbindung</i> (auch mit Vollstab) mit quer zur Krafrichtung beanspruchter Stumpfnaht. Schweißnaht nicht bearbeitet. 6. <i>Verbindung verschiedener Werkstoffdicken</i> durch eine Stumpfnaht. Wurzel gegengeschweißt. Schweißnaht nicht bearbeitet. 7. Durch <i>Kreuzstoß</i> mittels DHV-(K-)Nähten verbundene Bauteile. Schweißnähte bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie E5) 8. Durch DHV-(K-)Nähte verbundene, auf <i>Biegung und Schub</i> beanspruchte Bauteile. Schweißnähte bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie E5) 	C, B
E5		<ol style="list-style-type: none"> 9. <i>Durchlaufendes Bauteil</i>, an das quer zur Krafrichtung Teile mit bearbeiteten DHV-(K-)Nähten angeschweißt sind. 10. <i>Bauteil mit aufgeschweißter Gurtplatte</i>. Die Kehlnähte sind an den Stirnflächen bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie F) 	C, B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

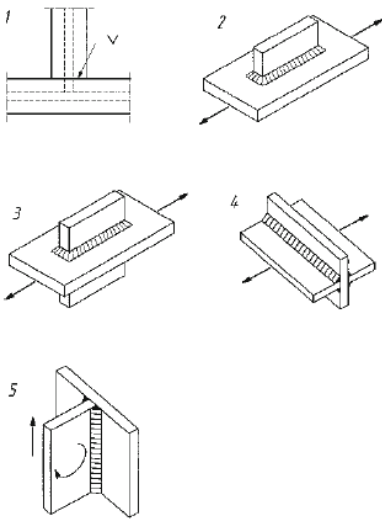
Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung		mögliche Bewertungsgruppe
F		<p>1. <i>Stumpfstöße von Profilen ohne Eckbleche</i>. Schweißnähte nicht bearbeitet.</p> <p>2. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit einem durch nichtbearbeitete Kehlnähte aufgeschweißtem Bauteil.</p> <p>3. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit einem durchgesteckten, durch Kehlnähte verbundenen Bauteil. Die Schweißnähte sind nicht bearbeitet.</p> <p>4. Durch <i>Kreuzstoß</i> mittels Kehlnähten verbundene Bauteile. Die Schweißnähte sind nicht bearbeitet.</p> <p>5. Auf <i>Schub und Biegung</i> durch nicht bearbeitete Kehlnähte verbundene Bauteile.</p>	C, B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

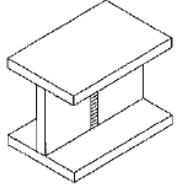
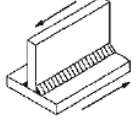
G		<p><i>Stegblechquerstoß</i>, maximale Schubbeanspruchung in Trägernulllinie. Die Linie gilt auch für auf <i>Torsion</i> beanspruchte, nicht geschweißte Bauteile.</p>	B
H		<p><i>Schubverbindung</i> mit DHV-(K-) oder Kehlnähten zwischen Stegblech und Gurt bei Biegeträgern (Halsnähte)</p>	B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

5.3 Usvajanje zavarenih spojeva

5.3.1 Norme zavarenih spojeva

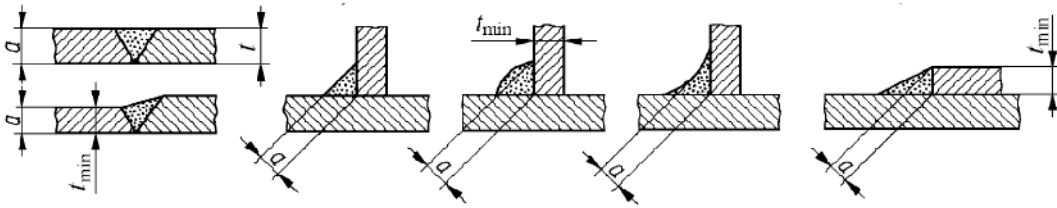
5.3.2 Proračun zavarenih spojeva

Nosive površine zavarenih spojeva

Najvažnije je pravilno odrediti ukupnu nosivu površinu zavora:

$$A_{zv} = \sum a \cdot L \quad \text{mm}^2$$

gdje je: a – računska debljina, mm
 L_{zv} – računska dužina zavora, mm

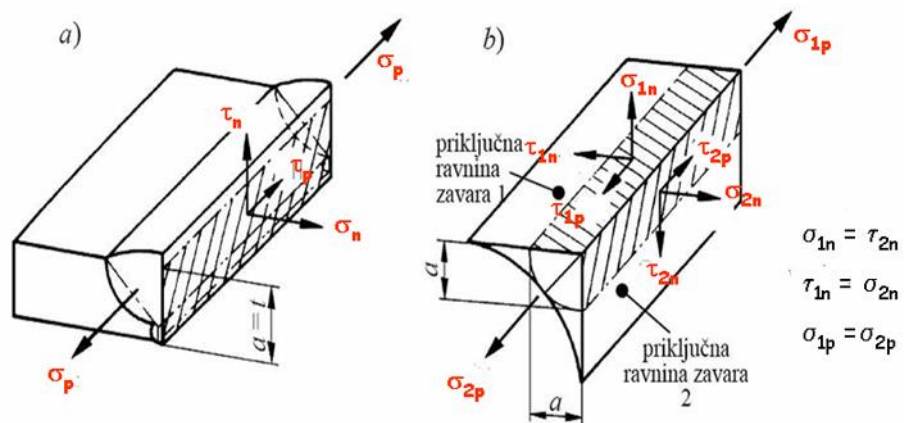


gdje je: t – debljina najtanjeg dijela zavarivanog spoja, mm

Računska dužina zavora L_{zv}

Sučeonni zavar	Kutni zavar

Naprezanja u zavarenim spojevima



gdje je: σ_n – normalno naprezanje, okomito na računsku ravninu, N/mm²
 σ_p – normalno naprezanje, okomito na računski presjek zavora, N/mm²
 τ_{sn} – smično naprezanje, u računskoj ravnini okomito na dužinu, N/mm²
 τ_{sp} – smično naprezanje, u računskoj ravnini uzduž zavora, N/mm²

Tabelle 2.7. Geometrische Größen und Spannungen bei Stumpfnähten

Beanspruchung	Anordnung	Geometrische Größen*)	Nennspannung
Zug (Druck)		$A_w = a \cdot l$	$\sigma_{w,z(d)} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$
Biegung		$W_b = \frac{a \cdot l^2}{6}$	$\sigma_{w,b} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$
		$W_b = \frac{l \cdot a^2}{6}$	
Schub		$A_{ws} = a \cdot l$	$\tau_{w,s} = \tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{ws}}$
Torsion		$W_t = c_2 \cdot l \cdot a^2$	$\tau_{w,t} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$

* mit $l = b - 2 \cdot a$ (bei Berücksichtigung der Endkrater)

und c_2	0,208	0,231	0,246	0,267	0,282	0,299	0,307	0,312	0,33
für $l/a =$	1	1,5	2	3	4	6	8	10	∞

Beanspruchung	Anordnung	Geometrische Größen	Nennspannung
Zug (Druck)		$A_w = \sum a_i \cdot l_i = 2 a (h + b)$	$\sigma_{w,z(d)} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$
Biegung		$W_b = \frac{I_{bc}^a}{e_{\max}}$	$\sigma_{w,b} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$
		$W_b = \frac{I_{bc}^b}{e_{\max}}$	
Schub		$A_{ws} = 2 a h$	$\tau_{w,s} = \frac{F}{A_{ws}}$
		$A_{ws} = 0,5 \pi d a$	
Torsion		$W_t = 2 (h + a) (b + a) a$	$\tau_{w,t} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$
		$W_t = \frac{\pi}{2} (d + a)^2 a$	

^a mit $I_{bc} = 2 \left[\frac{ba^3}{12} + ba \left(\frac{h+a}{2} \right)^2 + \frac{ah^3}{12} \right]$ und $e_{\max} = \frac{h}{2} + a$

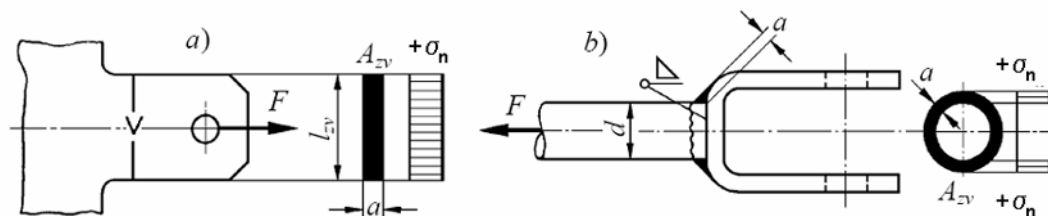
^b mit $I_{bc} = \frac{\pi [(d+2a)^4 - d^4]}{64}$ und $e_{\max} = \frac{d}{2} + a$

Proračun čvrstoće zavarenih spojeva

Proračun temelji na usporedbi radnih i dopuštenih naprezanja u zavaru.

Vlačno opterećeni zavareni spojevi

§ Decker 40

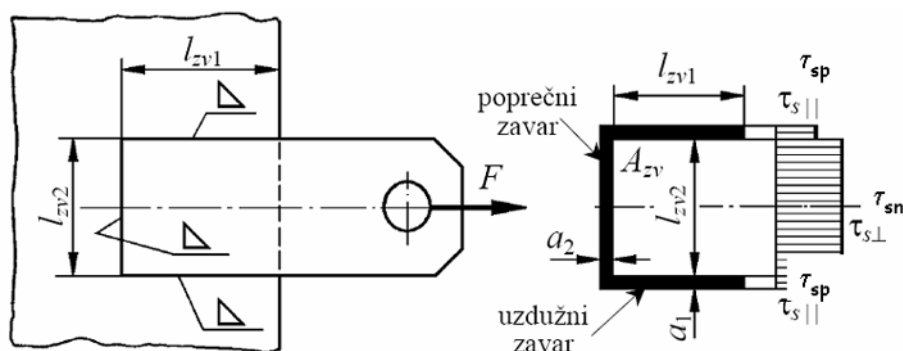


a) sučeoni, b) kutni

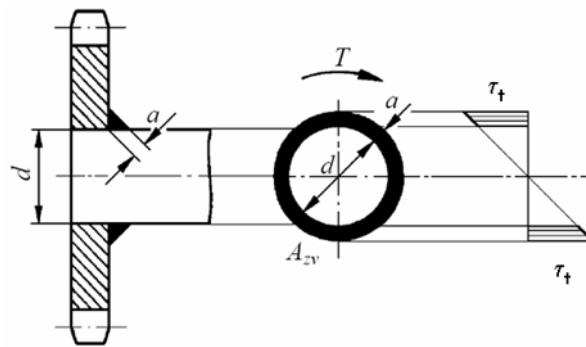
$$\sigma_v = \frac{F}{\sum A_n} \leq \sigma_{v,zv,dop} \quad \sigma_t = \frac{F}{\sum A_n} \leq \sigma_{t,zv,dop}$$

gdje je: F – sila (opterećenje), N, σ – naprezanje okomito na računsku ravninu, N/mm² (v – vlačno, t – tlačno) A_n – nosiva površina, mm² $\sigma_{zv,dop}$ – dopušteno naprezanje zavara na vlak/tlak, N/mm²

