

# Analiza mikrostrukture limova za autoindustriju spojenih točkastim zavarivanjem

---

**Dervić, Dorian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:334434>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Dorian Dervić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Dorian Dervić

ANALIZA MIKROSTRUKTURE LIMOVA ZA AUTOINDUSTRIJU SPOJENIH  
TOČKASTIM ZAVARIVANJEM

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

prof. dr. sc. Zoran Glavaš - predsjednik  
doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član  
izv. prof. dr. sc. Stjepan Kožuh - član  
izv. prof. dr. sc. Ljerka Slokar - zamjenski član

Sisak, srpanj 2018.

## *Zahvala*

*Ovim putem zahvaljujem se svima koji su svojim prijedlozima i savjetima pomogli u izradi ovog rada. Hvala mojoj obitelji, djevojci, prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja. Posebna zahvala ide mojoj voditeljici doc. dr. sc. Martini Lovrenić-Jugović i Željku Grubišiću mag. ing. met. na pomoći, vodstvu i strpljenju koju su mi pružili.*

## SAŽETAK

### ANALIZA MIKROSTRUKTURE LIMOVA ZA AUTOINDUSTRIJU SPOJENIH TOČKASTIM ZAVARIVANJEM

U radu je dan teorijski pregled postupaka elektrootpornog zavarivanja s detaljnijim opisom postupka elektrootpornog točkastog zavarivanja. Opisan je osnovni fizikalni princip elektrootpornog zavarivanja te je istaknut utjecaj ključnih parametara na kvalitetu zavarenog spoja. Navedeni su uređaji i vrste elektroda primijenjeni kod elektrootpornog točkastog zavarivanja. Opisan je proces formiranja točkastog zavara i navedene su njegove karakteristične strukture.

U eksperimentalnom dijelu rada izrezane su trake limova različitih proizvođača motornih vozila (Opel, Peugeot i Toyota) i u uzdužnom smjeru trake na četiri mjesta zavarene elektrootpornim točkastim zavarivanjem. Nakon zavarivanja traka, limovi su rasječeni po sredini zavarenog spoja, zaliveni u vodljivu masu, brušeni i polirani te je provedena metalografska analiza osnovnog lima i zavarenih limova na mjestu točkasto zavarenog spoja. Nakon provedene diskusije rezultata metalografskih ispitivanja zaključilo se da se prijenosnim uređajem za točkasto zavarivanje mogu postići mikrostrukturne karakteristike zavarenog spoja koje se postižu boljim uređajima s mogućnostima regulacije ulaznih parametara.

**Ključne riječi:** elektrootporno točkasto zavarivanje, čelični limovi, autoindustrija, mikrostruktura

## SUMMARY

### ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF STEEL SHEETS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY JOINED BY SPOT WELDING

The paper provides a theoretical overview of electric resistance welding procedures with a more detailed description of the electric resistance spot welding procedure. The basic physical principle of electric resistance welding is described and the influence of key parameters on the quality of the welded joint is emphasized. Devices and types of electrodes used for electric resistance spot welding are mentioned. A process of the formation of a spot welded joint is described and its characteristic structure are mentioned.

In the experimental part, the strips of sheets of various motor vehicle manufacturers (Opel, Peugeot and Toyota) are cut and in the longitudinal direction of the strip in four places by electric resistance spot welding are welded. After welding the strips, the sheets are cut off at the centre of the welded joint, suffused in the conductive mass, grinded and polished and a Metallographic analysis of the base sheet and welded sheets on the point of the spot welding joint are performed. After conducted discussion of the results of the metallographic tests, it was concluded that the portable spot welding device could achieve the microstructural characteristics of welded joints which are achieved by better devices with the possibilities of regulation of the input parameters

**Keywords:** electric resistance spot welding, steel sheets, automotive industry, microstructure

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o zavarivanju .....	2
2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE.....	4
2.1. Točkasto zavarivanje.....	6
2.2. Bradavičasto zavarivanje .....	6
2.3. Šavno zavarivanje .....	7
2.4. Sučeljno zavarivanje .....	7
3. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE.....	9
3.1. Elektrode i uređaji.....	10
3.2. Proces formiranja točkastog zavara .....	12
3.3. Struktura točkastog zavara.....	13
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	14
5. REZULTATI I DISKUSIJA .....	20
6. ZAKLJUČAK.....	24
7. LITERATURA .....	25

# 1. UVOD

Razvoj sigurnosti automobila napreduje velikom brzinom, a konačan cilj razvoja aktivnih i pasivnih sigurnosnih sustava je promet bez nesreća ili nesreće sa što manjim posljedicama. Nakon pogibije Ayrtona Senne 1994. u Imoli učestalo su se pri konstrukciji i proizvodnji automobila počele koristiti deformacijske zone. Karoserija nije samo lijepo oblikovana hrpa lima već ima odgovornu ulogu štititi putnike i nositi kompletno opterećenje. Nekada je kabina ležala na šasiji, na kojoj su bili učvršćeni kotači, motor i mjenjač, pa se takav automobil praktički mogao voziti i bez kabine koja se samo vijcima pričvrstila na šasiju.

Današnje karoserije su sve samonoseće, tj. na njima su učvršćeni svi dijelovi pogonskog mehanizma i donjeg postroja. Svi profili i sva ojačanja prostudirani su do krajnjih granica kako bi karoserija bila čim homogenija, ali i mekana na onim mjestima gdje to mora biti. Takva mjesta ili deformacijske zone služe da prilikom sudara apsorbiraju energiju i ne dozvole direktan udar i pomicanje u putničkom prostoru. Današnja vozila su već dostigla takav nivo zaštite da se i prilikom udara velikom brzinom u prepreku, kod smrskanog prednjeg kraja vrata mogu normalno otvoriti. Sama izrada karoserije danas je povjerena robotima pri čemu su postignute takve točnosti i brzina zavarivanja, da čovjek to jednostavno više ne može stići. Duboko vučeni komadi lima točkastim se zavarivanjem spajaju u konačan oblik karoserije.

U današnjoj industriji automobila proizvođači koriste, za izradu karoserija, čelike različitih gradacija čvrstoće od mekih do onih ultra visoke čvrstoće, aluminijske i magnezijeve ljeveve te razne polimerne materijale [1]. Na slici 1. prikazani su materijali korišteni u izradi rešetkaste karoserije.



Slika 1. Primjer materijala u izradi samonosive rešetkaste karoserije (Volvo, V60) [1]

Kako je spomenuto, većinu spajanja dijelova karoserije obavljaju roboti točkastim zavarivanjem, a zbog povećanja preciznosti i kvalitete zavarenih spojeva koriste se sofisticirani uređaji za točkasto zavarivanje, kojima se mogu postići posebni zahtjevi pri proizvodnji. Međutim, kod reparaturnih radova nakon oštećenja karoserije koriste se prijenosni uređaji za točkasto zavarivanje. U eksperimentalnom dijelu ovog rada korišten je prijenosni uređaj kojim se točkasto zavarivao lim izrezan iz vrata automobila, koji je kod većine proizvođača sličnih svojstava.

Veći dio karoserijskih elemenata na automobilu (nosivi profili, poklopac motora, vrata, krov, prtljažnik...) izrađen je postupkom dubokog izvlačenja. Duboko izvlačenje predstavlja proces obrade materijala deformacijom, kod kojeg se oblik predmeta dobije istovremenim savijanjem i istežanjem. Ovim postupkom se od lima zahtijevane kvalitete i dimenzija, a kvadratnog, kružnog, pravokutnog ili nekog drugog oblika u hladnom stanju dobiva prostorna forma posuda, kutija, dijelova auto karoserija. Dubokim izvlačenjem oblikuju se limovi debljine 0,02- 50 mm na strojevima poput koljenastih, hidrauličkih i ekscentar preša. Kako bi se umanjilo trenje između lima i alata, lim se podmazuje uljem ili tankim slojem masti [2].

Dubokim izvlačenjem karoserijskih dijelova u ovisnosti o deformiranosti materijala, u navedenim dijelovima postoje zaostala naprezanja. Uslijed hladne deformacije dolazi do znatnog povećanja tvrdoće i otpora prema deformaciji. Pri odabiru limova koji su korišteni u završnom radu pazilo se da izrezani dio lima bude iz nedeformirane zone pa je zbog toga izabran ravni dio sredine prednjih vrata od 3 različita proizvođača osobnih automobila (Opel, Peugeot i Toyota).

### 1.1. Općenito o zavarivanju

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj [3]. Prema načinu spajanja zavarivanje se dijeli u dvije skupine [4]: zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom (tablica 1), a odabir postupka provodi se ovisno o svojstvima i debljini materijala koji se zavaruju (tablica 2).

