

UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

Ines Šrol

**VARJENJE IN ZNAČILNOSTI ZVARJENIH  
SPOJEV V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH**

Diplomsko delo

Maribor, avgust 2012





Univerza v Mariboru

*Fakulteta za gradbeništvo*

Diplomsko delo visokošolskega študijskega programa

**VARJENJE IN ZNAČILNOSTI ZVARJENIH SPOJEV V  
JEKLENIH KONSTRUKCIJAH**

Študent: Ines ŠROL  
Študijski program: visokošolski, Gradbeništvo  
Smer: Operativno - konstrukcijska

Mentor: red. prof. dr. Stojan KRAVANJA, univ.dipl. inž. grad.  
Somentor: doc. dr. Tomaž ŽULA, univ.dipl. inž. grad.  
Lektor(ica): Breda Žunič, prof. slov.

Maribor, avgust 2012



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo

Številka: 93616815  
Maribor, 05.07.2012

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 6/2012) izdajam

### SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Ines Šrol, študent(ka) visokošolskega strokovnega študijskega programa GRADBENIŠTVO, smer OPERATIVNO-KONSTRUKCIJSKA SMER, lahko izdela diplomsko delo pri predmetu Jeklene konstrukcije.

MENTOR(ICA): red. prof. dr. Stojan Kravanja

SOMENTOR(ICA): doc. dr. Tomaž Žula

Naslov diplomskega dela:

VARJENJE IN ZNAČILNOSTI ZVARJENIH SPOJEV V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

WELDING AND CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS IN STEEL STRUCTURES

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 05.07.2013 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.



DEKAN  
red. prof. dr. Miroslav Premrov

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv

### **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se mentorju, red. prof. dr. Stojanu Kravanji, in somentorju, doc. dr. Tomažu Žuli, ki sta mi s svojim znanjem in izkušnjami podajala napotke za opravljanje diplomskega dela.*

*Iskreno se zahvaljujem svojim domačim, ki so mi v času študija stali ob strani in me spodbujali.*

## **VARJENJE IN ZNAČILNOSTI ZVARJENIH SPOJEV V JEKLENIH KONSTRUKCIJAH**

**Ključne besede:** jeklene konstrukcije, varjenje, zvarjeni spoji, varivost, postopki spajanja z varjenjem

**UDK:** 624.014.2:621.791(043.2)

### **Povzetek**

*V diplomski nalogi je obravnavana problematika varjenja jeklenih konstrukcij v gradbeništvu. Skozi celotno delo predstavljamo obnašanje zvarjenih spojev, katerih kakovost je odvisna od kemijske sestave in kristalizacije jekel. Ker je v današnjem času razvitih že zelo veliko število različnih postopkov varjenja, smo se omejili na opis le tistih, ki so najpogosteje uporabljeni za spajanje jeklenih konstrukcij v gradbeništvu.*

*V drugem poglavju smo najprej predstavili zgodovino razvoja varjenja in znanstvenike, ki so s svojimi odkritji pomembno vplivali na razvoj varjenja. V nadaljevanju sledi kratek opis kemijske sestave in oblike kristalizacije železa in jekla, katerih poznavanje je zelo pomembno za uspešno izvedbo spajanja. V diplomskem delu smo opisali vrste stikov in zvarov, ki se jih v gradbeništvu največkrat poslužujemo, njihove oblike in simbole za označevanje, napake, ki lahko nastajajo med varjenjem in njihove kontrole ustreznosti. Podani so postopki ugotavljanja sposobnosti varivosti jekel in kriteriji, katere moramo upoštevati že pri načrtovanju zvarnega spoja.*

## **WELDING AND CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS IN STEEL STRUCTURES**

**Key words:** steel structures, welding, welded joints, weldability, joining by welding procedures

**UDK:** 624.014.2:621.791(043.2)

### **Abstract**

*This diploma thesis deals with the problem of welding of steel structures in buildings. Throughout the work we present the behavior of welded joints, which quality is depend aut on the chemical composition and crystallization of steel. Since a viariety of different welding processes is developed up today, we focus on the description of only those which are most commonly used for joining the steel structures in civil engineering.*

*The second chapter briefly presents the history of the development of welding and the scientists who significantly influenced the development of welding. Below is a brief description of the chemical composition and form of the crystallization of iron and steel, which knowledge is very important for successful implementation of the welding. The diploma thesis describes the types of connections and welds which are many times in use in the construction industry, their shapes and symbols for marking errors that may occur during welding, and their quality control. The assessment of weldability procedures are shown as well as criterias, which should be considered when designing the welded joint.*

## Kazalo vsebine

1	UVOD .....	1
2	ZGODOVINA VARJENJA .....	2
3	METALOGRAFIJA .....	4
3.1	Kristalna struktura kovin .....	4
3.2	Kristalizacija čistega železa .....	6
3.3	Kristalizacija jekla .....	8
4	VRSTE KONSTRUKCIJSKIH JEKEL V GRADBENIŠTVU .....	10
4.1	Pomen oznak jekel .....	11
5	VARJENJE .....	12
5.1	Splošno .....	12
5.2	Zvarni spoji .....	13
5.3	Posledice prisotnosti plinov v zvarjenih spojih .....	16
5.4	Vrste stikov in zvarov .....	17
5.4.1	Kotni zvari .....	18
5.4.2	Kotni zvari v odprtinah (očesni zvari) .....	20
5.4.3	Čelni zvari .....	20
5.4.4	Čepasti zvari .....	21
5.4.5	Zvari ob zaobljenih robovih .....	22
5.5	Oblike zvarov in njihovi simboli označevanja .....	23
5.6	Napake v varjenih spojih .....	26
5.7	Kontrola ustreznosti zvarnega spoja .....	28
5.7.1	Neporušne preiskave .....	29
5.7.2	Porušne preiskave .....	33
6	VARIVOST MATERIALA .....	40
6.1	Splošno .....	40
6.2	Varivost jekla .....	42
7	NAČINI VARJENJA IN VARILNI POSTOPKI .....	44
7.1	Splošno .....	44
7.2	Elektro obločno varjenje – EOV .....	45



7.3	Ročno elektro obločno varjenje z oplaščeno elektrodo (REO).....	48
7.3.1	Splošno .....	48
7.3.2	Varilna in merilna oprema.....	50
7.3.3	Lege varjenja .....	50
7.3.4	Osnovni material .....	52
7.3.5	Dodajni material – elektrode .....	52
7.4	Varjenje v zaščiti aktivnega plina CO <sub>2</sub> (MAG) .....	56
7.4.1	Splošno .....	56
7.4.2	Oprema za MAG varjenje.....	58
7.4.3	Dodajni material .....	58
7.5	Varjenje v zaščiti nevtralnega plina (MIG) .....	61
7.5.1	Splošno .....	61
7.5.2	Oprema in dodajni material .....	62
7.6	Varjenje z netaljivo elektrodo (TIG) .....	62
7.6.1	Splošno .....	62
7.6.2	Oprema za varjenje.....	64
7.6.3	Dodajni material .....	65
7.7	Obločno varjenje pod praškom (EPP) .....	66
7.7.1	Splošno .....	66
7.7.2	Dodajni material .....	69
7.7.3	Varilni prašek .....	69
7.8	Elektroporovno varjenje.....	70
7.8.1	Splošno .....	70
7.8.2	Točkovno uporabno varjenje.....	71
7.8.3	Uporovno bradavično varjenje .....	72
7.8.4	Uporovno kolutno varjenje.....	73
7.8.5	Sočelno uporabno varjenje .....	73
7.8.6	Sočelno obžigalno uporabno varjenje .....	74
7.9	Plamensko varjenje .....	75
7.9.1	Splošno .....	75
7.9.2	Plamen .....	76

7.9.3	Oprema za varjenje.....	77
7.9.4	Dodajni material .....	78
8	SKLEPNE MISLI .....	79
9	VIRI, LITERATURA.....	80
10	PRILOGE .....	82
10.1	Seznam slik .....	82
10.2	Seznam preglednic .....	83
10.3	Naslov študenta.....	84
10.4	Kratek življenjepis .....	84

**UPORABLJENI SIMBOLI**

C	– ogljik
H	– vodik
N	– dušik
Si	– silicij
Mn	– mangan
P	– fosfor
S	– žveplo
Al	– aluminij
Zn	– cink
V	– vanadij
Nb	– niobij
Fe	– železo
W	– volfram
Mo	– molibden
Cr	– krom
Ni	– nikelj
Ti	– titan
Ta	– tantal
CO <sub>2</sub>	– ogljikov dioksid
f <sub>y</sub>	– napetost tečenja
f <sub>u</sub>	– natezna trdnost
Ceq	– ogljikov ekvivalent

$I_v$	– vpliv varilnega toka
$U_v$	– varilna napetost
$V_v$	– hitrost varjenja
$\gamma\text{Fe}$	– ploskovno centrirana kubična mreža
$\alpha\text{Fe}, \delta\text{Fe}$	– prostorsko centrirana kubična mreža

## **UPORABLJENE KRATICE**

TVO – toplotno vplivano območje

EOV – elektroobločno varjenje

REO – ročno elektroobločno varjenje

MAG – varjenje v zaščiti aktivnega plina

MIG – varjenje v zaščiti nevtralnega plina

TIG – varjenje z netaljivo elektrodo

EPP – obločno varjenje pod praškom

## 1 UVOD

V konstrukcijah imajo poleg njenih sestavnih delov zelo pomembno vlogo tudi njihovi spoji. V jeklenih konstrukcijah so spoji najpogosteje izvedeni z varjenjem, ki sile prenašajo iz enega na drugi element enakomerno in ne v skokih, kot je to npr. v stikovanju z zakovicami. Varjenje v jeklenih konstrukcijah pomeni spajanje dveh elementov istega ali podobnega materiala s pomočjo dodatnega materiala in toplote. Z varjenjem dosežemo neprekinjenost ali kontinuiteto materiala.

Primerno izvedbo moramo predvideti že pri načrtovanju, saj moramo izpolnjevati pogoje glede varnosti, gospodarnosti in nazadnje tudi izgleda. Pri načrtovanju moramo upoštevati obremenitve, s katerimi bo obremenjena konstrukcija v času njene »življenjske« dobe. V primeru, ko je konstrukcija obremenjena s statično obremenitvijo, lahko izvedemo enostavne spoje, v primeru dinamične obremenitve pa moramo spojem posvetiti več skrbnosti.

Namen diplomske naloge je predstaviti varjenje jeklenih konstrukcij in dejavnike, ki pomembno vplivajo na ustreznost zvarnega spoja. Omejili smo se na tiste postopke varjenja in tehnologij, ki so največkrat uporabljeni v gradbeništvu.

Za kakovostno izvedbo varjenja jeklenih konstrukcij je potrebno veliko znanja iz različnih področij. Poglavitni dejavniki, katere moramo upoštevati pri načrtovanju in izvajanju varjenih spojev, so: lastnosti jekel, sposobnosti varivosti jekel, različni načini varjenja, vrsta dodatnega materiala, vrsta obremenitve, namembnost konstrukcije, itd. Prav tako je poleg naštetih dejavnikov pomemben tudi način in postopek varjenja ter oprema.

V diplomski nalogi smo tudi predstavili različne oblike zvarov, njihove značilnosti, označevanje v tehničnih risbah, njihove namembnosti, najprimernejše izvedbe zvarnih spojev različnih priključkov elementov. Seveda pa pri izvajanju zvarov prihaja tudi do napak, ki lahko nastanejo zaradi neustreznosti osnovnega materiala, neustreznosti dodatnega materiala, neustreznega uporabljenega načina varjenja, človeške napake in

drugih razlogov. Zato smo predstavili tudi morebitne napake, ki se lahko pojavijo v zvarih in rešitve za preprečevanje le teh.

## 2 ZGODOVINA VARJENJA

Toliko, koliko je star človek, je tudi stara želja po spajanju. Človek je že daleč v zgodovini moral spajati različne materiale, da si je lahko izdelal potrebna orodja (sekira, sulica, harpuna, kladivo, itd.), ki so mu lajšala opravila.

Zelo pomembna prednost kovin pred ostalimi materiali je ta, da jih je mogoče preoblikovati v hladnem, vročem ter jih spajati z varjenjem.

Razvoj varjenja se je skozi stoletja razvijal počasi. Že v starem veku, v bronasti dobi, se pojavijo prvi začetki varjenja, takrat so ljudje spoznali, da je možno kovino, ki je razžarjena, s kovanjem spajati. To so bili začetki tehnike kovaškega varjenja, ki se je v srednjem veku zelo razmahnilo.

Z odkritjem plinov v drugi polovici 18. stoletja pa je bilo ključno za začetek razvijanja plinskega varjenja:

- leta 1766 je Anglež Henry Cavendish odkril vodik,
- leta 1774 sta Anglež Joseph Priestly in Šved Carl Wilhelm Scheele odkrila kisik,
- leta 1836 je Anglež Edmund Davy odkril acetilen,
- leta 1894 je Anglež William Ramsay odkril argon,
- leta 1985 Nemec Cleve in Anglež William Ramsay odkrijeta helij.

Prvi začetki plinskega varjenja se pojavljajo že od leta 1894, ob razvoju industrijske proizvodnje acetilena in kisika leta 1902 pa še plamensko varjenje.

Varjenje se je zelo razmahnilo s pojavom električne energije, saj je omogočalo gradnjo velikih objektov in s tem varjenje postane glavni tehnološki postopek sestavljanja konstrukcij.

Oče sodobnih varilnih postopkov, Slavjanov, je leta 1891 pri varjenju uporabil kovinsko žico, ki je omogočala vzpostavitev električnega obloka z istosmernim tokom in

odtajevanjem. S tem je odpravil pomanjkljivost prisotnosti ogljikovih delcev, ki je bila prisotna pri patentu ruskih raziskovalcev, Bernadosa in Oliševskega. Omenjena sta patentirala visoko temperaturo električnega obloka leta 1882, vendar je bila njuna metoda nekvalitetna zaradi prisotnosti ogljikovih delcev, kar je bila posledica delno raztopljene grafitne elektrode in nezaščitenosti pred zrakom, kar je povzročilo oksidacijo. Kakovost zvarnega spoja je leta 1908 izboljšal Šved Oscar Kjellberg, ki je z oplačanjem do tedaj gole elektrode rešil pomanjkljivost absorpcije plinov iz zraka v zvarno talino. Z oplačanjem, ki je služilo za lajšanje vžiga in preprečevalo vdor zraka v talino. Od tega pomembnega odkritja naprej, se začne pospešen razvoj elektro varjenja v svetu.

Leta 1920 je vpeljana tehnologija varjenja z neskončno žico, ki je predstavnica predhodne metode varjenja današnjih MIG in MAG. Varilni postopek elektroobločnega načina varjenja s taljivo elektrodo pod praškom so razvili po letu 1930 v ZDA in ZSSR in razvoj le te je bil ključen za zelo povečano produktivnost varjenja.

Med 2. svetovno vojno in po njej je varjenje doseglo največji skok v razvoju. Začeli so odkrivati nove materiale in tehnike obdelovanja, ki so omogočali zahtevnejše predvsem pa kvalitetnejše varjenje. Tako se je leta 1941 pojavil način elektro obločnega varjenja v zaščiti inertnega plina z netaljivo volframovo elektrodo, leta 1948 pa z taljivo elektrodo. Leta 1953 so v ZSSR prvič za varjenje uporabili aktivni plin ( $\text{CO}_2$ ). Začetki plazemskega varjenja se pojavijo v letu 1955, leto kasneje varjenje s trenjem in še leto kasneje, torej leta 1957, varjenje z elektronskim snopom. Difuzijsko varjenje se pojavi leta 1959, šele leta 1960 se razvije lasersko in eksplozijsko varjenje.

Razvoj robotike v industriji in računalniške tehnologije nam v današnjem času omogočata lažje in zahtevnejše izvedbe zvarov.



## 3 METALOGRAFIJA

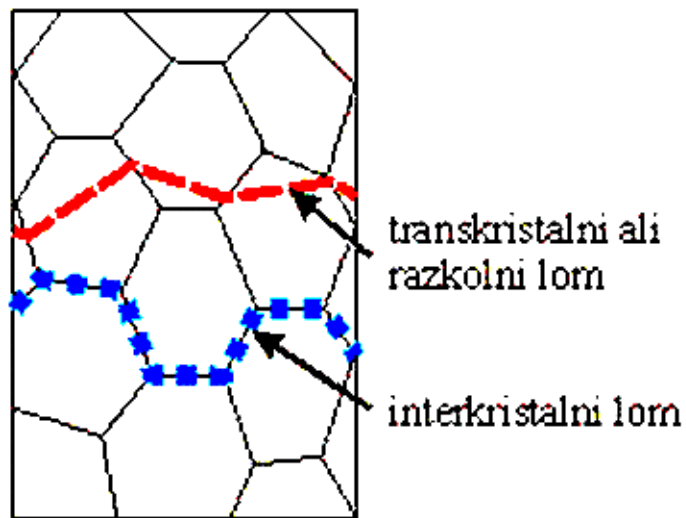
### 3.1 Kristalna struktura kovin

Pri varjenju kovin je zelo pomembno, da poznamo pojave, ki nastanejo pri taljenju in strjevanju kovin. Če želimo preoblikovati ali spajati kovine, moramo poznati njihove osnovne fizikalne in mehanske lastnosti (trdota, trdnost in kovnost), ki pa so odvisne od kristalne strukture, iz katerih je sestavljen material.

Kristal nastane s strjevanjem taline in glede na razmere, pri katerih se talina strjuje oz. ohlaja, se oblikujeta njegova velikost in oblika. Kristal začne rasti na kristalni kali, ki pa je običajno neka nečistoča. Tako kristali rastejo, dokler niso v stiku s sosednjimi. V talini sestavljeni iz velikega števila kali, se bo izoblikovalo veliko kristalov in se bo zato imenovala fino-zrnata mikrostruktura. Zelo pomemben dejavnik je tudi hitrost strjevanja taline, saj hitreje kot se bo talina strjevala, več se bo aktiviralo kali in posledično bo nastala fino-zrnata mikrostruktura. Kot smo že omenili na začetku, so od mikrostrukture zelo odvisne mehanske lastnosti materiala.

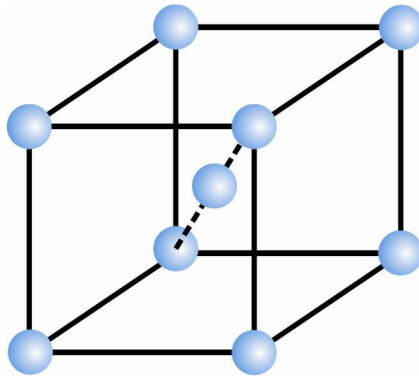
Mikrostruktura v trdni snovi je spremenljiva, tako se spreminja pri toplotni obdelavi, pri plastičnem preoblikovanju materiala in za nas pomembnem varjenju.

Fino-zrnata mikrostruktura ima pri temperaturi okolice večjo trdnost kot grobo-zrnata iste snovi. Ker je trdnost zrn manjša od trdnosti mej med kristalnimi zrn, nastopi pri preobremenitvi porušitev prek zrn ali tako imenovan transkristalni lom. Ko pa povečamo temperaturo okolice, se snov poruši po mejah, kar imenujemo interkristalni lom, saj postanejo meje med zrn šibka točka; glej sliko 3.1. Torej ima kovina, ki je sestavljena iz drobne zrnatosti, boljše mehanske lastnosti.

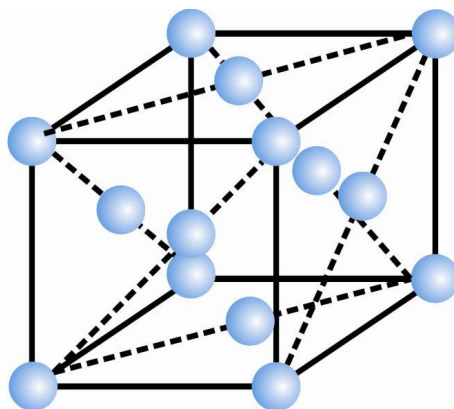


**Slika 3.1:** Prikaz poteka različnih lomov [23]

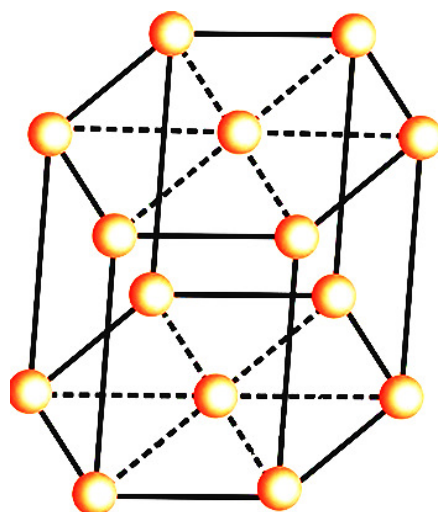
Kovinski kristal tvorijo atomi kovine, ki so razporejeni v prostoru po določenem sistemu. Kovine in njene zlitine najpogosteje kristalizirajo v obliki kubične kristalne rešetke ali v obliki heksagonalne kristalne rešetke, kar je razvidno iz slik 3.2 – 3.4.



**Slika 3.2:** Prostorsko centrirana rešetka [14]



Slika 3.3: Ploskovno centrirana rešetka [13]



Slika 3.4: Heksagonalna zgradba osnovne kristalne celice [15]

### 3.2 Kristalizacija čistega železa

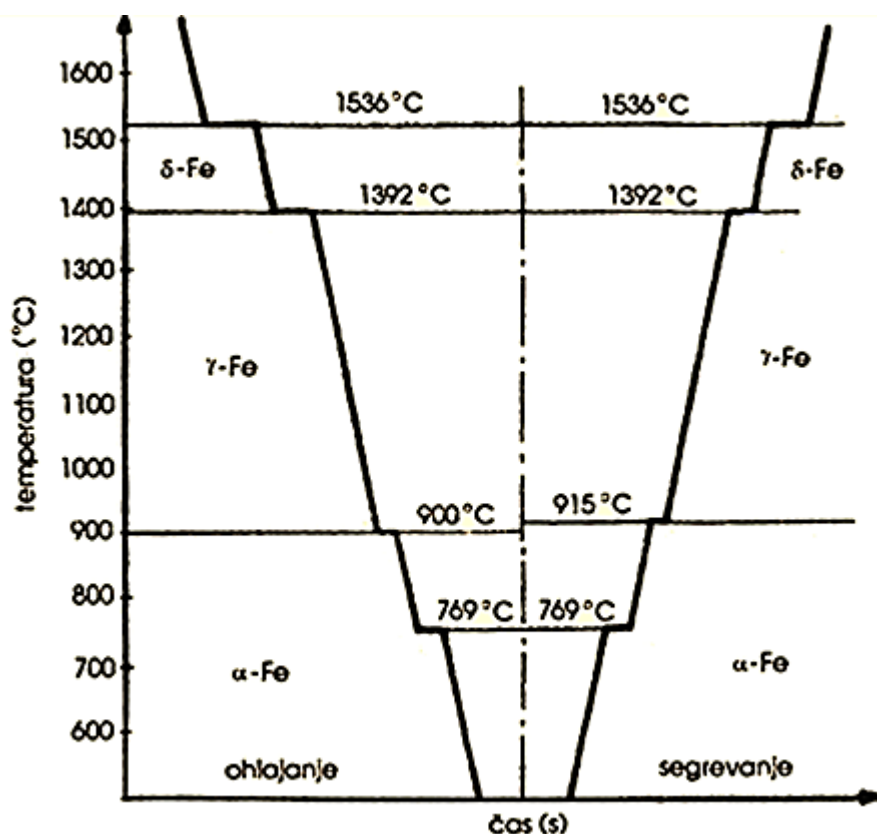
Železo (Fe) pridobivamo iz rud, v katerih je železo vezano v kemijskih spojinah kot hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), siderit ( $\text{FeCO}_3$ ), itd. Kasneje v plavžih reduciramo železo, vendar se pri tem reducirajo tudi drugi elementi, kot so  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , itd.