Smično opterećen zavareni spoj

Za vlačno/tlačno i smično (poprečno i uzdužno) opterećenje zavara silom F :gdje je: σ_n – vlačno/tlačno naprezanje okomito na računsku ravninu, N/mm² τ_{sn} – smično naprezanje u računskoj ravnini, poprečno na dužinu zavara, N/mm² τ_{sp} – smično naprezanje u računskoj ravnini, uzduž zavara, N/mm² $\sigma_{zv,dop}$ – dopušteno naprezanje zavara na vlak/tlak, N/mm² $\tau_{zv,dop}$ – dopušteno naprezanje zavara na smicanje, N/mm²

Opterećenje zavara na savijanje



$$\tau_t = \frac{T}{W_{p,zv}} \leq \tau_{t,zv,dop}$$

$$W_{p,zv} = \frac{(d + 2 \cdot a)^3 \pi}{16} \left[1 - \left(\frac{d}{d + 2 \cdot a} \right)^4 \right]$$

gdje je: τ_t – naprezanje zavara na torziju, N/mm²

T – moment torzije, N·mm

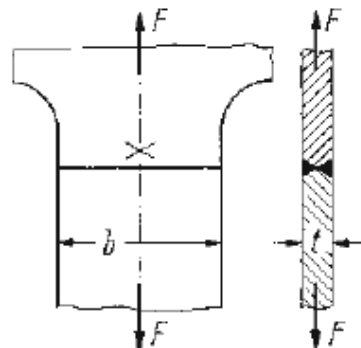
$W_{p,zv}$ – polarni moment otpora računске površine zavara, mm³

$\tau_{t,zv,dop}$ – dopušteno naprezanje na torziju u zavaru, N/mm²

5.3.3 Primjeri usvajanja zavarenih spojeva

Beispiel 1: Auslegung bei statischer Beanspruchung

Ein Flachstahl aus S 235 mit einer Dicke von $t = 15$ mm soll mit einer X-Naht an eine Stahlkonstruktion nach Abb. 2.13 angeschweißt werden. Er wird ruhend mit $F = 168000$ N belastet (Lastfall H). Gesucht wird die erforderliche Breite des Flachstahls.



Nach Tabelle 2.9 ist die zulässige Spannung in der Schweißnaht $\sigma_{\text{zul}} = 160 \text{ N/mm}^2$. Die Schweißnahtdicke der Stumpfnah ist $a = t = 15 \text{ mm}$. Für die erforderliche Schweißnahtlänge gilt:

$$l = \frac{F}{a \sigma_{\text{zul}}} = \frac{168 \cdot 10^3 \text{ N}}{15 \text{ mm} \cdot 160 \text{ N/mm}^2} = 70 \text{ mm}$$

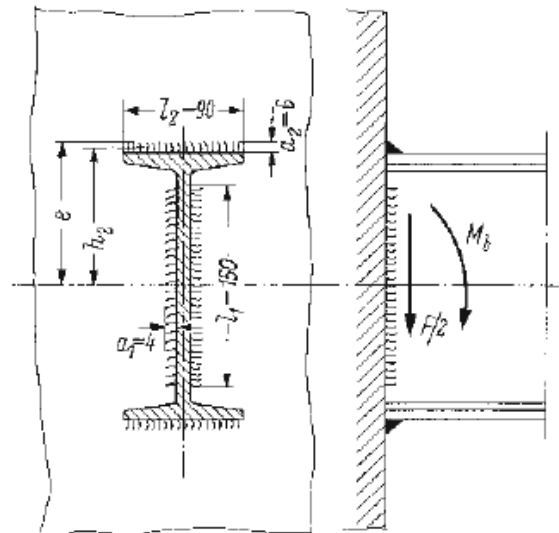
Nach Gl (2.1) wird die Breite des Flachstahls

$$b = l + 2a = 70 \text{ mm} + 2 \cdot 15 \text{ mm} = \underline{100 \text{ mm}}$$

Beispiel 2: Festigkeitsnachweis bei statischer Beanspruchung

Ein in der Mitte mit $F = 100000 \text{ N}$ belasteter Träger ($h = 200 \text{ mm}$, $b = 90 \text{ mm}$ und $l = 800 \text{ mm}$) aus S235 ist entsprechend Abb. 2.14 mit Kehlnähten seitlich an biegesteife Wände angeschweißt.

Abb. 2.14. Festigkeitsnachweis einer Kehlnahtverbindung bei stationärer Beanspruchung (Beispiel 2)



1. Belastungsgrößen.

1.1 Biegemoment:

$$M_b = \frac{F l}{8} = \frac{100000 \text{ N} \cdot 800 \text{ mm}}{8} = 10 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

1.2. Querkraft:

$$F_Q = F/2 = 50\,000 \text{ N}$$

2. Geometrische Größen

2.1 Widerstandsmoment gegen Biegung:

mit

$$h_2 = \frac{h + a_2}{2} = \frac{200 + 6}{2} = 103 \text{ mm}$$

wird

$$\begin{aligned} I_b &= 2 \left[\frac{l_2 a_2^3}{12} + l_2 a_2 h_2^2 + \frac{a_1 l_1^3}{12} \right] = 2 \left[\frac{90 \cdot 6^3}{12} + 90 \cdot 6 \cdot 103^2 + \frac{4 \cdot 150^3}{12} \right] \\ &= 13,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

und mit

$$e = e_{\max} = \frac{h}{2} + a_2 = 100 + 6 = 106 \text{ mm}$$

wird

$$W_b = \frac{I_b}{e_{\max}} = \frac{13,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}{106 \text{ mm}} = 129 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

2.2 Schweißnahtfläche für Schubbeanspruchung

$$A_{wS} = 2 a_1 l_1 = 2 \cdot 4 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm} = 1200 \text{ mm}^2$$

3. Nennspannungen

3.1 Biegespannung:

$$\sigma_{w,b} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{10 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{129 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} = 77,5 \text{ N/mm}^2$$

3.2 Schubspannung:

$$\tau_{w,s} = \frac{F_Q}{A_{wS}} = \frac{50000 \text{ N}}{1200 \text{ mm}^2} = 41,7 \text{ N/mm}^2$$

3.3 Vergleichsspannung nach Gl. (2.2):

$$\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_{w,b}^2 + \tau_{w,s}^2} = 88 \text{ N/mm}^2.$$

4. Zulässige Spannungen

Nach Tabelle 2.9 wird $\sigma_{w,v \text{ zul}} = \sigma_{w \text{ zul}} = 135 \text{ N/mm}^2$.

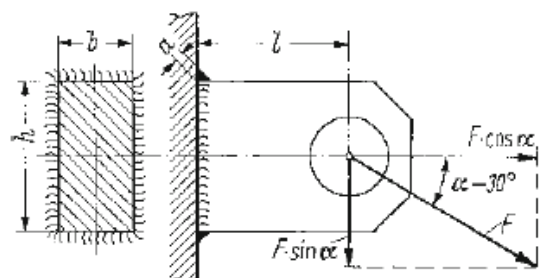
5. Vergleich (Festigkeitsnachweis):

$$\sigma_{w,v} = 88 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{w \text{ zul}} = 135 \text{ N/mm}^2.$$

Beispiel 3: Festigkeitsnachweis bei dynamischer Beanspruchung

An einer Tragöse mit rechteckigem Querschnitt (Abb. 2.15), die mit Kehlnähten von der Dicke $a = 5 \text{ mm}$ an eine steife Wand angeschweißt ist, greift unter dem Winkel $\alpha = 30^\circ$ eine Schwellkraft mit $F_{\text{max}} = 15000 \text{ N}$ an. Die Tragöse aus S355 hat die Abmessungen $l = 40 \text{ mm}$, $h = 40 \text{ mm}$ und $b = 20 \text{ mm}$.

Abb. 2.15. Festigkeitsnachweis einer Kehlnahtverbindung bei dynamischer Beanspruchung (Beispiel 3)



1. Belastungsgrößen

1.1 Maximale Normalkraft (Zugkraft):

$$F_N = F \cos \alpha = 15\,000 \text{ N} \cdot \cos 30^\circ = 13\,000 \text{ N}$$

1.2 Maximales Biegemoment:

$$M_b = F l \sin \alpha = 15\,000 \text{ N} \cdot 40 \text{ mm} \cdot \sin 30^\circ = 300\,000 \text{ Nmm}$$

1.3 Maximale Querkraft:

$$F_Q = F \sin \alpha = 15\,000 \text{ N} \cdot \sin 30^\circ = 7\,500 \text{ N}$$

2. Geometrische Größen

2.1 Schweißnahtfläche für Zugspannung:

$$A_w = 2 a (h + b) = 2 \cdot 5 \text{ mm} \cdot (40 \text{ mm} + 20 \text{ mm}) = 600 \text{ mm}^2$$

2.2 Widerstandsmoment gegen Biegung:

$$I_b = 2 \left[\frac{b a^3}{12} + b a \left(\frac{h + a}{2} \right)^2 + \frac{a h^3}{12} \right]$$

$$= 2 \left[\frac{20 \cdot 5^3}{12} + 20 \cdot 5 \cdot 22,5^2 + \frac{5 \cdot 40^3}{12} \right] = 155 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$W_b = \frac{I_b}{e_{\max}} = \frac{I_b}{h/2 + a} = \frac{155 \cdot 10^3 \text{ mm}^4}{25 \text{ mm}} = 6200 \text{ mm}^3$$

2.3 Schweißnahtfläche für Schubbeanspruchung:

$$A_{wS} = 2 a h = 2 \cdot 5 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} = 400 \text{ mm}^2$$

3. Nennspannungen

3.1 Zugspannung:

$$\sigma_{w,z} = \frac{F_N}{A_w} = \frac{13000 \text{ N}}{600 \text{ mm}^2} = 21,7 \text{ N/mm}^2$$

3.2 Biegespannung:

$$\sigma_{w,b} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{300000 \text{ Nmm}}{6200 \text{ mm}^3} = 48,4 \text{ N/mm}^2$$

Die maximale Normalspannung tritt in der oberen Naht auf, da sich hier die Biege- und Zugspannungen additiv überlagern:

$$\sigma_{w,b \max} = \sigma_{w,b} + \sigma_{w,z} = 48,4 + 21,7 = 70,1 \text{ N/mm}^2$$

