

Elektrootporno točkasto zavarivanje tankih limova

Gracin, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:144639>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Gracin

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Martin Gracin

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći pri izradi završnog rada.

Posebne zahvale dr. sc. Maji Jurici na strpljenju, pomoći i korisnim savjetima pri izradi završnog rada.

Također, zahvaljujem svojoj obitelji na potpori tijekom studija, te svojoj djevojci i prijateljima na svima lijepim trenucima tijekom studija.

Martin Gracin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN GRACIN**

Mat. br.: 0035204894

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ELEKTROOTPRONO TOČKASTO ZAVARIVANJE TANKIH LIMOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **RESISTANCE SPOT WELDING OF THIN STEEL PLATES**

Opis zadatka:

Detaljno opisati elektrootporno zavarivanje kao i sve opcije izvođenja. Analizirati glavne parametre zavarivanja pri točkastom elektrootpornom zavarivanju, te opisati njihov utjecaj na geometriju i kvalitetu spoja. Obrazložiti zavarljivost različitih metalnih materijala za elektrootporno zavarivanje. Navesti primjenu elektrootpornog točkastog zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati utjecaj različitih parametara zavarivanja na kvalitetu i oblik zavarenog spoja. Definirati plan pokusa koji će obuhvaćati razne odabrane kombinacije parametara. Dobivene zavarene spojeve potrebno je podvrgnuti razornim i nerazornim ispitivanjima te na temelju dobivenih informacija ocijeniti adekvatnost odabranih parametara s obzirom na kvalitetu zavarenog spoja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE	3
3. TOČKASTO ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE	5
3.1. Ciklus elektrootpornog zavarivanja	5
3.2. Otpori materijala pri točkastom elektrootpornom zavarivanju	6
3.3. Načini izvođenja točkastog elektrootpornog zavarivanja	9
3.4. Režimi elektrootpornog točkastog zavarivanja.....	10
3.5. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja.....	11
3.5.1. Sila na elektrode.....	11
3.5.2. Dimenzije vrha elektrode	11
3.5.3. Vrijeme pritiska	12
3.5.4. Vrijeme zavarivanja	12
3.5.5. Vrijeme držanja.....	12
3.5.6. Struja zavarivanja.....	13
3.6. Elektrode	14
3.7. Strojevi za elektrootporno točkasto zavarivanje	16
3.7.1. Vrste strojeva za elektrootporno zavarivanje.....	18
3.8. Zavarljivost materijala elektrootpornim zavarivanjem	21
3.9. Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja	22
4. EKSPERIMENTALNI DIO	25
4.1. Stroj za točkasto elektrootporno zavarivanje	25
4.2. Ispitni uzorci i njihova priprema	28
4.3. Zavarivanje uzoraka	29
4.4. Nerazorno ispitivanje uzoraka	32
4.5. Razorno ispitivanje uzoraka	35
5. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41
PRILOZI.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [3]	1
Slika 2.	Opći prikaz točkastog elektrootpornog zavarivanja [5]	3
Slika 3.	Ciklus elektrootpornog zavarivanja [6]	6
Slika 4.	Otpori kod točkastog elektrootpornog zavarivanja [7].....	7