Tablica 1. Podjela postupaka zavarivanja [4]

Zavarivanje taljenjem	Zavarivanje pritiskom
Elektrolučno	Kovačko
Aluminotermijsko	Plinsko
EPT- elektro pod troskom	Difuzijsko
Elektronskim mlazom	Hladno
Ljevačko	Elektrootporno
Laserom	Eksplozijom
Plazmom	Trenjem
Elektrolučno	MPL- magnet pokretnim lukom
Plinsko	VF- visokofrekventnom strujom
Kisik acetilen	Elektrolučno svornjaka
Kisik propan	Infracrvenim zračenjem
Kisik vodik	

Zavarivanje taljenjem je zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja uz dodatni materijal ili bez njega, dok je zavarivanje pritiskom zavarivanje materijala u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja s pomoću pritiska ili udara [3].



Tablica 2. Postupci zavarivanja u ovisnosti o debljini materijala [5]

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 <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> )	0,5 - 8
MIG	0,5 - 50
TIG	4 - 10
MAG	3 - 50
REL	2 - 150
EPT	25 - 450
Aluminotermijsko	>10

Prema tablici 1 elektrootporno zavarivanje spada u kategoriju zavarivanja pritiskom, a sam postupak točkastog zavarivanja korišten je u eksperimentalnom dijelu završnog rada.

## 2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno zavarivanje je jedan od najstarijih postupaka zavarivanja, koji i danas nalazi primjenu u modernoj industriji. To je postupak zavarivanja kojim se materijal zagrijava toplinom koja se stvara električnim otporom, a zavareni spoj nastaje pod djelovanjem sile zbog pritiska između elektroda [6]. Izvor struje za ovo zavarivanje je transformator koji je spojen primarnim namotajem na gradsku mrežu (230/380V), a na sekundaru dobivamo napon od 1 do 15 V i struju koja je u rasponu od nekoliko ampera do nekoliko tisuća ampera. Ovaj tip zavarivanja koristi se u zrakoplovnoj industriji (u putničkom zrakoplovu ima do milijun elektrootpornih zavarenih spojeva), automobilskoj industriji (u automobilu je preko 15000 elektrootporno zavarenih točaka), nuklearnoj, raketnoj, svemirskoj tehnici, te se koristi za izradu strojeva i aparata.

Elektrootporno zavarivanje u industriji automobila primjenjuje se pri proizvodnji: spremnika za gorivo, dijelova ispušnih sustava, prstenastih prirubnica za putničke automobile i teretna vozila te za spajanje većine elemenata karoserije. Ovaj postupak zavarivanja u modernoj autoindustriji je automatiziran i robotiziran zbog ubrzanja proizvodnog procesa, povećanja preciznosti izrade, ali i zbog smanjenja radne snage. Svoju primjenu ova vrsta zavarivanja nalazi i u vojnoj industriji za zavarivanje: stabilizatora avionskih bombi, sanduka za municiju, pješačkih mina, zavarivanje oružja (automatski pištolji, mitraljezi).

Osnovni parametri elektrootpornog zavarivanja su [8]:

- električni napon,
- jakost električne struje,
- sila na elektrode,
- vrijeme zavarivanja,
- oblik elektrode,
- izbor materijala elektrode.

Struja i pritisak pomažu u stvaranju topline u zavaru, a vrijeme određuje izgled te veličinu zavara.

Ostali parametri koji utječu na kvalitetu zavara su [9]:

- debljina radnih komada i njihov oblik (geometrija),
- električni otpor materijala radnih komada,
- toplinska vodljivost materijala,
- stanje kontaktne površine komada (nečistoće, razni oksidi, hrapavost),
- mehanička i metalurška svojstva materijala,
- kemijski sastav,
- vrijeme držanja sile na elektrodama,
- mogućnost toplinske obrade prije i nakon zavarivanja,
- oblik strujnih impulsa.

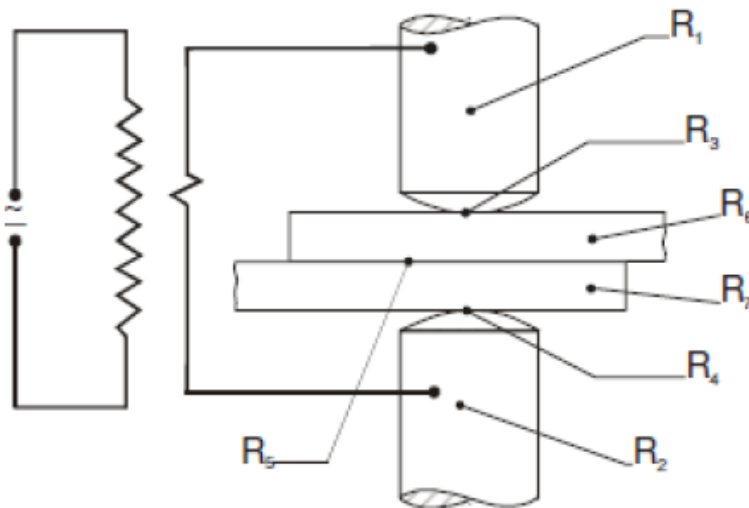
U bilo kojoj točki strujnog kruga jakost struje je ista, a nastala toplina je direktno ovisna o otporu na pojedinom mjestu. Na taj se način može po želji u strujnom krugu proizvoditi toplina, dok drugi dijelovi ostaju relativno hladni.

Unutar sekundarnog strujnog kruga toplina se ne razvija samo na dodirnim mjestima limova (gdje je najveća) nego i na elektrodama, zbog čega se moraju i hladiti. Količina nastale topline kod elektrootpornog zavarivanja ovisi o [6]:

- 1) električnom otporu materijala koji se zavaruje,
- 2) otporu kontaktnih površina komada koji se zavaruje,
- 3) otporu materijala elektroda.

Jakost struje najviše utječe na stvaranje topline. Pritisak utječe na otpor te je veća jakost struje što je veći pritisak.

Veliku ulogu u elektrootpornom zavarivanju ima otpor. Na slici 2 prikazane su sve vrste otpora koji se javljaju između materijala i elektroda pri zavarivanju.  $R_1$  i  $R_2$  čine otpor materijala gornje i donje elektrode,  $R_3$  i  $R_4$  otpor kontaktne plohe između materijala i elektroda,  $R_5$  je kontaktni otpor između dva materijala,  $R_6$  i  $R_7$  su vlastiti otpori materijala. Vrlo je važno da kontaktni otpor bude što veći između materijala, a manji između materijala i elektroda, zbog toga da se elektrode što manje zagrijevaju [9].



Slika 2. Vrste otpora tijekom elektrootpornoga zavarivanja [9]

Ovaj postupak zavarivanja vrlo je brz i efikasan te daje vrlo kvalitetne spojeve. Prednost elektrootpornog zavarivanja je relativna jednostavnost postupka. Može se postići visoka produktivnost rada automatizacijom i robotizacijom procesa. Nije potrebna dugotrajna obuka za operatere, niti upotreba dodatnog materijala i zaštitnih plinova. Malene su deformacije zbog koncentriranog unosa topline te zbog kratkog vremena zagrijavanja, a samim tim vrlo je uska i zona utjecaja topline. Postupak je siguran zbog struje niskog napona, te je ekološki prihvatljiv. Nedostaci ovog postupka su visoka cijena održavanja opreme i uređaja, trošenje elektroda, ograničenje debljine materijala koji se zavaruju (najčešće do 5 mm).

Elektrode za elektrootporno zavarivanje imaju više električnih i mehaničkih uloga: prenose električnu struju na komade koji se zavaruju i određuju količinu struje na dodirnoj površini, preko njih se prenosi pritisak, odvođe toplinu iz zone zavara kako bi se spriječilo pregrijavanje i topljenje površine komada te održavaju komad u odgovarajućoj poziciji.

Greške koje se javljaju u zavarima su: pukotine, poroznost, uključci troske i oksida. Greške ovog tipa nemaju znatan utjecaj na kvalitetu zavara ako se nalaze u njegovoj sredini, dok na površini imaju. Vrlo često se poroznost nastala zbog zagrijavanja i neodgovarajućeg pritiska, kao i prijevremenog prestanka pritiska zavarivanja nalazi u sredini zavara. Poroznost se može eliminirati sporijim zagrijavanjem, većim pritiskom i smanjenjem najviše temperature [6].

Postoje više postupaka elektrootpornog zavarivanja, a najčešće korišteni su [7]:

- točkasto,
- bradavičasto,
- šavno te
- sučeljno.

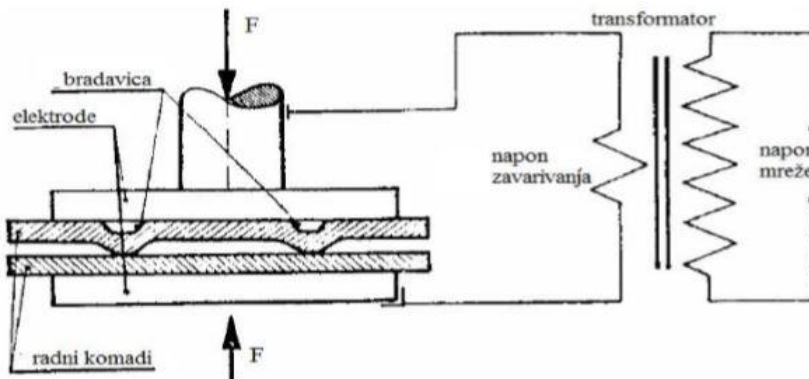
## 2.1. Točkasto zavarivanje

Točkasto zavarivanje primjenjuje se najčešće od svih elektrootpornih zavarivanja i to za zavarivanje ugljičnih i visokolegiranih čelika, Ni legura, a mogu se zavarivati i Al legure. Prije samog postupka zavarivanja limovi moraju biti očišćeni od nečistoća i oksida. Točkasto zavarivanje je preklopno zavarivanje kod kojeg struja prolazi kroz dvije elektrode između koje su smješteni limovi koji se na mjestu dodira zbog velikog otpora zagrijavaju. Može biti jedнотоčkasto ili više točkasto, direktno ili indirektno.

