



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

Joško Valentinčič, Damjan Klobčar, Andrej Lebar

Nekonvencionalne tehnologije in tehnologije spajanja

Izdelovalne tehnologije 2

Gradivo za vaje

Ljubljana, 2014

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo sedanjim in bivšim sodelavcem Laboratorija za alternativne tehnologije in Laboratorija za varjenje za pomoč pri nastanku tega gradiva. Predvsem velja omeniti Marka Jermana, Pavla Drešarja, dr. Izidorja Sabotina, doc.dr. Henrija Orbanića, doc.dr. Davorin Kramarja, doc.dr. Ivana Polajnarja, dr. Ladislava Grada, izr.prof.dr. Rajka Kejžarja, prof.dr. Viktorja Prosenca, prof.dr. Viljema Kralja, Matevža Steržaja, inženirja Borisa Bella in nenazanje tudi vodji obeh laboratorijev prof.dr. Mihaela Junkarja in prof.dr. Janeza Tuška.

Kazalo

Sklop Nekonvencionalne tehnologije

1	VP: Uvodna vaja	9
2	1. LV1: Ekonomika obdelave s potopno in žično elektroerozijo	19
2.1	Potopna elektroerozija	19
2.1.1	Osnovne enačbe	19
2.1.2	Primer izračuna stroška strojne ure	22
2.2	Žična elektroerozija	23
2.2.1	Empirični model hitrosti rezanja	23
2.2.2	Osnovne enačbe	23
2.2.3	Primer izračuna stroška strojne ure	25
3	2. LV1: Ekonomika rezanja z abrazivnim vodnim curkom in laserskega rezanja	27
3.1	Abrazivni vodni curek	27
3.1.1	Empirični model hitrosti rezanja z abrazivnim vodnim curkom	27
3.1.2	Osnovne enačbe	28
3.1.3	Primer izračuna stroška strojne ure	30
3.2	Lasersko rezanje	31
3.2.1	Empirični model rezanja z laserskim žarkom	31
3.2.2	Osnovne enačbe	31
3.2.3	Primer izračuna stroška strojne ure	33
4	1. LV2: Potopna elektroerozija	35
4.1	Uvod	35
4.2	Namen vaje	36

4.3	Potek vaje	36
4.4	Naloge	36
5	2. LV2: Priprava CAM programa na podlagi CAD risbe	39
5.1	Uvod	39
5.2	Namen vaje	40
5.3	Potek vaje	40
5.4	Naloge	40
6	3. LV2: Stroj in rezanje z AVC	43
6.1	Uvod	43
6.2	Namen vaje	45
6.3	Potek vaje	45
6.4	Naloge	45

Sklop Tehnologije spajanja

7	OSNOVNI PODATKI O POTEKU VAJ IZ VARILSKIH PREDMETOV	48
7.1	POTEK LABORATORIJSKIH VAJ	48
7.2	OCENA POROČILA	49
7.3	OCENA VAJ	50
7.4	KOLOKVIJ in IZPIT	50
8	UVOD V VARJENJE IN OSNOVNI POJMI	51
8.1	POMEN VARJENJA V OKVIRU IZDELOVALNIH TEHNOLOGIJ	51
8.2	OSNOVNI POJMI	52
9	ROČNO OBLOČNO VARJENJE	56
9.1	DELITEV OBLOČNEGA VARJENJA	56
9.2	ROČNO OBLOČNO VARJENJE Z OPLAŠČENO ELEKTRODO (ROV, REO, MMAW – manual metal arc welding, SMAW – shielded metal arc welding)	57
9.3	Razdelitev elektrod po SIST EN 499 (DIN 1913)	58
9.4	VIRI VARILNEGA TOKA ZA ROV	59
9.5	Laboratorijska vaja 1: Viri varilnega toka za ročno obločno varjenje	62
1.	NALOGA	62
2.	OPREMA	62
3.	POSTOPEK	62
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	62
5.	ZAKLJUČKI	62
10	VARJENJE EPP (SUBMERGED ARC WELDING - SAW)	63
10.1	Laboratorijska vaja 2: Primerjava med ROV in varjenjem EPP	66
1.	NALOGA	66
2.	OPREMA	66
3.	POSTOPEK	66
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	67
5.	ZAKLJUČKI	68
11	OBLOČNO VARJENJE V ZAŠČITI PLINSKIH ATMOSFER	69
11.1	RAZDELITEV	69
11.2	POMEN ZA VARILNO TEHNIKO	69
11.3	VARJENJE Z ODTALJIVO ELEKTRODO	69
11.4	VARJENJE Z NEODTALJIVO ELEKTRODO (TIG – Tungsten Inert Gas, Plazma)	72

11.5	Laboratorijska vaja 3: Primerjava MIG in MAG varjenja	75
1.	NALOGA	75
2.	OPREMA	75
3.	POSTOPEK	75
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	76
5.	ZAKLJUČEK	77
11.6	Laboratorijska vaja 4: Primerjava med varjenjem MAG in TIG	78
1.	NALOGA	78
2.	OPREMA	78
3.	POSTOPEK	78
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	78
5.	ZAKLJUČEK	79
12	ELEKTROUPOROVNO VARJENJE	80
12.1	Uporovno točkovno varjenje (UTV)	80
12.2	Elektroda	81
12.3	Varilni parametri	82
12.4	Napake pri točkovnem varjenju	82
12.5	Ocena kakovosti točkovnih zvarov	83
12.6	Laboratorijska vaja 5: Uporovno točkovno varjenje	85
1.	NALOGA	85
2.	OPREMA	85
3.	POSTOPEK	85
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	87
5.	ZAKLJUČEK	87
13	PLAMENSKA TEHNIKA	88
13.1	Plamensko varjenje in varilni plamen	90
13.2	Varjenje v levo in v desno	92
13.3	Ukrepi pred, med in po varjenju	92
13.4	Plamensko rezanje	93
13.5	Laboratorijska vaja 6: KISIK - ACETILENSKI PLAMEN	94
1.	NALOGA	94
2.	OPREMA	94
3.	POSTOPEK	94
4.	REZULTATI IN DISKUSIJA	94
5.	ZAKLJUČEK	94
14	PREDLOGE ZA POROČILA	95

Sklop Nekonvencionalne tehnologije

Poglavje 1

VP: Uvodna vaja

Na uvodni vaji spoznamo štiri nekonvencionalne postopke: potopno elektroerozijo, žično elektroerozijo, rezanje z abrazivnim vodnim curkom in lasersko rezanje. Na vaji so predstavljene karakteristike teh postopkov, ki so pomembne za izračun cene strojne ure in nadalje stroškov izdelave. Vaja poteka ob posnetkih na naslednjih straneh.

Izdelovalne tehnologije 2

1. Elektroerozijska obdelava



3



Elektroerozijska obdelava



potopna elektroerozija



žična elektroerozija



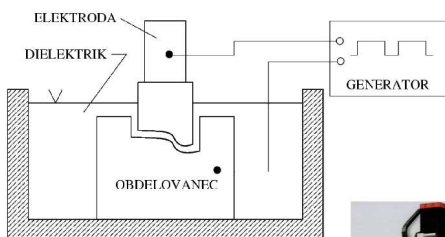
elektroerozijsko brušenje



4



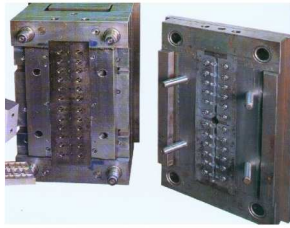
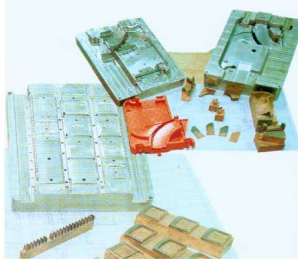
Potopna elektroerozija



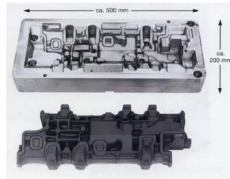
5



Uporaba potopne elektroerozije

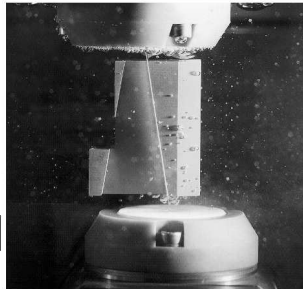
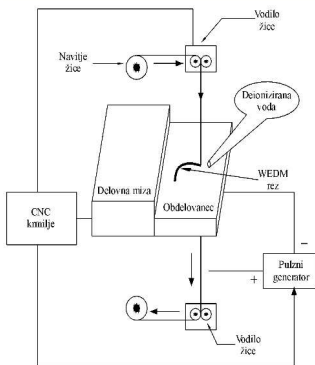


V orodjarstvu sta potopna elektroerozija in visokohitrostno freziranje komplementarna postopka.



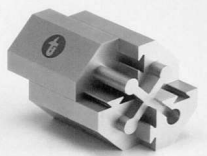
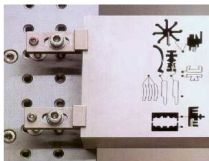
6

Žična elektroerozija



7

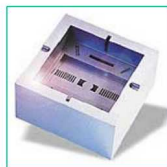
Uporaba žične elektroerozije



- Žična elektroerozija sodi med konturne postopke in se uporablja za natančno rezanje.
- Postopek ni toliko občutljiv na debelino reza kot ostali postopki konturnega rezanja.
- Največ se uporablja za izdelavo orodij za štancanje (matric in pestičev)

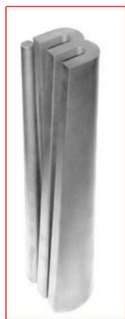
8

Potopna in žična elektroerozija



Potopna EDM:
 - slepe luknje
 - ozke in globoke
 - natančno

Žična EDM:
 - skozijske luknje
 - ozke in globoke
 - natančno



9



Elektroerozijsko brušenje



Primer brušenja orodja z EDG

Primer izdelave profila z EDG



10



Izdellovalne tehnologije 2

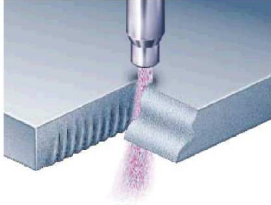
2. Rezanje z abrazivnim vodnim curkom



11



Obdelava z vodnim in abrazivnim vodnim curkom



Značilnosti:

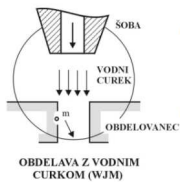
- Visokohitrostni vodni curek pomešan z abrazivom odnaša material.
- Režemo tako krhke, kot tudi žilave materiale.
- Rezanje z AVC ne povzroča toplotno vplivanega področja.
- Značilna tekstura in koničnost reza sta posledici dinamike procesa in omejujeta uporabnost.
- Običajna natančnost: 0,15 mm



12



Obdelava z vodnim curkom (VC)



OBDELAVA Z VODNIM CURKOM (WJM)

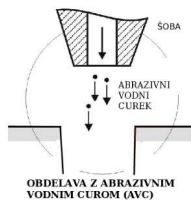
- Princip:
 - visokohitrostni vodni curek zadeva ob površino obdelovanca povečuje razpoke in odnaša material.
- Aplikacije:
 - razrez, površinska obdelava – vnos zaostalih napetosti, odstranjevanje srha
- Materiali:
 - usnje, polimeri, tanke pločevine iz barvnih kovin, hrana
- Integriteta površine:
 - običajna hrapavost: $Ra=3 \mu m$
 - tekstura: naključna, brazdava
 - ni toplotno vplivanega območja
 - zaostale napetosti: pri rezanju zanemarljive



13



Obdelava z abrazivnim vodnim curkom (AVC)



OBDELAVA Z ABRAZIVNIM VODNIM CURKOM (AVC)

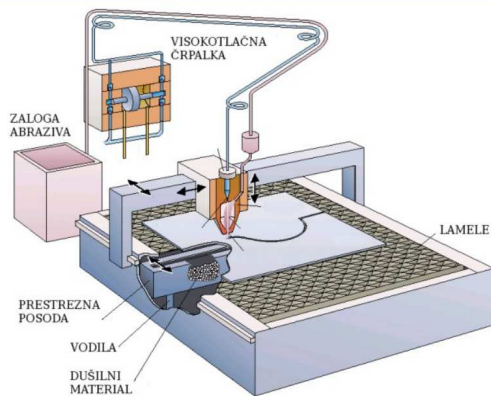
- Princip:
 - visoko hitrostni vodni curek z dodanim abrazivom zadeva ob površino obdelovanca in odnaša material
- Aplikacije:
 - rezanje
 - graviranje (redko)
- Materiali:
 - praktično vsi, problematični so krhki materiali
- Integriteta površine:
 - običajna hrapavost: $Ra=5 \mu m$
 - tekstura: naključna, brazdava
 - ni toplotno vplivanega območja
 - zaostale napetosti: pri rezanju zanemarljive



14



Stroj za rezanje z abrazivnim vodnim curkom



15

Stroj za rezanje z abrazivnim vodnim curkom



- Tlak: 400 MPa
- Moč črpalke: 15 kW
- Rezalna hitrost < 4,6 m/min
- Poraba vode 3.8 l/min
- Poraba abraziva: 0,3 kg/min
- Obstočnost šobe za oblikovanje vodnega curka: 70 h
- Obstočnost pospeševalne šobe: 100 h

16

Uporaba: razrez zahtevnih oblik in tudi večjih debelin



17

Primeru uporabe (abrazivnega) vodnega curka



18

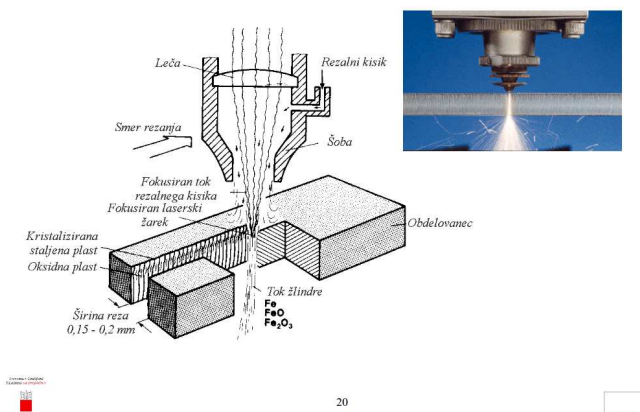
Izdelovalne tehnologije 2

3. Lasersko rezanje



19

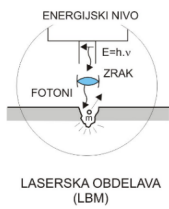
Lasersko rezanje



20

Laserska obdelava

Laserska Beam Machining (LBM)



- Princip:
 - Obdelovanec absorbira fotone in njihova energija se pretvori v toploto; nastopi taljenje, uparjanje, oksidacija in odvzem
 - Z rezalnimi plini povečujemo odvzem
- Aplikacije:
 - rezanje, graviranje, varjenje, nanašanje
- Materiali: načeloma vsi, dobro se reže nerjavno jeklo; zaželena visoka absorptivnost in nizka toplotna prevodnost
- Integriteta površine:
 - običajna hrapavost: $R_a=3 \mu\text{m}$
 - tekstura: naključna, brazdava
 - toplotno vplivano področje: 0,1 mm
 - zaostale napetosti: prisotne
 - mikrorazpoke: prisotne



21



Stroj za lasersko rezanje



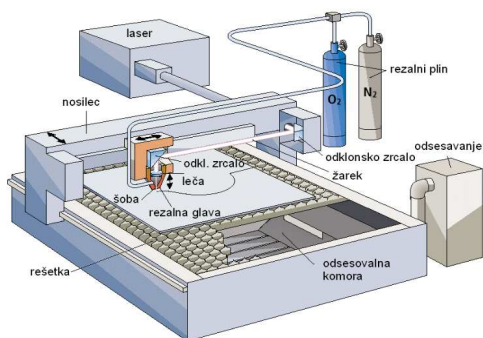
za tanke (0,5mm)
in debele (20mm)
materiale



22



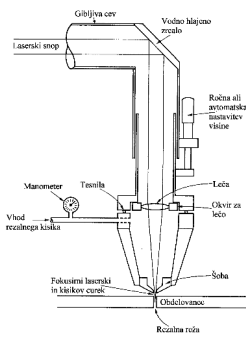
CO₂ laser



23



Rezalna glava



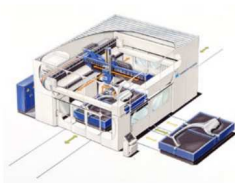
laserski žarek je fokusiran
↓
problem rezanja večjih debelin



24



3D obdelava po preoblikovanju – EMO orodjarna



25



Poglavje 2

1. LV1: Ekonomika obdelave s potopno in žično elektroerozijo

Pri določitvi cene izdelka, moramo znati izračunati oziroma oceniti proizvodne *stroške*. To je hkrati tudi *cena izdelka*, ki zagotavlja, da ne delamo z izgubo. Kakšna ceno izdelka določimo, je naša odločitev. Če bo previsoka, ne bomo konkurenčni in ne dobimo posla, če bo prenizka, ne bomo imeli takšnega dobiška, kot bi ga sicer lahko imeli.

2.1 Potopna elektroerozija

2.1.1 Osnovne enačbe

Proizvodni strošek je sestavljen iz stroška strojne ure, stroška materiala in ostalih stroškov, ki jih težko ali celo ne moremo točno določiti. To so npr. strošek režijskih delavcev (tajnica, čistilka, direktor itd.), strošek infrastrukture itd. Prav v primeru potopne elektroerozije, kjer je potrebna namenska elektroda ali celo več elektrod, je smiselno strošek elektrode izračunati posebej in ne v okviru stroška strojne ure, kot bomo to naredili pri ostalih postopkih, kjer je strošek orodja odvisen od časa obdelave. Na tem mestu mogoče ni odveč omeniti, da je izdelave T_e sestavljen iz časa obdelave t_{ob} in pripravljajno-zaključnega časa t_{pz} .

Proizvodne stroške PSI v primeru potopne elektroerozije tako izračunamo po enačbi 2.1.

$$PSI = (S_{su} + S_{ma} + S_{or}) \cdot R \text{ [€]} \quad (2.1)$$

Strošek strojne ure S_{su} , strošek orodja S_{or} in strošek materiala S_{ma} iz katerega naredimo izdelek, seštejemo in množimo s faktorjem režije R , ki je se v praksi giblje med 1,1 in 1,3.

Strošek strojne ure S_{su} izračunamo tako, da ceno strojne ure C_{su} množimo s časom izdelave T_e (En. 2.2). Zato mora biti cena strojne ure podana na enoto časa. Cena je torej podana, določena ali izračunana za določeno postavko iz katere izračunamo strošek.

$$S_{su} = C_{su} \cdot T_e \text{ [€]} \quad (2.2)$$

Ceno strojne ure C_{su} izračunamo po enačbi 2.3

$$C_{su} = C_i + C_e + C_{pm} + C_{op} + C_v \text{ [€/h]} \quad (2.3)$$

Poglejmo kako izračunamo vsako postavko posebej.

Cena investicije:

$$C_i = \frac{I}{L_{\text{stroj}}} [\text{€/h}],$$

kjer je investicija I cena v €, ki jo je potrebno plačati, da je stroj postavljen v podjetju in pravilno deluje, ter L_{stroj} amortizacijska doba v urah. V času L_{stroj} se povrne investicija v stroj.

Cena energije:

$$C_e = P \cdot c_e [\text{€/h}],$$

kjer je P priključna moč stroja za potopno elektroerozijo v kW in c_e cena električne energije v €/kWh¹.

Cena pomožnega materiala (cena dielektrika):

$$C_{\text{pm}} = \frac{c_{\text{diel}} \cdot V_r}{L_{\text{diel}}} [\text{€/h}],$$

kjer c_{diel} cena dielektrika podana v €/l, V_r je volumen rezervarja za dielektrik v litrih in L_{diel} je obstojnost dielektrika v urah.

Cena operaterja: To je cena bruto-bruto ure delavca podana v €/h.

Cena vzdrževanja:

$$C_v = \frac{c_v}{L_{\text{vzd}}} [\text{€/h}]$$

obsega stroške nadomestnih delov, nadgradnje programske opreme, rednega vzdrževanja; c_v je cena vzdrževanja v €/leto in L_v je število delovnih ur v enem letu.

Čas izdelave T_e sestavljata dva časa: pripravljajno-zaključni čas t_{pz} , ki je potreben za vpetje, pozicioniranje, programiranje ipd., in obdelovalni čas t_{ob} .

$$T_e = t_{\text{pz}} + t_{\text{ob}} \tag{2.4}$$

Čas obdelave določimo na podlagi hitrosti odnašanja V_w , ki je podana za vsak obdelovalni režim posebej. Hitrost odnašanja pove, kolikšen volumen materiala odvezamemo v časovni enoti (En 2.5).

$$V_w = \frac{V}{t_{\text{ob}}} \tag{2.5}$$

Oznaka t_{ob} prapravlja čas obdelave v katerem se odnese volumen V . Primer hitrosti odnašanja podaja tabela 2.1, kjer je prikazana tehnološka tabela za določen stroj, material elektrode in material obdelovanca.

¹Male tiskane črke uporabljamo za oznako cen, ki niso v enotah €/h.

Tabela 2.1: Tehnološka tabela za potopno elektroerozijo prirejena za pedagoške namene. Stroj: Ingersoll 80P, elektroda: ECu, obdelovanec: jeklo

Ingersoll 80P, elektroda: ECu, obdelovanec: jeklo		Režim					
		1	2	3	4	5	6
Vžigna napetost	u_i [V]	180	180	180	140	140	140
Razelektritveni tok	i_e [A]	0,8	1,4	2	3	4	11
Čas impulza	t_i [μs]	56	66	91	135	270	350
Čas pavze	t_o [μs]	25	31	28	50	71	130
Velikost reže	-	7,3	7,3	7,3	7,0	6,9	6,5
Servo ojačanje	-	8,1	8,1	8,1	7,0	7,9	7,5
Čas odmika	-	0,05	0,05	0,05	0,05	-	-
Višina odmika	-	0,05	0,05	0,05	0,05	-	-
Hitrost odnašanja materiala	V_w [mm ³ /min]	0,29	0,55	0,81	2,83	9,26	22,5
Volumska obraba elektrode	V_e [mm ³ /min]	0,012	0,013	0,022	0,016	0,016	0,009
Relativna obraba robov elektrode	ϑ_{LC} [-]	0,10	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12
Srednja višina odstopanja neravnin	R_a [μm]	1,7	1,9	2,9	4,4	6,5	9,3
Srednja višina neravnin	R_z [μm]	11,7	14,2	18,2	25,3	33,9	45,4
Največja višina neravnin	R_{max} [μm]	14,9	16,3	22,3	30,9	43,1	70,3
Globina bele plasti	HAZ [μm]	4,5	7,5	9,5	12,8	16,2	27,5
Dodatek za nadaljnjo obdelavo	z [mm]	0,019	0,02	0,03	0,04	0,06	0,10
Bočna reža	$2 \cdot s$ [mm]	0,03	0,07	0,07	0,16	0,22	0,31

Pri izračunu stroška strojne ure se torej upošteva tudi pripravljajno-zaključni čas. Seveda je to eden od možnih načinov. Če zahteva izdelek veliko programiranja, potem je smiselno obravnavati ta strošek posebej, ne kot strojno uro, saj stroj med programiranjem lahko izvaja obdelavo nekega drugega izdelka. Podobno velja tudi za strošek operaterja: če se vrši obdelava dolgo časa, je smiselno operaterja zaposliti na drugem stroju in tako se njegova cena ne množi z izdelovalnim časom, ampak samo z obdelovalnim časom.

Strošek orodja S_{or} pri potopni elektroeroziji se običajno ne deli na več izdelkov, saj so v splošnem potrebne dve do tri elektrode za en izdelek. Tako celoten strošek orodja nosi en izdelek. Strošek materiala za izdelavo elektrode se enostavno izračuna iz mase surovca m_{or} in cene materiala c_{or} , ki je običajno podana na kg (En. 2.6).

$$S_{or} = m_{or} \cdot c_{or} + S_{or,izdelave} \text{ [€/h]} \quad (2.6)$$

Strošek materiala S_{ma} se izračuna po enačbi 2.7, torej na podoben način kot strošek orodja, le da tukaj ni stroška izdelave.

$$S_{ma} = m_{ma} \cdot c_{ma} \text{ [€/h]} \quad (2.7)$$

2.1.2 Primer izračuna stroška strojne ure

Prikazali bomo primer izračuna stroška izdelave vzorčnega izdelka. S potopno elektroerozijo moramo izdelati slepo kvadratno luknjo dimenzij 10x10x10 v orodno jeklo.

Za izračun bomo uporabili naslednje podatke:

- Cene strojev za potopno elektroerozijo se gibljejo pod 100.000 € za stroje brez numeričnega krmiljenja, ki zmorejo obdelavo samo v osi z , cene numerično krmiljenih se gibljejo med 150.000 in 300.000 € – mi bomo nalogo izvedli na stroju vrednem 90.000 €.
- Stroj dela v eni izmeni in se mora amortizirati v 5-ih letih, pri čemer upoštevamo 174 delovnih ur na mesec za enozmensko delo.
- Priključne moči klasičnih strojev se gibljejo med 5 in 7 kW, numerično krmiljeni do 15 kW – nalogo bomo izvedli na stroju moči 7 kW.
- Cena električne energije c_e je 0,2 €/kWh.
- Cena dielektrika c_{pm} je 3,5 € za liter. Kapaciteta rezervarja na takem stroju je $V_r = 2001$. Dielektrik je potrebno menjati vsako leto. Torej je dielektrik uporaben: $L_{diel} = 1 \cdot 174 \cdot 12 = 2112$ h.
- Cena operaterja je 10 €/h.
- Letni stroški vzdrževanja c_v se gibljejo od 100 €/leto za klasične stroje pa do nekaj 1000 €/leto za numerično krmiljene stroje – v nalogi upoštevamo strošek vzdrževanja $c_v = 200$ €/leto.
- Izdelek je enostaven, vendar je potrebno ustrezno pozicionirati obdelovanec in elektrodo, zato je pripravljajno-zaključni čas $t_{pz} = 30$ min.
- Faktor režije je 1,2.

Hitrost odnašanja materiala določimo na podlagi En. 2.5. Podatek o hitrosti odnašanja V_w razberemo iz tabele 2.1.

Glede na enačbo 2.2 najprej določimo ceno strojne ure:

$$C_{su} = \frac{90.000}{1 \cdot 174 \cdot 12 \cdot 5} + 7 \cdot 0,2 + \frac{3,5 \cdot 200}{1 \cdot 174 \cdot 12} + \frac{200}{1 \cdot 174 \cdot 12} = 10 \text{ €/h.}$$

Nadalje potrebujemo še obdelovalni čas. Iz tabele 2.1 izberemo režim 6, ker ni posebnih zahtev po kakovosti površine in ugotovimo, da je hitrost odnašanja enaka $22,5 \text{ mm}^3/\text{min}$. Po En. 2.5 je čas obdelave:

$$t_{\text{ob}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10}{22,5} = 44 \text{ min.}$$

Določimo čas izdelave, ki je:

$$T_e = 30 + 44 = 74 \text{ min} = 1,2 \text{ h.}$$

Strošek strojne ure za naš izdelek tako znaša:

$$S_{\text{su}} = 10 \cdot 1,2 = 12 \text{ €.}$$

Glede na to, da določamo samo strošek izdelave luknje (primer, ko stranka priskrbi material), je naslednji korak določitev stroškov orodja. V našem primeru je to elektroda dimenzij $9,69 \times 9,69 \text{ mm}$ ustrezne višine in z oblikovanim mestom vpetja. Dimenzije smo določili glede na podatek o bočni reži za obdelovalni režim 6 (Tabela 2.1). Takšno orodje bi izdelali iz kvadratne palice, ki jo ustrezno obdelamo. Torej bi morali strošek izdelave izračunati po enačbi za izračun *PSI* za ustrezen obdelovalni postopek, v tem primeru za frezanje. Tukaj bomo strošek orodja ocenili na 20 €. Ker moramo izdelati samo eno luknjo, moramo celoten strošek orodja pripisati samo izdelavi te luknje.