V plavžu dobimo zlitino železa z elementi C, Si, Mn, P, in S. Taka zlitina se imenuje surovo železo ali godelj, ki za razliko od jekla vsebuje večji odstotek ogljika (C). Poznamo belo in sivo surovo železo, ki se razlikujeta predvsem po možnostih obdelave.

Belo surovo železo je zelo krhko, zato ga lahko obdelujemo le z brušenjem, ker pa ima nizko viskoznost pa se ga da dobro ulivati. Sivo surovo železo se da dobro oblikovati, vendar je slabo ulivno.

Železo kristalizira v kristalni obliki, ki je lahko ploskovno centrirana kubična mreža ( $\gamma\text{Fe}$ ) ali pa prostorsko centrirani kubični mreži ( $\alpha\text{Fe}$  in  $\delta\text{Fe}$ ). Lastnost  $\alpha\text{Fe}$  je visoka meja plastičnosti in omejena možnost plastičnih deformacij v hladnem stanju, lastnost  $\gamma\text{Fe}$  pa visoka meja plastičnosti in večja možnost plastičnih deformacij v hladnem stanju.

Kristalna oblika je odvisna od temperature, in sicer, če segrevamo železo, prehaja kristalna oblika iz ene v drugo, prav tako pri ohlajevanju. Točko, v kateri se ti prehodi zgodijo iz ene kristalne oblike v drugo, imenujemo premene in so prikazani v sliki 3.5.



Slika 3.5: Premene pri ohlajanju in segrevanju Fe [4]

### 3.3 Kristalizacija jekla

Definicija:

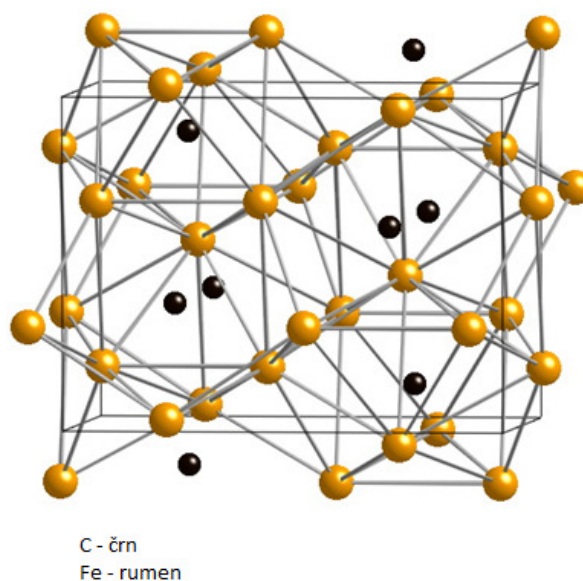
Jeklo je mehanska zmes (zlitina) železa s stalnimi spremljevalci (C, Si, Mn, P, S). Če zlitini dodamo še druge elemente (W, Mo, Cr, Ni, Ti, Ta, itd.), dobimo jeklo s posebej izbranimi lastnostmi ali legirana jekla. [2]

Funkcije elementov v jeklu:

- C** - ogljik : povečuje trdnost in trdoto, zmanjšuje pa duktilnost, žilavost in varivost,
- Si** - silicij : dezoksidant, preprečuje izcejanje in preprečuje poroznost,
- Mn** - mangan : poveča trdnost, veže žveplo v MnS in s tem zmanjša neugodne vpliva žvepla,
- P** - fosfor : povečuje trdnost in trdoto, zmanjšuje pa žilavost in duktilnost, povečuje odpornost na atmosfersko korozijo ter zelo pospešuje izcejanje,
- S** - žveplo : je zelo neugoden element, saj zmanjšuje materialu duktilnost, žilavost in sposobnost varivosti, močno povzroča segregacijo ter zmanjšuje kvaliteto površine.

Jeklo lahko pridobivamo na dva načina, in sicer iz belega surovega železa in pa tudi iz starega železa in odpadnega jekla.

Surovo železo pridobivamo tako, da v plavž nasujemo železno rudo, koks in dodatke. Pri temperaturi višji od  $1600^{\circ}$  se razen železa izloči večina drugih materialov v obliki plinov ali žilindre, ki jo odstranimo. Tako dobimo grodelj, ki ga naprej predelujemo v jekla (beli grodelj) in v lita železa (sivi grodelj). Razlika med jeklom in litim železom je predvsem v vsebnosti ogljika (C) in kako je ta vezan na železo (Fe). Pri jeklu je C vezan kot  $Fe_3C$  (slika 3.6), v sivem grodlju pa C ostane nevezan in izločen v lističih grafita.



**Slika 3.6:** Struktura cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) [24]

Postopek pridobivanja jekla iz belega grodlja imenujemo tudi žilavljenje. Pri tem postopku zmanjšujemo odstotek C do najvišje meje 2,1 %. Nad to mejo zlitina postane lito železo.

Količina C v jeklu pomembno vpliva na mehanske lastnosti in varilne sposobnosti jekla. Če material plastično deformiramo, s tem tudi posledično deformiramo zrna in distorzijo atomske mreže. S tem posegom naredimo material trši in manj žilav, to imenujemo tudi ostareel material. Mehanske lastnosti pa so povratne na prvotne z izvajanjem žarjenja. Ko material segrejemo nad določeno temperaturo, atomi zavzemajo svoje prave položaje in tvorijo se nova zrna s pravilnim razporedom atomov, to imenujemo rekristalizacija.

Pri segrevanju na visokih temperaturah pa pride do porasta velikosti zrn, kar ima za posledico slabšo žilavost in občutljivost na krhkost materiala, večjo možnost kaljenja in občutljivost na tople razpoke.

## 4 VRSTE KONSTRUKCIJSKIH JEKEL V GRADBENIŠTVU

Vrste konstrukcijskih jekel podaja SIST 1993-1-1, glede njihove nazivne vrednosti napetosti tečenja  $f_y$  in natezne trdnosti  $f_u$  podajata tabeli 4.1 in 4.2.

Standard in kakovost jekla	Nazivna debelina elementa $t$ [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40$ mm $< t \leq 80$ mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

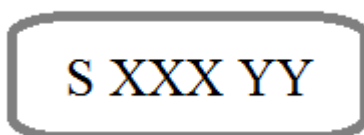
**Tabela 4.1:** Nazivne vrednosti napetosti tečenja  $f_y$  in natezne trdnosti  $f_u$  za vroče valjana konstrukcijska jekla [10]

Standard in kakovost jekla	Nazivna debelina elementa $t$ [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 65$ mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10210-1</b>				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
<b>EN 10219-1</b>				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

**Tabela 4.2:** Nazivne vrednosti napetosti tečenja  $f_y$  in natezne trdnosti  $f_u$  za votle profile

[10]

#### 4.1 Pomen oznak jekel



S – oznaka za konstrukcijsko jeklo

XXX – nazivna napetost tečenja v MPa za debeline do 16 mm

YY – razred lomne žilavosti, določen s Charpy-V testom (JR, J0, J2, K2, N, NL, M, ML, Q, QL, QL1)

Tej oznaki pa še je lahko dodana oznaka H, ki pomeni, da gre za votli profil.



## 5 VARJENJE

### 5.1 Splošno

#### Definicija

Varjenje je spajanje dveh ali več delov osnovnega materiala v nerazdružljivo celoto. Spajanje dosežemo s toploto, s pritiskom ali pa s kombinacijo obeh. [12]

Varjenje je zaradi svoje učinkovitosti in ekonomičnosti eden glavnih tehnoloških postopkov pri proizvodnji kovinskih delov, saj nam omogoča enostavno izdelavo kompliciranih oblik vseh velikosti. Z njim dosežemo kontinuiteto materiala.

Za učinkovito varjenje moramo poznati obsežno področje problematike od zasnove varilnih konstrukcij, metalurgijo zvarov, varivost materialov in različne tehnološke preizkuse za varjenje.

Najpomembnejši pogoji pri varjenju, ki jih moramo upoštevati, so:

- material mora biti variv, s tem zagotovimo, da ni podvržen pojavu vročih razpok, por in drugih napak v zvaru,
- da v toplotno vplivani coni ne prihaja do martenzitne strukture,
- da ne obstaja nevarnost krhkega loma

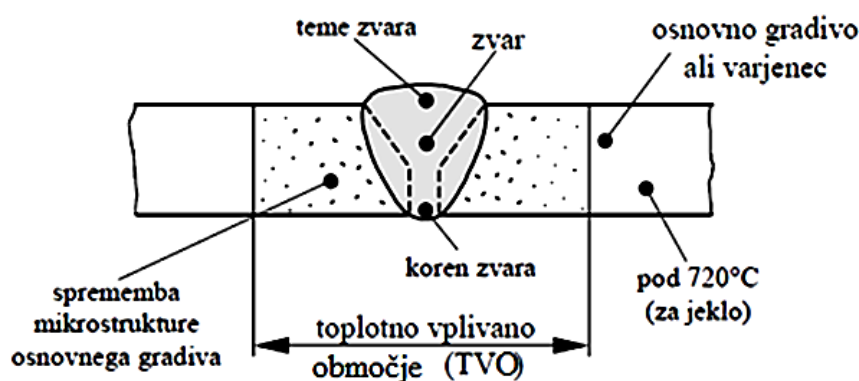
Martenzitna struktura nastane pri hitrem ohlajanju raztopine, ki je bila segreti na visoko temperaturo. Zanj je značilno, da ima zelo veliko trdoto.

Razpoke v hladnem se pojavijo, če material vsebuje preveč C in H (vodika), zaradi prevelike količine S (žvepla) pa obstaja nevarnost razpok v vročem stanju. Razpokajo predvsem rada trda jekla.

Za izdelavo jeklenih konstrukcij v gradbeništvu uporabljamo jekla z vsebnostjo ogljika do 0,25% in jih imenujemo standardna konstrukcijska jekla.

## 5.2 Zvarni spoji

Zvarni spoj predstavljajo zvar in stični deli zvarjencev. Na sliki 5.1 so prikazani osnovni pojmi v zvarjenem spoju.



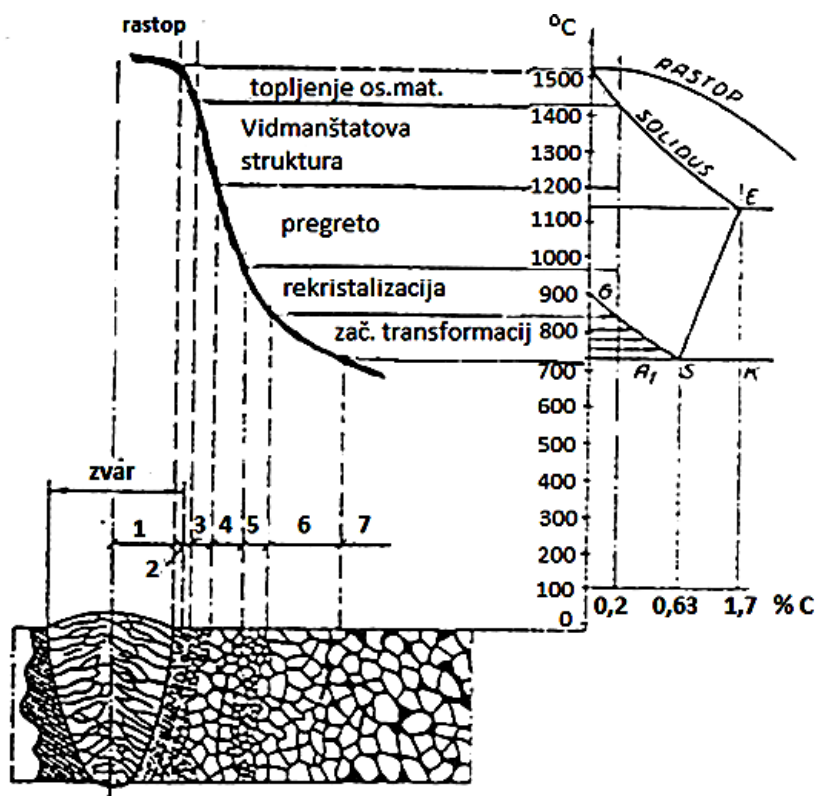
Slika 5.1: Definicija zvarnega spoja [20]

**Osnovno gradivo** je material, iz katerega so narejeni elementi, ki jih varimo.

**Teme zvara** je del zvara, ki je širši in je dvignjen nad površino osnovnega gradiva.

**Koren zvara** predstavlja spodnji del zvara, ki je ozek.

**TVO** (toplotno vplivano območje) je območje materiala, ki je bilo segreto, vendar nestaljeno. Vzrok za njegov nastanek je dovajanje energije, ki je potrebna za varjenje. Pri večvarkovnem varjenju pa je toplotni vpliv varjenja opazen tako v osnovnem materialu kakor tudi v predhodnih varkih. Mikrostruktura TVO se v odvisnosti od temperature spreminja, kar je lepo razvidno na sliki 5.2 (cone od 2 do 7). Ker imajo var, TVO in osnovni material drugačno mikrostrukturo, je zelo pomembno, da pri varjenju z dodajnim materialom pravilno izberemo le-tega in primerno tehnologijo varjenja ter s tem dosežemo enakovrednost vara in TVO osnovnemu materialu.



Slika 5.2: Struktura zvarjenega spoja [7]

- Cona 1 – zvar, ki nastane od stopljenega dodatnega materiala
- Cona 2 – je formirana iz stopljenih robov osnovnega materiala
- Cona 3 – je del osnovnega materiala, ki je bil dolgo časa pod vplivom visoke temperature, zaradi česar je prišlo do porasta zrn.
- Cona 4 – območje, kjer je osnovni material bil dolgo segret, zato se njegova zrnavaost še poveča. Struktura materiala v tej coni je odvisna od hitrosti hlajenja. Rezultat počasnega ohlajanja je feritno perlitna struktura, hitrega pa martenzitna struktura.
- Cona 5 – območje, kjer je material prenesel rekristalizacijo, ampak je ohranil fino zrnato strukturo.
- Cona 6 – osnovni material je bil kratek čas izpostavljen segrevanju.
- Cona 7 – območje, kjer je mikrostruktura nespremenjena.

Na sliki 5.3 je prikazan mikroposnetek meje med varom in TVO.



**Slika 5.3:** Mikroposnetek meje med varom in TVO [18]

Zvarni spoji imajo svoje prednosti in slabosti, ki pa so:

Prednosti:

- nosilnost zvarnih spojev je le malo manjša ali enaka od nosilnosti, ki so značilne za osnovni material,
- v primeru čelnih zvarov je omogočeno primernejše oblikovanje zvarjenih elementov,
- gladka površina nam omogoča lažjo naknadno obdelavo proizvoda,
- gospodarnost,
- ker so velike možnosti popravkov, je izmet varjencev zelo majhen.

Slabosti:

- za spajanje lahko uporabljamo le material, ki ima enako ali zelo podobno sestavo,
- zaradi lokalnega segrevanja, ki povzroča dodatne notranje napetosti, se pojavi neenakomerno krčenje in raztezanje varjencev,
- zvarno mesto je potrebno ustrezno pripraviti,

- potrebna je ustrezna razvrstitev zvarov po legi in zaporednem izvajanju,
- slaba odpornost proti koroziji,
- majhna sposobnost dušenja vibracij.

### 5.3 Posledice prisotnosti plinov v zvarjenih spojih

Pri varjenju in tudi po njem raztopljeni plini v talini povzročajo nevšečnosti. Od procesa neustreznih kemičnih reakcij ostajajo ali prihajajo v zvarno talino iz atmosfere, z dodajnim materialom in tudi iz osnovnega materiala, različni plini ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  in drugi).

#### Kisik [O]

Je v zvarih prisoten v obliki oksidov kot produkt kemičnih reakcij dezoksidacije. Kadar so pri varjenju zagotovljeni ugodni pogoji, se izloči iz taline v žlindro, ali pa ostane v talini kot nemetalni vključek. Rezultat neugodne kemične reakcije pa je, da se veže na C in tvori  $\text{CO}$  in  $\text{CO}_2$ , ki pri izhajanju povzroča nemirnost taline in vretje, lahko pa tudi poroznost.

#### Dušik [N]

V zvarno talino prihaja z varjenjem, kot vezan v osnovnem materialu ali pa iz atmosfere v obliki  $\text{N}_2$ . Ta se topi pri višjih temperaturah v majhnih količinah v železu in se veže v  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Njegova vezava z železom ima izredno neugoden vpliv, saj povzroča staranje, popuščno krhkost ter znižuje duktilnost. Ob hitrem skokovitem ohlajanju ob prehodu v trdno stanje se zaradi raztopljene velike količine  $\text{N}_2$  v tekoči talini lahko pojavi visoka poroznost. Pri sodobnih jeklih dodajamo elemente (Al, V, Nb, Ti), ki vežejo N v stabilno obliko, ki se pri višjih temperaturah izločijo in delujejo kot kali in povzročijo drobno zrno. Čeprav so izločeni, povišujejo trdnost in zaradi drobnega zrna ne znižujejo žilavosti, kar je pomembno ob uporabi jekel za obratovanje pri nizkih temperaturah.

#### Vodik [H]

Vodik je v kovinah vedno prisoten v plinski obliki, saj se s kovinami ne spaja. V talino prihaja iz atmosfere ali v obliki  $\text{H}_2\text{O}$  z dodajnim materialom. Z zniževanjem temperature se

topnost  $H_2$  skokovito zniža in pojavi se lahko poroznost. Prisotnost vodika prav tako povzroča razpokljivost v hladnem.

#### 5.4 Vrste stikov in zvarov

V odvisnosti od medsebojnih položajev elementov, katere varimo, poznamo vrste zvarov in varjenih stikov, ki jih prikazujeta tabela 5.1 in slika 5.4.

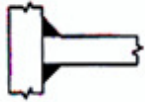

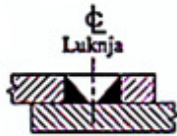



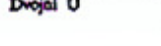


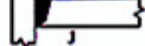
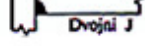



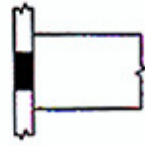

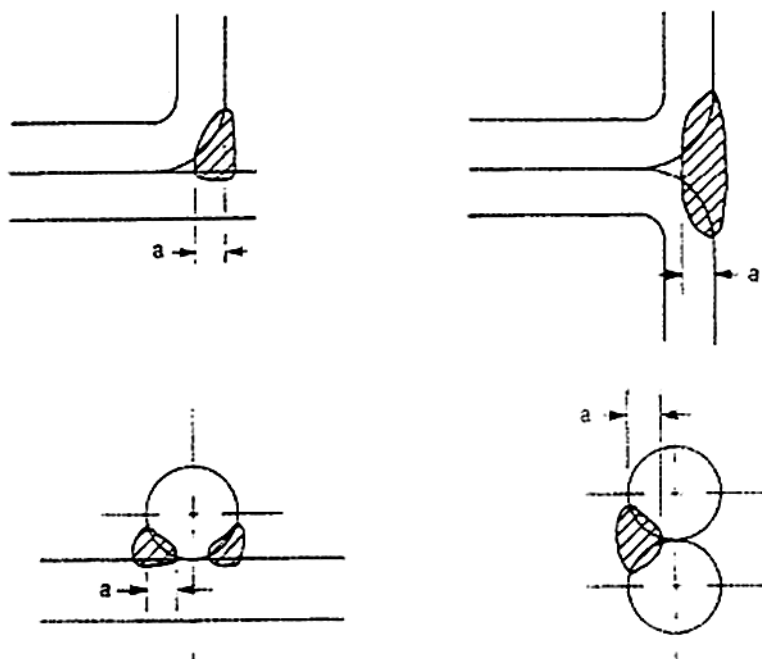
Vrsta zvarov	Vrsta stikov		
	Čelni stik	T-stik	Preklopni stik
Kotni zvar			
Kotni zvar v odprtini			
Polno penetrirani čelni zvar	 V  X  U  Dvojni U	 V  K  J  Dvojni J	
Delno penetrirani čelni zvar	 Dvojni U  Dvojni V	 K	
Čepasti zvar			
Zvari ob zaobljenih robovih	Glej slika 5.4		

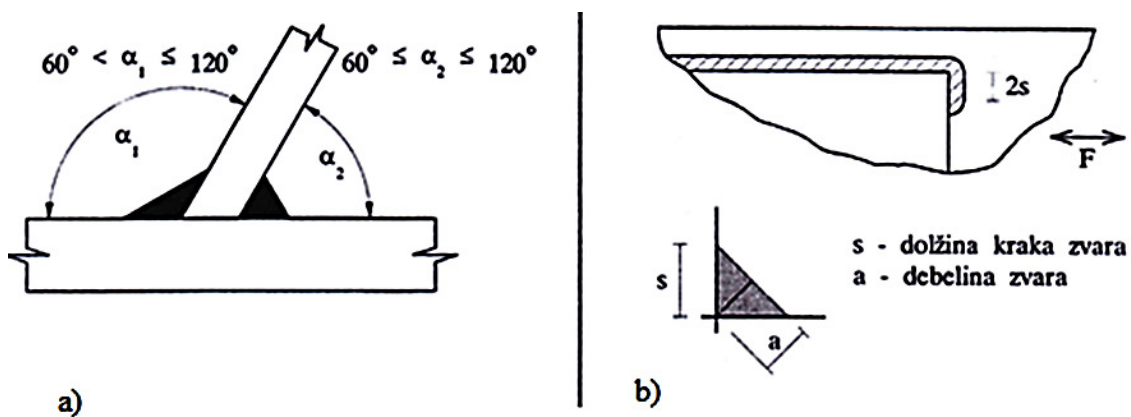
Tabela 5.1: Vrsta zvarov in varjenih spojev [1]



Slika 5.4: Zvari ob zaobljenih robovih [21]