Više o ovom načinu zavarivanja bit će spomenuto u poglavlju 3.

## 2.2. Bradavičasto zavarivanje

Elektrootporno bradavičasto zavarivanje je vrlo slično točkastom zavarivanju. Na limu koji se zavaruje prethodno se naprave ispupčenja (bradavice). Pločastim elektrodama pritisnemo limove koje spajamo i nakon zagrijavanja nastaju spojevi na mjestu ispupčenja (slika 3). Njegova prednost u odnosu na točkasto zavarivanje je izrada više zavara odjednom što ovisi o broju pripremljenih bradavica na limu. Elektrode se manje troše jer nisu toliko opterećene kao kod točkastog ili šavnog zavarivanja. Potreba za velikom snagom i silom pritiska je nedostatak bradavičastog zavarivanja što poskupljuje sam uređaj za zavarivanje [6].

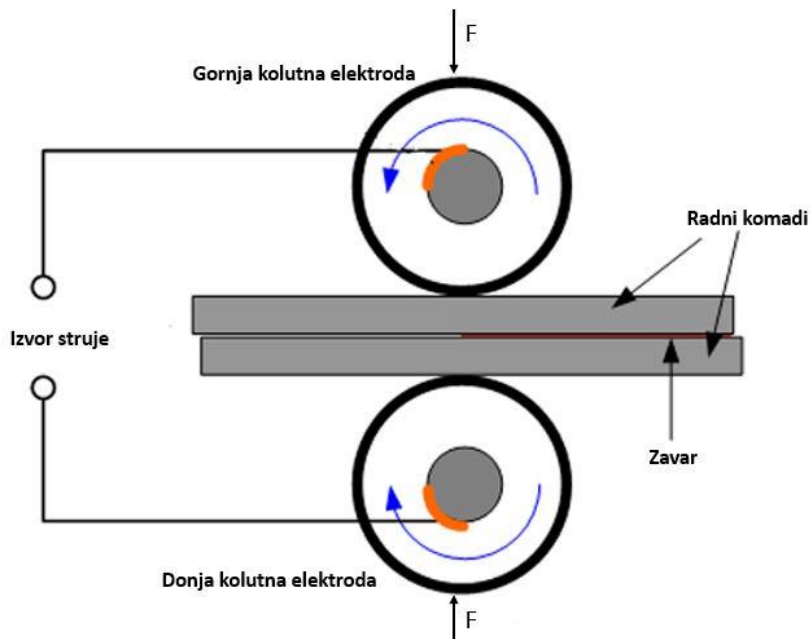


Slika 3. Bradavičasto zavarivanje [6]

### 2.3. Šavno zavarivanje

Šavno zavarivanje je preklopno zavarivanje dvaju dijelova pomoću bakrenih elektroda u obliku koluta (diska), koji zavarivane dijelove pritišću s obje strana i istovremeno se pomiču, dok preko njih na mjestu dodira, neprekidno ili u prekidima, protječe električna struja zavarivanja (slika 4) [10]. U ovom postupku zavarivanje se vrši neprekidno, a šav je kvalitetan i nepropustan.

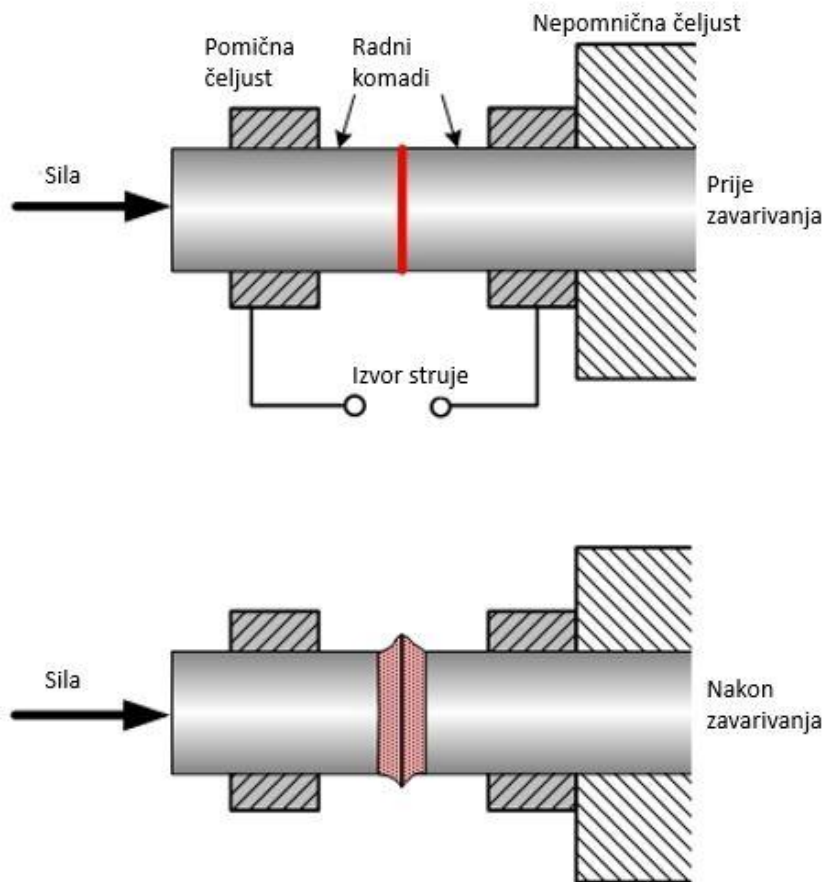
Ova vrsta zavarivanja može se izvoditi dvostrano ili jednostrano ako nisu pristupačne obje strane. Šavno zavarivanje rijetko se primjenjuje zbog oštećenja komada i brzog trošenja elektroda [6].



Slika 4. Šavno zavarivanje (dvostrano) [11]

### 2.4. Sučeljno zavarivanje

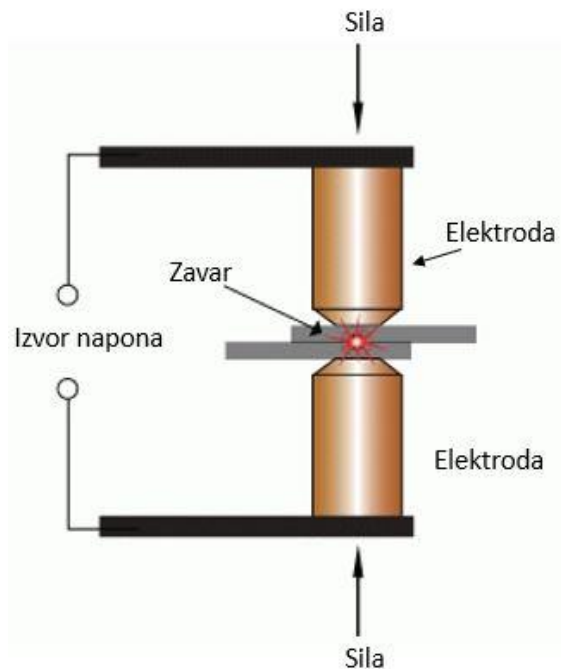
Kod ovog načina zavarivanja dijelovi koji se zavaruju imaju oblik traka ili štapa. Aktiviranjem sile pritiska na zavarene dijelove u sučeljnopoložaju (slika 5) stvara se tlak na dodirnom mjestu te se određeno vrijeme kroz njih propušta električna struja. Nastaje zadebljani zavareni spoj zbog nastale topline i tlaka. Zavarivanje može biti zavarivanje čistim otporom i zavarivanje iskrenjem. Upotrebljava se za zavarivanje cijevi, lanaca, karika, žice itd. [9, 10].



Slika 5. Sučeljno zavarivanje [12]

### 3. ELEKTROTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE

U poglavlju 2.1. spomenuto je kako je elektrootporno točkasto zavarivanje najčešće korišteni postupak za spajanje tankih dijelova, obično limova iz ugljičnih i visokolegiranih čelika. Zavar nastaje samo u točki dodira preklopljenih limova smještenih između dviju elektroda koje ih pritišću i kroz koje se pušta struja. Prestankom djelovanja struje te pritiskom elektroda dolazi do spajanja u obliku točke što se može vidjeti na slici 6.