Slika 5.	Vrijednosti otpora u ovisnosti o temperaturi [8]	8
Slika 6.	Osnovni načini izvođenja točkastog zavarivanja [1].....	9
Slika 7.	Prikaz oblika zavara ovisno o režimu zavarivanja [9]	10
Slika 8.	Ovisnost jakosti struje i vremena zavarivanja kod točkastog zavarivanja (dijagram karakterističan za svaki metal) [8].....	13
Slika 9.	Cilindrična ravna elektroda za točkasto zavarivanje [8]	14
Slika 10.	Elektrode za elektrootporno zavarivanje [13]	15
Slika 11.	Najčešće korištene elektrode za točkasto elektrootporno zavarivanje [14]	16
Slika 12.	Shema stroj za točkasto zavarivanje s naznačenim djelovima [4]	18
Slika 13.	Stroj za elektrootporno zavarivanje s lučnim putem elektroda [17].....	19
Slika 14.	Stroj za elektrootporno zavarivanje s linearnim putem elektroda [12]	20
Slika 15.	Ručni stroj za elektrootporno zavarivanje [18]	20
Slika 16.	Robot za točkasto elektrootporno zavarivanje [23]	23
Slika 17.	Primjena robotiziranog elektrootpornog točkastog zavarivanja u automobilskoj industriji [21]	24
Slika 18.	Stroj za točkasto elektrootporno zavarivanje TV – 15 PKS.....	25
Slika 19.	Specifikacije stroja	26
Slika 20.	Upravljačka jedinica stroja	27
Slika 21.	Oprema za analizu kemijskog sastava čelika	28
Slika 22.	Donja strana ispitnih uzoraka (kontakt: radni komad – nepomična elektroda).....	30
Slika 23.	Gornja strana ispitnih uzoraka (kontakt: radni komad – pomična elektroda)	31
Slika 24.	Prikaz zavara za ispitne uzorke 1, 2 i 3	31
Slika 25.	Prikaz zavara za ispitne uzorke 4, 5 i 6	32
Slika 26.	Prikaz zavara za ispitne uzorke 7, 8 i 9	32
Slika 27.	Prikaz mjerenja promjera zavara prema normi ISO 14329 – 2003 [27]	33
Slika 28.	Grafički prikaz srednjeg promjera točke zavara.....	34
Slika 29.	Grafički prikaz srednjeg promjera zone utjecaja topline.....	34
Slika 30.	Kidalica EU 40 mod	35
Slika 31.	Ispitni uzorci nakon ispitivanja na kidalici.....	36
Slika 32.	Grafički prikaz vlačnih sila uzoraka.....	37
Slika 33.	Grafički prikaz vlačne čvrstoće uzoraka	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela osnovnih postupaka konduktivnog elektrootpornog zavarivanja [4]	4
Tablica 2. Ocjena međusobne zavarljivosti metala i legura postupcima elektrootpornog zavarivanja [4]	22
Tablica 3. Kemijski sastav materijala.....	29
Tablica 4. Parametri zavarivanja pojedinih ispitnih uzoraka	30
Tablica 5. Izmjereni promjeri točke zavara i zone utjecaja topline.....	33
Tablica 6. Maksimalne vlačne sile ispitnih uzoraka.....	36
Tablica 7. Vlačna čvrstoća uzoraka.....	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm ²	Površina zavara
d	mm	Promjer zavarene točke
d _e	mm	Promjer vrha elektrode
d _s	mm	Srednji promjer zavarene točke
d _{zut}	mm	Promjer zone utjecaja topline
d _{zuts}	mm	Srednji promjer zone utjecaja topline
F _m	N	Vlačna sila
I, I _z	A	Struja zavarivanja
l	mm	Duljina vodiča
Q	J	Joule-ova toplota
R	Ω	Omski otpor
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
s	mm	Debljina materijala
t	s	Vrijeme
t _s	s	Vrijeme zavarivanja
ρ	Ωmm	Specifični otpor materijala