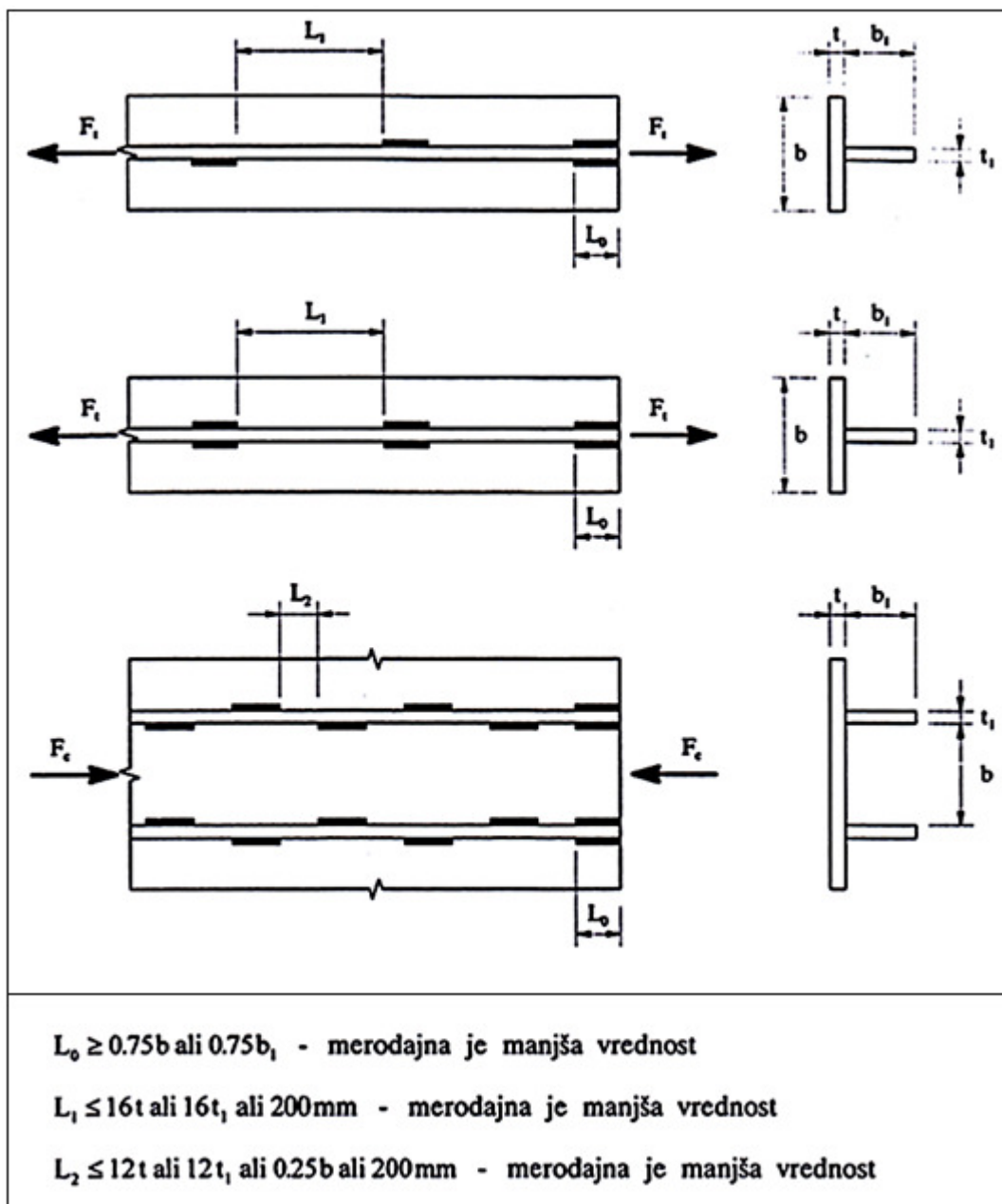
#### 5.4.1 Kotni zvari

Uporabni so za stikovanje pločevin, med katerimi je kot od  $60^\circ$  do  $120^\circ$  (slika 5.5 a). Če je le možno kotnih zvarov ne zaključujemo v vogalu, podaljšamo jih okoli vogala za dolžino dveh krakov zvara. Njihov podaljšek pa mora ležati v isti ravnini kot osnovni zvar in pločevina, ki jo varimo (slika 5.5 b).



Slika 5.5: Geometrijski pogoji pri kotnih zvarih [1]

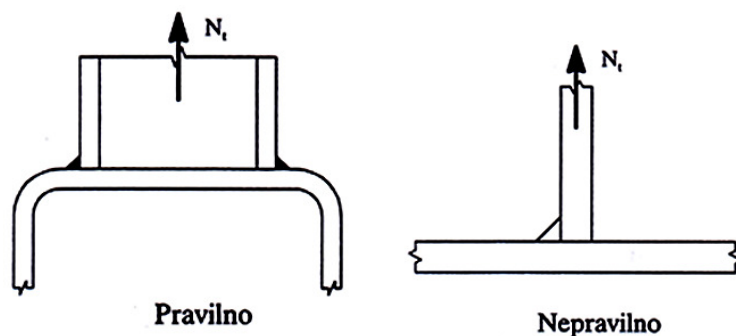
Lahko so neprekinjeni ali prekinjeni, vendar prekinjenih ne smemo uporabljati v korozivnem okolju. Geometrijske zahteve podaja tabela 5.2.



**Tabela 5.2:** Geometrijske zahteve za prekinjene kotne zware [1]

Kotni zvari so lahko tudi enojni, ampak jih ne smemo uporabiti, če je možen pojav obremenitve z momentom okoli vzdolžne osi zvara, ker ti povzročajo velike natege v korenu zvara (slika 5.6). Dovoljeno jih je uporabljati, če so del grupe zvarov.

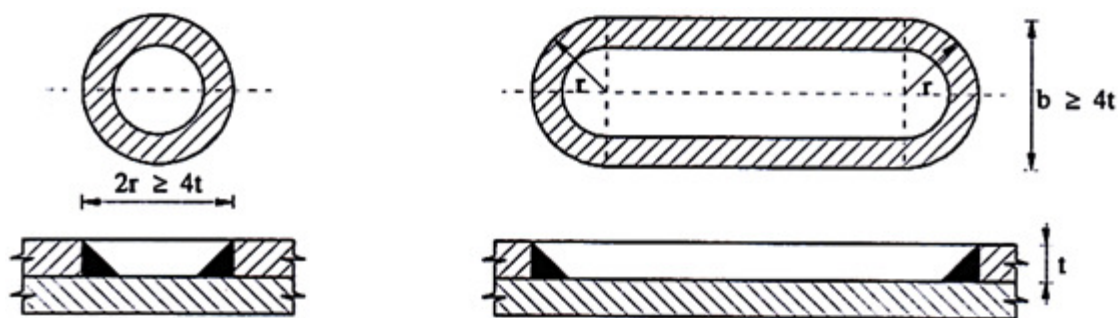




Slika 5.6: Enojni kotni zvari [1]

#### 5.4.2 Kotni zvari v odprtinah (očesni zvari)

Uporabljamo jih samo za prevzem strižnih obremenitev. Z njimi preprečujemo lokalno izbočenje pločevin in ločevanje preklopnih pločevin. Odprtine so lahko okrogle ali ovalne oblike, glej sliko 5.7. Pogoji, ki mora biti izpolnjen je ta, da premer okroglih odprtin ali širina ovalnih odprtin morata presežati štirikratno debelino pločevine z odprtino. Ovalne odprtine morajo biti zaključene polkrožno, razen ko odprtina sega do konca pločevine.



Slika 5.7: Kotni zvari v odprtinah [1]

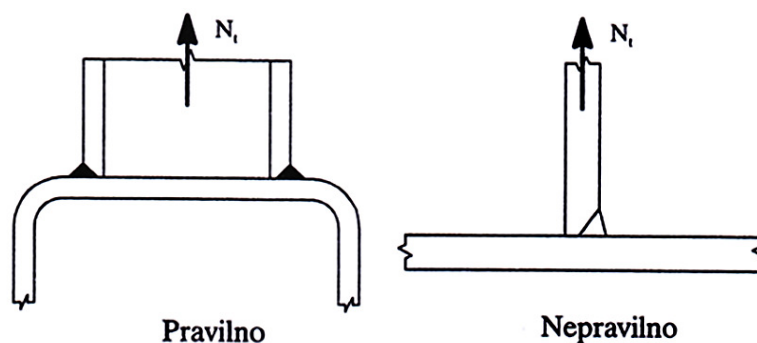
#### 5.4.3 Čelni zvari

Razlikujemo med polno penetriranimi zvari in delno penetriranimi čelnimi zvari.

Polno penetrirani čelni zvari so tisti, pri katerih je po celotni debelini stikovanih pločevin doseženo zlitje zvara in osnovnega materiala.

Pri delno penetriranih čelnih zvarih pa se zvari ne raztezajo po celotni debelini stikovane pločevine.

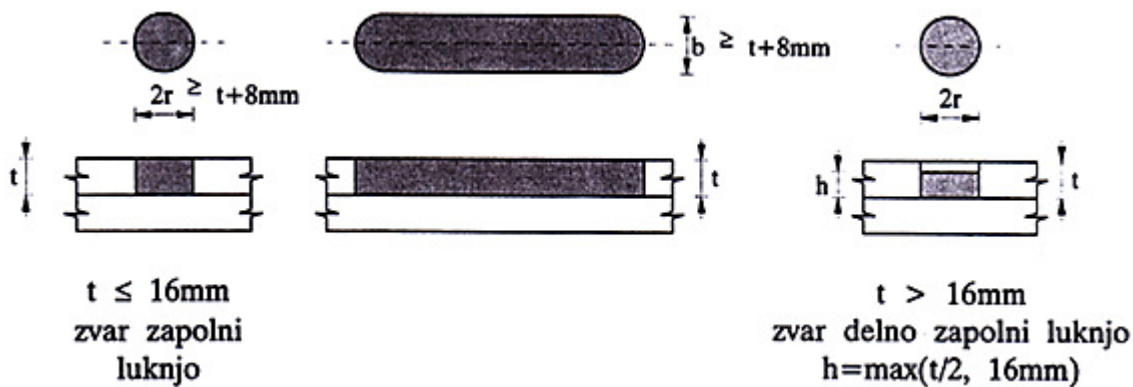
Prav tako kakor pri enojnih kotnih zvarih velja, da enojnih čelnih zvarov ne smemo uporabljati v primeru obremenitve z momentom v vzdolžni osi, zaradi enakega razloga, kar prikazuje slika 5.8.



Slika 5.8: Enojni čelni zvari [1]

#### 5.4.4 Čepasti zvari

Z njimi zapolnimo okrogle ali podolgovate luknje. Uporabni so za prevzemanje strižnih obremenitev, z njimi preprečujemo lokalno izbočenje in ločevanje preklopnih pločevin in za povezovanje elementov pri sestavljenih prerezih. Njihove geometrijske zahteve podaja slika 5.9.



Slika 5.9: Čepasti zvari [1]

### 5.4.5 Zvari ob zaobljenih robovih

Te zveze uporabljamo za priključevanje hladno oblikovanih največkrat votlih profilov in okroglih palic polnega prereza. Oblike zvarov ob zaobljenih robovih prikazuje slika 5.4. Njihovo debelino določamo s poskusnim varjenjem, prečnim razrezom in meritvijo doseženih debelin.

Podrobnejše zahteve glede geometrije in dimenzije zvarov, ki jih uporabljamo za varjenje jeklenih konstrukcij v gradbeništvu, podaja SIST EN 1993-1-8.

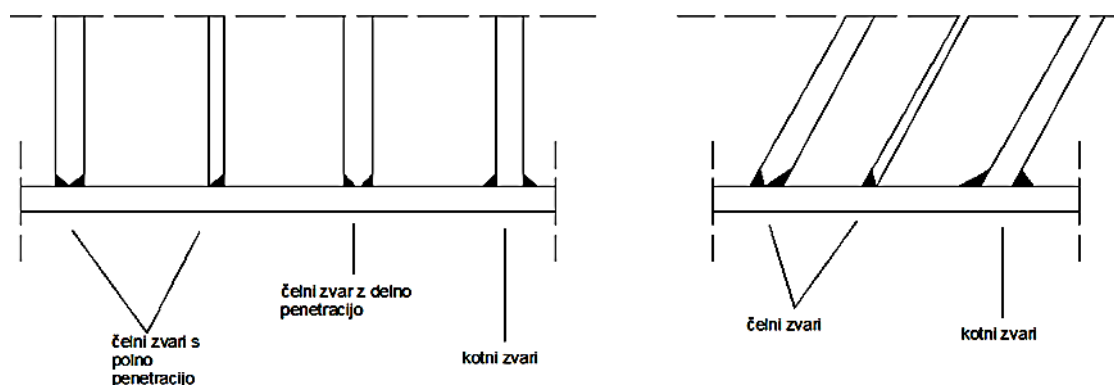
V gradbeništvu se najpogosteje poslužujemo kotnih in pa čelnih zvarov. Slika 5.10 prikazuje nekaj najpogostejših primerov čelnih in kotnih zvarov. Vsaka oblika ima svoje prednosti in slabosti:

a. Kotni zvar

- prednosti: njegova izdelava je poceni in za njegovo izdelavo ni potrebna posebna obdelava ali priprava materiala.
- slabosti: slabo prenašajo utrujanje in so neestetskega videza.

b. Čelni zvar

- prednosti: dobro prenaša utrujanje in so estetskega videza.
- slabosti: potrebna je priprava varilnih površin oz. žlebov zvara, zaradi tega je izvedba le-teh dražja in zahteva več časa.



Slika 5.10: Primeri čelnih in kotnih zvarov [3]

## 5.5 Oblike zvarov in njihovi simboli označevanja

Poznamo veliko oblik zvarov in za njihovo opisovanje poznamo različne simbole, ki so prikazani v tabelah 5.3 – 5.5.










































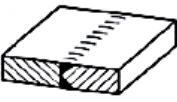
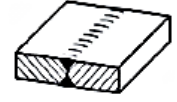
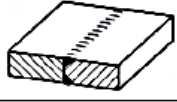

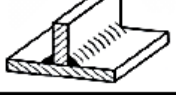






Ime zvara	prikaz	simbol	ime zvara	prikaz	simbol
zvar s privihom			očesni zvar		
I-zvar			točkovni zvar		
V-zvar			linijski zvar		
polovični v-zvar			strmi zvar		
Y-zvar			polovični strmi zvar		
polovični Y-zvar			čelni zvar		
U-zvar			navarek		
polovični U-zvar			površinski zvar		
korenski varek			poševni zvar		
kotni zvar			pregibni zvar		

Tabela 5.3: Oblike in grafični simboli za nekatere osnovne zware [19]

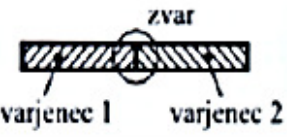
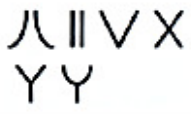

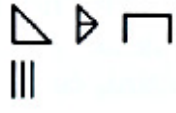
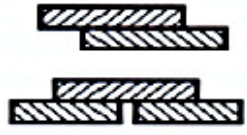
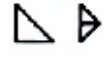








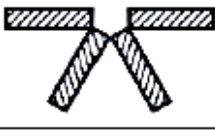

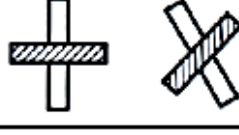

Ime zvara	prikaz	simbol
Dvojni V ali X-zvar		X
dvojni HV ali K-zvar		K
dvojni Y-zvar		Y
dvojni HY-zvar		K
dvojni U-zvar		U
dvojni kotni zvar		∇

**Tabela 5.4:** Grafični simboli dvojnih zvarov [19]

Pomen	Prikaz	Simbol
V-zvar z ravno površino		∇
X-zvar z ibočeno površino na obeh straneh		∞
V-zvar z ravno površino in ravnim korenskim varkom		∇
Y-zvar s korenski varkom		Y
kotni zvar z vbočeno površino		∇
kotni zvar s prehodom brez zarez		∇

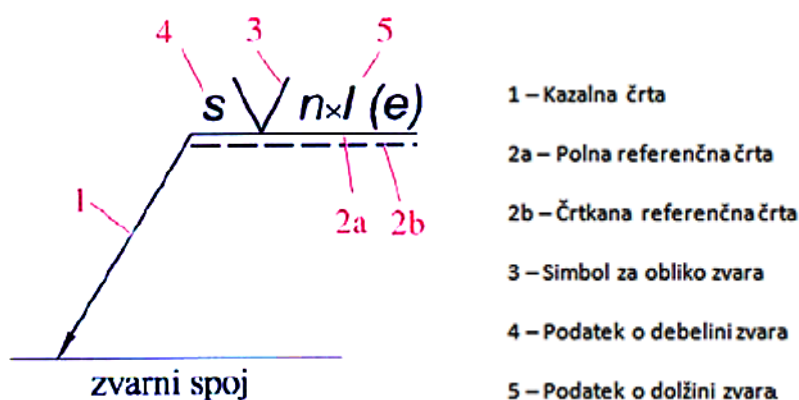
**Tabela 5.5:** Primeri kombiniranih oblik zvarov z njihovimi simboli [19]

V naslednji tabeli so prikazane nekatere priporočljive oblike zvarov glede na vrste zvarnih spojev:

Vrsta zvarnega soja	Medsebojna lega varjencev	priporočljive oblike zvarov
<i>Soležni spoj</i> Varjenca ležita v isti ravnini.		
<i>Paralelni spoj</i> Varjenca se v celoti prekrivata.		
<i>Prekrivni spoj</i> Varjenci se delno prekrivajo.		
<i>Kotni spoj T</i> Varjenca sta med seboj pravokotna.		
<i>Dvojni T spoj</i> Varjenci so med seboj pravokotni.		
<i>Poševni spoj</i> En varjencec leži poševno nad drugim varjencecem.		
<i>Vogalni spoj</i> Varjenca se stikata z robovoma pod poljubnim kotom.		
<i>Večdelni spoj</i> Spoj več varjencev.		
<i>Križni spoj</i> Varjenca ležita križno eden poleg drugega		

**Tabela 5.6:** Priporočljive oblike zvarov glede na medsebojne lege varjencev [19]

Označevanje zvarnih spojev in zvarov v tehničnih risbah prikazuje slika 5.11.



Slika 5.11: Oznaka zvarnega spoja v risbi [19]

## 5.6 Napake v zvarjenih spojih

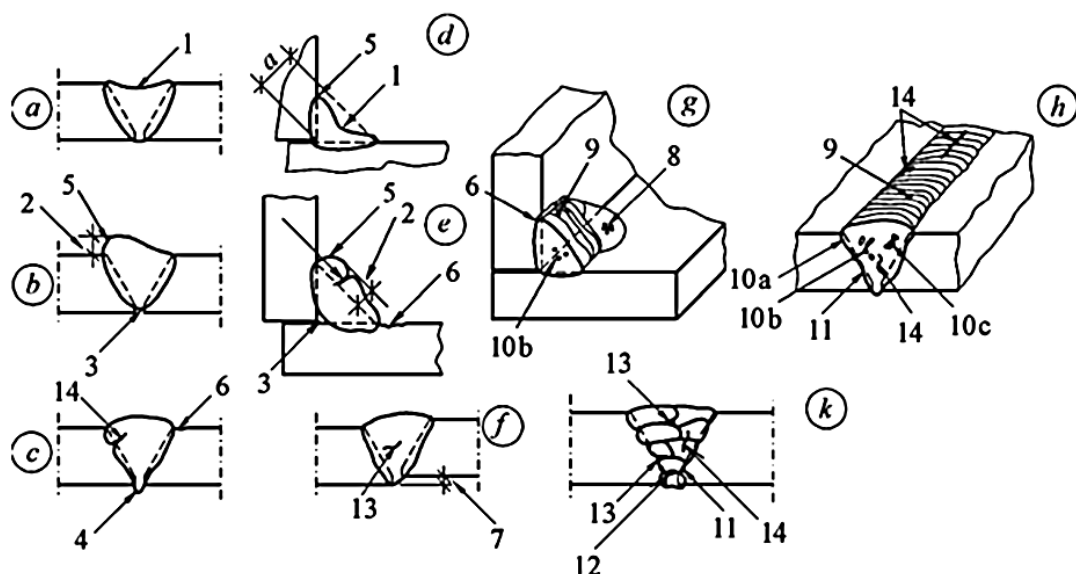
Pri varjenju, s katerim želimo doseči kontinuiteto dveh ali več elementov, prihaja do kemičnih in fizičnih sprememb v elementih, katere spajamo in so vzrok za nastajanje napak v zvarjenih spojih. Najpomembnejši vzroki, ki vplivajo na nastanek napak v zvarih, so: neustrezna vrsta in kemijska sestava materiala, ki ga varimo, neprimeren tehnološki postopek varjenja ali neprimerna vrsta dodajnega materiala. Zelo pomembna pa je tudi kvalificiranost varilca, saj je njegova ustrezna izvedba zelo pomembna za preprečevanje napak v zvarjenih spojih.

Zelo pomembno je poznavanje možnih nastalih napak in njihovih vzrokov, saj s tem lahko preprečujemo nastanek le teh ali predvidimo obnašanje konstrukcije in njeno trajnost ob njihovem pojavu.

V zvarih poznamo v glavnem dve vrsti napak:

- dimenzijske ali zunanje napake
- strukturne ali notranje napake

Primeri napak v zvarjenih spojih so prikazani na sliki 5.12.



Slika 5.12: Prikaz napak v zvarnih spojih [3]

### Dimenzijske ali zunanje napake

- 1 – nezadostno izpolnjevanje žleba
- 2 – preveliko nadvišanje zvara
- 3 – neprevarjen koren zvara
- 4 – prekap zvara
- 5 – oster prehod med zvarom in osnovnim materialom
- 6 – zareza na robu zvara
- 7 – zamik elementov v žlebu
- 8 – krater na začetku ali koncu zvara
- 9 – pore na površini zvara

### Strukturne ali notranje napake

- 10a – plinske pore
- 10b – gnezdo por
- 10c – verižne pore
- 11 – zlep
- 12 – napaka pri privarjanju korena
- 13 – žindra
- 14 – prečne ali vzdolžne razpoke



Napake v zvarnih spojih se zelo pogosto pojavljajo v kombinacijah. Najpogostejše napake, ki se pojavijo v zvarjenih spojih, so:

- **Oksidni vključki in nečistoče**

Njihova značilnost je, da so nepravilnih oblik, njihova usmerjenost in velikost je različna, vključki imajo ostre in nepravilne prehode. Lahko se pojavijo kot samostojne, večslojne in pa tudi skupinske. Največkrat so posledica izbire neustrezne varilne tehnologije ali neustreznih elektrod.

- **Plinske pore**

Zapolnjene so s plinom, ki je pri strjevanju ostal v zvaru. So posledica nečistega materiala ali neustreznosti elektrod, kot sta vlažnost in poškodovanost.

- **Razpoke**

Razpoke so najbolj nezaželene napake v zvarnih spojih. V zvarih se pojavljajo kot vzdolžne, prečne ali poljubne smeri, lahko so v notranjosti, na površini ali v toplotno vplivanem območju zvarnega spoja. So posledica neenakomernosti segrevanja, neprimerne tehnologije varjenja ali neustreznega uporabljenega dodatnega materiala.

## 5.7 Kontrola ustreznosti zvarnega spoja

Funkcija zvara je, da spaja dele konstrukcij v konstruktivno celoto tako, da je sposobna prenašati obremenitve ali izpolnjevati kake druge funkcije. Kontrola kvalitete zvara je odvisna od intenzitete in vrste napetosti v zvarih in od vpliva zvara na celotno konstrukcijo. Vseh zvarov pa nam ni potrebno strogo kontrolirati, saj vsaka napaka ne pomeni, da bo konstrukcija neustrezna. Zato je potrebno pri kontroli izvedenega zvara upoštevati sledeče:

- kateri tehnološki postopek je bil izveden in usposobljenost varilca,
- vrsto materiala, njegove karakteristike, debelino elementa in obnašanje materiala pri varjenju,
- tip in značilnosti konstrukcije,
- značaj posameznih zvarov v konstrukciji (statični ali konstruktivni zvari),

- način obremenitve konstrukcije (statična ali dinamična obremenitev),
- vrsta in intenziteta napetosti (nateg ali tlak),
- delovna temperatura konstrukcije.