Slika 6. Prikaz direktnog točkastog zavarivanja [13]

Zavarivanje počinje pritiskom limova, kako bi se ostvario dobar kontakt. Prilikom toga je vrlo važno osigurati odgovarajuću silu pritiska jer se može pojaviti istiskivanje. Istiskivanje se na početku procesa može odmah uočiti zbog nedovoljne sile pritiska ili zbog brzog zagrijavanja, ali i na kraju procesa zbog prekomjernog zagrijavanja. Zagrijavanje je kratkotrajno, a središnji dio točke (jezgre) se najviše zagrijava, gdje je jakost struje najveća. Jezgra se topi zagrijavanjem, a zavarena se točka dobije njezinim očvršćivanjem. Kako bi se izbjegla pojava šupljina i pora, kod debljih limova sila pritiska na elektrodama mora biti veća i duža [5, 6].

Tijekom procesa zavarivanja veliku ulogu igra vrijeme zagrijavanja kako bi se ostvario kvalitetan zavar. Vrijeme zagrijavanja treba biti što kraće, jer ako je vrijeme predugo može doći do prevelikog udubljenja ili prevelike točke što nije poželjno. Vremenski raspon ovisi o debljini materijala, sili na elektrodama i njihovom promjeru i najčešće je od 0,1-0,5 sekundi, ali vrijeme zavarivanja kod strojeva visokog učinka pri zavarivanju debljih materijala može iznositi i do 10 sekundi. Najveće zagrijavanje i najbrže hlađenje je u centru zone zavarene točke [8].

### 3.1. Elektrode i uređaji

Elektrode koje se koriste pri točkastom zavarivanju moraju imati dobru električnu vodljivost i odgovarajuću tvrdoću na povišenoj temperaturi. Ovisno o zahtjevima, najčešće se koriste elektrode od bakra, kroma, srebra, kadmija i volframa. Uglavnom se prave od legura bakra ali njegova tvrdoća na povišenoj temperaturi je nedovoljna, stoga se najčešće koriste legure bakra s kromom (0,3–1,2% Cr), s kadmijem (0,7–1,3% Cd) ili legura bakar, krom, cirkonij (0,5–1,4% Cr, 0,02–0,2% Zr). Elektrode za elektrotopno točkasto zavarivanje mogu biti raznih oblika i veličina što je vidljivo na slici 7 [6].



Slika 7. Vrhovi i oblici elektroda [14]

Najčešći oblici vrhova elektroda su [15] (slika 8):

- konični tj. konične elektrode (kut konusa 120-140°),
- zaobljeni tj. kupolaste elektrode (radijus od 50-100mm),
- ravne plohe tj. ravne elektrode.



Slika 8. Najčešći oblici vrhova elektroda [15]

Dijelovi uređaja za elektrotopno točkasto zavarivanje sastoje se od [6]:

- 1) vremenskog prekidača za struju,
- 2) elektroda,
- 3) transformatora velike snage koji smanjuje napon na 0,5-10 V sa 380 ili 220 V,
- 4) mehanizama za silu pritiska.

Sila pritiska ovisi o uređaju koji se koristi te se može mehanički aktivirati (nogom, rukom) ili automatizirati (hidraulično, električno, pneumatski). Razlikujemo više uređaja za zavarivanje, a neki od njih su: ručni punkt aparat/kliješta (slika 9a), stabilni punkt aparati s lučnim putem elektrode (slika 9b), stabilni punkt aparat s linearnim putem elektrode, stabilni punkt za projekcijsko zavarivanje, višestruki modularni punkt aparati.





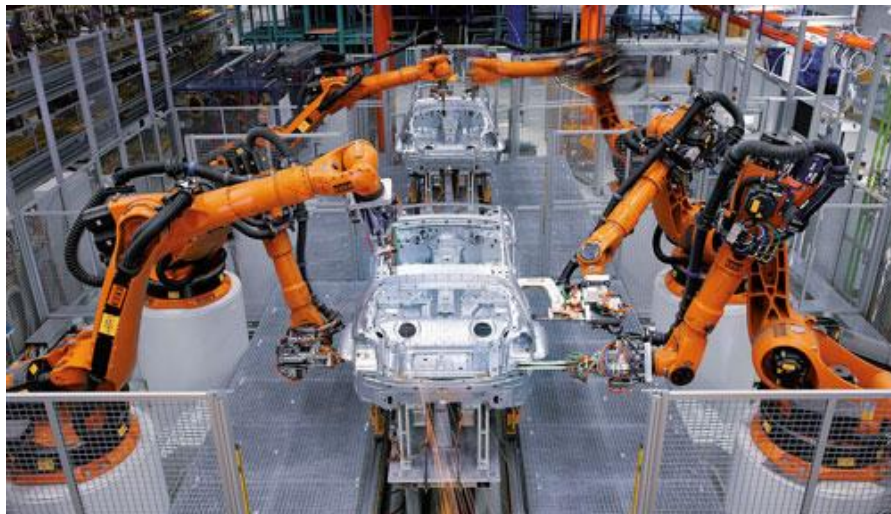
a)



b)

Slika 9. Uređaji za elektrootporno točkasto zavarivanje: a) pokretni [17], b) nepokretni [18]

U ovome završnom radu koristio se ručni punkt aparat/kliješta. Taj uređaj može biti hlađen vodom s pneumatskim ostvarenjem pritiska ili zračno hlađeni s ručnim pritiskom elektroda. Uglavnom se uređaji snage do 2 kW rade sa zračnim hlađenjem dok se uređaji veće snage rade s vodenim hlađenjem elektroda. Uređaji za točkasto zavarivanje svoju primjenu pronalaze u manjim radionicama pri popravcima karoserija, metalnoj industriji pa sve do automobilske industrije pri čemu je proces zavarivanja potpuno robotiziran (slika 10) [16].



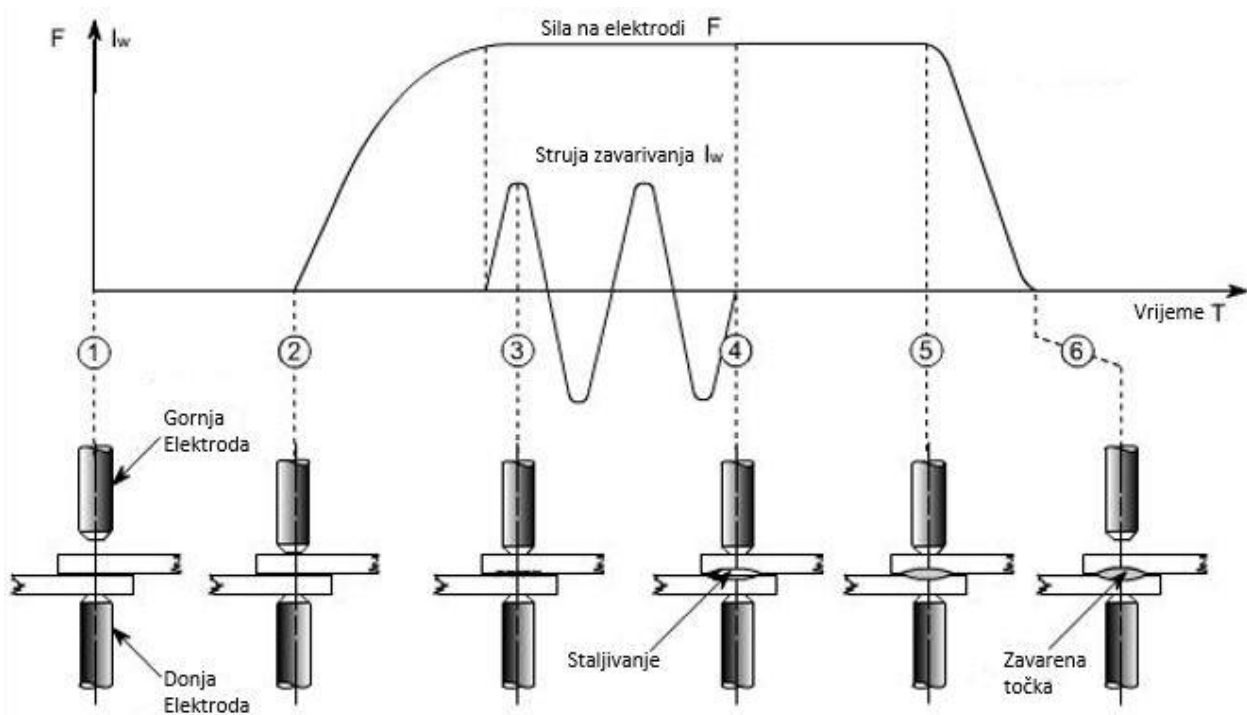
Slika 10. Robotizirano točkasto zavarivanje [19]

### 3.2. Proces formiranja točkastog zavara

Elektrootporno točkasto zavarivanje čest je i efikasan način spajanja metalnih dijelova manje debljine, najčešće limova. Kako bi postupak rezultirao ispravnim zavarom, tehnološki parametri procesa moraju biti vremenski kontrolirani i međusobno usklađeni. Iz tog razloga koriste se upravljački uređaji koji prema propisanom tehnološkom procesu ostvaruju željene ciljeve.