SAŽETAK

U ovom završnom radu obrađen je postupak elektrootpornog zavarivanja. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu završnog rada detaljno je opisan postupak elektrootpornog zavarivanja i njegovo izvođenje. Naveden je sažeti pregled parametara i njihov utjecaj na geometriju i kvalitetu zavarenog spoja. Opisani su strojevi za izvođenje elektrootpornog zavarivanja, te obrazložena zavarljivost materijala za navedeni postupak.

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Tanki limovi nehrđajućeg čelika zavarivani su na stroju za elektrootporno zavarivanje TV – 15 PKS. Na dobivenim uzorcima provedeno je nerazorno i razorno ispitivanje. Obradom rezultata eksperimenta utvrđene su optimalne postavke za zavarivanje danog materijala.

Ključne riječi: elektrootporno točkasto zavarivanje tankih limova, parametri točkastog zavarivanja, primjena točkastog zavarivanja, zavarljivost

SUMMARY

In this undergraduate thesis the topic of resistance spot welding is discussed. The paper consists of theoretical and experimental part. The theoretical part of the final paper describes the process of electrical resistance welding and its implementation. An overview of the parameters and their effect on the geometry and quality of the weld is given. Machines for performing electrical resistance welding are described and the weldability of the material for the said process is explained.

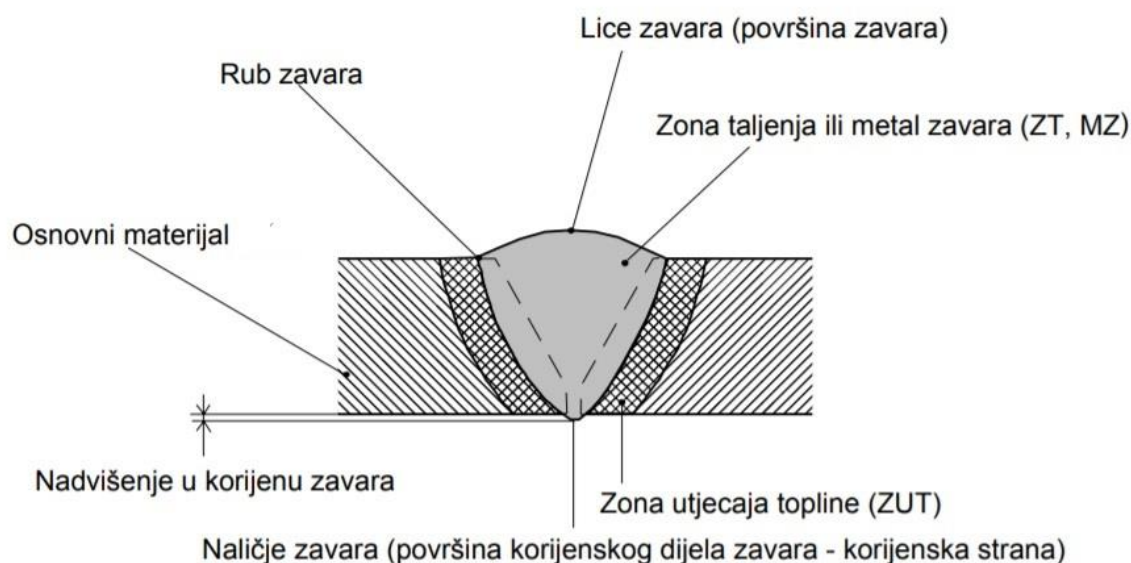
The experimental part was carried out at the Welding Laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Thin plates of stainless steel were welded on the TV - 15 PKS welding machine. Non-destructive and destructive testing was performed on the samples obtained. By processing the results of the experiment, the optimal parameters for welding the given material were determined.

Key words: resistance spot welding of thin steel plates, parameters of spot welding, implementation of spot welding, weldability

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje ili prevlačenje osnovnog materijala primjenom topline i/ili pritiska, s ili bez dodatnog materijala. Zavareni spoj je nerastavljivi spoj dvaju ili više dijelova istovrsnog ili raznorodnog materijala ostvaren zavarivanjem. Sastoji se od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT). Zona taljenja je dio zavarenog spoja koji je tijekom zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja. U ovoj zoni odvijaju se procesi slični kao i pri proizvodnji metala u pećima (međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okoline). Zona taljenja može se sastojati od osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, gdje dolazi do promjene kristalne strukture .

Zavarivanjem se mogu spajati metalni (čelici, Al, Cu, Ni i njihove legure) i nemetalni materijali (termoplastični dijelovi i dr.). Na slici 1. koja pokazuje poprečni presjek zavara, označeni su osnovni elementi zavarenog spoja. [1,2]



Slika 1. Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu [3]

Zavarivanju srodni postupci su postupci spajanja lemljenjem i lijepljenjem kojima se, kao i pri zavarivanju, ostvaruju nerastavljivi spojevi. [1]

Do danas je razvijeno, i nalazi se u primjeni, više od 80 različitih postupaka i varijanata postupaka za zavarivanje materijala, prvenstveno metala i plastičnih materijala. Najveći dio proizvodnje zavarivanjem (više od 90% ukupne mase prerađenog materijala) obavlja se sa sljedećih 5 postupaka zavarivanja: [1]

- Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL)
- Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina (MIG/MAG)
- Zavarivanje netaljivom elektrodom od volframa u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG)
- Zavarivanje pod praškom (EPP)
- Elektrootporno zavarivanje (EO)

2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Postupci kod kojih se metal zagrijava i tali toplinom koja nastaje uslijed otpora pri prolazu električne energije nazivaju se elektrotoporni postupci zavarivanja. Prilikom elektrotopornog zavarivanja nema pojave električnog luka, a za oblikovanje spoja potrebno je primijeniti uz toplinsku i mehaničku energiju.