3.3 Schubspannung:

$$\tau_{w,s} = \frac{F_Q}{A_{wS}} = \frac{7500 \text{ N}}{400 \text{ mm}^2} = 18,8 \text{ N/mm}^2$$

3.4 Vergleichsspannung nach Gl. (2.3):

$$\sigma_{w,V} = \sqrt{\sigma_{w,b \max}^2 + 2 \cdot \tau_{w,s}^2} = \sqrt{70,1^2 + 2 \cdot 18,8^2} = 75 \text{ N/mm}^2$$

4. Zulässige Spannungen

Nach Gl. (2.4) ist das Grenzspannungsverhältnis

$$\kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = \frac{0}{15\,000\text{ N}} = 0 \quad (\text{Schwellfestigkeit})$$

Nach Abb. 2.10 läßt sich die Tragöse dem Kerbfall F(5) zuordnen. Damit kann aus Abb. 2.11 für $\kappa = 0$ die zulässige Normalspannung mit $\sigma_{\text{zul}} = 80\text{ N/mm}^2$ abgelesen werden. Da die zulässige Spannung nur für Bauteildicken $\leq 10\text{ mm}$ gilt, muß dieser Wert mit dem Dickenbeiwert nach Abb. 2.12 multipliziert werden:

$$\sigma_{\text{w zul}} = b \sigma_{\text{zul}} = 0,95 \cdot 80\text{ N/mm}^2 = 76\text{ N/mm}^2$$

5. Vergleich (Festigkeitsnachweis):

$$\sigma_{\text{w, V}} = 75\text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{w zul}} = 76\text{ N/mm}^2.$$

5.4 Primjena zavarenih spojeva

5.4.1 Zavarljivost materijala

Zavarljivost opisuje svojstvo materijala da se postupkom zavarivanja mogu postići spojevi dijelova zahtijevane kvalitete.

Materijal je dobro zavarljiv ako se standardnom opremom i tehnologijom zavarivanja mogu postiću spojevi dijelova zahtijevane kvalitete.

Materijal je slabo zavarljiv ako se spojevi dijelova zahtijevane kvalitete postižu tek uz korištenje složene opreme i/ili tehnologije zavarivanja.

Veliki broj metala i umjetnih konstrukcijskih materijala je dobro zavarljiva, ako se izabere odgovarajuća tehnologija zavarivanja.

Najvažniji materijal u tehnologiji zavarivanja je čelik.

Na zavarljivost utječe:

- ⇒ kemijska svojstva materijala (*sastav materijala*)
- ⇒ mehanička svojstva materijala
- ⇒ geometrija dijelova

Materijali na bazi željeza

Zavarljivost čelika ovisna je o njegovom kemijskom sastavu – udjelima osnovnih pratećih elemenata (*C, Si, Mn, P, S*) i legirajućih dodataka (*Cr, Ni, Mo, V, W, Ta, Nb, Al, Ti, Cu, Co*), te o čistoći (*razne primjese i O₂, N₂, H₂*). Pored toga na zavarljivost velik utjecaj ima i geometrija zavarivanih dijelova o kojoj ovise brzina hlađenja zavara.

Najbolju zavarljivost imaju nelegirani i niskolegirani konstrukcijski čelici sa sadržajem C do 0,23 %. Sadržaji S i P ne smije prelaziti pojedinačno 0,045% ili ukupno 0,07 %. Legirajući elementi, prije svega Si i Mn, smanjuju zavarljivost. Nelegirani i niskolegirani čelici se upotrebljavaju u izgradnji konstrukcija (*mostovi, stupovi dalekovoda*) te izradi strojeva (*vozila, kotlovi*).

Visokolegirani čelici s ukupnim sadržajem legirajućih elemenata preko 10 % zavaruju se samo uz specijalne tehnologije zavarivanja.

Spajanje zavarivanjem se uobičajeno provodi s čelicima:

- ⇒ konstrukcijski: dobro su zavarljivi Č0260, Č0360, Č0460 i Č0560 (*HRN*),
- ⇒ za poboljšanje: dobro su zavarljivi postupcima s taljenjem Č1330, Č4730, Č3139, te 28Cr4 (*DIN*); potrebno predgrijavanje i naknadna obrada.
- ⇒ čelici za cementaciju su svi dobro zavarljivi, ali u necementiranom stanju.

Čelični ljevovi ima dobru zavarljivost (*kao srodni čelici*). Potrebno imati na umu grublju i krhku strukturu, te velike debljine dijelova (*brzine hlađenja*). Dobro zavarljivi čelični ljevovi ČL0300 i ČL0400.

Sivi ljevovi su krhki te ne podnose unutarnja naprezanja. Zbog visokog postotka C u zona pod utjecajem topline je sklona povećanju tvrdoće. Moguće je hladno zavarivanje. Kod toplog zavarivanja potrebno je dijelove predgrijati na 600...650 °C i postupno hladiti nakon zavarivanja.

Nodularni ljevovi i temper ljevovi bolje se zavaruju od sivih ljevova zbog njihove veće duktilnosti i žilavosti. Postupak zavarivanja je sličan kao postupak kod sivog ljevova.

Laki metali

Aluminij (*Al*) i legure te magnezijeve (*Mg*) legure su slabije zavarljivosti od čelika, jer se brzo hlade i oksidiraju.

Titanove (*Ti*) legure dobro su zavarljive, a Ti u dodatnom materijalu poboljšava svojstva zavara.

Teški i obojeni metali

Bakar (*Cu*), mjedi (*CuZn legure*) i bronce (*CuSn legure*) su dobro zavarljivi. Mjedi imaju bolju zavarljivost pri manjem sadržaju Zn.

Nikal (*Ni*) i njegove legure (*NiFe*, *NiMn*, *NiCr*, *NiCu*, *NiMoCr*) su zavarljivi pod određenim uvjetima.

Plastične mase

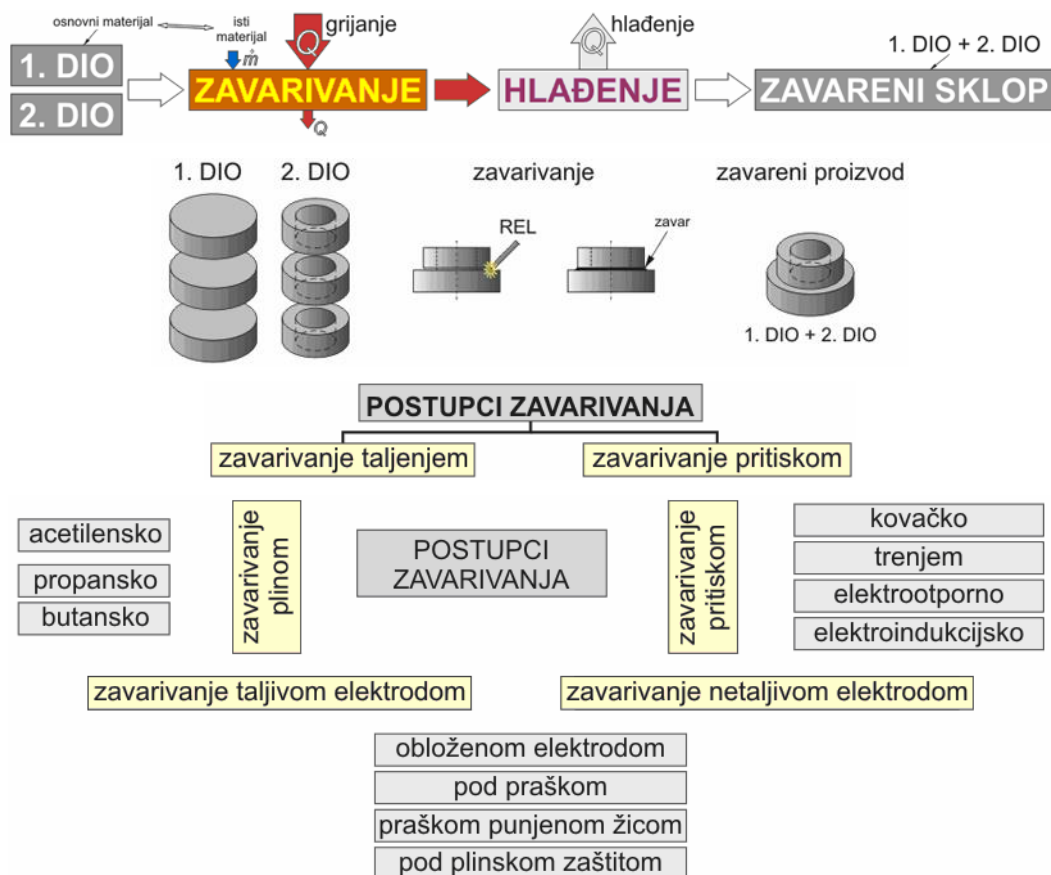
Duroplasti se nakon formiranja ne mogu toplinski preoblikovati i te su nezavarljivi.

Termoplasti se pri dovođenju topline (*povećanje temperature*) smekšaju i potom tale te su dobro zavarljivi.