Tako izračinamo strošek izdelave luknje po enačbi 2.1:

$$PSI = (10 \text{ €} + 0 + 20 \text{ €}) \cdot 1,2$$

$$PSI = 36 \text{ €}$$

2.2 Žična elektroerozija

2.2.1 Empirični model hitrosti rezanja

Pri žični elektroeroziji ne nastavljamo direktno hitrost rezanja, ampak je hitrost rezanja posledica izbire obdelovalnih parametrov. Kljub temu je mogoče oceniti hitrost rezanja v_r z empirično enačbo (En. 2.8) glede na ciljne vrednosti. Hitrost rezanja je tako odvisna od materiala, ki ga režemo, njegove debeline, zahtevane hrapavosti površine in premera žice s katero režemo.

$$v_r = A \cdot h^{-B} \text{ [mm/min]} \quad (2.8)$$

kjer je h debelina materiala v mm, A in B pa eksperimentalno pridobljeni konstanti (Tabela 2.2).

2.2.2 Osnovne enačbe

Enačbe smo že zgoraj zapisali in razložili za primer potopne elektroerozije. Tukaj jih ponovimo in osvetlimo v luči žične elektroerozije, saj je potrebno pri izračunu proizvodnih stroškov upoštevati

Tabela 2.2: Hitrost rezanja pri žični elektroeroziji

Material obdelovanca	Ra [μm]	žica premera 0,25 mm			
		A		B	
		$h \leq 50$	$h \geq 50$	$h \leq 50$	$h \geq 50$
Orodno jeklo	3,2	53,73	746,04	0,764	1,441
Nerjavno jeklo	4	68,4	889,5	0,822	1,467
Konstruktivno jeklo	4	72,5	941,6	0,822	1,467
Baker	3,2	46,17	1269	0,681	1,525
Aluminij	5	98,11	2606,9	0,625	1,474

specifike vsakega izmed obdelovalnih postopkov. Glede na to, da se pri žični elektroeroziji uporablja standardno orodje (žica), ki se med obdelavo obrablja in je tako strošek orodja odvisen od časa obdelave, ne uvrščamo *strošek orodja* S_{or} posebej med proizvodne stroške, ampak vključimo *ceno orodja* v ceno strojne ure.

Pri proizvodnem strošku PSI se torej strošek orodja skriva v ceni strojne ure in proizvodne stroške izračunamo po sledeči enačbi:

$$PSI = (S_{su} + S_{ma}) \cdot R \text{ [€]}, \quad (2.9)$$

kjer je S_{su} strošek strojne ure in S_{ma} strošek materiala, iz katerega naredimo izdelek. Primerjaj enačbi 2.1 in 2.9.

Strošek strojne ure:

$$S_{su} = C_{su} \cdot T_e \text{ [€]} \quad (2.10)$$

Enačba za ceno strojne ure žične elektroerozije C_{su} (En. 2.9) se v nekaj postavkah razlikuje od izračuna cene strojne ure pri potopni elektroeroziji (En. 2.3). V primeru žične elektroerozije je dielektrik deionizirana voda. Za pripravo vode skrbi posebna enota prigrajena k stroju, ki jo sestavljajo filtri in deionizatorji, ki jih je potrebno periodično menjati. Menjava predstavlja majhen strošek, zato bomo ta strošek pri izračunu strojne ure zanemarili. V primeru žične elektroerozije je orodje žica, ki med obdelavo z določeno hitrostjo potuje skozi režo in se pri tem obrablja. Zato je smiselno v ceno strojne ure prišteti tudi ceno orodja.

$$C_{su} = C_i + C_e + C_{or} + C_{op} + C_v \text{ [€/h]}, \quad (2.11)$$

Ceno investicije C_i , ceno energije C_e , ceno operaterja C_{op} in ceno vzdrževanja C_v se določi enako kot v primeru potopne elektroerozije. Cene strojev za žično elektroerozijo se gibljejo med 100.000 € in 300.000 €, imajo priključne moči P med 8 in 15 kW, in letni stroški vzdrževanja znašajo nekaj 1000 €.

Cena orodja (žice):

$$C_{or} = c_{or} \cdot m_{or}$$

Cena žice c_{or} je v praksi podana na enoto mase, zato maso porabljene žice zapišemo tako, da izračunamo ceno na uro:

$$C_{or} = c_{or} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_{or} \text{ [€/h]},$$

kjer je d premer žice v m, ρ gostota žice v kg/m^3 (medenina ima gostoto 8700 kg/m^3) in v_{or} hitrosti previjanja žice v m/s. Za izračun cene žice na enoto urepotrebujemo torej hitrost previjanja žice v_{or} , ki je odvisna od materiala, ki ga režemo, njegove debeline in premera žice (Tabela 2.2).

Tabela 2.3: Hitrost previjanja žice pri žični elektroeroziji

Material obdelovanca	Debelina h [mm]	v_{or} [m/min]	
		groba obdelava	fina obdelava
Jeklo	$h < 50$	5	10
	$50 \leq h < 150$	3,5	10
Barvne kovine	$5 \leq h < 150$	4,9	10

Glede časa izdelave T_e , pripravljajalno-zaključnega časa t_{pz} in časa obdelave t_{ob} veljajo iste ugotovitve kot za potopno elektroerozijo.

$$T_e = t_{\text{pz}} + t_{\text{ob}}$$

Čas rezanja izračunamo iz rezalne hitrosti v_{ob} in dolžine poti s :

$$t_{\text{ob}} = \frac{s}{v_{\text{ob}}}. \quad (2.12)$$

Strošek materiala S_{ma} se izračuna kot v primeru potopne elektroerozije (En. 2.7).

2.2.3 Primer izračuna stroška strojne ure

Prikazali bomo primer izračuna proizvodnih stroškov za izdelek, ki iz orodnega jekla debeline 40 mm, katerega dolžina konture oz. poti, ki jo mora opraviti žica, znaša 1 meter. Rezanje poteka v grobem režimu. Gabaritne mere izdelka so 390 x 390 mm.

Za izračun bomo uporabili naslednje podatke:

- cena stroja za rezanje z laserjem znaša 300.000 €,
- stroj dela v dveh izmenah in se mora amortizirati v 5-ih letih, pri čemer upoštevamo 174 delovnih ur na mesec,
- priključna moč stroja je 15 kW,
- cena električne energije je 0,2 €/kWh,
- žica je iz medenine gostote 8700 kg/m^3 in je premera 0,25 mm,
- cena žice je 5 €/kg
- cena operaterja je 10 €/h,
- letna cena vzdrževanja je 5000 €,
- izdelek je enostaven - pripravljajalno-zaključni čas je 5 minut,
- cena orodnega jekla je $c_{\text{or}} = 2 \text{ €/kg}$,
- faktor režije je 1,2.

Glede na enačbo za izračun proizvodnih stroškov (En. 2.10) najprej določimo ceno strojne ure (En. 2.11):

$$C_{\text{su}} = \frac{300000}{2 \cdot 174 \cdot 12 \cdot 5} + 15 \cdot 0,2 + 5 \cdot 8700 \cdot \frac{\pi \cdot (0,25 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 5 \cdot 60 + \frac{5000}{2 \cdot 174 \cdot 12} = 19,2 \text{ €/h.}$$

Za izračun hitrosti rezanja so v tabeli 2.2 podane vrednosti konstant A in B za žico premera 0,25 mm in različne materiale v odvisnosti od debeline rezanja. Hitrost rezanja potrebujemo za določitev časa obdelave. Hitrost rezanja izračunamo po enačbi 2.8:

$$v = 53,73 \cdot 40^{-0,764} = 3,2 \text{ mm/min.}$$

Čas obdelave je tako (En. 2.12):

$$t_{\text{ob}} = \frac{1000}{3,2} = 312,5 \text{ min} = 5,2 \text{ h}$$

in čas izdealeve:

$$T_e = 15 + 312 = 327 \text{ min} = 5,5 \text{ h.}$$

Strošek strojne ure za naš izdelek tako znaša (En. 2.10):

$$S_{\text{su}} = 19,2 \cdot 5,5 = 105 \text{ €.}$$

Pri izračunu stroška materiala moramo upoštevati ceno surovca. Sureovec mora biti malenkostno večji od gabaritnih mer izdelka. Tako je masa surovca

$$m_{\text{ma}} = V_{\text{ma}} \cdot \rho_{\text{ma}} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,04 \cdot 7850 = 50 \text{ kg}$$

in strošek materiala po enačbi 2.7

$$S_{\text{ma}} = c_{\text{ma}} \cdot m_{\text{ma}} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ €}$$

Proizvodni stroški izdelka so tako

$$PSI = (105 + 100) \cdot 1,2 = 246 \text{ €}$$

Kljub nizki postavki za strojno uro ostaja žična elektroerozija tehnologija, ki proizvaja izdelke najvišjega kakovostnega razreda. Hitrost odnašanja materiala je nizka. Ekonomičnost obdelave tako obsega predvsem kovine različnih debelin kjer je zahtevana geometrijska natančnost in malo sprememb na generirani površini.

Poglavje 3

2.

LV1: Ekonomika rezanja z abrazivnim vodnim curkom in laserskega rezanja

3.1 Abrazivni vodni curek

3.1.1 Empirični model hitrosti rezanja z abrazivnim vodnim curkom

Pri rezanju z abrazivnim vodnim curkom (AVC) se največkrat krmili samo podajalno hitrost rezanja, ker je to najenostavnejše izvesti. Ostalih parametrov se med rezanjem ne spreminja. Podobno kot v primeru žične elektroerozije, obstaja empirični model hitrosti rezanja tudi za rezanje z abrazivnim vodnim curkom, le da je ta empirični (Zengov) model veliko bolj dodelan. Uporablja ga tudi krmilnik stroja za izračun hitrosti rezanja glede na vhodne parametre v proces in želene karakteristike reza parametre.

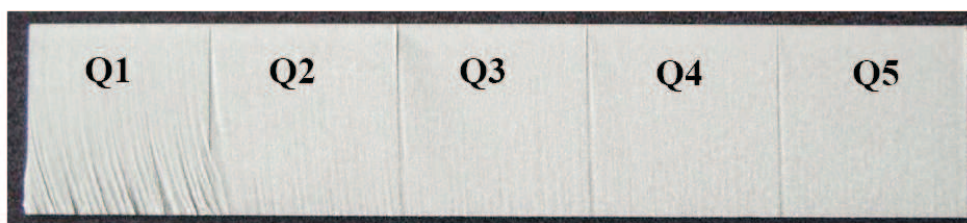
Empirični model hitrosti rezanja je zapisan o obliki sledeče enačbe:

$$v = \left(\frac{N_m \cdot p^{1,25} \cdot \dot{V}^{0,687} \cdot \dot{m}_a^{0,343}}{C_z \cdot h \cdot Q \cdot d_f^{0,618}} \right)^{1,15}, \quad (3.1)$$

kjer je h globina reza v mm, N_m obdelovalno število, ki pove kakšen material režemo; p tlak vode v MPa, \dot{V} volumski pretok vode v l/min, \dot{m}_a masni pretok abraziva v g/s, C_z konstanta (za metrični sistem je vrednost 8800), d_f premer fokusirne šobe v mm, v hitrost rezanja v mm/s in Q kakovost reza.

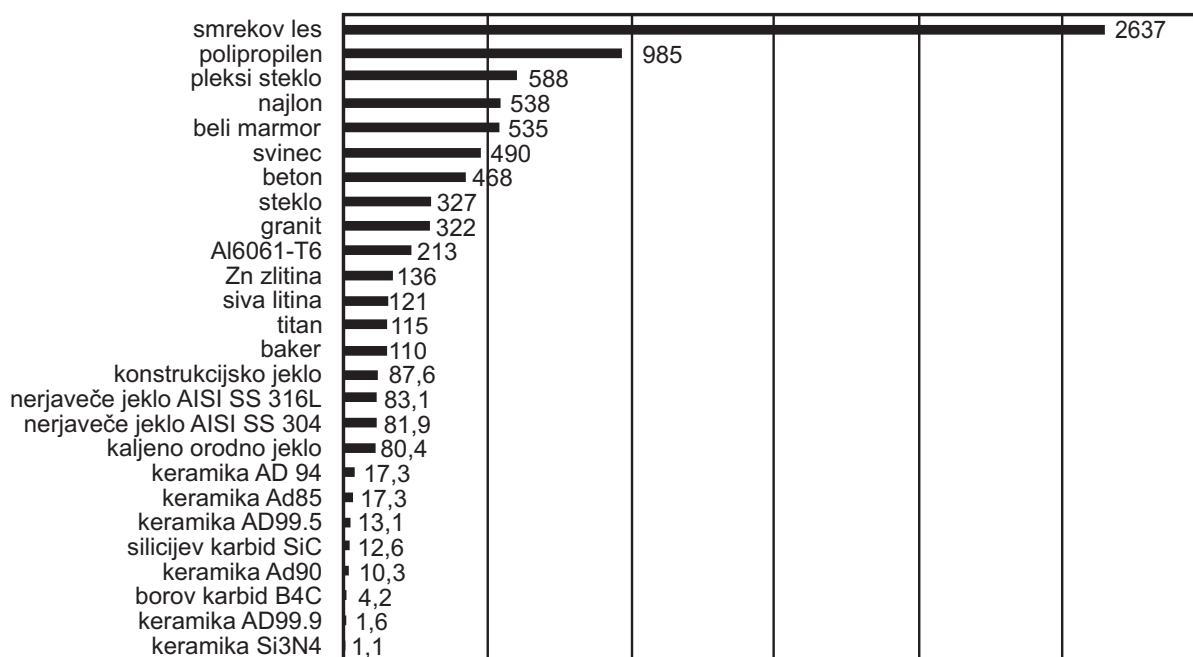
Definiranih je pet kakovostnih razredov, kjer Q zajema vrednosti od 1 do 5. Pri tem je $Q = 1$ najslabša kakovost, $Q = 5$ pa najboljša. Obratno velja, da je pri nižji kakovosti hitrost rezanja večja in je takšna obdelava zato cenejša. Primer odrezanih površin aluminija za pet kakovostnih razredov je prikazan na sliki 3.1.

Koeficienti obdelovalnosti N_m za različne materiale so prav tako pridobljeni eksperimentalno kot eden izmed koeficientov regresijske enačbe. Večja vrednost koeficienta pomeni, da se material lažje obdeluje in je zato lahko hitrost rezanja večja. Primerjava med obdelovalnostjo različnih



Slika 3.1: Primer odrezanih površin aluminija za pet kakovostnih razredov.

materialov je prikazana na sliki 3.2.



Slika 3.2: Primerjava obdelovalnih števil N_m za različne materiale pri rezanju z AVC. Večja vrednost pomeni lažjo obdelavo.

3.1.2 Osnovne enačbe

Osnovne enačbe smo že zgoraj zapisali za primer elektroerozijske obdelave. Tukaj jih osvetlimo v luči rezanja z AVC. Kot v primeru žične elektroerozije, je tudi tukaj cena orodja (abrazivnega vodnega curka) odvisna od časa obdelave.

Proizvodni strošek PSI :

$$PSI = (S_{su} + S_{ma}) \cdot R \text{ [€]}, \quad (3.2)$$

kjer je S_{su} strošek strojne ure in S_{ma} strošek materiala, iz katerega naredimo izdelek.

Strošek strojne ure:

$$S_{su} = C_{su} \cdot T_e \text{ [€]} \quad (3.3)$$

Enačba za ceno strojne ure C_{su} se v nekaj postavkah razlikuje od izračuna cene strojne ure žične elektroerozije (En. 2.11). Pri določitvi cene strojne ure rezanja z AVC štejemo ceno porabljene vode in abraziva k ceni orodja, ceno vodne in fokusirne šobe pa kot ceno pomožnega materiala C_{pm} .

$$C_{su} = C_i + C_e + C_{or} + C_{pm} + C_{op} + C_v \text{ [€/h]}, \quad (3.4)$$

Ceno investicije C_i , ceno energije C_e , ceno operaterja C_{op} in ceno vzdrževanja C_v se določi enako kot v primeru elektroerozijske obdelave. Cene strojev za rezanje z AVC se gibljejo med 150.000 € in 250.000 €, imajo priključne moči P med 15 in 30 kW, letni stroški vzdrževanja znašajo do 5000 €. Največja postavka vzdrževanja je servisiranje visokotlačne črpalke ter visokotlačnih vodov in rezalne glave. Sem štejemo tudi čiščenje stroja in odstranitev odpadkov in odpadnega abraziva iz lovilnega bazena.

Cena orodja:

$$C_{or} = C_{vo} + C_{ab} \text{ [€/h]},$$

kjer je C_{vo} cena vode in C_{ab} cena abraziva. Seveda moramo vse cene podati na uro, da jih lahko seštejemo.

Ceno vode na uro izračunamo iz volumskega pretoka vode \dot{Q}_{vo} v m^3/h in cene vode za kubični meter c_{vo} po enačbi:

$$C_{vo} = \dot{Q}_{vo} \cdot c_{vo} \text{ [€/h]}.$$

Večji strošek je abraziv, katerega ceno na uro izračunamo na podoben način kot ceno vode:

$$C_{ab} = \dot{m}_{ab} \cdot c_{ab} \text{ [€/h]},$$

kjer je \dot{m}_{ab} masni pretok abraziva v kg/h in c_{ab} cena abraziva v €/kg.

Cena pomožnega materiala:

$$C_{or} = C_{vs} + C_{fs} \text{ [€/h]},$$

kjer je C_{vs} cena vodne šobe in C_{fs} cena fokusirne šobe. Seveda moramo vse cene podati na uro, da jih bomo lahko sešteli skupaj.

Fokusirno in vodno šobo je potrebno pogosto menjavati. Njun doprinos k ceni strojne ure izračunamo glede na njuno ceno na kos (I_{vs} za vodno šobo in I_{fs} za fokusirno šobo v €) in njuno dobo obstojnosti (L_{fs} in L_{ps} v urah):

$$C_{vs} = \frac{I_{vs}}{L_{vs}} \text{ [€/h]},$$

$$C_{fs} = \frac{I_{fs}}{L_{fs}} \text{ [€/h]}.$$

Glede časa izdelave T_e , pripravljajno-zaključnega časa t_{pz} in časa obdelave t_{ob} veljajo iste ugotovitve kot za potopno in žično elektroerozijo:

$$T_e = t_{pz} + t_{ob}$$

Čas rezanja izračunamo iz rezalne hitrosti v_{ob} in dolžine poti s :

$$t_{ob} = \frac{s}{v_{ob}}.$$

Hitrost obdelave izračunamo s pomočjo empirične enačbe 3.1.

Strošek materiala S_{ma} se izračuna kot v primerih potopne in žične elektroerozije (En. 2.7).

$$S_{ma} = m_{ma} \cdot c_{ma} \text{ [€/h]}$$

3.1.3 Primer izračuna stroška strojne ure

Prikazali bomo primer izračuna stroška strojne ure vzorčnega izdelka. Z AVC moramo odrezati izdelek iz aluminija debeline 12 mm, katerega dolžina konture oz. poti, ki jo mora opraviti rezalna glava, znaša 1 meter. Zahtevana je kakovost reza 3. Gabaritne mere izdelka so 390 x 390 mm.

Za izračun bomo uporabili naslednje podatke:

- cena stroja za rezanje z AVC znaša 200.000 €,
- stroj dela v dveh izmenah in se mora amortizirati v 5-ih letih, pri čemer upoštevamo 174 delovnih ur na mesec,
- priključna moč stroja za rezanje z AVC je 30 kW,
- cena električne energije je 0,2 €/kWh,
- premer vodne šobe je 0,3 mm in fokusirne šobe 0,8 mm,
- režemo s tlakom vode 300 MPa,
- cena vode je 0,5 €/m³ in cena abraziva garnet zrnatosti 80 je 0,4 €/kg,
- masni pretok abraziva je 18 kg/h,
- cena vodne šobe je 20 € in doba obstojnosti je 40 h
- cena fokusirne šobe je 70 € in doba obstojnosti je 100 h,
- cena operaterja je 10 €/h,
- letna cena vzdrževanja je 5000 €,
- izdelek je enostaven - pripravljajalno-zaključni čas je 3 minute.

Glede na enačbo 3.3 najprej določimo ceno strojne ure. Volumski pretok vode je odvisen od tlaka vode in premera vodne šobe. V našem primeru znaša pretok 2 l/min.

Glede na enačbo 3.4 sledi:

$$C_{su} = \frac{200000}{2 \cdot 174 \cdot 12 \cdot 5} + 30 \cdot 0,2 + 0,19 \cdot 0,5 + 18 \cdot 0,4 + \frac{20}{40} + \frac{70}{100} + 10 + \frac{5000}{2 \cdot 174 \cdot 12} = 35,27 \text{ €/h.}$$

Nadalje potrebujemo še obdelovalni čas, pred tem pa izračunamo še hitrost rezanja z enačbo 3.1:

$$v = \left(\frac{219 \cdot 300^{1,25} \cdot 3,16^{0,687} \cdot 5^{0,343}}{8800 \cdot 12 \cdot 3 \cdot 0,8^{0,618}} \right)^{1,15} = 4,63 \text{ mm/s} = 278 \text{ mm/min.}$$

Določimo čas izdelave, ki je:

$$T_e = 15 + \frac{1000}{278} = 18 \text{ min} = 0,3 \text{ h.}$$

Strošek strojne ure za naš izdelek tako znaša:

$$S_{su} = 35,27 \cdot 0,3 = 11 \text{ €.}$$

Pri izračunu stroška materiala upoštevamo ceno surovca, ki je nekaj večji od gabaritnih mer izdelka. Masa surovca:

$$m_{\text{ma}} = V_{\text{ma}} \cdot \rho_{\text{ma}} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,012 \cdot 2700 = 5 \text{ kg}$$

in strošek materiala po enačbi 2.7

$$S_{\text{ma}} = c_{\text{ma}} \cdot m_{\text{ma}} = 5 \cdot 5 = 25 \text{ €}$$

Proizvodni stroški izdelka izračunomo po enačbi 3.2 in so tako

$$PSI = (11 + 25) \cdot 1,2 = 43 \text{ €}$$

3.2 Lasersko rezanje

3.2.1 Empirični model rezanja z laserskim žarkom

Pri rezanju z laserskim žarkom se tako kot pri rezanju z AVC krmili predvsem hitrost rezanja, saj je to najenostavnejše izvesti, medtem ko so ostale nastavitve kot so laserska moč, optika, plinski parametri itd. nespremenjene. Za oceno primerne hitrosti rezanja uporabimo podobno empirično enačbo kot v primeru žične elektroerozije (En. 2.8), ki omogoča določitev v_r glede na ciljne vrednosti (En. 3.5). Pridobljena je bila na podlagi velike količine preizkusov ter z uporabo regresijske metode in velja v omejenem območju laserskih moči.

$$v_r = Q \cdot P \cdot h^{-B} \quad (3.5)$$

Parametra Q in B sta konstanti, ki sta odvisni od materiala, ki ga režemo. Njune vrednosti so podane v tabeli 3.1. Da izračunamo hitrost rezanja v mm/min, je moč laserskega vira P podana v vatih in debelina obdelovanca h v milimetrih. Enačba velja v območju laserskih moči od 1,5 do 4 kW za rezanje kovin in od 100 do 1500 W za rezanje nekovin ter nerjavnih jekel s kisikom.

Tabela 3.1: Vrednosti konstant Q in B za izračun hitrosti laserskega rezanja

Material	Q	B	Največja debelina h_{max} [mm]	Rezalni plin
Nizkoogljčno jeklo	7,04	1,053	20	kisik
Orodno jeklo	5,28	1,053	15	kisik
Nerjavno jeklo	4,65	1,265	12	dušik
Aluminij	4,79	1,495	8	dušik
Najlon	40	1,350	30	zrak
Akrilno steklo	70	1,350	30	zrak
Vezan les	69,66	1,276	30	zrak

3.2.2 Osnovne enačbe

Princip izračuna stroškov obdelave je podoben kot pri žični elektroeroziji in rezanju z AVC. Tudi tukaj je cena orodja (rezalnih plinov) odvisna od časa obdelave.

Proizvodni strošek PSI :

$$PSI = (S_{su} + S_{ma}) \cdot R \text{ [€]}, \quad (3.6)$$

kjer je S_{su} strošek strojne ure in S_{ma} strošek materiala, iz katerega naredimo izdelek.

Strošek strojne ure:

$$S_{su} = C_{su} \cdot T_e \text{ [€]} \quad (3.7)$$

Pri določitvi cene strojne ure laserskega rezanja štejemo ceno porabljenih plinov kot ceno orodja C_{or} . V tem primeru ne upoštevamo stroškov pomožnega materiala C_{pm} , npr. obrabo leče in šobe.

$$C_{su} = C_i + C_e + C_{or} + C_{op} + C_v \text{ [€/h]}, \quad (3.8)$$

Ceno investicije C_i , ceno energije C_e , ceno operaterja C_{op} in ceno vzdrževanja C_v se določi enako kot v prejšnjih primerih. Cene strojev za lasersko rezanje se gibljejo med 200.000 € in 500.000 €, imajo priključne moči P med 25 in 70 kW, letni stroški vzdrževanja znašajo tudi do 10000 €.

Cena orodja:

$$C_{or} = \dot{m}_p \cdot c_p \text{ [€/h]},$$

kjer je \dot{m}_p volumski pretok plina in c_p cena kubičnega metra plina pri normalnih pogojih. Če uporabljamo več različnih plinov, potem moramo sešteti njihovo porabo. Porabo plina določimo iz table 3.2.

Tabela 3.2: Primer volumskih pretokov plinov v m^3/h za laserje različnih moči.

		Moč laserja [kW]			
		1	2	3	4
Kisik		1	1	1	1
Dušik	$h < 2$	11	11	11	11
	$2 < h \leq 4$	-	16	16	16
	$4 < h \leq 6$	-	23	23	23
	$h > 6$	-	-	30	30

Glede časa izdelave T_e , pripravljajno-zaključnega časa t_{pz} in časa obdelave t_{ob} veljajo iste ugotovitve kot v prejšnjih primerih:

$$T_e = t_{pz} + t_{ob}$$

Čas rezanja izračunamo iz rezalne hitrosti v_{ob} in dolžine poti s :

$$t_{ob} = \frac{s}{v_{ob}}.$$

Hitrost obdelave izračunamo po empirični enačbi 3.5.

Strošek materiala S_{ma} se izračuna kot v prejšnjih primerih (En. 2.7).

$$S_{ma} = m_{ma} \cdot c_{ma} \text{ [€/h]}$$

3.2.3 Primer izračuna stroška strojne ure

Prikazali bomo primer izračuna stroška strojne ure vzorčnega izdelka. Z laserjem moramo odrezati izdelek iz nerjavnega jekla debeline 8 mm in gabaritnih mer 390 x 390 mm, katerega dolžina konture oz. poti, ki jo mora opraviti rezalna glava, znaša 1 meter.

Za izračun bomo uporabili naslednje podatke:

- cena stroja za rezanje z laserjem znaša 400.000 €,
- stroj dela v dveh izmenah in se mora amortizirati v 5-ih letih, pri čemer upoštevamo 174 delovnih ur na mesec,
- priključna moč laserja z močjo žarka 4 kW je 45 kW,
- cena električne energije je 0,2 €/kWh,
- ker režemo nerjavno jeklo, uporabimo dušik kot rezalni plin, katerega cena je 2,5 €/m³ (cena kisika je 2 €/m³).
- cena operaterja je 10 €/h,
- letna cena vzdrževanja je 8000 €,
- izdelek je enostaven - pripravljalno-zaključni čas je 15 minut.

Ceno strojne ure izračunamo po enačbi 3.7. Imamo vse potrebne podatke razen volumskega pretoka rezalnega plina, ki ga določimo iz tabele 3.2. Glede na debelino materiala (8 mm), moč laserja 4 kW, in rezalni plin (dušik), je poraba plina 30 m³/h.

Glede na enačbo 3.8 sledi:

$$C_{su} = \frac{400000}{2 \cdot 174 \cdot 12 \cdot 5} + 45 \cdot 0,2 + 30 \cdot 7 + \frac{8000}{2 \cdot 174 \cdot 12} = 240,1 \text{ €/h.}$$

Za izračun obdelovalnega časopotrebujemo hitrost rezanja, ki jo določimo po empirični enačbi 3.5:

$$v_{ob} = 4,65 \cdot 4000 \cdot 8^{-1,265} = 1340 \text{ mm/min.}$$

Čas izdelave je tako:

$$T_e = 15 + \frac{1000}{1340} = 16 \text{ min} = 0,2 \text{ h.}$$

Strošek strojne ure za naš izdelek tako znaša:

$$S_{su} = 240,1 \cdot 0,2 = 48 \text{ €.}$$

Pri izračunu stroška materiala upoštevamo ceno surovca, ki je nekaj večji od gabaritnih mer izdelka. Masa surovca:

$$m_{ma} = V_{ma} \cdot \rho_{ma} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,008 \cdot 7850 = 100 \text{ kg}$$

in strošek materiala po enačbi 2.7

$$S_{ma} = c_{ma} \cdot m_{ma} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ €}$$

Proizvodni stroški izdelka izračunomo po enačbi 3.6 in so tako

$$PSI = (48 + 300) \cdot 1,2 = 348 \text{ €}$$

Kljub temu, da je strojna ura laserskega rezanja dokaj draga, so stroški obdelave konkurenčni ostalim postopkom, saj je hitrost laserkega rezanja dokaj velika.



