

OPTIMIZACIJA ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA SVORNJAKA U VODORAVNOM POLOŽAJU

Bežan, Dario

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:362261>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

OPTIMIZACIJA ELEKTROOTPORNOG ZAVARIVANJA SVORNJAKA U VODORAVNOM POLOŽAJU

Bežan, Dario

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:362261>

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

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



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva

Dario Bežan

**OPTIMIZACIJA
ELEKTROOTPORNOG
ZAVARIVANJA SVORNJAKA
U VODORAVNOM POLOŽAJU**

**Optimisation of electroresistance stud
welding in horizontal position**

Završni rad

Karlovac, 2019.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva

Dario Bežan

**OPTIMIZACIJA
ELEKTROOTPORNOG
ZAVARIVANJA SVORNJAKA U
VODORAVNOM POLOŽAJU**

**Optimisation of electroresistance stud
welding in horizontal position**

Završni rad

dr. sc. Tanja Tomić, dipl. ing. stroj.

Karlovac, 2019.

PREDGOVOR

Izjava

Izjavljujem da sam ja student DARIO BEŽAN, izradio završni rad samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija, služeći se navedenom stručnom literaturom uz stručnu pomoć mentorice dr. sc. Tanje Tomić, dipl. ing. stroj.

Zahvala

Zahvaljujem se dr. sc. Tanji Tomić, dipl. ing. stroj. na pomoći pri izradi završnog rada i prikupljanju literature za isti.

Najveća zahvala mojoj obitelji, posebno supruzi Branki bez čijeg strpljenja i potpore ovaj diplomski rad nikada ne bi bio pisan. Hvala Mateju i Marti što su bili dobri.

Dario Bežan

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ..... | I |
| POPIS SLIKA..... | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA..... | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY..... | VI |
| | |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OPĆI DIO..... | 3 |
| 2.1. ELEKTROTOPORNO ZAVARIVANJE..... | 3 |
| 2.1.1. Vrste elektrootpornog zavarivanja..... | 3 |
| 2.2. ELEKTROTOPORNO ZAVARIVANJE SVORNJAKA ISKRENJEM..... | 13 |
| 2.2.1. Općenito o postupku..... | 13 |
| 2.2.2. Oprema za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem | 15 |
| 2.2.3. Svornjaci za elektrootporno zavarivanje iskrenjem..... | 17 |
| 2.2.4. Keramički prsten za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem..... | 20 |
| 2.3. FAZE PROCESA ZAVARIVANJA SVORNJAKA ISKRENJEM..... | 21 |
| 2.4. PARAMETRI ZAVARIVANJA | 22 |
| 2.5. UTJECAJ TOPLINSKOG I MAGNETNOG PUHANJA LUKA..... | 25 |
| 2.6. KONTROLA ZAVARENOSTI SPOJA..... | 26 |
| 3. POSTAVKA ZADATKA | 28 |
| 4. RAZRADA ZADATKA | 29 |
| 4.1. OPREMA I MATERIJAL KORIŠTEN U POSTUPKU..... | 29 |
| 4.2. SKRAĆENI OPIS REDOSLJEDA OPERACIJA..... | 31 |
| 4.3. VIZUALNI PREGLED UZORAKA NAKON ZAVARIVANJA | 34 |
| 4.4. DIMENZIONALNA KONTROLA NAKON ZAVARIVANJA | 34 |
| 4.5. ISPITIVANJE ZAVARA GLODANJEM..... | 36 |
| 4.6. ISPITIVANJE TVRDOĆE NA ZAVARENIM UZORCIMA..... | 41 |
| 5. ANALIZA REZULTATA | 44 |
| 6. ZAKLJUČAK | 45 |
| PRILOZI..... | 46 |
| LITERATURA..... | 47 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 1. Shematski prikaz direktnog točkastog elektrootpornog zavarivanja [6]</i> | <i>4</i> |
| <i>Slika 2. Ilustracija indirektnog točkastog elektrootpornog zavarivanja [7].....</i> | <i>5</i> |
| <i>Slika 3. Shema bradavičastog zavarivanja [8]</i> | <i>6</i> |
| <i>Slika 4. Shema šavnog zavarivanja (dvostranog) [6]</i> | <i>7</i> |
| <i>Slika 5. Jednostrano šavno zavarivanje [8]</i> | <i>8</i> |
| <i>Slika 6. Bakrene kolutne elektrode za šavno zavarivanje [10]</i> | <i>9</i> |
| <i>Slika 7. Sučeljeno zavarivanje čistim otporom [6]</i> | <i>10</i> |
| <i>Slika 8. Prikaz elektrootpornog zavarivanja iskrenjem [16]</i> | <i>11</i> |
| <i>Slika 9. Shema indukcijskog zavarivanja [12]</i> | <i>12</i> |
| <i>Slika 10. Indukcijsko zavarivanje [13].....</i> | <i>12</i> |
| <i>Slika 11. Shematski prikaz principa elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem uz primjenu keramičkog prstena [10].....</i> | <i>14</i> |
| <i>Slika 12. Faze elektrootpornog zavarivanja svornjaka – detalji nastajanja zavarenog spoja. [14].....</i> | <i>14</i> |
| <i>Slika 13. Izvor struje za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem [15]</i> | <i>15</i> |
| <i>Slika 14. Pištolj za zavarivanje svornjaka integriran u izvoru struje za zavarivanje. [15].....</i> | <i>17</i> |
| <i>Slika 15. Razni oblici svornjaka [20]</i> | <i>18</i> |
| <i>Slika 16. Dimenzije svornjaka [15].....</i> | <i>19</i> |
| <i>Slika 17. Primjeri keramičkih prstena [15]</i> | <i>20</i> |
| <i>Slika 18. Faze radnih koraka kod zavarivanja svornjaka</i> | <i>21</i> |
| <i>Slika 19. Shematski prikaz ovisnosti struje i vremena zavarivanja [10]</i> | <i>24</i> |
| <i>Slika 20. Ispravljanje utjecaja magnetskog skretanja luka [10].....</i> | <i>25</i> |
| <i>Slika 21. Proba savijanja u svrhu ispitivanja kvalitete zavara svornjaka [10]</i> | <i>27</i> |
| <i>Slika 22. Oprema korištena za provedbu eksperimentalnog dijela [18]</i> | <i>29</i> |
| <i>Slika 23. Sirovi i obrađeni komad sa zavarenim svornjakom za prihvata u stroj [18].....</i> | <i>30</i> |
| <i>Slika 24 Stezna naprava Lang Makro Grip [23].....</i> | <i>30</i> |
| <i>Slika 25 Tehnički podaci proizvođača za svornjak [15]</i> | <i>31</i> |
| <i>Slika 26 Tehnički podaci proizvođača za keramički prsten [15]</i> | <i>31</i> |
| <i>Slika 27 Vodoravni položaj svornjaka i obratka [18]</i> | <i>32</i> |
| <i>Slika 28 Grafički prikaz dimenzija položaja svornjaka na čelu obratka [18]</i> | <i>32</i> |
| <i>Slika 29 5-osni CNC stroj za obradu tip HAMUEL HSTM B500 [18]</i> | <i>33</i> |
| <i>Slika 30 Ispitivanje tvrdoće u zonama zavarenog spoja [18]</i> | <i>33</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Slika 31 Prikaz uzoraka sa svornjacima zavarenim u vodoravnom položaju [18]</i> | <i>34</i> |
| <i>Slika 32 Mjerna mjesta na Z i Y osi [18]</i> | <i>35</i> |
| <i>Slika 33 Mjerna mjesta na Z i Y osi [18]</i> | <i>35</i> |
| <i>Slika 34 Obradak sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]</i> | <i>36</i> |
| <i>Slika 35 Obradak sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]</i> | <i>36</i> |
| <i>Slika 36 Obradni centar HAMUEL HSTM 500 [19]</i> | <i>37</i> |
| <i>Slika 37 Glodača glava Walter F2334.B.040.Z04.06 sa pločicama WSP ROHX1204M0-F67 WSP45 [22]</i> | <i>37</i> |
| <i>Slika 38 Trošenje oštrice alata ovisno o broju prolaza na obratcima sa pinom zavarenim u okomitom položaju [18]</i> | <i>39</i> |
| <i>Slika 39 Trošenje oštrice alata ovisno o broju prolaza na obratcima sa pinom zavarenim u vodoravnom položaju [18]</i> | <i>40</i> |
| <i>Slika 40 Stroj za ispitivanje tvrdoće HBW 2,5/187,5 [18]</i> | <i>41</i> |
| <i>Slika 41 Ispitani uzorak i shematski prikaz zona zavara [18]</i> | <i>41</i> |
| <i>Slika 42 Mjerenje tvrdoće na obratku sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18] .</i> | <i>42</i> |
| <i>Slika 43 Mjerenje tvrdoće na obratku sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]</i> | <i>43</i> |

POPIS TABLICA

| | |
|---|-----------|
| <i>Tablica 1. Podjela postupaka zavarivanja [2]</i> | <i>2</i> |
| <i>Tablica 2. Postupci zavarivanja u ovisnosti o debljini materijala [3]</i> | <i>2</i> |
| <i>Tablica 3. Primjer karakteristika uređaja za zavarivanje, tip NELSON INTRA 2100 [15]</i> | <i>16</i> |
| <i>Tablica 4. Primjer osnovnih karakteristika pištolja, tipa NELSON NS 20 HD [15]</i> | <i>17</i> |
| <i>Tablica 5. Brzina uranjanja svornjaka ovisno o parametru prigušenja. [17]</i> | <i>23</i> |
| <i>Tablica 6. Parametri zavarivanja svornjaka, primjer svornjak Ø 22 x 175 mm.</i> | <i>24</i> |
| <i>Tablica 7. Opseg ispitivanja i dopuštene greške zavarenih svornjaka. [21]</i> | <i>26</i> |
| <i>Tablica 8 Rezultati mjerenja na uzorku od 6 prizmi [18]</i> | <i>35</i> |
| <i>Tablica 9 Dimenzije obratka i režimi obrade.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tablica 10. Trošenje oštrice na obradku sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]</i> | <i>38</i> |
| <i>Tablica 11. Trošenje oštrice na obradku sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju.</i> | <i>39</i> |
| <i>Tablica 12 Tvrdoća obratka sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]</i> | <i>42</i> |
| <i>Tablica 13 Tvrdoća obratka sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]</i> | <i>43</i> |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------|---------------|--------------------------|
| I_z | A | Struja zavarivanja |
| t_z | s | Vrijeme zavarivanja |
| t_b | s | Vrijeme držanja |
| F_e | N | Sila na elektrode |
| R | Ω | Ukupni otpor |
| S | mm^2 | Površina presjeka vodiča |
| l | mm | Dužina vodiča |
| D | mm | Promjer |

SAŽETAK

U ovom radu je opisan postupak elektrootpornog zavarivanja s naglaskom na zavarivanje svornjaka iskrenjem. Opisane su značajke elektrootpornog zavarivanja kao što su vrste i parametri zavarivanja, geometrija elektroda, materijal elektroda i drugo. Poblize je opisan postupak elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem s praktičnim dijelom gdje je proveden postupak elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem u vodoravnom položaju. Nakon zavarivanja, izvedena su različita dimenzionalna ispitivanja te ispitivanja mehaničkih svojstava te su analizirani rezultati.

Ključne riječi: elektrootporno zavarivanje, zavarivanje svornjaka iskrenjem

SUMMARY

This paper describes the procedure of electroresistance welding with spots. Electro-welding features such as welding types and parameters, electrodes geometry, electrodes material are described. The arc stud welding procedure is described in more detail with the practical part where the welding procedure of the studs was carried out in a horizontal position. After welding, various dimensional tests and mechanical properties tests were performed and results were analyzed.

Key words: electroresistance welding, arc stud welding

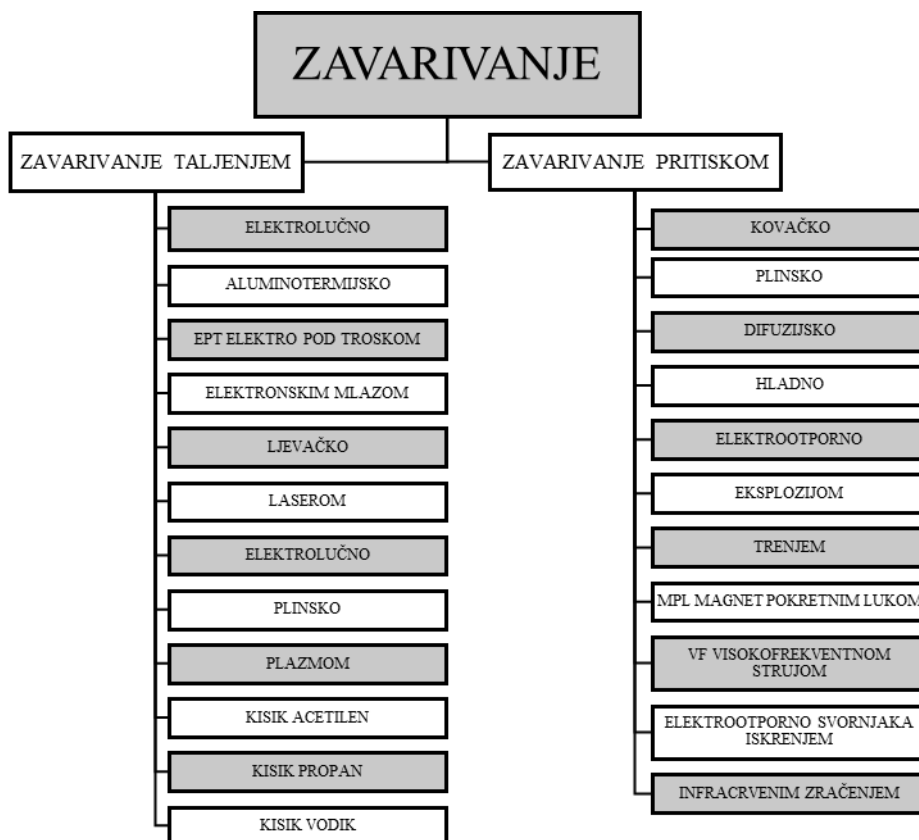
1. UVOD

Zavarivanje je spajanje materijala pri kojem se dijelovi na spojnome mjestu zagriju do omekšanja (plastičnosti) ili se rastale, a spajaju se staljivanjem uz dodavanje ili bez dodavanja materijala. Često se uz zagrijavanje primjenjuje i povećani tlak, dok je zavarivanje bez djelovanja topline rijetko. Zavareni spoj sastoji se od metala zavara (dio materijala koji je prilikom zavarivanja bio rastaljen) i zone utjecaja topline u kojoj zbog povišene temperature nastaju strukturne promjene. Kakvoća i svojstvo zavarenoga spoja ovise o brzini zavarivanja, količini i gibanju taline, miješanju osnovnoga i dodatnog materijala, plinovima koji pri višim temperaturama ulaze u rastaljeni materijal, raspodjeli temperature na mjestu zavarivanja i dr. Zavarivanje je posebno važno u gradnji čeličnih konstrukcija (u brodogradnji, mostogradnji, teškoj strojogradnji), ali zavarivati se mogu osim metala i nemetali.