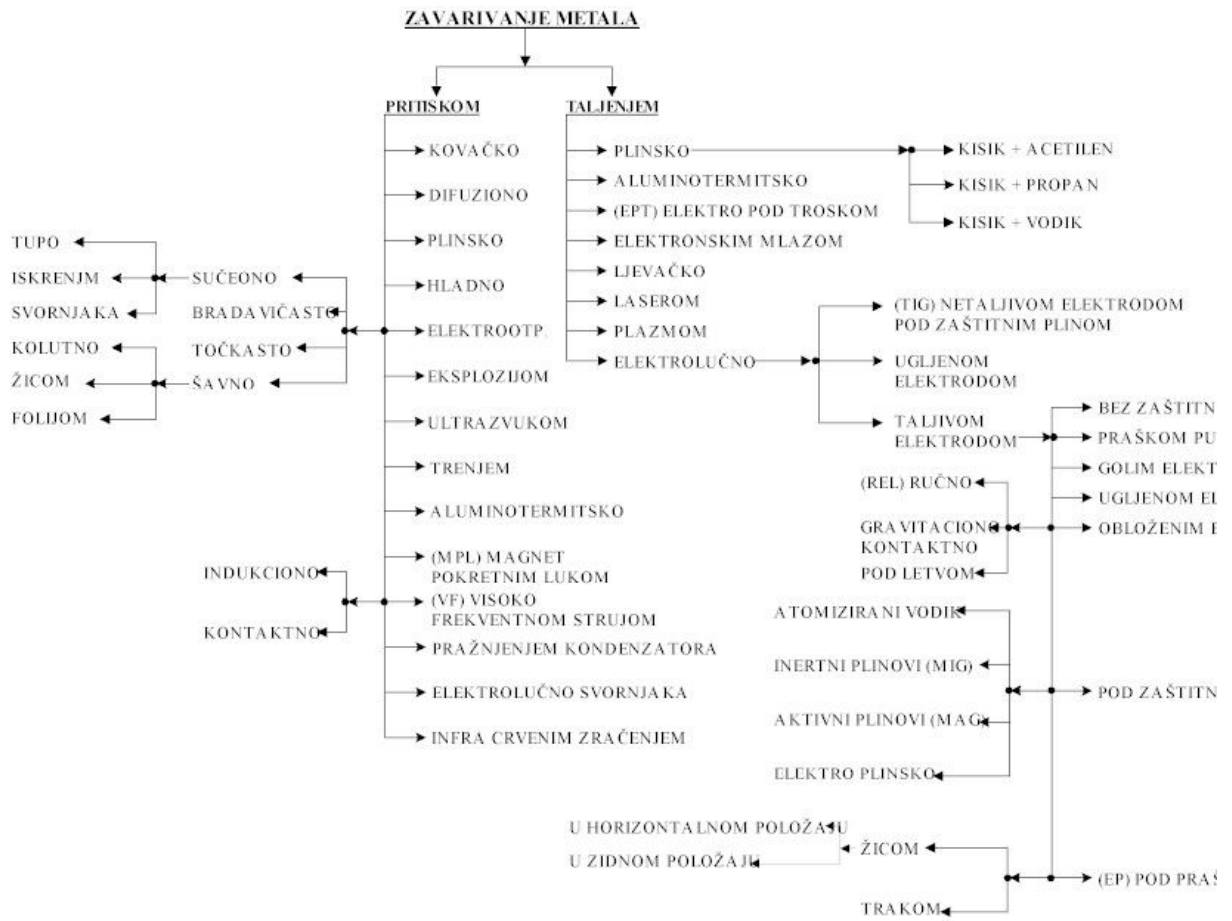
5.4.2 Tehnologija zavarivanja

Haberhauer [2011, 80. str.]

Zavareni spoj mora biti homogen, sa zahtijevanim svojstvima, bez grešaka. Svojstva zavarenog spoja ovise o osnovnom i/ili dodatnom materijalu i postupku zavarivanja.



Podjela zavarivanja po Samardžicu [<http://www.sfsb.hr/kth/zavar/>]



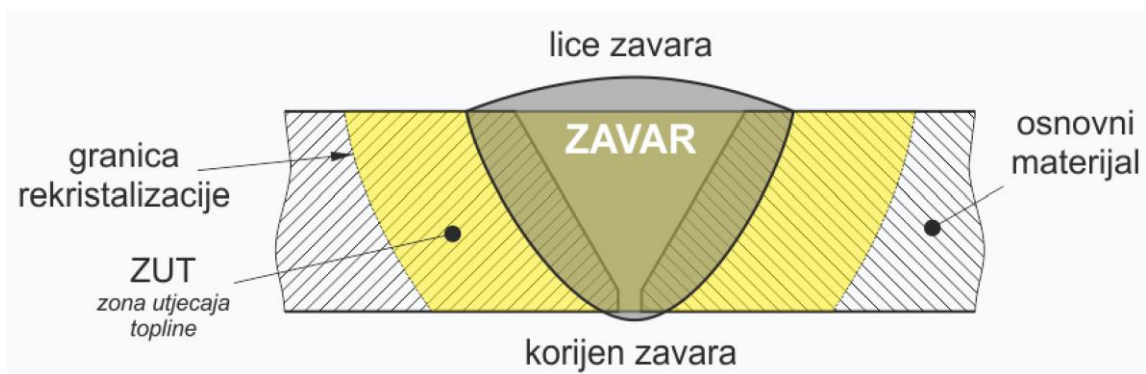
Oznaka postupka	Postupak zavarivanja
0	zavarivanje taljenjem
1	zavarivanje električnim lukom
11	zavarivanje električnim lukom bez plinovite zaštite
111	elektrolučno zavarivanje s obloženom elektrodom
112	elektrolučno zavarivanje s gravitacijskim uređajem
113	elektrolučno zavarivanje s golom žicom
114	elektrolučno zavarivanje s praškom punjenom žicom
115	elektrolučno zavarivanje s obloženom žicom
12	zavarivanje s praškom prekrivenim električnim lukom tj. EPP postupak
121	zavarivanje EPP postupkom s taljivom žicom
122	zavarivanje EPP postupkom s taljivom trakom
13	elektrolučno zavarivanje s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi
131	elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi inertnog plina tj. MIG
135	elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina tj. MAG
136	elektrolučno zavarivanje s praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
137	elektrolučno zavarivanje s praškom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
14	elektrolučno zavarivanje s netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi
141	elektrolučno zavarivanje s volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina tj. TIG
15	zavarivanje plazmatskim lukom
18	ostali postupci zavarivanja električnim lukom
2	elektrootporno zavarivanje
21	elektrootporno točkasto zavarivanje
22	elektrootporno šavno zavarivanje
24	zavarivanje iskrenjem
25	elektrootporno zavarivanje sučeljnih spojeva
29	ostali postupci elektrootpornog zavarivanja
3	zavarivanje plinskim plamenom
31	zavarivanje plamenom mješavine kisika i plina
311	zavarivanje plamenom mješavine kisika i acetilena
312	zavarivanje plamenom mješavine kisika i propana
313	zavarivanje plamenom mješavine kisika i vodika
32	zavarivanje plamenom mješavine zraka i plina
4	zavarivanje pritiskom
41	zavarivanje ultrazvučnim vibriranjem
42	zavarivanje trenjem
43	kovačko zavarivanje
44	zavarivanje snažnim mehaničkim djelovanjem
441	eksplozijsko zavarivanje
45	difuzijsko zavarivanje
7	ostali postupci zavarivanja
71	aluminotermijsko zavarivanje
72	zavarivanje pod elektroprovodljivom troskom
73	elektroplinsko zavarivanje
74	elektroindukcijsko zavarivanje
75	zavarivanje svjetlosnim zrakama
751	zavarivanje laserskim snopom
76	zavarivanje elektronskim snopom
9	lemljenje
91	tvrdi lemljenje
94	meko lemljenje



Abb. 2.2. Schweißverfahren (nach DIN 1910)

Zavarivanje toplinskom energijom

5. materijali spajanih dijelova u zoni zavarivanja se zagrijevaju (*električna energija, termička energija produkata izgaranja*) na temperaturu višu od tališta
6. formirane taline materijala dijelova (*uključivo talinu dodatnog materijala*) stapaju se pri hlađenju te skrućuju u jedinstvenu cjelinu



ZUT (*zona utjecaja topline*) – područje u kojem je tijekom zavarivanja, uslijed djelovanja visokih temperatura, došlo do promjena građe materijala.

Uvjet zavarljivosti – spajani dijelovi iz istog ili srodnog materijal (*uključivo dodatni materijal*).

Zavarivanje s mehaničkom energijom

U zoni zavarivanja materijal pod djelovanjem velikih pritisaka podliježe velikim plastičnim deformacijama.

Kod toplog zavarivanja, materijali o zoni dodirnih površina dijelova, prije ili tijekom djelovanja pritiska, na različite načine se zagrijavaju do tijestastog stanja, čime se pospješuje proces difuzije atoma kroz granicu faza.

Pri hladnom zavarivanju (*spajani dijelovi na sobnoj temperaturi, bez dovođenja topline*) za formiranje zavarenog spoja potrebni su veći pritisci.

Zavarivanje se provodi bez dodatnog materijala – zavar je dio materijala koji je omekšao i pri tome rekristalizirao.

5.4.3 Korištenje i odlaganje zavarenih spojeva

Haberhauer [2011, 81. ÷ 83. str.]

5.4.4 Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • široka primjena za različite proizvode od različitih materijala • nosivost zavarenog spoja može biti približno jednaka nosivosti osnovnog materijala • manje mase proizvoda od lijevanih zbog boljeg korištenja materijala • manje mase spojeva od zakovičnih (<i>preklopi, zakovice</i>) • za manji i srednji broj proizvoda zavareni spojevi su najekonomičniji (<i>bez modela</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • kvaliteta ovisi o materijalu (<i>zavarljivost</i>), postupku zavarivanja i pažnji zavarivača • mogu se spajati dijelovi koji imaju jednaku ili približnu kvalitetu i koji su dobro zavarljivi • zbog lokalnog zagrijavanja te neravnomjernog rastezanja i skupljanja prilikom hlađenja, pojavljuju se zaostala napreznja (<i>zajedničko djelovanje s pogonskim napreznjima</i>). To se uvelike može otkloniti pogodnim smjerom i redoslijedom zavarivanja te naknadnim žarenjem (<i>čelik na 500...700 °C</i>) • mjesto zavarivanja potrebno je pripremiti, oblikovati i očistiti • zavareni spojevi su skloni koroziji • zbog visoke cijene nisu isplativi za velikoserijsku proizvodnju

5.5 Zalemljeni spojevi

Zalemljeni spojevi – često korišteni nerastavljivi spojevi (*strojarstvo, elektrotehnika*) manje opterećenih (*mehanički, toplinski*) strojnih elemenata.

Nosivost zalemljenih spojeva temelji na međuatomskim/međumolekulskim privlačnim (*odbojnim*) silama u zalemljenom (*nehomogena cjelina*) koji se može razdvojiti jedino razaranjem.

Lemljenje je spajanje metalnih materijala (*osnovnih*) pomoću rastaljenog dodatnog materijala (*lem*) kojemu je talište barem 50 °C niže od tališta osnovnog materijala.

Područje taljenje lema podrazumijeva:

- od početka taljenja (*temperatura solidusa*)
- do potpuno rastaljenog stanja (*temperatura liquidusa*)

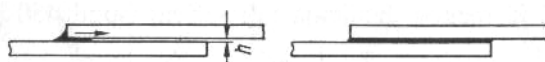
5.5.1 Osnove zalemljenih spojeva

Razlikuje se:

- **meko lemljenje** – lem se tali ispod 450 °C
- **tvrd lemljenje** – lem se tali iznad 450 °C

Mjesta lemljenja, prema obliku:

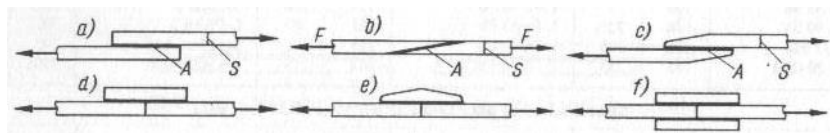
1. **Lemljenje sa zračnošću** (rasporom) – površine koje se spajaju imaju međusobno malu zračnost, najčešće do $h = 0,25$ mm. Lem se kapilarnim djelovanjem usisava u tu zračnost.



