



ICES
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija
Program: Strojništvo
Modul: Orodjarstvo

ELEKTROUPOROVNO VARJENJE ŽIC RAZLIČNIH DEBELIN

Mentor: mag. Slavko Božič, univ. dipl. inž. stroj.
Lektorica: Metka Bartol, prof. slov.

Kandidat: Tine Kvas

Vodice nad Kamnikom, junij 2021

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju mag. Slavku Božiču, univ. dipl. inž. stroj., ki mi je pomagal pri izdelavi diplomskega dela.

Posebna zahvala gre moji družini, ki mi je v času celotnega študija stali ob strani in me spodbujala.

Zahvaljujem se tudi lektorici Metki Bartol, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

IZJAVA

Študent Tine Kvas izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Slavka Božiča, univ. dipl. inž. stroj.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne _____

Podpis: _____

POVZETEK

Elektrouporovno varjenje se uporablja v različnih panogah. Poleg avtomobilske industrije, kjer je uporovno varjenje najbolj razširjeno, se uporablja tudi pri varjenju različnih mrež, košar in okvirjev ter pri izdelavi betonske armature. V diplomski nalogi so predstavljeni elektrouporovno varjenje in elektrode za točkovno uporovno varjenje, opisani so naprava, parametri ter napake, ki se pojavljajo pri tej vrsti varjenja. Pri eksperimentalnem delu smo prekrovno varili žice različnih debelin med seboj, in sicer od debeline 2 mm do debeline 10 mm. Z grafi smo predstavili dobljene parametre, ki zagotavljajo ustrezen in dober zvarni spoj. Pri varjenju žice sta videz ter vizualni nadzor zvara zelo pomembna. Zvari morajo biti ne samo trdni, pač pa tudi kar se da gladki ter lepi na pogled.

KLJUČNE BESEDE

- žica
- zvar
- uporovno točkovno varjenje
- elektroda
- varilni parametri

ABSTRACT

Electric resistance welding is used in various industries. In addition to the automotive industry, where resistance welding is most prevalent, it is also used in the welding of various nets, baskets, frames and concrete reinforcement. This diploma thesis discusses electric resistance welding and electrodes for spot resistance welding. It additionally examines and describes the device, parameters and errors that occur in this type of welding. In our experiment, we welded wires which were different thickness- from 2mm to 10mm thick. We presented the obtained parameters using graphs, as they turned out to provide a suitable good welded joint. The visual appearance and the inspection of the weld play major role in welding wire. Welds must not only be solid and firm but also as smooth and visually beautiful as possible.

KEYWORDS

- wire
- weld
- resistance spot welding
- electrode
- welding parameters

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Cilji naloge	1
1.3	Predpostavke in omejitve	1
1.4	Metode dela	2
2	OSNOVE ELEKTROUPOROVNEGA VARJENJA.....	2
3	TOČKOVNO UPOROVNO VARJENE.....	3
3.1	Naprave za točkovno uporovno varjenje	6
3.2	Elektrode za točkovno uporovno varjenje.....	8
3.3	Parametri točkovnega uporovnega varjenja	12
3.4	Tehnologija varjenja	14
3.5	Napake pri elektrouporovnem točkovnem varjenju	16
3.6	Preizkušanje točkovnih zvarov	18
4	EKSPERIMENTALNI DEL.....	21
5	ZAKLJUČEK	33
6	LITRATURA IN VIRI.....	34

KAZALO SLIK

Slika 1: Različni načini elektrouporovnega varjenja	3
Slika 2: Točkovno uporovno varjenje	4
Slika 3: Shematski prikaz točkovnega elektrouporovnega varjenja z vnosom in odvodom toplotne energije	5
Slika 4: Shematski prikaz naprave za točkovno uporovno varjenje z najpomembnejšimi sestavnimi deli ter s sistemom za merjenje varilnega toka in napetosti	7
Slika 5: Hlajenje konice za točkovno uporovno varjenje	8
Slika 6: Standardizirane elektrodne kape za točkovno uporovno varjenje.....	9
Slika 7: Standardizirane palične elektrode za točkovno uporovno varjenje	9
Slika 8: Različne nestandarizirane oblike elektrod za točkovno uporovno varjenje ..	10
Slika 9: Poškodovana elektroda, na kateri je viden odtis žice	11
Slika 10: Nekaj primerov elektrodnih držal pri točkovnem uporovnem varjenju z dimenzijami v mm.....	11
Slika 11: Varilne klešče slovenskega proizvajalca Kočever in sinovi	12
Slika 12: Prikaz varilnih ciklusov za točkovno uporovno varjenje	13
Slika 13: Potek točkovnega uporovnega varjenja	15
Slika 14: Različne lege varjencev med točkovnim uporovnim varjenjem in različna velikost varjenca v oknu med držaloma elektrod, ki vpliva na varilne parametre, predvsem na jakost varilnega toka	15

Slika 15: Prikaz primernih in neprimernih izvedb točkovnega uporovnega varjenja v industriji.....	18
Slika 16: Tehnološki preizkus kakovosti točkovno zavarjenega zvara	19
Slika 17: Dve preprosti napravi za torzijsko preizkušanje enotočkovno zavarjenih prekrovnih zvarnih spojev.....	20
Slika 18: Shematski prikaz ročnega preizkušanja trdnosti zvarne točke z luščenjem na prekrovnem zvarnem spoju z eno zvarno točko.....	20
Slika 19: Nadzorna plošča varilnega aparata, s katerim smo varili	22
Slika 20: Prikazovalnik tlaka varilnega aparata, ki ga poljubno uravnavamo.....	22
Slika 21: Vpetje pri varjenju	23
Slika 22: Varjenje žic različnih debelin.....	23
Slika 23: Nepravilna izbira parametrov za žice dane debeline	24
Slika 24: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 2 mm...	26
Slika 25: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 4 mm...	27
Slika 26: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 6 mm...	28
Slika 27: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 10 mm.	29
Slika 28: Primer dobrega zvarnega spoja žic debeline 6 mm ter 8 mm.....	30
Slika 29: Primer dobrega zvarnega spoja na levi ter slabega na desni strani, žice .	30
Slika 30: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 2 mm in 4 mm.....	31
Slika 31: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 10 mm	31
Slika 32: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 2 mm in 6 mm.....	32
Slika 33: Primer dobrega zvarnega spoja žic debeline 6 mm.....	32

KAZALO TABEL

Tabela 1: Prednosti in slabosti točkovnega uporovnega varjenja.....	6
Tabela 2: Možne napake v uporovno točkovno zavarjenih spojih	17
Tabela 3: Parametri eksperimentalnih varjencev	25
Tabela 4: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 2 mm .	26
Tabela 5: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 4 mm .	27
Tabela 6: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 6 mm .	28
Tabela 7: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 10 mm	29

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

Oznaka	Enota	Pomen
t	[s]	čas
p	[bar]	tlak
S	[mm ²]	površina
π	3,14159...	Arhimedova konstanta
r	[mm]	polmer
Q	[J]	toplota
I	[A]	električni tok
R	[Ω]	upor
U	[V]	napetost

1 UVOD

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

Pri uporovnem varjenju gre za spajanje materialov brez dodatnega materiala, pri katerem izkoriščamo električni tok ter mehansko silo za spajanje materiala. Čas varjenja je relativno kratek. Zaradi upornosti med elektrodo in varjencem spreminjamo električno energijo v toploto. Električni tok potuje od mesta prve elektrode na prvi varjenec, potem na drugega in nato na drugo elektrodo. Upornost in posledično toplota sta na stiku varjencev največji, zato z aplicirano silo skozi elektrodi pride do zavaritve. Za dobro varjenje so potrebni pravilno nastavljeni parametri, kot so: jakost toka, čas varjenja ter sila. V splošnem velja, da je najboljše varjenje ob velikem električnem toku in čim krajšem času varjenja. Glede na druge oblike varjenja gre pri elektroporovnem varjenju za dokaj čisto obliko varjenja. Elektrode so po navadi iz bakra, to pa zaradi zelo dobre prevodnosti.

1.2 CILJI NALOGE

Elektroporovno varjenje se uporablja v različnih panogah, kot so: avtomobilska industrija, izdelava gradbenih elementov ter izdelava bele tehnike. Po številu zvarnih spojev je uporovno varjenje prvo na svetu. Elektroporovno varjenje žice je ena od osnovnih tehnik. Cilj naloge je prikazati točkovno uporovno varjenje na primeru svetlo vlečenih žic različnih debelin, od 2 mm do 10 mm premera. Bralec se bo seznanil z osnovami uporovnega točkovnega varjenja, nastavitvami parametrov ter napakami, ki se pojavljajo v praksi ob nepravilni nastavitvi parametrov.

V diplomski nalogi se bomo osredotočili na točkovno uporovno varjenje žic različnih debelin in poskušali določiti parametre, ki zagotavljajo zvarni spoj ustrezne kakovosti, kot jo zahteva kupec. Spoznali bomo opremo za točkovno uporovno varjenje, tehnologijo varjenja, vpliv parametrov ter napake, ki se dogajajo.

1.3 PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE

Predpostavljamo, da bo pri praktičnem delu prišlo do težav predvsem pri nastavljanju parametrov pri žicah različnih debelin. Verjetno bomo porabili kar nekaj časa, da bomo nastavili optimalne parametre, to predvsem velja pri varjenih žicah z največjo razliko v debelini. Ker je aparat PECO FPA2 starejše izdelave, bomo omejeni z nastavljanjem in odčitavanjem določenih parametrov. Elektroporovno točkovno varjenje žic različnih debelin je specifično področje, zato bomo tudi z literaturo precej omejeni.

1.4 METODE DELA

V diplomskem delu bomo pri raziskovalnem delu uporabili primerjalno metodo, kjer bomo primerjali vpliv parametrov na različno debelino žic pri točkovnem uporovnem varjenju.

Pri teoretičnem delu bo uporabljena opisna metoda; opisani bodo naprava za uporovno varjenje, elektrode, parametri ter tehnologija varjenja. Raziskovali bomo tudi s pomočjo literature iz različnih virov.

2 OSNOVE ELEKTROUPOROVNEGA VARJENJA

Definicija varjenja je: spajanje materialov v trajno neločljivo zvezo.

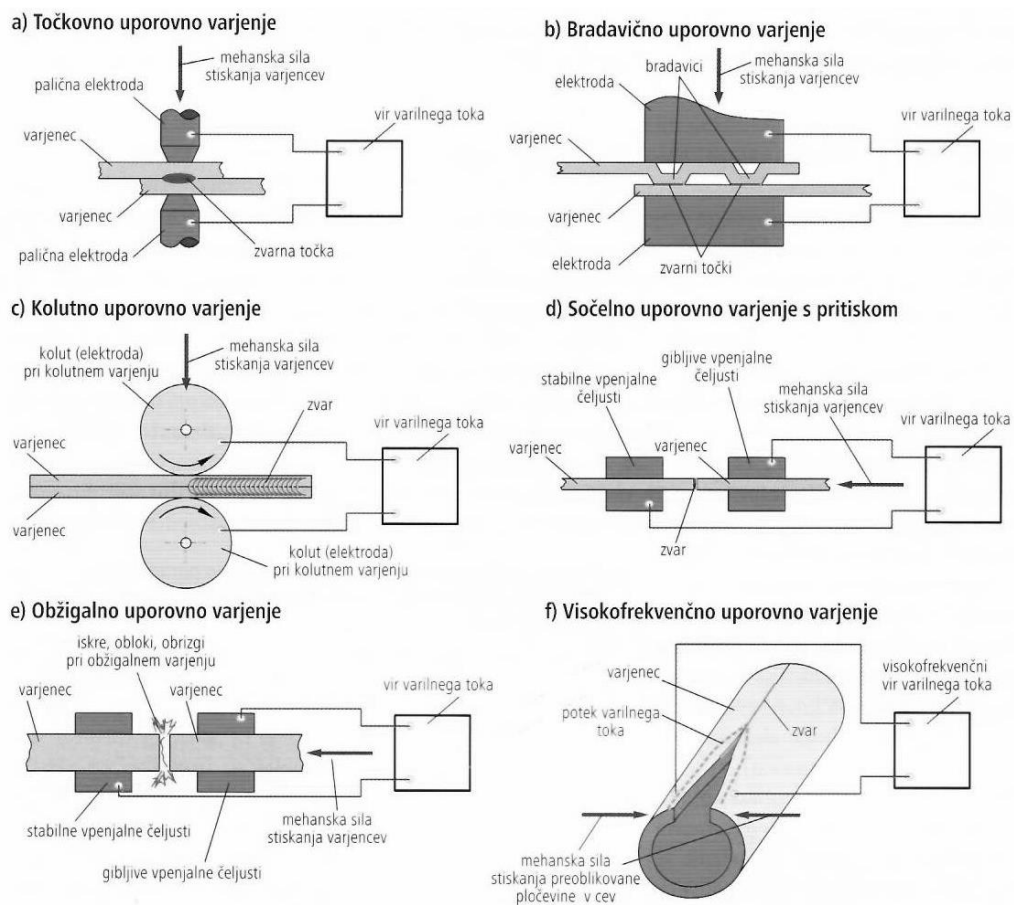
Elektrouporovno varjenje zajema več varilnih postopkov. Združuje jih značilnost, da se ob prisotnosti pritiskne sile skozi varjence prevaja električni tok velike jakosti ($I_v = 10^2 - 10^5$ A) in razmeroma nizke napetosti ($U_v = 1 - 10$ V). Zaradi ohmske upornosti, ki je praviloma največja na stiku varjencev, pride do hitrega segrevanja predvsem na mestu stika. Ko se doseže temperatura, ki je v mejah med trdno in tekočo linijo varjenih materialov, se ob delovanju pritiskne sile tako pregreta stična mesta tudi uspešno zavarijo. Pri elektrouporovnem varjenju je hitrost vnosa energije izredno velika (večja je le pri laserskem varjenju in pri varjenju z elektronskim snopom).