Proces formiranja točkastog zavara možemo opisati u tri faze. Prva faza započinje u trenutku kad se uključi struja zavarivanja i karakterizira je: formiranje električnog kontakta, grijanje i širenje krutog metala i istisnuće metala pod utjecajem sile zavarivanja. U drugoj fazi je daljnje povećanje kontakta, nastankom i rastom rastaljene jezgre sve do nominalne veličine, uz nastanak plastičnih deformacija i širenja metala. Treća faza počinje u trenutku isključivanja struje zavarivanja i karakterizirana je kristalizacijom i hlađenjem metala [20].

Jačina struje i vrijeme zavarivanja su međusobno povezani parametri, a u kombinaciji sa silom na elektrode njihov se odnos može prikazati dijagramom na slici 11.



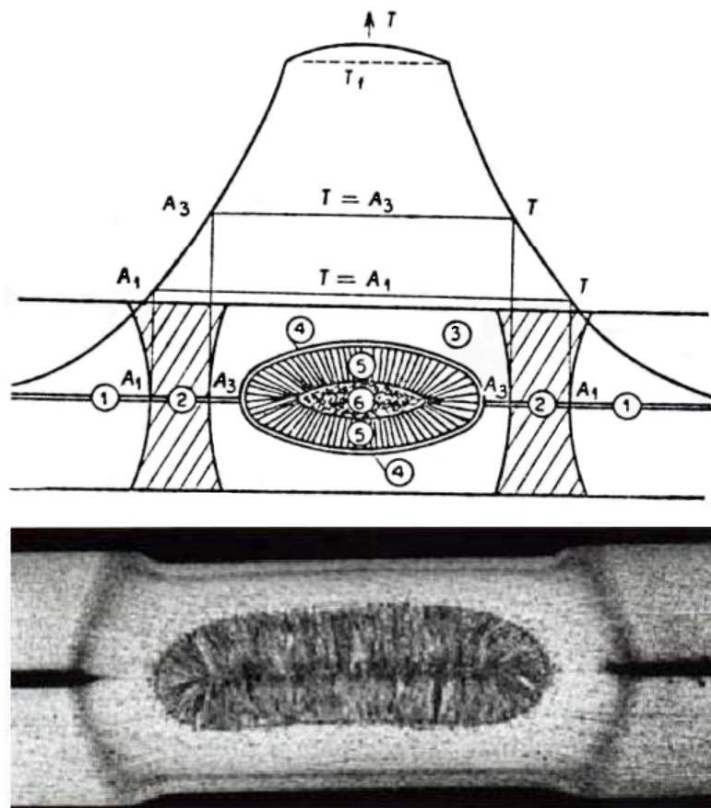
Slika 11. Dijagram ovisnosti sile i struje zavarivanja o vremenu [21]

### 3.3. Struktura točkastog zavara

Elektrootporno točkasto zavareni spoj ima specifičan izgled za razliku od ostalih postupaka zavarivanja. Zavarena točka ima dvije osi simetrije. Mala os koja se poklapa s osi elektroda i veliku os koja se poklapa s linijom dodira između dva lima. Eliptičnost izgleda zavarene točke nastaje jer je u centralnoj zoni zavarene točke najveće zagrijavanje i najbrže hlađenje, a promjena temperature je različita u različitim pravcima [22].

Greške koje nastaju kod elektrootpornog točkastog zavarivanja su: poroznost, lijepljenje, šupljine, prskanje, pregrijavanje. Zbog različite brzine hlađenja zavarenog spoja u mikrostrukтури možemo uočiti različite zone (slika 12) [10, 20]:

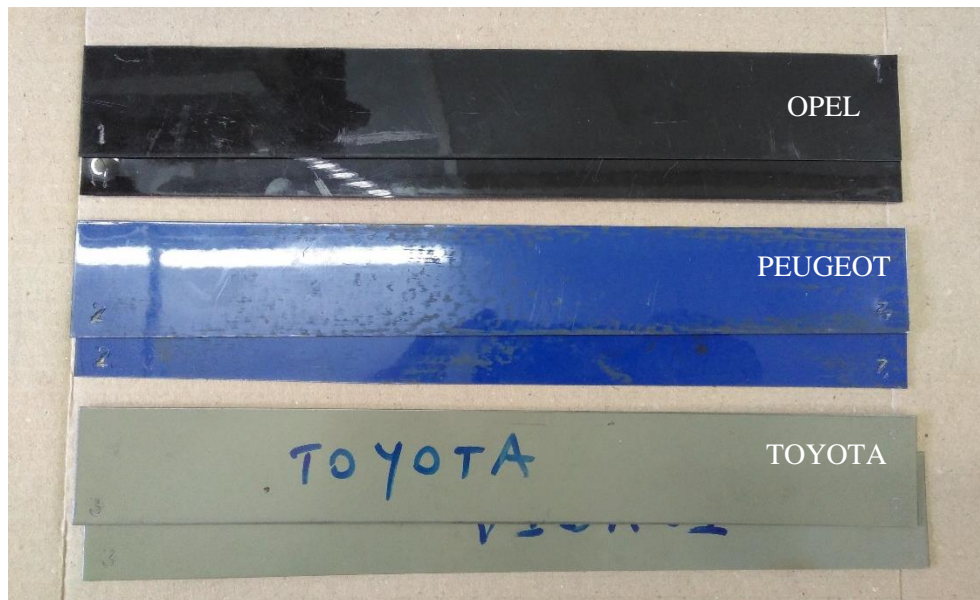
- Zona 1 - zona osnovnog materijala koja nije podvrgnuta djelovanju toplinskog ciklusa zavarivanja. U ovoj zoni materijal zadržava prvobitan oblik.
- Zona 2 - ograničena je izotermama koje odgovaraju temperaturama  $A_1$  i  $A_3$  (Fe-C dijagram). U toj zoni se stvara zrnata struktura.
- Zona 3 - odgovara temperaturi iznad točke  $A_3$ , a karakterizira se usitnjenom strukturom.
- Zona 4 - okružuje zonu taljenja, predstavlja tanki difuzijski sloj, gdje dolazi do kemijskih reakcija u čvrstoj fazi, difuzije ugljika.
- Zona 5 – vanjski sloj zone taljenja (staljivanja) s orijentiranim dendritima,
- Zona 6 - unutarnji sloj zone taljenja (staljivanja) s istoosnom strukturom.



Slika 12. Mikrostruktura točkasto zavarene točke [23]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izrezane su trake limova od tri različita proizvođača osobnih automobila koje su zatim točkasto zavarene prijenosnim uređajem za zavarivanje. Pri izrezivanju traka limova vodilo se računa da one budu izrezane s istih deformacijskih zona jer postupkom dubokog izvlačenja lima u ovisnosti o deformiranosti materijala dolazi do pojave zaostalih naprezanja. Stoga su trake izrezane iz skoro nedeformirane zone tj. ravnog dijela sredine prednjih vrata od tri proizvođača osobnih vozila Opel, Peugeot i Toyota (slika 13). Od svake vrste automobila izrezane su po dvije trake dimenzija 200x40 mm s odgovarajućim debljinama prema tablici 3.



Slika 13. Izrezane čelične trake različitih proizvođača automobila

Tablica 3. Debljine limova ovisno o proizvođaču automobila

Vrsta automobila	Debljina lima (mm)
Opel	0,65
Peugeot	0,7
Toyota	0,74

Nakon izrezivanja traka lima pristupilo se uklanjanju laka s obje površine svakog lima, koje je provedeno ručno vodombrusnim papirom granulacije 120, 240, 400 i 600. Neposredno prije zavarivanja površine limova su očišćene alkoholom. Očišćene trake limova zavarene su prijenosnim uređajem (punkt aparat/kliještima) za točkasto zavarivanje prikazanim na slici 14.



Slika 14. Punkt aparat/klješta

Prije postavljanja limova u uređaj za zavarivanje skinuti su bakreni oksidi s vrhova koničnih bakrenih elektroda sa svrhom uspostavljanja što boljeg kontakta radi smanjenja prijelaznog otpora između elektrode i lima. Na preklopljenim trakama limova napravljena su u uzdužnom smjeru trake po četiri točkasta zavara što je prikazano na slikama 15 i 16.



Slika 15. Elektrootporno točkasto zavarivanje izrezanih limova punkt aparat/klještima





Slika 16. Točkasto zavareni izrezani limovi

Kako bi reprezentativne uzorke pripremili za metalografsku analizu svaki lim je na rezalici Buehler ABRASIMET 2 odrezan poprečno, presjekom koji vodi kroz sredinu zavara. Nakon rezanja uzorci osnovnih i zavarenih limova pažljivo su postavljeni u uređaj za pripremu uzoraka (slika 17). Praškasta vodljiva masa u uređaju se najprije sabila, zatim grijala 2,5 minute te prešala tlakom 250 bara.