V praksi poznamo veliko metod kontroliranja kvalitete zvarov, ki pa jih delimo v dve veliki skupini. To sta metodi porušnih in neporušnih preiskav.

### **5.7.1 Neporušne preiskave**

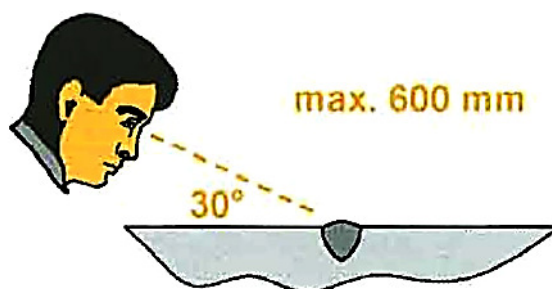
Z njimi odkrivamo nepravilnosti tako na površini, kot tudi v notranjosti preiskovanega objekta, ne da bi ga pri tem poškodovali. Običajno jih uporabljamo takrat, ko ugotavljamo končno kakovost izdelka.

Najpomembnejše neporušne preiskave so:

- vizualna kontrola,
- radiografska kontrola,
- ultrazvočna kontrola,
- magnetna ali elektromagnetna kontrola,
- penetracijska kontrola.

#### **Vizualna kontrola**

Predstavlja najpomembnejšo in najstarejšo kontrolo za vse vrste zvarjenih spojev. Največjo oddaljenost in kot opazovanja prikazuje slika 5.13. Izvajajo jo izkušeni strokovnjaki. Vizualna kontrola se izvaja z detajlnim pregledom zvara v smislu preveritve kvalitete izvedbe, potrebnih dimenzij zvara, obstoječih neravnin, zarez, kraterjev, nepovarjenega korena, površinskih por in razpok.



**Slika 5.13:** Največja oddaljenost in kot opazovanja pri vizualni preiskavi [22]

Pri vizualni preiskavi pa si lahko pomagamo tudi z naslednjimi pripomočki:

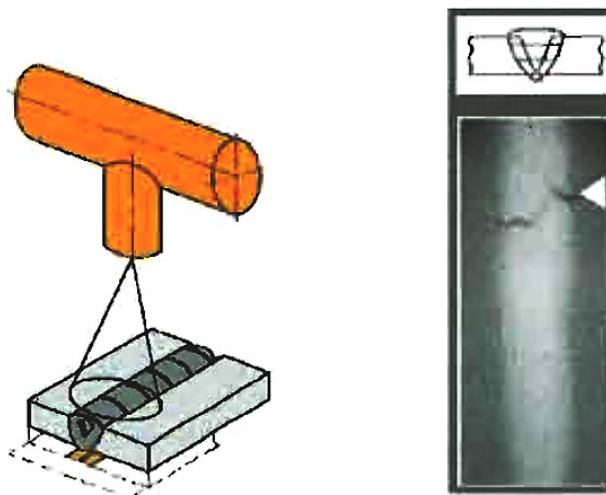
- lupe,
- ogledala,
- merila in merilni instrumenti v vizualni kontroli,
- boroskopi,
- video boroskopi,
- replike.

### **Radiografska kontrola**

Rezultat te preiskave je odkrivanje nepravilnosti po celotnem objektu. Preiskavo izvajamo s presevanjem materiala z žarki določene valovne dolžine. Pri preizkusu je na zadnji strani presevanega objekta nameščen film, na katerega snemamo posnetke, iz katerih kasneje razvijemo slike in na podlagi teh prepoznavamo nepravilnosti, kot so poroznost, vključki, neprevarjenost, itd. Slika 5.14 prikazuje radiografsko preiskavo in primer radiografskega posnetka razpoke v zvaru.

Material v odvisnosti od svoje gostote in debeline absorbira različno količino rentgenskih ali gama žarkov, ki preizkušance presvetijo. V primeru por ali razpok se ti žarki manj absorbirajo, kar povzroči močnejšo eksponiranje foto emulzije. Na radiogramu so ta mesta temnejša od ostalih ustreznih delov zvara.

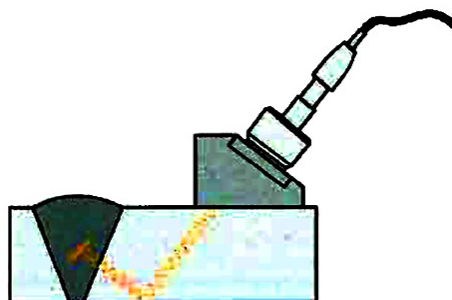
Preiskavo je možno izvajati v delavnicah ali na sami montaži objekta, vendar se kontrole pogosteje izvajajo na montaži, saj ne potrebujemo električne energije in oprema je lahka za manipulacijo.



**Slika 5.14:** Radiografska preiskava in radiografski posnetek razpoke v zvaru [22]

### Ultrazvočna kontrola

S pomočjo te kontrole ugotavljamo nepravilnosti po celotni globini materiala ali zvara, ki ga preizkušamo in je prikazana na sliki 5.15. Za tovrstno preiskavo uporabljamo ultrazvočne žarke z visoko frekvenco (0,5-15 MHz). Ob pojavu nepravilnosti (razpoke, poroznosti, vključki) se valovanje nekoliko oslabiljeno odbije nazaj, ki ga zajamemo z drugo ultrazvočno glavo. V primeru kombinirane ultrazvočne glave pa lahko žarke zajamemo z isto glavo. Odboje analiziramo in s tem odkrijemo morebitne nepravilnosti, njihov položaj in velikost.

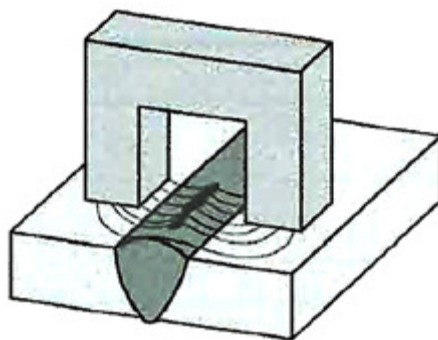


**Slika 5.15:** Princip delovanja ultrazvočne preiskave [22]

## Magnetna ali elektromagnetna kontrola

S to preiskavo odkrivamo nepravilnosti na površini ali pa tik pod njo in je uporabna samo za feromagnetne materiale. Princip preiskave z magnetnimi delci je prikazan a sliki 5.16.

Preiskavo izvajamo tako, da na površino preizkušanca naneseemo emulzijo, ki vsebuje feromagnetni prah (magnetni delci). Pri prisotni napaki se z vzpostavitvijo magnetnega polja magnetni delci odzovejo drugače, kot bi se sicer. S tem načinom je možno odkriti položaj, velikost in obliko nastale napake v zvaru. Lahko jo izvajamo z uporabo črnih magnetnih delcev na beli podlagi in so vidni pri običajni sončni svetlobi, ali pa uporabimo fluorescentne delce, vendar za njih potrebujemo še ultravijolično svetilko, ki nam omogoči vidnost teh delcev.



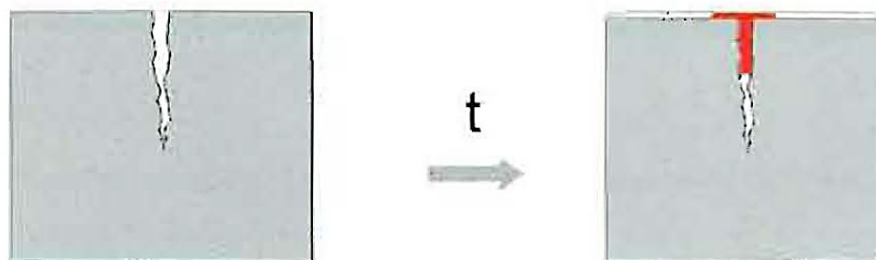
**Slika 5.16:** Princip preiskave z magnetnimi delci [22]

## Penetracijska kontrola

Pri penetracijski kontroli s pomočjo tekočih penetrantov odkrivamo izključno razpoke, ki prihajajo na površino, sicer pa je njihov izvor v notranjosti preizkušanca. Penetracijsko kontrolo prikazuje slika 5.17, z njo najpogosteje odkrivamo razpoke, poroznost ali zlepe v zvarnih spojih.

Površino, ki jo želimo preiskati, moramo najprej temeljito očistiti s sredstvom, ki je temu namenjeno. Na očiščeno površino naneseemo penetracijsko sredstvo, ki mora imeti dobro omočljivost, da prodre v notranjost ob prisotnosti napak. Po času od 15 do 30 minut,

njegovo odvečno količino odstranimo s čistilnim sredstvom in naneseemo razvijalec, ki omogoči prehod penetrantskega sredstva iz napake na površino in s tem njegovo vidnost. Razvijalec je običajno bele barve, lahko pa tudi fluorescentne, kateri pa je viden le z ultravijolično svetilko.



**Slika 5.17:** Princip delovanja penetracijske preiskave [22]

### 5.7.2 Porušne preiskave

S temi preiskavami ugotavljamo mehanske lastnosti preiskovanega objekta. Z njimi preizkušamo končne izdelke, materiale, zvarne spoje, itd.

Pri preiskavi zvarnega spoja izvedemo preizkus tako, da ga na različne načine obremenjujemo z mehanskimi silami ali ga celo porušimo. Iz dobljenih rezultatov med obremenjevanjem ali poružitvijo ovrednotimo posamezne lastnosti. Na tak način je težko preizkušati celoten objekt, zato iz njega odvezamemo le vzorec, ki ga imenujemo etalon ali epruveta, na katerem izvedemo preizkuse.

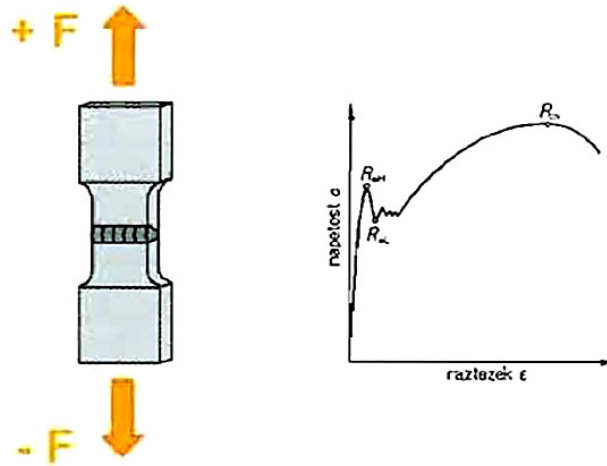
Med porušne preiskave spadajo:

- natezni preizkus,
- tlačni preizkus,
- upogibni preizkus,
- prelomni preizkus,
- preizkus udarne žilavosti,
- merjenje trdote,
- metalografska preiskava,
- preizkusi z dinamičnimi obremenitvami.

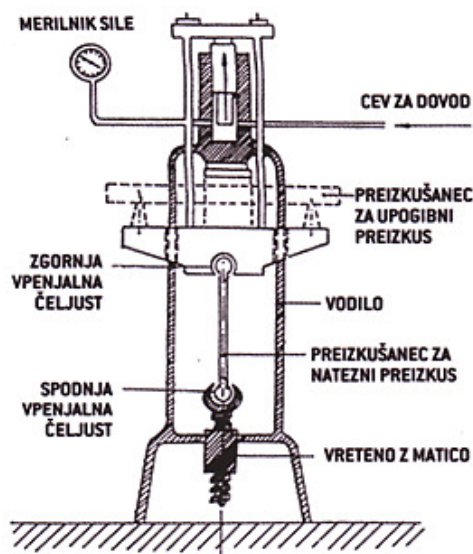
## Natezni preizkus

Pri nateznem preizkusu ugotavljamo trdnostne lastnosti kovin ali zlitin, napetosti tečenja, natezno trdnost in modul elastičnosti.

Preizkuse izvajamo na tako imenovanih trgalnih strojih (slika 5.19). Pri izvajanju preizkusa povzročimo z enakomerno naraščajočo hitrostjo obremenitve v preizkušancu enosne napetosti in linearne raztege. Preizkus lahko izvajamo do zahtevane obremenitve ali raztega, praviloma pa do pretrga preizkušanca. Iz razmerja med silo  $F$  in raztežkom  $\Delta L$  preizkušanca ugotavljamo lastnosti materiala, ki so rezultat diagrama odvisnosti med napetostjo in specifičnim raztežkom. Primer nateznega preizkusa in diagrama je prikazan na sliki 5.18.



**Slika 5.18:** Natezni preizkus [22]



Slika 5.19: Trgalni stroj [2]

### Tlačni preizkus

Z njim določamo trdnostne lastnosti materialov, ki so obremenjeni na tlak ali pa so krhki in ne prenašajo nateznih napetosti (siva litina).

Preizkušanca s pomočjo naprave stiskamo do določene višine ali pa do tiste višine, pri kateri se pojavijo prve razpoke. Napetosti izračunamo iz tlačne sile na vsakokratni preizkušanca. Na podlagi tega izrišemo diagrame tečenja, s pomočjo katerega določimo faktor utrjevanja in sposobnost materiala na plastično deformacijo.

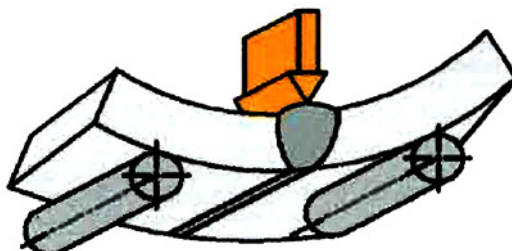
### Upogibni preizkus

Izvedba preizkusa poteka tako, da preizkušane obremenjujemo s trnom, ki je določenega premera, na sredini med dvema valjema, ki sta oddaljena za predpisano dolžino (slika 5.20).

Upogibno trdnost materiala dobimo tako, da preizkušane upogibno obremenjujemo do določenega upogiba ali pa do porušitve.



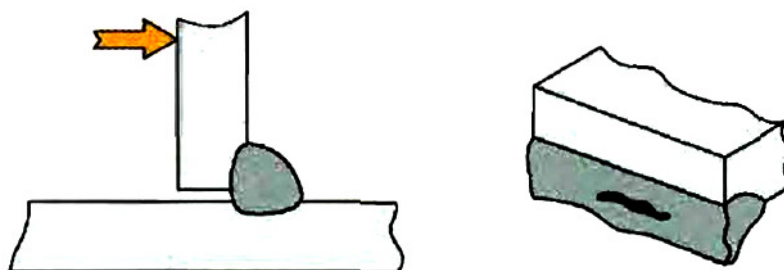
Pri preizkusu zvarnih spojev s to metodo odkrivamo predvsem zlepe, pomanjkljive spojitve in razpoke.



Slika 5.20: Upogibni preizkus [22]

### Prelomni preizkus

Pri tem preizkusu preizkušanec prelomimo z namenom, da ocenimo njegovo prelomno površino in ga prikazuje slika 5.21. Pri preizkušanju zvarjenih spojev s tem ugotovimo zmanjšano nosilnost premera spoja zaradi morebitnih napak, kot so poroznost in vključki, saj prelom nastopi praviloma na tem oslABLjenem mestu preizkušanca.



Slika 5.21: Prelomni preizkus [22]

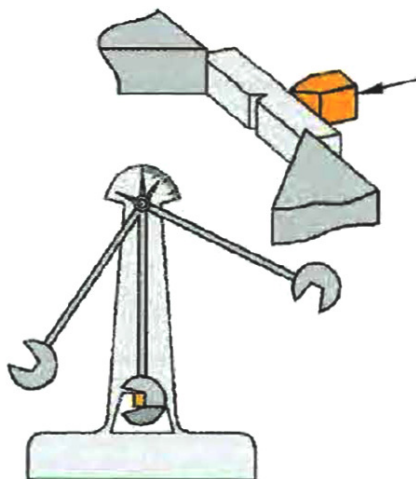
### Preizkus udarne žilavosti

Žilavi materiali so tisti, ki se pred porušitvijo močno plastično deformirajo. Žilavost izražamo z delom, ki je potrebno za prelom preizkušanca točno določenih dimenzij.

Preizkus udarne žilavosti ob zarezi, ki je narejena na preizkušancu, izvedemo z nihajnim kladivom, ki ga spustimo iz določene višine, in ta v svoji najnižji legi zadene ob

preizkušanec in ga pri tem prelomi, glej sliko 5.22. Po prelomu kladivo zaniha v nasprotno smer. Udarno žilavost določimo iz razlike višin, iz katere smo kladivo spustili in nasprotnega nihaja.

Pri večini materialov je žilavost v odvisnosti od temperature okolice preizkušanja, saj s padanjem temperature materiali po večini postanejo krhkejši.



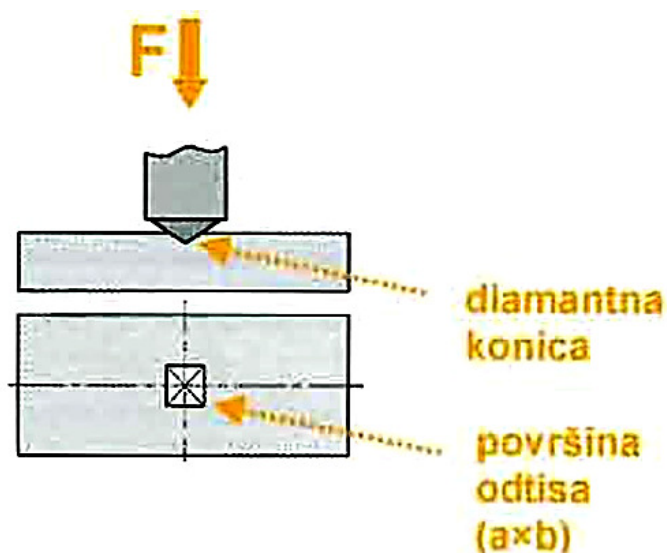
**Slika 5.22:** Preizkus udarne žilavosti [22]

### Merjenje trdote

Trdota materialov je relativna lastnost in jo ocenjujemo na podlagi primerjav. Trdoto pri kovinah in zlitinah merimo tako, da ugotavljamo odpornost proti vdiranju drugega tršega materiala v preizkušanec, ali z odbojno sposobnostjo materiala na udarce. Trdoto lahko merimo tudi na končnih izdelkih. Mesto preizkušanja je potrebno ustrezno očistiti, obrusiti, včasih tudi spolirati.

Za ugotavljanje trdote zvarnega spoja moramo pripraviti ustrezen prerez zvarnega spoja, ki ga imenujemo obrus. Trdoto merimo na varu, toplotno vplivanem območju in osnovnem materialu. Najpogostejše meritve trdote so po Vickersu, Brinellu, ali po Rockwellu. Pri merjenju trdote v zvarnih spojih običajno uporabljamo merjenje po Vickersu in je prikazano na sliki 5.23. Preizkus izvajamo tako, da vtiskamo trdo (diamantno) piramidno konico, točno določenih dimenzij in z določeno silo v material. Trdoto na to določimo na

osnovi izmerjenih dimenzij vtiska. Z merjenjem trdote zvarnih spojev ugotovimo morebitna območja, kjer bi lahko bila trdota tako velika, da bi zaradi krhkosti prišlo na tem mestu do pojava razpok in posledičnega zloma.



Slika 5.23: Princip merjenja trdote po Vickersu [22]

### Metalografska preiskava

Z metalografsko preiskavo ugotavljamo strukturne značilnosti preizkušene materiala oziroma zvarnega spoja. Rezultat preizkusa so tip strukture, vrsta ter razvrstitev strukturnih komponent, velikost kristalnih zrn ter izločkov, množina vrste, velikost ter razvrstitev nekovinskih vključkov, razpoke, pore, mikrolunkerji ter druge napake v kompaktnosti in izceje v zlitinah oziroma neenakomerna porazdelitev legirnih elementov ter nečistoč v zlitinah.

Preiskava se vedno izvaja na primerno pripravljene površini preizkušanca ali pa na njegovem prerezu pri preiskavi zvarnih spojev. Površino pripravljamo z vedno finejšim brušenjem in kasneje z jedkanjem. Mikrostrukturo kasneje opazujemo in ocenjujemo. Vzorce, na katerih to preiskavo izvajamo, imenujemo obrusi.

**Preizkusi z dinamičnimi obremenitvami**

Preizkušanece obremenjujemo s periodično ponavljajočimi obremenitvami, ki se lahko po določenih nihajih zlomijo, čeprav je bila obremenitev manjša od napetosti tečenja. Ta pojav imenujemo porušitev zaradi utrujanja. Obremenitve so lahko tlačne, natezne, upogibne in pa tudi torzijsko menjajoče. Na podlagi teh preizkusov izdelamo Wohlerjev diagram, ki podaja odvisnost nihajne obremenitve od števila nihajev, ko pride do zloma.

## 6 VARIVOST MATERIALA

### 6.1 Splošno

Varivost materiala je osnovni pogoj za uspešno varjenje in je odvisna od lastnosti materiala in tehnologije varjenja in varnosti glede zasnove konstrukcije.

Pri varnosti konstrukcije mislimo na zasnovo konstrukcije in njeno dimenzioniranje, vrsto obremenitve, debelino materiala in temperature, kateri je konstrukcija izpostavljena. Pri tem moramo upoštevati kemično sestavo, metalurške lastnosti in fizikalne lastnosti materiala.