Elektrouporovno varjenje, po podatkih iz gospodarstva, zavzema do 30 % vseh varilskih del. Po številu zvarjenih spojev pa uporovno varjenje znatno presega postopke talilnega varjenja. Slika 1 prikazuje različne postopke uporovnega varjenja, vse prikazane tehnologije pa imajo osnovo v elektrouporovnem varjenju, razen tehnologija pod točko f (visokofrekvenčno uporovno varjenje). Ta, kot pove že ime, temelji na visoki frekvenci, ki namesto električne energije zagotavlja ustrezno temperaturo na mestu zvara.

Znano je, da se pri izbiri načina varjenja največkrat upoštevajo naslednji kriteriji:

- varivost materiala in zahtevane lastnosti spoja,
- ekonomičnost postopka,
- možnost avtomatizacije,
- vpliv na ekologijo.

Kot je navedeno v IWE/IWT specializacija, so prav po vseh navedenih kriterijih postopki uporovnega varjenja praviloma v prednosti pred postopki talilnega varjenja, kar še zlasti velja za primere množične proizvodnje.



Slika 1: Različni načini elektroporovnega varjenja
(Vir: Tušek, 2014)

3 TOČKOVNO UPOROVNO VARJENE

V praksi najpogosteje uporabljamo dvostransko točkovno uporovno varjenje, čeprav je možno na ta način variti tudi enostransko. Pri klasičnem točkovnem varjenju najpogosteje uporabljamo dve okrogli palični elektrodi, od katerih je po navadi spodnja nepremična, zgornja pa gibljiva. Na začetku varjenja se ena ali obe elektrodi premakneta in tako stisneta oba varjenca oziroma varjenice. Ko je pritisk prek elektrod na varjenice dovolj visok, steče skozi njiju varilni tok. Energija varilnega toka zaradi upornosti ogreje oba varjenca. Največja električna upornost je na stični površini obeh varjenic. Na tej točki se temperatura dvigne najvišje, celo do tališča vsaj enega varjenca. Vedno ko sta varjenca iz enakih materialov, se temperatura dvigne do tališča obeh varjenic in tako se med varjenci ustvari točkovni zvar. Kot navaja Tušek (2014), se nato varilni tok izključi, zvarno točko elektrodi še za trenutek stiskata, da se zvar strdi in nekoliko ohladi. Nato zgornjo elektrodo dvignemo ali odmaknemo obe,

in varjenje je končano. Na splošno je zaželeno, da je stična upornost med elektrodo in varjencem čim manjša, med varjencema pa čim večja.

Slika 2 prikazuje najbolj tipičen primer uporovnega varjenja dveh pločevin.

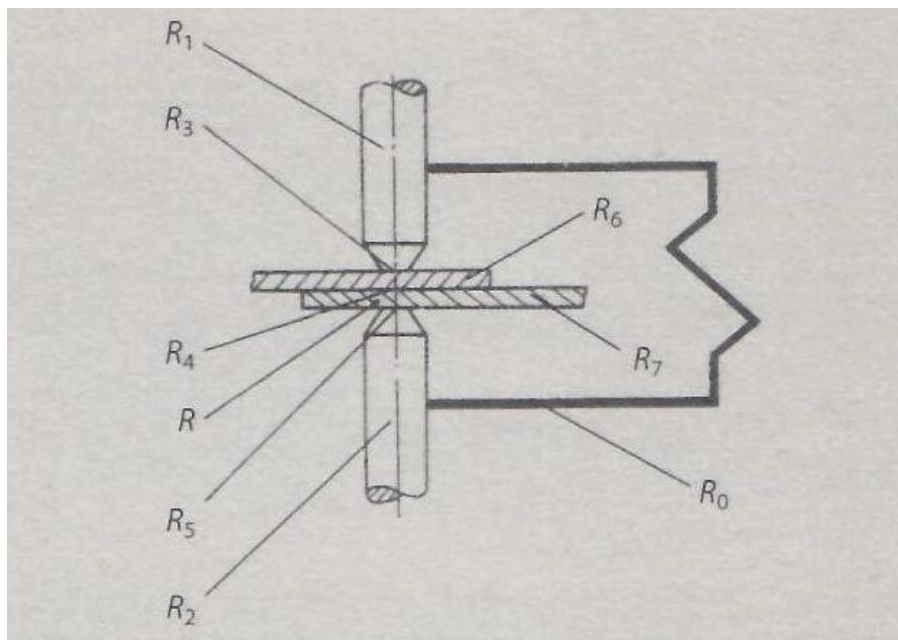
Za kakovosten točkovno zvarni spoj je potrebno vzpostaviti optimalen odnos med:

- jakostjo varilnega toka in časom njegovega prehoda skozi varjenec,
- velikostjo sile elektrode in njeno časovno spremenljivostjo,
- geometrijo elektrodnih konic.

Poleg teh obstaja še niz drugih vplivnih veličin, kot so:

- debelina varjencev in njihova oblika,
- električna upornost materiala,
- toplotna prevodnost materiala,
- stanje stične površine (nečistoče, oksidi),
- mehanske lastnosti varjencev,
- kemična sestava varjencev,
- fizikalne lastnosti materiala varjencev,
- metalurške lastnosti materiala varjencev in
- material elektrode.

Kot je navedeno v IWE/IWT specializacija, lahko sprememba enega od parametrov povzroči spremembo na drugih, saj so parametri medsebojno odvisni.



Slika 2: Točkovno uporovno varjenje
(Vir: Rak, 2008)

$R_1, R_2 = R_E$ – upornost elektrod

$R_3, R_4, R_5 = R_S$ – upornost stikov

$R_7, R_8 = R_m$ – upornost varjencev

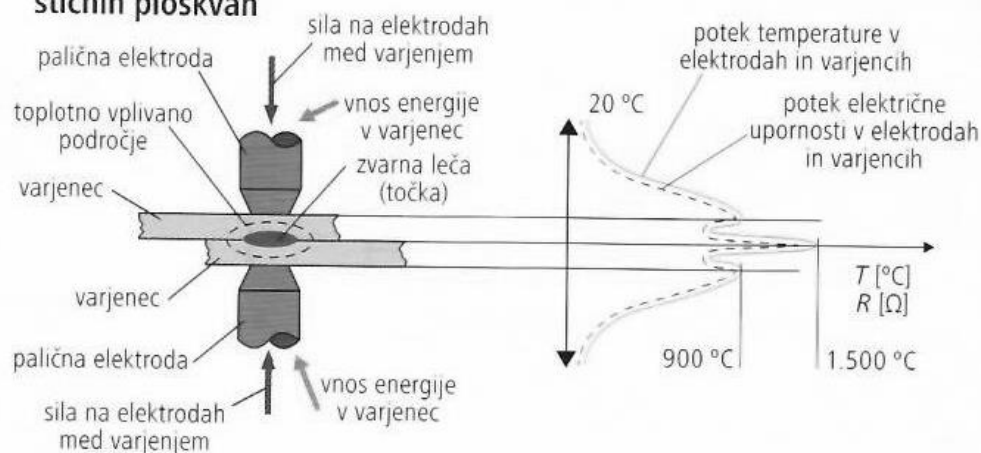
$R_0 = R_0$ – upornost tokovodnikov

Skupna upornost: $R = R_E + R_S + R_m + R_0$

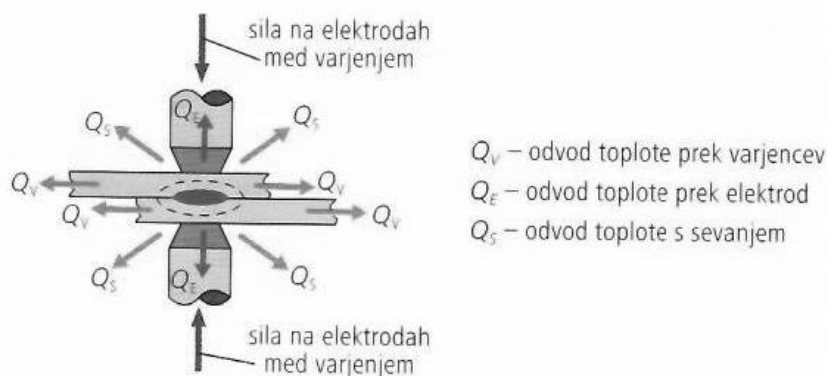
Na sliki 3 je prikazan shematski prikaz točkovnega elektrouporovnega varjenja z vnosom in odvodom toplotne energije. Na sliki a vidimo potek temperature v elektrodah in varjencih ter potek električne upornosti v elektrodah in varjencih.

Na sliki b pa je prikazan odvod toplote iz zvarne točke. V tabeli 1 so na kratko predstavljene prednosti in slabosti te tehnologije t.

a) Točkovno elektrouporovno varjenje s približno porazdelitvijo temperature in upornosti v elektrodah in obeh varjencih ter na vseh stičnih ploskvah



b) Odvod toplote iz zvarne točke med varjenjem in po njem



Slika 3: Shematski prikaz točkovnega elektrouporovnega varjenja z vnosom in odvodom toplotne energije
(Vir: Tušek, 2014)

Prednosti točkovnega uporovnega varjenja	Slabosti točkovnega uporovnega varjenja
Kratki varilni časi	Obraba elektrod
Idealen za varjenje pločevine (predvsem avtomobilska industrija)	Zareza okoli zvara med varjenima pločevinama vpliva na mehanske lastnosti
Spoji so zanesljivi	Majhna natezna trdnost
Varen postopek varjenja	Slaba odpornost na utrujanje
Dodajni materiali niso potrebni	Draga oprema
Okolju prijazen postopek	Visoka poraba električne energije

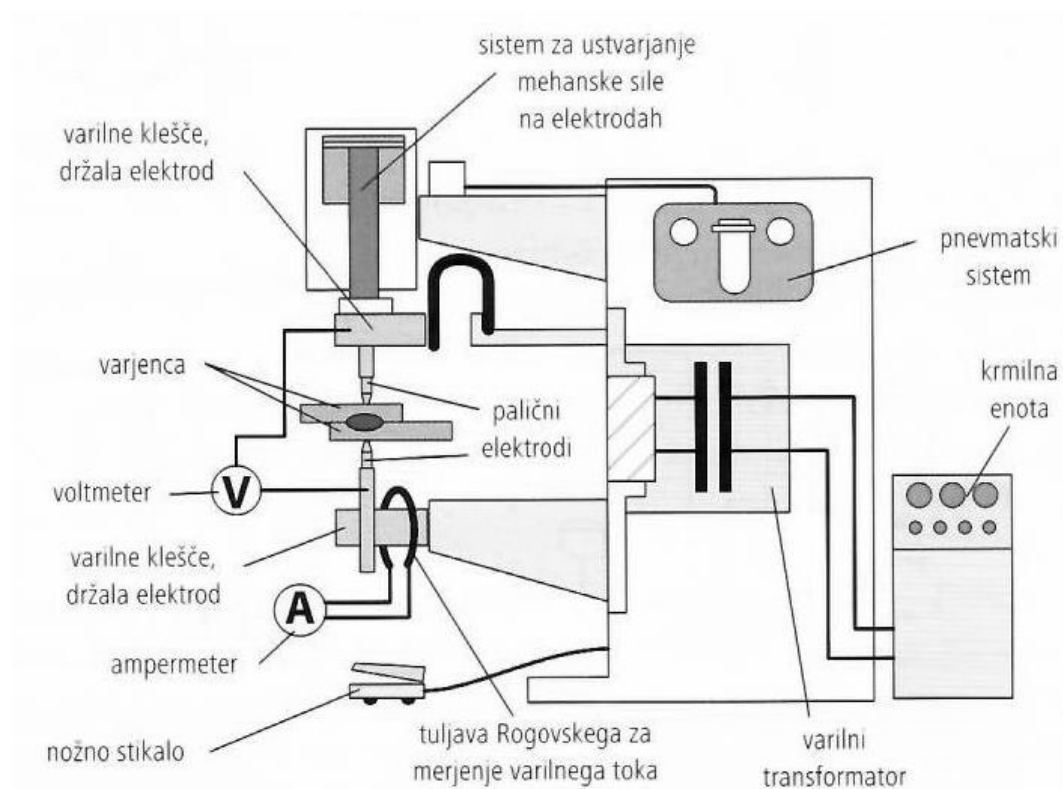
Tabela 1: Prednosti in slabosti točkovnega uporovnega varjenja
(Vir: Dolinar, 2020)

3.1 NAPRAVE ZA TOČKOVNO UPOROVNO VARJENJE

Naprave za točkovno varjenje so sestavljene iz številnih električnih, mehanskih in drugih komponent. Osnovno izvedbo s sestavnimi deli si lahko ogledamo na sliki 4.