Postupci zavarivanja razvrstavaju se prema izvoru energije koja se pretvara u toplinu potrebnu za stvaranje spoja, a to može biti plinski plamen, el. luk, plazma, laser, elektronski snop te ultrazvuk. Izvori topline se razlikuju prema snazi, količini topline koja se unosi u osnovni materijal, najvećoj radnoj temperaturi i gustoći toplinskoga toka. U primjeni je više od pedeset različitih postupaka zavarivanja. [1]

Prema načinu spajanja zavarivanje se dijeli u dvije skupine [2] : zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom (*Tablica 1*) dok se odabir postupka provodi ovisno o svojstvima i debljini materijala koji se zavaruju (*Tablica 2*).

Tablica 1. Podjela postupaka zavarivanja [2]



Tablica 2. Postupci zavarivanja u ovisnosti o debljini materijala [3]

| Postupak zavarivanja | Debljina materijala (mm) |
|---|--------------------------|
| Ultrazvučno | do 1 |
| Mikroplazma | 0,25 - 2 |
| Laser | do 3 |
| Elektrootporno točkasto | 0,25 - 5 |
| Plazma | 0,5 - 8 |
| Plinsko (C ₂ H ₂ + O ₂) | 0,5 - 8 |
| MIG | 0,5 - 50 |
| TIG | 4 |
| MAG | 3 |
| REL | 2 |
| EPT | 25 - 450 |
| Aluminotermijsko | >10 |

Kao što je vidljivo u tablici 1 elektrootporno zavarivanje, kao i elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem pripada kategoriji zavarivanja pritiskom, dok je postupak elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem upravo onaj koji će detaljnije biti razrađen unutar ovog završnog rada.

2. OPĆI DIO

2.1. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno zavarivanje jedan je od najčešće korištenih automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja, a obuhvaća grupu postupaka kod kojih se materijal zagrijava toplinom stvorenom električnim otporom. Zavareni spoj nastaje djelovanjem sile na elektrode. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu taljenja, kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Najčešće se koristi izmjenična struja niskog napona i visoke jakosti te kratkog trajanja.

Ovaj postupak zavarivanja pripada skupini postupaka uz djelovanje pritiska, odnosno spajanje metalnih dijelova pritiskom i to bez korištenja dodatnog materijala, za razliku od druge skupine postupaka gdje se zavarivanje izvodi taljenjem, odnosno spajanjem metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spajanja, s korištenjem ili bez korištenja dodatnog materijala te bez djelovanja pritiska ili udaraca.

Elektrootporno zavarivanje je, zahvaljujući niskim troškovima i visokoj učinkovitosti, superiorno ostalim postupcima zavarivanja u vidu zavarivanja tankih metalnih limova. Lako se automatizira i pogodno je za velike serije, odnosno masovnu proizvodnju. Također je pogodno i za manje serije jer se radi o fleksibilnoj tehnologiji i jednostavnoj opremi čiji se radni parametri daju lako podešavati i kontrolirati. Velika pogodnost elektrootpornog zavarivanja je mogućnost zavarivanja velikog broja metalnih materijala. [4]

2.1.1. Vrste elektrootpornog zavarivanja

Elektrootporno se zavarivanje klasificira na nekoliko podvrsta, a to su [4]:

- točkasto,
- bradavičasto,
- šavno,
- sučeljeno i
- indukcijско.

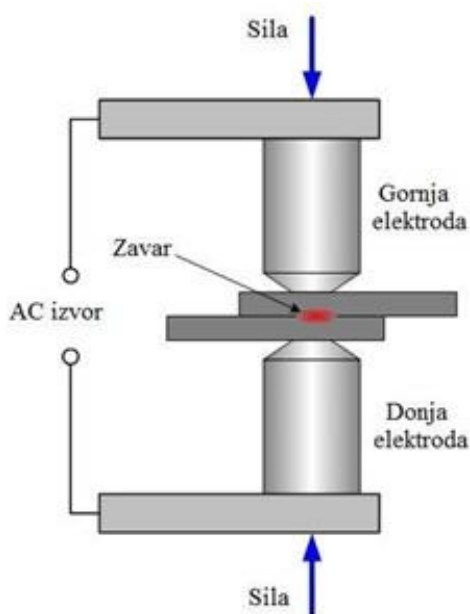
2.1.1.1. Točkasto elektrootporno zavarivanje

Kao što i samo ime kaže, elektrootporno se zavarivanje zasniva na električnom otporu koji uzrokuje tzv. Jouleovu toplinu* između dviju elektroda gdje se nalazi radni komad pritisnut silom F .

Točkasto elektrootporno zavarivanje dijeli se na [5]:

- direktno elektrootporno zavarivanje i
- indirektno elektrootporno zavarivanje.

Shematski je ilustrirano direktno (klasično) elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna nasuprot drugoj pritišćući silom radni komad (*Slika 1*). [5]

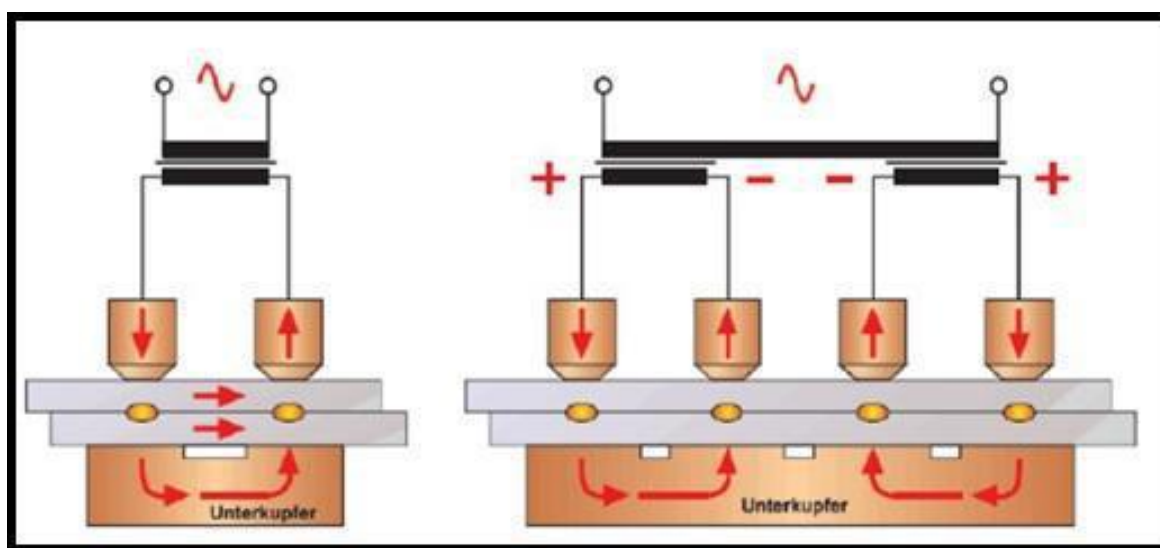


Slika 1. Shematski prikaz direktnog točkastog elektrootpornog zavarivanja [6]

*Jouleova toplina - toplina koju proizvede električna struja prolaskom kroz vodič tijekom nekoga vremena, nazvana po engleskom fizičaru Jamesu Prescottu Jouleu (Salford, 1818. - Sale, 1889.)

Postoji i indirektno elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna pored druge, a ispod njih nalazi se bakrena podloga. Koristi se u slučajevima kada je teško s obje strane direktnim postupkom pritisnuti radni komad.

Na slici 2 ilustrativno je prikazan postupak indirektnog točkastog elektrootpornog zavarivanja, sa lijeve strane jedan par elektroda, a desne više parova elektroda spojenih na zajednički izvor struje za indirektno zavarivanje. [7]



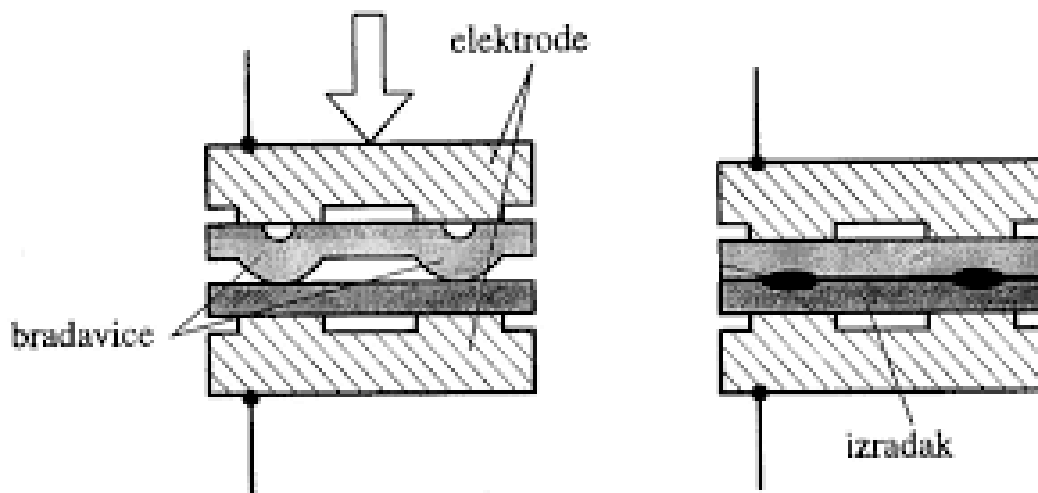
Slika 2. Ilustracija indirektnog točkastog elektrootpornog zavarivanja [7]

2.1.1.2. Bradavičasto elektrootporno zavarivanje

Potreba za što većom proizvodnošću dovela je do razvoja elektrootpornog bradavičastog zavarivanja koje je u osnovi slično kao točkasto zavarivanje, s tim da se na jednom od limova koji se zavaruju prethodno naprave ispupčenja (bradavice) koje naliježu na drugi lim i time određuju put struji u zatvorenom strujnom krugu.

Princip postupka je da u trenutku kada poteče električna struja izbočina se slegne dok se na tom istom mjestu materijal rastali te nastane točkasti zavar (sličan zavaru dobivenom postupkom točkastog zavarivanja).

Na slici 3 prikazana je shema bradavičastog zavarivanja kada se jednim ciklusom ostvare zavari na dva mjesta istovremeno. Moguće je tako odjednom napraviti n zavara. [8]



Slika 3. Shema bradavičastog zavarivanja [8]

Prednost bradavičastog zavarivanja u odnosu na točkasto je u tome što u jednom prolazu nastaje onoliko točaka koliko je bradavica pripremljeno na limu, tj. u većoj proizvodnosti. Osim toga, elektrode traju znatno duže jer nisu opterećene kao kod točkastog.

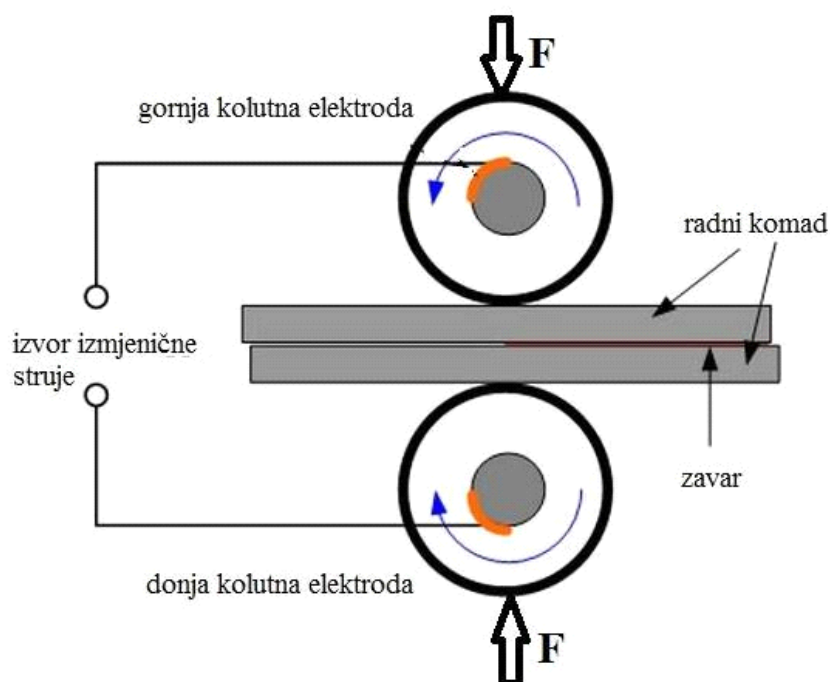
Nedostatak bradavičastog zavarivanja je potreba za velikom snagom i silom pritiska, što dodatno otežava i poskupljuje uređaj za zavarivanje. Kod takovog postupka ujedno se zahtijeva i precizna predpriprema osnovnog materijala (ploča) prije zavarivanja.

Koristi se u strojogradnji za privarivanje vijaka i matica, čepova, kutnika, te u industriji igračaka, bijele tehnike (gdje je zavarivanje u velikim količinama). Metali koji se najčešće zavaruju ovim postupkom su pocinčani limovi, aluminij i bronca. [8]

2.1.1.3. Šavno elektrootporno zavarivanje

Elektrootporno šavno zavarivanje je postupak spajanja metala kombiniranim djelovanjem topline dobivene električnim otporom između dva lima pritisnuta elektrodama u obliku diska (koluta) i sile na njih. Pri tome nastaje spoj (šav) koji se može shvatiti kao niz točaka koje mogu i ne moraju biti djelomično prekrivene tvoreći kontinuirani zavar.