Materialne razdelimo v štiri osnovne skupine varivosti:

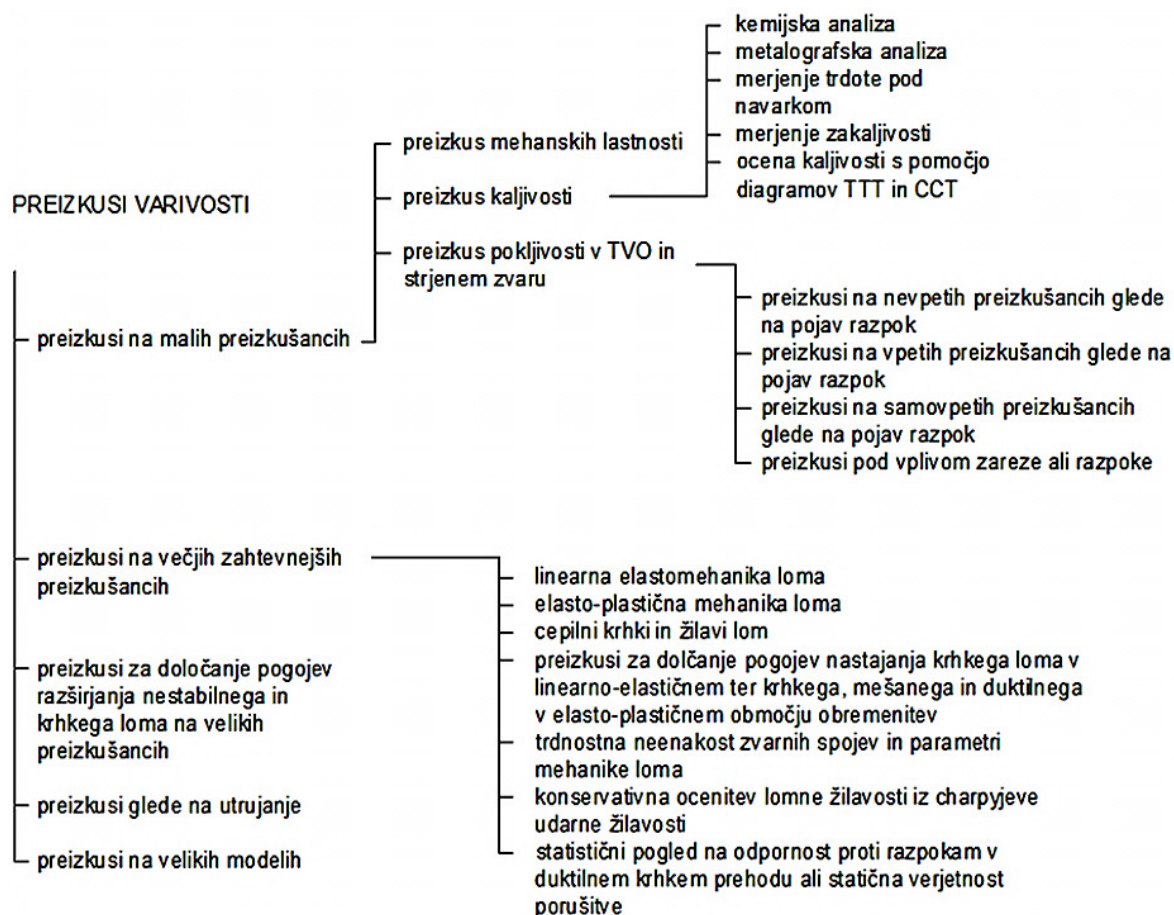
1. Materiali z zagotovljeno varivostjo. Lastnosti osnovnega materiala in lastnosti zvarov se bistveno ne razlikujejo.
2. Materiali, ki imajo dobro varivost. Karakteristika zvara ni bistveno slabša od osnovnega materiala.
3. Materiali ki imajo pogojno dobro varivost in so varivi pod določenimi pogoji (predgrevanje, posebni dodajni materiali, toplotna obdelava po varjenju).
4. Materiali s slabo varivostjo imajo slabe lastnosti materiala ali celo nesprejemljive.

Varivost pa ni odvisna samo od mehansko kemičnih lastnosti kovin, ampak tudi od:

- vrste mikrostrukture,
- občutljivosti na topnost plinov,
- nagnjenosti k oksidaciji,
- občutljivost na korozijo,
- obnašanje materiala pri visoki temperaturi,
- odzivom materiala pri hitrem segrevanju in ohlajanju,
- občutljivost na zakalitev,

- občutljivosti na utrjanje in staranje.

Preizkuse varivosti, ki jih izvajamo, so prikazani na sliki 6.1.



**Slika 6.1:** Shema različnih preizkusov varivosti

## 6.2 Varivost jekla

Pri preizkušanju varivosti jekla najprej preverimo njegovo kemično sestavo. Pod to razumemo vsebnost elementov, kot so C, Si, Mn, P in S.

Vsebnost ogljika, ki je najpomembnejši element za varivost, mora biti pod 0,22 %, in če je ta pogoj izpolnjen, lahko govorimo o dobri varivosti materiala. Vendar je varivost poleg tega še odvisna od debeline materiala, vpliva ostalih legirnih elementov, vsebnost plinov in nečistoč. To nam podaja ogljikov ekvivalent in njegova formula, ki jo predpisuje mednarodni inštitut za varjenje (IIW – ang. International Institute of Welding), je:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \left( \frac{Cr + Mo + V}{5} \right) + \left( \frac{Ni + Cu}{15} \right)$$

Glede na rezultat izraza velja:

- $C_{eq} < 0,40$  → jeklo je dobro varivo
- $C_{eq} = 0,40-0,60$  → jeklo je delno varivo
- $C_{eq} > 0,60$  → jeklo je slabo varivo

Pri določanju varivosti pa na rezultat pomembno vpliva tudi debelina elementa, katerega želimo variti. In ta pogoj je, da čim debelejša je jeklo, s tem nižjim  $C_{eq}$  ga lahko varimo. Povišanje  $C_{eq}$  in povečanje debeline materiala povzroči povišanje trdote v TVO in zvaru. Prav tako se dviga trdota z večanjem hitrosti varjenja in z večanjem debeline elementa. Glede na vrednosti  $C_{eq}$  poznamo priporočila, ki jih podaja tabela 6.1.

$C_{eq}$	predgrevanje	priporočilo
<b>0,45</b>	100°	brez posebnih ukrepov, poljubne elektrode
<b>0,45 - 0,60</b>	100° - 250°	bazične nizko vodične elektrode
<b>0,60</b>	250° - 350°	posebno nizko vodične legirane elektrode

**Tabela 6.1:** Priporočila za varjenje glede rezultata  $C_{eq}$  [9]

Te vrednosti so zgolj informativne, saj je višina predgrevanja odvisna še od več dejavnikov, kot so kemična analiza, debelina materiala (hitrosti ohlajevanja), količina  $H_2$ , vnesene energije. Glede na te parametre uporabljamo varivostne preizkuse, ki so omenjeni že v prejšnjem poglavju. Ti preizkusi so preizkusi glede na kaljivost, glede na mehanske lastnosti, preizkusi glede na pokljivost in glede na zarezni vpliv.

Pri preverjanju varivosti jekel je zelo pomembna vsebnost elementov:

- Si; njegova vsebnost zelo pomembno vpliva na varivost. Si jeklo pomirja in preprečuje izceje, s čimer nam omogoča enakomernejše in lažje varjenje jekla, zato mora biti prisoten v njem. Vsebnost Si v jeklu je običajno od 0,15 do 0,45 %,
- Mn; z dodajanjem le tega povišujemo trdnost jekla in talino očisti – dezoksidira s tem, ko veže nase O in S. S tem smo predvsem pri nizkih temperaturah povečali žilavost jekla. Normalna vsebnost Mn je v jeklu od 0,35 do 1,5 %,
- S; ker povzroča razpokljivost v vročem, je v jeklu nezaželen. Njegova vsebnost mora biti nižja od 0,05 %,
- P; povzroča krhkost in s tem slabša sposobnost oblikovanja v hladnem, zato je prav tako nezaželen. Njegova vsebnost mora biti pod 0,05 %.

Elementa P in S povzročata močno izcejanje, zato njuna skupna vsebnost ne sme presežati 0,07 %. Če je vsebnost enega od omenjenih visoka, je potrebno varjenje izvajati z bazičnimi elektrodami.

Za jeklene konstrukcije v gradbeništvu uporabljamo največ standardna konstrukcijska jekla, ki vsebujejo < 0,25 % C. Ta jekla so dobro variva in za varjenje lahko uporabljamo vse tehnologije varjenja.



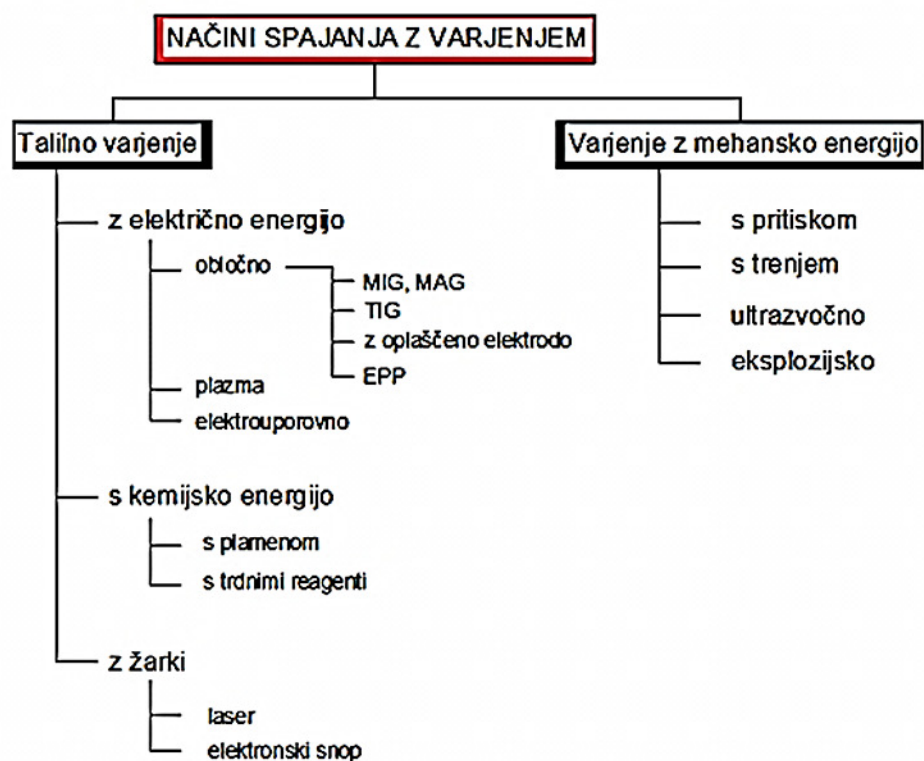
## 7 NAČINI VARJENJA IN VARILNI POSTOPKI

### 7.1 Splošno

Danes poznamo zelo veliko različnih načinov spajanja materialov z varjenjem (več kot 200), slika 7.1 prikazuje shemo najpogostejših načinov spajanja, vendar bomo mi predstavili le načine in postopke, ki se največ uporabljajo za varjenje jeklenih konstrukcij v gradbeništvu.

Ker niso vsi načini varjenja primerni za vse vrste materialov in vse vrste konstrukcij, se poslužujemo različnim načinom varjenja, ki se med seboj bistveno razlikujejo. Razlikujejo se po načinu vnosa energije v zvarni spoj, produktivnosti, možnosti avtomatizacije in drugih lastnostih. Pri izbiri načina varjenja moramo vedeti, da noben način nima v vseh pogledih najboljših lastnosti, ampak ima vsak način svoje prednosti in slabosti. Ustrezen varilni postopek izberemo na podlagi več faktorjev, kot so varivost materiala, vrste zvara in spoja, proizvodna zmožnost, stroškovni aspekt, varnostni faktorji in ostalo.

Ko govorimo o načinu varjenja, mislimo na vrsto varjenja. Kadar pa gre za točno določen postopek varjenja s točno določenim območjem vseh potrebnih varilnih parametrov, pri katerem se uporablja eden od poznanih načinov, pa govorimo o postopku varjenja.



Slika 7.1: Shema delitve najpogostejših načinov spajanja z varjenjem

## 7.2 Elektro obločno varjenje – EOJ

Pri tem viru toplote je nosilec energije električen oblok in ga uporabljamo pri mnogih različnih načinih varjenja.

Osnovne fizikalne karakteristike EOJ so:

- v električnem obloku električno energijo pretvarjamo v toploto, ki lahko nastane med dvema varjencema, med dvema elektrodama ali med elektrodo in varjencem,
- elektrode, ki jih uporabljamo v EOJ, so lahko na določene dolžine narezane palice (obložene ali gole in strženske elektrode), netaljive ali taljive (paličaste, polne žične ali tračne, ki so lahko polnjene), navite v kolut ali v obliki kolobarja.

Vsi postopki EOJ pa imajo skupne naslednje fizikalne lastnosti:

- vzpostavitev in vzdrževanje električnega obloka,

- varjenje brez dodajnega ali z dodajnim materialom s prehajanjem raztaljene kovine skozi oblok v talino,
- taljenje in kristalizacija kovine,
- medsebojno učinkovanje kovinske taline z raztaljeno žlindro ali plinasto okolico.

## **Oblok**

Varilni oblok je del tokokroga v varilnem procesu, pri katerem se električna energija, ki jo uporabljamo za taljenje dodajnega materiala, osnovnega materiala in plašča elektrode, pretvarja v toploto.

Ob stiku elektrode in osnovnega materiala konec elektrode zažari, čemur je vzrok kratki stik. Pri gorenju obloka kovina, ki je razžarjena oddaja elektrone, kateri se pospešeno gibljejo od negativnega k pozitivnemu polu, zaradi varilnih napetosti. Ti elektroni s trki povzročijo disociacijo in ionizacijo nevtralnih molekul in atomov plinov in kovin, ti so vzrok za nastanek negativnih in pozitivnih ionov ter elektronov, ki so v obloku nosilci električnega naboja. Električni oblok je lahko odkrit na zraku, lahko je v zaščitni atmosferi ali pa je zakrit s praškom ali varilno letvijo.

## **Sile v obloku**

Sile, ki nastopajo v obloku in pomembno vplivajo na kvaliteto zvara, so:

- gravitacijske sile,
- mehanske sile zaradi gibanja žice in gorilnika,
- elektrostatične sile,
- elektrodinamične sile,
- sile zaradi pretoka plina,
- sile nastajajočih plinov in par,
- površinska napetost,
- kemijske sile,
- viskoznost.

## Prehodi materiala v obloku

Razlikujemo tudi med prehodi materialov, na katerega zelo pomembno vplivajo parametri varjenja in atmosfera, hitrost dodajanja žice, oddaljenost gorilnika, dolžina prostega konca žice, hitrost varjenja, varilni položaj, itd. Razlikujemo med naslednjimi osnovnimi oblikami prehajanja materiala:

- **kratkostični prehod;** primeren je za tanjše pločevine, prisilne lege, za korenski varek. Zaradi povečanja toka se v trenutku kratkega stika pojavi brizganje taline. Kovina se v kratkem času stali in segreje do vrelišča. Eksplozija nastopi, če pride do prekinitve obloka pri odcepitvi kapljice od elektrode, to pa lahko preprečimo tako, da se v tem trenutku tok zniža in se tako kapljica lahko odtali in preide v talino brez brizganja,
- **mešani prehod;** nastopi pri povečanju toka. Ne prihaja do pršečega prehoda, saj je še tok premajhen. Kapljice so velike in prihaja do močnega brizganja, ker pa se pri varjenju temu hočemo izogniti, to storimo s prehodom na impulzni način dovajanja toka,
- **pršeči prehod;** je značilen za MAG postopek in se pojavi pri velikih tokovih in ustrezni plinski mešanici. Hitrost varjenja in talilni učinek sta zelo velika. Pojav obrizgov je manjši kot pri kratkostičnem prehodu,
- **rotirajoči prehod;** nastopi, če se tok in napetost še povečata. Zaradi velikih napetosti in tokov pri MAG postopku pride do rotiranja obloka in intenzivnega taljenja žice,
- **pulzni prehod;** nastane, ko ob nizkem osnovnem toku občasno delujejo tokovni impulzi, ki stalijo vrh elektrode v talino. Vsebnost CO<sub>2</sub> v plinu ne sme presegati 25 %. Ta način omogoča izreden nadzor nad procesom, vnesene energije so nizke, obrizgov je malo.

## Načini vzpostavitve obloka

- **kratkostični;** na tak način vzpostavimo oblok pri REO, MIG/MAG, EPP varjenju, le redko pa pri TIG. Pri REO in TIG nastane oblok z odmikom elektrode, pri MAG pa z odgorevanjem elektrode pri kratkem stiku z naletom. Novejše aparature za MIG/MAG pa omogočajo vzpostavitev obloka tudi z odmikom,
- **visokofrekvenčni in visokonapetostni;** na tak način vzpostavimo oblok, ko nam je preprečen direkten kontakt elektrode z varjencem ali v primeru, ko ne smemo vzpostaviti direktnega stika z varjencem,
- **s kovinsko volno;** s pomočjo le te vzpostavimo oblok pri EPP postopku. Vzpostavimo ga tako, da med elektrodo in varjenec vstavimo kovinsko volno, ta pa pri majhnih tokovih zažari in pomaga pri ionizaciji v obloku,
- **RPI (ang. Reverse Polarity Ignition);** na tak način vzpostavimo oblok pri TIG postopku. Pri tem postopku s smerjo toka proti elektrodi dosežemo intenzivno segrevanje elektrode, ki spremeni polariteto in tako ogreto lažje odda elektrone,
- **ostali načini;** pojavljajo se pri avtomatskih ali polavtomatskih postopkih varjenja.

## 7.3 Ročno elektro obločno varjenje z oplaščeno elektrodo (REO)

### 7.3.1 Splošno

Za ročno elektro obločno varjenje (REO) je značilno, da za varjenje uporabljamo taljivo oplaščeno elektrodo. Za taljenje osnovnega in dodajnega materiala uporabljamo električno energijo, ki se pretvarja v toploto. Primer REO varjenja prikazuje slika 7.2.

Električni oblok pri REO vzpostavimo med taljivo elektrodo in varjencem, ki ga vžigamo s kratkim stikom. Pri vzpostavljenem obloku se talijo osnovni material ter jedro in plašč elektrode. Talilna kopel, ki je zaščitena pred zunanjimi vplivi z žlindro, nastane iz staljene elektrode in njenega plašča in staljenim osnovnim materialom. Žlindra ima poleg tega, da zaščiti zvarno kopel in strjeni zvar pred zrakom, tudi pomembno funkcijo pri fizikalno-kemijskih procesih v zvarni talini.

REO varjenje je uporabno za:

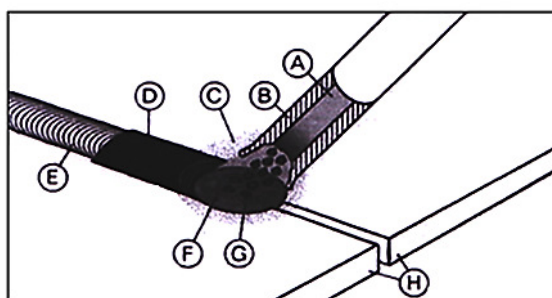
- gradnjo in montažo jeklenih nosilnih konstrukcij,
- rezervoarje, tlačne posode in cevovode,
- posamično ali maloserijsko proizvodnjo,
- za jeklene materiale in aluminij,
- domačo uporabo.

Prednosti REO varjenja:

- varimo lahko v zaprtih prostorih, kot tudi na prostem,
- varimo lahko v vseh legah,
- manjši investicijski stroški,
- prilagodljivost in enostavnost postopka,
- kvalitetni zvari.

Slabosti REO varjenja:

- majhna produktivnost (menjavanje elektrod, čiščenje zvarov),
- slab izkoristek dodatnega materiala (ostanek elektrode ob prijemališču držala elektrode),
- prekinitve zvarov ob menjavanju elektrod.

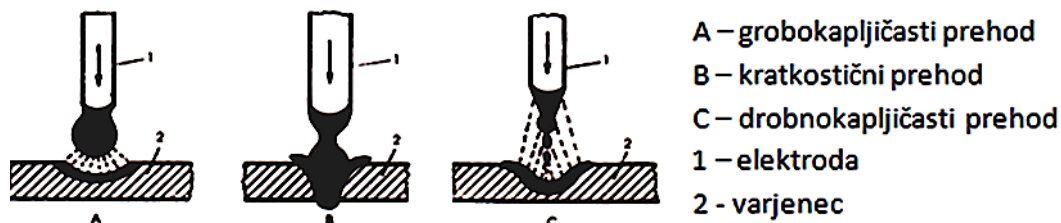


- A – kovinsko jedro
- B – oplaščenje
- C – plin iz oplaščenja
- D – strjena žindra
- E – var
- F – talina
- G – kovinske kapljice s talilom
- H – osnovni material

**Slika 7.2:** REO varjenje [5]

Med procesom varjenja material elektrode prehaja v zvar v obliki kapljic. Velikost kapljic in njihovo število nastajata v odvisnosti od električnih sil, morebitnih kemijskih reakcij in

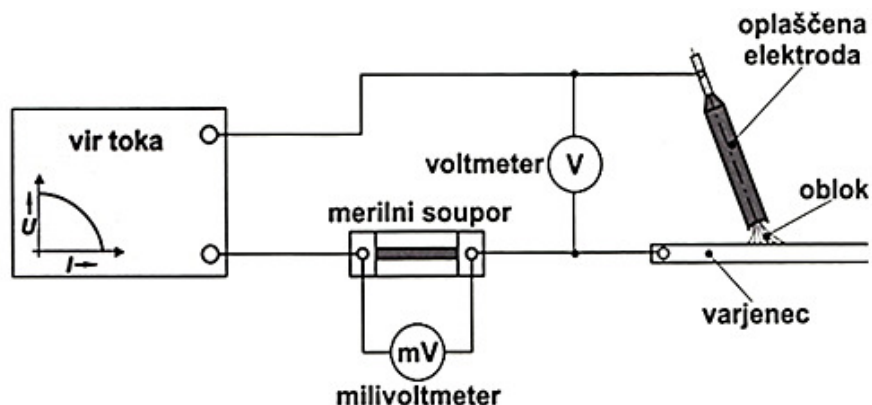
sestave plašča. Lahko so v obliki grobih ali drobnih kapljic, kar je razvidno iz slike 7.3, njihova oblika pa je odvisna od vrste plašča in jakosti toka.



Slika 7.3: Prehod kapljic v odvisnosti od jakosti električnega toka [4]

### 7.3.2 Varilna in merilna oprema

Pri REO uporabljamo varilno opremo z instrumenti za merjenje varilnega toka in obločne napetosti, kot jo prikazuje slika 7.4.



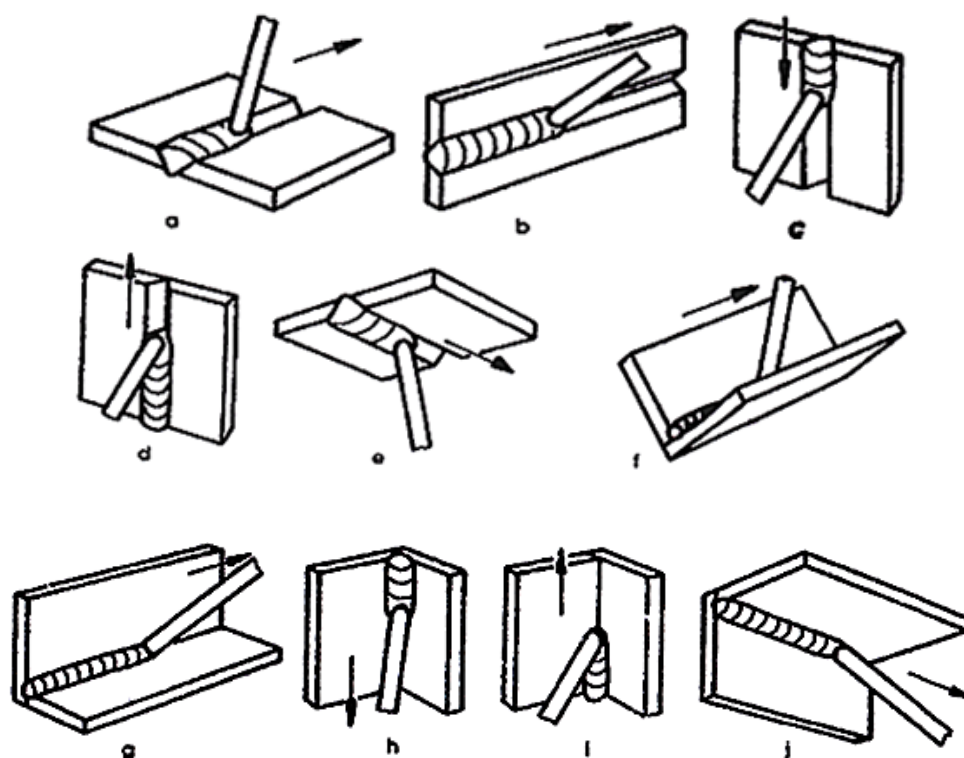
Slika 7.4: Shematski prikaz naprave skupaj z merilno opremo za REO [11]

### 7.3.3 Lege varjenja

V splošnem lahko z uporabo oplašene elektrode varimo v vseh legah, ki so prikazane na sliki 7.5. Proizvajalec mora podati oznake elektrod, iz katerih je razvidno, za katere lege je elektroda primerna.