Stroje za uporovno varjenje delimo glede na:

- vrsto vira toka,
- vrsto električnega toka,
- način krmiljenja parametrov varjenja,
- način ustvarjanja mehanske sile,
- vrsto in lego elektrod,
- smer gibanja elektrod,
- mobilnost stroja,
- ravnanje z njimi,
- stopnjo avtomatizacije in
- način varjenja (enostransko, dvostransko).



Slika 4: Shematski prikaz naprave za točkovno uporovno varjenje z najpomembnejšimi sestavnimi deli ter s sistemom za merjenje varilnega toka in napetosti

(Vir: Tušek, 2014)

Kot navaja Tušek (2014), viri toka zagotavljajo klasičen izmenični varilni tok, zato jih v praksi tudi najpogosteje uporabljamo. To so varilni transformatorji, ki omrežnemu toku znižajo napetost in zvišajo jakost, frekvenca varilnega toka pa ostane nespremenjena. Viri toka na enosmerni tok in viri roka z nakopičeno energijo omogočajo varjenje s pulznim tokom, zato se jih tudi vedno pogosteje uporablja. Na zvarnem mestu je učinek enosmernega toka večji od učinka izmeničnega toka, prav tako enosmerni tok ni občutljiv za fazne zamike med tokom in napetostjo. Manjša obraba elektrod, manj brizganja in na splošno boljši vari so prednosti pri varjenju z enosmernim tokom.

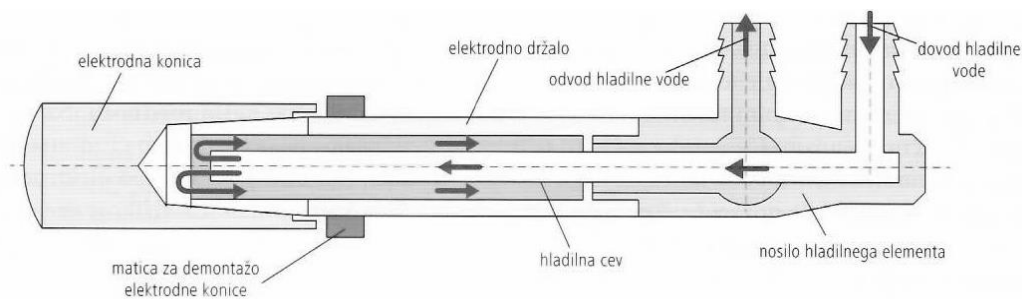
Pri najstarejših in zelo preprostih napravah ustvarimo mehansko silo s preprostim mehanizmom in človeško silo. Na takih napravah sila stiskanja večinoma ni krmiljena, ampak je določena s posebno vzmetjo, s katero nastavljamo velikost sile na elektrodah. Danes je večina naprav opremljenih s pnevmatskimi sistemi za uravnavanje sile na elektrodah in premik elektrod. Zelo redke so naprave, ki so za premik elektrod in uravnavanje sile na elektrodah opremljene s hidravličnimi sistemi.

Vedno več pa je naprav, ki so opremljene z električnim servomotorjem za premik elektrod, da jih lahko preprosto krmilimo.

Kot navaja Javornik (2018), je pri uporovnem varjenju merjenje varilnih parametrov izjemno pomembno. Jakost toka merimo na različne načine; jakost izmeničnega toka najpreprosteje merimo z merilno tuljavo. Nekatere sodobne naprave so sposobne prikazovati, beležiti in shranjevati vse pomembne parametre. Po navadi nas zanimajo varilni parametri varilnega ciklusa in vrsta materiala, ki ga varimo, debelina materiala ter osnovni podatki o vrsti in obliki elektrode.

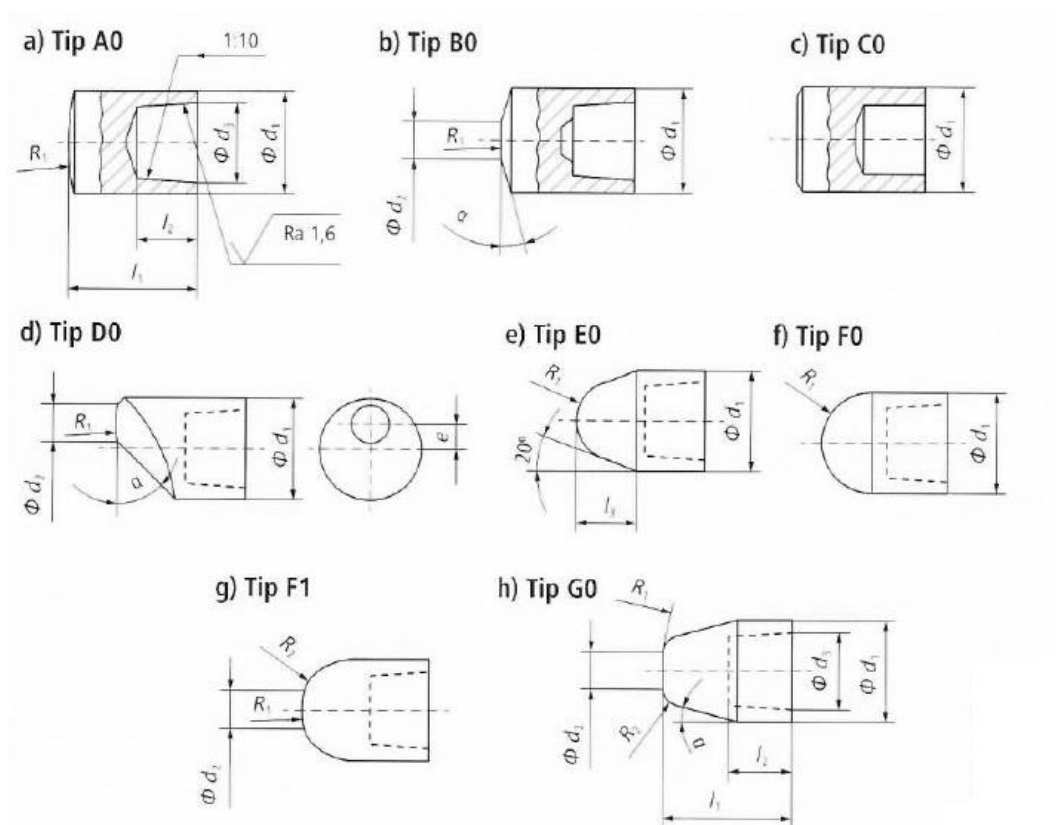
3.2 ELEKTRODE ZA TOČKOVNO UPOROVNO VARJENJE

Elektrode za točkovno uporovno varjenje so izdelane iz različnih materialov in so zaradi različnih namenov uporabe tudi različnih oblik. Med varjenjem so zelo obremenjene zaradi visoke jakosti toka in zaradi mehanske sile. Elektrode pri točkovnem uporovnem varjenju so še posebno obremenjene zaradi visoke gostote toka na stiku elektrode z varjencem, kar povzroči segretje konic elektrode. Visoka obremenitev elektrod je tudi pri serijski proizvodnji, kjer je narejenih do 30 zvarnih točk v minuti. Vse nekoliko močnejše naprave za uporovna varjenja morajo imeti hladilni sistem za hlajenje elektrod. Da se ne troši omrežna voda, se priporoča uporaba zaprtega sistema s hladilnikom. Raziskave so pokazale, da je zelo pomembno, da je temperatura vode, ki vstopa v hladilni sistem, čim nižja. Shematski prikaz hlajenja elektrod je prikazan na sliki 5.

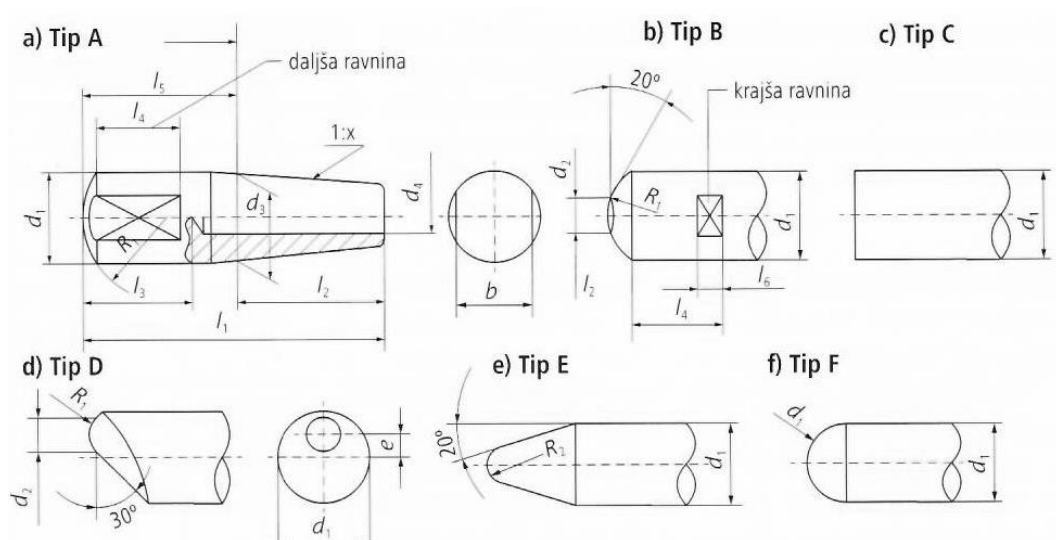


Slika 5: Hlajenje konice za točkovno uporovno varjenje
(Vir: Tušek, 2014)

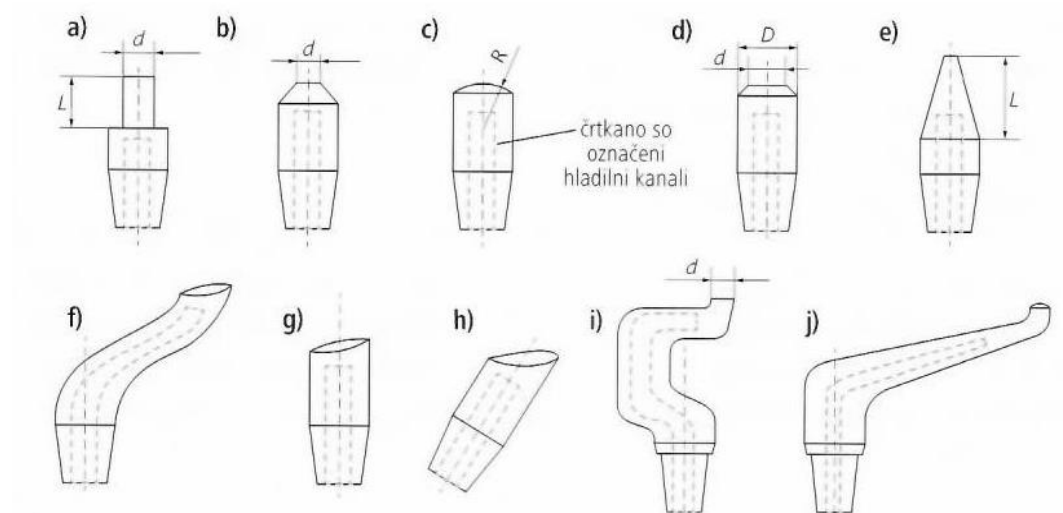
Kot prikazuje Tušek (2014), elektrode delimo v tri večje skupine, kar prikazujejo slike 6–8. Prva skupina predstavlja standardizirane elektrodne konice oziroma kape, druga skupina so ravne palične elektrode, tretja skupina pa so vse druge elektrode, ki jih standardi ne obravnavajo.