Kot ste opazili, smo pri izračunih naredili kar nekaj poenostavitev. Prva poenostavitev je pri izračunu cene energije na uro obratovanja, kjer smo upoštevali priključno moč stroja. Stroj namreč ne dela vedno pod polno obremenitvijo. Druga poenostavitev je pri izračunu stroška strojne ure. Računali smo, kot da stroj dela tudi v času pripravljajno-zaključnega časa, kar pa dejansko ni res. Strošek strojne ure lahko izračunamo tudi drugače: vsako od postavk v enačbi (npr. En. 3.8) lahko posebej množimo bodisi samo s časom obdelave t_{ob} , pripravljajno-zaključnim časom t_{pz} ali obema. Podrobneje si to ogledamo na vajah.

Poglavje 4

1. LV2: Potopna elektroerozija

4.1 Uvod

Potopna elektroerozija sodijo med elektrotermične nekonvencionalne obdelovalne postopke. S potopno elektroerozijo preslikamo obliko elektrode v obdelovanec (Slika 4.1). Če upoštevamo še karakteristike elektroerozijskega procesa, je ta postopek primeren za izdelavo zapletenih 3D oblik v trde in električno prevodne materiale. Zato se potopna elektroerozija uporablja predvsem v orodjarnah za izdelavo orodij za preoblikovanje, tlačno litje, brizganje plastike ipd. Postopek je uporaben tudi za izdelavo lukenj majhnih premerov in relativno velikih globin. Premer luknje je navzdol omejen s premerom elektrode, ki jo lahko izdelamo. Standardne elektrode okroglega preseka imajo premer $d \geq 0,2 \text{ mm}$. Globina luknje je omejena le z ravnostjo elektrode, torej tudi z njeno togostjo.



Slika 4.1: Primer preslikave oblike elektrode v obdelovanec

Poglejmo si fizikalno ozadnje preslikave oblike elektrode v obdelovanec. Obdelovanec in orodje sta spojena z virom električne energije: predstavljata elektrodi med katerima teče proces razelektritev skozi dielektrik v katerega sta potopljena. Dielektrik je električno neprevoden in razelektritve

v reži so posledica električnih impulzov, ki nastajajo v generatorju impulzov. Impulzi povzročajo porast električnega potenciala na elektrodi, kar vodi do nastanka električnega polja v reži in posledično do preboja izolacijske plasti dielektrika v reži med elektrodo in obdelovancem. Preboj se zgodi na mestu, kjer je električno polje najmočnejše in prevodnost reže največja. V tekočini, ki ionizira, se ustvari kanal plazme premera nekaj mikrometrov. Dovedena energija v času obstoja kanala plazme se pretvarja v toploto, ki prehaja iz kanala plazme v obe elektrodi in vpliva na količino raztaljenega in uparjenega materiala na elektrodah. Po prenehanju impulza in dovajanja energije nastopi implozija plazemskega kanala in raztaljen material zapusti obdelovanec ter zaplava v dielektriku v obliki drobnih delcev. Tak način obdelave je ima določene rednosti v primerjavi z ostalimi obdelovalnimi postopki: omogoča natančno izdelavo kompleksnih oblik v trde materialih, saj trdnost in trdota ne igrata pomembne vloge pri obdelavi. Slabost je relativno počasna obdelava.

4.2 Namen vaje

Na vaji se seznanimo z elektroerozijskim postopkom obdelave na primeru stroja za potopno elektroerozijo. Spoznamo funkcionalne enote stroja in princip delovanja. Spoznamo uporabniški vmesnik stroja in način izbire obdelovalnih parametrov. Med vajo ločimo med nastavitvenimi in krmilnimi obdelovalnimi parametri in spoznamo njihov vpliv na potek in rezultate obdelave.

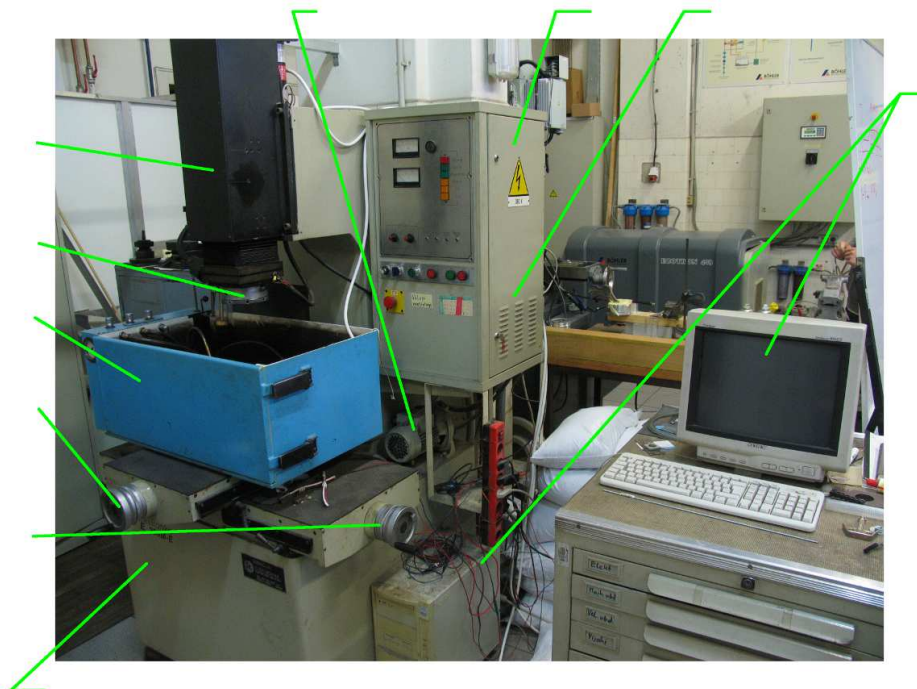
4.3 Potek vaje

Vaja poteka v sledečem vrstem redu:

- ogled izdelkov narejenih s potopno elektroerozijo,
- spoznavanje komponent stroja,
- pregled obdelovalnih parametrov in delitev na nastavitvene in krmilne,
- izbira obdelovalnih parametrov za podan primer izdelka
- vsak študent praktično izvede obdelavo in določi take obdelovalne parametre, da je zagotovljen stabilen obdelovalni proces,
- spreminjanje obdelovalnih parametrov in opazovanje njihovega vpliva na potek procesa,
- povzetek vsebine vaje in izdelava poročila.

4.4 Naloge

1. Podaj (skiciraj) bistvene razlike med žično in potopno elektroerozijo s stališča oblike obdelovancev!
2. Poimenuj komponente stroja označene na sliki 4.2. Kratko opiši funkcijo vsake komponente.
3. Navedi nastavitvene in krmilne parametre! Obkroži tiste, ki vplivajo na hrapavost površine, in podčrtaj tiste, ki vplivajo na hitrost odnašanja.
4. Kako zagotovimo stabilen elektroerozijski obdelovalni proces?



Slika 4.2: Stroj za potopno elektroerozijo, kjer je obdelava možna samo v verzikalni osi z.

Tabela 4.1: Tabela nastavitvenih in krmilnih parametrov

Nastavitveni parametri	Krmilni parametri

Poglavje 5

2. LV2: Priprava CAM programa na podlagi CAD risbe

5.1 Uvod

Obdelava z abrazivnim vodnim curkom (AVC) sodi med mehanske nekonvencionalne obdelovalne postopke, kjer z visoko zgoščeno kinetično energijo odnašamo material. Rezanje z abrazivnim vodnim curkom uporablja visokohitrostni vodni curek za pospeševanje zelo trdih abrazivnih zrn. Abrazivna zrna zaradi svoje velike hitrosti in trdote odnašajo material. Pri tem pomaga tudi voda s prodiranjem v razpoke, ki nastajajo v območju rezanja. primer rezanja prikazuje slika 5.1.



Slika 5.1: Primer rezanja z AVC

Rezanje z AVC poteka po vnaprej določeni konturi, ki je podana v obliki tekstovne datoteke, ki služi kot vhod v krmilnik stroja. Prvi numerično krmiljeni stroji so bili stroji za struženje in frezanje. Takrat se je program izvanjanja operacij pisal v t.i. G-kodi. Ker je bilo to dokaj mukatrpno delo, so se kmalu pojavili sistemi, ki so omogočali pretvorbo risbe izdelka (CAD¹) v

¹angl. Computer Aided Design

program za izdelavo (CAM¹).

5.2 Namen vaje

Stroj Omax, na katerem poteka vaja, uporablja svoj sistem za izdelavo CAM programa na podlagi risbe v DXF formatu. Na vaji bomo spoznali programsko opremo in se naučili pripraviti program za rezanje z AVC. Pri tem bomo spoznali tudi splošne zakonitosti pretvorbe risbe izdelka v program za obdelavo, ki veljajo tudi na ostalih obdelovalnih procesih, kot so lasersko rezanje, struženje, frezanje ipd.

5.3 Potek vaje

Vaja poteka v sledečem vrstem redu:

- razlaga uporabe programa za načrtovanje (CAD) in programa (CAM) pri konturnem rezanju,
- opis delovanja programa OMAX Layout in OMAX Make,
- izvedba programiranja OMAX stroja na primerih,
- povzetek vsebine vaje in izdelava poročila.

5.4 Naloge

1. Osnove risanja v CAD/CAM programu OMAX Layout:
 - Odpri datoteko Test_1_Beginner.dxf in reši zahtevane primere!
 - Odpri datoteko Test_1_Intermediate.dxf in reši zahtevane primere! Tokrat uporabi pomoč oz. Help!
2. V programu OMAX Layout pripravi program za rezanje z AVC:
 - Narišite prirobnico z zunanjim premerom $\phi 200$ in notranjim premerom $\phi 140$. Prirobnica naj ima po obodu enakomerno razporejenih 6 lukenj premera $\phi 15$.
 - Določite kakovostni razred obdelave. Razrede za posamezne črte izberite primerno funkciji prirobnice!
 - S funkcijo Lead In-Out: Auto-path (Advanced) dodajte vhode in izhode na konturo ter hitre gibe rezalne glave.
 - S funkcijo Path ustvarite program rezanja. Ustvarjen program odprite v programu OMAX Make!
3. V programu OMAX Make izvedite simulacijo rezanja z AVC:
 - Ogleđ glavnih funkcij in nastavitev.
 - Izvedite simulacijo rezanja z AVC za program rezanja prirobnice. Oglejte si hitrostni profil rezanja.
 - Izvedite primer gnezdenja izdelka na primeru kotnika!
4. Opiši glavne značilnosti programiranja konturnega rezanja (preboj, vhod in izhod s konture, rezanje v vogalih in na krivinah, možne napake pri programiranju).

¹angl. Computer Aided Manufacturing

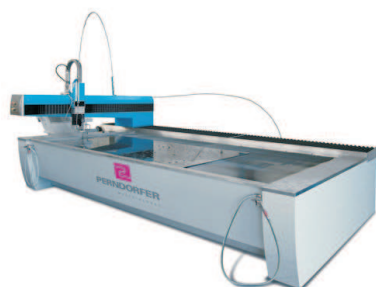
5. Katere parametre procesa rezanja nastavljamo v programu Layout in katere v programu Make?

Poglavje 6

3. LV2: Stroj in rezanje z AVC

6.1 Uvod

V uvodu v prejšnjo vajo smo opisali fizikalni princip delovanja, ki je pri vseh enak. Veliko proizvajalcev nastopa na trgu s stroji za rezanje z AVC. Stroji za obdelavo z AVC imajo dokaj klasično zasnovo, ki je značilna za stroje za razrez pločevinastih obdelovancev. Za dvoosone stroje sta značilni predvsem dva tipa konstrukcije: konzolna (slika 6.1 (a)) in portalna (slika 6.1 (b)). Za večosno obdelavo se največ uporablja portalna izvedba ali pa kar robotska roka.



(a) Konzolni tip



(b) Portalni tip

Slika 6.1: Tipi AVC strojev

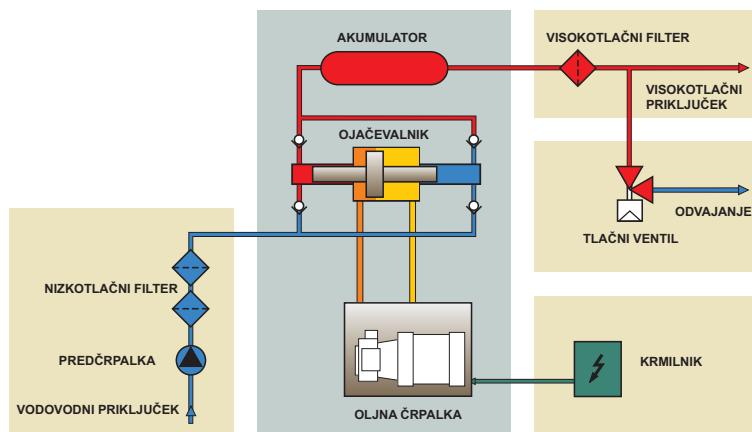
Poleg delitve strojev na število krmiljenih osi ločimo stroje tudi glede na način doseganja suspenzije abraziva.

Prva je hidravlična črpalka z ojačevalnikom¹, druga pa je batna črpalka z ročično gredjo². Pri črpalki z ojačevalnikom, prikazani na sliki 6.2, električni motor poganja oljno črpalko, ki tlači olje v cilindru ojačevalnika na tlak med 7 in 27 MPa. Olje potem potiska večji bat, kar ustvarja veliko silo na manjšem batu. Manjši bat nato stisne vodo v razmerju, ki je proporcionalno razmerju med površinama večjega in manjšega bata. Cilindru ojačevalnika deluje dvojno, saj večji bat v srednjem cilindru z oljem izmenično potiska manjša bata v stranskih cilindrih z vodo. Ko se manjši bat umika, protipovratni ventil na eni strani cilindra omogoči dotok vode pod nizkim

¹angl. Intensifier

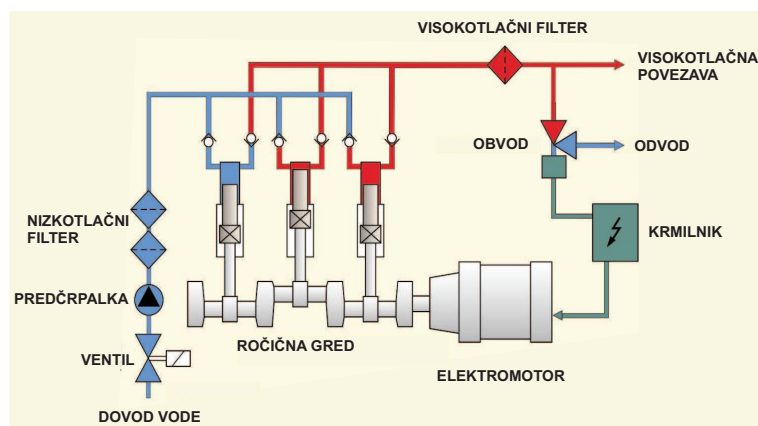
²angl. plunger crank shaft pump

tlakom (približno 0,5 MPa, za kar poskrbi predčrpalka) v stranski cilinder ojačevalnika, ventil na drugi strani pa med tlačanjem odvaža vodo pod visokim tlakom. To dvojno delovanje povzroča pulzirajoč tok vode pri visokem tlaku. Da voda teče bolj enakomerno, ima črpalka z ojačevalnikom vgrajen akumulator, ki je visokotlačna cilindrična posoda, ki zmanjša tlačna nihanja na sprejemljivo mero nekaj 10 kPa.



Slika 6.2: Črpalka z ojačevalnikom

Zasnova črpalk z rolično gredjo je znana že od začetkov parnih strojev, saj tu rolična gred poganja posamezne bate po visokotlačnih cilindrih. Največkrat so to trije bati, ki delujejo v 120-stopinjskem faznem zamiku. Shema črpalke je prikazana na sliki 6.3. Črpalke z rolično gredjo so energijsko bolj učinkovite od ojačevalnikov, saj nimajo energijsko potratne oljne črpalke. Prav tako zaradi delovanja batov v zamiku proizvajajo dokaj enakomeren tok vode in zato ne potrebujejo akumulatorja za izravnavo tlačnih nihanj. Po drugi strani pa ima takšen tip črpalk zaradi velikega števila hodov posameznih batov težave z dobo trajanja tesnil in ventilov, vendar se ta z izboljšavo konstrukcije ventilov in boljših materialov podaljšuje.



Slika 6.3: Črpalka z rolično gredjo

6.2 Namen vaje

Na vaji se seznanimo s konstrukcijo stroja, njegovimi funkcijskimi enotami in njihovim delovanjem. Ogleđamo si črpalko z ročično grednjo in črpalko z ojačevalnikom ter podamo bistvene razlike s stališča procesa rezanja. Nadalje ugotovimo bistvene razlike v konstrukciji vodne in abrazivne vodne rezalne glave. Spoznamo obdelovalne parametre in v grobem orišemo njihov vpliv na proces rezanja.

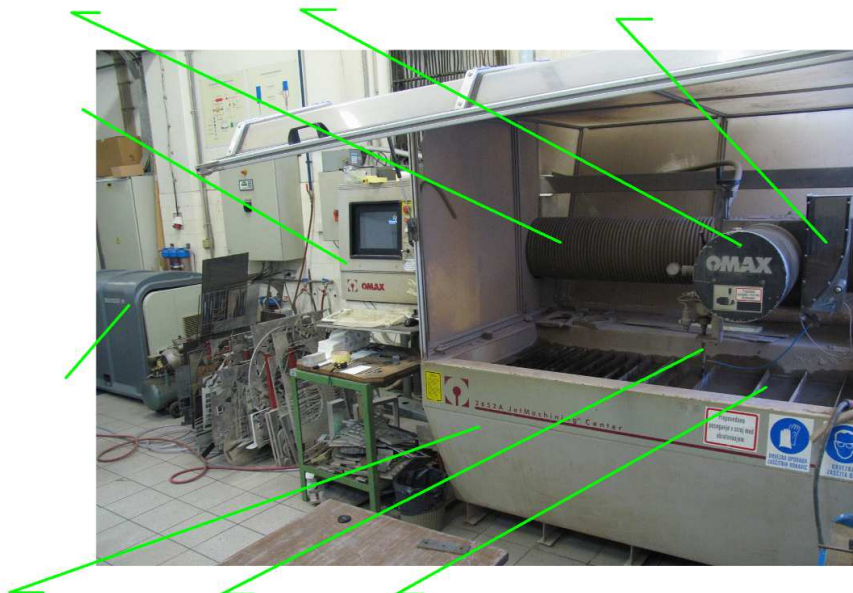
6.3 Potek vaje

Vaja poteka v sledečem vrstem redu:

- ogled stroja za obdelavo z vodnim in abrazivnim vodnim curkom,
- opis posameznih komponent stroja,
- opis delovanja batne črpalke z ojačevalnikom (posreden tip) in batne črpalke z ročično gredjo (neposreden tip) ter zagon obeh črpalk in ogled njihovega krmiljenja,
- predstavitev vodne in abrazivne vodne rezalne glave ter doziranje abraziva,
- opis procesa rezanja z vidika vhodnih in izhodnih parametrov,
- spreminjanje globine in kakovosti rezanja pri različnih vhodnih parametrih,
- vsak študent praktično izvede obdelavo,
- povzetek vsebine vaje in izdelava poročila.

6.4 Naloge

1. Na sliki 6.4 poimenuj označene komponente stroja za rezanje v AVC. Kratko opiši vlogo vsake komponente.
2. Skiciraj hidravlično črpalko z ojačevalnikom in črpalko z ročično gredjo. Opiši delovanje vsake črpalke. Posebej pojasni princip delovanja ojačevalnika.
3. Nariši grafa pretoka vode v odvisnosti od časa $Q(t) - t$ za obe črpalki in z njima pojasni razliko v delovanju črpalk. Zakaj potrebujemo predčrpalko?
4. Opiši krmiljenje za oba tipa črpalk (vklop-izklop curka, regulacija tlaka).
5. Skiciraj in opiši delovanje injekcijskega tipa rezalne glave za rezanje z AVC. Kako je izveden dovod abraziva? Na kakšne načine reguliramo pretoka abrazivnega peska?



Slika 6.4: Komponente stroja za rezanje z AVC

Sklop Tehnologije spajanja

7 OSNOVNI PODATKI O POTEKU VAJ IZ VARILSKIH PREDMETOV

www.fs.uni-lj.si/lavar/IT2 - urniki, predloge za izvedbo laboratorijskih vaj, obvestila

Asistent:

doc dr. Damjan Klobčar
tel: 01 4771 205
damjan.klobcar@fs.uni-lj.si
Andrej Skumavc

soba: 207 govornilne ure: ponedeljek od 9 – 10 h v sobi 205

Laboranta:

Boris Bell (boris.bell@fs.uni-lj.si)
Matevž Steržaj tel: 01 4771 705 Laboratorij za varjenje, stara stavba klet - K11

7.1 POTEK LABORATORIJSKIH VAJ

Po urniku →

Na vajah je obvezna 80 % prisotnost!

	Oktober	November	December	Januar
Osn. Pod. O poteku LV				
1. Uvodna vaja		4. Lab. vaja – oddaja in zag. p.		
2. Uvodna vaja 1. Lab. vaja				
3. Uvodna vaja 2. Lab. vaja				
3. Lab. vaja				

PRIPRAVLJALNE (UVODNE) VAJE: → priprava na laboratorijske vaje (teorija, naloga, kaj bomo na vaji delali). Potekale bodo v predavalnici.

LABORATORIJSKE VAJE:


→ praktično izvajanje vaj.
Za vsako vajo izdelate poročilo.
Zbrana poročila oddate na naslednjih LV v *kartonasti mapi z zavihki*. Vaje se sproti ocenjujejo, na koncu imate še zagovor poročil. Takrat jih zagovarjate in dobite oceno iz vaj.

Vaje bodo potekale v LABORATORIJU ZA VARJENJE, stara stavba klet K11.



Na vaje prinesete delovno obleko!

Izgled in potrebni podatki, ki so sestavni del prve strani poročila so prikazani na spodnji sliki levo, prva stran poročila pa je prikazana na sliki desno. Obe predlogi najdete na spletni strani www.fs.uni-lj.si/lavar/IT2 v elektronski obliki.

 <p>Katedra za tehnologijo materialov, Laboratorij za varjenje</p>		
LABORATORIJSKE VAJE IZ Izdelovalnih tehnologij 2 Sklop: Tehnologije spajanja		
Letnik, smer	- PRIIMEK in IME-	Šolsko leto

 <p>Katedra za tehnologijo materialov, Laboratorij za varjenje</p>		
POROČILO LABORATORIJSKE VAJE VPIŠI NASLOV LV VPIŠI IME PREDMETA		
I		
LV oddane pravočasno:	DA	NE
Ocena LV:		
Letnik, smer	- PRIIMEK in IME-	
Šolsko leto		Stran 1 od 1

7.2 OCENA POROČILA

Poročila iz laboratorijskih vaj se oddajajo na začetku naslednje laboratorijske vaje. V poročilu se ocenjuje:

1. **Struktura poročila** – vrstni red poglavij (1. Uvod, 2. Oprema, 3. Postopek, 4. Rezultati in diskusija, 5. Ugotovitve oz. Zaključki)
2. **Vsebina poglavij** (kaj se napiše v posamezno poglavje)
 1. Uvod (prepišete tekst naloge)
 2. Oprema (popišete vso uporabljeno opremo)
 3. Postopek (opišete postopek dela na vajah, **ter ročno narišete vse potrebne skice, merilne verige, ...**)
 4. Rezultati in diskusija (**izvedete preračun – napisana mora biti enačba, v drugem koraku v enačbo vstavite podatke in enote, v tretjem koraku napišete rezultat in enote, in komentirate rezultate**)
 5. Ugotovitve oz. Zaključki (napišete vaše ugotovitve)
3. Pravilnost izračunov, enot, postopka, grafi (kakovost in jasnost grafov, brez nepotrebnih ničel, urejenost)
4. **Ugotovitve**
5. **Izgled poročil** (mapa, pravilnost in doslednost pri navajanju podatkov o študentu in predmetu, urejenost poročila, izgled poročila, kakovost skic, pisava)
6. **Sodelovanje na LV**

7.3 OCENA VAJ

Ocena vaj je sestavljena iz:

- obiska in sodelovanja na vajah,
- kakovosti izdelanih poročil,
- kakovosti seminarja in predstavitve seminarja in
- iz zagovora vaj.

Ocena iz vaj, ki se vpiše v indeks je sestavljena iz

- ocene vaj s področja spajanja (1. del)
- in s področja alternativnih tehnologij (2. del).

V primeru prekoračitve dovoljenih izostankov na vajah, morate izdelati dodatno seminarsko nalogo.

7.4 KOLOKVIJ in IZPIT

Na polovici semestra imate možnost opravljati kolokvij iz prvega dela (spajanja). Pozitivno opravljen kolokvij velja tekoče šolsko leto. Za opravljanje izpita s kolokvijem ali izpitom velja, da morate na enem izpitu ali kolokvijem zbrati najmanj 40 % možnih točk, ter pri obeh delih vsaj 120 % od 200 % možnih točk. Če pisni del dobro opravite, nimate ustnega zagovora. Kolokvij velja samo tekoče študijsko leto.

[Izpitni roki](#) bodo objavljeni na spletni strani FS.

Na izpit se lahko prijavijo vsi študenti, ki imajo opravljene vse obveznosti iz vaj. Opravi se računalniška prijava.

Pisni izpit pišete 2 šolski uri in vsebuje 10 vprašanj iz predavanj in laboratorijskih vaj. Vprašanja zajamejo celotno snov predavanj in vaj obeh sklopov. V primeru, da ne naredite enega dela izpita lahko ponavljate samo tisti del, ki ste ga opravili slabše oz. ga niste opravili.

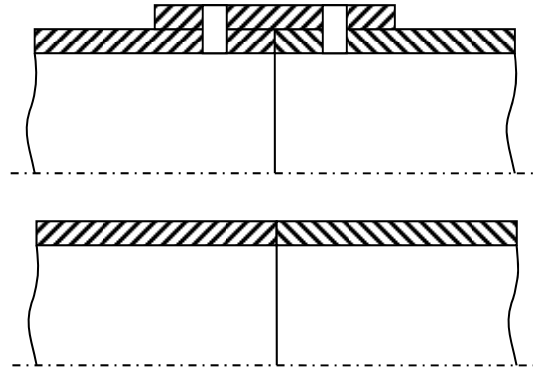
8 UVOD V VARJENJE IN OSNOVNI POJMI

8.1 POMEN VARJENJA V OKVIRU IZDELOVALNIH TEHNOLOGIJ

- tehnologija spajanja, ki je primerna zlasti za kovine : »If it is metal, weld it«
- uspešno se da variti tudi vrsto nekovinskih materialov (zlasti umetne mase - termoplaste)
- primerno za množično proizvodnjo (avtomatizacija in robotizacija)

Glavne prednosti varjenja:

- enostavnost izvedbe (v pripravi)
- enostavnost profila
- manjša masa konstrukcije
- nižji proizvodnji stroški
- praviloma boljša nosilnost (glede na ostale tehnologije spajanja)
- boljša korozijska obstojnost



Glavne slabosti varjenja:

- strukturne spremembe (problematičnost pri kaljivih materialih; zaostale napetosti)
- potreba po veliki izurjenosti: → varilcev (ročne spretnosti)
→ varilnih tehnologov (avtomatizacija)
- velik vpliv delovnega okolja na kakovost zvarov
- ni mogoče razdružiti brez porušitve

8.2 OSNOVNI POJMI

VARJENJE je spajanje dveh ali več delov (osnovnega materiala) v trajno zvezo *s toploto*, *s stiskanjem* ali *z obema* brez dodajanja ali z dodajanjem materiala.

DELITEV VARJENJA po namenu:

- × **ZVARJANJE**: spajamo 2 ali več varjencev z (ali brez) dodatnega materiala v trajno celoto.
- × **NAVARJENJE**: nanašanje dodatnega materiala na neko podlago in spajanje z osnovnim materialom.