Varilec je pri montažnih delih prisiljen variti v vseh možnih legah, v proizvodnji pa je njegovo delo nekoliko olajšano, saj mu je omogočeno obračanje varjenca. Pri varjenju vodi

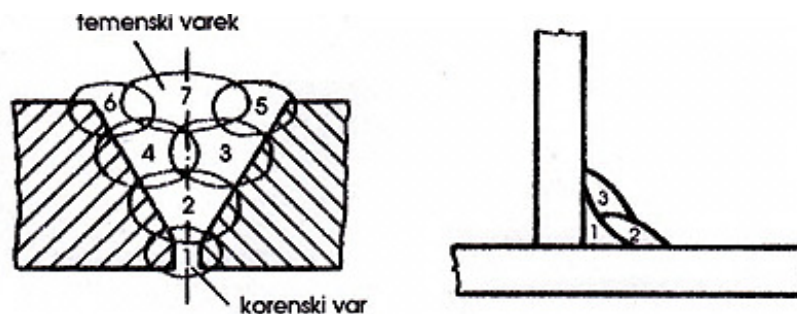
elektrodo v smeri varjenja in s tem oblikuje zvar, pri tem niha z elektrodo prečno na smer varjenja in tako zapolnjuje zvarni žleb. Preširoka talina je posledica prevelikega prečnega nihanja, ki povzroči, da plini in žlindra ne morejo ščititi taline pred zrakom. Prečno nihanje ni potrebno pri varjenju tanjših pločevin, pri širših žlebah pa je obvezno, da oblok stali robove osnovnega materiala. Če varilec ne uspe zapolniti žleba z enim varkom, opravi to z več varki. Vrstni red varkov je prikazan na sliki 7.6.



- |                                     |                                         |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| a) Vodoravna lega                   | f) Kotni zvar v vodoravni legi          |
| b) Vodoravna lega na steni          | g) Kotni zvar v vodoravni legi          |
| c) Navpična lega na steni – navzdol | h) Kotni zvar v navpični legi – navzdol |
| d) Navpična lega na steni – navzgor | i) Kotni zvar v navpični legi – navzgor |
| e) Nadglavna lega                   | j) Kotni zvar v nadglavni legi          |

**Slika 7.5:** Zvar v različnih legah in smereh [4]





Slika 7.6: Vrstni red varkov[4]

Zaradi možnosti, da je pri izvajanju prvega varka stekla žindra v špranjo, korenski verek odstranimo in ga ponovno zavarimo. Kadar pri varjenju vodoravnih kotnih zvarov, pločevini nista enakih debelin, varilec nagne elektrodo proti tanjši, s tem oblok zajame debelejšo pločevino in ji tako dovaja več toplote. V primeru istih debelin pa drži varilec elektrodo simetrično med pločevinama.

#### 7.3.4 Osnovni material

S postopkom REO lahko varimo večino jekel. Za varjenje nelegiranih konstrukcijskih jekel z vsebnostjo ogljika pod 0,22% ni potrebno predgrevanje, pri jeklih z višjo vsebnostjo ogljika pa je potrebno predgrevanje na 100 – 200 °C, pri visokotrčnih in poboljšanih jeklih pa je še poleg predgrevanja potrebno po varjenju še žariti.

#### 7.3.5 Dodajni material – elektrode

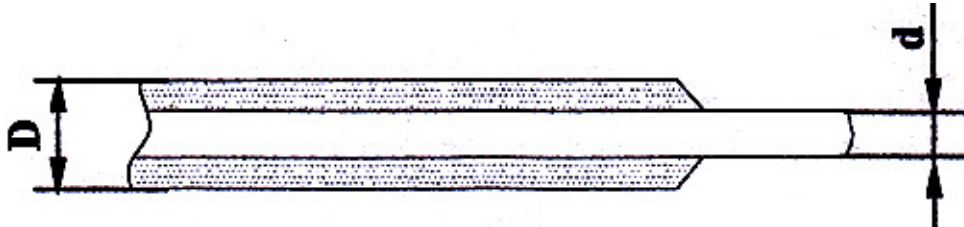
V splošnem delimo elektrode na gole, ki so danes le malo v uporabi in na strženske ter oplaščene elektrode, ki jo prikazuje slika 7.7.

##### Strženske elektrode

So sestavljene iz stržena, ki vsebuje prah in je v sredini elektrode. Ta služi za vzpostavitev obloka in njegovo stabilizacijo, za metalurške procese v talini zvara in zaščito zvara. Mogoče jih je kriviti in so primerne za vse lege varjenja.

## Oplaščene elektrode

Oplaščene elektrode (slika 7.7) so sestavljene iz kovinskega dela (jedro ali cev) in polnila (plašč ali stržen). Praviloma so sestavljene iz kovinskega jedra in oplaščanja.



Slika 7.7: Oplaščena elektroda [5]

Funkcija jedra elektrode:

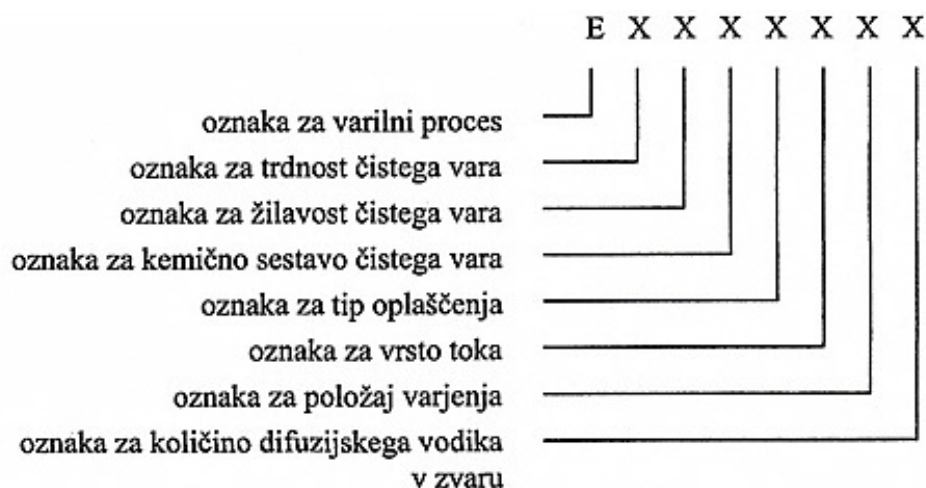
- prevaja električni tok,
- vzpostavi in vzdržuje električni oblok,
- je vir dodajnega materiala,
- od njega so odvisne mehanske in kemijske lastnosti vara.

Funkcije plašča elektrode so:

- olajša vzpostavitev obloka in ga stabilizira,
- tvori pline, ki ščitijo talino in var pred atmosfero ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ),
- tvori žlindro, ki fizično ščiti talino zvara,
- metalurško deluje na zvar (talino dezoksidira, pomirja, legira, veže nečistoče, odplinja),
- poveča izkoristek elektrode,
- vpliva na način prehoda materiala v obloku,
- oblikuje teme zvara,
- vpliva na ohlajanje zvara

## Oznake elektrod

Pomen oznak oplaščenih elektrod za varjenje konstrukcijskih jekel razlaga slika 7.8.



**Slika 7.8:** Označevanje oplaščenih elektrod za varjenje konstrukcijskih jekel [5]

Glede na tip oplaščenja delimo elektrode na:

- A – kisle elektrode** ; primerne so za domačo in obrtniško rabo, za industrijsko pa nekoliko manj, zaradi nižjih mehanskih lastnosti. Niso primerne za varjenje jekel z višjo vsebnostjo C, prav tako niso uporabne za varjenje v prisilnih legah. Uporabne so za varjenje malolegiranih jekel do natezne trdnosti  $500 \text{ N/mm}^2$ .
- B – bazične elektrode** ; primerne so za jekla za nizke temperature, z njimi varimo jekla z višjim deležem C in mikrolegirana drobnozrnata jekla, legirana jekla in visokolegirana jekla. Zvari imajo dobre mehanske lastnosti, predvsem žilavost in so odporni na vročo pokljivost. S temi elektrodami je možno variti v vseh položajih.

- C – celulozne elektrode** ; z njimi lahko premostimo velike razmake v korenu vara. Ker imajo te elektrode »močan« oblok, z njimi dosežemo globok uvar. Primerne so za varjenje korenskih varkov pri cevovodih. Ustrezen položaj za te elektrode je vertikalno navzdol. Niso pa primerne za zahtevnejša jekla in za delo v zaprtih prostorih, saj izgoravanje elektrode tvori ogromno dimnih plinov.
- O – oksidativne elektrode** ; z njimi nam je omogočeno varjenje estetskih zvarov. Njihove slabosti so, da zvari niso odporni na vročo pokljivost, žilavost varov je slaba. Zaradi številnih pomanjkljivosti te elektrode praktično danes niso več v uporabi.
- R – rutilne elektrode** ; imajo zelo stabilen oblok, ki ga je enostavno prižgati. Z njimi lahko varimo v vseh legah in tudi dobro premoščajo razmake v korenu zvara. Nagnjenost k toplim razpokam je manjša kot pri kislih elektrodah. Zvari imajo dobro žilavost in trdnost. Ker imajo dobre varilno tehnične lastnosti, so najbolj razširjene oplaščene elektrode.
- S – specialne elektrode** ; uporabljajo se za podvodno varjenje, žlebljenje, vezanje, pogrevanje.
- RB, AB elektrode** ; elektrode mešanega tipa.

Oplaščene elektrode se po debelini oplaščenja delijo na:

- tanko oplaščene (  $D < 1,2 d$  ),
- srednje debelo oplaščene (  $D = 1,2 - 1,4d$  ),
- debelo oplaščene (  $D > 1,4d$  ).

## 7.4 Varjenje v zaščiti aktivnega plina CO<sub>2</sub> (MAG)

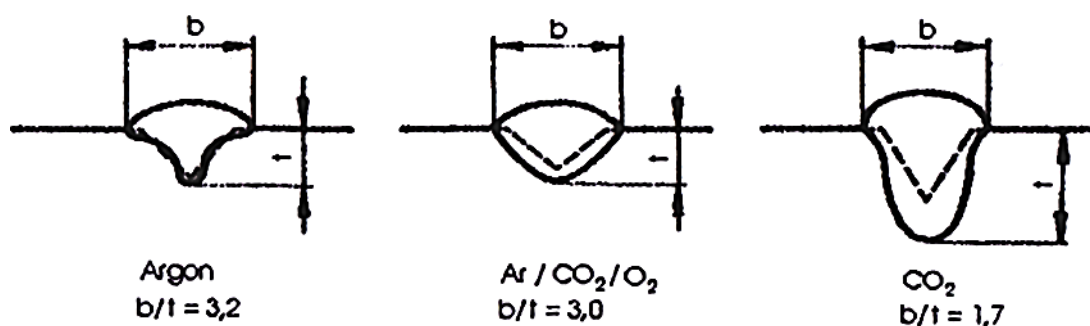
### 7.4.1 Splošno

MAG – ang. Metal Active Gas

MAG postopek je uporaben za varjenje vseh vrst ogljikovih konstrukcijskih in drugih jekel. Močno legiranih jekel pa s tem postopkom ne varimo, prav tako ne smemo variti aluminija, ker CO<sub>2</sub> z njim reagira.

Ker s tem postopkom varjenja dosežemo globok uvar, lahko brez priprav robov varimo pločevine do debeline 6 mm. V primeru varjenja iz obeh strani pa lahko varimo brez priprave robov do debelin 12 mm.

Na podlagi vrste osnovnega materiala, ki ga varimo, izberemo primeren dodatni material in ustrezno sestavo mešanice plina. V vsaki mešanici mora biti nekaj odstotkov CO<sub>2</sub>, da lahko govorimo o MAG varjenju. Poleg plina CO<sub>2</sub> pa kot aktivni plin lahko uporabimo tudi mešanice plinov, kot so: Ar + O<sub>2</sub>, Ar + CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. Vsaka mešanica od naštetih vpliva drugače na varilne pogoje. Slika 7.9 prikazuje obliko zvara v odvisnosti od vrste zaščitnega plina.



Slika 7.9: Oblika zvara v odvisnosti od vrste zaščitnega plina [4]

Naloge plinov so, da pred atmosfero ščitijo talino in prosti konec žice z raztaljeno konico. CO<sub>2</sub> ima močan vpliv na način prehajanja materiala v električnem obloku. Njegova vsebnost preprečuje tudi nastajanje CO v kapljici na koncu žice in v talini vara, s tem pa zmanjša možnost nastajanja poroznosti.

Prednosti varjenja v zaščiti CO<sub>2</sub> so:

- bolj ekonomičen postopek kot pri varjenju v zaščiti drugih plinov,
- velika hitrost varjenja zaradi velike hitrosti taljenja žice,
- zvar ima dobre mehanske lastnosti in globok uvar,
- varjenje je možno v vseh legah,
- čiščenje zvara ni potrebno,
- možnost avtomatizacije in robotizacije postopka.

Oblok gori med tanko žico in varjencem v zaščiti plina CO<sub>2</sub>. V oblok neprekinjeno dovajamo žico, ki je navita na kolut. Ta se v obloku tali in prehaja v talino vara v obliki ločenih raztaljenih kapljic. Mednarodni inštitut za varjenje klasificira prehode materiala na štiri skupine:

- kapljičasti prehod,
- prehod ob delovanju reaktivnih sil,
- eksplozijski prehod,
- kratkostični prehod.

Prednost MAG varjenja pred REO varjenjem je predvsem v produktivnosti, ki še je večja, če postopek popolnoma avtomatiziramo. Ostale prednosti pred REO varjenjem pa so še: globlji uvari, lažja priučitev varilcev, ni potrebno menjavati elektrod, hitrejše in enostavnejše odstranjevanje žlindre.

Pri varjenju v zaščiti CO<sub>2</sub>, se večkrat pojavi nastanek por v zvaru. Najpogostejši vzroki za nastanek por so:

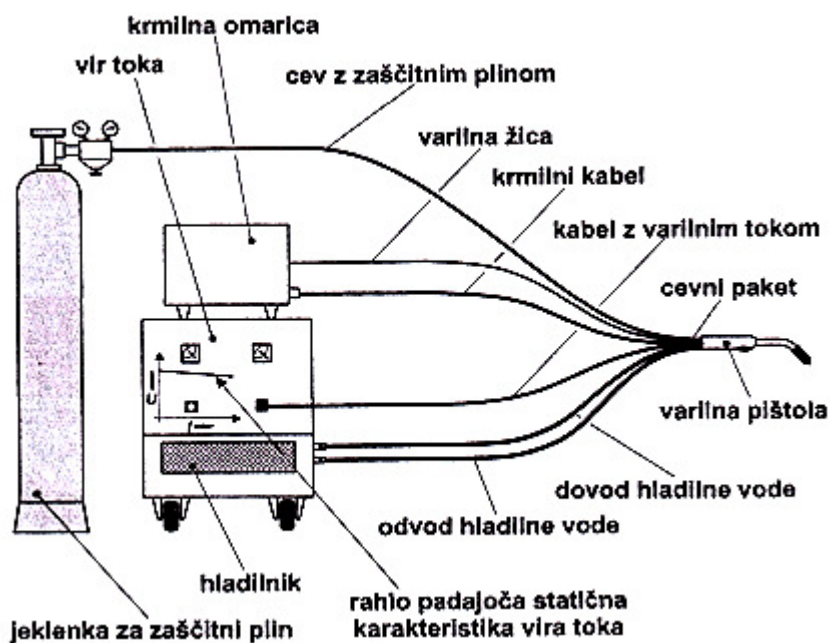
- premajhna količina dezoksidacijskih sredstev v varilni žici,
- slabo očiščeni robovi zvarov,
- CO<sub>2</sub> vsebuje vodno vlago,
- CO<sub>2</sub> vsebuje N ali pa plin ne pokriva vse taline in tako ima dušik iz zraka dostop do nje.

Rezultat pravilne izvedbe MAG postopka in nastavljenih parametrov so brezhibni zvari z dobro trdnostjo, žilavostjo in nepropustnostjo.

### 7.4.2 Oprema za MAG varjenje

Standardna naprava za ta postopek varjenja je sestavljena iz varilnega usmernika s hladilno enoto, ki jo imajo naprave z višjimi jakostmi tokov, krmilne omarice z dodatnim materialom (žica navita na kolut), sistemom za pogon varilne žice, ventila za dovajanje zaščitnega plina, cevne paketa z gorilnikom (s kontaktno in plinsko šobo) in iz jeklenke z zaščitnim plinom CO<sub>2</sub>, ki je shranjen v tekočem stanju. Opremo za MAG varjenje prikazuje slika 7.10.

Danes se na trgu pojavljajo tudi malo drugačne naprave za MAG varjenje, ki olajšajo varjenje, znižajo brizganje, povečujejo kakovost zvarov in omogočajo varjenje najrazličnejših materialov.



Slika 7.10: Shematski prikaz opreme za MAG varjenje [11]

### 7.4.3 Dodajni material

Kot dodajni material pri MAG postopku uporabljamo tanke masivne žice in/ali tanke strženske žice. Pri industrijskem varjenju varimo z žicami premerov od 0,6 do 2,4 mm, največkrat pa z žicami premerov od 1,0 do 1,2 mm.

Strženska žica je navita v kolut in je gola. V sredini se nahaja stržen, ki ima podobno kemično sestavo kot plašč pri oplaščeni elektrodi. Delimo jih glede na izdelavo, vrsto zaščite med varjenjem, sestavo stržena, namen uporabe, po obliki in glede na varilni postopek.

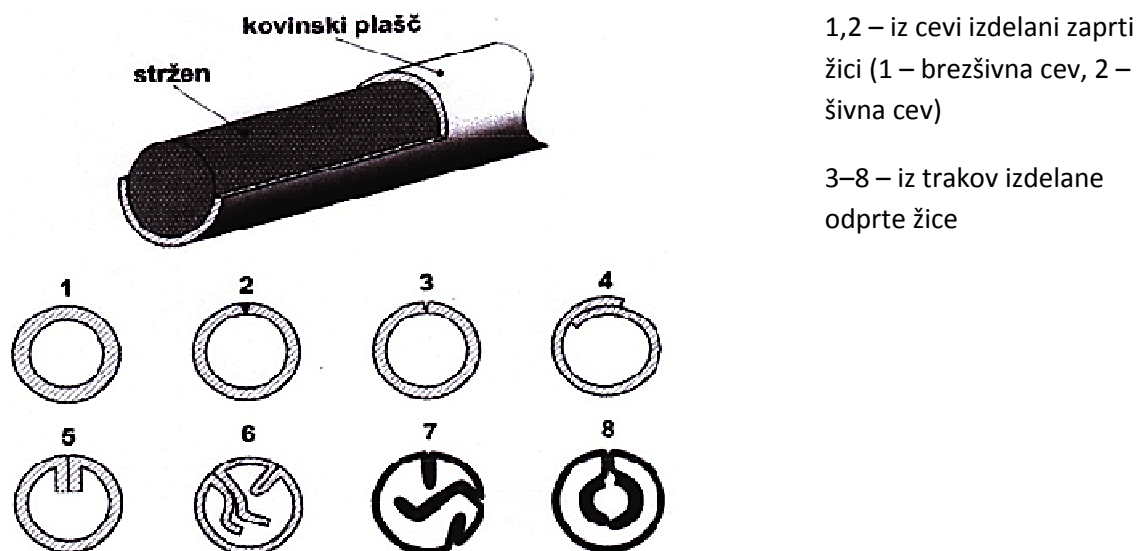
S strženskimi žicami imamo možnost avtomatiziranega varjenja, z njimi dosegamo boljšo kvaliteto vara in večjo produktivnost.

Funkcije stržena so:

- lajšajo vžig obloka in ga stabilizirajo,
- dezoksidira in legira talino vara,
- ščiti raztaljeni dodajni in osnovni material in varilni oblok pred atmosfero,
- v mnogih primerih poveča produktivnost.

Slika 7.11 prikazuje prečne preseke različnih tipov strženskih žic in njen vzdolžni presek.

Produktivnost še lahko povečamo, če uporabimo žico, ki v strženu vsebuje kovinske elemente (železov prah).



**Slika 7.11:** Prečni presek različnih tipov strženskih žic in njen delni vzdolžni presek [11]



Prednosti strženskih žic pred masivnimi:

- kvaliteta zvarov je enaka kot pri REO postopku in boljša kot pri MAG postopku z masivnimi žicami,
- večja produktivnost,
- večje tokovne obremenitve,
- hitro strjevanje,
- manjša poroznost,
- manj zleпов,
- manj obrizgov tudi pri varjenju v čistem CO<sub>2</sub>,
- manj občutljiva na nečistoče zvarnega mesta,
- lepši izgled zvara,
- manj zajed,
- primerna za vse položaje,
- velika stabilnost obloka,
- enostavnejše odstranjevanje žindre,
- žice polnjene z metalnim prahom nimajo žindre,
- dober uvar in prevaritev,
- debelejši kotni varki,
- dobra žilavost,
- manjša nevarnost razpok,
- v primeru zaprte žice je nizka vsebnost vodika.

## 7.5 Varjenje v zaščiti nevtralnega plina (MIG)

### 7.5.1 Splošno

MIG – ang. Metal Inert Gas

Pri tem postopku varimo z odkritim oblokom, ki gori med kovinsko elektrodo in varjencem in je zaščiten z nevtralnimi plini, ki ne reagira z drugimi elementi. Ta plin je argon, poleg njega pa lahko uporabljamo tudi plin helij.

Prehod materiala v obloku poteka s prostimi kapljicami, ki so lahko grobe ali fine, možen pa je tudi kratkostični prehod.

MIG postopek uporabljamo za varjenje močno legiranih jekel, lahke kovine in njihove zlitine, baker, nikelj in njegove zlitine večjih debelin. Za varjenje navadnih konstrukcijskih jekel pa tega postopka ne uporabljamo, saj je varjenje v zaščiti argona predrago.

Varjenje je hitro, saj je gostota električnega toka pri tem postopku varjenja velika, kar povzroča hitro taljenje žice. Hitrost varjenja pa še lahko povečamo, če postopek popolnoma avtomatiziramo.