2. **Lemljenje sa šavom** – površine koje se spajaju imaju zračnost **veću od 0,25 mm ili šav** u obliku X ili Y. U drugom slučaju nastaju šavovi kao kod zavarivanja, pa se tako govori o zavarivačkom lemljenju.

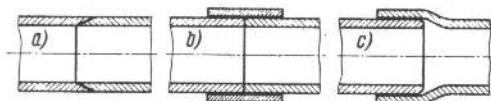
Primjeri zalemljenih spojeva

Spajanje limova lemljenjem



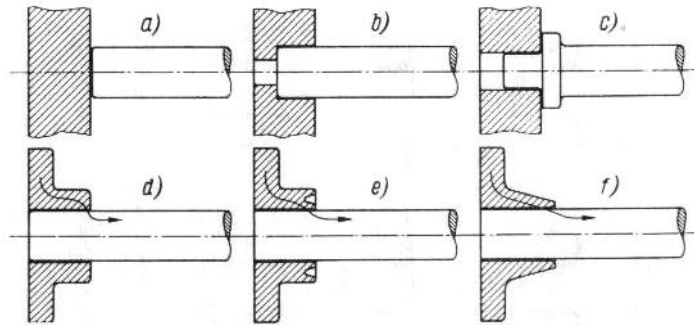
- (e) Prijeklop
- (f) Kosi prijeklop
- (g) Zakošen prijeklopni spoj
- (h) Spoj s vezicom
- (i) Spoj sa zašiljenom vezicom
- (j) Spoj s dvije vezice

Spajanje cijevi lemljenjem



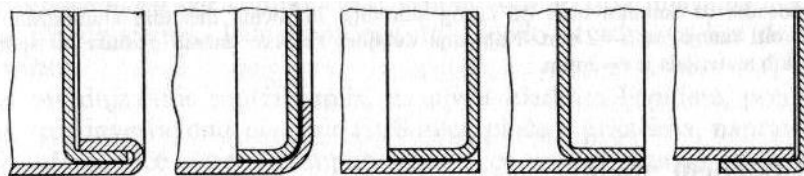
- (a) Čeoni spoj – tvrdo lemljeno, stožasta površina povećava površinu lemljenja
- (b) Spajanje kolčakom – meko lemljeno
- (c) Proširenje na jednom kraju

Spajanje okruglih šipki lemljenjem



- (a) Čeono lemljenje – ne preporuča se
- (b) Lemljen obod šipke
- (c) Lemljen obod rukavca
- (d) Lemljenje u krutu glavinu
- (e) Lemljenje u elastične glavine
- (f) Lemljenje u elastične glavine

Spajanje spremnika lemljenjem



Pravila za lemljenja ista kao i kod limova. Na slikama su prikazana spojena dna posuda.

5.5.2 Materijali za lemljenje

MATERIJALI ZA LEMILA

Za meko lemljenje teških kovina (željezni, bakreni i materijali na bazi nikla) – olovno-kositreni lemovi (*Pb-Sn-lemovi*) ili kositar-olovni lemovi (*Sn-Pb-lemovi*)

Za meko lemljenje lakih kovina (aluminij i aluminijske slitine) – lemovi od kositra (*Sn*), cinka (*Zn*) i kadmija (*Cd*).

Za tvrdo lemljenje teških kovina – srebrni lemovi (*Ag*), bakreni lemovi (*Cu*), mjedeni lemovi (*Ms*)

Za tvrdo lemljenje lakih kovina – aluminij-silicijski lemovi (*Al-Si* i *Al-Si-Sn*).

5.5.3 Oblikovanje zalemljenih spojeva

5.5.4 Usvajanje zalemljenih spojeva

Proračun čvrstoće zalemljenih spojeva

Mjesto spoja mora imati jednaku čvrstoću kao i dijelovi koji se spajaju.

Lemljeni spojevi opterećeni su na smicanje.



$$S \cdot R_m = A \cdot \tau_{sL}$$

gdje je: S – presjek sastavnih dijelova u spoju izložen vlačnom naprezanju, mm^2

R_m – vlačna čvrstoća materijala dijelova u spoju, N/mm^2

A – površine spojene lemom izložene smičnom naprezanju, mm^2

τ_{sL} – smična čvrstoća samog lemljenog spoja, N/mm^2

Vrsta lemljenog spoja		$R_m, \text{N/mm}^2$		$\tau_{sL}, \text{N/mm}^2$	
		$h^* \geq 0,25$	$h = 0,1$	$h \geq 0,25$	$h = 0,1$
Meki lem		20	30	15	20
Tvrđi lem	300	400	150	280	
	250	350	150	250	
	aluminij	Čvrstoća ista kao dijelova koji se spajaju			

* Međuvrijednosti treba procijeniti

Kod dinamičkih opterećenja, lemljeni spojevi izdrže 80% moguće opteretivosti dijelova u spoju, dok kod zračnosti od $h = 0,2$ mm samo 60 %.

Meko lemljenim spojevima dinamička izdržljivost vrlo brzo pada, pa dinamičko naprezanje ne smije biti veće od 2...3 N/mm^2 .

5.5.5 Primjena zalemljenih spojeva

Tehnologija lemljenja

Lemljeni se spoj ostvaruje kvašenjem površine lemljenih dijelova rastaljenim lemom, difuzijom lema u površinske slojeve spajanih dijelova te kristalizacijom lema i mehaničkim sidrenjem.

1. Uvjet – da bi rastaljeni lem kvasio čvrste metalne dijelove, potrebna je toplina za taljenje lema s time da je kvašenje to bolje što je temperatura viša.
2. Uvjet – površinske veze metala moraju biti slobodne tj. da na njima nema oksida, prevlaka, nečistoća i sl. Zbog toga se spojne površine čiste mehanički i kemijski prije lemljenja te kemijski za vrijeme lemljenja pomoću talila, koje otapa površinske nečistoće. Ako se lemi na zraku, talilo reducira oksidni sloj i štiti površinu od oksidacije.

Talila

- (k) meko lemljenje – cinkov klorid i amino spojevi s dodatkom fluorida i klorida (Al)
- (l) tvrdo lemljenje – različiti fluoridi, kloridi i spojevi bora

Postupci lemljenja

Lemljenje ručnim lemilom

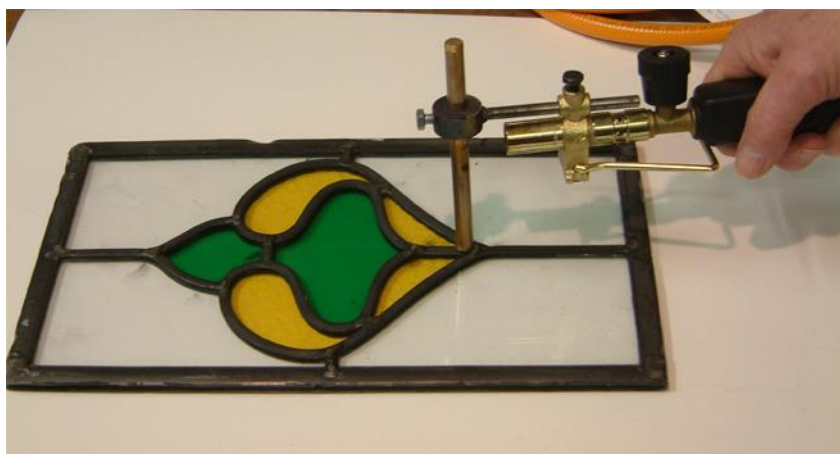
Koristi se samo za meko lemljenje. Lem se tali u dodiru s vrućim šiljkom, koji se može zagrijavati električnom strujom ili plinskim plamenom. Lemovi su u obliku šipke, često s talilom u posebnom kanalu.

Primjena: pojedinačni spojevi u elektrotehnici i limarskim radionicama.



Plinsko lemljenje

Temelji se na zagrijavanju i taljenju lema plamenom gorivih plinova (acetilen, propan, butan, prirodni plin i sl.). Plinsko se taljenje može i automatizirati tako da se između dijelova koji se spajaju unaprijed stavi talilo i lem, pa se tako pripremljen spoj pomoću pokretne trake vodi pored plamenika koji ga zagrijava na temperaturu lemljenja.



Lemljenje u peći sa zaštitnom atmosferom

U peći se osigurava ravnomjerno zagrijavanje metala, što omogućava lemljenje bez deformacija te lemljenje složenih predmeta s mnogo spojeva. Zaštitnu atmosferu čine inertni plinovi, a upotrebljavaju se i vakuumske peći. Za masovnu proizvodnju koriste se peći u kojima se nalazi pokretna traka na kojima se nalaze predmeti sa već umetnutim lemom



Indukcijsko lemljenje

Dijelovi s umetnutim lemom izlažu se visokofrekventnom magnetnom polju, kojeg stvara zavojnica prilagođena obliku dijelova i hlađena vodom. Spojno se mjesto zagrije zbog pojave elektromagnetske indukcije i induciranog napona uzrokovanog vrtložnim strujama. Sami elementi nisu dijelovi strujnog kruga.

Elektrootporno lemljenje

Dijelovi koji se leme dijelovi su strujnog kruga. Elektrode su bakrene ili grafitne, a izvori energije su kao i kod elektrootpornog zavarivanja. Najčešće je to izmjenična struja velike jakosti i niskog napona.

Primjena: Za proizvodnju u malim serijama, ali se talilo rijetko koristi zbog izolatorskih svojstava.

Lemljenje uranjanjem

Lemljeni dijelovi se sklope (*postave na određene međusobne položaje*) i uranjaju u kupelj s rastaljenim lemom. Lem tada ulazi u slobodne prostore između dijelova.

U drugom postupku se sklopovi s umetnutim lemom uranjaju u rastaljenu solnu kupelj (*talilo i izvor energije*).

Ovi se postupci primjenjuju za lemljenje dijelova hladnjaka motornih vozila, kolektora elektromotora i štampanih krugova (*meko lemljenje*), te dijelova instalacija i cijevnih priključaka (*tvrdo lemljenje*).



Lemljenje elektromagnetskim zračenjem

Mjesto spajanja se zagrijava fokusiranjem infracrvenog zračenja. Zbog male specifične topline lemljenja (*energije po jedinici mase lema*) ovaj je postupak pogodan za lemljenje vrlo malih dijelova u serijskoj proizvodnji. Primjenjuje se za spajanje žica i limova u elektrotehnici i elektronici, te u preciznoj tehnici za lemljenje materijala osjetljivih na jako zagrijavanje.