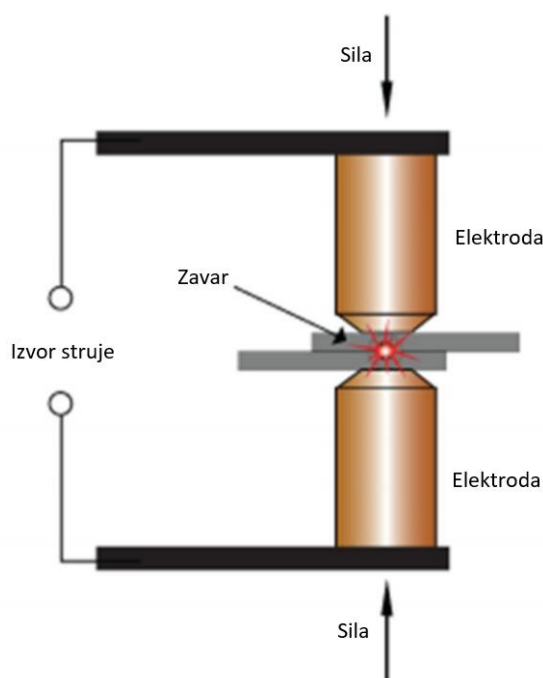
Količina topline razvijene u vodiču, kroz koji u određenom vremenskom intervalu protječe električna struja određene jakosti iznosi prema Joule-ovom zakonu:

$$Q = \int_0^t I^2(t) \cdot R(t) dt \text{ [J]} \quad (1)$$

Odnosno pojednostavljeno:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ [J]} \quad (2)$$

Gdje je Q oslobođena (Joule-ova) toplotina [J], R je otpor vodiča [Ω], I je struja koja teče kroz vodič [A], a t je vrijeme prolaska električne energije [s]. Ovdje se radi o pretpostavci da su struja i otpor vodiča konstantni. U stvarnosti otpor nije konstantan jer se svojstva materijala mijenjaju s porastom temperature vodiča. Opći prikaz točkastog elektrotopornog zavarivanja prikazan je na slici 2.[1,4]



Slika 2. Opći prikaz točkastog elektrotopornog zavarivanja [5]

Tijekom zavarivanja nastoji se raditi s jačim strujama (100-300000 A) u što kraćem vremenskom prolasku struje. Zbog razmjerno malog električnog otpora metala, napon zavarivanja je od 0,5 do 25 V. Ovisno o vrsti postupka i zavarivanog materijala vrijeme zavarivanja je vrlo kratko (od 0,05 do nekoliko desetaka sekundi). Kao izvor struje za vrijeme zavarivanja uglavnom se koristi izmjenična struja, ali mogu se koristiti i istosmjerni izvori struje. Opća podjela osnovnih postupaka konduktivnog elektrootpornog zavarivanja prikazana je u tablici 1. [2]

Tablica 1. Podjela osnovnih postupaka konduktivnog elektrootpornog zavarivanja [4]

Vrsta spoja	Postupak zavarivanja	Način izvođenja	Način zagrijavanja
Preklopni	Točkasto	Pomoću jednog para elektroda	Na principu električnog otpora
		Pomoću više pari elektroda	
		Pomoću kolutova	
	Šavno (kolutno)	S dva koluta S sjednim kolutom i „ramom“	
	Bradavičasto	Na stroju za bradavičasto zavarivanje	
Sučeljni	Sučeono zavarivanje čistim otporom	Na stroju za sučeono zavarivanje	Na principu električnog otpora
	Sučeono zavarivanje iskrenjem		Iskrenjem