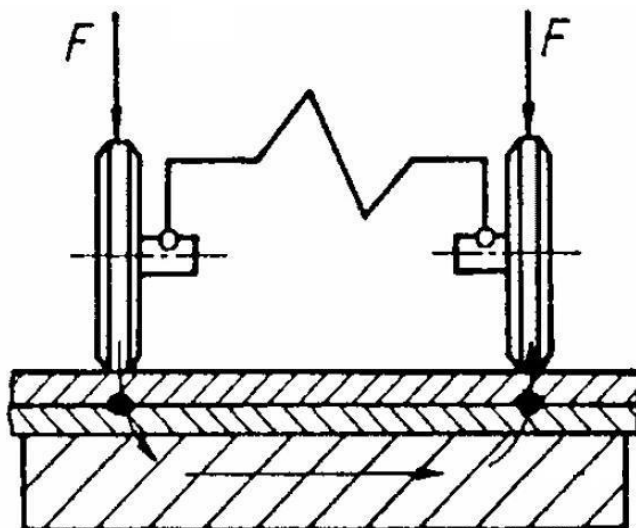
Bitna razlika šavnog zavarivanja u odnosu na točkasto zavarivanje je oblik elektrode (disk umjesto šipke) i njeno rotiranje oko vlastite osi. Osim toga, kod šavnog zavarivanja je neophodno relativno kretanje elektroda i osnovnog materijala u pravcu šava. Na slici 4 prikazan je shematski postupak elektrootpornog šavnog zavarivanja. [6]



Slika 4. Shema šavnog zavarivanja (dvostranog) [6]

Šavno elektrootporno zavarivanje koristi se za privarivanje ojačanja spremnika goriva ili njihovo zavarivanje, zavarivanje karoserija automobila, vagona, cijevi, posuda, bubnjeva strojeva za pranje, radijatora i slično.

U slučaju da nisu pristupačne obje strane radnog komada, šavno se zavarivanje može izvoditi i jednostrano, kako je to prikazano na slici 5. [8]



Slika 5. Jednostrano šavno zavarivanje [8]

Uvjeti zagrijavanja pri šavnom i točkastom zavarivanju imaju dosta toga zajedničkog, kao što je utjecaj intervala vremena u kojem je uključena struja i sile pritiska na karakteristike zavarenog spoja, dok su razlike posljedica kretanja komada u odnosu na elektrodu. Otpor pokretnog kontakta je veći od otpora nepokretnog kontakta što dovodi do intenzivnog izdvajanja topline.

Zbog oštećenja komada i brzog trošenja elektroda neprekidno šavno zavarivanje se rijetko primjenjuje. Stanke kod prekidnog zavarivanja poboljšavaju hlađenje elektroda smanjujući njihovo pregrijavanje. [9]

Osnovni parametri šavnog zavarivanja su [9]:

- sila na elektrode F ,
- jačina i vrijeme djelovanja struje I ,
- promjer i korak elektrode t i
- brzina zavarivanja v .

Sila na elektrode, jačina i vrijeme djelovanja struje povezani su na sličan način kao kod točkastog zavarivanja. Korak diskova (kolutnih elektroda) ovisi o debljini materijala i režimu zavarivanja. Prekomjerno prekrivanje diskova je nepoželjno jer smanjuje čvrstoću spoja. Promjer pojedinih diskova ovisi o debljini materijala, profilu radnog dijela elektroda i režimu zavarivanja. [9]

Uređaji za šavno zavarivanje su slični uređajima za točkasto zavarivanje, s tim da imaju veću snagu i umjesto šipkaste elektrode ona je u obliku diska [10]. Na *slici 6* prikazane su bakrene elektrode u obliku diska, općenito se za elektrode koriste u velikoj mjeri isti materijali kao i kod točkastog zavarivanja.



Slika 6. Bakrene kolutne elektrode za šavno zavarivanje [10]

2.1.1.4. Sučeljeno elektrotoporno zavarivanje

Sučeljeno zavarivanje je postupak kojim se najčešće zavaruju deblji metalni limovi te šipkasti materijal. Radni komadi se stežu čeljustima (elektrodama) i njihovim se dodirom zatvori sekundarni krug struje te se uslijed kontaktnog otpora krajevi počnu zagrijavati i taliti. Naposljetku se pod djelovanjem sile pritiska krajevi sabiju i nastane zavareni spoj.

Sučeljeno zavarivanje može biti [11]:

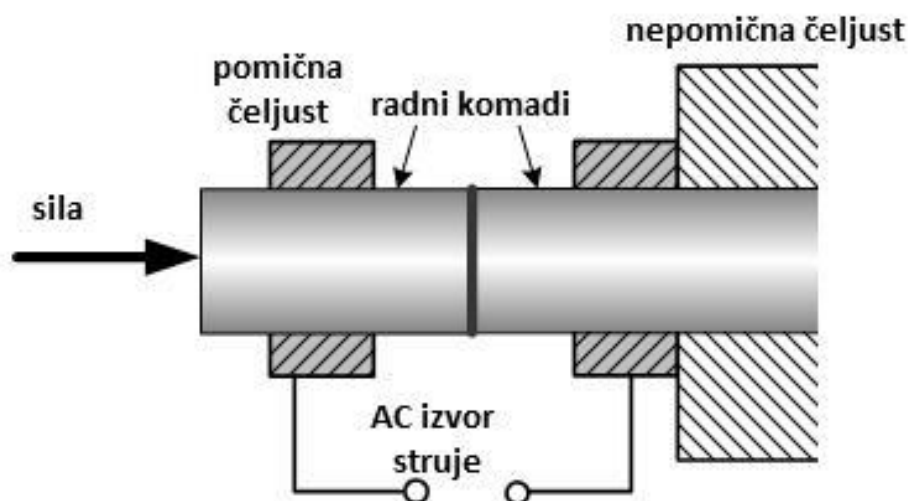
- zavarivanje čistim otporom i
- zavarivanje iskrenjem.

Zavarivanje iskrenjem je malo složeniji proces jer se sastoji od predgrijavanja kod kojeg se primicanjem i odmicanjem čeljusti stvaraju kratki spojevi te su uslijed kontaktnog otpora krajevi radnih komada zagrijavaju. Kada su krajevi, odnosno sučeljene površine radnih komada dovoljno zagrijane, međusobno se približavaju te protječe velika struja zavarivanja uslijed koje nastaje taljenje materijala, a ujedno se javlja i električni luk. [11]

- **Zavarivanje čistim otporom**

Zavarivanje čistim otporom je klasično sučeljeno zavarivanje i predstavlja prvi otkriveni postupak elektrootpornog zavarivanja. Dijelovi koji se zavaruju stežu se čeljustima koje su smještene na pločama od kojih je jedna pokretna. Obje ploče vezane su za krajeve sekundarnog dijela transformatora za zavarivanje. Između čelnih površina radnih komada uspostavi se lagani dodir djelovanjem sile čime se zatvori sekundarni krug transformatora. Nakon toga uspostavi se tok električne struje pri čemu se krajevi radnih komada zagrijavaju na određenu temperaturu i uslijed djelovanja sile sabijaju te nastaje zavareni spoj. [6]

Postupak sučelnog zavarivanja čistim otporom prikazan je na slici 7.

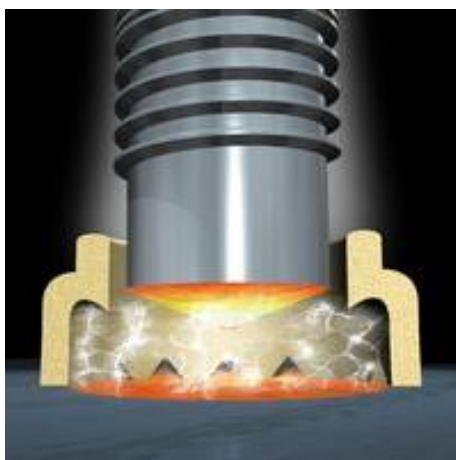


Slika 7. Sučeljeno zavarivanje čistim otporom [6]

- **Elektrootporno zavarivanje iskrenjem**

Kao i kod sučeljenog zavarivanja, kod zavarivanja iskrenjem dijelovi koji se zavaruju stežu se u čeljusti stroja i pomiču jedan prema drugom, ali se strujni krug uspostavlja preko električnog luka kada su dijelovi na nekom razmaku i tek onda se njihove čeon površine priljube.

Pri tome se kontakt uspostavlja samo u pojedinim, istaknutim točkama (zbog neravnina čeonih površina), a gustoća struje dostiže velike vrijednosti uvjetujući topljenje i isparavanje materijala, koji se pod uticajem okolnih elektromagnetnih sila izbacuje iz spoja, zajedno sa nečistoćama i oksidima. Ovaj proces izgleda kao iskrenje, po čemu je postupak dobio ime. Tek kada se dostigne dovoljno zagrijavanje po dužini osnovnog materijala i rastapanje čeonih površina, silom pritiska se ostvaruje spoj uz naglo ubrzanje pomicanja dijelova i ukupno skraćanje zavarenih predmeta. Pri tome se oko spoja formira karakterističan vijenac (Slika 8). [16]

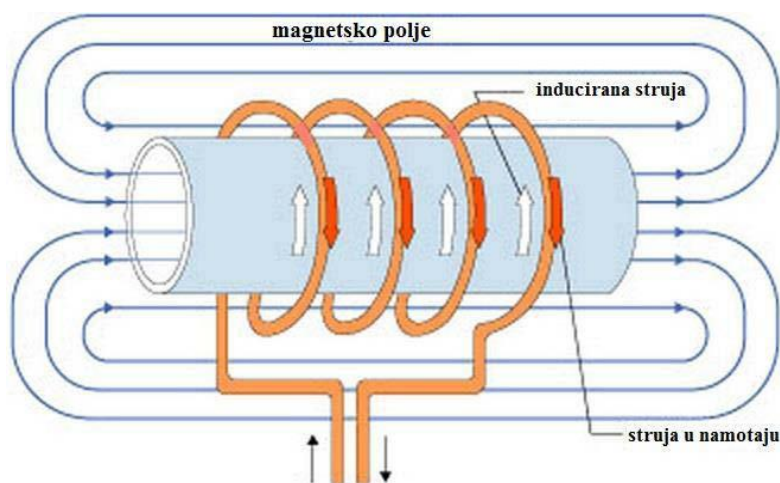


Slika 8. Prikaz elektrootpornog zavarivanja iskrenjem [16]

2.1.1.5. Indukcijsko elektrootporno zavarivanje

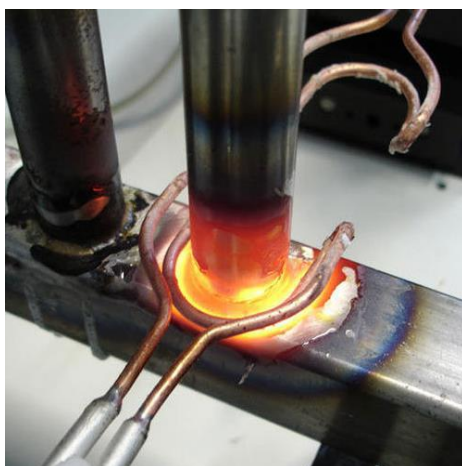
Indukcijsko zavarivanje je vrsta elektrootpornog zavarivanja gdje se mjesto zavora zagrijava visokofrekventnim induciranim strujama kratkog spoja, što ih u zavarivanim dijelovima inducira izmjenično magnetsko polje induksijske zavojnice (induktora). [12]

Na slici 9 shematski je prikazan postupak induksijskog zavarivanja.



Slika 9. Shema induksijskog zavarivanja [12]

Zavarivanje se postiže pritiskom ili bez njega. Visokofrekventna struja stvara jako magnetsko polje, a teče putem najniže induktivnosti. Najgušći tok magnetskih silnica je na mjestu najmanje zračnosti, gdje je i zagrijavanje najveće. Uslijed zagrijavanja dolazi do lokalnog taljenja i omekšanja, te uz djelovanje pritiska do trenutnog spajanja. Primjenjuje se za izradu konstrukcijskih profila, šavnih cijevi, pločastih izmjenjivača topline i drugo. Šavne cijevi se tim postupkom izrađuju iz trake neograničene duljine, namotane na kolut. Prikaz induksijskog zavarivanja u praksi nalazi se na slici 10. [9]



Slika 10. Indukcijsko zavarivanje [13]

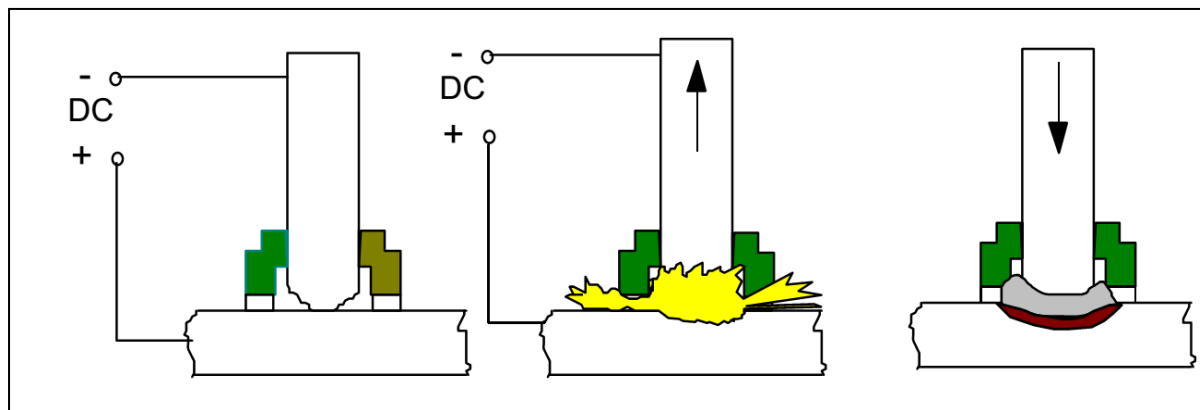
2.2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE SVORNJAKA ISKRENJEM

Postupak elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem visoko je učinkovita metoda zavarivanja za široko područje primjene. Unatoč tome ne susreće se često u našim proizvodnim pogonima, iako je postupak zavarivanja sa stajališta tehnološki vrlo zanimljiv, posebno u brodogradnji, mostogradnji, izradi ostalih čeličnih konstrukcija, proizvodnji opreme, ali i u mnogim drugim granama industrije. Početak primjene ovog postupka veže se za primjenu kod gradnje brodova u brodogradilištima početkom prošlog stoljeća. Konkretno, postupak je primjenjen za postavljanje i fiksiranje drvenih podova i drvene konstrukcije na metalnu konstrukciju unutar broda. Tijekom „svemirske utrke“ 50-tih i 60-tih godina prošlog stoljeća inženjeri američke agencije za istraživanje svemira NASA-e odigrali su ključnu ulogu u usavršavanju procesa i njegovom širenju u svakodnevnu industrijsku uporabu. Danas je tako našao široku primjenu u različitim proizvodnim djelatnostima u građevinarstvu, kotlogradnji, automobilskoj industriji, brodogradnji, mostogradnji i dr. Iako ima više podvrsta ovoga postupka zavarivanja, s obzirom na učestalost primjene u praksi, najrasprostranjeniji je postupak zavarivanja sa keramičkim prstenom.