Dodaci

Literatura

Zavareni i zalemljeni spojevi [Alfirević 1996, Androić 1994, Ashby 2009, Böge 2008, Böge 2011, Brown 2005, Brumbaugh 2007, Budynas 2008, Budynas 2011, Callister 2007, Carvill 2003, Decker 2006, Decker 87, DIN 2008, Fritz 2008, Grote 2007, Haberhauer 2009, Haberhauer 2011, Hall 1968, Hering 2004, Humpston 2004, Jelaska 2005, Kraut 1988, Künne1 2008, Lingaiah 2004, Messler 2004, Messler 2005, Messler 2006, Mott 2004, Muhs 2006, Muhs 2007, Niemann 2005, Oberg 2004, Oberg 2008, Pandžić 2008,

Podrug 2008, Pritchard 1997, Shigley 1996, Shigley 2004, SolidWorks DZ 2006, Spotts 1961, Steinhilper1 2008, Vitas1 1990, Wittel 2009]

5.5 Zalemljeni spojevi [Vitas1 1990]

- D** Avallone/1340÷1360 (ANSI/ASME norme – tablice, anglosaksonske jedinice),
- B** Böge20/144÷156 (skice, detaljan proračun s primjerima, DIN/ISO norme – nekoliko tablica),
- B** Brown/366÷384 (detaljan proračun s primjerima),
- A** Budynas/463-504, (skice, ANSI/ASTM norme – nekoliko tablica, SI jedinice, detaljan proračun s primjerima i zadacima – dio rješenja),
- C** Carvill/24÷26 (proračun),
- A** Childs/285÷287 (osnove, proračun, primjeri) 287÷289 (literatura, norme, WEB, oznake),
- A** Decker/12÷56 (norme, skice, tablice, oblikovanje, proračun),
- A** DIN/572÷636 (norme, skice, tablice),
- A** Fleicher (primjeri proračuna),
- B** GroteDubbel/443÷455 (osnove, skice, konstrukcijska rješenja, proračun), 576÷577 (tablice), 590÷591 (literatura),
- AA** Haberhauer15/182÷227, **AA** Haberhauer16/171 ÷216, 640÷641 (literatura),
- A** Hering/380÷389 (kratko: skice, tablice, proračun),
- C** Hicks/428÷432 (primjer proračuna),
- AA** Jelaska/73÷87
- B** Klebanov/277÷319 (zanimljivi detalji),
- B** Kraut/263÷276 (navoji, norme – skice i tablice), 286÷287 (vijci i matice, norme – skice i tablice)
- AA** Künne/282÷344,
- B** Kutz/818÷819 (zanimljivost – elektronska oprema),
- AA** Lingaiah/510÷585 (oznake, formule, norme – skice, tablice),
- AA** Messler/45÷106 (vijčani spojevi, osnove, prednosti i nedostaci, pitanja), 118÷134 + 173÷176 (navoji, vijci i matice, pitanja),
- AA** Mott/727÷744 (osnove, WEB, pitanja),
- AA** Muhs/Aufgabesammlung/44÷55 (zadaci), 185÷194 (postavke rješenja), 272÷280 (rješenja),
- AA** Muhs/Formelsammlung/77÷105 (oznake, formule, tijek proračuna, popis DIN EN ISO normi),
- AA** Niemann/410÷487,
- AA** Norton/832÷897,
- A** Podrug/21-29 (sazete osnove i formule),
- AA** Shigley3/671÷748, Shigley2/21.1÷21.38, 23.1÷23.39
- A** Smith/309÷318 (zanimljivo – proizvođači)
- A** Smith-Maintenance/211,216,234, 240÷244 (zanimljivo – problemi, montaža)
- A** Spotts/101÷115 (osnove, primjeri, problemi, zadaci – dio s rezultatom)
- AA** Steinhilper/274÷387,
- A** Timings-Pocket/123÷287 (skice/tablice),
- A** Timings-Workshop/87÷179 (skice/tablice),
- AA** Vitas1/66÷154,
- AA** Wittel/236÷292,

Dodatak
Literatura

Oznake

Carvill2003/299÷300, Haberhauer2011/637, Shigley1996/A.2,

A	–	površina, mm^2
D/d	–	vanjski/unutarnji promjer, mm
F	–	sila, N
m	–	masa, kg
$L/B/H$	–	duljina/širina/visina, mm
p	–	tlak, N/mm^2
t	–	vrijeme, s
T	–	apsolutna temperatura, K
V	–	volumen, m^3
v	–	brzina, m/s
W	–	rad, J
ϑ	–	temperatura, $^{\circ}\text{C}$
η	–	koeficijent gubitaka energije, 1 ; dinamička viskoznost, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ	–	gustoća, kg/dm^3 ; električna otpornost, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$

Podloge

[Haberhauer (2011), str. 75 ÷ 78]

Tabelle 2.9. Zulässige Spannungen [in N/mm²] für Schweißnähte bei statischer Belastung (nach DIN 18800)

Nahtart	Nahtgüte	Spannungsart	Werkstoff und Lastfall			
			S 235 JRG 2		S 355 J2 G3	
			H	HZ	H	HZ
Stumpfnäht DHV-Naht (K-Naht) HV-Naht DHY-Naht (K-Stegnaht) ^b HY-Naht ^b Dreiblechnaht	alle Nahtgüten	Druck und Biegedruck $\sigma_{\perp d, zul}$	160	180	240	270
	Nahtgüte ^a nachgewiesen	Zug und Biegezug $\sigma_{\perp z, zul}$				
	Nahtgüte nicht nachgewiesen					
Kehlnähte Dreiblechnähte	alle Nahtgüten	Druck und Biegedruck $\sigma_{\perp d, zul}$	135	150	170	190
		Zug und Biegezug $\sigma_{\perp z, zul}$				
alle Nähte		Schub in Nahrichtung $\tau_{ , zul}$				
HY-Nähte Kehlnähte		Vergleichswert $\sigma_{V, zul}$				

^a Freiheit von Rissen, Binde- und Wurzelfehlern und Einschlüssen, ausgenommen vereinzelte und unbedeutende Schlackeneinschlüsse und Poren, ist mit Durchstrahlungs- oder Ultraschalluntersuchung nachzuweisen.

^b Wegen des vorhandenen Wurzelspaltes kommen für Zug und Biegezug nur die niedrigen Werte in Betracht.

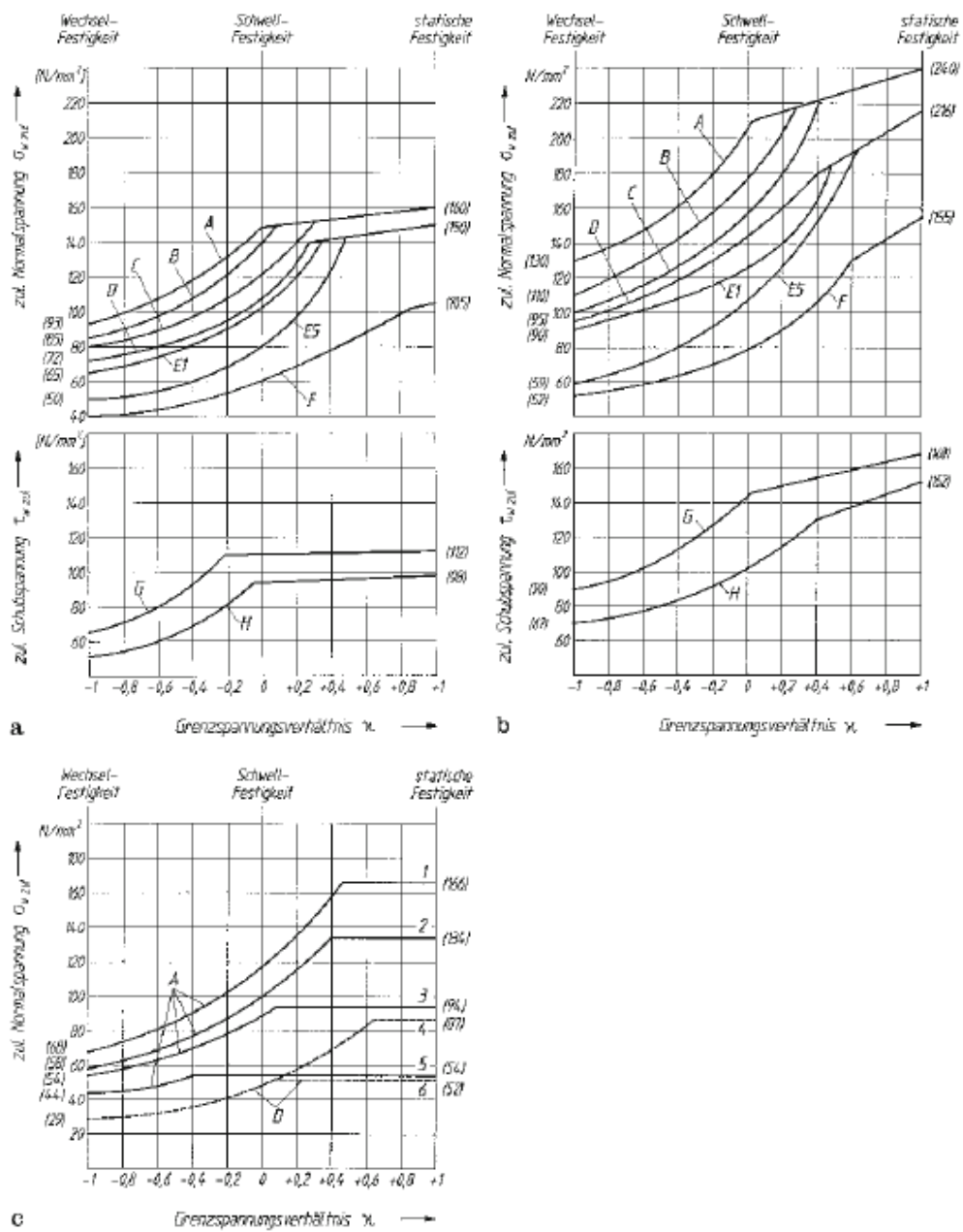


Abb. 2.11. Zulässige Spannungen für Schweißverbindungen im Maschinenbau nach DV 95201 für Werkstückdicken ≤ 10 mm (Erläuterungen der Spannungslinien A bis H siehe Abb 2.10)
 a) für Bauteile aus S 235 JRG 2 (St 37-2);
 b) für Bauteile aus S 355 J2 G3 (St 52-3);
 c) für Bauteile aus AlMgSi 1 und AlMg 3.

Razno

Provjera znanja

Kod prezentacija i računskih zadataka ocjenjuje se: zanimljivost, sadržaj, obim, razina i estetika.