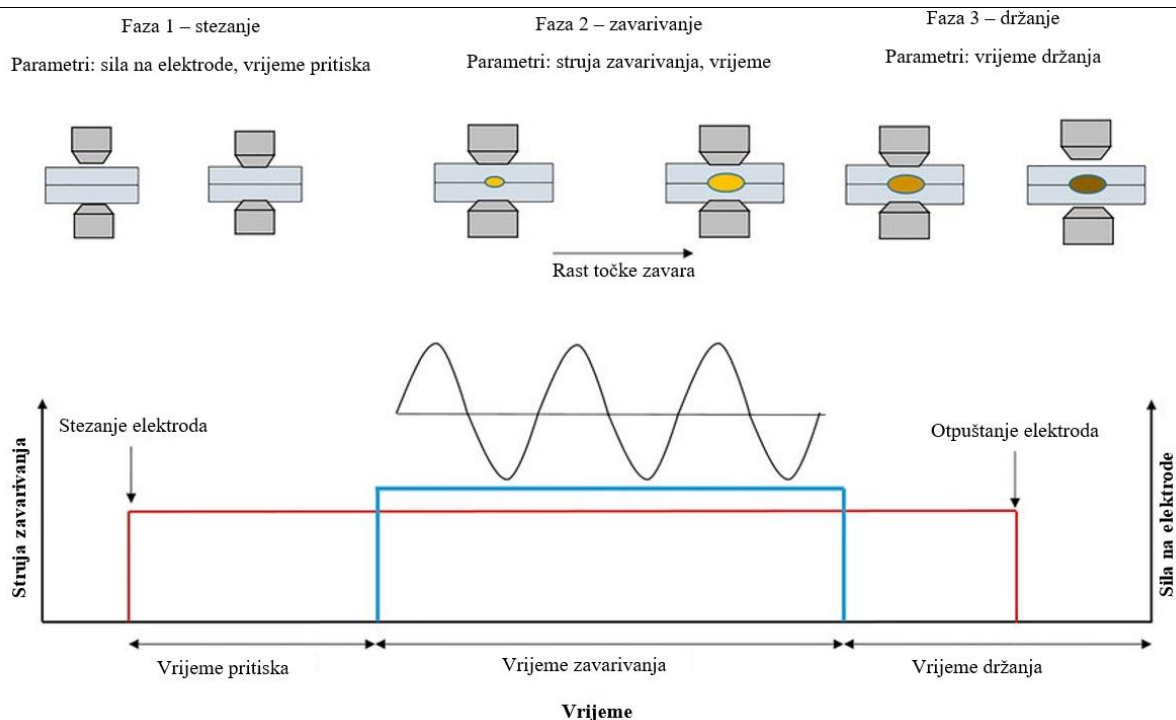
3. TOČKASTO ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno točkasto zavarivanje najčešće je korišteni postupak elektrootpornog zavarivanja. Svoju primjenu uglavnom je našao za zavarivanje čelika, Ni – legura i Al – legura, no moguće je zavarivati i razne druge materijale. Najčešće se koristi za spajanje tanjih dijelova, obično limova iz ugljičnih i visokolegiranih čelika. Postupak se odvija bez korištenja dodatnog materijala i zaštitnih plinova.

Kod ovog postupka zavarivanja toplina se razvija zbog otpora tijekom struje između kontaktnih površina radnih komada pritisnutih elektrodama iz Cu-legura. Zavarivani komadi postavljaju se jedan na drugi i ulažu između para elektroda od Cu-legura. Struja na putu od jedne do druge elektrode prolazi punom debljinom zavarivanih limova. Kontaktni otpor između limova veći je od otpora između bakrene elektrode i lima, pa se volumen između limova rastali. Nakon prekida tijekom struje točka se skrutne, a pritisak se zadržava do ohlađivanja. Kod ovog postupka zavarivanja zavar je lećastog oblika. [2]

3.1. Ciklus elektrootpornog zavarivanja

Ciklus elektrootpornog točkastog zavarivanja započinje pokretanjem držača pokretne elektrode (najčešće gornje) čime se ostvaruje potrebna sila između elektroda i materijala koji se zavaruje. Potom se izvodi zatvaranje prekidača u primarnom krugu transformatora. Sekundarni krug je električno već zatvoren i ispunjeni su svi uvjeti za protjecanje električne struje. Postojeći električni otpor između vrhova elektroda uvjetuje pretvaranje električne energije u toplinsku. Generiranje topline u dijelu metala između elektroda je veće od toplinskih gubitaka u okolni metal i elektrode, pa zbog toga temperatura mjesta spajanja raste i prelazi granicu faznog pretvaranja čvrstog materijala u tekući, što dovodi do zavarivanja. Prekidač se otvara, struja se prekida, ali sila između elektroda i dalje traje. Vodom hladene elektrode izazivaju naglo sniženje temperature rastaljene jezgre čime se materijal opet vraća u čvrsto agregatno stanje i proces je završen. Elektrode se odvajaju od materijala, a rezultat cijelog postupka je formiranje spoja koji spada u kategoriju trajnih spojeva. Ciklus elektrootpornog zavarivanja prikazan je na slici 3.[4]



Slika 3. Ciklus elektrootpornog zavarivanja [6]

3.2. Otpori materijala pri točkastom elektrootpornom zavarivanju

Otpori materijala [Ω] jedan su od odlučujućih čimbenika u procesu formiranja točkastog spoja. Njih čini ukupni otpor dijela električnog kruga između elektroda i dan je kroz zbroj sljedećih parcijalnih električnih otpora:

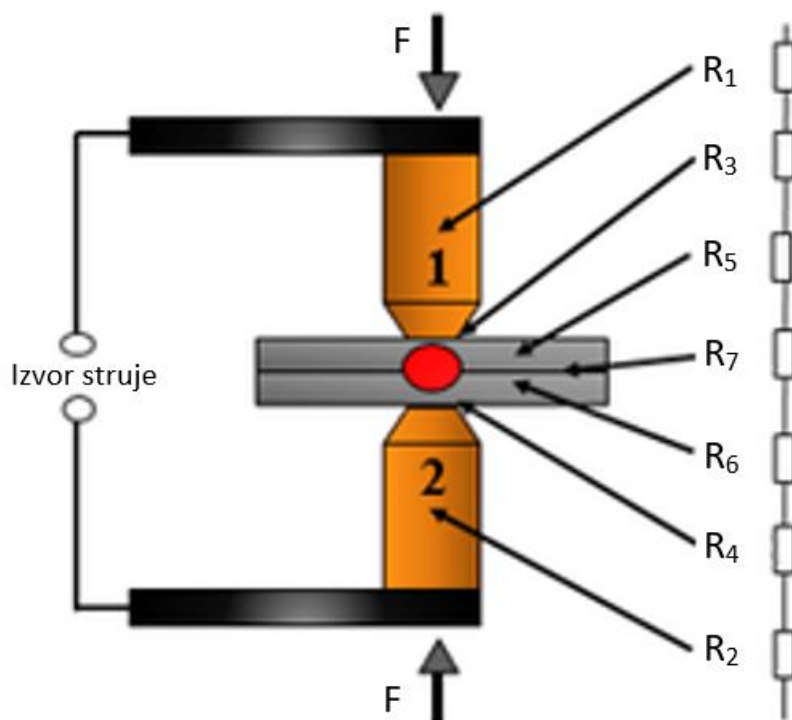
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ } [\Omega] \quad (3)$$

Gdje su:

- R_1 i R_2 - otpori elektroda, [Ω]
- R_3 i R_4 - kontaktni otpori između materijala i elektrode, [Ω]
- R_5 i R_6 - otpori materijala, [Ω]
- R_7 - kontaktni otpor između materijala, [Ω]

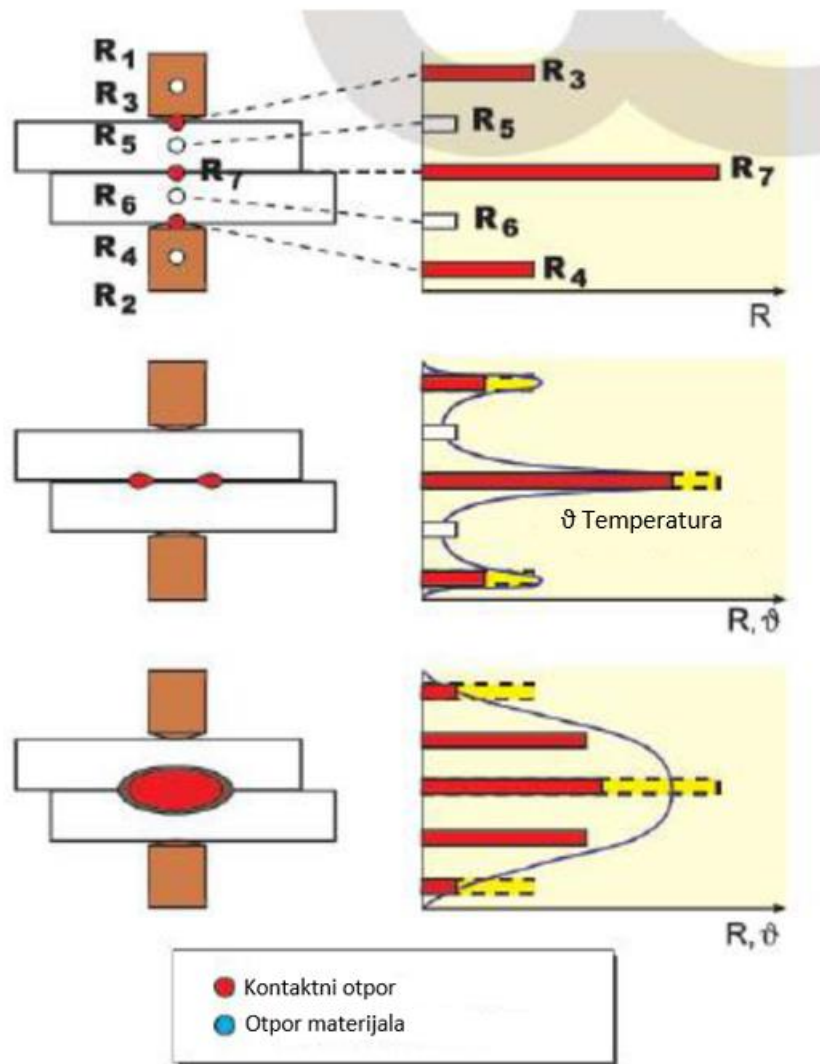
Budući da se elektrode izrađuju iz materijala koji veoma dobro provode električnu struju i stvaraju minimalan kontaktni otpor, najveći dio topline se izdvaja na kontaktu između komada, tako da je u početnom trenutku temperatura kontakta najveća. Međutim, s

povećanjem temperature, R_7 se smanjuje, tako da sada veću ulogu imaju otpori R_5 i R_6 čija vrijednost raste s porastom temperature. Shema otpora prikazana je na slici 4.