Slika 17. Postavljanje lima prije prešanja u masu

Nakon zalijeivanja uzoraka u vodljivu masu uslijedilo je njihovo brušenje i poliranje kako bi površine bile adekvatno pripremljene za metalografsku analizu. Brušenje je provedeno brusnim papiroma različite granulacije zrna, postepeno od najgrublje, prema najsitnijoj granulaciji, kako bi se što bolje izbrusila površina uzorka. Za vrijeme brušenja površina uzorka konstantno je hladena vodom radi sprječavanja utjecaja topline na promjenu mikrostrukture. Uzorci su brušeni vodobrusnim papirom granulacija 120, 240, 400, 600 i 800, a na kraju su ispolirani vodenom suspenzijom ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  prahom granulacije  $0,03\mu\text{m}$  pomiješanim s vodom). Poliranjem na vrlo glatkoj površini uzorak poprima zrcalan izgled površine bez ogrebotina i pukotina.

Postupci pripreme uzoraka su sljedeći:

- a) vruće izostatsko prešanje gdje je svaki uzorak uložen u vodljivu masu (Resin Phenolic Conduitive) provedeno je na uređaju SimpliMet 1000 tvrtke Buehler (slika 18),
  - b) brušenje i poliranje uzoraka koje je provedeno na uređaju Phoenix Beta tvrtke Buehler (slika 19),
- a parametri tih postupaka navedeni su u tablici 4.



a)



b)

Slika 18. Uređaj za vruće izostatsko prešanje: a) masa i uzorak u fazi zagrijavanja, b) uzorak zaliven u masu

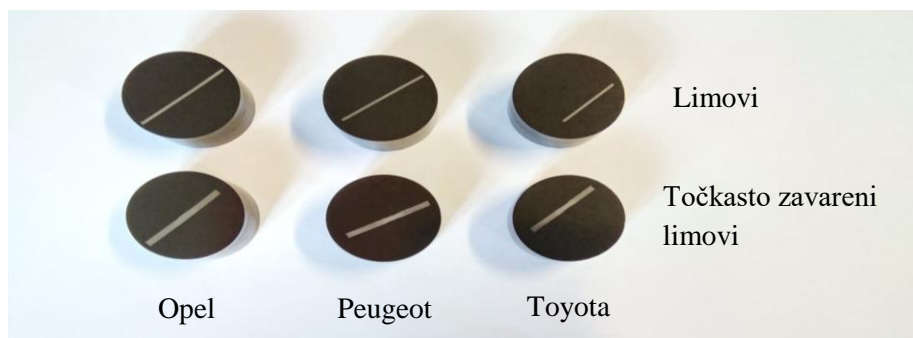


Slika 19. Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka zalivenih u masu tijekom rada

Tablica 4. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čeličnih traka zalivenih u masu

Brušenje					
Podloga	Granulacija zrna	Medij	Brzina rotacije ploče, okret/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
SiC – papir	120	voda	200	30	2
	240			20	3
	400			20	3
	600			20	3
	800			20	5
Poliranje					
Podloga	Granulacija zrna	Medij	Brzina rotacije ploče, okret/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
Tkanina (tzv. filc)	mikrovlakna	voda + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (0,03μm)	200	20	5

Pripremljeni uzorci osnovnog lima i točkasto zavarenog lima triju različitih proizvođača osobnih automobila (Opel, Peugeot, Toyota) prikazani su na slici 20.



Slika 20. Izbrušeni i polirani uzorci zaliveni u masu

Za analizu točkasto zavarenih limova korišten je invertni metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70 s mogućnošću snimanja mikrostrukture uzoraka pri povećanjima 50x do 1000x (slika 21). Uređaj je opremljen programskim paketom za automatsku obradu slike AnalySIS Materials Research Lab. Za snimanje makrostrukture uzoraka korišten je Stereo mikroskop Olympus SZ11 i digitalna kamera Promicra s mogućnošću povećanja od 9x do 55x.



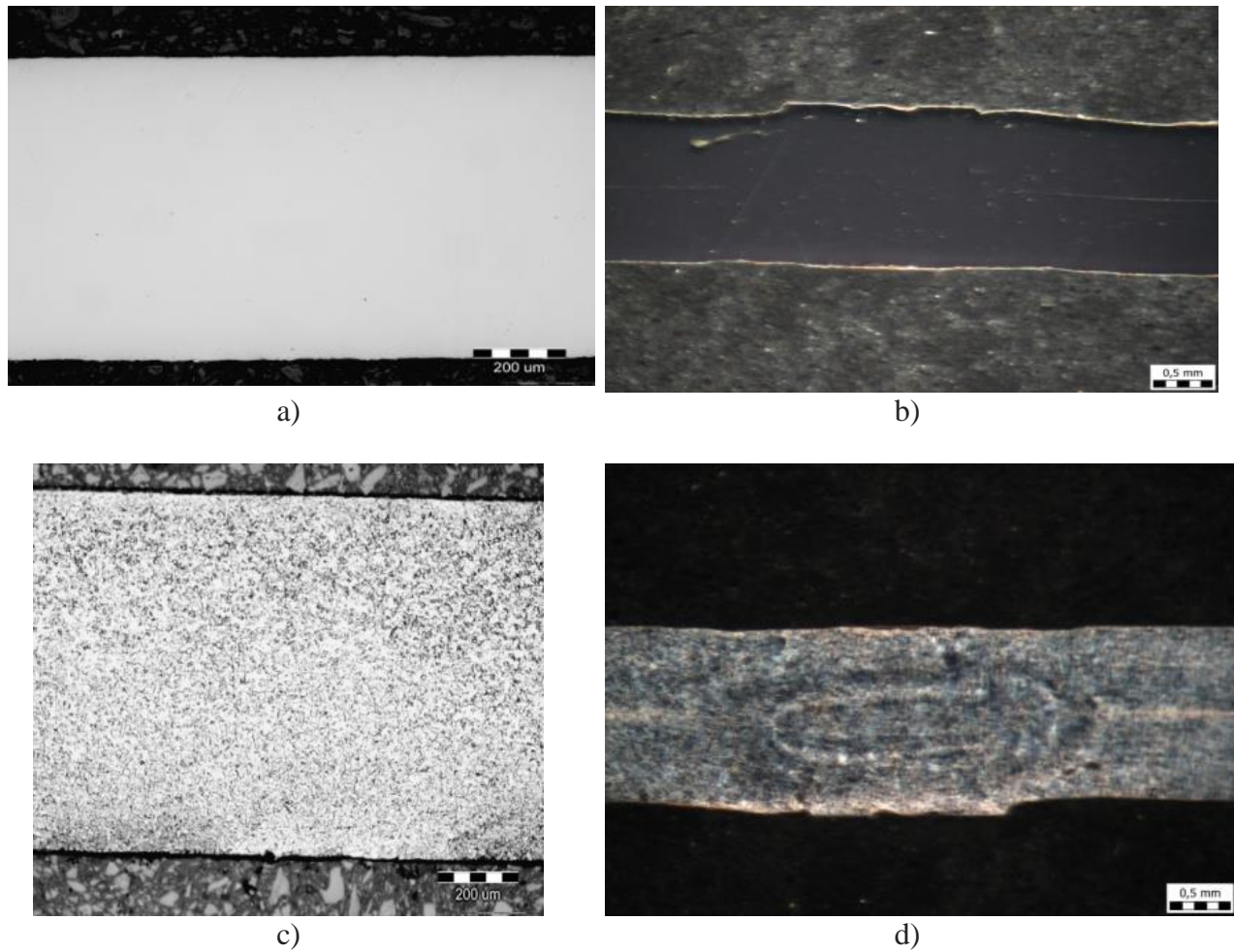


Slika 21. Invertni metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 70

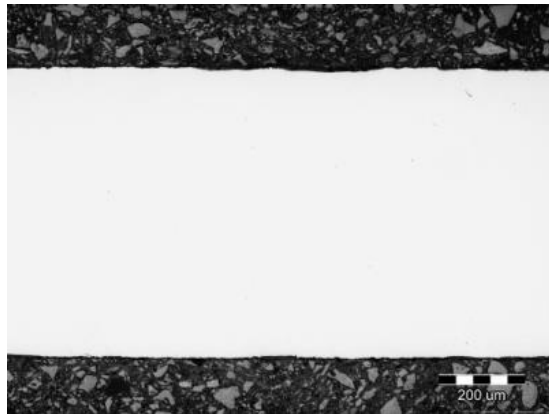
Metalografska analiza najprije je provedena na nenagrizenim uzorcima, radi analize uključaka. Zatim su uzorci nagrizeni u 5,0 % -tnom nitalu ( $\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) kako bi se metalografskom analizom odredile karakteristične mikrostrukture koje se javljaju pri točkastom zavarivanju. Nakon pregleda pod mikroskopom svih osnovnih i točkasto zavarenih limova, za daljnju analizu izabran je zavareni spoj na kojem se najbolje mogla vidjeti očekivana mikrostruktura.