2.2.1. Općenito o postupku

Princip elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem je u suštini vrlo jednostavan. Postoji nekoliko podvrsta postupka ovisno o tipu izvora energije za zavarivanje, vrsti zaštite mjesta zavarivanja, te obliku i stanju površine vrha svornjaka koji se zavaruje. S obzirom na učestalost primjene u praksi, najrasprostranjeniji je postupak zavarivanja sa keramičkim prstenom. Taj je postupak elektrootpornog zavarivanja shematski prikazan na *slici 11* [10]. Svornjak se stavlja u pištolj koji je sastavni dio uređaja za zavarivanje, potom se na vrh svornjaka postavlja keramički prsten, svornjak sa prstenom se priljubi uz radni komad na kome je predviđeno zavarivanje svornjaka. Nakon toga se u točno određenom trajanju pušta struja, uspostavlja se električni luk, svornjak se malo udalji od radnog komada kako bi se uspostavljenim električnim lukom postiglo ravnomjerno zagrijavanje, lokalno taljenje i omekšanje materijala na mjestu spoja, nakon čega djeluje pritisak u određenom trajanju koji potiskuje svornjak i daje konačni oblik zavarenom spoju. Vrijeme gorenja električnog luka i utiskivanje svornjaka u lokalno rastaljeni i omekšani osnovi materijal se automatski kontrolira pomoću upravljačke jedinice koja je sastavni dio opreme za zavarivanje. Zbog činjenice da je ciklus gorenja električnog luka kod elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem vrlo kratak (vremenski interval gorenja električnog luka ovisi o promjeru svornjaka i orijentacijski iznosi od 0,05 do 2 sekunde, no najčešće se kreće ispod jedne sekunde), to ima za posljedicu

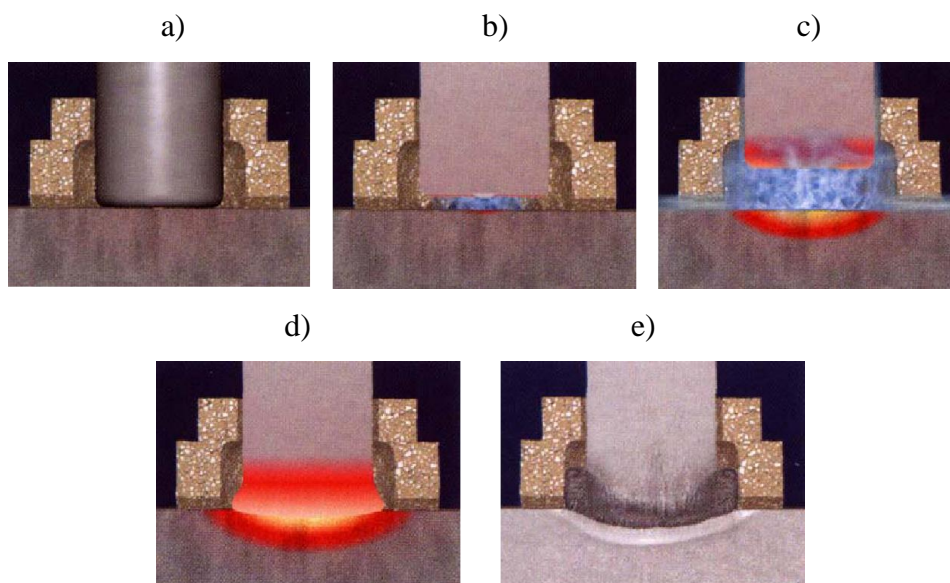
vrlo mali unos topline u zavareni spoj u odnosu na konvencionalno elektro-lučno zavarivanje taljenjem. [10]



Slika 11. Shematski prikaz principa elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem uz primjenu keramičkog prstena [10]

Detalji vezano uz faze nastajanja elektrootpornog zavara svornjaka iskrenjem prikazani na slici 11, koja definira sljedeće faze [10]:

- Svornjak se postavlja na čelo obratka,
- Svornjak je odignut od obratka, struja teče i uspostavlja se električni luk,
- Električni luk topi površine svornjaka i obratka,
- Svornjak se uranja u rastopljenu masu materijala i
- Ostvaren je čvrsti spoj svornjaka i obratka.



Slika 12. Faze elektrootpornog zavarivanja svornjaka – detalji nastajanja zavarenog spoja. [14]

2.2.2. Oprema za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem

Poluautomatski uređaj za zavarivanje svornjaka koji je uzet za primjer sastoji se od:

- izvora struje,
- kontrolno – upravljačke jedinice,
- pištolja za zavarivanje i
- upravljačkih i zavarivačkih kablova.

2.2.2.1. Izvor struje za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem

Izvor struje je trofazni transformator tiristorski upravljan. Opremljen je s mikroprocesorskom kontrolno – upravljačkom jedinicom, koja preuzima ulogu upravljačkog člana s mogućnošću pohranjivanja podataka – parametara zavarivanja za pojedine primjere uspješno zavarenih svornjaka. Izgled izvora struje prikazuje *slika 13*. [15]



Slika 13. Izvor struje za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem [15]

Pošto je u memoriji mikroprocesorske kontrolno – upravljačke jedinice pohranjena baza tehnoloških podataka za pojedine primjere uspješno zavarenih svornjaka (struja zavarivanja, vrijeme gorenja električnog luka, visina napona luka, brzina uranjanja itd.), uređaj pruža mogućnost izbora programa za optimalno zavarivanje svornjaka. Parametri zavarivanja se provjeravaju kod verifikacije postupka zavarivanja i tijekom predviđenih kontrolnih aktivnosti vezano uz kvalitetu zavarenih spojeva. Osnovne karakteristike uređaja za zavarivanje vidljive su u *tablici 3*. [15]

Tablica 3. Primjer karakteristika uređaja za zavarivanje, tip NELSON INTRA 2100 [15]

| | |
|---|--------------------------|
| Područje promjera svornjaka | 8 do 22 mm |
| Priključni napon, 50Hz | 230/400 V |
| Snaga uključujući pričuvu | 2350 A |
| Područje struje zavarivanja (kontinuirano) | 200-2100 A |
| Vrijeme zavarivanja | 0,01-1 s |
| Klasa zaštite kućišta | IP 23 |
| Osigurači | 63 A (380 V) |
| Učinak kod zavarivanja (za \varnothing 16 mm) | 6 kom / min. |
| Priključni kabel na mrežu | 16 mm ² / 5 m |
| Dimenzije (duljina x širina x visina) | 520x750x770 mm |
| Masa | 248 kg |

2.2.2.2. Pištolj za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem

Pištolj za zavarivanje koristi se za uspostavljanje električnog luka između svornjaka i radnog komada te za sjedinjavanje dviju kupki metala (nastale taljenjem vrha svornjaka i područja unutar keramičkog prstena na radnom komadu) uranjanjem svornjaka kontroliranom brzinom u nastalu kupku. Pištolj za zavarivanje ima mikroprocesorski regulirano odizanje klipa koji s mikroprocesorski upravljanim kompaktnim sustavom za zavarivanje (izvor struje) čini potpuno integriranu cjelinu. Odizanje pištolja (lift) i brzina uranjanja (Dmp) više nisu ovisne o uobičajenom mehaničkom sklopu pištolja. Pištolj za zavarivanje svornjaka spojen je sa upravljačkim i zavarivačkim kablovima s kontrolno - upravljačkom jedinicom. Primjer izgleda pištolja za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem prikazan je na *slici 14*.

[15]



Slika 14. Pištolj za zavarivanje svornjaka integriran u izvoru struje za zavarivanje. [15]

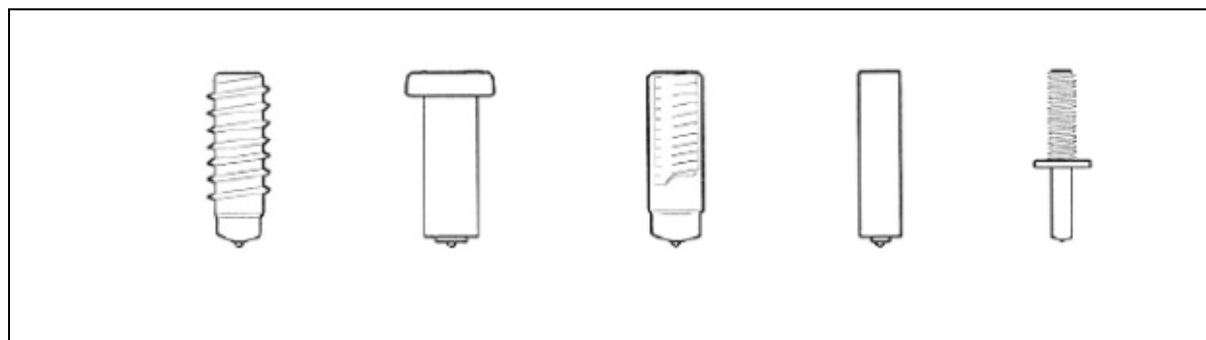
Osnovne karakteristike pištolja prikazane su u tablici 4. [15]

Tablica 4. Primjer osnovnih karakteristika pištolja, tipa NELSON NS 20 HD [15]

| | |
|--|-------------------------------|
| Područje promjera zavarivanih svornjaka | φ 16 do 22 mm |
| Zavarivački kabeli | 120 mm ² / 2 m |
| Upravljački kabeli | 2/6 x 1,0 m / mm ² |
| Težina bez kabela | 3,1 kg |

2.2.3. Svornjaci za elektrootporno zavarivanje iskrenjem

Svornjake obično isporučuje isti proizvođač koji je isporučio i opremu za zavarivanje. Danas postoji više od dvije tisuće različitih vrsta svornjaka za elektrootporno zavarivanje iskrenjem. Neki od tipova svornjaka niže su prikazani na slici 15. [20]



Slika 15. Razni oblici svornjaka [20]

2.2.3.1. Materijal svornjaka za elektrootporno zavarivanje iskrenjem

- **Nelegirani čelici**

Svornjaci s navojem, svornjaci bez navoja i slični elementi za zavarivanje izrađuju se od čelika, klase čvrstoće 4.8 prema DIN EN ISO 898-1 s izvrsnom zavarljivošću.

Mehanička svojstva:

- granica razvlačenja (R_{el}) $\geq 340 \text{ N / mm}^2$,
- vlačna čvrstoća (R_m) $\geq 420 \text{ N / mm}^2$,
- izduženje (A_5) $\geq 14\%$.

Svornjaci mogu biti izrađeni i od S235J2 + C450.

Mehanička svojstva:

- granica razvlačenja (R_{el}) $\geq 350 \text{ N / mm}^2$,
- vlačna čvrstoća (R_m) $\geq 450 \text{ N / mm}^2$,
- izduženje (A_5) $\geq 15\%$.

- **Nehrđajući čelici**

Navojni svornjaci, svornjaci s navojem, svornjaci bez navoja i slični elementi za zavarivanje izrađuju se od A2-50 prema DIN EN ISO 3506-1 (prikladni za zavarivanje).

Mehanička svojstva:

- granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) ≥ 210 N / mm,
- vlačna čvrstoća (R_m) ≥ 500 N / mm,
- izduženje (A_L) $\geq 0,6$ d

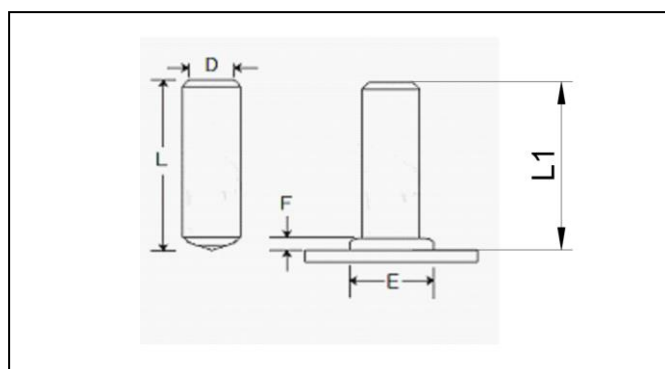
Svornjaci se izrađuju i od ostalih materijala kao na primjer 1.4571, 1.4541 i 1.5415 (16Mo3), aluminij itd.

Specifikacije materijala sukladne su s DIN EN ISO 13918 i DIN EN ISO 14555.

2.2.3.2. Dimenzije svornjaka za elektrotoporno zavarivanje iskrenjem

Dimenzije svornjaka za zavarivanje najčešće su navedene u tablicama proizvođača (dimenzije mogu biti u milimetrima ili inchima). Svi svornjaci standardizirani su prema standardu DIN EN ISO 13918. Posebni elementi za zavarivanje, koji nisu opisani, isporučuju se na zahtjev.

Dimenzije svornjaka definirane su na *slici 16* [15]. Nominalna duljina (L) uvijek odgovara duljini nakon zavarivanja. Ovisno o promjeru, duljina prije zavarivanja (L) je veća kao dodatak za zavarivanje od 1 do 5 mm.



Slika 16. Dimenzije svornjaka [15]

2.2.4. Keramički prsten za elektrootporno zavarivanje svornjaka iskrenjem

Uz svornjake se isporučuju i keramički zaštitni prsteni kao pomoćni materijal. Za zaštitu zavarivačke kupke koriste se keramički prsteni prema EN ISO 1391. Za svaki svornjak koristi se po jedan keramički prsten, čija je uloga da :

- koncentrira električni luk na maleno područje (u zonu zavara),
- smanjuje odvođenje topline i brzinu hlađenja,
- oblikuje zavareni spoj u obliku kružnog vijenca,
- zaštiti zavarivačku kupku od okolne atmosfere i
- djelomično zaštiti operatera od zračenja.