Slika 6: Standardizirane elektrodne kape za točkovno uporovno varjenje
(Vir: Tušek, 2014)



Slika 7: Standardizirane palične elektrode za točkovno uporovno varjenje
(Vir: Tušek, 2014)

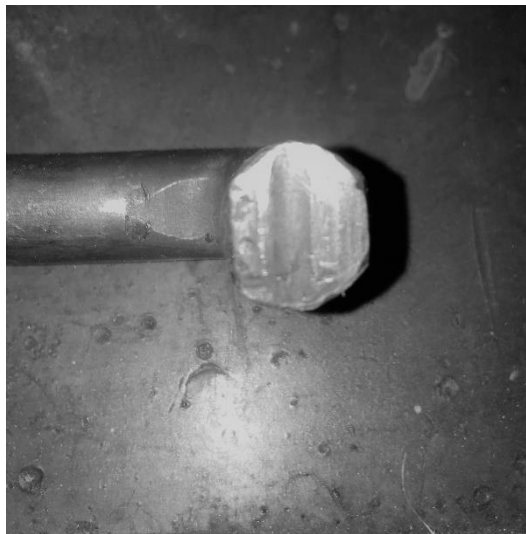


Slika 8: Različne nestandarizirane oblike elektrod za točkovno uporovno varjenje
(Vir: Tušek, 2014)

Kot je navedeno v Tušek (2014), je življenjska doba elektrod za točkovno varjenje odvisna predvsem od varilnih parametrov in števila točk, ki jih je potrebno zavariti v časovni enoti. Če se elektrode primerno hladi, se jim s tem podaljša uporabno dobo. Elektrodam za točkovno varjenje se uporabno dobo določi na podlagi njihove obrabe. Glavno merilo je premer konice elektrode, ki se z obrabo poveča. Zaradi tega se zniža gostota toka in zato je manjši tudi volumen zvarne točke, ki poslabša nosilnost zvara. Eden izmed načinov merjenja obrabe paličnih elektrod med uporovnim varjenjem je standardiziran. Če je premer zvarne točke enak ali manjši od vrednosti $3,5\sqrt{t}$, pri čemer je t debelina varjenca v mm, potem je elektroda še primerna za varjenje, če pa je večji, je elektroda iztrošena. Primer iztrošene elektrode je prikazan na sliki 9.

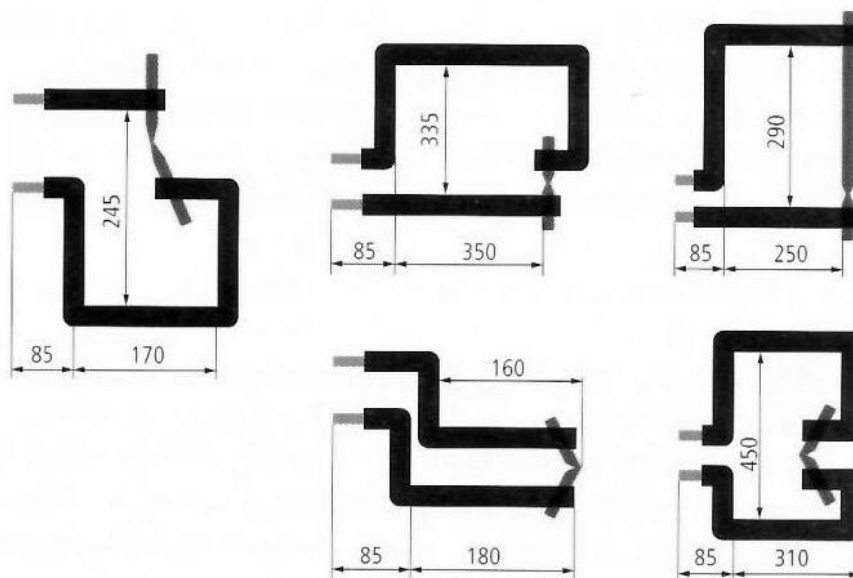
Kot navaja Inštitut za varilstvo (2015), za elektrodne materiale in elektrode same velja, da morajo zadostiti večjemu številu zahtev:

- Zaradi izpostavljenosti velikim tokovnim in mehanskim obremenitvam so elektrode najpogosteje narejene iz bakrovih zlitin, ki ohranjajo visoke mehanske lastnosti tudi pri povišanih temperaturah.
- Materiali elektrode morajo imeti visok koeficient toplotne in električne prevodnosti, in sicer bistveno višjega kot kovine, ki se jih vari.
- Elektrode morajo imeti dovolj visoko trdnost in trdoto, da se zaradi pritiskne sile ali obrabe ob stiku z varjenci ne bi deformirale.
- Oblika elektrodne konice bistveno vpliva na oblikovanje in videz zvarne točke.
- Pri ravnih elektrodnih konicah mora biti varjenec vzporeden s površino elektrodne konice, premer zvarne točke lahko doseže velikost odtisa konice.
- Pri elektrodah z zaobljeno konico je premer zvarne točke vedno manjši od površine odtisa elektrode.



Slika 9: Poškodovana elektroda, na kateri je viden odtis žice
(Lastni vir)

Elektrode so z virom toka povezane prek elektrodnih držal in nosilcev elektrodnih držal. Zaradi stabilnosti stika ter čim manjše ohmske in induktivne upornosti morajo biti držala čim krajša, vendar so v praksi prilagojena obliki zvarjencev. Tudi ti parametri vplivajo na življenjsko dobo elektrod. Slika 10 prikazuje različne tipske oblike držal. Kot zanimivost si na sliki 11 lahko ogledate varilne klešče slovenskega proizvajalca Kočever in sinovi, ki izvažajo opremo za uporovno varjenje po vsem svetu.



Slika 10: Nekaj primerov elektrodnih držal pri točkovnem uporovnem varjenju z dimenzijami v mm
(Vir: Tušek, 2014)



*Slika 11: Varilne klešče slovenskega proizvajalca Kočever in sinovi
(Vir: kocevar.eu/sl/robotske-klesce-za-uporovno-varjenje)*

3.3 PARAMETRI TOČKOVNEGA UPOROVNEGA VARJENJA

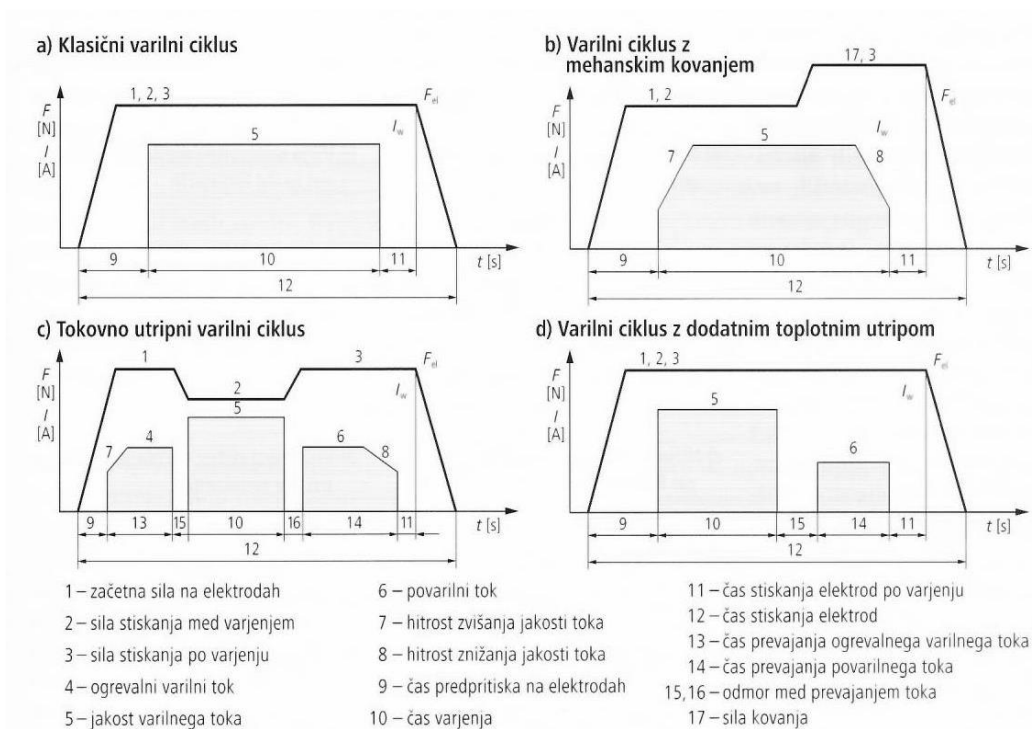
Glavni parametri pri točkovnem uporovnem varjenju so jakost toka I , upornost R ter čas varjenja t , ki so razvidni iz enačbe Joulovega zakona: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ [J]

Jakost varilnega toka [A] vpliva na količino sproščene toplote s kvadratom efektivne vrednosti. Učinek efektivne vrednosti pa je odvisen od vrste varilnega toka (izmenični, enosmerni), oblike ovojnice (sinusen, s prerezom), načina dovoda (kontinuirano, impulzno).

Ohmska upornost [Ω] nastane med obema elektrodama in odločilno vpliva na potek varjenja. Ni pa za zanemariti tudi upornosti preostalega tokokroga. Ob vrsti in debelini varjencev na upornost močno vplivajo še: stanje površine varjencev, vrsta in oblika elektrodnih konic ter pritisna sila.

Kot navaja Inštitut za varjenje (2015), čas varjenja [s] vpliva linearno na količino sproščene toplote. Pri varjenju z izmeničnim tokom se ta čas pogosto označuje s številom period (pri toku $v = 50 \text{ s}^{-1}$ je čas ene periode $t_0 = 1/v = 0,02 \text{ s}$).

Parametre lahko prikažemo z varilnim ciklusom. Na spodnji sliki so prikazani štiri različni varilni ciklusi za točkovno uporovno varjenje. Pri novejših napravah lahko nastavljamo parametre zelo poljubno glede na potrebe in zahteve. Parametrov, ki jih lahko nastavljamo na novejših napravah, je zelo veliko, na sliki 12 jih je prikazanih sedemnajst.



Slika 12: Prikaz varilnih ciklusov za točkovno uporovno varjenje
(Vir: Tušek, 2014)

Z različnimi varilnimi ciklusi vplivamo na režim varjenja in posledično na količino ter potek energije in temperature v sami zvarni točki ter v toplotno vplivnem področju. To pomeni, da so različni ciklusi namenjeni za varjenje različnih materialov. Najbolj splošen in tudi najpogostejše uporabljen varilni ciklus je prikazan na sliki 12 a. Z njim zelo dobro varimo varilne materiale. Poseben varilni ciklus uporabljamo za uporovno varjenje električnih žičk, ki so prevlečene s slabo prevodno ali celo neprevodno snovjo. S tokovnim utripom, ki ima zvišano napetost, moramo »prebiti« prevleko na žički, da prek nje in naprej po žici steče varilni tok, da se lahko zavari. Tudi za varjenje jeklenih pločevin, ki so prevlečene s kovinami, ter pri varjenju neželeznih kovin, nerjavnih avstenitnih jekel, uporabljamo posebne varilne cikle.

Kot je navedeno v Tušek (2014), poznamo različne raziskave merjenj še drugih parametrov za spremljanje procesa med točkovnim uporovnim varjenjem. Večno vprašanje je, kako na podlagi sprotnega spremljanja in merjenja parametrov takoj po zavaritvi točke vedeti, ali je zvarna točka dovolj kakovostna. To za zdaj še ni možno,

kljub temu da lahko zanesljivo merimo jakosti varilnega toka, padec napetosti med elektrodama, silo stiskanja varjencev, premik elektrode med nastajanjem vara, električno upornost med nastajanjem zvarne točke in med ohlajevanjem ter še nekatere druge veličine. Prav tako danes še ne moremo zanesljivo ugotoviti kakovosti zvarne točke, če vse navedene parametre izmerimo in statistično obdelamo. Z metodami pregleda zvarne točke brez porušitve je sicer možno ugotoviti kakovost zvara, a so te z ekonomskega vidika za meritve v serijski proizvodnji z velikim številom zvarnih točk veliko predrage.