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

Metalografskom analizom na invertnom mikroskopu napravljena je analiza mikrostrukture osnovnog lima i točkasto zavarenih limova za automobile Opel, Peugeot i Toyota. Metalografske snimke mikrostrukture osnovnog lima i točkasto zavarenih limova u nagrizenom i nenagrizenom stanju prikazane su za Opel na slici 22, za Peugeot na slici 23 i za Toyotu na slici 24.



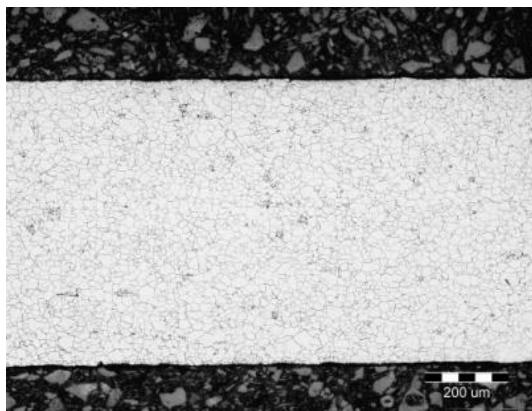
Slika 22. Struktura osnovnog lima i točkasto zavarenih limova automobila Opel u nenagrizenom i nagrizenom stanju promatranih navedenim mikroskopima: a) osnovni lim, povećanje 100x- nenagrizen, b) zavareni limovi, povećanje 30x- nenagrizen, c) osnovni lim, povećanje 100x- nagrizen, d) zavareni limovi, povećanje 30x- nagrizen.



a)



b)

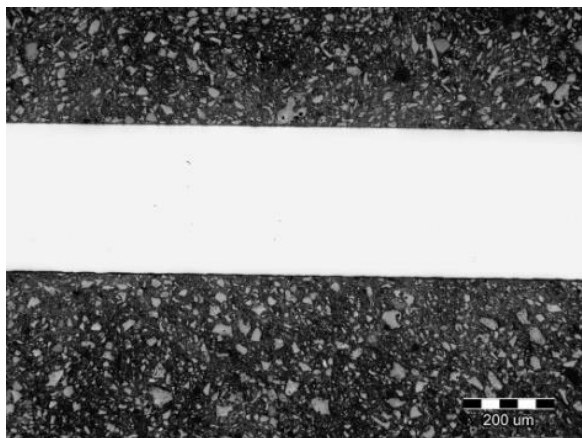


c)

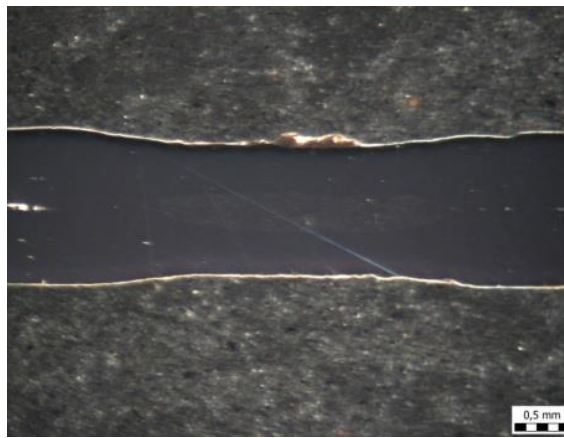


d)

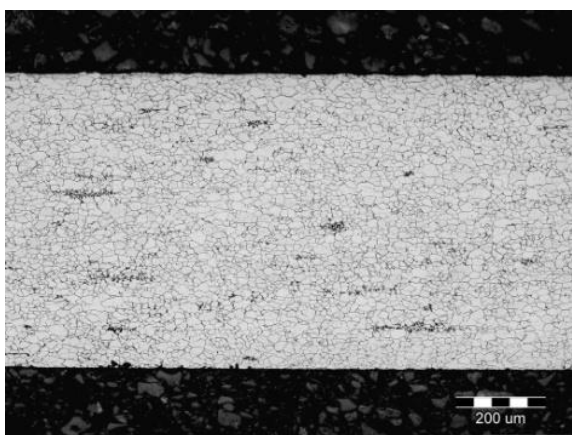
Slika 23. Struktura osnovnog lima i točkasto zavarenih limova automobila Peugeot u nenagrizenom i nagrizenom stanju promatranih navedenim mikroskopima: a) osnovni lim, povećanje 100x- nenagrizen, b) zavareni limovi, povećanje 30x- nenagrizen, c) osnovni lim, povećanje 100x- nagrizen, d) zavareni limovi, povećanje 30x- nagrizen.



a)



b)



c)



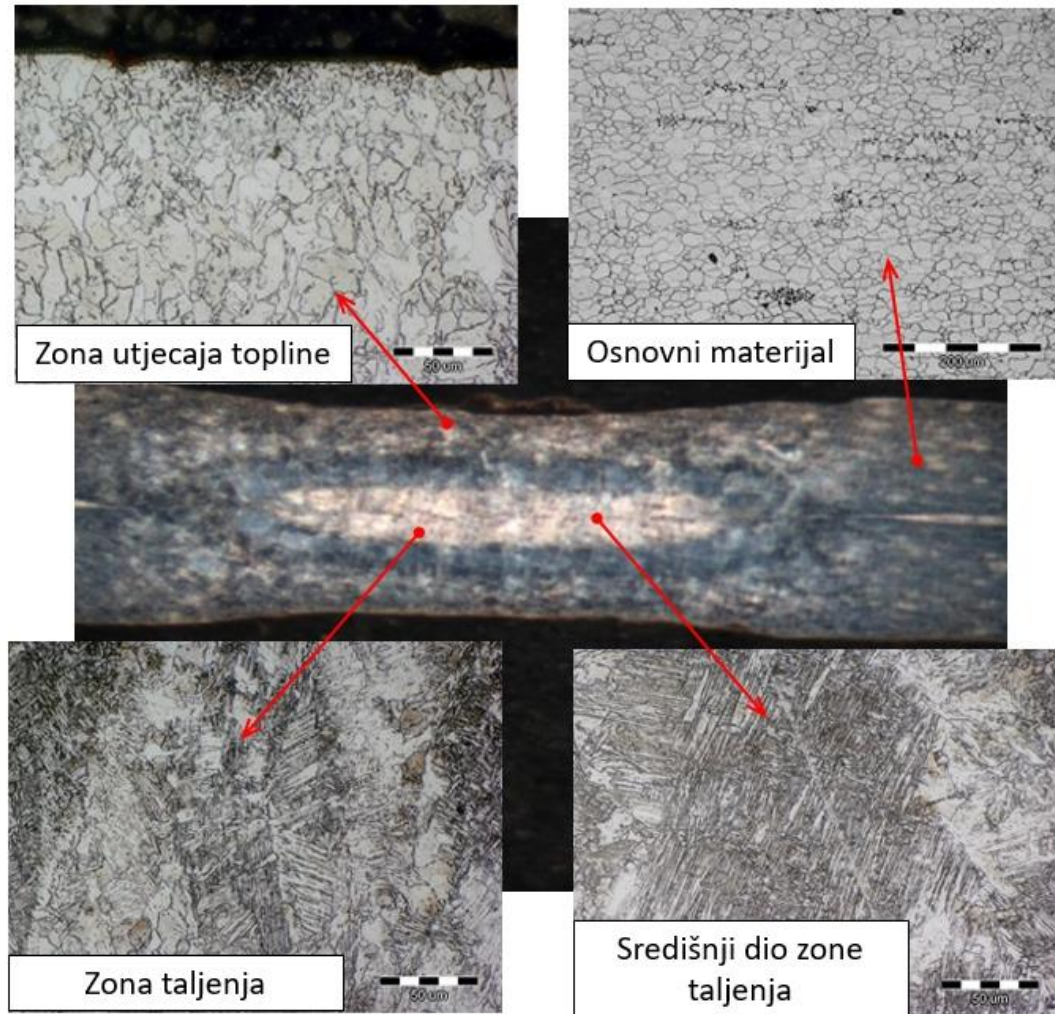
d)

Slika 24. Struktura osnovnog lima i točkasto zavarenih limova automobila Toyota u nenagrizenom i nagrizenom stanju promatranih navedenim mikroskopima: a) osnovni lim, povećanje 100x- nenagrizen, b) zavareni limovi, povećanje 30x- nenagrizen, c) osnovni lim, povećanje 100x- nagrizen, d) zavareni limovi, povećanje 30x- nagrizen.

Na slikama 22, 23 i 24 prikazane su metalografske snimke strukture osnovnih limova pod povećanjem 100x (mikrostruktura), dok su snimke zavarenih limova prikazane su pod povećanjem 30x (makrostruktura). Mikrostruktura osnovnog lima može se vidjeti u nagrizenom stanju na slikama c, a u sva tri slučaja karakterizira ju grubo zrno. Makrostruktura zavarenih limova u nenagrizenom stanju (b) homogena je na mjestu zavora, a jasno se vidi granica preklopnih površina izvan zone utjecaja topline. Na osnovi makrostrukturnog prikaza zavarenih limova (d) uočava se na svakom zavaru zona staljivanja eliptičnog oblika. Zona staljivanja ovisna je o nizu parametara koji se u ovom eksperimentu nisu mogli pratiti jer je točkasto zavarivanje provedeno pomoću prijenosnog uređaja koji nije imao takve mogućnosti. Na osnovi prikazanih metalografskih snimki može se zaključiti kako nema većih odstupanja u izgledu točkastog zavora kod razmatranih zavarenih limova.