VARIVOST je sposobnost materiala za varjenje. Odvisna je od lastnosti spojnega mesta.

ZVARNI STIK je medsebojna lega varjencev, pripravljenih za zavaritev.

ZVARNI SPOJ je celota napravljena z varjenjem. Označujemo ga po medsebojni legi varjencev in po obliki zvarnih koncev.

VAR (zvar, navar)

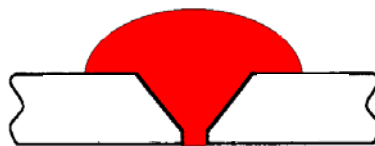
- je področje materiala, ki je med varjenjem doživelo strukturne spremembe in se sestoji iz osnovnega ali iz osnovnega in dodatnega materiala.
- so vsi med varjenjem raztaljeni materiali (osnovni in dodajni), vsebovani v varu.

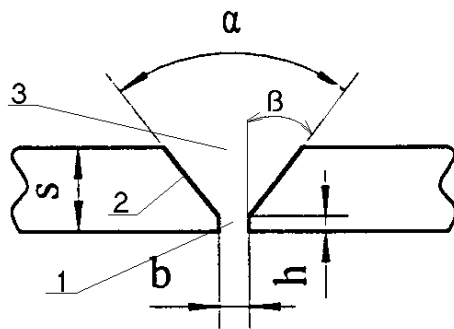
VARJENEC je tisti del osnovnega materiala, ki se ga vari.

VAREK nastane pri talilnem varjenju v enem potegu varjenja.

- je strjeni del kovine sestavljen iz osnovnega in dodatnega materiala, ki je nastal pri talilnem varjenju v enem potegu.

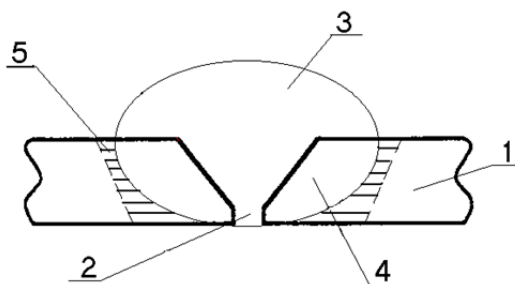
ČISTI VAR je geometrijski pojem in nam predstavlja potrebno količino nanosa dodatnega materiala.



ELEMENTI OBLIKOVANEGA ŽLEBA

s - debelina osnovnega materiala
 b – širina špranje
 h – višina špranje
 β - kot posnetja
 α - kot žleba

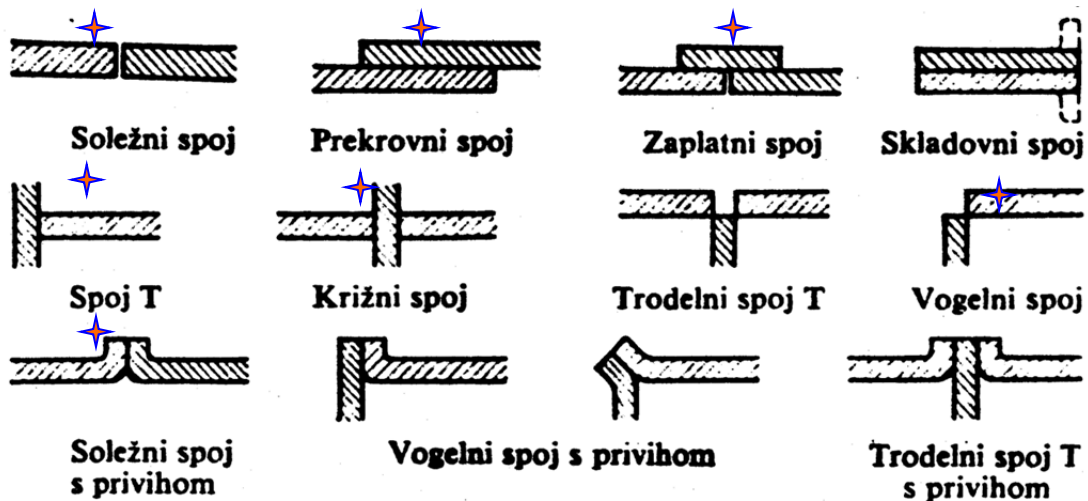
1 – špranja žleba (*ostra, topa*)
 2 – stranica žleba (*ravna, poševna, vbočena*)
 3 – teme žleba

ELEMENTI VARA

1 – osnovni material
 2 – koren zvara (kritični del zvara)
 3 – teme zvara (*izbočeno, ravno, vbočeno*)
 4 – uvar (del osnovnega materiala, ki je bil med varjenjem raztaljen)
 5 – toplotno vplivano področje (TVP)

OBLIKE ZVARNIH SPOJEV

Razvrstimo jih glede na medsebojno lego varjencev in deloma po obliki zvarnih korenov.



VRSTE ZVAROV DELIMO GLEDE NA:

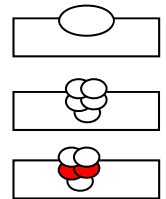
1. obliko prečnega prereza in načina izdelave na zware nastale s talilnim varjenjem, s stiskanjem

Ime zvara	Prečni prerez	Znak	Ime zvara	Prečni prerez	Znak
Zvar I *			Kotni zvar		
Zvar V *			Vogelni zvar		
Zvar Y			Žmulasti zvar		
Zvar U			Grebenasti zvar		
Zvar X *			Točkovni zvar		
Zvar K			Bradavični zvar		

* S STISKANJEM

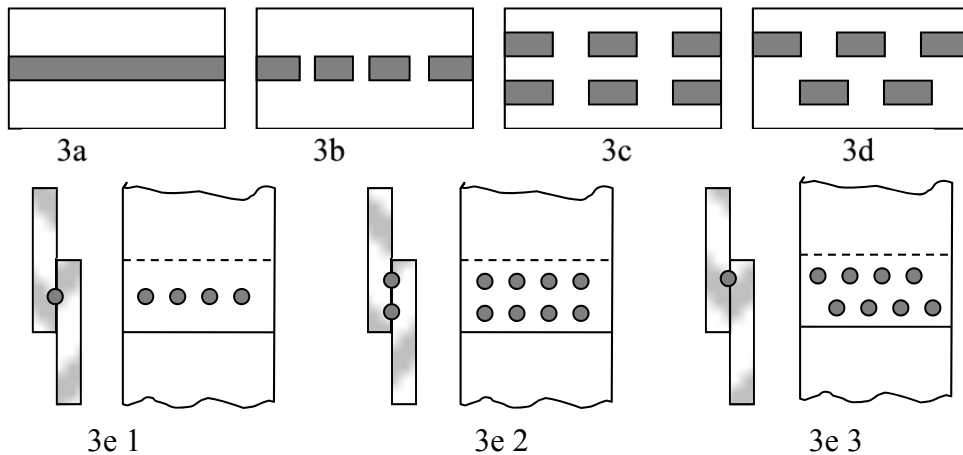
2. glede na zgradbo

- enopotezni
- večpotezni
- večpotezni večslojni (če so potegi iz različnega materiala)



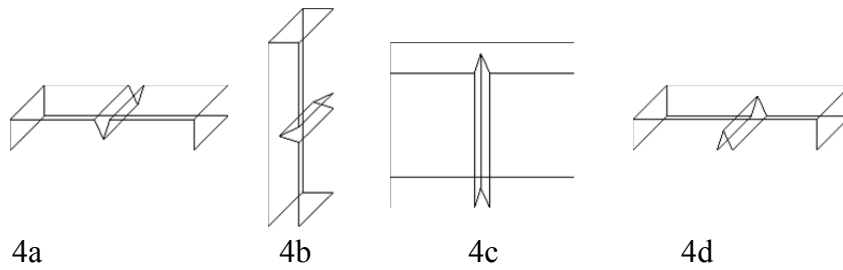
3. glede na kontinuiteto in medsebojno lego zvarnih mest

- neprekinjeni zvari
- prekinjeni zvari
- vzporedno prekinjeni
- izmenično prekinjeni
- zvari v več nizih
 - zvar v enojnem nizu
 - v vzporednem nizu
 - v izmeničnem nizu



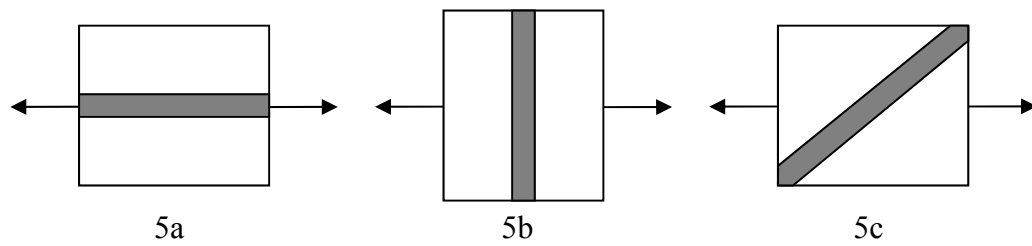
4. glede na lego pri varjenju

- a. v vodoravni legi
- b. vodoravni na steni
- c. vertikalni
- d. nadglavni



5. glede na smer delovanja sil pri zvarnem spoju

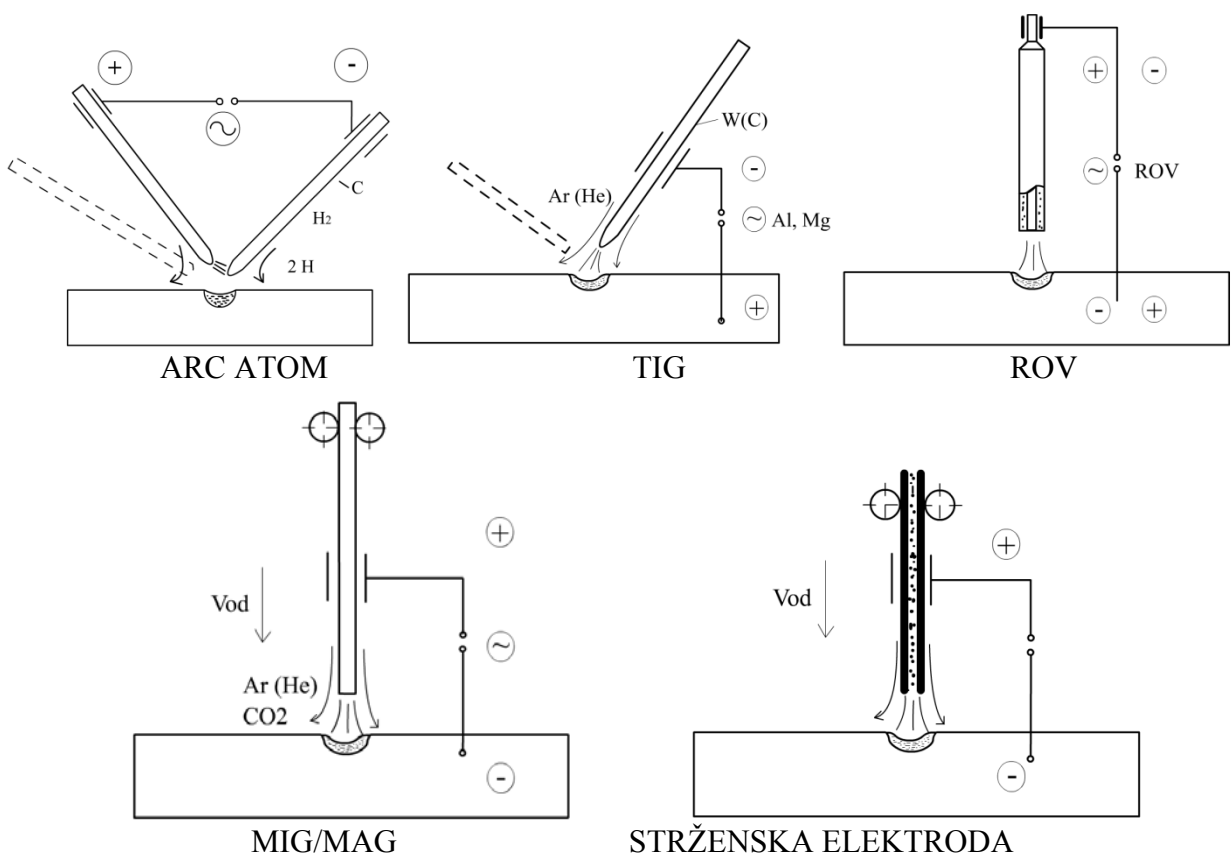
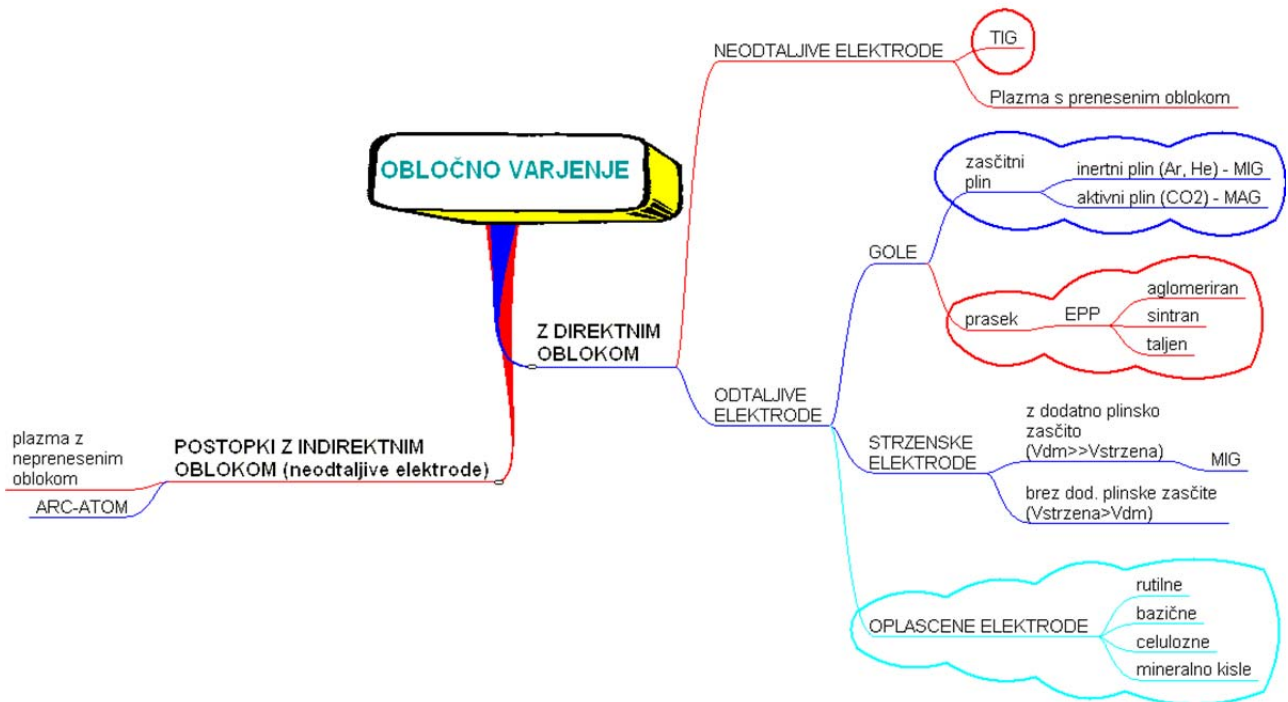
- a. vzdolžni zvari
- b. prečni zvari
- c. poševni zvari



9 ROČNO OBLOČNO VARJENJE

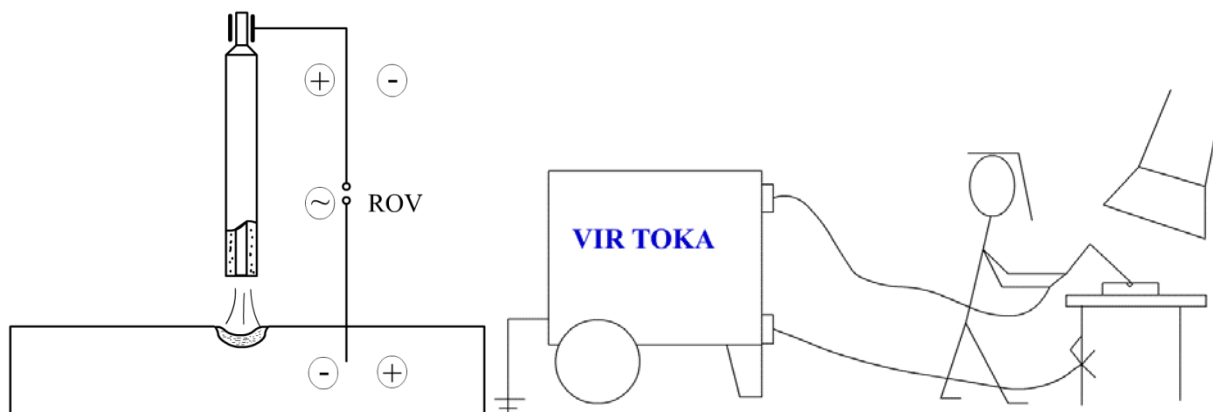
9.1 DELITEV OBLOČNEGA VARJENJA

Obsega več postopkov talilnega varjenja z ali brez dodatnega materiala.
Delitev obločnega varjenja glede na vzpostavitev obloka:



9.2 ROČNO OBLOČNO VARJENJE Z OPLAŠČENO ELEKTRODO (ROV, REO, MMAW – manual metal arc welding, SMAW – shielded metal arc welding)

Najbolj razširjen postopek obločnega varjenja. Njegova *prednost* je predvsem *cenenost in visoka kakovost zvarov*. Glavna *slabost* *priučeni delavci ter zamudnost*.



Elektroda predstavlja *električni vodnik za dovod energije do obloka*. V obloku se sprošča toplotna energija, ki raztaljuje osnovni in dodajni material (elektrodo).

Naloge oplaščenja so:

- ✓ zaščita obloka in taline pred vplivi atmosfere,
- ✓ stabilizira gorenje obloka,
- ✓ legira in čisti talino,
- ✓ žlindra zmanjšuje sevanje svetlobe v okolico in upočasni ohlajanje zvara.

Elektrodo izberemo glede na vrsto in debelino materiala, ki ga varimo.

Držalo elektrode povezuje elektrodo z dovodnim kablom in omogoča:

- ✓ dober električni stik,
- ✓ hitro ter enostavno zamenjavo elektrode,
- ✓ vpenjanje različnih vrst elektrod.

Držalo mora biti navzven dober izolator!

Dovodni kabli dovajajo *električni tok od vira toka na mesto varjenja*. Ker varimo z majhnimi napetostmi (20 V) in visokimi tokovi (150 A) morajo biti kabli večjega preseka, da zmanjšajo pregrevanje in izgube. V njih napetost ne sme pasti za več kot 2V. Sestavljeni so iz pletenih žic, da so gibljivi.

Delovna miza mora biti prilagojena varjencu in varilcu. Na njej je običajno *držalo za elektrode*, *zalagovnik za elektrode* ter *včasih grelec*.

Varilčevo orodje: kladivo, ploščate klešče, žična ščetka.

Osebna zaščitna sredstva:

- ✓ zaščitna maska s filtrom za oči,
- ✓ delovna obleka,

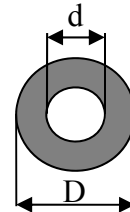
- ✓ delovni čevlji,
- ✓ usnjene rokavice,
- ✓ usnjen predpasnik.

Naloga **spom** je vzpostavljanje stika med virom varilnega toka in delovno mizo.

9.3 Razdelitev elektrod po SIST EN 499 (DIN 1913)

po debelini oplasčenja

- ✓ debelo oplasčene $D/d > 1,5$
- ✓ srednje oplasčene
- ✓ tanko oplasčene $D/d < 1,2$



po namenu

- ✓ elektrode za varjenje
- ✓ navarjanje
- ✓ rezanje (kisik v oplasčenju)
- ✓ žlebljenje

po vrsti osnovnega materiala:

- ✓ za konstrukcijska jekla
- ✓ za visokolegirana jekla
- ✓ za SL
- ✓ za Cu
- ✓ za Al

po tehnoloških značilnostih:

- ✓ globoko prevaritvene
- ✓ visoko produktivne (hitreje odtaljujejo)
- ✓ gravitacijske

po karakteristikah oplasčenja:

- a) **Mineralno kisle** (Oznaka: **A**): Oplasčenje vsebuje okside *Fe* in *Mn* ter dezoksidante ferromangan.

Značilnost: *židka žindra*, ki pušča lep izgled temena zvara. **Slabša žilavost zvarov.**

- b) **Bazične** (Oznaka: **B**): Osnovna sestavina je kalcijev karbonat CaCO_3
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (plin - dodatna zaščita)
 CaO dobro veže razne nečistoče in okside.

PREDNOSTI

- + visoka kakovost zvarov
- + homogeni zvari
- + visoka žilavost

SLABOSTI

- kompaktna žindra in težje odstranljiva
- zahtevajo varjenje $z =$ tokom $s +$ polom na elektrodi

- c) **Rutilne** (Oznaka: **R**): oplasčenje vsebujejo *Mn* in *Ti* (TiO_2 – rutil). Rutil je izredno **dober stabilizator gorenja obloka**. Uporablja se za varjenje s transformatorjem (domača ročna dela).

PREDNOSTI

- + židka žilindra, ki se lepo odstranjuje
- + lepo teme

SLABOSTI

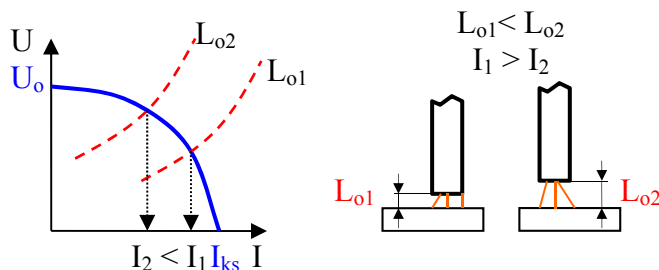
- slabše trdnostne lastnosti
- nima čistilnih efektov

d) Celulozne (Oznaka: **C**): V oplášenju imajo ob osnovni sestavini TiO_2 – rutil še veliko celuloznih substanc, ki pri varjenju zgorijo ter ustvarjajo dobro zaščito obloka in taline. Te elektrode združujejo pozitivne lastnosti bazičnih in rutilnih elektrod (dobro zaščito pred atmosfero in visoko stabilnost gorenja obloka). Imajo slabši izgled površine vara (glede na bazične elektrode). Uporabljajo se za montažna dela: varjenje cevovodov (dobra in globoka prevaritev).

9.4 VIRI VARILNEGA TOKA ZA ROV

Od virov toka pričakujemo:

- ustrezno električno energijo (pravilne U in I ter oblike (časovno)),
- omogočajo nastavljanje varilnih parametrov, zlasti jakosti toka,
- enostavnost v rokovanju,
- dober izkoristek,
- čim boljši $\cos\varphi$ (razmerje med koristno in jalovo energijo),
- cenenost,
- robustnost (v električnem in mehanskem smislu),
- ni hrupen.



Padajoča statična karakteristika vira toka (ROV, TIG, EPP)

Daljši oblok ima večjo električno upornost!

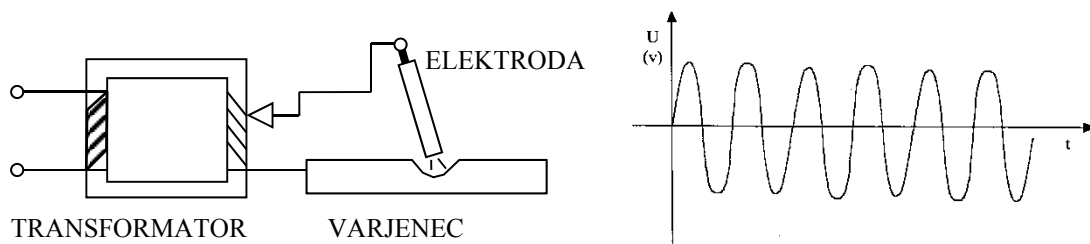
$U_o = 50 - 60 \text{ V}$, $U_v = 14-35 \text{ V}$

U_o = napetost prostega teka

U_v = napetost varjenja

I_{ks} = tok kratkega stika

TRANSFORMATORJI

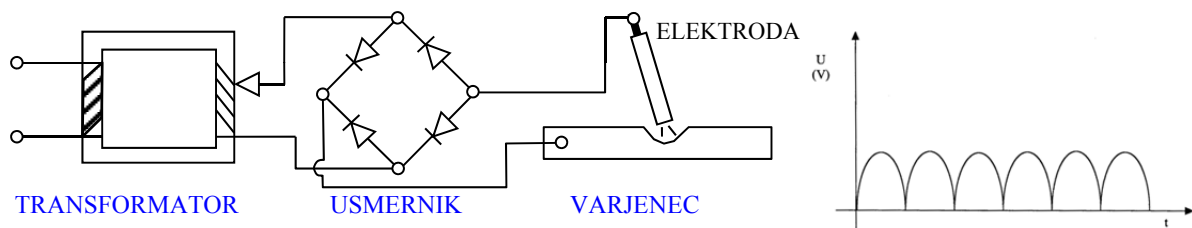
**Prednosti:**

- + enostavnost,
- + cenenost,
- + dober izkoristek $\eta=0.8-0.9$.

Slabosti:

- daje izmeničen tok (ugašanje in vžiganje oblaka),
- slabši $\cos\varphi$,
- nesimetrično obremenjevanje omrežja.

USMERNIK = transformator + usmernik

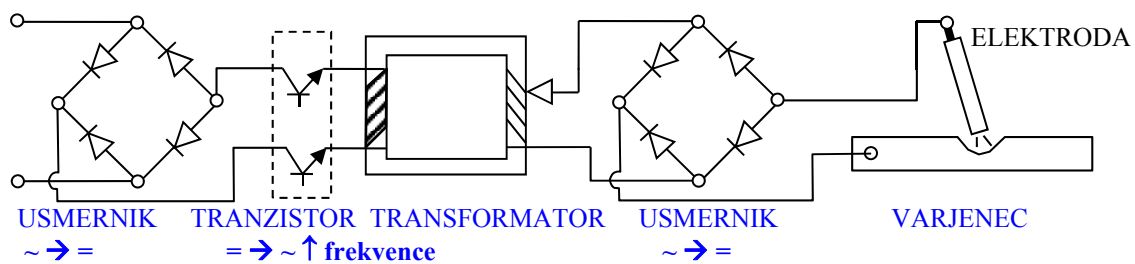
**Prednosti:**

- + enosmerna napetost,
- + boljši delovni pogoji glede na transformator,
- + dober izkoristek $\eta=0.7-0.8$.

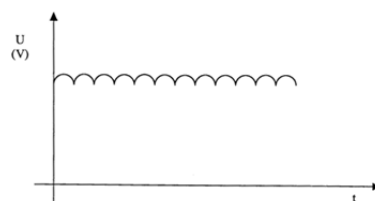
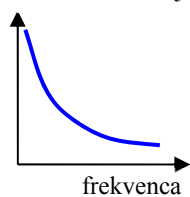
Slabosti:

- dražji od transformatorja,
- občutljivejši.

INVERTER



Masa transformatorja

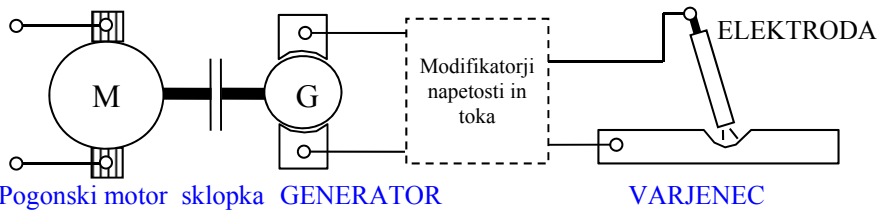
**Prednosti:**

- + konstantni varilni pogoji U,
- + dober $\cos\varphi$,
- + manjša masa (10x kot masa transformatorja).

Slabosti:

- cena,
- občutljivost na preobremenitev,
- vpliv omrežne napetosti.

VARILNI AGREGAT



Pogonski motor sklopka GENERATOR

- diesel
- otto
- plinski
- elektromotor

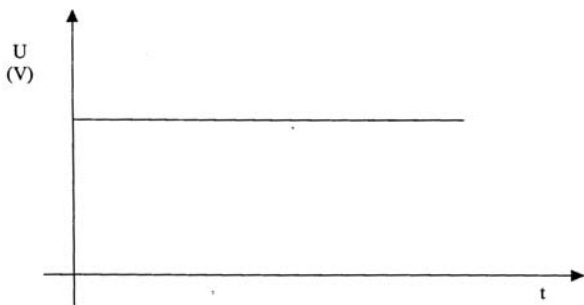
VARJENEC

Prednosti:

- + = tok in U velike stabilnosti tudi pri nestabilnosti vhodnih pogojev (U, I),
- + dober $\cos\varphi$,
- + robustnost,
- + primeren za delo na terenu

Slabosti:

- drag,
- slab izkoristek $\eta \sim 0.5$,
- hrupen.