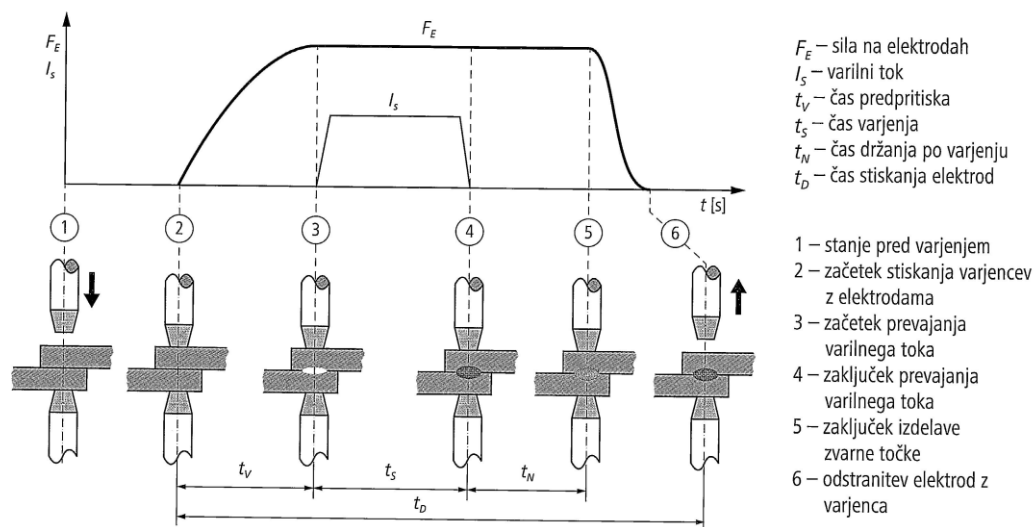
3.4 TEHNOLOGIJA VARJENJA

Površine materiala, ki se bodo varile, morajo biti popolnoma čiste, suhe in brez oksidov, maščob ali drugih nečistoč. Priporočeno je, da so varjenci že pri vložitvi med varilni elektrodi v dobrem stiku. Za izbrani material in dimenzije varjencev moramo izbrati optimalne varilne parametre. Pred vsakim novim postopkom varjenja moramo narediti atest (preizkus), delovni preizkus ali vsaj nekaj primernih praktičnih preizkusov. Atest varilnega postopka je standardiziran način preizkusa postopka varjenja, ki ga praviloma opravi tretja oseba, torej ne naročnik oziroma izvajalec. Prav tako je standardiziran delovni preizkus. V primerjavi z atestom je manj obsežen in ga lahko opravi tudi organizacija, ki izvaja varilska dela. Praktični preizkusi večinoma niso standardizirani in jih izvajajo izvajalci varilskih del za sproten preizkus varilnega postopka.

Silo stiskanja na elektrodah najpogosteje ustvarimo s pnevmatskim sistemom, pri katerem silo na elektrodah uravnavamo s tlakom stisnjenega zraka, ki ga dobimo iz kompresorja ali črpalke. Sila stiskanja je odvisna predvsem od oblike in vrste elektrod ter vrste in oblike materiala, ki ga varimo.

Čas varjenja pri varjenju z izmeničnim tokom merimo v periodah (1 perioda = 0,02 s), pri varjenju z enosmernim ali utripnim tokom pa v mili- ali celo mikrosekundah. Jakost varilnega toka pri točkovnem varjenju pločevine je od nekaj tisoč amperov do 60 kA, pri varjenju neželeznih kovin pa tudi do 80 kA.

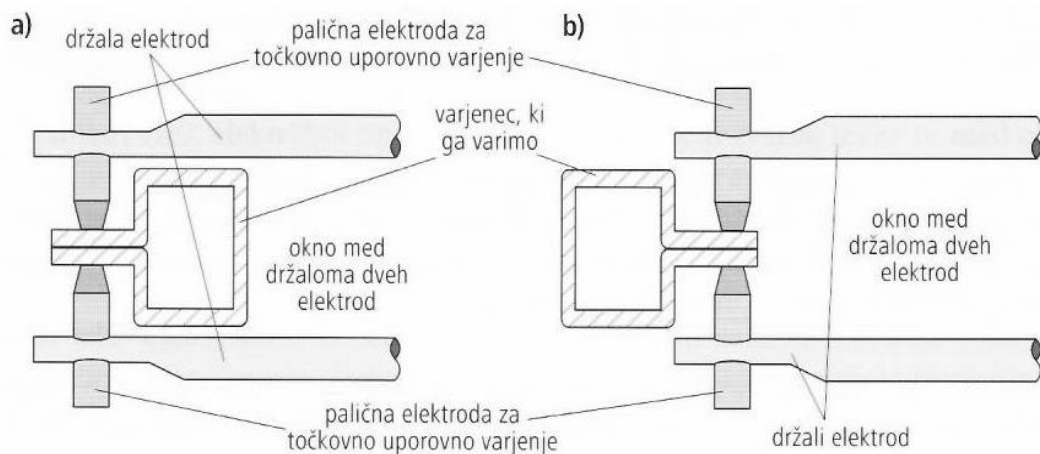
Postopek celotnega točkovnega varjenja je prikazan na sliki 13. V diagramu je prikazan klasični varilni cikel s potekom parametrov, pod njim pa lega elektrod med varjenjem v posameznih fazah ter način nastajanja zvarne točke.



Slika 13: Potek točkovnega uporovnega varjenja

(Vir: Tušek, 2014)

Na tehnologijo varjenja ter parametre močno vplivajo tudi dimenzije varjencev, njihova lega med varjenjem in velikost (volumen) varjencev med elektrodama v tako imenovanem oknu, ki je prikazano na sliki 14.



Slika 14: Različne lege varjencev med točkovnim uporovnim varjenjem in različna velikost varjenca v oknu med držaloma elektrod, ki vpliva na varilne parametre, predvsem na jakost varilnega toka

(Vir: Tušek, 2014)

Lega varjencev na zgornji sliki je različna. Kot prikazuje Tušek (2014) na sliki 14 a, je večina mase obeh varjencev v oknu, kar pri varjenju z izmeničnim tokom ustvarja vrtilne tokove, ki povzročijo izmenično magnetno polje, ta pa ovira prevajanje

varilnega toka prek elektrod. Na sliki 14 b pa je večina mase varjencev zunaj okna, kar pomeni, da pri tej postavitvi varjenja vrtnični tokovi skoraj ne vplivajo na jakost varilnega toka. Iz tega sledi, da čim več varjenca je med varjenjem v oknu med držaloma elektrod, tem manjši varilni tok bo tekel prek držal elektrod in varjencev.

3.5 NAPAKE PRI ELEKTROUPOROVNEM TOČKOVNEM VARJENJU

Pri točkovnih zvarih so možne različne napake. Nekatere so vidne s prostim očesom in so na površini zvarne točke, druge so v notranjosti spoja in jih je mogoče videti le s pripomočki, kot sta ultrazvok ali rentgen. Napake na zvarnih točkah lahko razdelimo na površinske napake, geometrijske napake, napake prevaritve, napake mikrostrukture vara ter napake zaradi neustreznih mehanskih lastnosti.

Med površinske napake štejemo nalepe elektrodnega materiala, površinske razpoke, izbrizge taline, nepravilne oblike vara, preglobok vdor elektrode v površino varjenca ter druge napake, ki so vidne s prostim očesom.

O geometrijskih napakah govorimo, kadar zvarna točka ne ustreza predpisani velikosti in obliki. V splošnem naj bi bil premer okrogle zvarne točke 3,5–4-krat večji od debeline najtanjše pločevine v spoju. Do nepravilne geometrije točkovnega vara pride zaradi nepravilno oblikovane konice elektrode ali zaradi nepravilnih parametrov. Najpogostejši razlog je premajhen premer okrogle elektrode.

Napaka prevaritve nastane pri varjenju s prenizko gostoto toka v elektrodah, kar pomeni, da varimo s prevelikim premerom elektrod ali prenizko jakostjo toka. Debelina pretaljenega materiala naj bi bila vsaj 20 odstotkov debeline pločevine, ki jo varimo. Maksimalna raztalitev pa naj ne bi presegala 80 odstotkov debeline varjenega materiala. Pri pretalitvi, manjši od 20 odstotkov, nastopi hladni spoj, ker je bil vnos energije premajhen. Pri pretalitvi, večji od 80 odstotkov, pride do brizganja taline iz vara, spajanja taline z elektrodo in do vdora elektrode v zvarno točko.

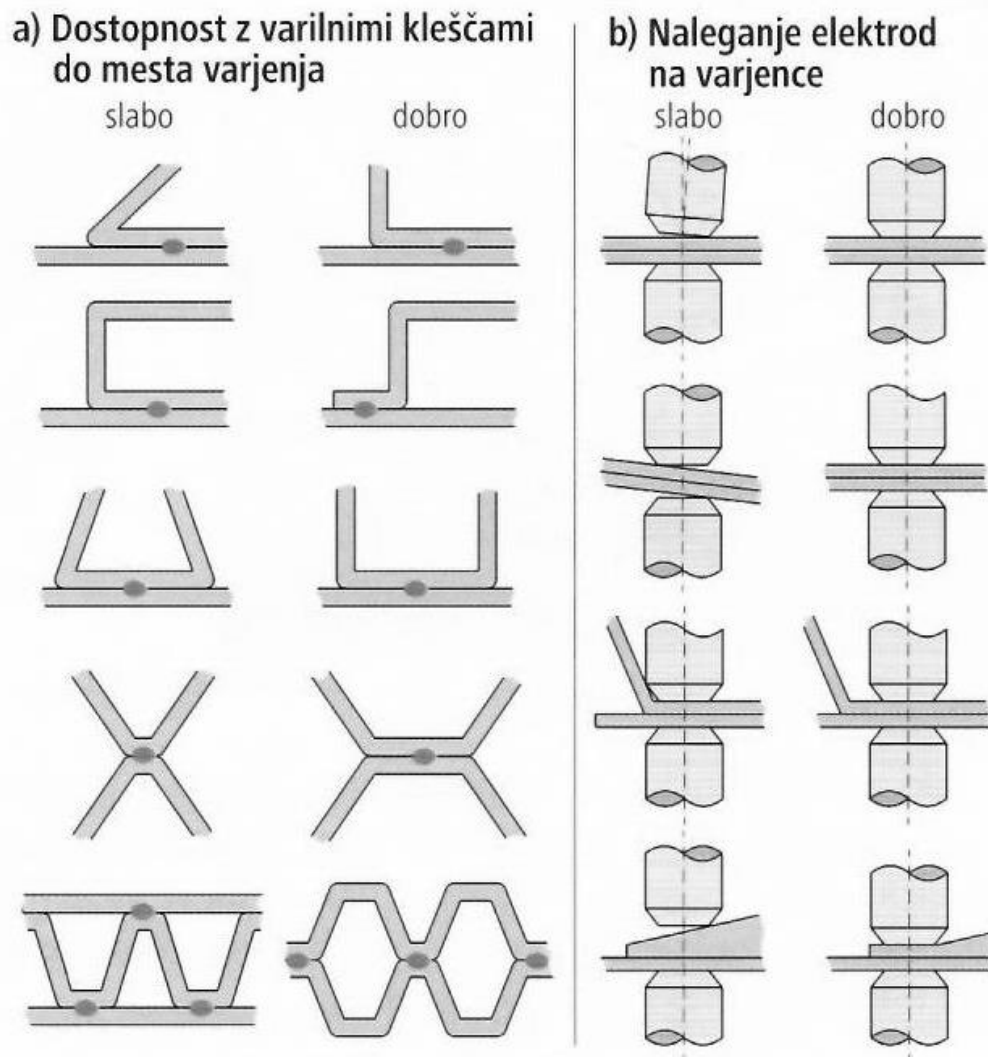
Napaka zaradi neustreznih mehanskih lastnosti nastane, če zvarni spoj nima dovolj velike trdnosti, ustrezne trdote in dovolj visoke žilavosti. Tudi pri točkovnem uporovnem varjenju si želimo podobno kot pri drugih zvarnih spojih, da je trdota v varu čim nižja, žilavost in trdnost pa sta čim višji.

Kot je navedeno v Tušek (2014), napake mikrostrukture vara s prostim očesom niso vidne. Mednje štejemo razpoke, poroznosti, vključke, neprevaritve in votlice v mikrostrukturi vara. V tabeli 2 so prikazane napake v odvisnosti od parametrov.