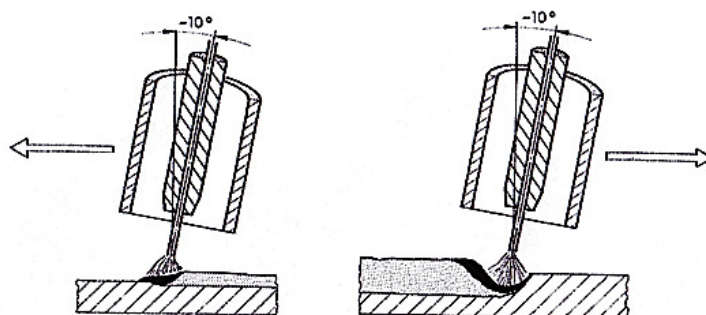
S postopkom MIG lahko varimo v levo ali desno smer, pri čemer mora varilec paziti, da drži gorilnik čimbolj pravokotno na zvar, glej sliko 7.12. Večji odklon od  $10 - 15^\circ$  lahko povzroči nezadostno pokrivanje taline z zaščitnim plaščem argona.

Varjenje v levo:

- varilcu je omogočen boljši pregled nad zvarnim žlebom, vendar zvar, ki smo ga pravkar izdelali, segreva gorilnik in roko varilca,
- plitvejši uvar,
- večja hitrost varjenja.

Varjenje v desno:

- globlji uvar,
- argon dalj časa ščiti talino (nekoliko v desno nagnjen gorilnik).



Slika 7.12: Smeri varjenja in nagibanje gorilnika [4]

Rezultat varjenja po MIG postopku so kakovostni zvari, ki imajo veliko trdnost in so brez vključkov.

### 7.5.2 Oprema in dodajni material

Varilno opremo pri MIG postopku sestavljajo popolnoma enake komponente kot za MAG postopek (slika 7.9), le da imamo zraven jeklenke s CO<sub>2</sub> še jeklenko z argonom.

Kot dodajni material uporabljamo žice, ki so navite na kolut in so približno enakega materiala kot je osnovni material.

## 7.6 Varjenje z netaljivo elektrodo (TIG)

### 7.6.1 Splošno

TIG – ang. Tungstan Inert Gas

Za ta postopek je značilno, da obloki gori med elektrodo iz volframa in varjencem v zaščitni atmosferi nevtralnega plina (argon). Varjenje TIG uporabljamo predvsem za varjenje visokolegiranih nerjavnih jekel in barvnih kovin. Ker je vnos toplote majhen, je s tem postopkom mogoče variti tudi zelo tanke pločevine. Uporabljamo ga najpogosteje za varjenje cevovodov, varjenje tankih materialov, izdelavo korenskih varkov, itd.

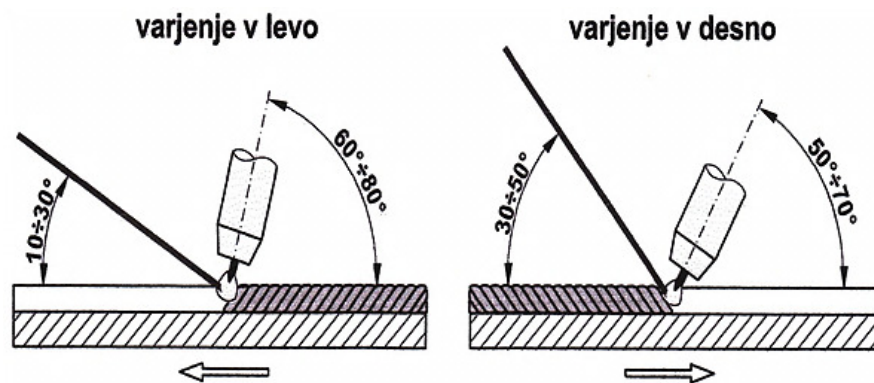
Postopek izvajanja je lahko ročni, polavtomatski, avtomatski in tudi robotiziran. Pomanjkljivosti TIG varjenja so: zahtevnejša tehnika varjenja, majhna produktivnost, drage naprave.

Pri TIG varjenju poznamo tri osnovne načine vzpostavitve obloka:

- visokofrekvenčni vžig,
- visokonapetostni vžig,
- kratkostični vžig (manj primeren zaradi obrabe elektrode in onečiščenja zvara).

Priprava robov pločevin za ta postopek varjenja je enaka kot pri drugih postopkih varjenja. Z enim varkom varimo elemente do debeline 6 mm, debelejše pa z več varki. Pri varjenju debelejših materialov se v praksi vari s TIG postopkom le korenski varek, polnilne varke varimo z MIG ali REO postopkom varjenja.

V splošnem pri TIG varjenju varimo v levo in desno (slika 7.13), ročno pa je možno variti v vseh legah.



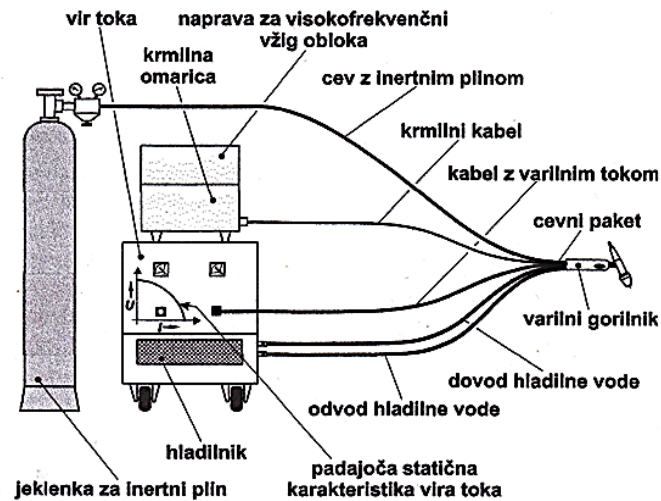
Slika 7.13: Varjenje v levo in desno [11]

## 7.6.2 Oprema za varjenje

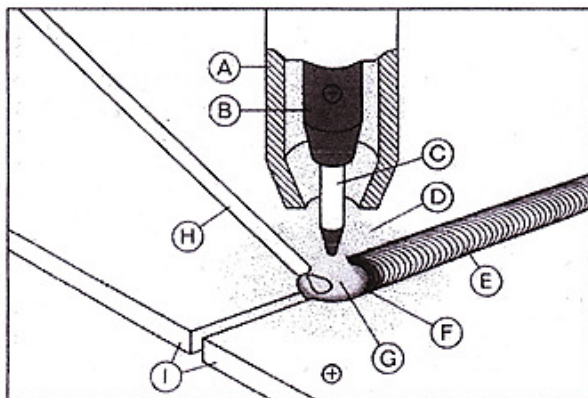
Varilno opremo za TIG varjenje sestavljajo:

- varilni izvor,
- visokofrekvenčna naprava za vzpostavitev oblaka,
- cevni paket,
- sistem za krmiljenje varilnega toka, pretoka zaščitnega plina, hladilne tekočine in gorilnika.

Natančneje opremo prikazuje slika 7.14, gorilnik za TIG varjenje pa je prikazan na sliki 7.15.



Slika 7.14: Varilna oprema za TIG varjenje [11]



- A – plinska šoba
- B – kontaktna šoba
- C – neporabljava W elektroda
- D – zaščitni plin
- E – var
- F – talina
- G – oblok, prehod materiala
- H – dodajni material
- I – osnovni material

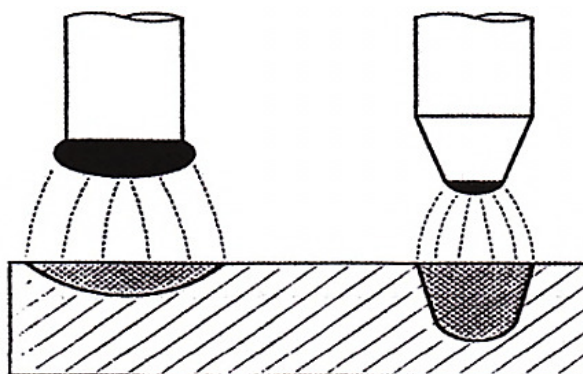
Slika 7.15: Gorilnik pri TIG varjenju [5]

### 7.6.3 Dodajni material

Pri TIG varjenju izbiramo dodajni material glede na vrsto oziroma kemijsko sestavo osnovnega materiala. Dodajni material je lahko v obliki kratkih palic ali tudi žic dolžine do 1000 mm in premera od 1,0 do 4,0 mm. V primeru avtomatiziranega varjenja pa je lahko žica navita na kolut. Tanjše pločevine lahko varimo tudi brez dodajnega materiala.

Netaljiva elektroda (večinoma volframova) pri TIG varjenju služi le za vzdrževanje varilnega obloka. Volframova elektroda je legirana z oksidi, ki ji povečajo tališče.

Na obliko uvara pomembno vpliva oblika konice elektrode (slika 7.16), ki je odvisna od vrste električnega toka in polaritete na elektrodi. Pri tanjši elektrodi dobimo ožji in stabilnejši oblok. Pri oblikovanju (ostrenju) konice moramo način brušenja izvajati pazljivo. Konico moramo brusiti vzdolžno in ne krožno, s čim bolj gladkim brusom. Danes so na tržišču zelo preproste brusne naprave, s katerimi izvedemo kakovostno brušenje volframovih elektrod. Kakovostno brušenje zagotovi stabilno gorenje obloka in s tem kakovostni var.



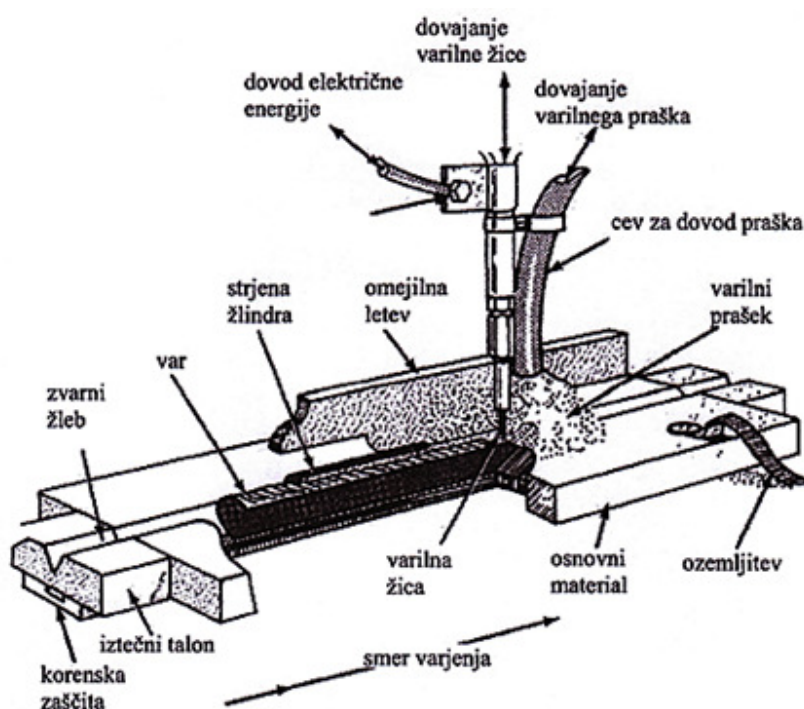
**Slika 7.16:** Vpliv oblike konice elektrode na obliko uvar [11]

## 7.7 Obločno varjenje pod praškom (EPP)

### 7.7.1 Splošno

EPP – elektroprevoden prašek

Postopek EPP je eden od najzmogljivejših in tudi najproduktivnejših izmed obločnih varjenj in se izvaja avtomatizirano. Slika 7.17 shematsko prikazuje varjenje pod praškom.

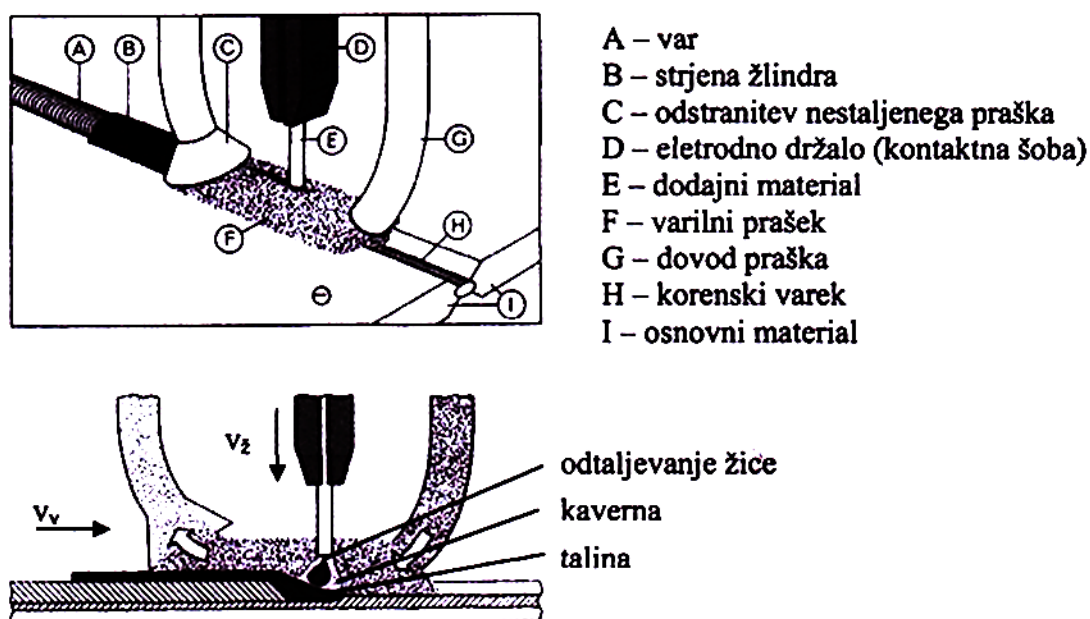


Slika 7.17: Shematski prikaz varjenja pod praškom [5]

S tem postopkom varjenja lahko varimo večino jekel. Nelegirana jekla, ki imajo vsebnost ogljika do 0,22 %, je možno variti brez predgrevanja. Jekla z višjo vsebnostjo ogljika pa je potrebno predgrevati na 100 - 200 °C, pri varjenju visokotrdnih konstrukcijskih jekel, poboljšanih jekel in nerjavnih jekel pa je še poleg predgrevanja po varjenju potrebno žariti.

S EPP postopkom varimo debelejšje jeklene pločevine, debeline nad 15 mm, lahko pa varimo tudi tanjše, ampak je za te primernejši MAG postopek. Največkrat uporabljamo postopek EPP za varjenje žerjavov, nosilnih jeklenih konstrukcij, avtodvigal, rezervoarjev, za varjenje dolgih varov.

Slika 7.18 prikazuje gorilnik za EPP varjenje.



Slika 7.18: Gorilnik za EPP varjenje [5]

Gorilnik pa je lahko izveden tudi z več žicami (do 6), ki so v glavi gorilnika poljubno razporejene, izvor pa ostaja isti. Če ima vsaka žica svojo glavo in svoj izvor, govorimo o varjenju z več elektrodami.

Varilni oblok gori med dodajnim materialom (žica ali trak navita v kolut) ter osnovnim materialom, ki je zakrit z žlindro in praškom. Funkcije praška so, da stabilizira oblok, oblikuje teme zvara in ščiti talino pred oksidacijo.

Dodajni in osnovni material tali toplota, ki nastaja v obloku. Vzpostavitev obloka se izvede kratkostično, možno pa je tudi visokofrekvenčno prižiganje obloka.

Prehod materiala najpogosteje nastaja v obliki:

- večjih kapljic ob steni žlindre imenovani tudi kaverna; pri manjši gostoti tokov,
- manjših kapljicah s prostim preletom; pri višji gostoti plinov.

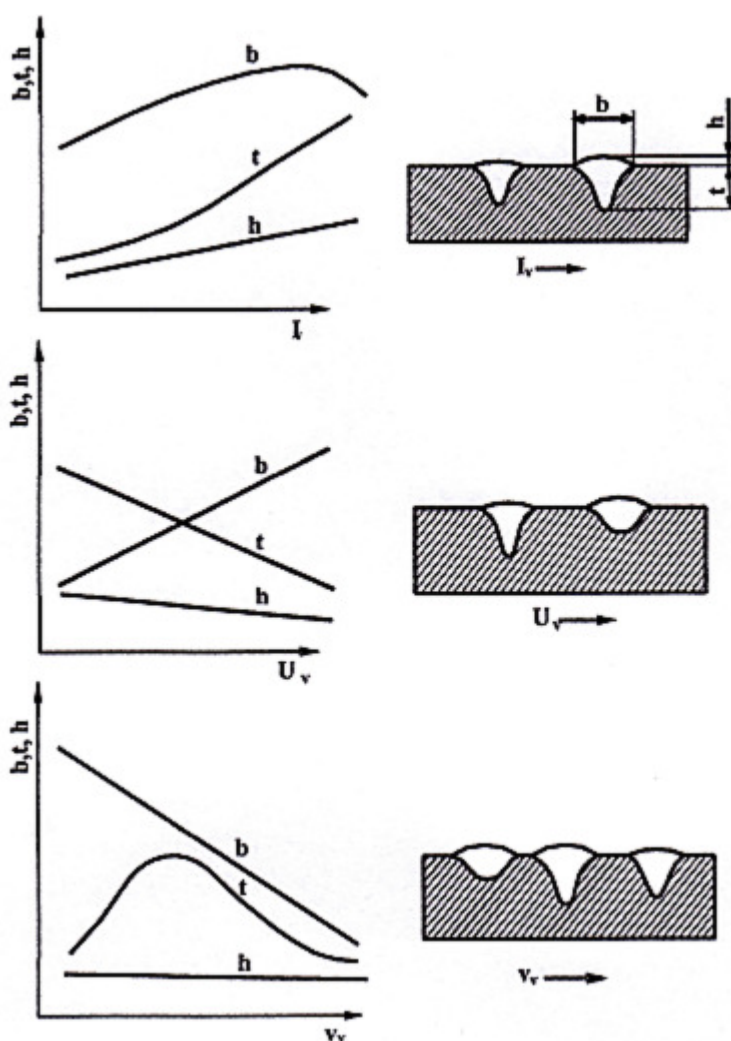
Lege varjenja za EPP postopek so najbolj primerne v vodoravnem položaju, saj za izvajanje varjenja v ostalih legah moramo pripraviti posebne naprave, ki niso ugodne iz ekonomskega vidika.



Prednosti tega postopka so še poleg visoke produktivnosti in širokega področja uporabe tudi velik talilni učinek, dober izkoristek dodajnega materiala in zelo kvalitetni zvari.

Poleg ustreznih varilnih parametrov za določen osnovni material je za doseg kvaliteten zvarov zelo pomembna izbira primerne dodatnega materiala in primerne praška.

Oblika vara je določena z: širina vara ( $b$ ), višina vara ( $h$ ) in globina vara ( $t$ ). Vplivi varilnega toka ( $I_v$ ), varilne napetosti ( $U_v$ ) ter hitrost varjenja ( $V_v$ ) vplivajo na višino in globino vara, kar je razvidno iz slike 7.19.



Slika 7.19: Vpliv  $I_v$ ,  $U_v$  in  $V_v$  na širino, višino in globino vara [5]

### 7.7.2 Dodajni material

Dodajni material, ki ga uporabljamo pri tem postopku, je v obliki hladno vlečene žice ali traka z gladko površino. V primeru varjenja nelegiranih ali malolegiranih jekel imajo žice pobakreno površino, ki izboljša električno prevodnost v kontaktni šobi, zmanjšuje trenje v dovodnih elementih in zmanjšuje nevarnost korozije žice. Premer žice je od 1,2 do 6 mm, vendar v praksi največkrat uporabimo žice premera od 2,5 do 6 mm. Trakovi so dimenzij od 0,5 x 20 mm do 1,5 x 120 mm in jih v večini primerov uporabljamo za navarjanje. V zadnjem času se največ uporabljajo strženske žice in trakovi. V primeru, ko so potrebni večji nanosi dodajnega materiala, pa so v uporabi tudi dodajni materiali v obliki kovinskega prahu, ki ga nasipamo v zvarni žleb pred varjenjem ali pa se ga dodaja skupaj z dodajnim materialom.

Dodajni material izberemo glede na želeno trdnost zvara, glede na kemično sestavo osnovnega materiala in glede izbire varilnega praška.

### 7.7.3 Varilni prašek

Varilni prašek, ki se nahaja v za to namenjeni posodi, se med varjenjem sipa na zvarno mesto pred oblokom. Funkcija varilnega praška je podobna oplaščenju pri REO varjenju.

Prašek ima pomembne funkcije in te so:

- ionizira in stabilizira oblok,
- ščiti var pred atmosferskimi vplivi,
- uravnava kemično sestavo zvara,
- koncentrira toploto v področju obloka,
- preprečuje nastajanje razpok in por,
- legira talino,
- dezoksidira talino,
- kontrolira ohlajanje zvara.

Da preprečimo nastanek por in hladno pokljivost zvara, je potrebno varilni prašek pred uporabo sušiti v peči (2 uri pri 350 - 400°C).

## 7.8 Elektroporovno varjenje

### 7.8.1 Splošno

Značilno za elektroporovno varjenje je, da se pri varjenju s pritiskom material v zvarni coni segreje do testastega stanja, pri tem pa se varjenca ne raztalita. Z mehanskim pritiskom se dobi dodatna energija za zvarni spoj.

Ta postopek varjenja temelji na segrevanju varjencev zaradi prevajanja električnega toka. Poleg električne energije uporabljamo še mehansko silo, s katero med varjenjem stiskamo varjenca. Na stiku med varjencema na zvarni točki se sprosti največ toplotne energije, zato je tu električna upornost največja in povzroči taljenje varjencev v omejenem obsegu. Var oz. zvarni spoj nastane tako, da na zvarni spoj preko elektrod ali vpenjalnih čeljusti deluje mehanska sila.

Poznamo več načinov elektroporovnega varjenja in ti so:

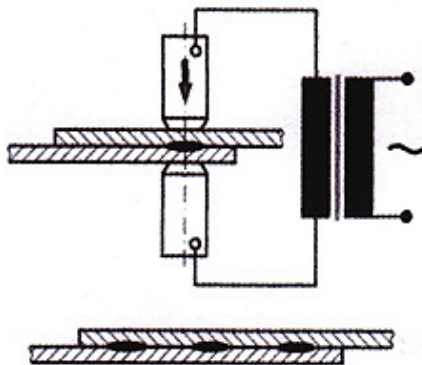
- točkovno varjenje,
- bradavičasto varjenje,
- kolutno varjenje,
- sočelno uporovno lotanje,
- sočelno obžigalno varjenje.

Prednosti uporovnega varjenja so:

- proces spajanja je enostaven,
- za varjenje ne potrebujemo dodatnih materialov,
- lahko varimo zelo tanke in tudi debele materiale,
- velika produktivnost,
- majhen vpliv vnesene toplote na osnovni material.

### 7.8.2 Točkovno uporovno varjenje

S točkovnim varjenjem, ki je prikazano na sliki 7.20, najpogosteje varimo pločevine debelin od 0,5 do 2 mm, le redko do 6 mm. S tem postopkom lahko varimo enake ali različne debeline pločevin, lahko pa varimo tudi enake ali različne materiale.