Keramički prsten se mora strogo centrirati u odnosu na vertikalnu os svornjaka. Kosi ili nejednoliki kontakt keramičkog prstena u odnosu na svornjak uzrokuje nejednoliko oblikovani zavar. Zidni položaj zavarivanja (PC položaj sukladno HRN EN 6947) zahtjeva posebnu vrstu keramičkih prstena. Keramički prsteni moraju biti u suhom uskladišteni. U slučaju pojave hladnih pukotina moraju se sušiti 1 sat na temperaturi preko 900°C. Izgled tipičnih keramičkih zaštitnih prstena prikazan je na *slici 17*. [15]

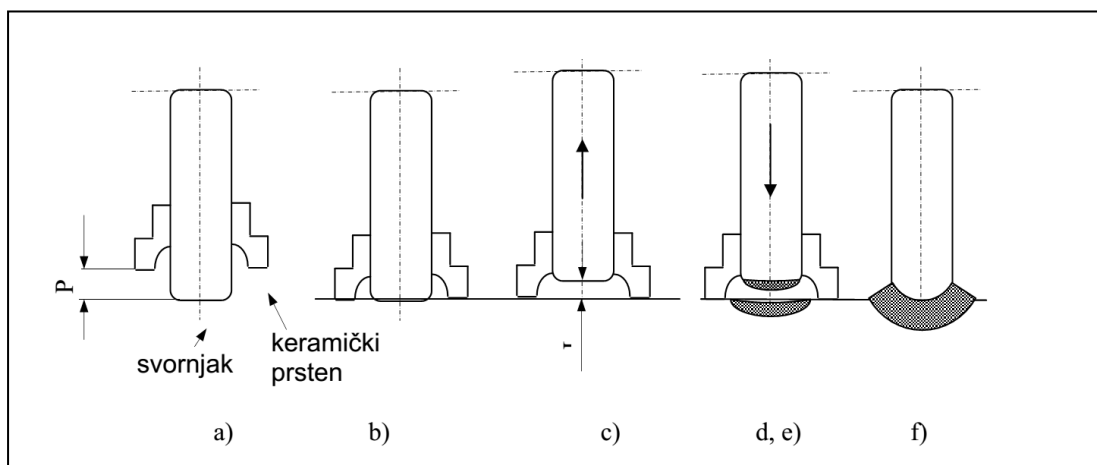


Slika 17. Primjeri keramičkih prstena [15]

2.3. FAZE PROCESA ZAVARIVANJA SVORNJAKA ISKRENJEM

Faze procesa zavarivanja može se pojednostavljeno opisati sljedećim točkama shematski prikazanim na *slici 18*: [10]

- SVORNJAK I KERAMIČKI PRSTEN postavljaju se u poseban držač na vrhu pištolja. Vrh svornjaka viri iz prstena za točno namještenu vrijednost “ P ”.
- SVORNJAK se postavlja na mjesto za zavarivanje. Vrh svornjaka se pri tome uvuče za vrijednost “ P ” čime se stvori određeno prednaprezanje opruge u pištolju.
- PRITISKOM NA MIKROSKLOPKU, pištolj odigne vrh svornjaka od podloge za vrijednost “ L ”. Istovremeno se uspostavlja sekundarni luk koji stvara preduvjete za uspostavu stabilnog primarnog luka.
- PO PRESTANKU SEKUNDARNOG LUKA uspostavlja se primarni luk pri nepromijenjenoj udaljenosti “ L ”. On tali vrh svornjaka i metalnu podlogu.
- PO PREKIDANJU ENERGETSKOG LUKA (PRIMARNI LUK) pištolj “upuca” rastaljeni vrh svornjaka u djelomično rastaljenu i omekšanu podlogu i time se stvara homogeni zavareni spoj
- Nakon hlađenja se odstranjuje keramički prsten.



Slika 18. Faze radnih koraka kod zavarivanja svornjaka poluautomatskim postupkom zavarivanja [10]

2.4. PARAMETRI ZAVARIVANJA

Odabir parametara zavarivanja provodi se:

- iz tablica prema preporuci proizvođača opreme,
- uz pomoć formula za orijentacijski odabir i
- eksperimentalno (vlastite tehnološke probe).

Prema EN ISO 14555 definirani su sljedeći parametri zavarivanja koji imaju bitan utjecaj na tok procesa i svojstva zavarenog spoja:

- **Polaritet**

Kod zavarivanja čelika svornjak je spojen na minus pol (DC -), a obradak na plus pol (DC +). Kod aluminija i njegovih legura, mesinga i sl. bolje se pokazalo zamjeniti polaritet.

- **Struja zavarivanja**

Računa se prema formuli : $I (A) = 80 \times d$ (mm) za svornjake do $d = 16$ mm, a prema formuli : $I (A) = 90 \times d$ (mm) za svornjake veće od 16 mm
Za nehrđajuće čelike koristi se otprilike 10 % manja jakost struje.

- **Napon luka**

Napon ovisi o visini "L" (razmak između vrha svornjaka i površine radnog komada) i jakosti struje zavarivanja. U pravilu se kreće od 20 – 40 V. Nečistoća površine tipa zauljenost ili zamašćenost povećavaju napon, dok ga korištenje zaštitnih inertnih plinova smanjuje.

- **Vrijeme zavarivanja**

Računa se prema formuli: $t_w (s) = 0,02 \times d$ (mm) za svornjake do $d = 12$ mm, te prema formuli: $t_w (s) = 0,04 \times d$ (mm) za svornjake $d > 12$ mm.

Izračunate vrijednosti vrijede za zavarivanje u PA - vodoravnom položaju (prema standardu HRN EN 6947). Za zavarivanje u PC - horizontalnom položaju treba vrijeme smanjiti.

- **Radni dio svornjaka**

Vrijednost "P" (mm) leži u granicama 1 do 8 mm i proporcionalna je promjeru svornjaka. Ova varijabla također ovisi o željenom obliku kružnog vijenca oko

zavarenog svornjaka, obliku baze svornjaka te o obliku zaštitnog keramičkog prstena.

- **Odizanje svornjaka**

Vrijednost “ L ” (mm) leži u granicama 1,5 do 8 mm i proporcionalna je promjeru svornjaka. Veća visina odizanja povećava dužinu električnog luka, a time i njegov napon. Ona je značajna veličina za određivanje načina topljenja vrha svornjaka. Ako je odizanje premaleno povećani broj kratkih spojeva kapljica može poremetiti proces zavarivanja. U slučaju većih odstupanja od optimalnih vrijednosti mogu nastati šupljine u kupki.

- **Brzina “uranjanja “**

Za svornjake $d > 14$ mm uranjanje treba biti prigušeno (usporeno).

Brzina kojom se svornjak uroni (“upuca”) u talinu za $d > 14$ mm iznosi 100 mm/s. To se postiže elektronskom regulacijom brzine uranjanja.

Na uređaju se mogu odabrati četiri razine (0-3). Vrijednost „0“ znači da nema prigušenja, tj. svornjak će se uroniti u kupku bez ikakve kontrole brzine.

Ako je brzina uranjanja premalena to će dovesti do pora ili zajeda u zoni zavara. Ako je brzina prevelika kupka zavara će prskati prema stranama ili prema gore u momentu uranjanja s rizikom blokiranja kretanja svornjaka prema dolje. Ovaj parametar je definiran preko vrijednosti prigušenja (njem. Dämpfung = DMP). U *tablici 5* prikazana je ovisnost brzine uranjanja svornjaka u ovisnosti o parametru prigušenja.

Tablica 5. Brzina uranjanja svornjaka ovisno o parametru prigušenja. [17]

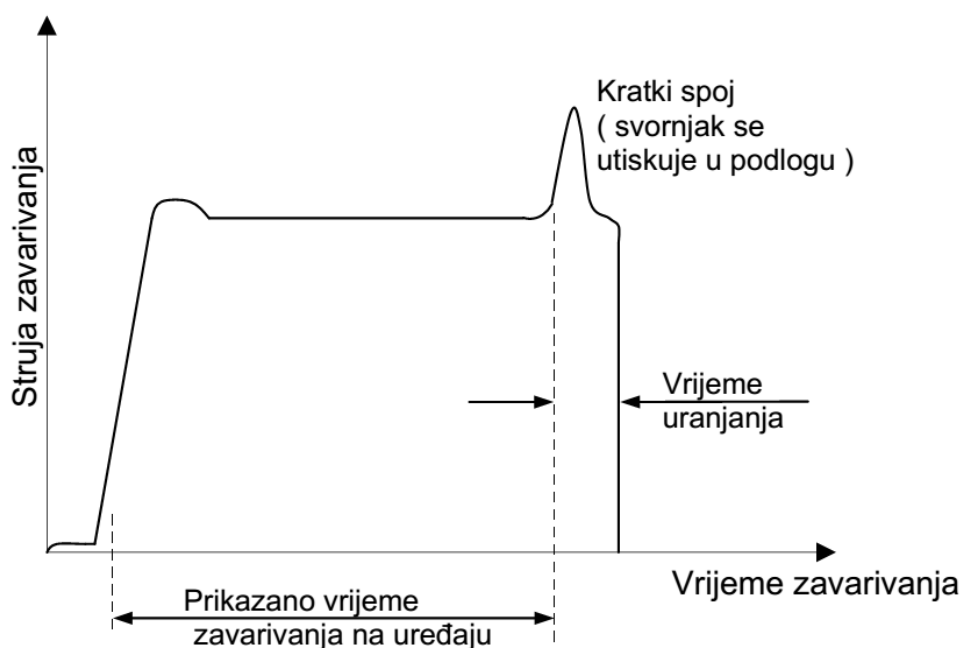
| c | v (mm/s) |
|----------|-------------------|
| 0 | 250-400 |
| 1 | 120 |
| 2 | 60 |

Primjer izračuna vremena uranjanja svornjaka u talinu :

Ako je $L = 4,5$ mm, DMP = 2 (60 mm/s)

$(L / v) \times 1000 = (4,5 / 60) \times 1000 = 75$ ms – vrijeme uranjanja svornjaka u talinu.

Ovisno o vrijednostima odizanja (“ L ”) i prigušivanja stvarno vrijeme zavarivanja će biti duže od nominalnog za vrijeme uranjanja što je vidljivo i prema shematskom prikazu ovisnosti struje i vremena zavarivanja na slici 19 . [10]



Slika 19. Shematski prikaz ovisnosti struje i vremena zavarivanja [10]

U tablici 6 nalaze se parametri definirani na temelju primjera zavarivanja svornjaka dimenzija $\varnothing 22 \times 175$ mm..

Tablica 6. Parametri zavarivanja svornjaka, primjer svornjak $\varnothing 22 \times 175$ mm.

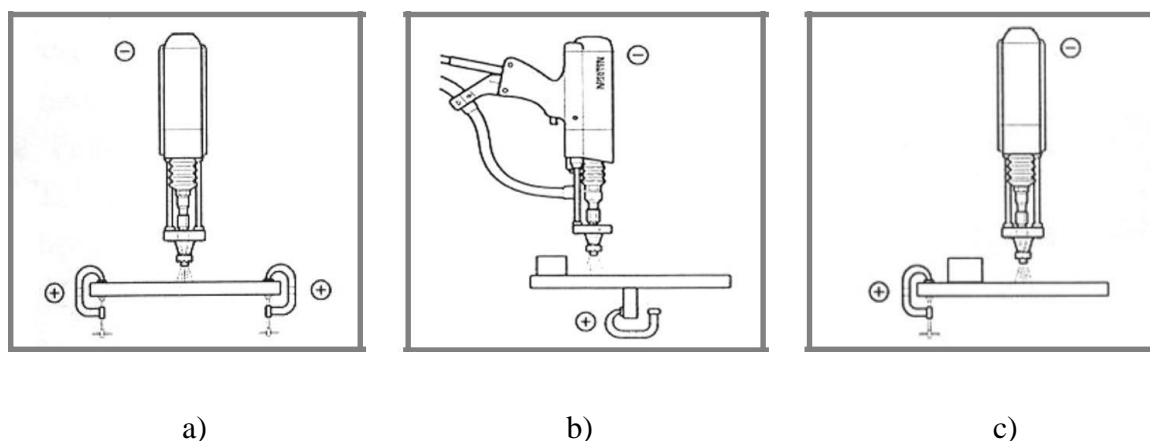
| Prema EN ISO 14555 | Prema preporukama proizvođača opreme |
|--------------------|--------------------------------------|
| $I = 1980$ A | $I = 2000$ A |
| $L = -$ | $L = 4,5$ mm |
| $P = -$ | $P = 5$ mm |
| $tw = 0,88$ s | $tw = 1$ s |
| DMP = 2 | DMP = 2 (3) |

Ako se zavarivanje izvodi često pod istim uvjetima, mogu se odabrani parametri zavarivanja pohraniti u memoriji uređaja, te su sačuvani i nakon isključivanja struje. Pohranjene vrijednosti se mogu jednostavno pozvati na zaslonu uređaja i ponovno koristiti.

2.5. UTJECAJ TOPLINSKOG I MAGNETNOG PUHANJA LUKA

Toplinsko skretanje električnog luka stvara usijani plin koji se pri tome širi i koji ga svojom turbulencijom pomiče iz željenog pravca. Otklanjanje je jako teško i zato se zahtjeva da se svornjaci sa keramičkim prstenom točno centriraju na mjesto zavarivanja.

Magnetno skretanje električnog luka nastaje usljed djelovanja magnetnih i elektromagnetnih utjecaja. Da bi se ta djelovanja otklonila postoji više načina, od kojih će biti spomenuti samo neki.



Slika 20. Ispravljanje utjecaja magnetskog skretanja luka [10]

Da bi se stvorio povoljan položaj električnog luka, mase se postavljaju simetrično u odnosu na mjesto zavarivanja (Slika 20 a). Postavljanjem dodatnih limova na određena mjesta čeličnih profila smanjuju se negativni utjecaji na električni luk (Slika 20 b). Ako se masa postavi sa samo jedne strane, onda je skretanje električnog luka na tu stranu (Slika 20 c). Dodatkom limova taj utjecaj se može eliminirati. [20]

Zbog kratkog vremena zavarivanja od osobite je važnosti čistoća površine za dobivanje zavara prihvatljive kvalitete. Kod površina koje su masne, zahrđale ili premazane temeljnim premazom možda će biti potrebno znatnije produžiti vrijeme zavarivanja, povećati odizanje

svornjaka, te smanjiti struju zavarivanja. Vrh svornjaka se ne smije mehanički oštetiti niti onečistiti (uljem, vlagom ili sl.).

2.6. KONTROLA ZAVARENOG SPOJA

Ispitivanje i kontrola zavarenog spoja uključuje razorne i nerazorne metode ispitivanja u skladu sa normom EN ISO 14555.