Št.	Vrsta napake (1–4 = glavne napake, 5–7 = nepomembne napake)	Možni vzroki za nastanek napak						
		Varilni tok	Varilni čas	Pritisk elektrod	Premier stične ploskve konice elektrode	Elektrode	Površine pločevin/prileganje	Drugo
1	nezadostna trdnost	prenizek	prekratek	prevelik	prevelik	slaba površina	slabo	-
2	votline v notranjosti in obrizgi	previsok, neustrezen program, brez vzpona toka	predolg	prekratek, neustrezen program	prenizek	prepočasno sledenje, neprimerno hlajenje, neprimeren varjenec	slabo	neustrezen čas začetne sile
3	ožganine, pore ali pogrezi na površini, razpoke na obrobju točke ¹	previsok	predolg	prenizek	prenizek	neprimeren varjenec, slabo hlajenje, slabo prilagojene površine, elektroda iz neprimernega materiala ter obrabljenost stične ploskve konice	slabo	prekratki časi začetnega pritiska, nepravilno pogrevanje, neustrezen material, nezadovoljiv čas preddržanja
4	nalegiranje elektrod ali varjencev	previsok	predolg	premajhen	premajhen		slabo	netočno vodenje pločevin ali elektrod, neprimerna oblika stične ploskve konice
5	odstopanje vtiska od zaželenne oblike						slabo	
6	prevelik premer vtiska	previsok	predolg	prevelik	prevelik			
7	preglobok vtisk	previsok	predolg	prevelik	premajhen			

Tabela 2: Možne napake v uporovno točkovno zavarjenih spojih
(Vir: Rak, 2008)

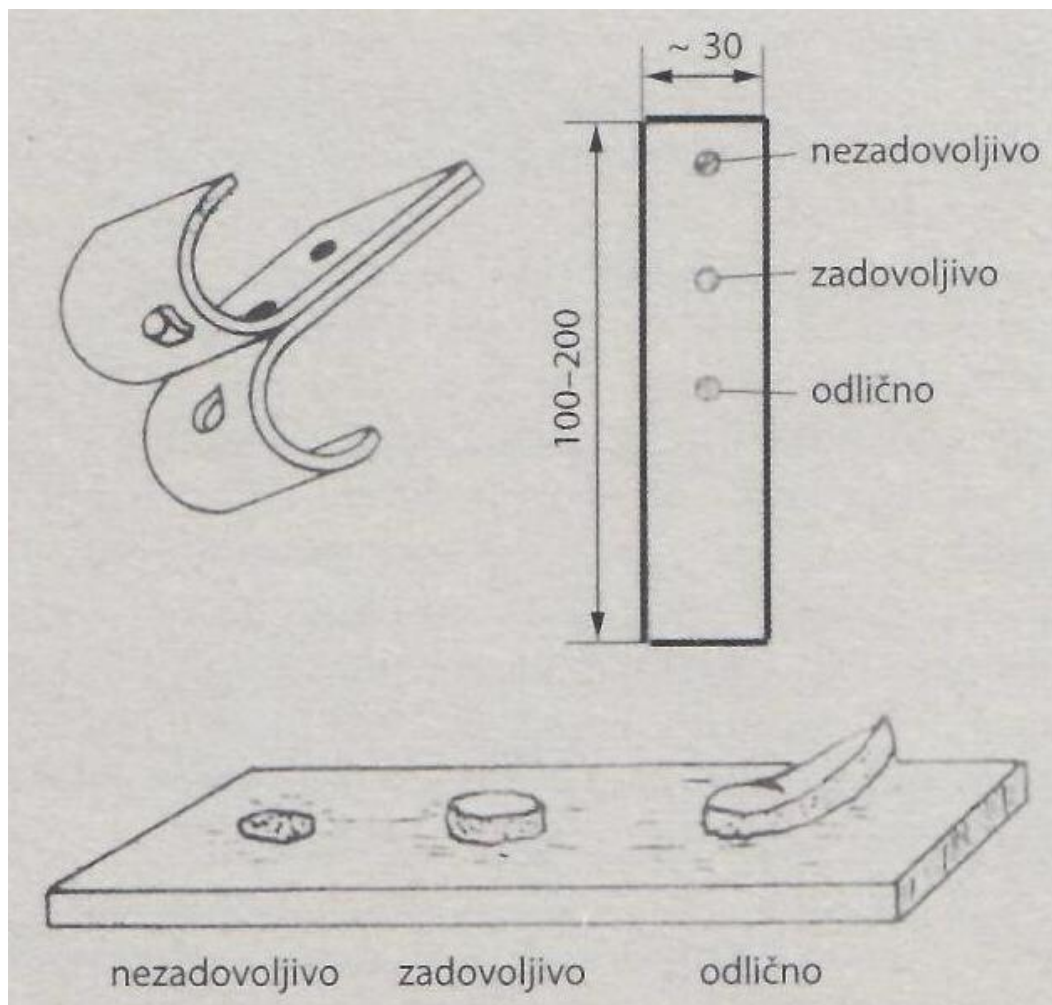
¹ Razpoke v srednji tretjini zvarne leče ne vplivajo bistveno na trdnost, vodijo pa k pojavu korozije.



Slika 15: Prikaz primernih in neprimernih izvedb točkovnega uporovnega varjenja v industriji
(Vir: Tušek, 2014)

3.6 PREIZKUŠANJE TOČKOVNIH ZVAROV

Kot je navedeno v Rak (2008), preizkus izvajamo na posebno pripravljenih ploščicah pred vsakim varjenjem po primerno izbranih parametrih varjenja. Izdelamo več zvarnih leč ter vpnemo en krak ploščice v primež ter ju razdvojimo. Kakovostna zvarna točka je tista, pri kateri se pri prelomu zvarne leče še drži iztrgani osnovni material, kot je prikazano na sliki 16. Trdnost na tlak strig in nateg zvarne leče morata biti vsaj tako visoka kot v osnovnem materialu.

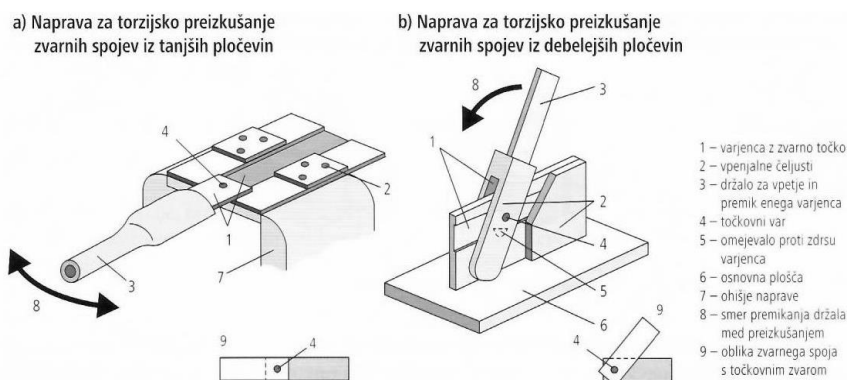


Slika 16: Tehnološki preizkus kakovosti točkovno zavarjenega zvara
(Vir: Rak, 2008)

Kot navaja Slovenski inštitut za standardizacijo (2012), poseben torzijski preizkus ene zvarne točke na prekrovnem spoju predpisuje Standard SIST EN ISO 17653.

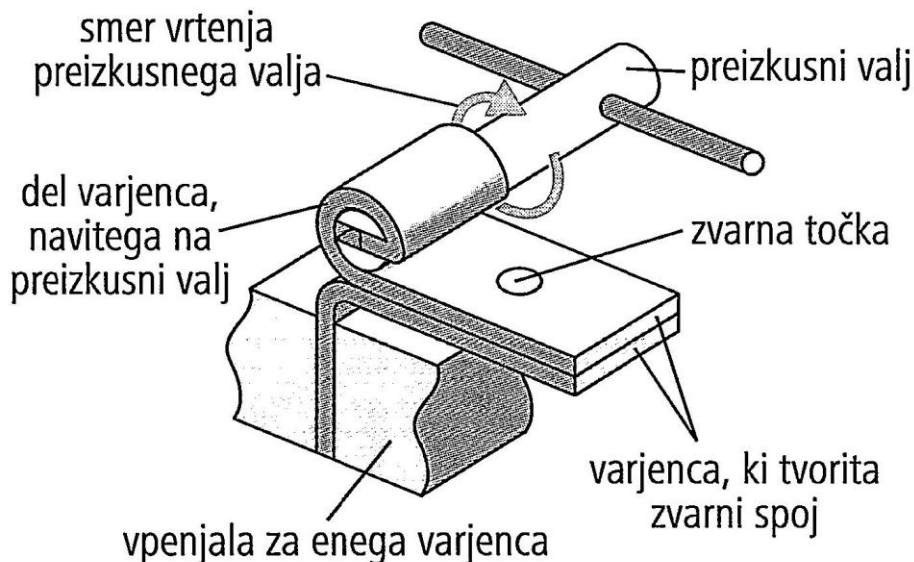
Standard opredeljuje dimenzije vzorcev, vrsto, opremo in potek preizkušanja točkovnih zvarov z eno točko na pločevinah iz jekla debeline med 0,5 in 6,0 mm.

Kot prikazuje Tušek (2014), sta na sliki 17 prikazani dve napravi za preizkušanje vzvojne trdnosti zvarnih točk. Primer a je za spoje tanjših pločevin, primer b pa za spoje debelejših pločevin. Napravi sta zelo preprosti in ju uporabljamo za hitro oceno trdnosti zvarne točke, za ugotavljanje njenega premera ter za ugotavljanje njenega načina porušitve. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo o primernosti izbrane varilne tehnologije.



Slika 17: Dve preprosti napravi za torzijsko preizkušanje enotočkovno zavarjenih prekrivnih zvarnih spojev
(Vir: Tušek, 2014)

Kot navedeno v Tušek (2014), v praksi z luščenjem zvarne točke ugotavljamo trdnost zvarjenega prekrivnega spoja. Poznamo več različnih vzorcev ter ročni in mehanizirani način za te preizkuse. Slika 18 prikazuje najpravičnejšo izvedbo preizkušanja na luščenje. To je poceni, zanesljiv in preprost preizkus trdnosti zvarne točke na prekrivnem zvarnem spoju. Uporabimo poseben razcepljeni valj, v katerega namestimo en konec varjenca, nato z vrtenjem valja nanj navijamo pločevino in jo luščimo od drugega varjenca. Merila za kakovost zvarne točke so predvsem velikost zvarne leče, sila preizkušanja in način porušitve zvarne točke.



Slika 18: Shematski prikaz ročnega preizkušanja trdnosti zvarne točke z luščenjem na prekrivnem zvarnem spoju z eno zvarno točko
(Vir: Tušek, 2014)

4 EKSPERIMENTALNI DEL

Pri praktičnem delu smo se osredotočili na elektroporovno varjenje svetlo vlečene žice različnih debelin, in sicer od debeline 2 mm do 10 mm. Vsi preizkušanci so bili dolžine 100 mm. Varili smo prekrovno. Ker je našim kupcem vizualna ustreznost zvara vsaj toliko pomembna kot njegove mehanske lastnosti, bo eksperimentalni del to tudi odražal. Naj omenimo, da je aparat PECO FPA2, na katerem smo varili, starejše generacije. Aparat je tudi predelan, tako da lahko nastavljamo čas v periodah, in sicer od 2 do 150 period, tlak v barih do 6 barov ter jakost toka od 0,1 do 4 (neznane vrednosti amperov s predvidevanjem, da gre za kA). Vendar naprava še vedno dobro služi za varjenje preprostejših izdelkov, kot so razni okvirji in aranžerske kljukice ter druga trgovinska opreme.

Za varjenje smo uporabljali dve bakreni palični elektrodi debeline 10 mm, ki sta vpeti v elektrodni držali. Zgornje držalo je pomično, spodnje pa fiksno. Naj omenimo, da je elektroporovno varjenje žice specifično področje. Literatura, ki smo jo našli, je večinoma omejena zgolj na elektroporovno varjenje pločevine, kjer se naležni ploskvi povsem stikata in prekrivata, za razliko od žice. Pri varjenju izdelkov iz žice, kot so različne košare, okvirji, stojala in aranžerske kljukice, so poleg trdnosti izdelka pomembne tudi vizualne lastnosti. To pomeni, da ne sme biti nobenih ostrih robov, ki bi lahko poškodovali npr. filter tkanino.

Zaradi različnih debelin žice smo imeli kar nekaj dela z nastavljanjem parametrov.

V tabeli 3 so prikazane vrednosti parametrov, ki zagotavljajo dober zvarni spoj pri dani debelini varjencev. Čas, ki ga lahko nastavljamo v periodah, je preračunan v milisekunde po enačbi $1 P = 0,02 s$.

Postopek: Na nadzorni plošči izberemo čas varjenja ter jakost toka, s katerim bi radi varili, za tem nastavimo še želeni tlak. Preden žice položimo med elektrodi, jih ustrezno pregledamo, odstranimo nečistoče, v kolikor so poškodovane, jih zamenjamo. Nato vstavimo žice med elektrodi ter pritismo na pedal. V kolikor smo izbrali ustrezne parametre, pride do dobrega zvarnega spoja. Na tem delu moramo opozoriti na možnosti poškodbe operaterja, in sicer od lažjih opeklin do hujših mehanskih poškodb človeškega skeleta. Zato je na prvem mestu operaterjeva varnost, ki jo zagotavljamo z ustrezno osebno varovalno opremo. Sem spadajo usnjene rokavice, delovni čevlji, usnjen predpasnik in varnostna očala.