Slika 4. Otpori kod točkastog elektrotopornog zavarivanja [7]

Uzrok pojave kontaktnog otpora na mjestu dodira dva komada je nehomogenost kontaktnih površina. Naime, metalna površina nikada nije savršeno ravna, već je uvijek manje ili više hrapava. Kontakt dvaju površina se ostvaruje na ispupčenjima površina. Zbog toga struja teče samo kroz spomenute kontakte, tako da se pojavljuje veliki kontaktni otpor uslijed smanjenje površine kontakta. Vrijednosti otpora u ovisnosti o temperaturi prikazani su na slici 5. [4,8]



Slika 5. Vrijednosti otpora u ovisnosti o temperaturi [8]

Otpor kojim se vodič suprotstavlja prolasku struje proporcionalan je dužini vodiča, a obrnuto proporcionalan presjeku. Osim toga, specifični otpor je karakteristika svakog materijala. Izraz za računanje otpora je:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (4)$$

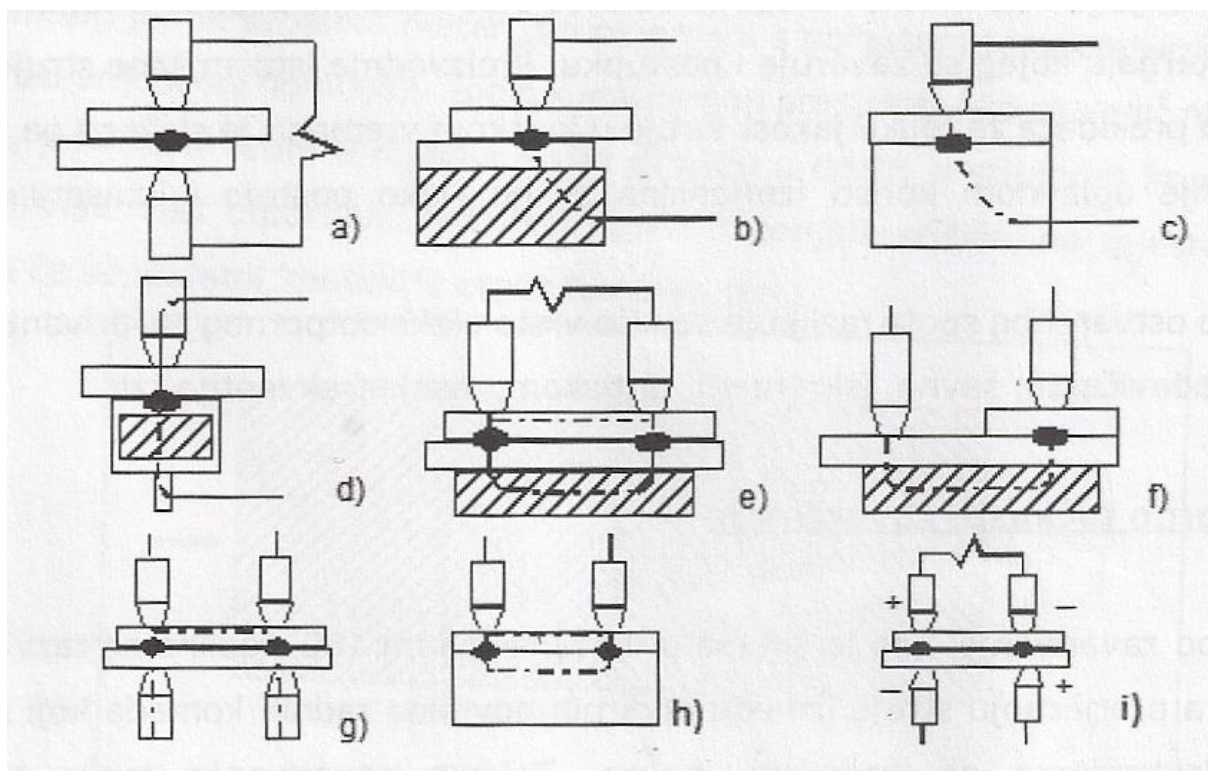
Gdje je R otpor vodiča [Ω], ρ je specifični otpor materijala vodiča [Ωm], l je duljina vodiča [m], a A je površina presjeka vodiča [m^2]. [1]