9.5 Laboratorijska vaja 1: Viri varilnega toka za ročno obločno varjenje

1. NALOGA

Skiciraj principiелne *sheme osnovnih vrst varilnega toka*, ki jih uporabljamo pri postopkih ROV ter opiši njihove glavne varilno-tehnološke značilnosti.

Na izvorih varilnega toka za ROV, ki so na razpolago v Laboratoriju za varjenje, izvedi preizkusno navarjanje z elektrodami različnih vrst oplasčenja in *opiši način vžiga, stabilnost obloka in izgled temena zvara*.

2. OPREMA

Viri varilnega toka:

- × transformator: Gorenje Varstroj VARUS 600 D01 (*sv. moder*)
- × usmernik: Saf Safex c2 (*sv. moder*)
- × inverter: Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy (*rdecč*)
- × agregat: Kjellberg KU 250 (*črn*)
- × rutilna elektroda:
- × bazična elektroda:
- × celulozna elektroda:

3. POSTOPEK

Popis poteka vaje, principiелne sheme osnovnih vrst varilnega toka in diagrami poteka toka ter opis glavnih tehnoloških značilnosti.

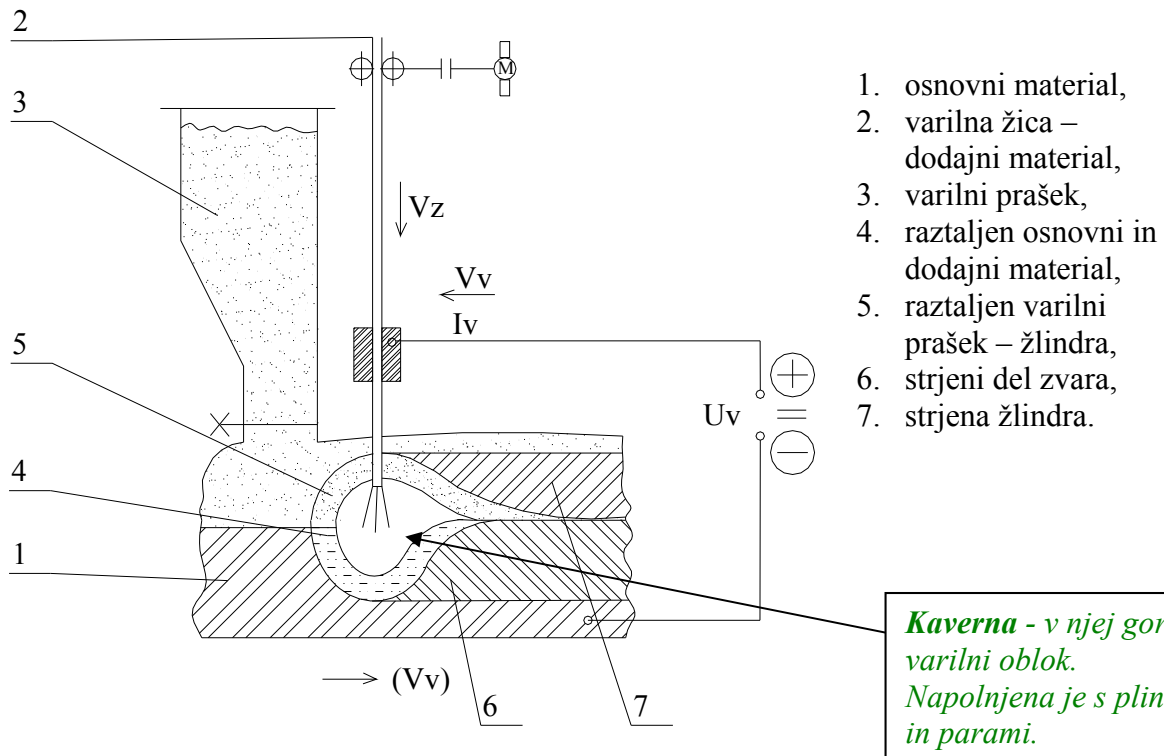
4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Opišete varilno-tehnološke značilnosti (vžig obloka, stabilnost obloka, izgled temena zvara) pri varjenju z različnimi vrstami izvorov toka in različno oplasčenimi elektrodami.

5. ZAKLJUČKI

Opišete vaše ugotovitve.

10 Varjenje EPP (Submerged arc welding - SAW)



EPP varjenje je avtomatski ali polavtomatski postopek obločnega varjenja z zakritim oblokom (varilno žico dodajamo avtomatsko). Potuje lahko varilna glava ali varjenec.

Oblok gori med odtaljivo elektrodo in osnovnim materialom, pri čemer sta oblok in talina zaščitena z raztaljeno žlindro ali raztaljenim praškom (oz. žlindro).

VLOGA VARILNIH PRAŠKOV:

1. zaščita obloka in taline zvara (v obliki žindre),
2. stabilizira gorenje obloka,
3. legira (metalurški učinek – vnos ali odvzem določenih legirnih elementov iz taline zvara),
4. dezoksidacija (odstrani kisika (okside) iz vara),
5. v toplotnih učinkih (zmanjšanje sevanja → izboljša toplotni izkoristek),
6. upočasni ohlajanje in oblikuje teme zvara (lep gladek var, homogen z dobro mikrostrukturo).

VRSTE VARILNIH PRAŠKOV (GLEDE NA NAČIN PRIDOBIVANJA):

1. TALJENI (nizkoreagentni praški); surovine v praškasti obliki v suhem stanju homogeniziramo in talimo v pečeh pri temperaturi 1100 do 1400 °C. Tekočo zmes zlivamo v posodo z vodo, kjer se ohladi in pretvori v steklasto zrnati, amorfni material. Nato se drobi, suši in embalira. Imajo steklen izgled (SiO_2), niso higroskopični. Prašek lahko ponovno uporabimo, ne moremo legirati zvara. Omogočajo dobro kakovost vara.
2. SINTRANI; Surovine mešamo z vezivom in briketiramo pri temperaturi pod tališčem (maks. 1200 °C), da so pri tem zunanji deli zrn nataljeni. Po sintranju maso briketiramo in drobimo

v prah s čim bolj enakomerno velikimi delci. Ti praški so **manj higroskopični kot aglomerirani praški** in **bolj aktivni** (zvar lahko **legiramo**).

3. AGLOMELIRANI; surovine v prašnatih oblikah ter vodno steklo granuliramo in sušijo pri temperaturah okoli 600°C. Ti praški so **visokoreagentni**, uporabljamo jih ko želimo var **legirati**. Ti praški so **zelo higroskopični**.

NAČINI VARJENJA:

- ✗ z enojno žico
- ✗ s tračno elektrodo
- ✗ s stržensko žico
- ✗ varjenje z večžično elektrodo
- ✗ varjenje z več elektrodami
- ✗ z dodatnim kovinskim prahom

UPORABA:

- jeklo, barvne kovine,
- za varjenje *debelejših varjencev*: $\delta > 5\text{mm}$,
- za varjence *večjih dolžin* $L \rightarrow \Sigma Li$ (kratki zvari, ki se pogosto pojavljajo - zaganjači)
 $\rightarrow Li$ (velike dolžine – masovna proizvodnja \rightarrow ladjedelnice)
- za *najtežje pogoje obratovanja*,
- za varjence, ki so *problematični za varjenje* po drugih postopkih s pretaljevanjem (zakaljivost),
- ko zahtevamo *lepo teme zvara* (pomemben izgled vara),
- ko zahtevamo dobre *mehanske lastnosti zvarov* (žilavost),
- ko zahtevamo *stabilnost kakovosti vara*,
- za *navarjanje večjih površin* (varjenje z večžično ali tračno elektrodo).

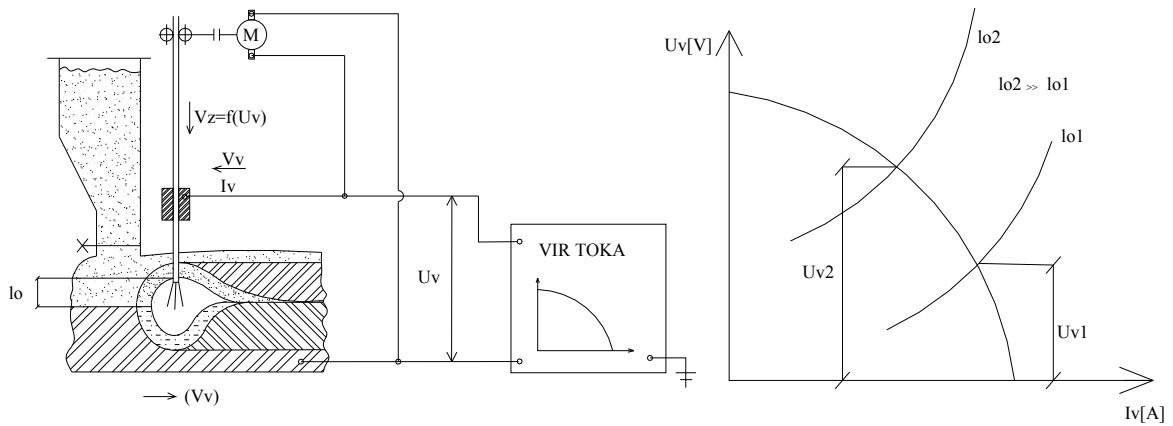
PREDNOSTI IN SLABOSTI EPP VARJENJA:

PREDNOSTI	SLABOSTI
<ul style="list-style-type: none"> + večji varilni tokovi (gostota) + visok izkoristek energije in DM + visoka produktivnost in talilni učinek (do 100 kg/h) + visoka hitrost varjenja (do 4 m/min) + metalurški učinki (dezoksidacija, rafinacija, legiranje...) + počasno ohlajanje vara (varimo lahko tudi materiale, ki so nagnjeni k zakalitvi) + okolju prijazen postopek (ni dimov, plinov, sevanja) 	<ul style="list-style-type: none"> - varjenje je možno le v vodoravni legi (vodoravni na steni) - vodenje obloka (zakrit zvarni žleb) - draga oprema - dolg pripravljalni čas

HITROST DOVAJANJA ŽICE:

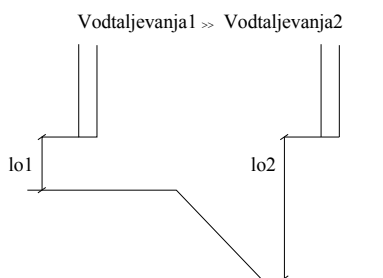
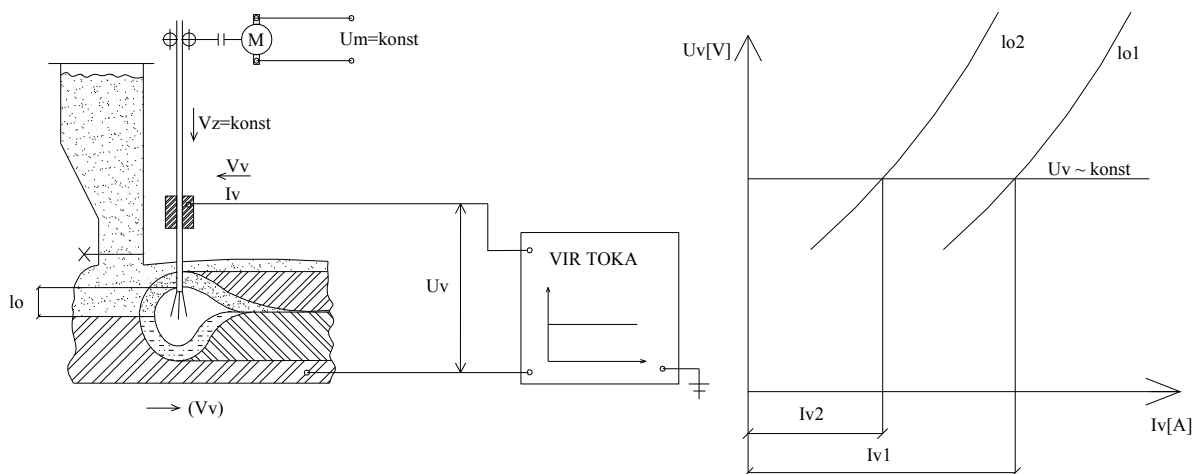
- konstantna b),
- spremenljiva a).

a) **varjenje z zunanjo regulacijo.** (elektrode večjega premera ter za manjše gostote tokov)



Če se oblok podaljša, se poveča napetost na motorju, ki hitreje poda dodajni material – varilno žico.

b) **Varjenje z notranjo regulacijo.** (elektrode manjšega premera, za velike gostote tokov)



10.1 Laboratorijska vaja 2: Primerjava med ROV in varjenjem EPP

1. NALOGA

Skiciraj principiелni shemi za postopek ROV in EPP varjenje. Izpostavi vsebinske podobnosti in razlike med tema dvema postopkoma talilnega varjenja. Pri navarjanju na isti varjenec izberi varilne parametre tako, da se bo pri obeh postopkih dobilo približno enaka navara s širino temena vara $b = 25 \text{ mm}$ in višino temena $h = 3 \text{ mm}$.

Z meritvami pred, med in po varjenju ugotovi in primerjaj:

- srednje vrednosti varilne napetosti U_v [V] in jakosti varilnega toka I_v [A],
- gostoto jakosti varilnega toka i [A/mm^2],
- povprečno hitrost pretaljevanja dodatnega materiala q [g/s],
- talilno konstanto α [g/Ah],
- izkoristek pretaljevanja elektrode η_e [%],
- celotni izkoristek pretaljevanja η_c [%],
- tehnološki čas varjenja t_t [min/m],
- poraba energije na kg čistega vara E_M [Wh/kg] in na dolžinski meter vara E_L [Wh/kg].

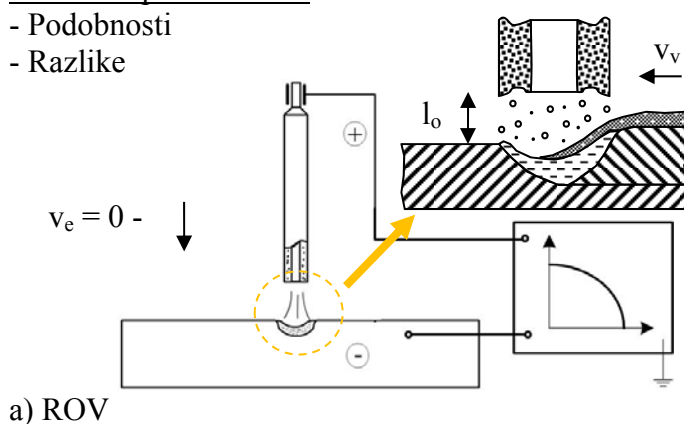
2. OPREMA

ROV	EPP
- varilni usmernik: SAF Safex C2	- varilni usmernik: Iskra E450, krmilna omarica Iskra E13
- tehtnica: Mettler Toledo	- voziček avtomata: ISKRA E11
- kljunasto merilo, štoparica, meter	- voltmeter: Iskra unimer 43, milivoltmeter: Iskra Unigor 4n
	- shunt: 1000 A / 60 mV

3. POSTOPEK

3.1. Principielne sheme

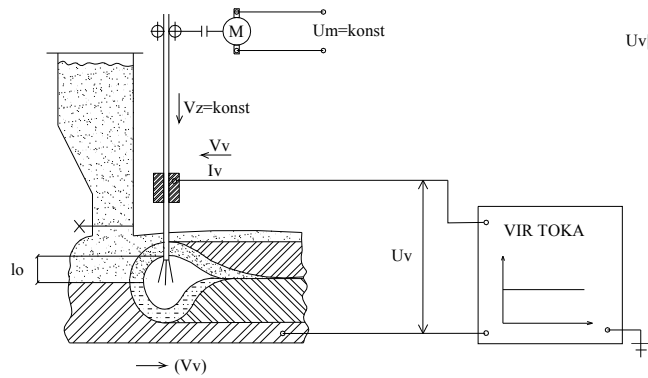
- Podobnosti
- Razlike



Masa jedra elektrode M_j (g):

$$M_j = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_E \cdot \rho_{jekla}; \rho_{jekla} = 7,85 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} M_j &= 22.8 \text{ g } (\phi 3.25 \times 350) \\ &= 34.7 \text{ g } (\phi 4 \times 350) \\ &= 44.3 \text{ g } (\phi 4 \times 450) \end{aligned}$$



b) EPP

3.2. Meritve pred varjenjem

a) Elektroda: ϕ mm x $L_E =$ mm	b) Elektroda: EPP2 ϕ 2 mm
masa elektrode $M_E =$ g, masa jedra el. $M_j =$ g	$m_z = 24,6$ g/m
masa varjenca pred varjenjem $M_{p0} =$ g	Prašek: ARD 1
napetost prostega teka $U_o =$ V	napetost prostega teka $U_o =$ V

3.3. Meritve med varjenjem

a) varilna napetost $U_v =$ V, varilni tok $I_v =$ A	b) $U_v =$ V, $I_v =$ A
čas varjenja $t_v =$ s	hitrost žice $v_z = 1000 / t_{1mz} =$ mm/s
	čas pomikanja 1 m žice $t_{1mz} =$ s, $t_v =$ s

3.4. Meritve po varjenju

a) masa varjenca po varjenju $M_{p1} =$ g	b) masa porabljenega praška $M_{pp} =$ g
dolžina ostanka elektrode $L_{os} =$ mm, $L_{zv} =$ mm	dolžina vara $L_{zv} =$ mm
širina vara $b =$ mm, višina vara $h =$ mm	$b =$ mm, $h =$ mm

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

a) $\bar{U}_v = \frac{U_{vi}}{i} [V]; \bar{I}_v = \frac{I_{vj}}{j} [A];$	b) $\bar{U}_v = \frac{U_{vi}}{i} [V]; \bar{I}_v = \frac{I_{vj}}{j} [A];$
$i = \frac{4 \cdot \bar{I}_v}{\pi \cdot \phi^2} [A/mm^2]$	$i = \frac{4 \cdot \bar{I}_v}{\pi \cdot \phi^2} [A/mm^2]$
$q = \frac{M_{pj}}{t_v} [g/s];$ $M_{pji} = M_j \cdot \frac{L_E - L_{os}}{L_E} [g]$	$q = \frac{M_{pž}}{t_v} [g/s]; M_{pž} = m_z \cdot v_z \cdot t_v$
$\alpha = \frac{M_{pj} \cdot 3600}{I_v \cdot t_v} [g/Ah]$	$\alpha = \frac{M_{pž} \cdot 3600}{I_v \cdot t_v} [g/Ah]$

$\eta_e = \frac{M_n}{M_{pj}} \cdot 100 (\%); M_n = M_{p1} - M_{p0}$	$\eta_e = \frac{M_{pž}}{M_{pž}} \cdot 100 (\%);$
$\eta_c = \frac{M_n}{M_E} \cdot 100 (\%)$	$\eta_c = \frac{M_{pž}}{M_{pž} + M_{pp}} \cdot 100 (\%)$
$t_i = \frac{t_v \cdot 1000}{L_{zv} \cdot 60} [\text{min}/m]$	$t_i = \frac{t_v \cdot 1000}{L_{zv} \cdot 60} [\text{min}/m]$
$E_M = \frac{I_v \cdot U_v \cdot t_v}{M_n} [\text{Wh}/\text{kg}]$	$E_M = \frac{I_v \cdot U_v \cdot t_v}{M_n} [\text{Wh}/\text{kg}]$
$E_L = \frac{I_v \cdot U_v \cdot t_v}{L_v} [\text{Wh}/m]$	$E_L = \frac{I_v \cdot U_v \cdot t_v}{L_v} [\text{Wh}/m]$

5. ZAKLJUČKI

11 OBLOČNO VARJENJE V ZAŠČITI PLINSKIH ATMOSFER

11.1 RAZDELITEV

- I. NEODTALJIVA ELEKTRODA → zaščita (Aktivni plin – H₂) – Arc-atom
 → zaščita (Inertni plin – Ar, He) – TIG, Plazma
- II. ODTALJIVA ELEKTRODA → zaščita (Aktivni plin – {CO₂ + mešanice}) – MAG
 → zaščita (Inertni plin – Ar, He) – MIG

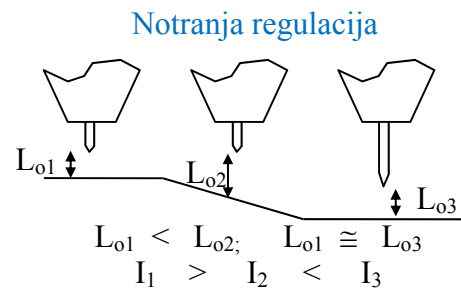
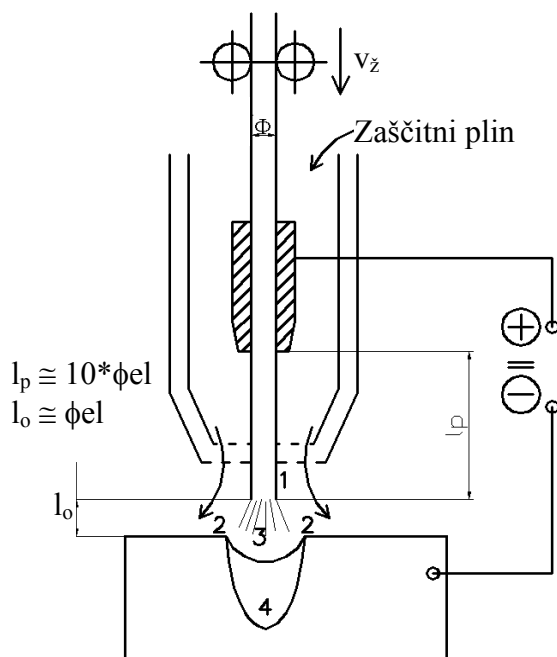
11.2 POMEN ZA VARILNO TEHNIKO

- Večje število postopkov.
- Prevladujoči v varilni praksi (*po količini porabljene energije, ceni varilne opreme in količini dodanega materiala; ne po št. delovnih mest*).
- Primernost za mehanizacijo, avtomatizacijo in robotizacijo.
- Širok razpon uporabnosti od mikro TIG do T.I.M.E.

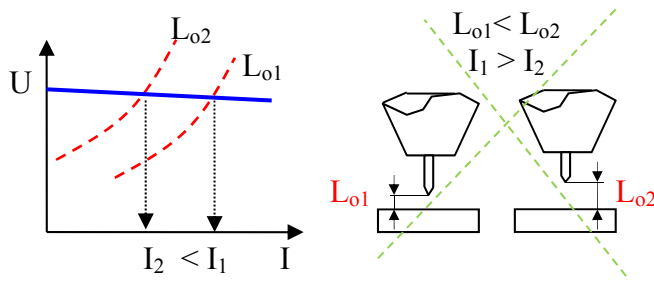
11.3 VARJENJE Z ODTALJIVO ELEKTRODO

(MAG – metal activ gas; MIG – metal inert gas)

5.3.1. Princip



VIR TOKA



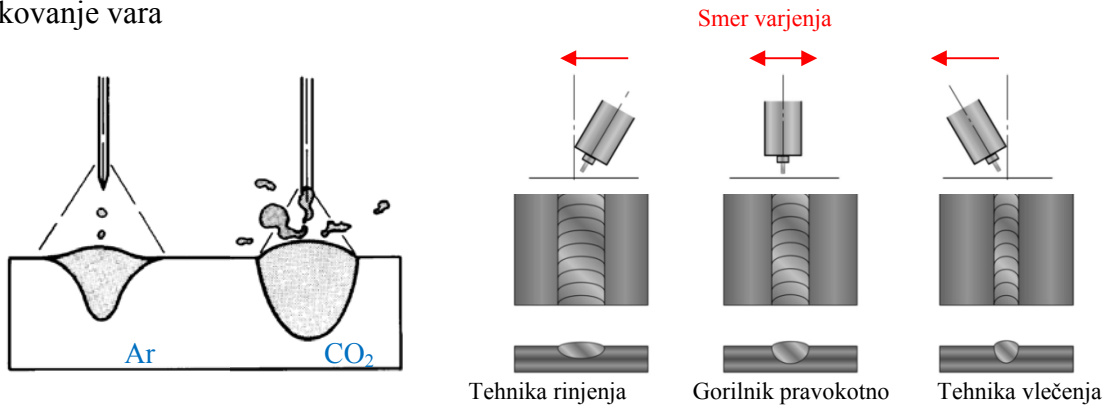
Vodoravna ali **rahlo padajoča** statična karakteristika vira toka (MIG/MAG, EPP).

Dodajni material: izbran glede na kemično sestavo oz. material

- a) Konstrukcijsko jeklo → leg.: C < 0,1%; Si < 1,0%; Mn < 1,5%
- b) Visokolegirana jekla → visoko trdnost in elastičnost
- c) ϕ žice = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 mm (izbran glede na debelino varjenja in želene pogoje pri varjenju).

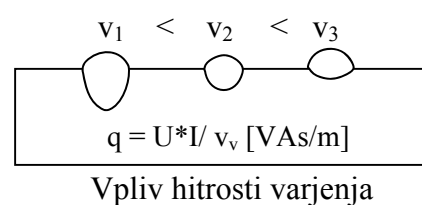
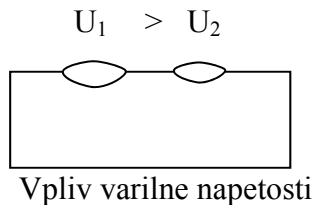
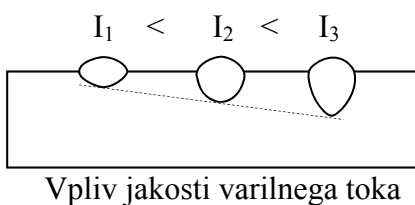
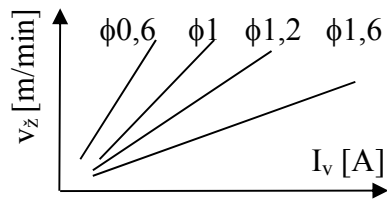
Zaščitni plin: CO₂ (+) mešanice, Ar, pomen:

- a) Zaščita obloka in taline
- b) Pomoč pri prenosu dodatnega materiala
- c) Prenos toplote (hlajenje gorilnika); predgrevanje varjenca CO₂
- d) Kemične reakcije v obloku in talini (CO₂ + mešanice)
- e) Oblikovanje vara



5.3.2. Izbira varilnih parametrov

- kemična sestava DM = f(kem. sest. OM)
- ϕ žice = f(debeline varjenca)
- $I_v, U_v, v_v = f(\phi, \text{debeline var.}, \text{oblike vara})$



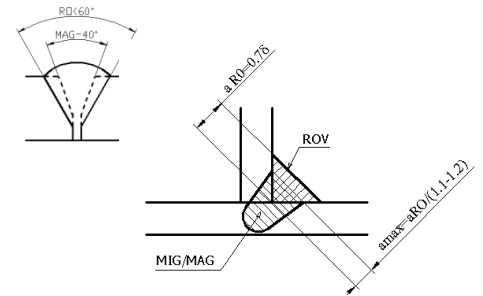
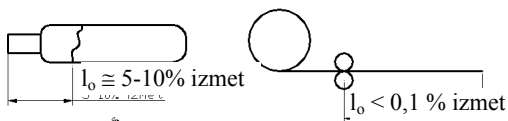
5.3.3. Tehnološko tehnične značilnosti

- + ekonomičnost
- + visoka produktivnost
- + lažje premoščanje špranje
- + primernost za robotizacijo
- + majhne deformacije
- majhna izbira dodatnih materialov
- slabše mehanske lastnosti
- zastoji pri transportu DM
- občutljivost pri delu na odprtem

PREDNOST PRED ROV

+ Manjša poraba DM

1. Kot posnetja $\alpha = 40^\circ$ (ROV $\alpha = 60^\circ$)
2. Globlja prevaritev; zato je pri kotnem zvaru $a_k = a_{ROV}/1,1-1,2$
3. Manjši izmet



+ Krajši časi varjenja

1. manjša poraba DM za enak spoj
2. gostota toka $i = 3 - 5 i_{ROV} \rightarrow \alpha_{MAG} < \alpha_{ROV}$
3. pomožni in dodatni časi so krajši (za menjavo elektrod in čiščenje žilindre).