Ispitivanje se najčešće sastoji od: [21]

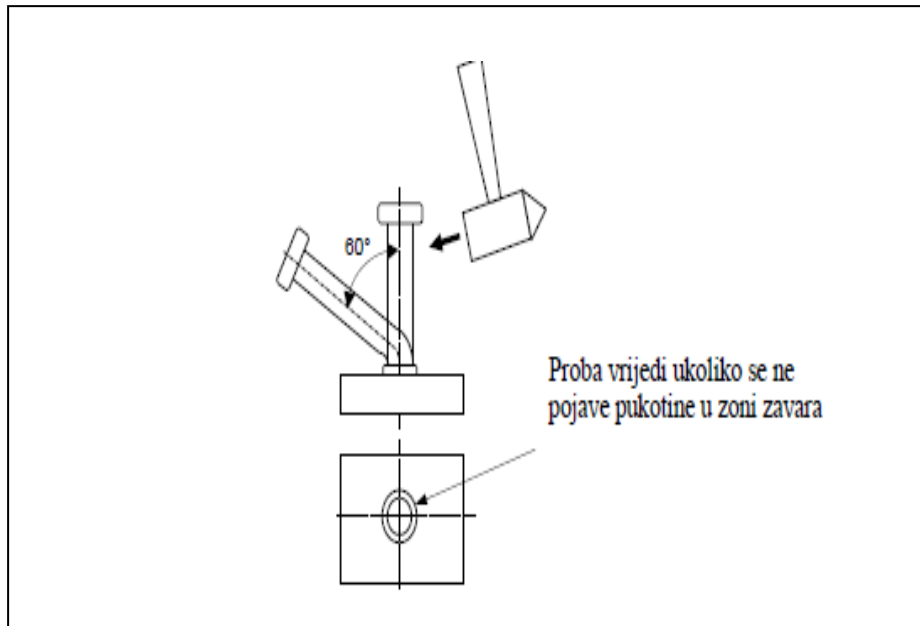
- vizualne kontrole zavarenih svornjaka,
- kontrole savijanjem za 60 stupnjeva,
- kontrole kidanjem ili radiografijom i
- izradom makro izbruska zavara.

U *tablici 7* nalazi se definiran opis kontrole uz opseg ispitivanja zavarenog u ovisnosti od području uporabe te dimenziji zavarenih svornjaka.

Tablica 7. Opseg ispitivanja i dopuštene greške zavarenih svornjaka. [21]

| TIP TESTA | BROJ UZORAKA (n) | | |
|--|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| | PODRUČJE UPORABE DO 100 °C | | PODRUČJE UPORABE ≥ 100 °C |
| | PROMJER ≤ 12 mm | PROMJER ≥ 12 mm | SVI PROMJERI |
| VIZUALNI PREGLED | SVI | | |
| ISPITIVANJE SAVIJANJEM POD 60° | 10 | | N/A |
| ISPITIVANJE SAVIJANJEM UPORABOM MOMENT KLJUČA | | N/A | 10 |
| ISPITIVANJE ČVRSTOĆE | 10 | 5 | x |
| RADIOGRAFIJA | N/A | OPCIONALNO | x |
| METALOGRAFSKO ISPITIVANJE | 2 | | |

Ispitivanje kvalitete zavora svornjaka izvodi se probom savijanja kako je prikazano na slici 21.



Slika 21. Proba savijanja u svrhu ispitivanja kvalitete zavora svornjaka [10]

3. POSTAVKA ZADATKA

Postupkom elektrootpornog zavarivanja iskrenjem izvršiti zavarivanje svornjaka na obratke predviđene za daljnju strojnu obradu u horizontalnom odnosno vodoravnom steznom položaju. Zavareni svornjaci služe kao prihvat u radno vreteno stroja dalje u tehnološkom procesu proizvodnje.

Ispitati sljedeće kriterije :

- pogrešku položaja svornjaka,
- odstupanje dimenzija i kutnosti položaja svornjaka u odnosu na čelo obratka,
- ujednačenost zavara,
- kvalitetu zavara mjerenjem tvrdoće i
- stabilnost svornjaka tijekom glodanja.

Izvršiti sljedeće definirane aktivnosti :

- izrezati sirovac na dimenzije 100 x 60 x 350 mm,
- postaviti obradak i svornjak u vodoravni položaj stezanja
(upotreba stezne naprave proizvođača LANG tip MAKRO GRIP za prihvat obratka i vodoravno zavarivanje svornjaka na slobodno čelo obratka)
- izvršiti mjerenje položaja (mjerenje svornjaka s obzirom na točnost položaja i kutnosti)
- provjeriti kvalitetu zavara ispitivanjem žilavosti i tvrdoće (profil tvrdoće na 3 obratka)
- izvršiti ispitivanje glodanjem svornjaka na u 5-osnom obradnom centru - provjera stabilnosti (vijek trajanja u odnosu na vertikalno zavarene svornjake) i
- analizirati rezultate mjerenja.

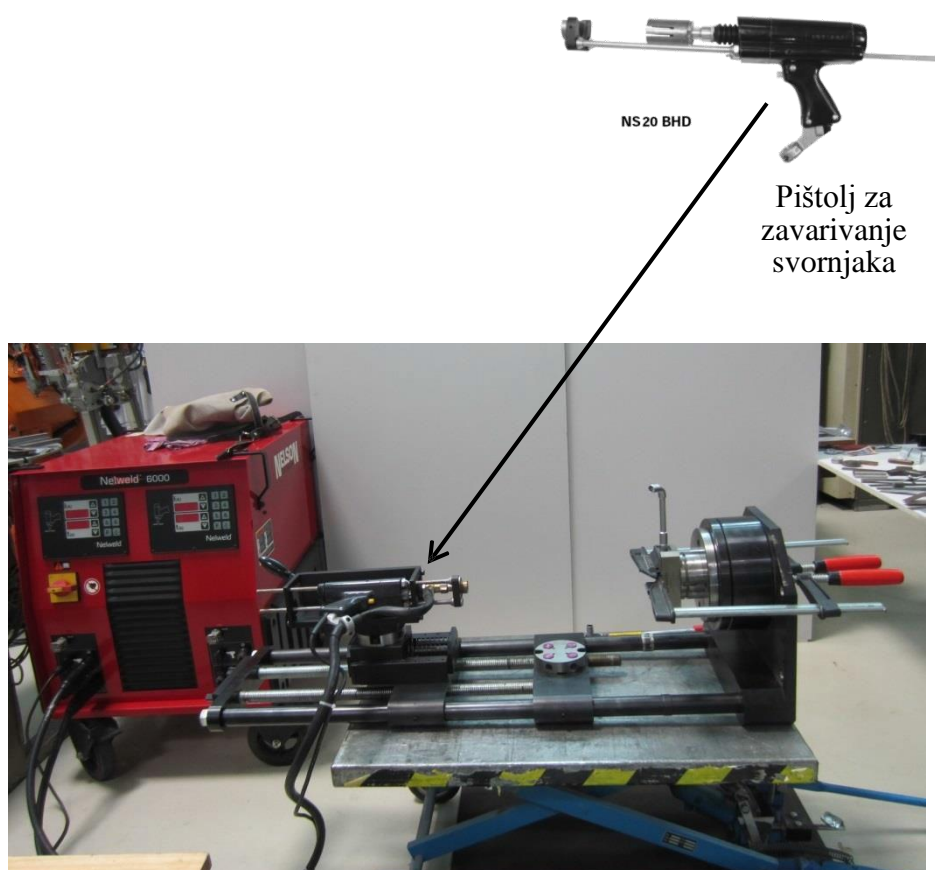
4. RAZRADA ZADATKA

4.1. OPREMA I MATERIJAL KORIŠTEN U POSTUPKU

Za elektrootporno zavarivanje svornjaka na obradak korištena je standardna oprema sa napravom za prihvat obratka postavljenom u vodoravni položaj, prikazano na *slici 22.* [18]

Oprema se sastoji od:

- izvora struje tip NELSON NELWELD 6000,
- pištolja za zavarivanje tip NELSON NS 20 BHS i
- stezne naprave tip LANG MAKRO GRIP na pripadajućem postolju.



Slika 22. Oprema korištena za provedbu eksperimentalnog dijela [18]

Materijal obratka je DIN X22CrMoV12-1 QT1 (WN 1.4923), specijalni legirani martenzitni čelik otporan na puzanje. Vrijednosti tvrdoće po Brinell-u (HB) čelika WN

1.4923 prema atestu proizvođača je 262-277 HB. Dimenzije obratka su 100 x 60 x 350 mm. Stanje polaznog materijala i obrađeni komad prikazano je na *slici 23*. [18]

Stezanje obradaka u 5-osnom obradnom centru:

- A-os stroja : LANG stezaljka za centriranje 77 mm, stezni rub na obratku 3mm
- Strana za zavarivanje : Svornjak D16mm zavaren (13,1 mm u steznoj čahuri)
- Materijal svornjaka : S235 J2G3



Slika 23. Sirovi i obrađeni komad sa zavarenim svornjakom za prihvat u stroj [18]

Stezna naprava Lang Makro Grip predviđena je za stezanje prizmatičnih obradaka kod 5-osne CNC obrade. Odlikuje se malom težinom, velikom silom stezanja te izvrsnom ponovljivošću centriranja obradaka. Korištena naprava prikazana je na *slici 24*. [23]



Slika 24 Stezna naprava Lang Makro Grip [23]

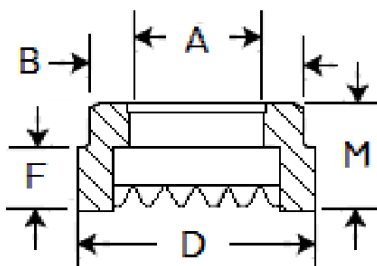
Svornjak promjera D=16 mm biti će kasnije tokaren na promjer D=13,1 mm pošto 5-osni stroj za CNC obradu HAMUEL HSTM 500 B ima prihvat promjera D=13,1 mm. Iz toga

sljedi da je maksimalni otklon položaja svornjaka 1,45 mm. Na *slici 25* definirani su podaci proizvođača za svornjak promjera $D=16$ mm.

| PROMJER SVORNJAKA D | MINIMALNA DUŽINA SVORNJAKA L | ZAVAR mm | DIMENZIJE ZAVARA | | PROMJER LUKA | POTREBAN STANDARDNI PRIBOR | | | |
|------------------------|---------------------------------|-------------|------------------|-----|--------------|----------------------------|-----------|-----------|------------|
| | | | F | G | | KERAMIKA | HVATALJKA | DRŽAČ | EKSTENZIJA |
| 6 | 18 | 2 | 9.10 | 3 | 11.10 | 100101067 | 501001007 | 500001267 | 502001137 |
| 8 | 23 | 3 | 11 | 4 | 12.50 | 100101007 | 501001006 | 500001009 | 502001137 |
| 10 | 23 | 3 | 13 | 4 | 14.50 | 100101037 | 501001008 | 500001269 | 502001137 |
| 12 | 24 | 3 | 16 | 4.5 | 17.50 | 100101027 | 501001009 | 500001206 | 502001137 |
| 16 | 29 | 4 | 21 | 6 | 22.50 | 100101187 | 501001014 | 500001016 | 501001138 |

Slika 25 Tehnički podaci proizvođača za svornjak [15]

U postupku je korišten zaštitni keramički prsten tip NELSON KSN 16, tehnički podaci prikazani na *slici 26*. [15]



| NOMINALNA DIMENZIJA SVORNJAKA | UNUTARNJI PROMJER A | PROMJER VRATA B | VELIKI PROMJER D | VISINA DO VRATA F | UKUPNA VISINA M | KATALOŠKI BROJ KERAMIČKOG PRSTENA |
|-------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 5/8 | 0.625 | 1.030 | 1.150 | 0.339 | 0.526 | 100101187 |

Slika 26 Tehnički podaci proizvođača za keramički prsten [15]

4.2. SKRAĆENI OPIS REDOSLJEDA OPERACIJA

Pripremni radovi za izvođenje postupka zavarivanja svornjaka u vodoravnom položaju :

- izrezivanje prizmi definiranih dimenzija iz šipke,
- umetanje prizmi u Makro Grip (LANG) stezač (jedna strana komada) i
- zavarivanje 6 komada prizmi u vodoravnom položaju (druga strana komada).

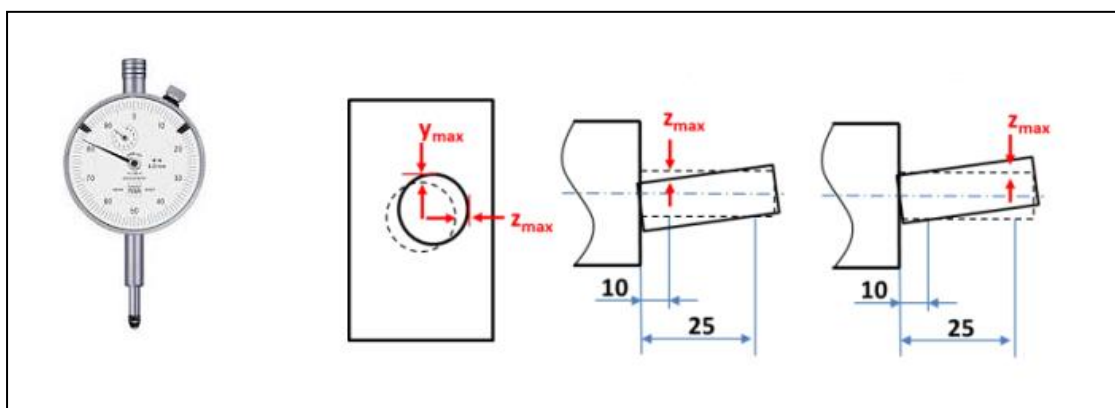
Na *slici 27* prikazan je položaj svornjaka i obratka u trenutku spremnosti za elektrootporno zavarivanje svornjaka u vodoravnom položaju.



Slika 27 Vodoravni položaj svornjaka i obratka [18]

- Mjerenje položaja svornjaka (Slika 28) [18]

Mjeriti će se pomak centra svornjaka po Y i Z osi u odnosu na centar prizme, kao i okomitost svornjaka u odnosu na čelo prizme.



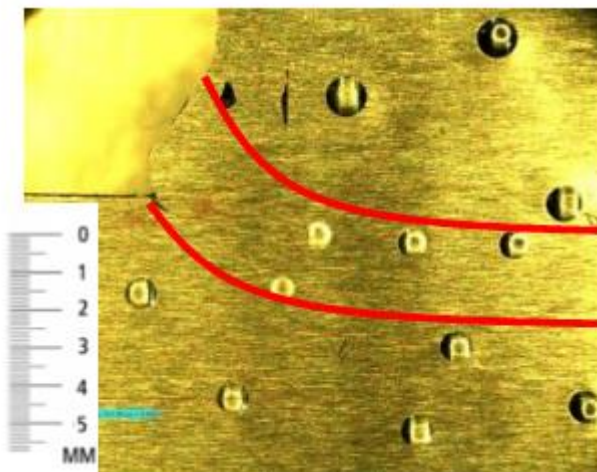
Slika 28 Grafički prikaz dimenzija položaja svornjaka na čelu obratka [18]

- Ispitivanje glodanjem na obradcima sa zavarenim svornjakom izvršeno je na 5-osnom stroju prikazanom na slici 29. [18]



Slika 29 5-osni CNC stroj za obradu tip HAMUEL HSTM B500 [18]

- Mjerenje tvrdoće zavarenog spoja (Slika 30) [18]



Slika 30 Ispitivanje tvrdoće u zonama zavarenog spoja [18]

4.3. VIZUALNI PREGLED UZORAKA NAKON ZAVARIVANJA

Nakon postupka zavarivanja u vodoravnom položaju analizirano je svih 6 uzoraka. Utvrđeno je da su svi obratci zavareni u potpunosti, ali je zavar neujednačeno formiran. Uočeno je da zbog sila teže rastaljeni metal zavara teče ispod vodoravne osi komada. Optički nije uočeno nikakvo izobličenja zavara. Na *slici 31* su vidljivi svi zavareni uzorci. [18]

ZAKLJUČAK:

Svornjak je potpuno, ali neravnomjerno zavaren.