Slika 19: Nadzorna plošča varilnega aparata, s katerim smo varili
(Lastni vir)



Slika 20: Prikazovalnik tlaka varilnega aparata, ki ga poljubno uravnavamo
(Lastni vir)



*Slika 21: Vpetje pri varjenju
(Lastni vir)*



*Slika 22: Varjenje žic različnih debelin
(Lastni vir)*



*Slika 23: Nepravilna izbira parametrov za žice dane debeline
(Lastni vir)*

Na slikah 21–23 so prikazane varilne elektrode pred in med varjenjem. Na sliki 23 je prikazan primer nastavljene prevelike jakosti toka za izbrane dimenzije varjencev. Prišlo je do prekomernega iskrenja in posledično do nesprejemljivega zvarnega spoja.

V tabeli 3 so prikazane vrednosti parametrov, ki zagotavljajo dober zvarni spoj pri dani debelini varjencev. Čas, ki ga lahko nastavljamo v periodah, je preračunan tudi v milisekunde, za lažjo predstavo po enačbi: 1 perioda = 0,02 s.

- t = čas
- a = jakost toka
- p = tlak

	2 mm	2,5 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm	10 mm
2 mm	t = 4 = 80 ms a = 1,5 p = 2,6 bar	t = 7 = 140 ms a = 1,5 p = 2,5 bar	t = 2 = 40 ms a = 2 p = 3,0 bar	t = 10 = 200 ms a = 1,5 p = 2,5 bar	t = 15 = 300 ms a = 1,5, p = 2,5 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 2,8 bar
2,5 mm	t = 7 = 140 ms a = 1,5 p = 2,5 bar	t = 2 = 40 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 3 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 3 bar	t = a = p =	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 3,5 bar	t = a = p =	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 3,8 bar
3 mm	t = 2 = 40 ms a = 2 p = 3,0 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 3 bar	t = a = p =	t = 10 = 200 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = a = p =	t = 4 = 80 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = a = p =	t = 10 = 200 ms a = 2,0 p = 3,8 bar
4 mm	t = 10 = 200 ms a = 1,5 p = 2,5 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 3 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,0 p = 4,0 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,5 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,5 bar
5 mm	t = 15 = 300 ms a = 1,5, p = 2,5 bar	t = a = p =	t = a = p =	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = a = p =	t = 15 = 300 ms a = 2,5 p = 5 bar
6 mm	t = 4 = 80 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 3,5 bar	t = 4 = 80 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,5 p = 4,0 bar	t = 15 = 300 ms a = 2,5 p = 4,5 bar	t = 15 = 300 ms a = 2,5 p = 5,0 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,5 p = 5,2 bar
8 mm	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 2,5 bar	t = a = p =	t = a = p =	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,5 bar	t = a = p =	t = 15 = 300 ms a = 2,5 p = 5,0 bar	t = 20 = 400 ms a = 2,5 p = 5,8 bar	t = 15 = 300 ms a = 3,0 p = 6 bar
10 mm	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 2,8 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,0 p = 3,8 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,0 p = 3,8 bar	t = 7 = 140 ms a = 2,5 p = 4,5 bar	t = 15 = 300 ms a = 2,5 p = 5 bar	t = 10 = 200 ms a = 2,5 p = 5,2 bar	t = 15 = 300 ms a = 3,0 p = 6 bar	t = a = p =

Tabela 3: Parametri eksperimentalnih varjencev
(Lastni vir)

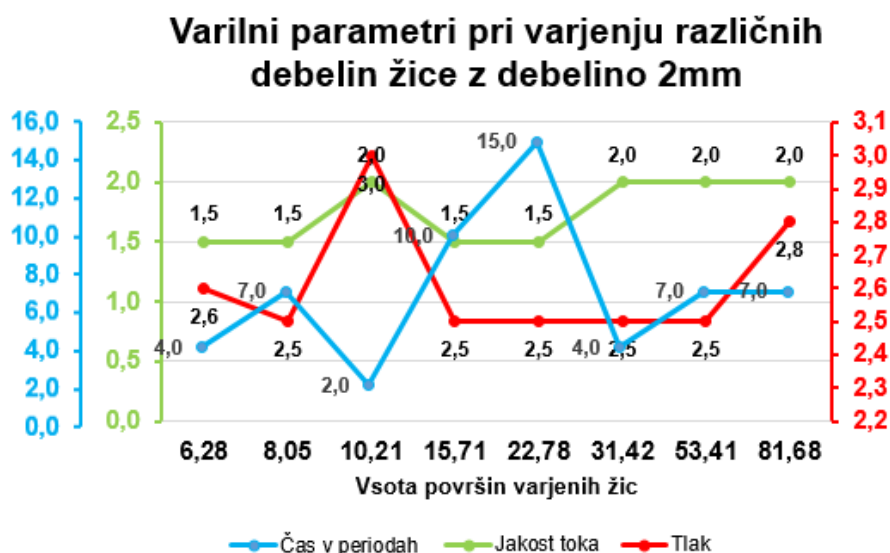
V tabelah 4, 5, 6 in 7 smo izračunali površino, skozi katero mora steči energija, da pride do zavaritve. Rezultati so prikazani na primerih naslednjih žic debeline 2 mm, 4 mm, 6 mm, 10 mm. Pri varjenju žice debeline 10 mm na enako debelino varilni aparat

kljub poizkušanju različnih parametrov ni mogel zavariti ustreznega spoja. Predpostavljamo, da je naprava prešibka za varjenje takih debelin.

Premer žice [mm]	Polmer žice r [mm]	π	Površina $S = \pi * r^2$ [mm ²]	Seštevek površin na debelino žice 2 mm [mm ²]	Čas v periodah	Jakost toka	Tlak v barih
2	1	3,14159	3,141592654	6,28	4,0	1,5	2,6
2,5	1,25	3,14159	4,908738522	8,05	7,0	1,5	2,5
3	1,5	3,14159	7,068583472	10,21	2,0	2,0	3,0
4	2	3,14159	12,56637062	15,71	10,0	1,5	2,5
5	2,5	3,14159	19,63495409	22,78	15,0	1,5	2,5
6	3	3,14159	28,27433389	31,42	4,0	2,0	2,5
8	4	3,14159	50,26548246	53,41	7,0	2,0	2,5
10	5	3,14159	78,53981635	81,68	7,0	2,0	2,8

Tabela 4: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 2 mm
(Lastni vir)

Z grafi na slikah 24–27 smo želeli prikazati odvisnost parametrov, ki zagotavljajo ustrezen zvarni spoj pri kombinacijah žic različnih debelin. Vendar nismo našli povezave, ki bi jo lahko v praksi uspešno uporabljali.

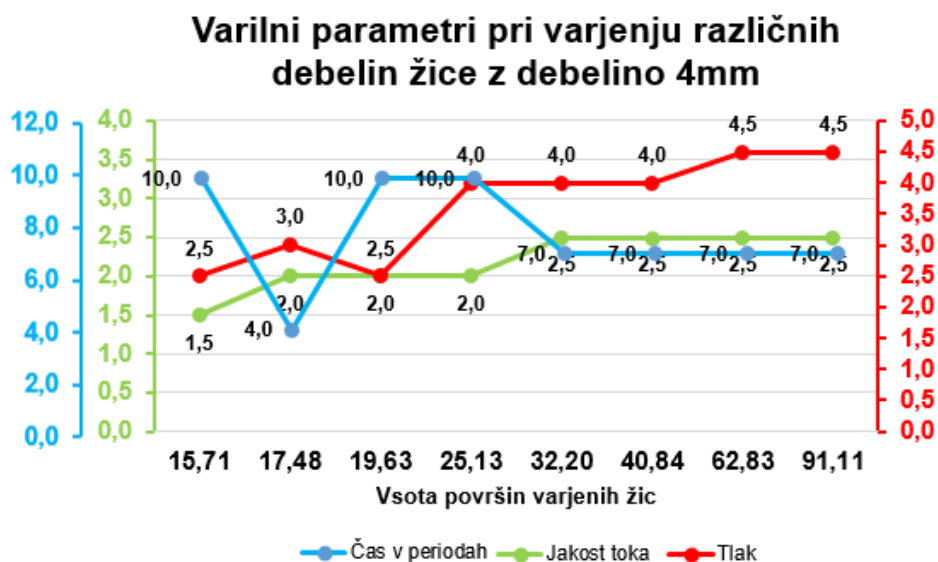


Slika 24: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 2 mm
(Lastni vir)

Na sliki 24 je prikazano varjenje žic različnih premerov z žico debeline 2 mm. V primeru varjenja žice debeline 3 mm z žico premera 2 mm smo čas nastavili na 2 periodi in zato sta posledično morala biti jakost toka ter tlak nekoliko višja kot v primeru varjenecv debeline 2,5 mm in 2 mm, kjer smo imeli čas nekoliko daljši in sta bila jakost toka ter tlak nekoliko nižja za zagotovitev ustreznega zvara. V primeru varjenja žice debeline 5 mm na debelino 2 mm pa smo jakost toka znižali, zato pa smo podaljšali čas varjenja na 15 period.

Premer žice [mm]	Polmer žice [mm]	π	Površina $S = \pi * r^2$ [mm ²]	Seštevek površin na debelino žice 4 mm [mm ²]	Čas v periodah	Jakost toka	Tlak v barih
2	1	3,14159	3,1415927	15,71	10,0	1,5	2,5
2,5	1,25	3,14159	4,9087385	17,48	4,0	2,0	3,0
3	1,5	3,14159	7,0685835	19,63	10,0	2,0	2,5
4	2	3,14159	12,566371	25,13	10,0	2,0	4,0
5	2,5	3,14159	19,634954	32,20	7,0	2,5	4,0
6	3	3,14159	28,274334	40,84	7,0	2,5	4,0
8	4	3,14159	50,265482	62,83	7,0	2,5	4,5
10	5	3,14159	78,539816	91,11	7,0	2,5	4,5

Tabela 5: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 4 mm
(Lastni vir)

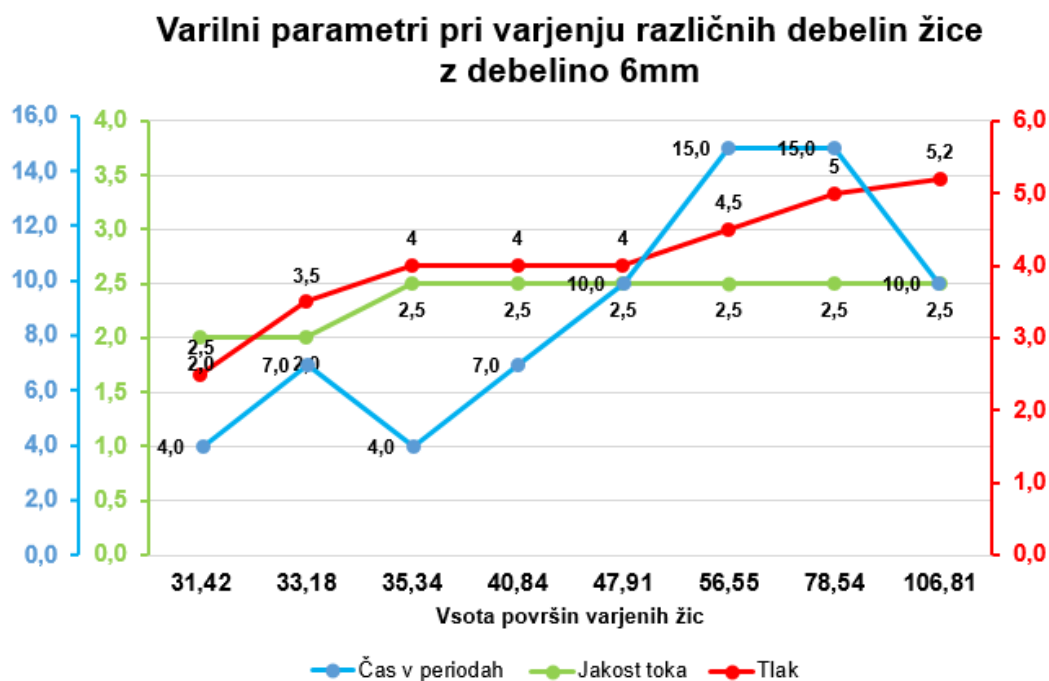


Slika 25: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 4 mm
(Lastni vir)

V primeru varjenja žice s premerom 2 mm in žice s premerom 4 mm smo nastavili nizko jakost toka ter tlaka, tako da smo morali čas nastaviti na 10 period. Pri varjenju žic debeline 2,5 mm in 4 mm pa smo nekoliko povišali tlak ter jakost in smo s časom varjenja 4 period dobili dober zvarni spoj.