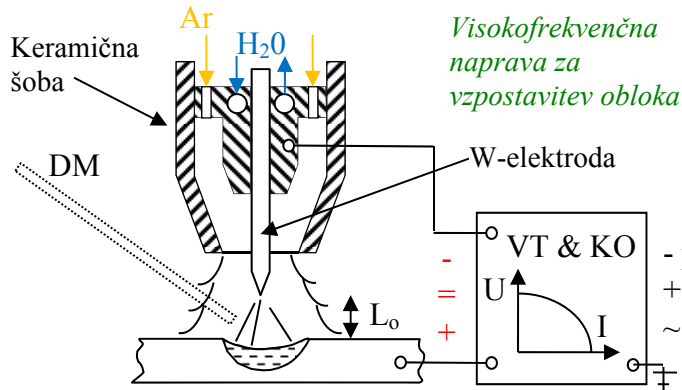
SLABOSTI PRED ROV

- dražja investicija,
- dražje in občutljivejše naprave,
- slabša kakovost zvara:
 - a) Ni dodatnih čistilnih učinkov (ni vezave nečistoč).
 - b) Zvari niso tako homogeni in nimajo takih mikrostruktur.
 - c) Majhna izbira dodatnega materiala.

11.4 VARJENJE Z NEODTALJIVO ELEKTRODO (TIG – Tungsten Inert Gas, Plazma)

5.4.1. Princip

a) TIG



b) Plazma

Zožitev obloka:

- s konstrukcijo gorilnika (zožitev)
- z elektromagnetnim poljem
- z ohlajanjem šobe/obloka

Elektroda priključena na **minus** polu ohranja življenjsko dobo elektrode, var ima globljo prevaritev. Elektroda priključena na **+** polu je bolj obremenjena, var je širši in bolj plitek.

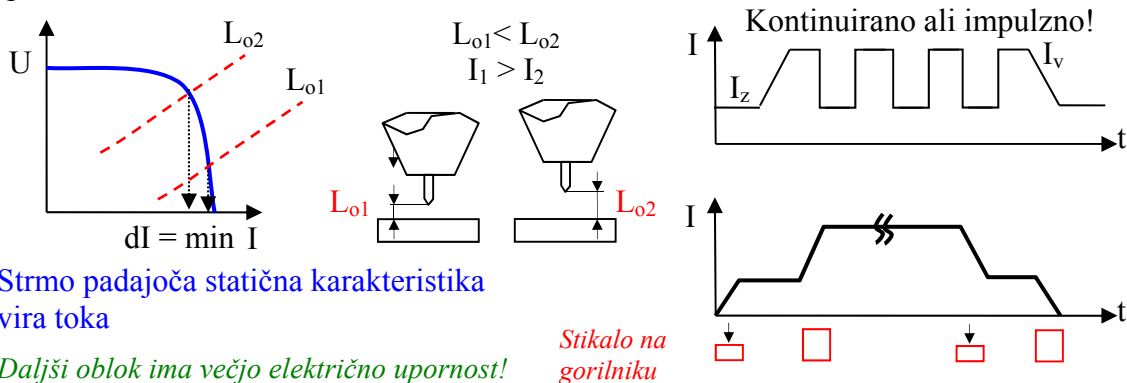
5.4.2. POMEMBNE ZNAČILNOSTI

UPORABA:

Za tanjše debeline varjencev in varjenje *aluminija, titana, magnezija* in *bakra* ter njihovih *zlitin* ter za varjenje *nerjavnih jekel, orodnih jekel*. Argon drag, ti materiali se z ostalimi postopki težje varijo. *Varimo lahko vse kovine, ki se spajajo s pretaljevanjem.*

VIR TOKA:

Pri TIG varjenju uporabljamo vire toka *s strmo padajočo statično karakteristiko*. Varilni tok je *enosmeren* ali *izmenični* ali pa *enosmeren impulzni* ali *izmenični tok s pravokotno oblikovanimi impulzi*. $I = I(t)$. Varilni tok je lahko časovno nespremenljiv (kontinuiran) ali impulzni.



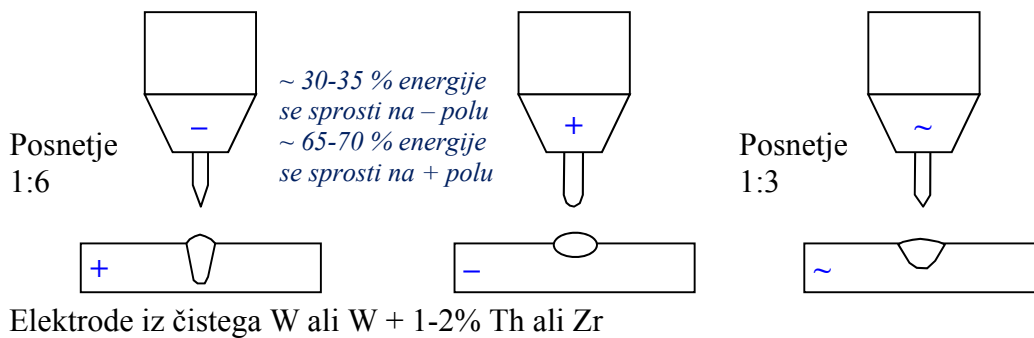
Strmo padajoča statična karakteristika vira toka

Daljši oblok ima večjo električno upornost!

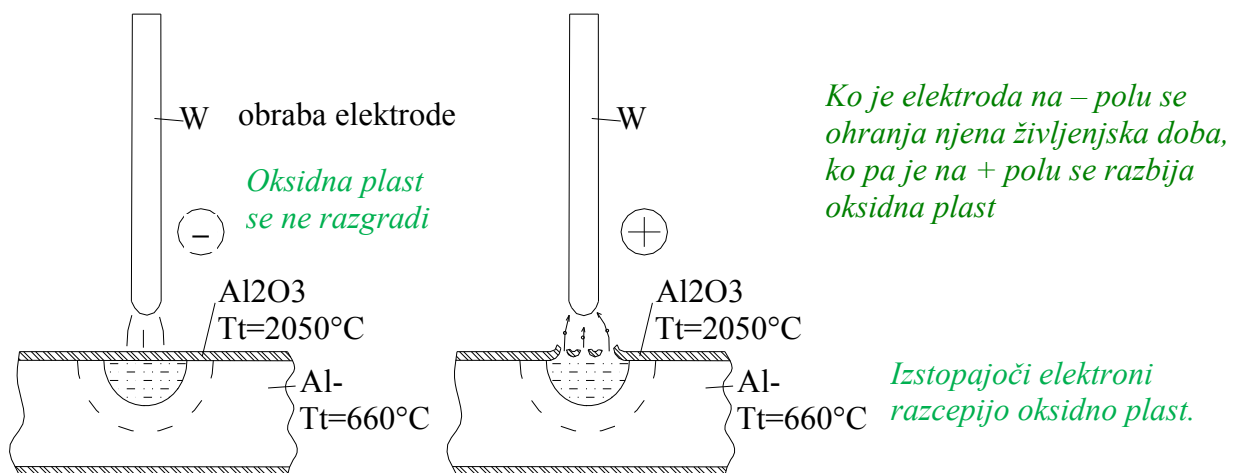
Stikalo na gorilniku

USPOSTAVITEV VARILNEGA OBLOKA:

- kratkostično,
- visokofrekvenčno.

VPLIV POLARITETE IN OBLIKE KONICE NA OBLIKO VARA**Težave pri varjenju Al in njegovih zlitin:**

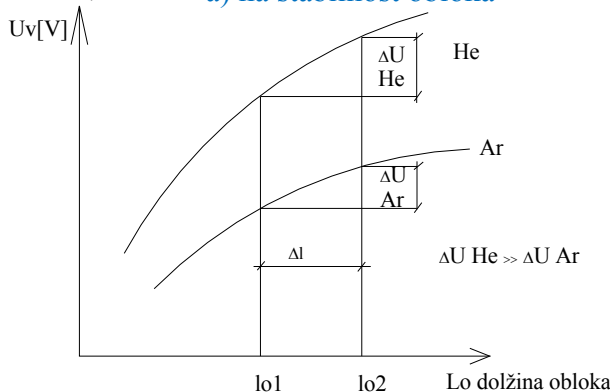
- med segrevanjem ne spreminja barve,
- oksidna plast (Al_2O_3 $T_t=2050^\circ\text{C}$) ima višje tališče kot Al ($T_t=660^\circ\text{C}$) (pred varjenjem jo odstranimo mehansko ali kemično),
- Aluminij ima dobro toplotno prevodnost \rightarrow velik odvod toplote.



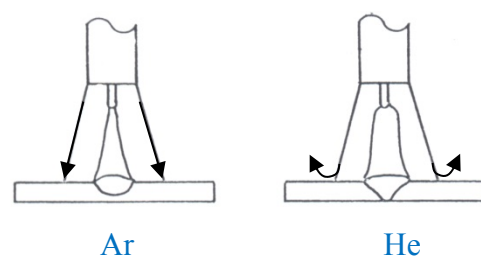
Al in njegove zlitine varimo z \sim tokom.

VPLIV ZAŠČITNEGA PLINA:

- Ar, He. a) na stabilnost obloka



- b) na zaščito in oblikovanje vara



Prednost uporabe helija: varjenje nad glavo (He – lažji od zraka).

Slabost: za zagotovitev enake zaščite je potreben večji pretok plina (tudi do 50 % kot pri uporabi argona (5-10 l/min)).

V praksi se uporablja mešanica plinov Ar in He, da se izrabe dobre lastnosti obeh plinov.

5.4.3. Tehnološko-tehnične značilnosti

- + izgled in kakovost zvara
 - + korozijska obstojnost
 - + primerno za varjenje tankih pločevin
 - + primerno za varjenje predvsem težje varivih materialov
- drag zaščitni plin
 - nizka produktivnost
 - zahteva po visoki izurjenosti varilcev
 - občutljivost pri delu na odprtem
 - občutljivost na stopnjo čistosti plina

11.5 Laboratorijska vaja 3: Primerjava MIG in MAG varjenja

1. NALOGA

Pri avtomatiziranem varjenju po postopku MIG oz. MAG z varilno žico VAC CuNi s približnim enakomernim vnosom energije na enaki dolžini navara $(I_v, U_v, t_v)_{MAG} = (U_v, I_v, t_v)_{MIG}$ ugotovi in primerjaj:

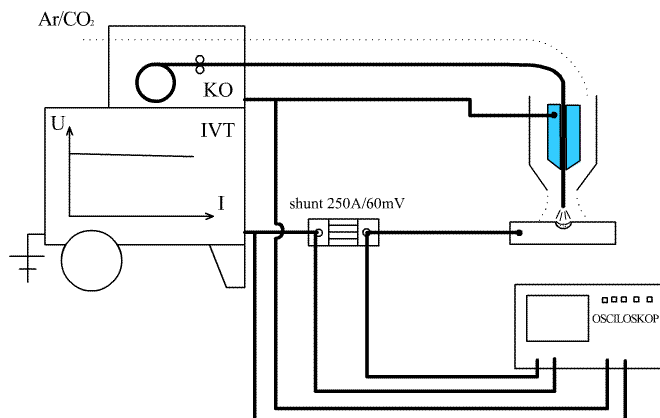
- varilni tok I [A],
- varilno napetost U [V],
- stabilnost varilnega toka ζ [%],
- stabilnost varilne napetosti ξ [%],
- višino temena h_t (mm),
- širino temena b (mm),
- koeficient oblike vara ψ ,
- koeficient oblike temena vara φ ,
- stopnjo razmešanja γ ,
- poraba obločne energije enostransko raztaljenega zvara za enoto raztopljenega vara A_0 (Wh/mm²).

2. OPREMA

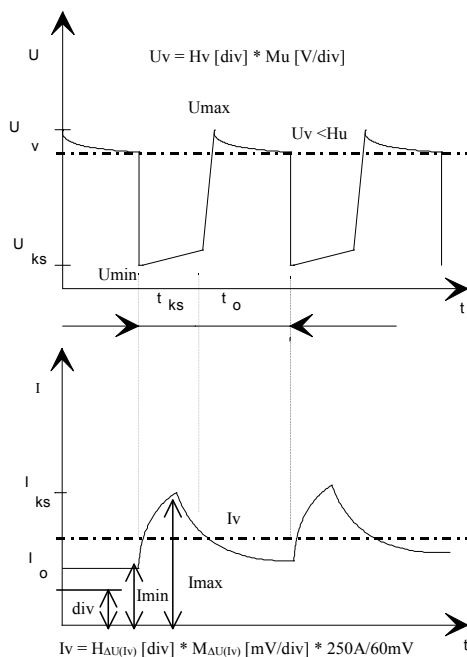
- vir varilnega toka: Usmernik Iskra E 450
- krmilna omarica: Iskra WF 500/4
- shunt: 250 A / 60 mV (400 A / 60 mV)
- varilna žica: VAC60 ϕ 1,2 mm
- zaščitni plin: CO₂, Ar
- osciloskop: Agilent DSOX3014A

3. POSTOPEK

Varjenec stehamo. Na viru toka nastavimo območje varjenja. Izberemo take varilne parametre, da lahko varimo s kratkimi stiki. Sledi varjenje in merjenje varilne napetosti in toka (preko padca napetosti na shuntu) ter prikaz rezultatov na osciloskopu. Med varjenjem odčitamo porabo zaščitnega plina, čas varjenja ter varilni tok in napetost na varilni napravi.



Shema varilnega postrojenja



Potek kratkostičnega varilnega toka in napetosti

Pri približno enakih pogojih vnosa energije primerjate vpliv zaščitnega plina na obliko zvara in izgled temena vara. Po navaritvi navara preizkušanece prerežemo preko zvarnih mest ter čelno površino jedkamo. Z uporabo programa Image J premerimo zvar in analiziramo njegovo obliko. Ugotovimo karakteristično obliko zvara za MIG oz. MAG varjenje.

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultat meritve je slika zaslona osciloskopa ter digitalni zapis poteka toka in napetosti v *.csv formatu.

1. Na zaslonski sliki osciloskopa določite okvirne vrednosti maksimalne, minimalne in srednje vrednosti varilnega toka in napetosti za varjenje MIG in MAG ter za varjenje brez zaščitnega plina. Izmerite razdaljo enega razdelka [div] in prej omenjene vrednosti toka in napetosti v [mm] s križnim računom preko merila enega razdelka pretvorite v [div]. Uporabite enačbe za izračun vrednosti iz zaslonske slike in določite prej omenjene vrednosti toka in napetosti.

2. Podatke o poteku varilnega toka in napetosti (*.csv formatu) iz osciloskopa uvozite v Excel. Vrednosti varilnega toka v [mV] pomnožite s faktorjem shunta, vrednosti varilnega toka so že pravilne. Narišite grafa poteka varilnega toka in napetosti pri varjenju MIG in MAG. Graf naj ima dve ordinati (eno za tok in eno za napetost). Iz grafa ali iz izmerjenih podatkov odčitajte minimalno ter maksimalno vrednost varilnega toka in napetosti za varjenje MIG in varjenje MAG. Srednjo vrednost varilnega toka in napetosti določite tako, da vrednosti napetosti in varilnega toka kvadrirate, nato določite srednjo vrednost kvadratov za določen časovni obseg (average), ter izračunate koren te vrednosti. Izračunajte stabilnost varilne napetosti in toka. Srednjo moč obloka $P [\text{VA}]$ določite iz povprečne vrednosti zmnožka izmerjenega varilnega toka in napetosti (po vrsticah) $P [\text{W}] = \sqrt{\text{average}((u \cdot i)^2)}$. Določite še porabljeno energijo $A [\text{Wh}] = P [\text{W}] * t_v$.

Merilo: $M_t = \text{___} [\text{ms/div}]$; $M_U = \text{___} [\text{V/div}]$; $M_{\Delta U(t_v)} = \text{___} [\text{mV/div}]$

Iz grafa odčitajte:

- Izračun varilnih tokov iz zaslonske slike:

$$I_v = H_{\Delta U(t_v)} [\text{div}] \cdot M_{\Delta U(t_v)} [\text{mV/div}] \cdot \frac{250A}{60mV}$$

$$I_{v,\min} = H_{\Delta U(t_v),\min} [\text{div}] \cdot M_{\Delta U(t_v)} [\text{mV/div}] \cdot \frac{250A}{60mV}$$

$$I_{v,\max} = H_{\Delta U(t_v),\max} [\text{div}] \cdot M_{\Delta U(t_v)} [\text{mV/div}] \cdot \frac{250A}{60mV}$$

- Stabilnost varilne napetosti in toka:**

$$\xi = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_v} \cdot 100\%$$

$$\zeta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_v} \cdot 100\%$$

- Izračun varilne napetosti iz zaslonske slike:

$$U_v = H_U [\text{div}] \cdot M_U [\text{V/div}]$$

$$U_{v,\min} = H_{U,\min} [\text{div}] \cdot M_U [\text{V/div}]$$

$$U_v = H_{U,\min} [\text{div}] \cdot M_U [\text{V/div}]$$

- Srednja moč obloka (generalized mean)**

$$P = \sqrt[p]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i \cdot I_i)^p}; p = 2 \text{ ali}$$

$$P [W] = \text{sqrt}(\text{average} ((u*i)^2))$$

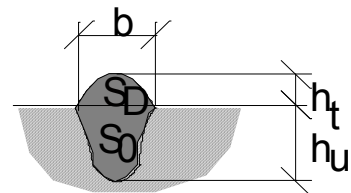
Iz makroobrusa s pomočjo programa Image J določite geometrijske vrednosti obrusa za MIG in MAG varjenje. V programu odprite sliko obrusa in ga skalibrirajte (analyze/ calibrate) glede na znano debelino pločevine. Nato s pomočjo orodij izmerite geometrijske dolžine in površine, ki jih zapišete v spodnji tabelo. Izračunate še vrednosti oblike vara ter porabo energije na enoto raztaljenega vara.

- stopnja razmešanja γ ter φ ψ :

$$\varphi = \frac{b}{h_t}; \quad \psi = \frac{b}{h_u}; \quad \gamma = \frac{S_0}{S_0 + S_d};$$

- poraba obločne energije na enoto raztaljenega vara:

$$A_0 = \frac{I_v \cdot U_v \cdot t_v}{(S_0 + S_d)}$$



Karakteristične vrednosti makroobrusa:

	MAG	MIG
Širina temena b (mm)		
Višina temena h_t (mm)		
Višina uvara h_u (mm)		
Ploščina temena S_d (mm ²)		
Ploščina uvara S_0 (mm ²)		

5. ZAKLJUČEK

11.6 Laboratorijska vaja 4: Primerjava med varjenjem MAG in TIG

1. NALOGA

Skiciraj principielni shemi za postopke varjenja MAG in varjenja TIG. Izpostavi vsebinske podobnosti in razlike med tema dvema postopkoma talilnega varjenja. S preizkusnim varjenjem kotnega vara višine $a = 3 \text{ mm}$ na enak varjenec po postopku MAG in TIG izračunaj in primerjaj:

- računsko dolžino za teoretično višino kotnega zvara z izbranimi varilnimi parametri L_3 [mm],
- tehnološke čase varjenja t_t [min/m],
- porabo dodatnega materiala q [g/m],
- porabo zaščitnega plina Q [g/m],
- porabo električne energije [kWh/m] in
- materialne stroške varjenja C_v [EUR/m].

2. OPREMA

2.1. MAG, zaščitni plin: CO2	2.2. TIG, zaščitni plin: ARGON
vir varilnega toka: usmernik ISKRA E450/1	vir toka: inverter Fronius Magic Wave 2000
krmilna omarica: ISKRA WF 500/4	dodajni material:
elektroda: <u>VAC 60 ϕ1.2 mm</u>	tehnica: Mettler Toledo, štoparica, meter

3. POSTOPEK

3.1. MAG, nastavitve:	3.2. TIG, nastavitve:
varilna napetost $U_v =$ V,	varilna napetost $U_v =$ V,
varilni tok $I_v =$ A	varilni tok $I_v =$ A
čas varjenja $t_v =$ s	čas varjenja $t_v =$ s
masa varjenca pred varjenjem $M_{p0} =$ g	masa varjenca pred varjenjem $M_{p0} =$ g
masa varjenca po varjenju $M_{p1} =$ g	masa varjenca po varjenju $M_{p1} =$ g
pretok plina $q_p =$ l/min	pretok plina $q_p =$ l/min

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Masa navara: $M_n = M_{p1} - M_{p0}$

$$M_{nx} = M_{n3mm}; \Rightarrow a_x^2 \cdot l_x \cdot \rho = a_3^2 \cdot l_3 \cdot \rho \Rightarrow$$

$$l_3 = \frac{M_{nx}}{a_3^2 \cdot \rho} = \frac{M_n [\text{g}] \cdot 10}{0,3^2 \text{ cm}^2 \cdot 7,85 \text{ g/cm}^3} [\text{mm}]$$

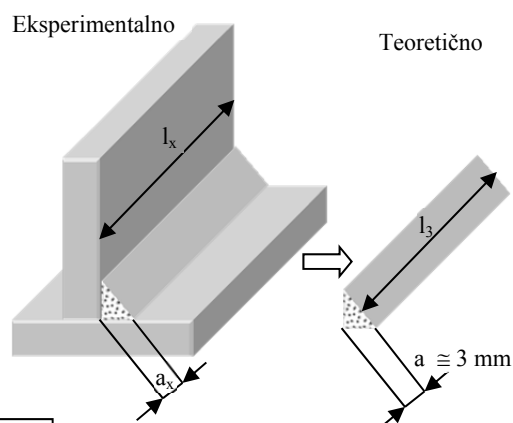
$$t_t = \frac{t_v \cdot 1000}{l_3 \cdot 60} [\text{min/m}]$$

$$q = \frac{M_n \cdot 1000}{l_3} [\text{g/m}]$$

$$\rho_{\text{jekla}} = 7,85 \text{ g/cm}^3$$

l_3 = teoretična dolžina vara

M_{pp} = masa porabljenega plina



$$Q = \frac{M_{pp}}{l_3}; M_{pp} = q_p [l / \text{min}] \cdot \rho_{plina} [g / l] \cdot (t_v + t_z); \rho_{CO_2} = 1.977 \text{ kg} / \text{m}^3; \rho_{Ar} = 1.78 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$E = (P_{obloka} + P_{prostega_teka} + P_{pogon_žice}) \cdot \frac{t_v}{l_3}$$

$$E' = (P_{obloka} + P_{prostega_teka} + P_{pogon_žice}) \cdot t_v$$

$$C_{NV} = (C_v \cdot t_N + C_{DM} \cdot M_{pž} + C_{pp} \cdot M_{pp} + C_E \cdot E') \cdot \frac{1}{l_3} [EUR / m]$$

P_{obloka} ... obločna moč = $I_v \cdot U_v$
 $P_{prostega\ teka}$... moč prostega teka
 $P_{pogon\ žice}$... moč za pogon žice

C_v ... cena varilne ure varilca = 20 €/h
 C_E ... cena električne energije = 0,07199 €/kWh * 2 (omrežnina, trošarina, ...)
 C_{DM} ... dodajnega materiala
 C_{pp} ... porabljenega plina
 t_N ... čas navarjanja $\cong 1,3 \cdot t_t$ (MAG); $1,5 \cdot t_t$ (TIG)

	MAG	TIG
$P_{prosti\ tek}$	0,2 kW	0,1 kW
$P_{pogon\ žice}$	0,15 kW	0
C_{DM}	3 €/kg	2,5 €/kg
C_{pp}	1 €/kg	5 €/kg
t_N	$1,3 \cdot t_t$	$1,5 \cdot t_t$
t_z (čas zakasnitve)	2 s	7 s

5. ZAKLJUČEK

12 ELEKTROUPOROVNO VARJENJE

Elektrooporovno varjenje temelji na segretju varjencev zaradi prevajanja električnega toka ob delovanju mehanske sile na varjence. Na zvarnem mestu je električna upornost največja. Zaradi prevajanja električnega toka je material v tej točki segret do testatega stanja in delno tudi raztaljen. Zvarni spoj nastane zaradi delovanja mehanske sile na varjence.

Elektrooporovno varjenje delimo na:

- točkovno varjenje,
- bradavičasto varjenje (betonske mreže, matice na pločevine),
- kolutno varjenje,
- obžigalno varjenje,
- varjenje s pritiskom,
- uporovno lotanje*.

12.1 Uporovno točkovno varjenje (UTV)

Je najbolj razširjen postopek.

Uporaba: v avtomobilski in elektroindustriji ter v množični proizvodnji bele tehnike.

Prednosti postopka so v:

- široki uporabnosti (varimo jekla, aluminij, ...),
- enostavnosti uporabe,
- majhne deformacije,
- primernosti za robotizacijo,
- prijaznost za okolje (ni dimov, žlindre),
- ekonomičnost.

Princip delovanja:

UTV je varjenje v toplem s stiskanjem. Za raztalitev volumna leče V, le-tega segrejemo malo nad mejo tališča in likvidus linijo.

$$Q_T = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T + V \cdot \rho \cdot W_L \quad - \text{toplota, ki jo teoretično moramo dovesti}$$

$$W_L = 270 \text{ kJ/Kg}$$

$$c_p = 465 \text{ J/KgK}$$

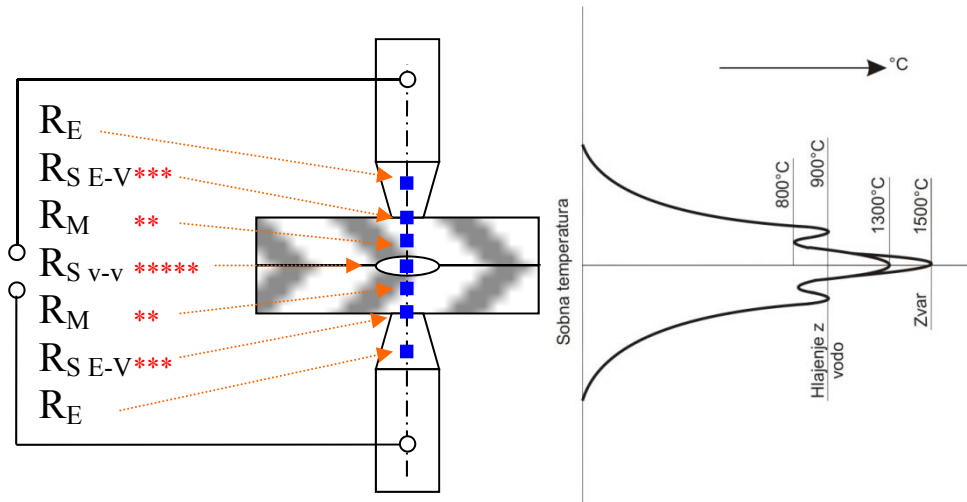
- talilna (latentna) toplota za jeklo

- srednja specifična toplota malolegiranega jekla

$$Q_D = Q_T / \eta_t \quad - \eta_t = 10 - 30\% \text{ (teoretični izkoristek)}$$

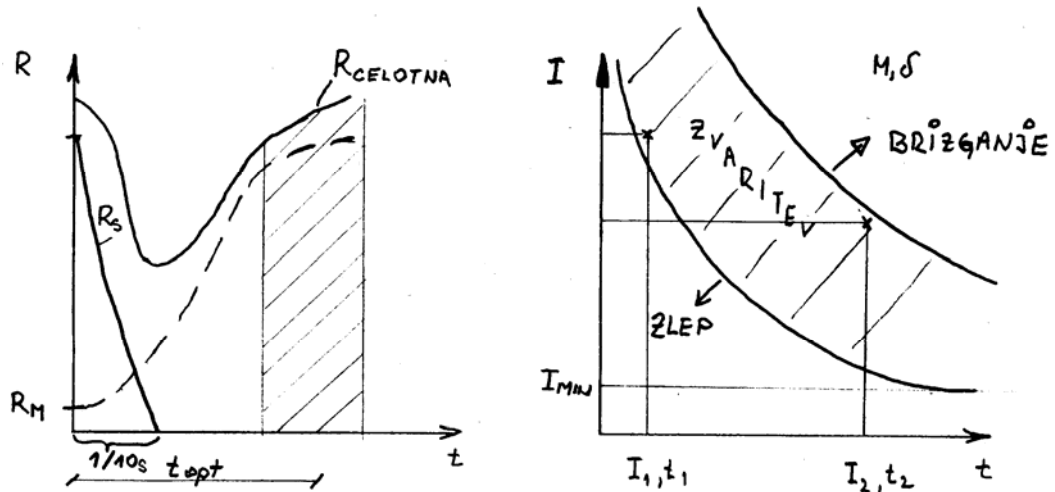
$$Q_D = \int_0^{t_v} U_v \cdot I_v \cdot dt = \int_0^{t_v} R(t) \cdot I_v^2 \cdot dt = \int_0^{t_v} R(t) \cdot I_v^2(t) \cdot dt = R \cdot I^2 \cdot t$$

Upornost elektrod:



Slika 1: Upornost elektrod

Najpomembnejša upornost je upornost stika ter upornost obeh materialov:



Slika 2: Upornost ter potreben tok v odvisnosti od časa

12.2 Elektroda

Funkcija elektrode:

- stiska varjenca (prenaša silo),
- prevaja električni tok,
- odvaja toploto in
- oblikuje zvarno lečo točkovega zvara.