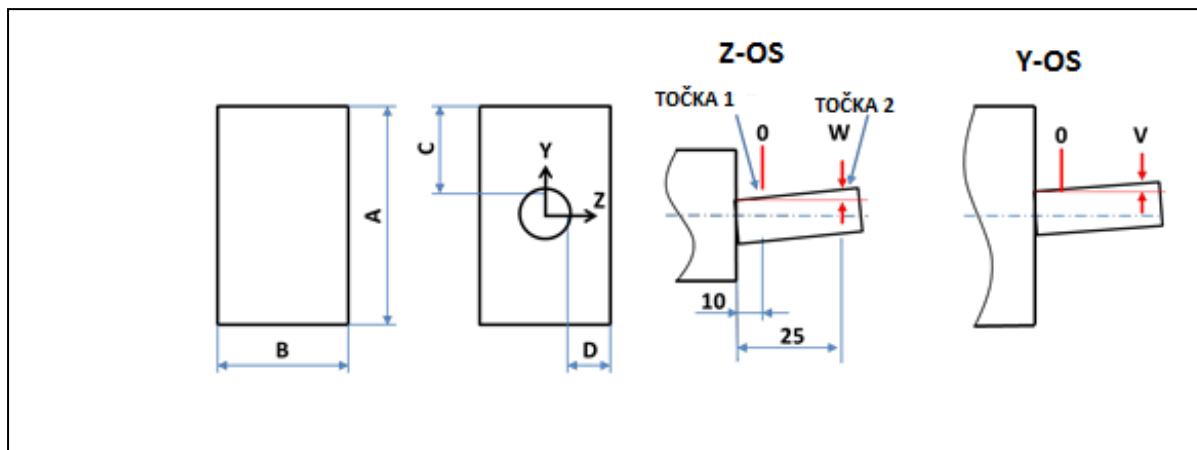


Slika 31 Prikaz uzoraka sa svornjacima zavarenim u vodoravnom položaju [18]

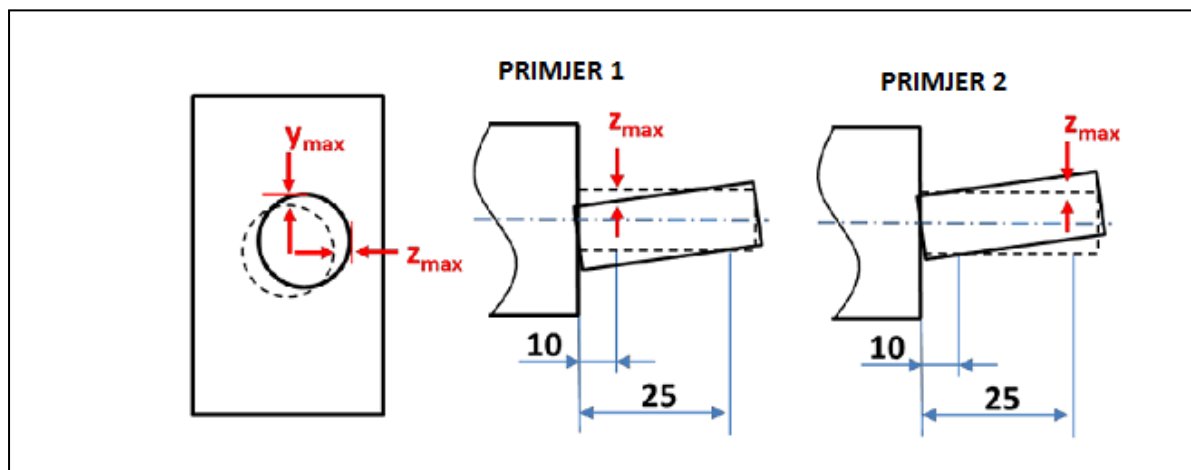
4.4. DIMENZIONALNA KONTROLA NAKON ZAVARIVANJA

Nakon provedenog zavarivanja svornjaka u vodoravnom položaju izvršeno je mjerenje na mjestima kako prikazuju *slika 32* i *slika 33*. Postavljen je komparator na stalku i mjeren je pomak centra svornjaka po Y i Z osi u odnosu na centar prizme u točkama 1 i 2 što je prikazano, kao i okomitost svornjaka u odnosu na čelo prizme, što je prikazano *slikom 32*.

Primjer 1 na *slici 33* pokazuje svornjak unutar tolerirane dimenzije po Z osi, dok primjer 2 na istoj slici pokazuje svornjak van zadanih tolerancija. Rezultati mjerenja definirani su u *tablici 8*.



Slika 32 Mjerna mjesta na Z i Y osi [18]



Slika 33 Mjerna mjesta na Z i Y osi [18]

Tablica 8 Rezultati mjerenja na uzorku od 6 prizmi [18]

| IZMJERE kod vodoravnog zavarivanja svornjaka Ø 16 mm | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------|-------------------------------------|--------|---------------------------------------|--------|---------------------------------------|--------|--|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|--|
| Red. Br. | Dimenzije | | Udaljenost svornjaka od ruba prizme | | Radijalno odstupanje od centra prizme | | Aksijalno odstupanje od centra prizme | | Maksimalno odstupanje od centra prizme | | Maks. dopušteno odstupanje | | Rezultat mjerenja | |
| | A [mm] | B [mm] | C [mm] | D [mm] | Y [mm] | Z [mm] | V [mm] | W [mm] | Y _{istmax} [mm] | Z _{istmax} [mm] | Y _{maxcoll} [mm] | Z _{maxcoll} [mm] | | |
| 1 | 100,3 | 60,1 | 43,0 | 21,2 | -0,85 | 0,85 | 0,02 | 0,17 | -0,85 | 1,02 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| 2 | 100,4 | 60,1 | 42,9 | 21,3 | -0,65 | 0,80 | 0,01 | 0,01 | -0,65 | 0,81 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| 3 | 102,0 | 60,6 | 43,6 | 21,7 | -0,60 | 0,60 | -0,01 | 0,19 | -0,61 | 0,79 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| 4 | 102,2 | 60,6 | 43,8 | 21,6 | -0,65 | 0,75 | -0,02 | 0,26 | -0,67 | 1,01 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| 5 | 102,1 | 60,5 | 44,0 | 21,5 | -0,95 | 0,75 | 0,06 | 0,09 | -0,95 | 0,84 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| 6 | 102,1 | 60,5 | 43,4 | 21,4 | -0,30 | 0,90 | -0,03 | 0,28 | -0,33 | 1,18 | ±1,45 | ±1,45 | DOBAR | |
| STANDARDNA DEVIJACIJA | | | | | | | 0,03 | 0,09 | 0,20 | 0,14 | | | | |

ZAKLJUČAK:

Svih 6 zavarenih svornjaka je unutar dopuštenog odstupanja po Y i Z osi ($\pm 1,45$ mm). Postupak zavarivanja u vodoravnom smjeru je temeljem rezultata mjerenja s postojećim uređajem za zavarivanje prikladan za uporabu.

4.5. ISPITIVANJE ZAVARA GLODANJEM

Cilj ispitivanja je usporedba trošenja slobodne površine na alatu nakon grubog glodanja jednog komada obratka sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju i glodanja jednog komada obratka sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju. Pretpostavka je da je to trošenje mora biti podjednako ili isto. Na *slici 34* vidimo pripremljen uzorak obratka sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju, dok na *slici 35* vidimo pripremljeni uzorak sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju. [18]



Slika 34 Obradak sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]



Slika 35 Obradak sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]

Glodanje je vršeno na stroju tipa HAMUEL HSTM 500. To je 5-osni obradni centar s horizontalnom orijentacijom komponenti posebno pogodan za strojnu obradu turbinskih i kompresorskih lopatica, bliskera / rotora i / ili ventilatora radijalnog kompresora. Klizne staze su pod kutom od 45° prema naprijed kako bi se osigurala optimalna raspodjela mase, ima izvrsne mogućnosti utovara i izvrstan pogled na radno područje. Spomenuti obradni centar prikazan je na slici 36. [19].



Slika 36 Obradni centar HAMUEL HSTM 500 [19]

Za glodanje je korištena glodača glava tip Walter F2334.B.040.Z04.06 (Slika 37) [22] sa pripadajućim pločicama WSP ROHX1204M0-F67 WSP45 (Slika 37) [22].



Slika 37 Glodača glava Walter F2334.B.040.Z04.06 sa pločicama WSP ROHX1204M0-F67 WSP45 [22]

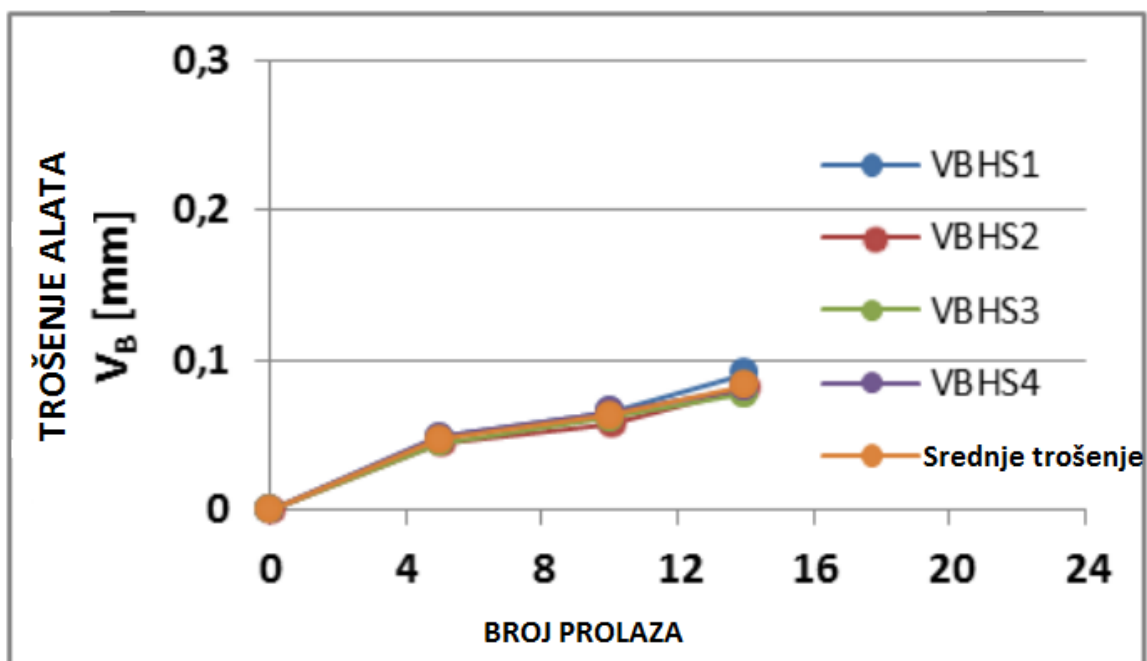
Prilikom obrade korišteni su režimi navedeni u *tablici 9*.

Tablica 9 Dimenzije obratka i režimi obrade

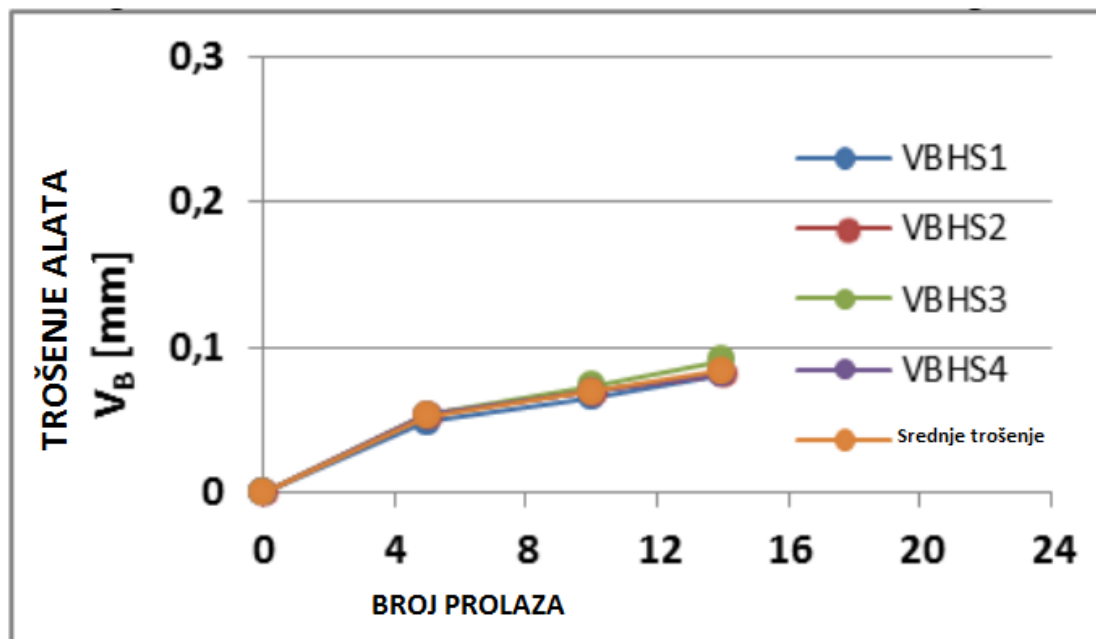
| Obradak Rh06 | |
|-------------------------------|---|
| Početni materijal | X22CrMoV12-1 QT1 |
| Dimenzije početnog materijala | 365x100x60 |
| Masa početnog mat. [kg] | 17,08 |
| Volumen [cm ³] | 1.480 |
| Tip obrade | Grubo glodanje |
| Zadani režimi obrade | $v_c=280\text{m/min}$, $f_z=0,4\text{mm}$, $a_p=3\text{mm}$, $a_e=66-100\%D_c$ KSS- Koncept: MMKS |
| Stezanje obratka | A-os: Stezač "Lang" Glava: zavareni svornjak |

Dobiveni podaci grafički prikazani su tablično gdje je trošenje oštrice prikazano u ovisnosti o broju prolaza alata i to na obradku sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju (*Tablica 10*) [18] i na obradku sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju (*Tablica 11*) [18].