Premer žice [mm]	Polmer žice [mm]	π	Površina $S = \pi * r^2$ [mm ²]	Seštevek površin na debelino žice 6 mm [mm ²]	Čas v periodah	Jakost toka	Tlak v barih
2	1	3,14159	3,141592654	31,42	4,0	2,0	2,5
2,5	1,25	3,14159	4,908738522	33,18	7,0	2,0	3,5
3	1,5	3,14159	7,068583472	35,34	4,0	2,5	4,0
4	2	3,14159	12,56637062	40,84	7,0	2,5	4,0
5	2,5	3,14159	19,63495409	47,91	10,0	2,5	4,0
6	3	3,14159	28,27433389	56,55	15,0	2,5	4,5
8	4	3,14159	50,26548246	78,54	15,0	2,5	5,0
10	5	3,14159	78,53981635	106,81	10,0	2,5	5,2

Tabela 6: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 6 mm
(Lastni vir)

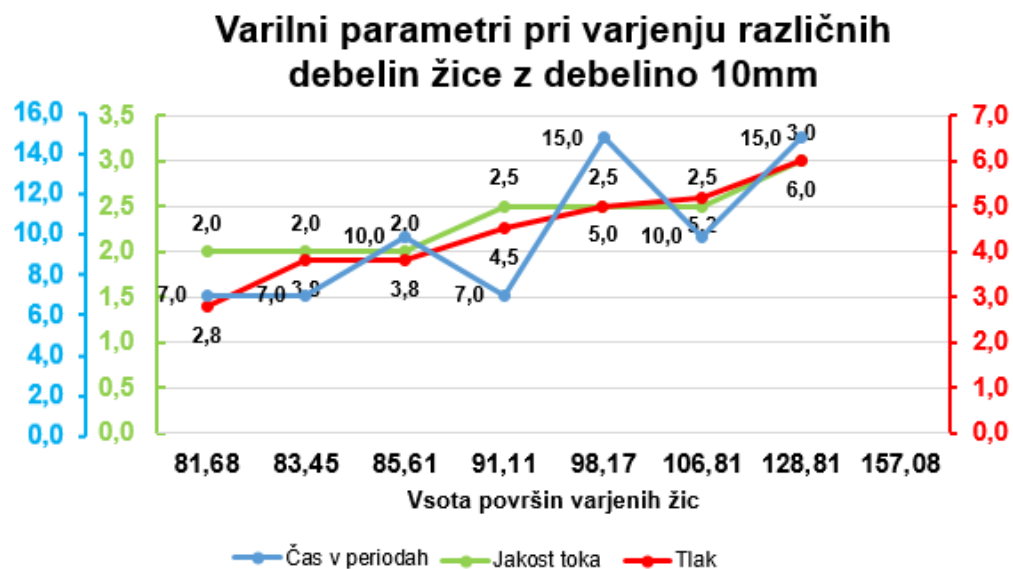


Slika 26: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 6 mm
(Lastni vir)

Pri varjenju žice debeline 2,5 mm in žice debeline 6 mm smo tlak nastavili na 3,5 bara, jakost toka je bila 2 ter čas 7 period. V naslednjem primeru varjenja zgolj 0,5 mm debelejša žice s premerom 6 mm smo povišali tlak za 0,5 bara ter jakost toka za 0,5, čas varjenja je lahko nižji za 3 periode.

Premer žice [mm]	Polmer žice [mm]	π	Površina [mm ²]	Seštevek površin na debelino žice 10 mm [mm ²]	Čas v periodah	Jakost toka	Tlak v barih
2	1	3,14159	3,14159265	81,68	7,0	2,0	2,8
2,5	1,25	3,14159	4,90873852	83,45	7,0	2,0	3,8
3	1,5	3,14159	7,06858347	85,61	10,0	2,0	3,8
4	2	3,14159	12,5663706	91,11	7,0	2,5	4,5
5	2,5	3,14159	19,6349541	98,17	15,0	2,5	5,0
6	3	3,14159	28,2743339	106,81	10,0	2,5	5,2
8	4	3,14159	50,2654825	128,81	15,0	3,0	6,0
10	5	3,14159	78,5398164	157,08			

Tabela 7: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 10 mm (Lastni vir)



Slika 27: Varilni parametri pri varjenju žic različnih debelin z žico debeline 10 mm (Lastni vir)

Z varjenjem žic debeline 5 mm ter 10 mm smo glede na primer varjenja žic debeline 4 mm ter 10 mm ohranili enako jakost toka, povišali tlak za 0,5 bara ter bili primorani povišati čas varjenja, in sicer za 8 period, da smo dobili ustrezen zvaren spoj. Tudi pri žici debeline 6 mm smo ohranili jakost toka, nato povišali tlak za 0,2 bara in čas varjenja skrajšali za 5 period. Pri varjenju dveh žic debeline 10 mm nismo mogli zagotoviti ustreznega zvarnega spoja, zato tudi v grafu ni prikazanih parametrov za ta primer.



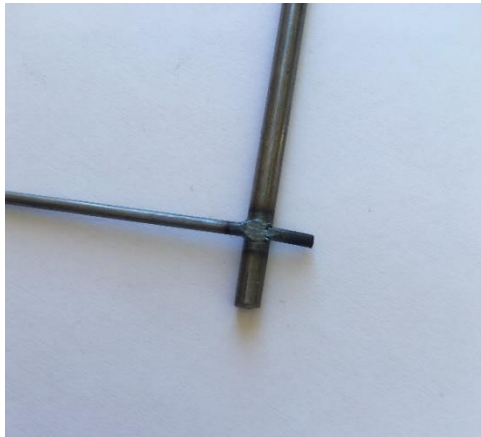
*Slika 28: Primer dobrega zvarnega spoja žic debeline 6 mm ter 8 mm
(Lastni vir)*

Na sliki 28 je prikazan primer dobrega zvarnega spoja, kjer ni vidnih nobenih obrizgov ali vtisa elektrod. Ustrezen zvar smo zagotovili s pravilno nastavljenimi parametri: tlak 5 barov, čas varjenja 15 period ter jakost toka 2,5.



*Slika 29: Primer dobrega zvarnega spoja na levi ter slabega
na desni strani, žice debeline 5 mm
(Lastni vir)*

Na sliki 29 vidimo, da smo pri varjenju žic debeline 5 mm v desnem primeru nepravilno izbrali parameter varjenja, in sicer jakost toka. Razvidno je, da je prišlo do obrizga na površini zvara. Ko smo znižali jakost toka, smo dobili ustrezen zvaren spoj, ki je prikazan na levi strani.



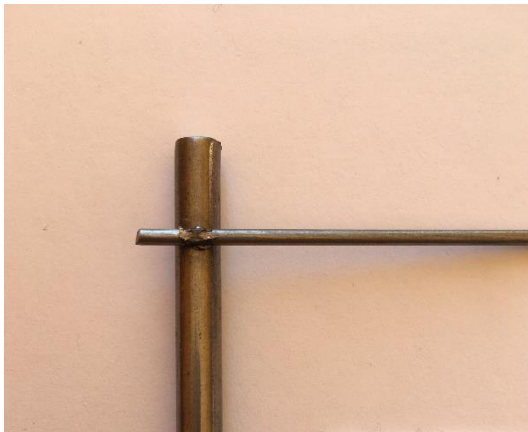
*Slika 30: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 2 mm in 4 mm
(Lastni vir)*

Slika 30 prikazuje popolnoma napačno izbran parameter. Poleg previsokega toka sta bila tudi tlak in čas nastavljena previsoko. Žica debeline 2 mm je na zvaru praktično popolnoma stisnjena.



*Slika 31: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 10 mm
(Lastni vir)*

V primeru varjenja dveh žic debeline 10 mm nismo mogli zagotoviti dobrega zvara. Slika 31 prikazuje prevelik vtis elektrode v žico, tako da ne zagotavlja gladke površine zvara.



*Slika 32: Primer slabega zvarnega spoja žic debeline 2 mm in 6 mm
(Lastni vir)*

Zaradi nepravilno izbrane jakosti toka pride do deformacije zvara, kot je prikazano na sliki 32. Zvar ni gladek, vsebuje obrizge ter ožganine.



*Slika 33: Primer dobrega zvarnega spoja žic debeline 6 mm
(Lastni vir)*

Zvar, prikazan na sliki 33, je dober, saj je za naše potrebe vizualno korekten in ima dovolj visoko trdnost.

5 ZAKLJUČEK

V literaturi je omenjeno, da sta za doseganje najboljšega zvarnega spoja najboljša naslednja parametra: velika jakost toka ter kratek čas varjenja. Naj omenimo, da se literatura večinoma nanaša na varjenje pločevine.

V našem primeru smo zagotovili kakovosten zvarni spoj tudi z drugače nastavljenimi parametri. Denimo, da je čas varjenja nekoliko daljši ter jakost toka manjša. Seveda je v našem primeru zelo pomembna vizualnost zvara in ne samo njegova trdnost. Nekateri žice smo varili večkrat z različnimi parametri, vendar so v rezultatih predstavljeni tisti parametri, ki so zagotovili najboljši zvarni spoj, tako vizualno kot trdnostno. Za debelejši žice potrebujemo višje parametre, za tanjše pa nižje. Vendar iz razbranih parametrov pri ustreznih zvarih spojih nismo bili uspešni pri izpeljavi enotnih zaključkov, ki bi služili za oporo pri nadaljnjem delu. Tudi v prihodnje se bomo morali zadovoljiti z dosedanjim načinom nastavitve parametrov, ki temelji na poskušanju in dobri strojniški praksi.

Med opravljanjem eksperimentalnega dela smo opazili, da aparat bolje služi varjenju žic manjših premerov. Z debelejšimi žicami smo imeli kar nekaj težav, da smo nastavili pravilne parametre za dober zvarni spoj. Aparat tudi ni bil zmožen zagotoviti dobrega zvara z žicami največjih debelin in predpostavljamo, da je za varjenje takih debelin prešibak.

Da bi lahko natančno določili, kateri zvarni spoji in pri katerih parametrih so resnično najboljše, bi bilo potrebno sam eksperiment zastaviti mnogo obširneje in z laboratorijsko opremo, tako varilno kot za preizkušanje zvarnih spojev. Tukaj imamo v mislih predvsem:

- natančno odčitavanje in nadzorovanje varilnih parametrov,
- penetrantsko preiskavo zvarnih spojev,
- izdelavo makro obrusov zvarnih spojev in
- porušitev zvarnih spojev na trgalnem stroju.

Za vsak spreminjajoči se parameter bi oblikovali svoj del eksperimenta, kjer bi ga spreminjali od najmanjše do največje (smiselne) vrednosti, medtem ko bi ostali parametri ostajali nespremenjeni.

6 LITRATURA IN VIRI

Dolinar, B. (2019). *Analiza spojev, izdelanih z uporovnim točkovnim varjenjem in lepljenjem*. Pridobljeno 25. 01. 2021 z naslova <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=118560&lang=slv>.

Elektro uporovno varjenje. (b. l.) Pridobljeno 02. 02. 2021 z naslova <http://www2.sts.si/arhiv/tehnolo/varjenje/var02.htm>.

Institut za varilstvo (2015). *Seminarsko gradivo IWE/IWT specializacija*. Institut za varilstvo d.o.o.

Javornik, D. I. (2018). *Uporovno točkovno varjenje*. Pridobljeno 18. 2. 2021 z naslova <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=110580&lang=slv>.

Polajnar, I. (2015). *Uporovno varjenje (specializacija za mednarodne varilske inženirje in tehnologe)*. Neobjavljeno delo.

Rak, I. (2008). *Tehnologija varjenja*. Ljubljana: Založba Modrijan, d.o.o.

Resistance Welding Guide. (12. 12. 2019). Pridobljeno 27. 01. 2021 z naslova <https://weldguru.com/resistance-welding/>.

Resistance Welding. (b. l.). Pridobljeno 27. 01. 2021 z naslova <https://www.swantec.com/technology/resistance-welding/>.

SIST EN ISO 17653 (2012). *Uporovno varjenje – Porušitveni preizkus na zvarih na kovinskih materialih — Torzijski preskus uporovnih točkovnih zvarov (ISO/DIS 17653:2011)*. Slovenski inštitut za standardizacijo.

Tušek, J. (2014). *Varjenje in sorodne tehnike spajanja materialov v neločljivo zvezo*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani.

Uporovno varjenje. (b. l.). Pridobljeno 05. 02. 2021 z naslova https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_tpr_sno_varjenje_uporovno_varjenje_01.

Zhang, H., Senkara, J. (2nd edition). (2011). *Resistance welding - Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis Group, LLC.