**Slika 7.20:** Prikaz elektroporovnega točkovnega varjenja s primerom zvara [11]

Elementa, ki ju spajamo, sta delno prekrita, nastali spoji so v obliki posameznih točk. Sam postopek varjenja pa poteka tako, da varjenca položimo med elektrodi tako, da se prekrivata in z gibljivo elektrodo pritismo na varjenca. Na stičnem mestu se varjenca segrejeta do testastega stanja in se zaradi pritiska zvarita.

Elektrode za elektroporovno točkasto varjenje so izdelane iz različnih materialov in so različnih oblik. Material, iz katerih so elektrode, mora imeti zelo dobro električno in toplotno prevodnost, prav tako mora imeti visoko trdnost in trdoto. Ker skozi elektrode tečejo visoki električni tokovi in zaradi velikega števila zvarjenih točk v časovni enoti, moramo elektrode hladiti.

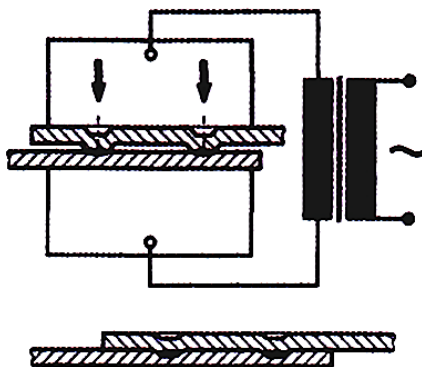
### 7.8.3 Uporovno bradavično varjenje

Z elektroporovnim bradavičnim varjenjem, varimo največkrat več točk hkrati, glej sliko 7.21. Bradavica predstavlja ob začetku varjenja fizično in električno povezavo med varjencema. Bradavica se zaradi prevajanja električnega toka in upornosti ogreje, zmehča in ob stiskanju varjencev delno ali v celoti deformira.

Prednosti bradavičnega varjenja pred točkovnim:

- možno je varjenje večih zvarnih točk hkrati,
- manjša obraba elektrod,
- razdalja med točkami ne vpliva na proces varjenja,
- manjše in tanjše varjence je možno navariti v debelejšo,
- možnost kombiniranja varjencev; različne debeline in vrste materialov,
- videz vara je lepši.

Čeprav je potrebna daljša in dražja priprava varjencev ter zahtevnejše karakteristike stroja, je bradavičasti postopek gospodarnejši v številnih primerih od točkovnega.

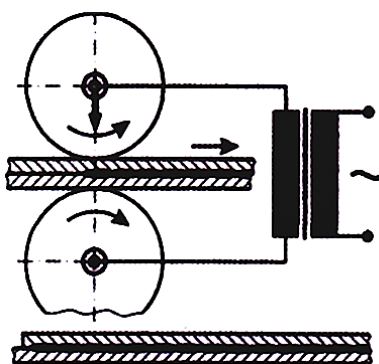


Slika 7.21: Prikaz elektroporovnega varjenja s primerom zvara [11]

#### 7.8.4 Uporovno kolutno varjenje

Tega postopka varjenja se poslužujemo pri izdelavi neprekinjenih in neprepustnih varov na pločevinah do 3 mm.

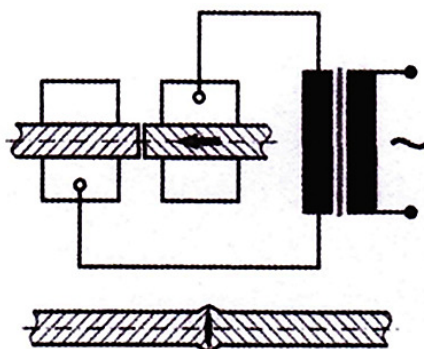
Pri kolutnem varjenju sta elektrodi koluta iz bakrene litine, ki se vrtita po varjencih, prevajata varilni tok iz vira toka na varjenca in ju z mehansko silo stiskata, kar prikazuje slika 7.22. Za doseganje ustreznih zvarov je izrednega pomena čistoča pločevin, ki jih varimo. Koluti so izdelani iz podobnih materialov kot elektrode pri točkovnem varjenju in za nji veljajo enaki pogoji.



Slika 7.22: Prikaz elektroporovnega kolutnega varjenja, s primerom zvara [11]

#### 7.8.5 Sočelno uporovno varjenje

S tem postopkom varjenja varimo sočelno zvarjanje dolgih in tankih elementov. Največkrat s sočelnim uporovnim varjenjem varimo okrogle in druge profile manjših presekov. Na sliki 7.23 je prikazano elektroporovno sočelno varjenje s primerom zvara.



Slika 7.23: Prikaz elektroporovnega sočelnega varjenja in primer zvara [11]

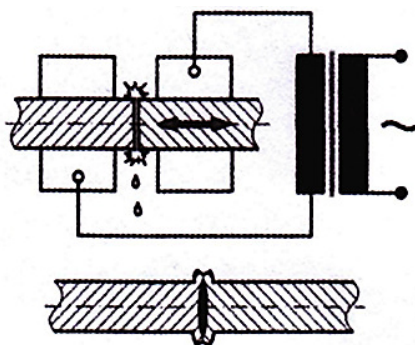
Med postopkom varjenja sta varjenca vpeta v posebne, bakrene čeljusti, ki so vodno hlajene. Eden od parov čeljusti je gibljiv, eden pa fiksni. Te čeljusti morajo biti izdelane iz podobnih materialov, kot so izdelane elektrode pri točkovnem varjenju. Gibljivi čeljusti se skupaj z varjencem premakneta in na stičnem mestu nastane zvar z žmulo. Na ta način se iz zvarnega mesta iztisnejo oksidi in druge nečistoče, kar je pogoj za doseganje kakovostnih zvarov.

### 7.8.6 Sočelno obžigalno uporovno varjenje

S sočelnim obžigalnim varjenjem varimo varjenca večjih presekov, ki jih ne moremo s sočelnim uporovnim postopkom. Najpogosteje postopek uporabljamo v serijski proizvodnji.

Prav tako imamo dva para čeljusti, ki so vodno hlajene in iz bakrene zlitine. Kakor pri sočelnem uporovnem postopku je tudi tukaj en par čeljusti z varjencem gibljiv, en pa fiksni. Gibljivi varjenec ob dotiku z drugim varjencem steče, preko posameznih kratkih stikov, varilni tok raztali posamezne konice, ki tvorijo stik med varjencema. Po obžiganju obeh, ko sta med seboj skoraj vzporedna, sledi stiskanje z mehansko silo, katera izrine talino in nečistoče iz mesta varjenja (slika 7.24).

Pri načrtovanju izdelka je potrebno upoštevati, da se varjenca zaradi obžiganja in taljenja med varjenjem krajšata.



**Slika 7.24:** Prikaz sočelnega obžigalnega varjenja [11]

## 7.9 Plamensko varjenje

### 7.9.1 Splošno

Za plamensko varjenje je značilno, da je za izvor toplote potreben plamen, ki nastane z izgorevanjem mešanice gorilnega plina. Ta plin je največkrat acetylen ali etin, ki se je v praksi uveljavil zaradi številnih prednosti pred ostalimi. Plin acetylen ob reakciji spajanja s kisikom daje največjo moč plamena in gori z največjo temperaturo oziroma energijo, v primerjavi z ostalimi tehničnimi gorljivimi plini.

S plamenskimi varjenjem varimo predvsem tanjše pločevine, cevi in razne profile. Debelejša jekla pa s plamenskimi varjenjem varimo redko.

Za postopek plamenskega varjenja je potrebna priprava robov pločevin, ki pa je odvisna od debeline varjencev in vrste materiala. Ločimo sočelni spoj s privihom, sočelni spoj z zvarom I, zvarom V in zvarom X ter skladovni zvarni spoj z robnim zvarom. Tabela 7.1 prikazuje vrste zvarov in zvarnih stikov s približnimi dimenzijami.

oznaka	oblika zvarnega stika	dimenzije	oznaka	oblika zvarnega stika	dimenzije
		$S=0+2 \text{ mm}$			$S=3+12 \text{ mm}$ $\alpha=60^\circ$ $b=2+4 \text{ mm}$
		$S=0+1 \text{ mm}$	X		$S=12 \text{ mm}$ $\alpha=50^\circ$ $b=4 \text{ mm}$ $h=S/2$
		$S=1+8 \text{ mm}$ $b=1+2 \text{ mm}$ $S=5+10 \text{ mm}$ $b=4 \text{ mm}$			
		$S=0+5 \text{ mm}$			

**Tabela 7.1:** Vrste zvarov in zvarnih stikov s približnimi dimenzijami za plamensko varjenje [11]

S tem postopkom lahko varimo v levo in v desno. Varjenje v levo je uporabno za varjenje tanjših varjencev iz jekla (do 3 mm). Pri varjenju v levo, v zvar vnesemo manj toplotne



energije, varjenje je hitrejše, kar ima za posledico slabšo oziroma nižjo prevaritev. Za varjenje debelejših varjencev je primernejšo varjenje v desno, saj plamen tako potuje po neraztaljenem varjencu in je usmerjen proti novo nastajajočem varu. Tako je omogočena globlja prevaritev, boljša zaščita taline vara pred atmosferskimi vplivi in počasnejše ohlajanje vara.

S plamenskim varjenjem varimo le v nekaj legah, ki morajo omogočati varjenje v vodoravni legi, horizontalno varjenje, horizontalno oziroma prečno varjenje na steni ter vertikalno varjenje in nadglavno varjenje. Za varjenje debelejših pločevin pa se največkrat poslužujemo dvostranskemu varjenju.

Prednosti plamenskega varjenja:

- enostavnost opreme,
- hitra priučitev varilca,
- cenenost,
- mobilnost.

Slabosti plamenskega varjenja:

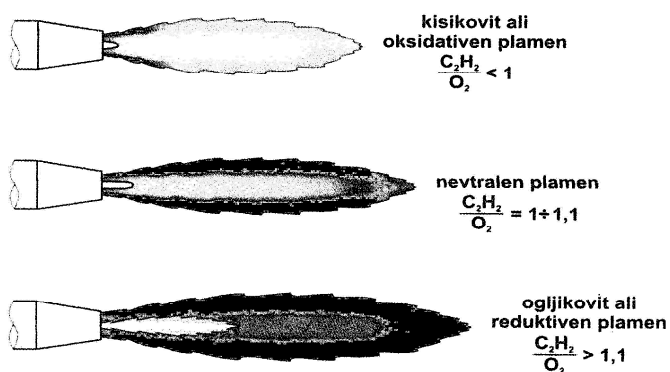
- močna oksidacija,
- velike deformacije,
- široko TVO,
- enostavni zvarni spoji,
- omejenost glede kvalitete pločevin,
- nevarnosti gorljivega plina in kisika.

## 7.9.2 Plamen

Ločimo tri vrste plamena v odvisnosti od razmerja acetilena in kisika (slika 7.25):

- **kisikovit ali oksidativen plamen;** primeren za varjenje medi, saj kisik z oksidacijo Zn preprečuje njegovo izcejanje,
- **nevtralen plamen;** primeren za varjenje jekel in ni primeren za varjenje kovin, ki so nagnjene k oksidaciji (Mg, Al),

- **ogljikovit ali reduktiven plamen;** primeren je za varjenje visokoogljčnih jekel, vsebuje več acetilena, ki preprečuje odgor ogljika v jeklu, lahko pa tudi dodatno oglični talino.

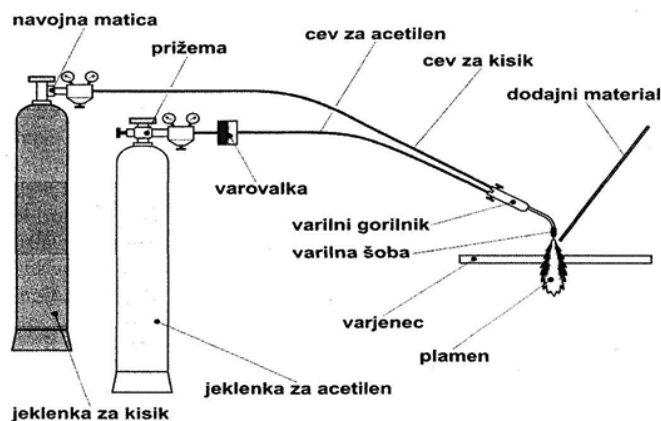


**Slika 7.25:** Shematski prikaz oksidativnega, nevtralnega, in reduktivnega plamena, ki nastane ob zgorevanju acetilena in kisika [11]

Bistvo mešalnega razmerja plinov je sprememba atmosfere. Temperaturo pa spreminjamo s približevanjem in oddaljevanjem gorilnika.

### 7.9.3 Oprema za varjenje

Opremo za plamensko je sestavljena iz dveh jeklenk (acetilen, kisik), reducirnih ventilov, varilnega gorilnika, cevi za pretok plinov, varovalk za preprečevanje povratnega udara plina in plamena. Slika 7.26 shematsko prikazuje opremo za plamensko varjenje.



**Slika 7.26:** Shematski prikaz opreme za plamensko varjenje [11]

#### **7.9.4 Dodajni material**

Dodajni material je v obliki žice (premerov od 1 do 4 mm), njegova kemična sestava mora biti podobna osnovnemu materialu. Žice so prevlečene s tanko plastjo bakra, kar preprečuje oksidacijo. Ker med varjenjem prihaja do odgorevanja elementov, mora biti vsebnost legirnih elementov večja kot v osnovnem materialu.

## 8 SKLEPNE MISLI

V diplomskem delu smo predstavili najpomembnejše kriterije za spajanje z varjenjem jeklenih konstrukcij v gradbeništvu, katere moramo upoštevati že pri načrtovanju in prav tako kasneje pri izvedbi.

Za ustrezno varjenje so zelo pomembna znanja iz področij materialov, mehanike (statika, trdnost, dinamika), elektrotehnike, kemije in fizike. Z zadostnim poznavanjem le teh lahko zadostimo kriterijem ustreznosti, kot so sposobnost materiala za varjenje, možnosti izvedbe tehnologije varjenja ter prav tako pomembno varnost in ekonomičnost.

S postopkom varjenja lokalno termično vplivamo na konstrukcijo, kar pomeni, da mesto varjenja predstavlja najšibkejši člen konstrukcije, saj se v TVO zvarnega spoja spreminjajo lastnosti osnovnega materiala. Na podlagi poznavanja toplotnih pojavov izberemo primeren način in postopek varjenja, tako da najmanj spremenimo lastnosti osnovnega materiala. Poleg omenjenega pa je potrebno še upoštevati dejstvo, da so v zvarnih spojih možne prisotne napake različnih oblik, ki imajo pomembno vlogo za uporabnost in varnost konstrukcije.

## 9 VIRI, LITERATURA

### *Tiskani viri:*

- ♦ [1] Beg, D., Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 1997.
- ♦ [2] Beharič, Z., Materiali in obdelave v strojništvu, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 2008.
- ♦ [3] Buđževac D., Marković Z., Bogavac D., Tošić D., Metalne konstrukcije, Građevinski fakultet Univerzитета u Beogradu, Beograd 1999.
- ♦ [4] Čretnik, D., Tehnologija spajanja in preoblikovanja, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1999.
- ♦ [5] Gliha V., Pučko B., Postopki spajanja, Fakulteta za strojništvo Maribor, Maribor 2006.
- ♦ [6] Kravanja, S., Zapiski iz predavanj pri predmetu jeklene konstrukcije.
- ♦ [7] Kržič, F., Jeklene konstrukcije I, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 1994.
- ♦ [8] Rak, I., Tehnologija varjenja, Založba Modrijan, Ljubljana 2008.
- ♦ [9] Rak, I., Varilna tehnologija, VTŠ Maribor, Maribor 1981.
- ♦ [10] SIST EN 1993-1-1:2005(sl), Evrokod 3 – Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.
- ♦ [11] Tušek, J., Praktične in računske vaje iz tehnike spajanja, Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Ljubljana 2011.

### *Spletni viri:*

- ♦ [12] <http://sl.wikipedia.org/wiki/Varjenje>
- ♦ [13] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:KubnaPC.jpg>

- ♦ [14] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:KubnaVC.jpg>
- ♦ [15] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/d/da/Hegsaonska.jpg>
- ♦ [16] [http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/JKI\\_2\\_Material\\_2011-09-27.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/JKI_2_Material_2011-09-27.pdf)
- ♦ [17] <http://www2.sts.si/arhiv/tehno/varjenje/var02.htm>
- ♦ [18] <http://www.fs.uni-mb.si/UserFiles/10/.../5%20NASTANEK%20ZVARA.pdf>
- ♦ [19] [http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/OZNACEVANJE\\_ZVAROV.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/OZNACEVANJE_ZVAROV.pdf)
- ♦ [20] [http://www.lace.uni-mb.si/strojni\\_elementi\\_1.../2%20-%20Zvarni%20spoji.pdf](http://www.lace.uni-mb.si/strojni_elementi_1.../2%20-%20Zvarni%20spoji.pdf)
- ♦ [21] [http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/OJK.../4\\_Vezna%20sredstva\\_2011-11-17.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/OJK.../4_Vezna%20sredstva_2011-11-17.pdf)
- ♦ [22] <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/sola%20varjenja.pdf>
- ♦ [23] [http://fsserver.unimb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA\\_UC/Mehansko\\_Obnasanje/interkris\\_talni\\_in\\_transkristalni\\_lom.html](http://fsserver.unimb.si/si/inst/itm/lm/GRADIVA_UC/Mehansko_Obnasanje/interkris_talni_in_transkristalni_lom.html)
- ♦ [24] <http://som.web.cmu.edu/structures/S055-Fe3C.html>

## 10 PRILOGE

### 10.1 Seznam slik

Slika 3.1: Prikaz poteka različnih lomov .....	5
Slika 3.2: Prostorsko centrirana rešetka .....	5
Slika 3.3: Ploskovno centrirana rešetka .....	6
Slika 3.4: Heksagonalna zgradba osnovne kristalne celice .....	6
Slika 3.5: Premene pri ohlajanju in segrevanju Fe .....	7
Slika 3.6: Struktura cementita ( Fe <sub>3</sub> C) .....	9
Slika 5.1: Definicija zvarnega spoja .....	13
Slika 5.2: Struktura zvarjenega spoja .....	14
Slika 5.3: Mikroposnetek meje med varom in TVO .....	15
Slika 5.4: Zvari ob zaobljenih robovih .....	18
Slika 5.5: Geometrijski pogoji pri kotnih zvarih .....	18
Slika 5.6: Enojni kotni zvari .....	20
Slika 5.7: Kotni zvari v odprtinah .....	20
Slika 5.8: Enojni čelni zvari .....	21
Slika 5.9: Čepasti zvari .....	21
Slika 5.10: Primeri čelnih in kotnih zvarov .....	22
Slika 5.11: Oznaka zvarnega spoja v risbi .....	26
Slika 5.12: Prikaz napak v zvarnih spojih .....	27
Slika 5.13: Največja oddaljenost in kot opazovanja pri vizualni preiskavi .....	30
Slika 5.14: Radiografska preiskava in radiografski posnetek razpoke v zvaru .....	31
Slika 5.15: Princip delovanja ultrazvočne preiskave .....	31
Slika 5.16: Princip preiskave z magnetnimi delci .....	32
Slika 5.17: Princip delovanja penetracijske preiskave .....	33
Slika 5.18: Natezni preizkus .....	34
Slika 5.19: Trgalni stroj .....	35
Slika 5.20: Upogibni preizkus .....	36
Slika 5.21: Prelomni preizkus .....	36
Slika 5.22: Preizkus udarne žilavosti .....	37
Slika 5.23: Princip merjenja trdote po Vickersu .....	38
Slika 6.1: Shema različnih preizkusov varivosti .....	41
Slika 7.1: Shema delitve najpogostejših načinov spajanja z varjenjem .....	45
Slika 7.2: REO varjenje .....	49
Slika 7.3: Prehod kapljic v odvisnosti od jakosti električnega toka .....	50
Slika 7.4: Shematski prikaz naprave skupaj z merilno opremo za REO .....	50
Slika 7.5: Zvar v različnih legah in smereh .....	51
Slika 7.6: Vrstni red varkov .....	52

Slika 7.7: Oplaščena elektroda .....	53
Slika 7.8: Označevanje oplaščenih elektrod za varjenje konstrukcijskih jekel .....	54
Slika 7.9: Oblika zvara v odvisnosti od vrste zaščitnega plina .....	56
Slika 7.10: Shematski prikaz opreme za MAG varjenje .....	58
Slika 7.11: Prečni presek različnih tipov strženskih žic in njen delni vzdolžni presek.....	59
Slika 7.12: Smeri varjenja in nagibanje gorilnika .....	62
Slika 7.13: Varjenje v levo in desno.....	63
Slika 7.14: Varilna oprema za TIG varjenje.....	64
Slika 7.15: Gorilnik pri TIG varjenju .....	64
Slika 7.16: Vpliv oblike konice elektrode na obliko uvar .....	65
Slika 7.17: Shematski prikaz varjenja pod praškom.....	66
Slika 7.18: Gorilnik za EPP varjenje .....	67
Slika 7.19: Vpliv $I_v$ , $U_v$ in $V_v$ na širino, višino in globino vara.....	68
Slika 7.20: Prikaz elektroporovnega točkovnega varjenja s primerom zvara .....	71
Slika 7.21: Prikaz elektroporovnega varjenja s primerom zvara.....	72
Slika 7.22: Prikaz elektroporovnega kolutnega varjenja, s primerom zvara.....	73
Slika 7.23: Prikaz elektroporovnega sočelnega varjenja in primer zvara.....	73
Slika 7.24: Prikaz sočelnega obžigalnega varjenja.....	74
Slika 7.25: Shematski prikaz oksidativnega, nevtralnega, in reduktivnega plamena, ki nastane ob zgorevanju acetilena in kisika.....	77
Slika 7.26: Shematski prikaz opreme za plamensko varjenje .....	77

## 10.2 Seznam preglednic

Tabela 4.1: Nazivne vrednosti napetosti tečenja $f_y$ in natezne trdnosti $f_u$ za vroče valjana konstrukcijska jekla .....	10
Tabela 4.2: Nazivne vrednosti napetosti tečenja $f_y$ in natezne trdnosti $f_u$ za votle profile. ....	11
Tabela 5.1: Vrsta zvarov in varjenih spojev .....	17
Tabela 5.2: Geometrijske zahteve za prekinjene kotne zware .....	19
Tabela 5.3: Oblike in grafični simboli za nekatere osnovne zware.....	23
Tabela 5.4: Grafični simboli dvojnih zvarov.....	24
Tabela 5.5: Primeri kombiniranih oblik zvarov z njihovimi simboli .....	24
Tabela 5.6: Priporočljive oblike zvarov glede na medsebojne lege varjencev.....	25
Tabela 6.1: Priporočila za varjenje glede rezultata $C_{eq}$ .....	42
Tabela 7.1: Vrste zvarov in zvarnih stikov s približnimi dimenzijami za plamensko varjenje .....	75



### **10.3 Naslov študenta**

Ines Šrol

Godemarci 11

9243 Mala Nedelja

### **10.4 Kratek življenjepis**

Rojena: 16.01.1985

Šolanje: 1991 – 1999 Osnovna šola Mala Nedelja

2001 – 2006 Ekonomska šola Ptuj

2006 – 2012 Fakulteta za gradbeništvo Maribor