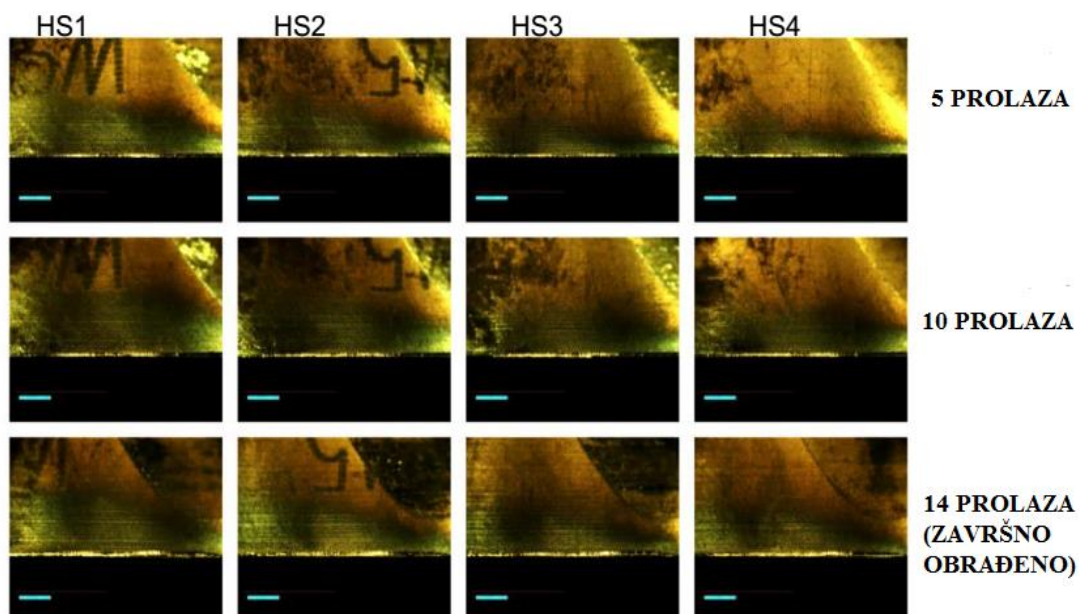
Tablica 10. Trošenje oštrice na obradku sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]



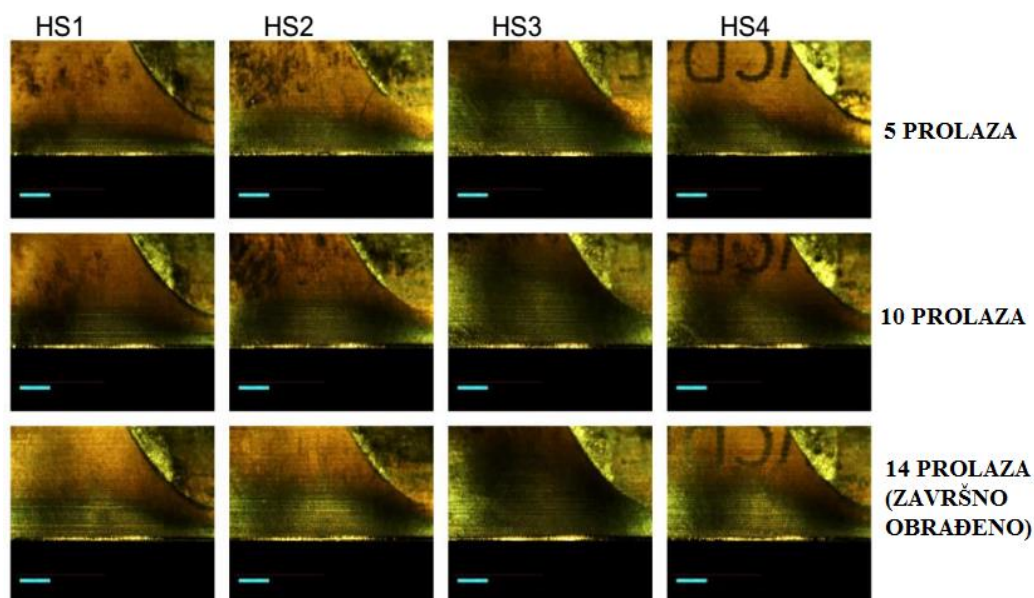
Tablica 11. Trošenje oštrice na obradku sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]



Fotografije oštrica uzete su nakon određenog broja prolaza alata, gdje je trošenje na obradcima sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju (Slika 38) [18], a trošenje na obradcima sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju (Slika 39) [18].



Slika 38 Trošenje oštrice alata ovisno o broju prolaza na obradcima sa pinom zavarenim u okomitom položaju [18]



Slika 39 Trošenje oštrice alata ovisno o broju prolaza na obradcima sa pinom zavarenim u vodoravnom položaju [18]

ZAKLJUČAK:

Nema značajne razlike u trošenju alata između dvije varijante koje su obrađivane, jedne sa svornjakom zavarenim u vertikalnom položaju, druge sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju, koje se mogu otkriti. Potvrđeno je da svornjak zavaren u vodoravnom položaju osigurava stabilno učvršćenje obratka tijekom cijelog procesa glodanja.

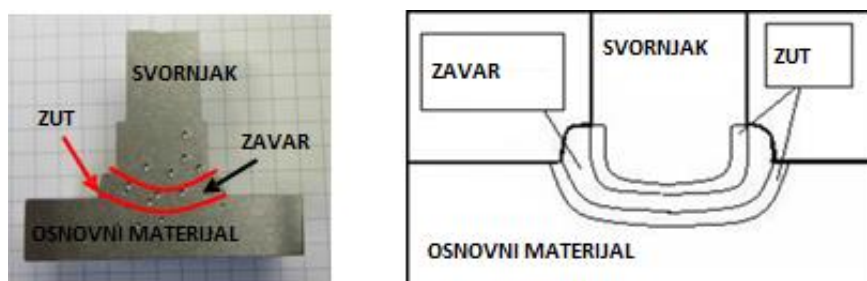
4.6. ISPITIVANJE TVRDOĆE NA ZAVARENIM UZORCIMA

Tvrdoća je ispitana metodom Brinell-a strojem HBW2,5/187,5 kuglicom promjera 2,5 mm i ispitnom silom od 1839 N. Korištni stroj za ispitivanje tvrdoće prikazan je na *slici 40*. [18]



Slika 40 Stroj za ispitivanje tvrdoće HBW 2,5/187,5 [18]

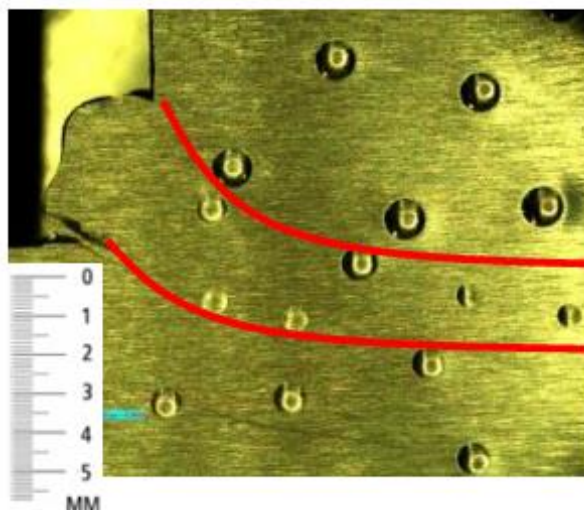
Presjek obratka sa zonama mjerena tvrdoće i shematski prikaz zona (*Slika 41*). [18]



Slika 41 Ispitani uzorak i shematski prikaz zona zavara [18]

Zone mjerenja tvrdoće dane su (*Slika 42*) [18] za obradak sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju i (*Slika 43*) [18] za obradak sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju, a rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće uzoraka prikazani su u *tablici 12* [18] za

obradak sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju te *tablici 13* [18] za obradak sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju.

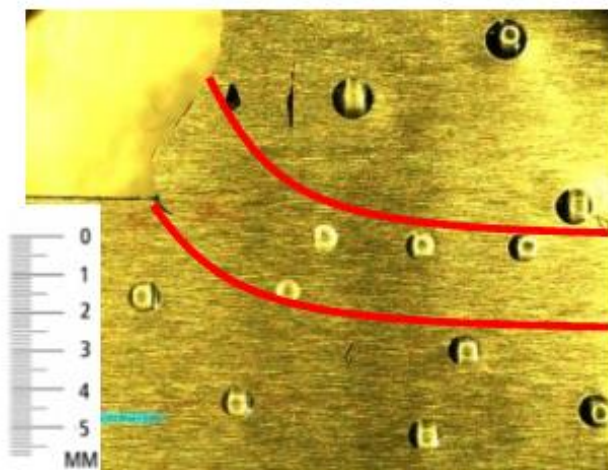


Slika 42 Mjerenje tvrdoće na obratku sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]

Tablica 12 Tvrdoća obratka sa svornjakom zavarenim u okomitom položaju [18]

| Izmjerena tvrdoća [HB] | | | |
|------------------------|-------|----------------------|------------------------|
| ZAVAR | **ZUT | OSNOVNI MATERIJAL | MATERIJAL SVORNJAKA |
| 311 | 458 | 273 | 166 |
| 303 | 510 | 273 | 167 |
| 393 | 444 | 270 | 158 |
| / | 523 | 268 | 164 |

**ZUT – Zona utjecaja topline



Slika 43 Mjerenje tvrdoće na obratku sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]

Tablica 13 Tvrdoća obratka sa svornjakom zavarenim u vodoravnom položaju [18]

| Izmjerena tvrdoća [HB] | | | |
|------------------------|-------|----------------------|------------------------|
| ZAVAR | **ZUT | OSNOVNI MATERIJAL | MATERIJAL SVORNJAKA |
| 338 | 424 | 269 | 176 |
| 327 | 504 | 263 | 165 |
| 325 | 406 | 268 | 168 |
| 342 | / | 270 | 157 |

ZAKLJUČAK:

Nema značajnih razlika u pogledu vrijednosti tvrdoće i profila tvrdoće između dvije varijante koje se mogu detektirati. Na području ZUT-a pojavljuju se najviše vrijednosti tvrdoće.

Za obje varijante na radnom komadu mora biti osiguran dodatak od 5 mm tako da je moguće ukloniti točke stezanja nakon glodanja izvan zavara ili ZUT-a u osnovnom materijalu.

5. ANALIZA REZULTATA

Eksperimentalno zavarivanje svornjaka elektrootpornim načinom u vodoravnom položaju dalo je sljedeće zaključke:

- Svih 6 zavarenih svornjaka je unutar dopuštenog odstupanja u odnosu na Y i Z os ($\pm 1,45$ mm)
- Svornjaci zavareni u vodoravnom položaju omogućavaju sigurno i stabilno stezanje obratka tijekom procesa glodanja
(Istrošenost alata tijekom obrade analogne je obradi poziciji sa svornjacima zavarenim u okomitom položaju)
- Vrijednosti tvrdoće i njen raspored usporedive su sa svornjacima zavarenim u okomitom položaju
- Promjer PIN-a bi trebao biti oko 3 mm veći od dimenzije stezne čahure u obradnom centru (dovoljan dodatak za obradu kao kompenzacija procesa zavarivanja i netočnosti položaja zavarivanja)
- Jednostavno pozicioniranje i mogućnost poravnanja
- Metal rastaljenog zavara teče prema dolje zbog sile teže i dovodi do nepravilnijeg zavarivanja u usporedbi s okomitim postupkom zavarivanja

6. ZAKLJUČAK

Nakon detaljnog opisivanja svih značajki elektrootpornog zavarivanja svornjaka iskrenjem obavljen je i postupak zavarivanja svornjaka u vodoravnom položaju. Tehnološki razlog zavarivanja svornjaka u vodoravnom položaju nalazimo kod zavarivanja svornjaka na dugačke prizme gdje vertikalni položaj može predstavljati ograničenje glede ukupne visine opreme za zavarivanje. Koristeći LANG MAKRO GRIP stezne naprave na podnožju obratka, rezultati mjerenja položaja svornjaka, vrijednosti i profila tvrdoće te stabilnosti stezanja u grubom glodanju pokazuju da postupak zavarivanja svornjaka u vodoravnom položaju daje praktički istovjetne rezultate kao i postupak zavarivanja svornjaka u okomitom položaju. Time pokazujemo da je postupak jednakovrijedan i kao takav može biti korišten bez ograničenja u proizvodnji.

PRILOZI

- I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66965> (preuzeto 23.1.2019)
- [2] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [3] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> (preuzeto 23.01.2019)
- [4]<http://www.welding.com/articles/introduction-to-resistance-welding/> (preuzeto 23.1.2019)
- [5]Guidelines For Resistance Spot Welding - Miller
- [6]http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw(preuzeto 23.1.2019)
- [7]Doc.dr.sc. I. Garašić: Prezentacija elektrootporno zavarivanje; ZiM, PS, PZ
- [8]<http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf>
- [9]Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000
- [10]Mustapić, I, Samardžić I, Klarić Š: Tehnologična primjena elektrolučnog postupka zavarivanja svornjaka u mostogradnji
- [11]<http://www.premieringots.in/prd/seam-welding-electrodes.jpg> (preuzeto 21.1.2019)
- [12]Z. Kordić, Elektrootporno zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb, 1987.
- [13] http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSm_rZvm4uxQHCBYseXOdrhKvmX5Loq-M-9s50AxUfIHhjEScRJ (preuzeto 18.1.2019)
- [14] Köco – Bolzenschweissen, prospekt proizvođača opreme za elektrootporno zavarivanje svornjaka.
- [15]Nelson stud welding, Stud, Ferrule & Accessory Catalog 2017
- [16]<http://www.constud.ca/ca/1177/products/continental-studwelding/equipment-and-accessories/arc-stud-welding/> (pristupljeno 25.1.2019)
- [17] Koster & Co. GmbH, tehnička dokumentacija tvrtke
- [18] „Optimierung PIN-Schweissen in horizontaler lage“, materijali tvrtke „Alstom“, 2014
- [19] <https://iniram.com/hamuel-hstm-series/> (preuzeto 19.2.2019)
- [20] Mihailo Krstić: Elektrootporno zavarivanje zavrtnja i moždanika, Stručni rad, Beograd 2004
- [21] ISO 14555: Welding-Arc stud welding of metallic materials, Second edition 2006-10-01

[22]<https://www.walter-tools.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/product-innovations-18-2-highlight-en.pdf>

[23]<http://www.lang-technovation.com/en/artikel/gruppen/65340.makro-grip-5-axis-vise.html>
(preuzeto 19.2.2019)