Za detaljniju analizu nagrizede mikrostrukture s većim povećanjem zavarenog lima odabrani su limovi automobila Toyota, na kojima se karakteristični prijelazi mikrostrukture najbolje uočavaju. Na slici 25 istaknute su četiri karakteristične mikrostrukture povezane sa slikom 24 d.





Slika 25. Mikrostruktura limova automobila Toyota u nagrizenom stanju zavarenih elektrootpornim točkastim zavarivanjem

Analizom prikazanih mikrostruktura na slici 25 može su uočiti sljedeće:

- zona osnovnog materijala prikazana pod povećanjem 200x ima grublje zrnatu strukturu, jer promatrana zona nije bila podvrgnuta toplinskom djelovanju te je početni materijal zadržao prvobitnu strukturu,
- zona utjecaja topline prikazana pri povećanju 500x ima sitnozrnatu strukturu, koja odgovara temperaturi iznad točke  $A_3$ ,
- zona taljenja (staljivanja) prikazana pri povećanju 500x u vanjskom dijelu ima orijentirane dendrite,
- unutarnji sloj zone taljenja (staljivanja) prikazan pri povećanju 500x ima istoosnu strukturu.

Prikazanim metalografskim slikama pokazano je da se s prijenosnim uređajem za točkasto zavarivanje mogu dobiti mikrostrukturne karakteristike identične teorijski opisanim u poglavlju 3.3., koja su dobivena kontroliranim parametrima: jakosti struje zavarivanja, silom pritiska na elektrode i vremenom zagrijavanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Automobilska industrija jedna je od mnogobrojnih industrija u kojoj je elektrootporno zavarivanje, a ponajviše točkasto, najzastupljenije i u kojoj je ono doživjelo svoju punu primjenu. S ciljem povećanja proizvodnosti i smanjenja troškova radne snage, ali i poboljšanja kvalitete zavarenih spojeva u automobilskoj industriji točkasto elektrootporno zavarivanje visoko je automatizirano i robotizirano pa strojevi mogu izraditi i do 350 točaka u minuti. Iz razloga što za postupak elektrootpornog zavarivanja nije potrebno koristiti ni dodatni materijal ni zaštitne plinove time je sama metalurgija procesa elektrootpornog zavarivanja relativno jednostavna. Deformacije nastale ovim postupkom zavarivanja su malene, a razlozi su koncentriran unos topline i kratko vrijeme zagrijavanja.

Kroz ovaj završni rad načinjeno je sljedeće:

- opisani su postupci elektrootpornog zavarivanja,
- detaljno je opisan postupak elektrootpornog točkastog zavarivanja od osnovnih fizikalnih principa, uređaja, vrsta elektroda, procesa formiranja zavara do karakteristične strukture zavara,
- izrezane su i očišćene površine traka limova tri različita proizvođača automobila Opel, Peugeot i Toyota korištene u eksperimentalnom dijelu ovog rada,
- na očišćenim i pripremljenim trakama limova s prijenosnim uređajem punkt aparat/kliještima napravljeno je više točkastih zavara,
- zavareni limovi odrezani su po sredini točkastog zavara,
- odrezani komadi osnovnog lima i zavarenih limova uloženi su u vodljivu masu,
- invertnim mikroskopom pod povećanjem analizirana je makro- i mikro-struktura osnovnog i zavarenog lima.

Analizom mikrostrukture osnovnog lima i zavarenih limova provedenom na invertnom mikroskopu pri različitim povećanjima kod svih promatranih proizvođača automobila vidljivo je da nema bitne razlike u mikrostrukturi točkasto zavarenih limova prijenosnim uređajem. Kod svakog od zavara uočene su karakteristične strukture za određena područja točkastog zavara. Na analiziranim zavarenim limovima vidljivo je da osnovni materijal zadržava prvobitnu strukturu, jer nije bio pod utjecajem toplinskog djelovanja. U zoni utjecaja topline vidljiva je sitnozrnata struktura na koju se, u zoni taljenja, nastavlja dendritni rast usmjeren prema središnjoj zoni koja je karakterizirana istoosnom strukturom.

Elektrootporno točkasto zavarivanje je vodeća tehnologija za spajanje tankih limova u današnjoj industriji. Poznato je da veliku ulogu na kvalitetu zavarenog spoja imaju parametri kao jakost struje, sila pritiska na elektrode i vrijeme zagrijavanja. Ti se parametri moraju dobro poznavati kako bi kvaliteta zavarenog spoja bila što bolja.

U eksperimentalnom dijelu rada točkasto zavarivanje provedeno je prijenosnim uređajem za točkasto zavarivanje koji nema mogućnost regulacije i praćenja navedenih parametara. Mikrostrukturnom analizom je potvrđeno da prijenosni uređaj korišten u reparaturnim radionicama daje karakteristične mikrostrukture kakve se postižu i boljim uređajima s mogućnošću praćenja ovih važnih parametara.

## 7. LITERATURA

- [1] Igor Župančić: Materijali i njihova svojstva u izradi karoserija osobnih motornih vozila, Vatrogasni Vjesnik, 2015, Vol.5, 15-18.
- [2] Stoja Rešković: Tehnologije oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2011.
- [3] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml> (preuzeto 02.07.2018)
- [4] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [5] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> (preuzeto 10.07.2018)
- [6] A. Sedmak, V. Šijački-Žeravčić, A. Milosavljević, V. Đorđević, M. Vukićević: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000  
<http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf> (preuzeto 20.06.2018)
- [7] ..... Praktičar 2: Strojarsvo, Školska knjiga, Zagreb, 1972.
- [8] Milenko Rakin: Zavarivanje i srodni postupci, V izdanje, Tehnička knjiga Beograd, 1986.
- [9] Andro Puče: Optimizacija parametara bradavičastog elektrootpornog zavarivanja sklopa žica cijev, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015 [http://repositorij.fsb.hr/4493/1/Pu%C4%8De\\_2015\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/4493/1/Pu%C4%8De_2015_diplomski.pdf) (02.07.2018)
- [10] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrootporno\\_zavarivanje#Su%C4%8Deljno\\_vodootporno\\_zavarivanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrootporno_zavarivanje#Su%C4%8Deljno_vodootporno_zavarivanje) (preuzeto 20.06.2018)
- [11] <http://techminy.com/resistance-seam-welding> (preuzeto 12.07.2018)
- [12] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance\\_welding\\_rw](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw) (preuzeto 12.07.2018)
- [13] <http://www.vista-industrial.com/blog/spot-welding/> (preuzeto 10.07.2018)
- [14] [http://www.weldsuppliers.com.au/index.php?p=1\\_43](http://www.weldsuppliers.com.au/index.php?p=1_43) (preuzeto 10.07.2018)
- [15] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (preuzeto 10.07.2018)
- [16] <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.tecna/PrirucnikPunktovanje.pdf> (preuzeto 21.06.2018)
- [17] <https://www.harborfreight.com/120-volt-spot-welder-61205.html> (preuzeto 09.07.2018)
- [18] <https://www.r-techwelding.co.uk/spot-welder-16kva-tecna-digital-4640-pedestal/> (preuzeto 09.07.2018)
- [19] <http://www.robotinvestment.eu/tool> (preuzeto 09.07.2018)
- [20] Dževad Hadžihafizović: Analiza geometrijskih parametara na mehanička svojstva spojeva nastalih postupkom elektrootpornim tačkastim zavarivanjem, magistarski rad, Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet, Sarajevo, 2016.
- [21] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/35> (preuzeto 10.07.2018)
- [22] Alen Hlevnjak: Točkasto elektrootporno zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.  
[http://repositorij.fsb.hr/4737/1/Hlevnjak\\_2015\\_zavrzni\\_prediplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/4737/1/Hlevnjak_2015_zavrzni_prediplomski.pdf) (preuzeto 03.07.2018)
- [23] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1416340010-0-elektrootpornozavarivanje.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1416340010-0-elektrootpornozavarivanje.pdf) (preuzeto 20.06.2018)

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Dorian Dervić,  
Datum i mjesto rođenja: 12. ožujak 1996., Sisak  
Adresa: Ulica Kneza Branimira 30, 44000 Sisak  
Telefon: 092/166-11-05  
E-mail: ddervic55@gmail.com

## OBRAZOVANJE:

2002.-2010. – Osnovna škola „Braća Bobetko“ Sisak  
2010.-2014. – Ekonomska škola Sisak, ekonomist  
2014.- – Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija,  
smjer Metalurško inženjerstvo

## VJEŠTINE:

- poznavanje i vladanje radom na računalu,
- znanje engleskog jezika,
- poznavanje osnova strojne obrade na CNC strojevima,
- vozačka dozvola B kategorije.