Zahteve za elektrode:

- izdelana iz materiala, ki dobro prevaja električni tok in toploto.
 - visoko trdnost pri povišanih temperaturah,
 - se ne legira z osnovnim materialom, ki ga varimo.
- Premer elektrode je odvisen od debeline varjenca:

$$D = k \cdot \sqrt{\delta} \quad k = f(\text{materiala}) = 4 - 11$$

$$k_{Al} = 11$$

$$k_{\text{Nerjaveče jeklo}} = 4$$

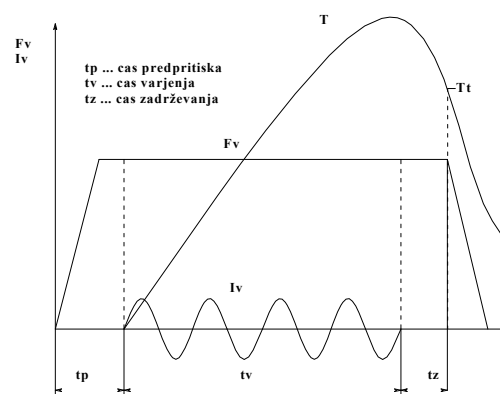
12.3 Varilni parametri

Nastavljamo:

- varilni tok (= ali \sim , (100 A) 10 000 A, 100 000 A)
- čas varjenja (0,02 s do \sim 1 s)
- sila stiskanja (3 kN)

Pomembni parametri so še:

- varilna napetost (je ne nastavljamo – 2V (5V),
- oblika in dimenzije elektrodnih konic (določajo velikost zvarne leče),
- material elektrod (odvisen od vrste materiala varjenca),
- vrsta varilnega ciklusa (odvisna od vrste materiala varjenca in njegovih dimenzij),



$$1 \text{ p} = 1/50 \text{ Hz} = 0,02 \text{ s}$$

Slika 3: Varilni ciklusi za točkovno varjenje

Varilni parametri:

	Prevodnost \uparrow	Debelina mat. \uparrow	Oksidacija pov. \uparrow	Hitrost varjenja \uparrow
F_V	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow
I_V	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow
t_v	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow

\uparrow - narašča

\downarrow - pada

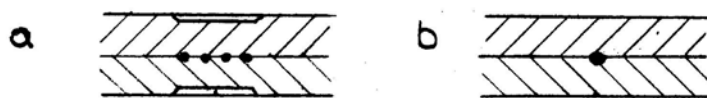
12.4 Napake pri točkovnem varjenju

Napake so posledica slabo izbranih varilnih parametrov;

- premera in oblike elektrode,
- toka, časa in sile varjenja,
- neustrezno pripravljen varjenec ter
- napak delavca in napak v materialu,

Neprevaritev:

- a) Po celem preseku. Navzven izgleda zvar dober. [$I \downarrow$]
 b) Premajhna energija. Vidi se da zvar ni dober. Test na vzvoj [$t \downarrow$]



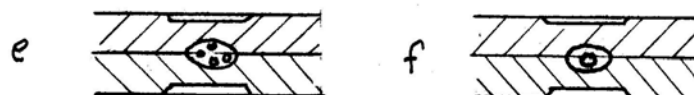
Brizganje:

- c) Na površini. [Pri prevlečenih materialih]
 d) V notranjosti [Prevelik vnos energije, $F \uparrow$]



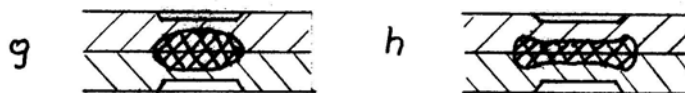
Vključki:

- e) Majhni po celi zvarni leči (oksidirane površine varjencev).
 f) Velik v sredini zvarne leče (premajhna pritisna sila).



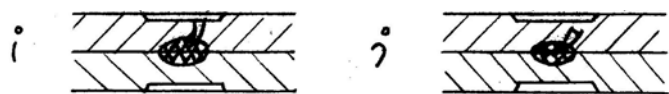
Prežiganje (prevelik vnos energije):

- g) Pri povečanem času.
 h) Pri povečani pritisni sili.



Razpoke:

- i) Zunanje.
 Notranje. So nevidne



12.5 Ocena kakovosti točkovnih zvarov

1. Ocena brez porušitve (statični pristop):

- Vizualna ocena
 - Ultrazvočna metoda
 - Penetrantski preizkusi
 - Elektromagnetne metode
 - Fotometrijske metode
2. Ocena brez porušitve (dinamičen pristop):
- Detekcija z akustično emisijo
3. Ocena z porušitvijo (statični preizkusi):
- Metalografska ocena (obrus)
 - Raznovrstni trdnostni preizkusi trdnosti zvarne točke s trganjem
4. Ocena z porušitvijo (dinamični preizkusi):
- Našteti trdnostni preizkusi z dinamično karakteristiko sile

12.6 Laboratorijska vaja 5: Uporovno točkovno varjenje

Določitev optimalnih varilnih parametrov pri uporovnem točkovnem varjenju

1. NALOGA

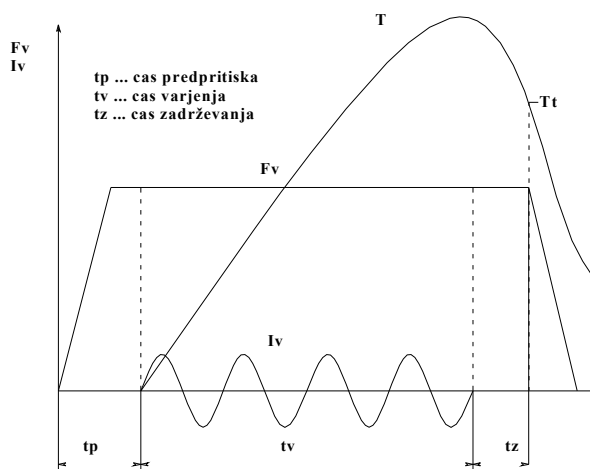
Za nizkoogljično dekapirano pločevino St 37 debeline 1,25 mm, ki jo variš elektro-uporovno z eno točko v prekrovnem spoju ugotovi:

- Odvisnost porušne sile od jakosti varilnega toka pri konstantnem času varjenja $F_p = f(I_v)$; $t_v = konst.$
- Odvisnost porušne sile od časa varjenja pri konstantni jakosti varilnega toka $F_p = f(t_v)$; $I_v = konst.$
- Minimalno vrednost produkta kvadrata toka in časa pri katerem pride do porušitve zvarjenega spoja v osnovnem materialu $\min\{I_v^2 t, \text{iztrg osnovnega zvara iz osnovnega materiala}\}$.

Preizkuse izvedi s kontinuiranim dovodom električne energije, s konstantno pritisko silo $F_s = 3 \text{ kN}$ in premerom konice elektrod $d_e = 7 \text{ mm}$!

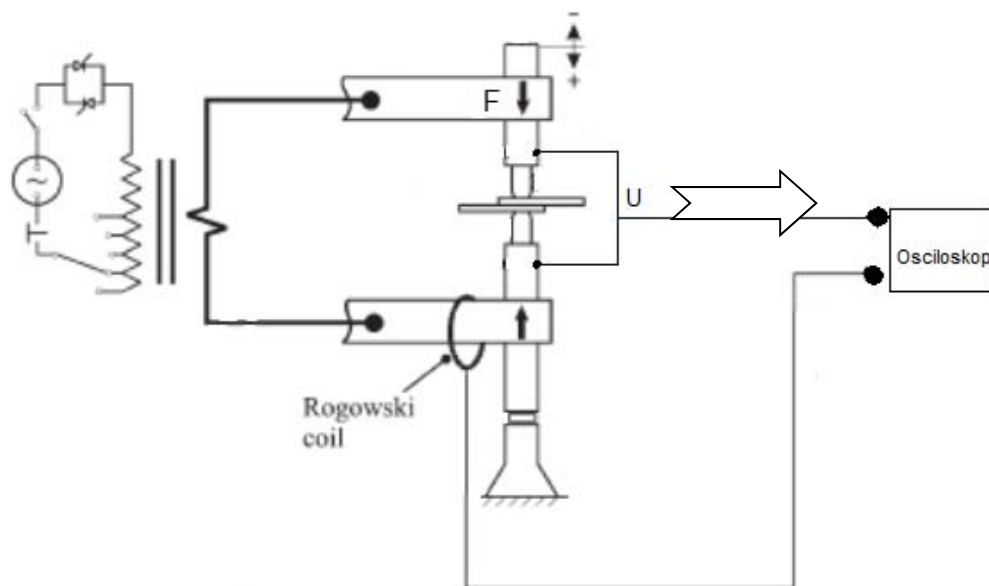
2. OPREMA

- ✘ stroj za elektro uporovno točkovno varjenje: elektroda Zagreb, TA60
- ✘ tuljava Rogowsky 300mV=1A
- ✘ osciloskop Hameg HM 205
- ✘ silomer:
- ✘ trgalni stroj Amsler tip 690 št. 7249; območje je 30kN

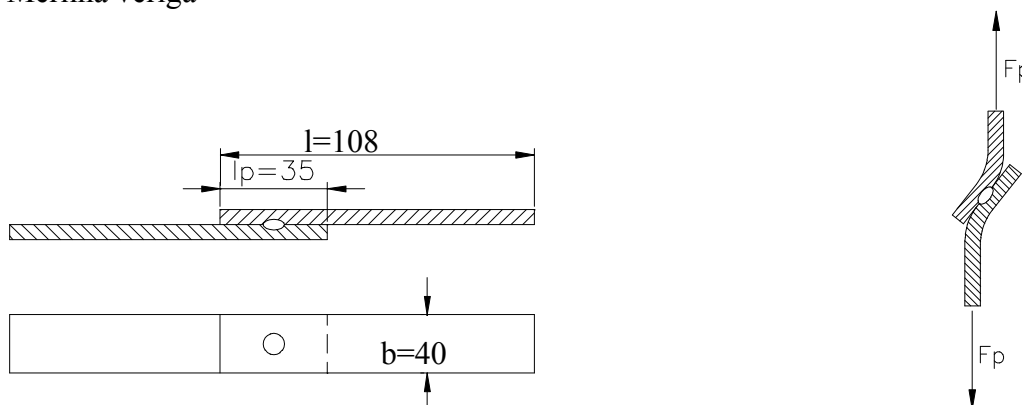


3. POSTOPEK

Varimo 2 varjenca v prekrovnem zvarnem spoju z eno zvarno točko. Pri varjenju spreminjamo (1) jakost varilnega toka in (2) čas varjenja. Po zavaritvi vseh varjencev, opravimo natezno strižni preizkus trdnosti zvarne točke, kjer beležimo silo porušitve F_p .



Merilna veriga



Varilni parametri:

Sila stiskanja $F_s = \text{___ kN}$

$p = (f)^{-1} = (50\text{Hz})^{-1} = 0,02\text{s}$

a) $t_v = \text{konst} = \text{___ p} = \text{___ s}$

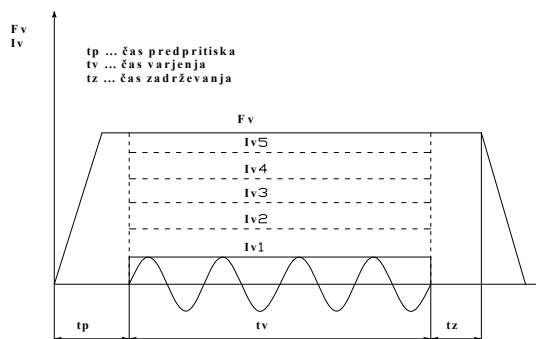
$I_{v1} = \text{___ A}$

$I_{v2} = \text{___ A}$

$I_{v3} = \text{___ A}$

$I_{v4} = \text{___ A}$

$I_{v5} = \text{___ A}$



b) $I_v = \text{konst} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

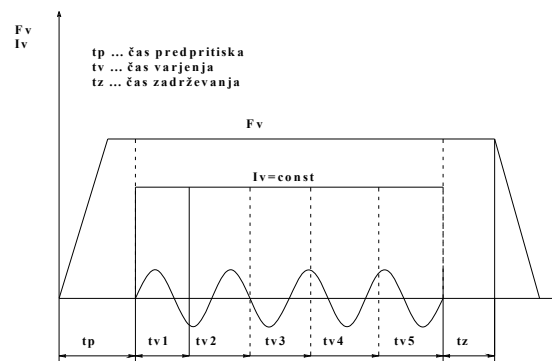
$t_{v1} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ p} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ S}$

$t_{v2} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ p} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ S}$

$t_{v3} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ p} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ S}$

$t_{v4} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ p} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ S}$

$t_{v5} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ p} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ S}$



4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Iz izmerjenih vrednosti porušnih sil zvarnih točk izračunamo povprečne vrednosti porušnih sil glede na posamezne varilne parametre in narišemo diagram:

a) odvisnost porušne sile od jakosti varilnega toka: $F_p = f(I_v)$, $t_v = \text{konst}$.

b) odvisnost porušne sile od časa varjenja: $F_p = f(t_v)$, $I_v = \text{konst}$.

Vnos energije: $Q = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t$

$U = R \cdot I$

5. ZAKLJUČEK

13 Plamenska tehnika

Tehnika je univerzalna.

Uporaba:

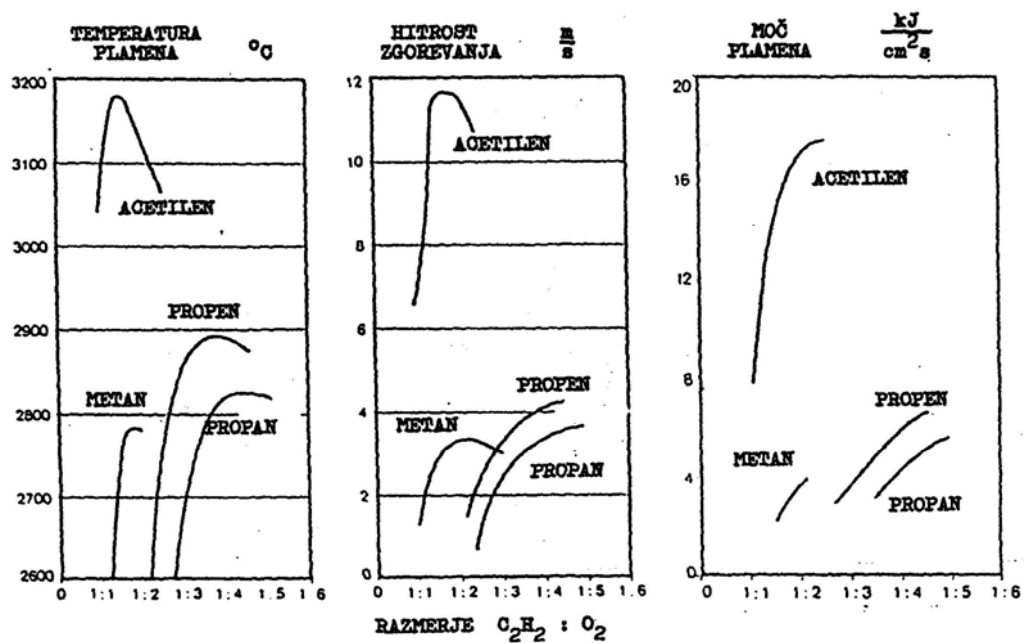
- Varjenje,
- Spajkanje,
- Rezanje,
- Površinsko čiščenje,
- Predgrevanje,
- Lokalno TO,
- Metalizacijo,
- Montažna in reparaturna varjenja.

Uporabljam: **gorljivi plin + kisik**

Gorljivi plini:

- Acetilen, C_2H_2 (*varjenje, rezanje*)
- Propan, C_3H_8 (*rezanje*)
- Butan, C_4H_{10} (*rezanje*)
- Metan, CH_4
- Vodik, H_2

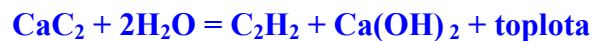
Zakaj uporabljamo acetilen?



Slika 4 : Primerjava fizikalnih lastnosti gorljivih plinov

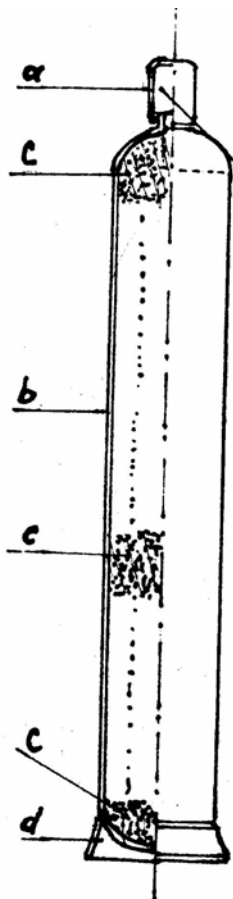
Acetilen, C_2H_2

Je nenasičen ogljikovodik, ki nastane iz karbida ob dotiku z vodo v acetilenskih razvijalnikih po enačbi:



Lastnosti acetilena:

- Brez barve, lažji od zraka z značilnim vonjem.
- V mešanici z zrakom eksploziven v razmerju od 2,4 – 80 % ter s kisikom od 2,4 – 90 %.
- Dopusten tlak čistega acetilena je 2,5 bar.
- Pri tlaku nad 3 bare pri acetilenu pride do polimerizacije in pri temperaturi nad 100°C do razkroja. Pri tem se temperatura poveča in pri konstantnem volumnu lahko vodi do eksplozije.
- Dobro *topen v acetonu*, pri tem *ni* tako *eksploziven*.
- Velika moč plamena.
- Dopustna temperatura 60°C.



V= 40 l
p= 18 bar

- 25% volumna je porozna masa (prepreči hitro reakcijo – proces zaprt med pore).
- 33% volumna (13l) je aceton:
 $V=13\text{L} * 18\text{bar} * 25 \cong 6000\text{l}$ acetilena v jeklenki

a. pokrov nad ventilom
b. plašč jeklenke
c. porozna kemična masa
d. podstavek jeklenke

Slika 5 : Jeklenka za aceten


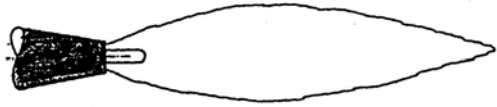
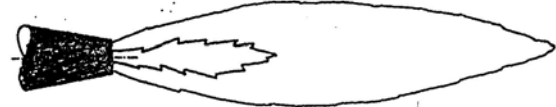
Kisik, O₂

V= 40 l
p= 150 bar

$V=150 * 40 \cong 6000\text{l}$

13.1 Plamensko varjenje in varilni plamen

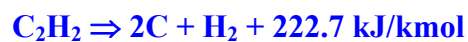
Nastane z gorenjem mešanice acetilena in kisika ob izstopu iz gorilnika. Glede na razmerje $C_2H_2:O_2$ poznamo:

	Uporaba za varjenje
 <p>KISIKOVIT ALI OKSIDATIVEN $\frac{C_2H_2}{O_2} < 1$</p>	Medenine (prepreči izstopanje cinka s tvorjenjem oksidne plasti).
 <p>NEVTRALEN $\frac{C_2H_2}{O_2} = 1 \div 1.1$</p>	Varjenje večina kovin
 <p>OGLJIKOVIT ALI REDUKTIVEN $\frac{C_2H_2}{O_2} > 1.1$</p>	Aluminij, siva litina (prepreči razogličenje)

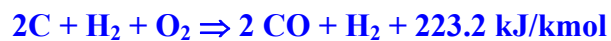
Slika 6 : Kisikovit, nevtralen in ogljikovit plamen

Pri nevtralnem plamenu poteka zgorevanje v treh fazah v treh področjih:

V prvi fazi (sl.5) *razpade acetilen* v jeklenki (eksotermno) po enačbi:

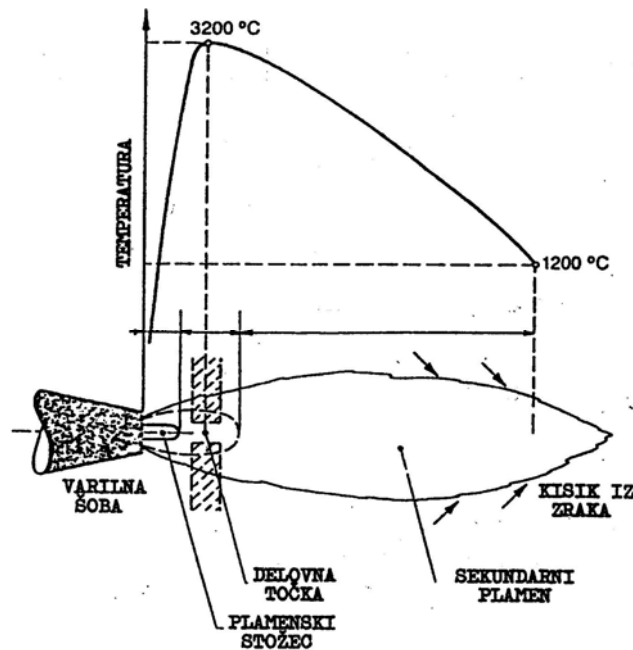


V drugem področju se odvija *gorenje ogljika v ogljikov monoksid* (v redukcijski ovojnici)



V tretjem področju poteka *dokončno zgorevanje* (v pahljači s kisikom iz zraka)





Slika 7 : Potek temperature v varilnem plamenu

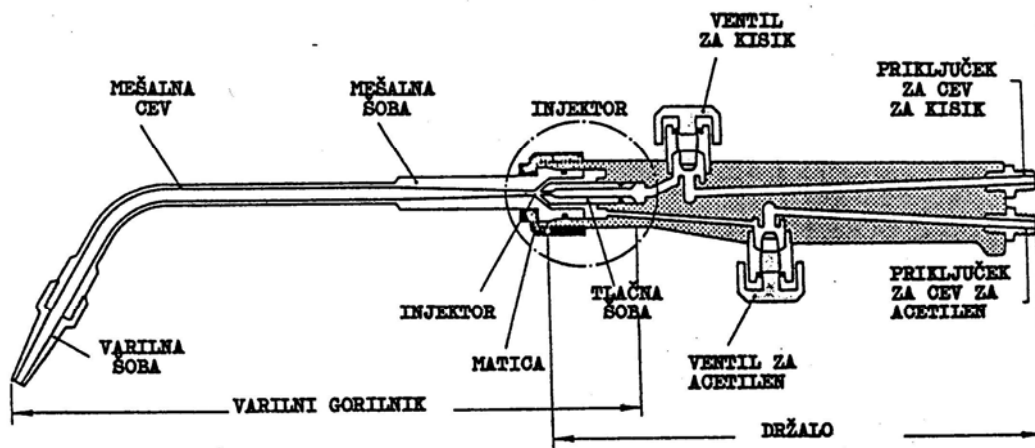
Velikost in moč varilnega plamena sta odvisni od količine pretoka plinov in od velikosti gorilnika. Izbira gorilnika je odvisna od debeline materiala. Za jekla velja spodnja tabela:

Tabela 1: Premer gorilnika izberemo glede na debelino materiala, ki ga varimo

Št. gorilnika	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Deb. mat. [mm]	do 0.5	0.5-1	1-2	2-4	4-6	6-9	9-14	14-20	20-30

Gorilniki:

- Injektorski (kisik prihaja pod višjim tlakom in v zoženem delu sesa aceten).
- Mešalni (mehkejši plamen).



Slika 8 : Injektorski varilni gorilnik za plamensko rezanje

Plamensko varimo predvsem *tanjše pločevine, cevi in raznih profilov.*

13.2 Varjenje v levo in v desno

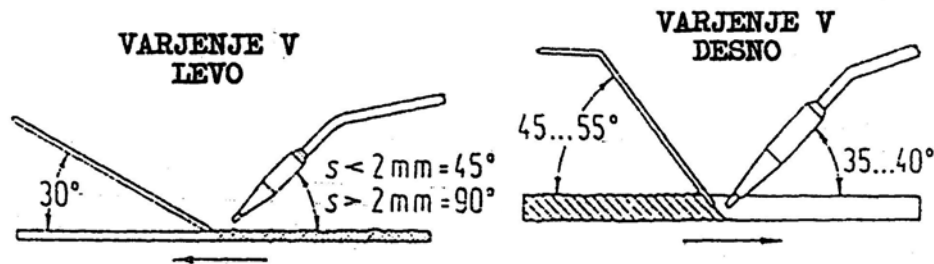
Razlikujemo varjenje v levo in v desno (sl.9).

V LEVO

- Za varjenje tanjših pločevin do 3 mm.
- Varimo hitreje kot v desno.
- Zaradi slabše zaščite pred atmosfero in slabše prevaritve korena so mehanske lastnosti zvara slabše.
- Izgled zvara je lepši.

V DESNO

- Za varjenje debelejših varjencev.
- Zvar je s plamenom zaščiten pred atmosfero in se počasneje ohlaja. To ugodno vpliva na kakovost zvara.
- Dobra prevaritev korena vara → boljše mehanske lastnosti.



Slika 9 : Varjenje v levo in v desno

13.3 Ukrepi pred, med in po varjenju

Ukrepi pred varjenjem:

- Izbira vrste plamena
- Preddeformacija
- Predgrevanje
- Spenjalna varjenja
- Uporaba talil (varjenje aluminija)

Ukrepi med varjenjem:

- Odvisni so od načina varjenja (v levo ali v desno)

Ukrepi po varjenju:

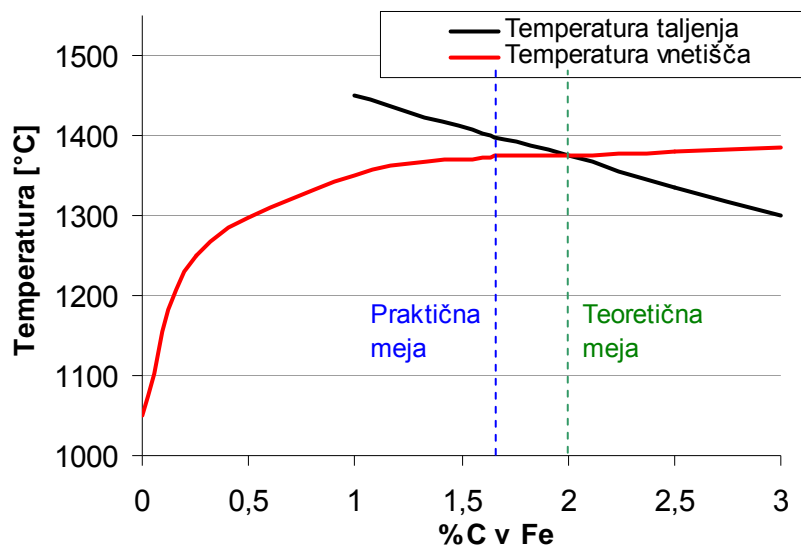
- Napetostno žarjenje zvarov

13.4 Plamensko rezanje

Plamensko lahko režemo Fe, Ti in nizkolegirana jekla. S plamenom gorilnika jeklo najprej segrejemo na temperaturo vnetišča in nato odpremo rezalni kisik, ki povzroča **gorenje** jekla. Tok kisika tudi izpihuje produkte gorenja. *(Med rezanjem bi lahko plamen ugasnili, vendar tega ne storimo da je proces rezanja bolj stabilen).*

Pogoji, ki morajo biti izpolnjeni za uspešno plamensko rezanje kovin:

1. kovina mora s kisikom goreti,
2. $T_{\text{VNETIŠČA KOVINE}} < T_{\text{TALJENJA KOVINE}}$ *(da se kovina ne stali prezgodaj in da je rez čist),*
3. $T_{\text{TALJENJA OKSIDOV}} < T_{\text{TALJENJA KOVINE}}$ *(oksidi ostanejo tekoči in tok kisika jih lahko izpiha),*
4. odvod toplote mora biti majhen in toplota zgorovanja visoka.