Prezentacija

- *Svaki student u grupi priprema prezentaciju uz korištenje programa: PowerPoint, CorelDraw i Photoshop;*

Izračunavanja

- *Računske zadatke rade timovi od po 3 studenta (2 ili 4);*
- *Tekst se piše u Word-u s formulama pisanim uz korištenje MathType-a;*
- *Crteži se izrađuju u CorelDraw i/ili AutoCAD-u i/ili SolidWorks-u;*
- *Zadacima se prilažu MATLAB semi-programi (format *.m);*

5. Zadatak – **05 Zavareni spojevi:** (60 bodova)

- (a) Izraditi prezentaciju odabrane teme iz zavarenih ili zalemljenih spojeva (20 bodova);
- (b) Usvojiti zavareni spoj (20 bodova);
- (c) Usvojiti zalemljeni spoj (20 bodova).

5. Zadatak – (a) Prezentacija (20 bodova)

Izraditi prezentaciju odabrane teme iz zavarenih ili zalemljenih spojeva.

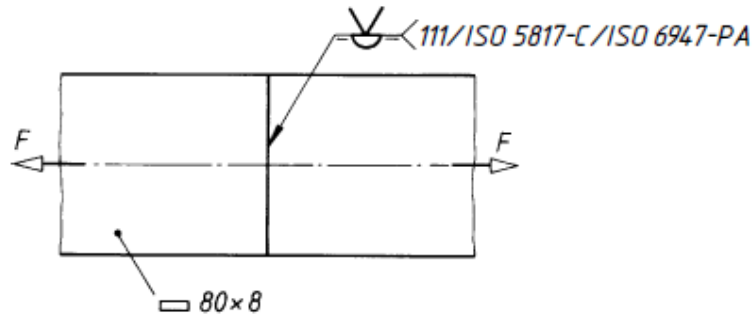
Napomena: Naslov teme može biti jednak ili uži od sljedećih naslova tema:

Teme

1. Osnova zavarenih spojeva
2. Nazivlje zavarenih spojeva
3. Struktura zavarenog spoja
4. Fizički temelji zavarenog spoja
5. Vrste zavara i zavarenih spojeva
6. Ispravno oblikovanje zavarenih spojeva
7. Pogreške u oblikovanju zavarenih spojeva
8. Primjeri oblikovanja zavarenih spojeva
9. Norme zavarenih spojeva
10. Proračun zavarenih spojeva
11. Primjeri usvajanja zavarenih spojeva
12. Zavarljivost materijala
13. Tehnologija zavarivanja
14. Korištenje i odlaganje zavarenih spojeva
15. Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva
16. Osnove zalemljenih spojeva
17. Materijali za lemljenje
18. Oblikovanje zalemljenih spojeva
19. Usvajanje zalemljenih spojeva
20. Primjena zalemljenih spojeva

5. Zadatak – (b) Zavareni spoj (20 bodova)

Zadatak **Z-05.01** Traka od čelika S35 sa sučelnim zavarom treba podnijeti vlačno opterećenje od $F = 125$ kN. [Wittel (2007), str. 19/155/233]



Pri zavarivanju su korištenjem dodatnih pločica izbjegnuti krateri na krajevima zavarrenog spoja.

Kvaliteta zavara nije poznata.

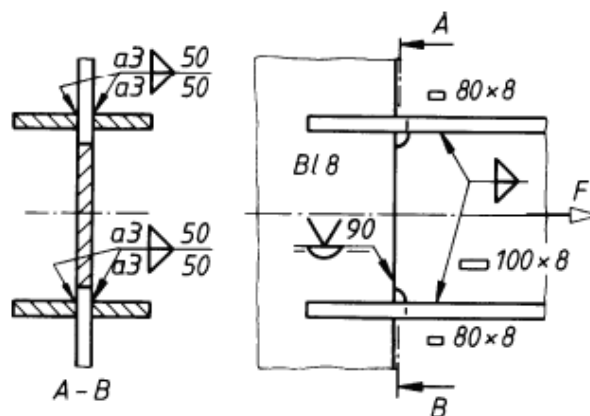
Odrediti:

Provjeriti jesu li dimenzije dobro određene?

Rješenje:

Dimenzije su dobro određene.

Zadatak **Z-05.02** U profil U80 od čelika S35 spojen je kutnim zavarima na čeličnu ploču. [Wittel (2007), str. 20/156/234]



Štap i zavareni spoj su opterećeni silom od $F = 90$ kN.

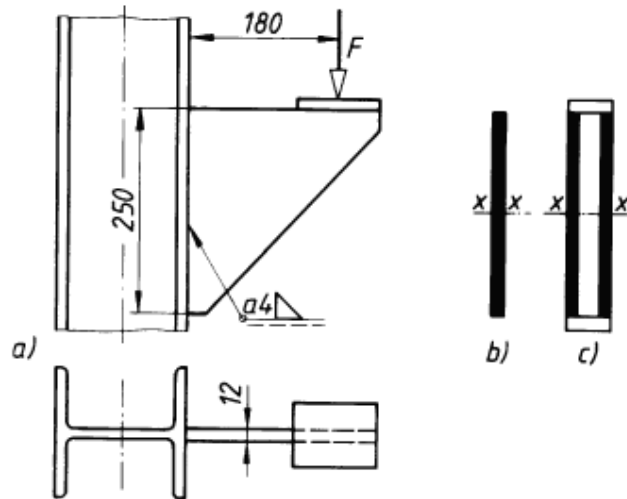
Odrediti:

Provjeriti jesu li dimenzije U profila i zavarrenog spoja dobro određene.

Rješenje:

Dimenzije su dobro određene.

Zadatak **Z-05.03** Za prihvat spremnika, za vertikalni nosač zavaren je konzolni lim debljine 12 mm od čelika S235JR. [Wittel (2007), str. 23/158/237]



Cijelom dužinom spoja izveden je zavar debljine $a = 4$ mm.

Konzola je opterećena silom od $F = 68$ kN.

Odrediti:

Provjeriti čvrstoću:

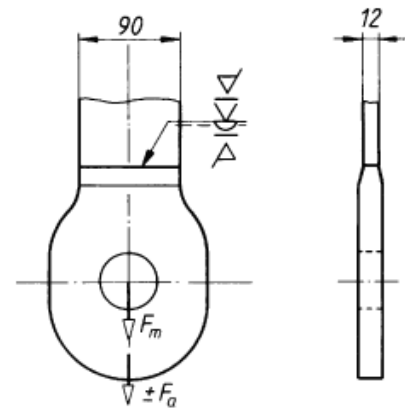
- (a) konzole u presjeku pored zavara – skica (b) i
- (b) zavarenog šava – skica (c).

Rješenje:

- (a) Maksimalno naprezanje: $\sigma = 98 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{doz}} = 218 \text{ N/mm}^2$, srednje smično naprezanje: $\tau = 23 \text{ N/mm}^2 < \tau_{\text{doz}} = 126 \text{ N/mm}^2$; Provjera ekvivalentnog naprezanja nije potrebna jer je $\tau/\tau_{\text{doz}} = 0,18 < 0,5$.
- (b) Ekvivalentno naprezanje zavarenog šava $\sigma = 151 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{doz}} = 207 \text{ N/mm}^2$.

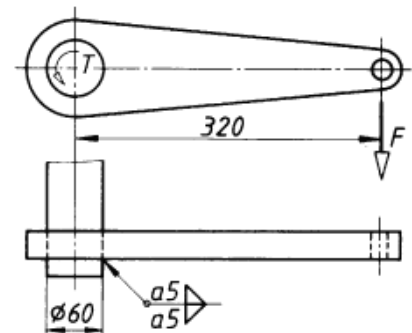
Wittel (2007), str. 25/159/240.

Ein geschmiedetes Stangenauge ($t = 18 \text{ mm}$) soll nach Skizze mit einer Zugstange $\square 90 \times 12 \text{ mm}$, beide aus S355J2, durch eine auf der ganzen Länge vollwertig ausgeführten Stumpfnah verbunden werden. Der Stab wird durch eine ruhend wirkende Mittellast $F_m = +80 \text{ kN}$ und durch eine mit mittelstarken Stößen ($K_A \approx 1,4$) auftretende Wechselbelastung $F_a = \pm 50 \text{ kN}$ in Längsrichtung belastet. Es ist zu prüfen, ob die Stumpfnah dauerhaft ist, wenn sie kerbfrei bearbeitet und zu 100 % durchstrahlt wird.



Wittel (2007), str. 26/160/241.

Ein Hebel soll mit einer 5 mm dicken Doppelkehlnah auf eine Welle $\varnothing 60 \text{ mm}$ geschweißt werden. Die Umfangskraft am Hebel tritt wechselnd zwischen $F = +6,3 \text{ kN}$ und $F = -2,0 \text{ kN}$ mit starken Stößen ($K_A = 1,6$) auf. Für den Bauteilwerkstoff S235JR ist zu prüfen, ob die Rundnaht dauerhaft ist.

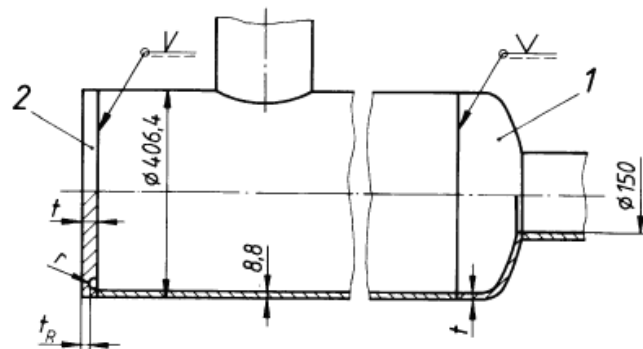


Wittel (2007), str. 28/160/244.

Für den Sammler einer Heißwasseranlage sind die Böden auszulegen. Der zulässige Betriebsdruck beträgt 25 bar und die zulässige Betriebstemperatur $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Als Werkstoff ist S235JR+N mit Abnahmeprüfzeugnis 3.1 vorgesehen.

Zu berechnen sind:

- die erforderliche Wanddicke des einteiligen Klöpperbodens (1) mit Stützen, wenn nach der Bodennorm das untere Abmaß der Wanddicke $-0,3 \text{ mm}$ beträgt,
- die erforderliche Wanddicke des ebenen Bodens mit Entlastungsnut (2), wenn bei Wanddicken über 25 mm der Zuschlag c_1 entfällt, sonst $c_1 = 0,8 \text{ mm}$,
- für die Entlastungsnut der Platte (2) den Nutenhalbmesser r und die Restwanddicke t_R .