13.5 Laboratorijska vaja 6: KISIK - ACETILENSKI PLAMEN

1. NALOGA

Opiši vlogo in pomen kisik-acetilenskega plamena v varilni tehniki in navedi področja uporabe. Kako razdelimo vrste plamena glede na razmerje med acetilenom in kisikom, ter za varjenje katerih materialov se posamezen plamen uporablja.

Skiciraj porazdelitev temperature in opiši kemične reakcije v nevtralnem kisik-acetilenskem plamenu.

Navedi pogoje za plamensko rezanje in navedi prednosti in slabosti tega postopka varjenja v primerjavi z alternativnimi postopki toplotnega rezanja.

2. OPREMA

- × injektorski gorilnik TELEOPTIK,
- × rezalni gorilnik TELEOPTIK,
- × jeklenki (kisik, acetilen),
- × reducirna ventila,
- × varovalke in
- × cevi za plin

3. POSTOPEK

- × skica plamena za varjenje,
- × skica plamena za rezanje,
- × glavne prednosti in slabosti,
- × področja uporabe,

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Opis praktične demonstracije s komentarjem!

5. ZAKLJUČEK

Poglavje 14

Predloge za poročila

V tem poglavju povzemamo naloge podane pri laboratorijskih vajah LV2 in jih podajamo v obliki za izpolnjevanje in oddajo v obliki poročila za vajo.

Ime in priimek: _____

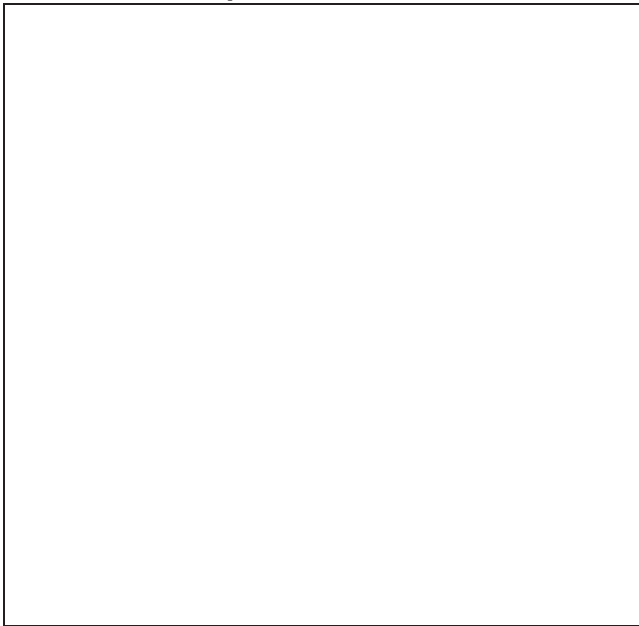
Vpisna številka: _____

Študijsko leto: _____

1. LV2: Potopna elektroerozija

1. Podaj (skiciraj) bistvene razlike med žično in potopno elektroerozijo s stališča oblike obdelovancev!

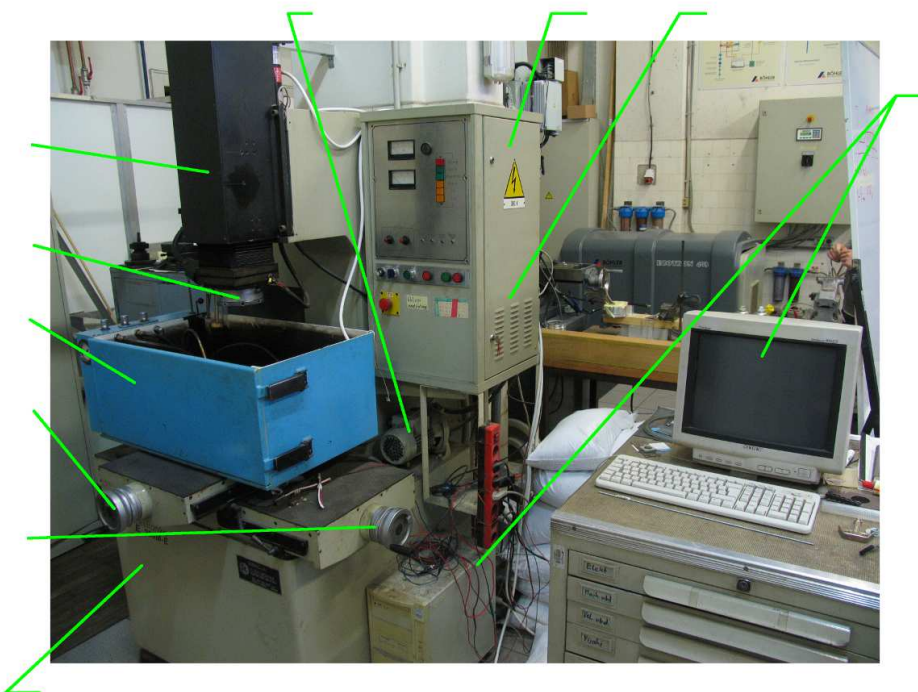
Žična elektroerozija



Potopna elektroerozija



2. Poimenuj komponente stroja označene na sliki. Kratko opiši funkcijo vsake komponente.



3. Navedi nastavitvene in krmilne parametre! Obkroži tiste, ki vplivajo na hrapavost površine, in podčrtaj tiste, ki vplivajo na hitrost odnašanja.

Nastavitveni parametri	Krmilni parametri

4. Kako zagotovimo stabilen elektroerozijski obdelovalni proces?

Ime in priimek: _____

Vpisna številka: _____

Študijsko leto: _____

2. LV2: Priprava CAM programa na podlagi CAD risbe

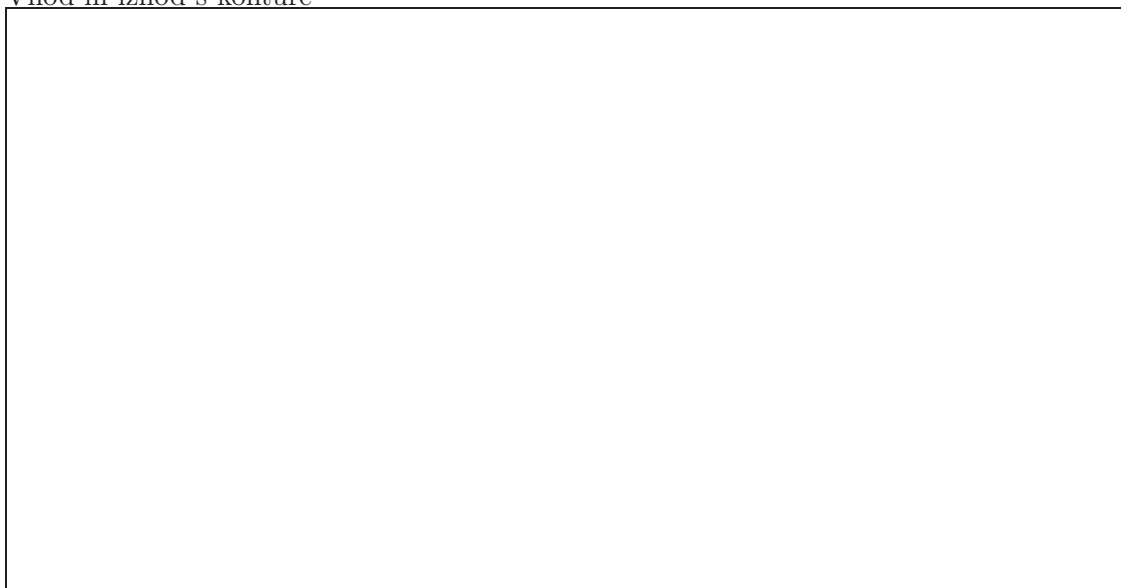
Naloge od 1 do 3 rešite na računalniku. Uspešnost pri teh nalogah oceni asistent med samo vajo. Datoteke niso del poročila.

4. Opiši glavne značilnosti programiranja konturnega rezanja:

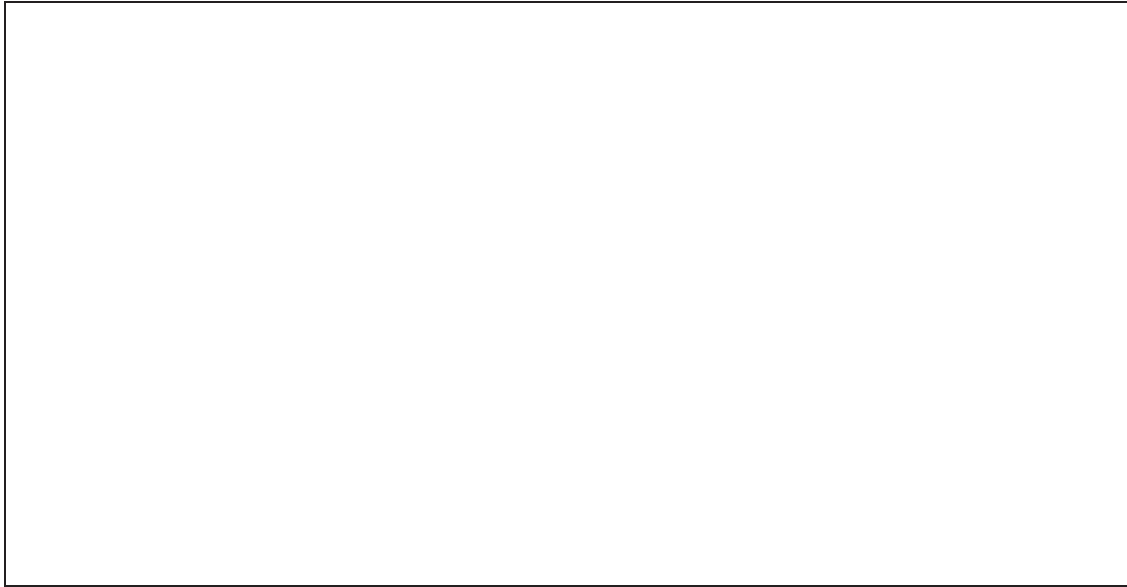
Preboj



Vhod in izhod s konture



Rezanje v vogalih in na krivinah



Možne napake pri programiranju



5. Katere parametre procesa rezanja nastavljamo v programu Layout in katere v programu Make?

Program Layout	Program Make

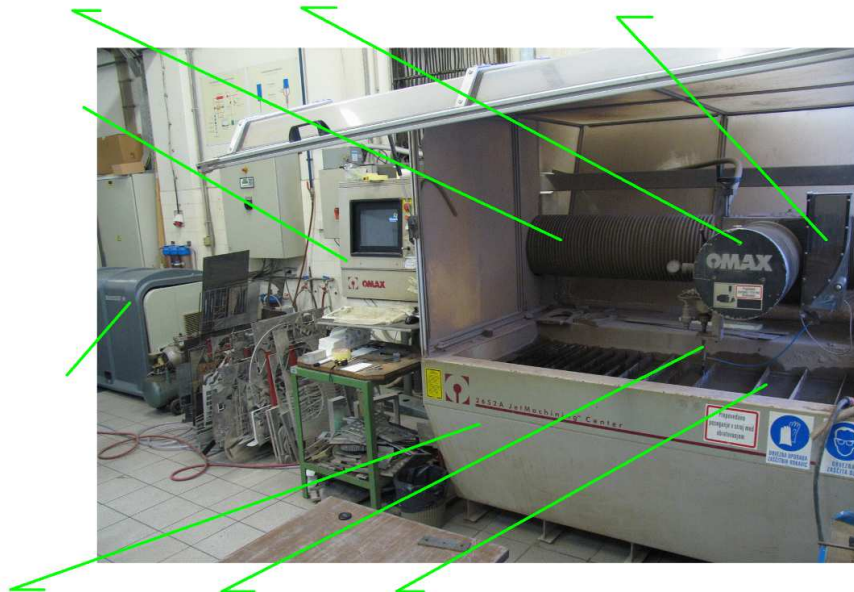
Ime in priimek: _____

Vpisna številka: _____

Študijsko leto: _____

3. LV2: Stroj in rezanje z AVC

1. Na sliki poimenuj označene komponente stroja za rezanje v AVC. Kratko opiši vlogo vsake komponente.



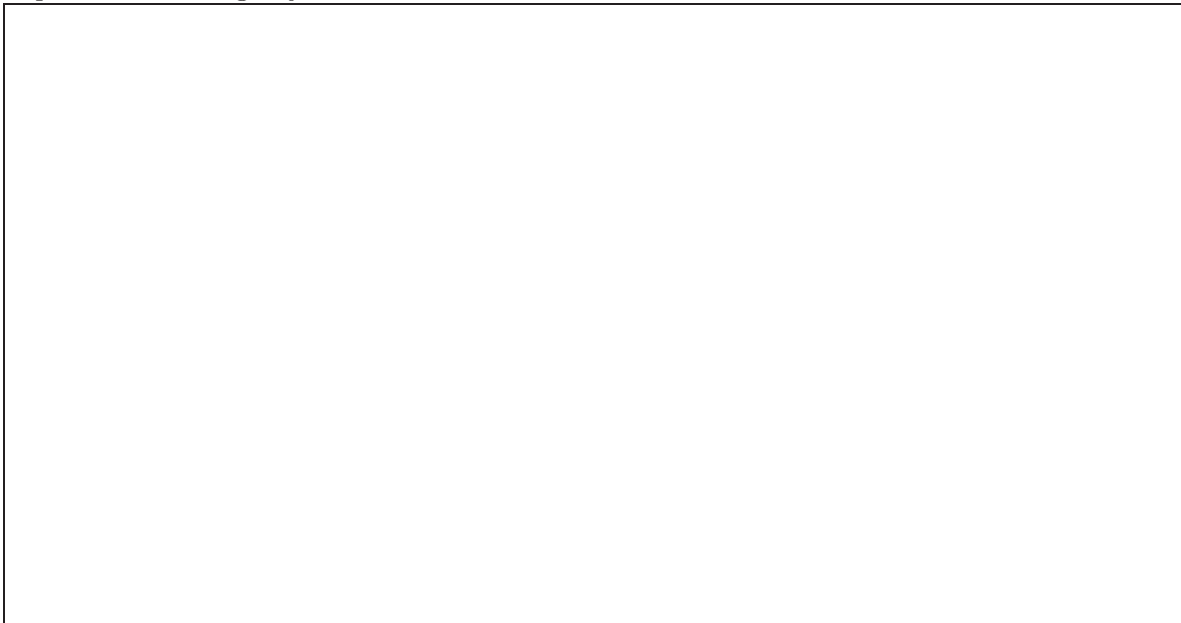
2. Skiciraj hidravlično črpalko z ojačevalnikom in črpalko z ročično gredjo. Opiši delovanje vsake črpalke. Posebej pojasni princip delovanja ojačevalnika.

Hidravlična črpalka z ojačevalnikom



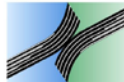
Opis delovanja:

Črpalka z ročično gredjo



Opis delovanja:

3. Nariši grafa pretoka vode v odvisnosti od časa $Q(t) - t$ za obe črpalki in z njima pojasni razliko v delovanju črpalk. Zakaj potrebujemo predčrpalko?



LABORATORIJSKE VAJE IZ

IZDELOVALNIH TEHNOLOGIJ 2

Letnik, smer	- PRIIMEK in IME -	Šolsko leto
--------------	--------------------	-------------



POROČILO LABORATORIJSKE VAJE

VPIŠI NASLOV LV

VPIŠI IME PREDMETA

LV oddane pravočasno:

DA

NE

Ocena LV:

DA	NE

Letnik, smer	- PRIIMEK in IME -	
Šolsko leto		Stran 1 od 1

Laboratorijska vaja 1: Viri varilnega toka za ročno obločno varjenje

1. NALOGA

Skiciraj principiелne *sheme osnovnih vrst varilnega toka*, ki jih uporabljamo pri postopkih ROV ter opiši njihove glavne varilno-tehnološke značilnosti.

Na izvorih varilnega toka za ROV, ki so na razpolago v Laboratoriju za varjenje, izvedi preizkusno navarjanje z elektrodami različnih vrst oplasčenja in *opiši način vžiga, stabilnost obloka in izgled temena zvara*.

2. OPREMA

Viri varilnega toka:

- × transformator: Gorenje Varstroj VARUS 600 D01 (*sv. moder*)
- × usmernik: Saf Safex c2 (*sv. moder*)
- × inverter: Fronius Magic Wave 2000 Fuzzy (*rdeč*)
- × agregat: Kjellberg KU 250 (*črn*)
- × rutilna elektroda:
- × bazična elektroda:
- × celulozna elektroda:

3. POSTOPEK

Popis poteka vaje, principiелne sheme osnovnih vrst varilnega toka in diagrami poteka toka ter opis glavnih tehnoloških značilnosti.

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Opišete varilno-tehnološke značilnosti (vžig obloka, stabilnost obloka, izgled temena zvara) pri varjenju z različnimi vrstami izvorov toka in različno oplaščenimi elektrodami.

5. ZAKLJUČKI

Opišete vaše ugotovitve.

Laboratorijska vaja 2: Primerjava med ROV in varjenjem EPP

1. NALOGA

Skiciraj principiелni shemi za postopek ROV in EPP varjenje. Izpostavi vsebinske podobnosti in razlike med tema dvema postopkoma talilnega varjenja. Pri navarjanju na isti varjenec izberi varilne parametre tako, da se bo pri obeh postopkih dobilo približno enaka navara s širino temena vara $b = 25 \text{ mm}$ in višino temena $h = 3 \text{ mm}$.

Z meritvami pred, med in po varjenju ugotovi in primerjaj:

- srednje vrednosti varilne napetosti U_v [V] in jakosti varilnega toka I_v [A],
- gostoto jakosti varilnega toka i [A/mm^2],
- povprečno hitrost pretaljevanja dodatnega materiala q [g/s],
- talilno konstanto α [g/Ah],
- izkoristek pretaljevanja elektrode η_e [%],
- celotni izkoristek pretaljevanja η_c [%],
- tehnološki čas varjenja t_t [min/m],
- poraba energije na kg čistega vara E_M [Wh/kg] in na dolžinski meter vara E_L [Wh/kg].

2. OPREMA

ROV	EPP
- varilni usmernik: SAF Safex C2	- varilni usmernik: Iskra E450, krmilna omarica Iskra E13
- tehtnica: Mettler Toledo	- voziček avtomata: ISKRA E11
- kljunasto merilo, štoparica, meter	- voltmeter: Iskra unimer 43, milivoltmeter: Iskra Unigor 4n
	- shunt: 1000 A / 60 mV

3. POSTOPEK

3.1. Principielne sheme

Masa jedra elektrode M_j (g):

$$M_j = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_E \cdot \rho_{jekla}; \rho_{jekla} = 7,85 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} M_j &= 22.8 \text{ g } (\phi 3.25 \times 350) \\ &= 34.7 \text{ g } (\phi 4 \times 350) \\ &= 44.3 \text{ g } (\phi 4 \times 450) \end{aligned}$$

b) EPP

3.2. Meritve pred varjenjem

a) Elektroda: ϕ mm x $L_E =$	b) Elektroda: EPP2 ϕ 2 mm
masa elektrode $M_E =$ g, masa jedra el. $M_j =$ g	$m_{\dot{z}} = 24,6$ g/m
masa varjenca pred varjenjem $M_{p0} =$ g	Prašek: ARD 1
napetost prostega teka $U_o =$ V	napetost prostega teka $U_o =$ V

3.3. Meritve med varjenjem

a) varilna napetost $U_v =$ V, varilni tok $I_v =$ A	b) $U_v =$ V, $I_v =$ A
čas varjenja $t_v =$ s	hitrost žice $v_{\dot{z}} = 1000 / t_{1m\dot{z}} =$ mm/s
	čas pomikanja 1 m žice $t_{1m\dot{z}} =$ s, $t_v =$ s

3.4. Meritve po varjenju

a) masa varjenca po varjenju $M_{p1} =$ g	b) masa porabljenega praška $M_{pp} =$ g
dolžina ostanka elektrode $L_{os} =$ mm, $L_{zv} =$ mm	dolžina vara $L_{zv} =$ mm
širina vara $b =$ mm, višina vara $h =$ mm	$b =$ mm, $h =$ mm

4. REZULTATI

5. ZAKLJUČKI

Laboratorijska vaja 3: Primerjava MIG in MAG varjenja

1. NALOGA

Pri avtomatiziranem varjenju po postopku MIG oz. MAG z varilno žico VAC CuNi s približnim enakomernim vnosom energije na enaki dolžini navara $(I_v, U_v, t_v)_{MAG} = (U_v, I_v, t_v)_{MIG}$ ugotovi in primerjaj:

- varilni tok I [A],
 - varilno napetost U [V],
 - stabilnost varilnega toka ζ [%],
 - stabilnost varilne napetosti ξ [%],
 - višino temena h_t (mm),
 - širino temena b (mm),
-
- koeficient oblike vara ψ ,
 - koeficient oblike temena vara φ ,
 - stopnjo razmešanja γ ,
 - poraba obločne energije enostransko raztaljenega zvara za enoto raztopljenega vara A_0 (Wh/mm²).

2. OPREMA

- vir varilnega toka: Usmernik Iskra E 450
- krmilna omarica: Iskra WF 500/4
- shunt: 250 A / 60 mV (400 A / 60 mV)
- varilna žica: VAC60 ϕ 1,2 mm
- zaščitni plin: CO₂, Ar
- osciloskop: Agilent DSOX3014A

3. POSTOPEK

Shema varilnega postrojenja

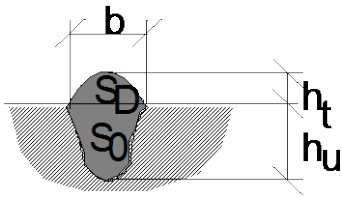
4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Varjenje MAG

Merilo: $M_t = \text{_____} [\text{ms/div}]$; $M_U = \text{_____} [\text{V/div}]$; $M_{\Delta U(tv)} = \text{_____} [\text{mV/div}]$

Varjenje MIG

Merilo: $M_t = \underline{\hspace{1cm}}$ [ms/div]; $M_U = \underline{\hspace{1cm}}$ [V/div]; $M_{\Delta U(tv)} = \underline{\hspace{1cm}}$ [mV/div]



Karakteristične vrednosti makroobusa:

	MAG	MIG
Širina temena b (mm)		
Višina temena h_t (mm)		
Višina uvara h_u (mm)		
Ploščina temena S_d (mm ²)		
Ploščina uvara S_o (mm ²)		

5. ZAKLJUČEK

PRILOGA

Laboratorijska vaja 4: Primerjava med varjenjem MAG in TIG

1. NALOGA

Skiciraj principiелni shemi za postopke varjenja MAG in varjenja TIG. Izpostavi vsebinske podobnosti in razlike med tema dvema postopkoma talilnega varjenja. S preizkusnim varjenjem kotnega vara višine $a = 3$ mm na enak varjenec po postopku MAG in TIG izračunaj in primerjaj:

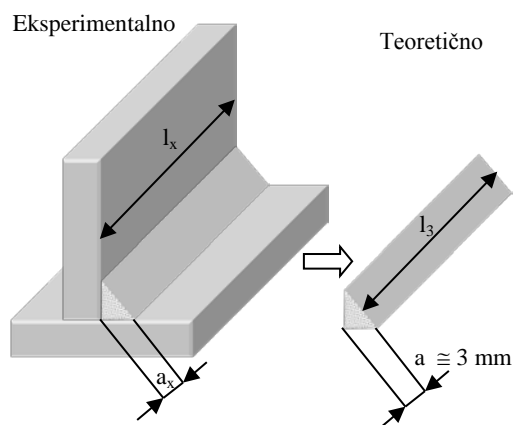
- računsko dolžino za teoretično višino kotnega zvara z izbranimi varilnimi parametri L_3 [mm],
- tehnološke čase varjenja t_t [min/m],
- porabo dodatnega materiala q [g/m],
- porabo zaščitnega plina Q [g/m],
- porabo električne energije [kWh/m] in
- materialne stroške varjenja C_v [EUR/m].

2. OPREMA

2.1. MAG, zaščitni plin: CO ₂	2.2. TIG, zaščitni plin: ARGON
vir varilnega toka: usmernik ISKRA E450/1	vir toka: inverter Fronius Magic Wave 2000
krmilna omarica: ISKRA WF 500/4	dodajni material:
elektroda: VAC 60 ϕ 1.2 mm	tehtnica: Mettler Toledo, štoparica, meter

3. POSTOPEK

3.1. MAG, nastavitve:	3.2. TIG, nastavitve:
varilna napetost $U_v =$ V,	varilna napetost $U_v =$ V,
varilni tok $I_v =$ A	varilni tok $I_v =$ A
čas varjenja $t_v =$ s	čas varjenja $t_v =$ s
masa varjenca pred varjenjem $M_{po} =$ g	masa varjenca pred varjenjem $M_{po} =$ g
masa varjenca po varjenju $M_{pl} =$ g	masa varjenca po varjenju $M_{pl} =$ g
pretok plina $q_p =$ l/min	pretok plina $q_p =$ l/min



4. REZULTATI

C_v ... cena varilne ure varilca = 20 €/h C_E ... cena električne energije = 0,07199 €/kWh * 2 (omrežnina, trošarina, ...) C_{DM} ... dodajnega materiala C_{pp} ... porabljenega plina t_N ... čas navarjanja $\cong 1,3 * t_t$ (MAG); $1,5 * t_t$ (TIG)			
$\rho_{\text{jekla}} = 7,85 \text{ g/cm}^3$ l_3 = teoretična dolžina vara M_{pp} = masa porabljenega plina		MAG	TIG
	$P_{\text{prosti tek}}$	0,2 kW	0,1 kW
	$P_{\text{pogon žice}}$	0,15 kW	0
	C_{DM}	3 €/kg	2,5 €/kg
	C_{pp}	1 €/kg	5 €/kg
	t_N	$1,3 * t_t$	$1,5 * t_t$
	t_z (čas zakasnitve)	2 s	7 s

5. ZAKLJUČEK

Laboratorijska vaja 5: Uporovno točkovno varjenje

1. NALOGA

Za nizkoogljično dekapirano pločevino St 37 debeline 1,25 mm, ki jo variš elektro-uporovno z eno točko v prekrovnem spoju ugotovi:

- Odvisnost porušne sile od jakosti varilnega toka pri konstantnem času varjenja $F_P=f(I_v)$; $t_v=konst.$
- Odvisnost porušne sile od časa varjenja pri konstantni jakosti varilnega toka $F_P=f(t_v)$; $I_v=konst.$
- Minimalno vrednost produkta kvadrata toka in časa pri katerem pride do porušitve zvarjenega spoja v osnovnem materialu $\min\{I_v^2 t, \text{iztrg osnovnega zvara iz osnovnega materiala}\}$.

Preizkuse izvedi s kontinuiranim dovodom električne energije, s konstantno pritisno silo $F_s=3$ kN in premerom konice elektrod $d_e = 7$ mm!

2. OPREMA

- ✗ stroj za elektro uporovno točkovno varjenje: elektroda Zagreb, TA60
- ✗ tuljava Rogowsky 300mV=1A
- ✗ osciloskop Hameg HM 205
- ✗ silomer:
- ✗ trgalni stroj Amsler tip 690 št. 7249; območje je 30kN

3. POSTOPEK

Merilna veriga
Varilni parametri

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

5. ZAKLJUČEK

Laboratorijska vaja 6: KISIK - ACETILENSKI PLAMEN

1. NALOGA

Opiši vlogo in pomen kisik-acetilenskega plamena v varilni tehniki in navedi področja uporabe. Kako razdelimo vrste plamena glede na razmerje med acetilenom in kisikom, ter za varjenje katerih materialov se posamezen plamen uporablja.

Skiciraj porazdelitev temperature in opiši kemične reakcije v nevtralnem kisik-acetilenskem plamenu.

Navedi pogoje za plamensko rezanje in navedi prednosti in slabosti tega postopka varjenja v primerjavi z alternativnimi postopki toplotnega rezanja.

2. OPREMA

- × injektorski gorilnik TELEOPTIK,
- × rezalni gorilnik TELEOPTIK,
- × jeklenki (kisik, acetilen),
- × reducirna ventila,
- × varovalke in
- × cevi za plin

3. POSTOPEK

- × skica plamena za varjenje,
- × skica plamena in gorilnika za rezanje,
- × glavne prednosti in slabosti,
- × področja uporabe,

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

5. ZAKLJUČEK