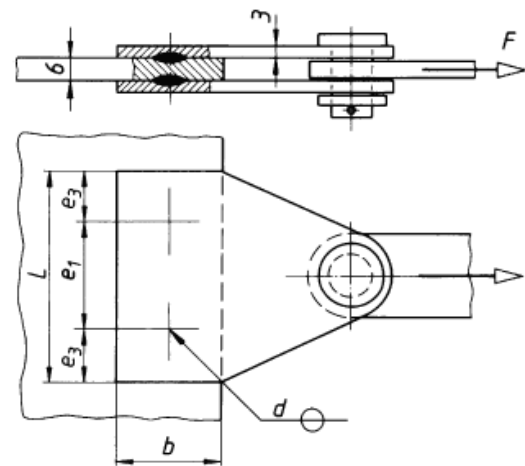
Wittel (2007), str. 30/161/245.

Die Punktschweißverbindung eines Gabelkopfes aus S235JR soll für eine vorwiegend ruhend auftretende Betriebslast $F = 30 \text{ kN}$ ausgelegt werden.

Zu bestimmen sind:

- die Anzahl der Schweißpunkte,
- die Anordnung der Schweißpunkte (Abstände).

Hinweis: Die Anzahl der eingezeichneten Schweißpunkte braucht nicht mit der berechneten übereinzustimmen.

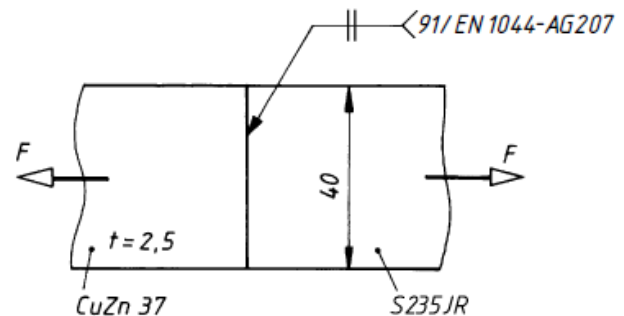


5. Zadatak – (b) Zalemljeni spoj (20 bodova)

Wittel (2007), str. 16/153/231.

Weil ein Überlappstoß konstruktiv nicht möglich ist, sollen 2,5 mm dicke Bauteile aus S235JR und CuZn37 stumpf gestoßen werden.

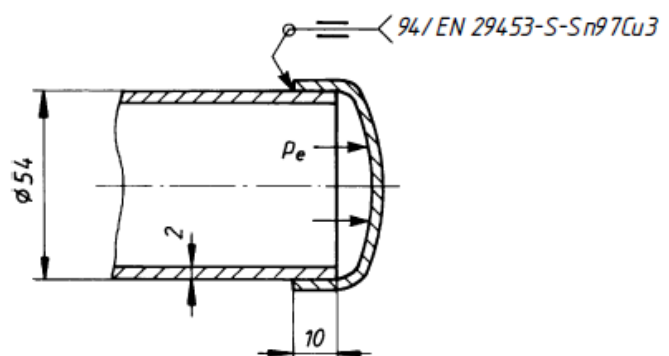
Welche ruhend wirkende Längskraft F kann übertragen werden, wenn eine 3-fache Sicherheit gegen Bruch der Lötnaht gefordert wird?



Wittel (2007), str. 16/153/231.

Eine Kaltwasserleitung aus Kupferrohr 54×2 wird nach Skizze mit einer weich aufgelöteten Kappe verschlossen.

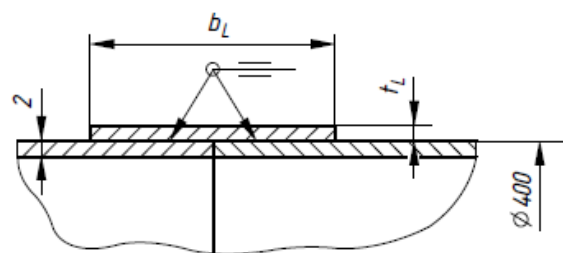
Es ist zu prüfen, ob die Spaltlötverbindung für einen höchsten Wasserdruck von 8 bar sicher ausgelegt ist.



Wittel (2007), str. 16/153/232.

Ein kleiner Druckbehälter aus Cu-DHP-R200 wird bei einem Außendurchmesser von 400 mm mit der erlaubten Mindestwanddicke von 2 mm ausgeführt. Der Behältermantel erhält eine Rundnaht mit weich aufgelöteter Lasche. Zu bestimmen sind:

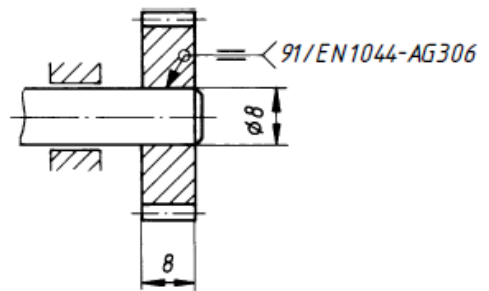
- Die Laschenbreite b_L und die Laschendicke t_L nach den Festlegungen der AD2000-Merkblätter,
- die beim zulässigen Betriebsüberdruck von 1,6 bar in der Lötnaht auftretende Scherspannung.



Wittel (2007), str. 17/154/232.

Auf die Welle eines Kleinmotors soll ein Ritzel nach Skizze hart aufgelötet werden. Die Verbindung hat ein bei mittleren Stößen ($K_A = 1,3$) auftretendes Drehmoment $T_{\text{nenn}} = 7 \text{ Nm}$ zu übertragen. Als Werkstoff für Ritzel und Welle ist E335 vorgesehen.

- Welche Bruchsicherheit weist die Lötnaht auf?
- Wie lang müsste die Lötnaht theoretisch ausgeführt werden, wenn sie etwa die gleiche Bruchtragfähigkeit wie die Welle haben soll?



Literatura

1. Alfircic I., Sikic Z., Budin I.: Inzinjerski prirucnik IP 1 – temelji inzenjerskih znanja; Skolska knjiga, 1996.
2. Androić B., Dujmović D., Džeba I.: Metalne konstrukcije 1 – Eurocode; Institut građevinarstva Hrvatske, 1994.
3. Ashby M. F., Messler R. W., Asthana R., Furlani E. P., Smallman R. E., Ngan A. H. W., Mills N.: Engineering Materials and Processes Desk Reference; Butterworth-Heinemann, 2009.
4. Böge A.: Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 20. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
5. Böge A.: Vieweg Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 18. Auflage; Vieweg, 2007.
6. Brown T. H. Jr.: Mark's Calculations For Machine Design; McGraw-Hill, 2005.
7. Brumbaugh J. E., Miller R.: Audel Welding Pocket Reference; Wiley, 2007.
8. Budynas R. G., Nisbett J. K.: Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th Edition; McGraw-Hill, 2011.
9. Budynas R. G., Nisbett K. J.: Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th Edition; McGraw-Hill, 2007.
10. Callister Jr. W. D.: Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition; John Wiley & Sons, New York, 2007.
11. Carvill J.: Mechanical Engineer's Data Handbook; Butterworth-Heinemann, 2003.
12. Decker K.-H.: Elementi strojeva, 2. izdanje; Tehnička knjiga, 1987.
13. Decker K.-H.: Elementi strojeva, 2. izdanje; Tehnička knjiga, 1987.
14. Decker K.-H.: Elementi strojeva, 3. izdanje; Golden marketing - Tehnička knjiga, 2006.
15. DIN – Deutsches Institut für Normung: Klein Einführung in die DIN-Normen, 14. Auflage; B.G.Teubner – Beuth, 2008.
16. Fritz A. H., Schulze G.: Fertigungstechnik; 8. Auflage; Springer, 2008.
17. Grote K.-H., Feldhusen J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage; Springer, 2007.
18. Haberhauer - Maschinenelemente – Gestaltung Berechnung Anwendung, 16. Auflage; Springer, 2011.
19. Haberhauer H., Bodenstein F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung, 15. Auflage; Springer, 2009.
20. Hall A. S., Holowenko A. R., Laughlin H. G.: Schaum's Outline of Theory and Problems of Machine Design; McGraw-Hill, 1968.
21. Hering E., Schröder B.: Springer Ingenieurtabellen; Springer, 2004.
22. Jelaska D.: Elementi strojeva – skripta za studente Industrijskog inženjerstva; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2005.
23. Kraut B.: Strojarski priručnik, 9. izdanje; Tehnička knjiga, 1988.
24. Künne B.: Köhler Rögnitz Maschinenteile Vol 1, 10. Auflage; Vieweg + Teubner, 2008.
25. Lingaiah K.: Machine Design Databook, 2nd Edition; McGraw-Hill, 2002.
26. Messler R. W.: Integral Mechanical Attachment – A Resurgence of the Oldest Method of Joining; Butterworth-Heinemann, 2006.
27. Messler R. W.: Joining of Materials and Structures From Pragmatic Process to Enabling Technology; Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
28. Messler R. W.: Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy; Wiley VCH, 2004.
29. Mott R. L.: Machine Elements in Mechanical Design, 4th Edition; Prentice Hall, 2003.
30. Muhs D., Wittel H., Jannasch D., Becker M., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Interaktive Formelsammlung auf CD-ROM, 8. Auflage; Vieweg, 2006.
31. Muhs D., Wittel H., Jannasch D., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Aufgabensammlung – Aufgaben, Lösungshinweise, Ergebnisse, 14. Auflage; Vieweg, 2007.

32. Niemann G., Winter H., Höhn B.-R.: Maschinenelemente – Band 1 – Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, 4. Auflage; Springer, 2005.
33. Oberg E., Jones F. D., Horton H. L., Ryffel H. H.: Machinery's Handbook 27th Edition; Industrial Press, 2004.
34. Oberg E., Jones F. D., Horton H. L., Ryffel H. H.: Machinery's Handbook 28th Edition; Industrial Press, 2008.
35. Pandžić J., Pasanović B.: Elementi strojeva – udžbenik s DVD-om za 2. razred tehničkih škola u području strojarstva i brodogradnje; Neodidacta, 2008.
36. Podrug S.: Elementi strojeva – predavanja za stručni i preddiplomski studij brodogradnje; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2008.
37. Pritchard D.: Soldering Brazing and Welding – A Manual of Techniques; Trafalgar Square, 1997.
38. Shigley J. E., Mischke C. R.: Standard handbook of machine design, 2nd Edition; McGraw-Hill Professional, 1996.
39. Shigley J. E., Mischke C. R.: Standard handbook of machine design, 3rd Edition; McGraw-Hill Professional, 2004.
40. SolidWorks – SolidWorks 2006 Training Manual – Sheet Metal and Weldments; SolidWorks Corporation, 2006.
41. Spotts M. F.: Design of Machine Elements; 3rd Edition; Prentice Hall, 1961.
42. Steinhilper W., Sauer B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 – Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen, 7. Auflage; Springer, 2008.
43. Vitas D. J., Trbojevic M. D.: Masinski elementi I, 10. izdanje; Naucna knjiga, 1990.
44. Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Lehrbuch und Tabellenbuch – Normung, Berechnung, Gestaltung, 19. Auflage; Vieweg + Teubner, 2009.