3.3. Načini izvođenja točkastog elektrotopornog zavarivanja

Ovisno o broju točaka ovaj postupak zavarivanja može biti jedнотоčkasti (elektrode se nalaze s obje ili s jedne strane zavarenog spoja) ili višetočkasti (struja prolazi istodobno kroz više točaka, što rezultira i većim brojem zavarenih mjesta). Najveću primjenu ima jedнотоčkasto dvostrano zavarivanje. [2]

Slika 6. prikazuje osnovne načine izvođenja točkastog zavarivanja: [1]

- a) klasični način
- b, c) gore klasična elektroda, dolje elektroda velike mase
- d) sučeljni spoj
- e) obje elektrode s gornje strane i velika masa dolje
- f) preklopni spoj, velika masa dolje
- g) istovremeno zavarivanje s dvije elektrode odozgo. Struja prolazi kroz oba dijela izratka
- h) istovremeno zavarivanje s dvije elektrode odozgo, dolje velika masa. Struja prolazi kroz oba dijela izratka
- i) zavarivanje s 2 para elektroda



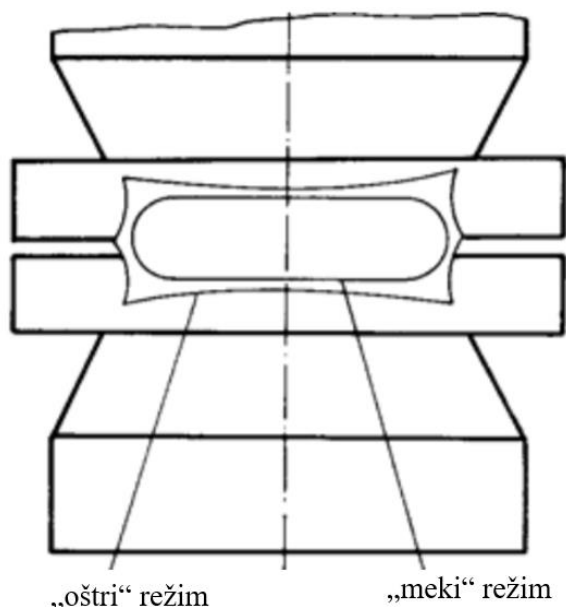
Slika 6. Osnovni načini izvođenja točkastog zavarivanja [1]

3.4. Režimi elektrootpornog točkastog zavarivanja

Za postizanje kvalitetnog točkasto zavarenog spoja potrebno je odabrati optimalni režim zavarivanja. Prema jačini struje i vremenu režimi se mogu podijeliti:

- „oštri“ režim – kratko vrijeme i velika struja
- „meki“ režim – dugo vrijeme i mala struja

Oštri režim karakteriziraju manji toplinski gubici i deformacije te bolja kvaliteta zavara. Najčešće se koristi za zavarivanje aluminijskog i bakra, a njegova mana je skuplja oprema. Meki režim karakteriziraju veliki toplinski gubici i deformacije, te duboki otisak elektroda. Navedeni režimi odražavaju se na oblik zavarene točke, koja je u slučaju mekog režima gotovo eliptična, a u slučaju oštrog režima javljaju se karakteristična ispupčenja po rubovima. Slika 7. prikazuje oblika zavara ovisno o režimu zavarivanja. [4,9]



Slika 7. Prikaz oblika zavara ovisno o režimu zavarivanja [9]

3.5. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja

Proces elektrootpornog točkastog zavarivanja sadrži niz parametara. Parametri su međusobno ovisni tako da promjena jednog može utjecati na ostale parametre. Odabir parametara zavarivanja određuje kvalitetu zavarenog spoja. Odgovarajuća kombinacija parametara rezultirat će dobrom kvalitetom zavara. Najbitniji parametri elektrootpornog zavarivanja su: [10]

1. Sila na elektrode
2. Dimenzije vrha elektrode
3. Vrijeme pritiska
4. Vrijeme zavarivanja
5. Vrijeme držanja
6. Struja zavarivanja

3.5.1. Sila na elektrode

Prilikom točkastog elektrootpornog zavarivanja potrebno je osigurati konstantan električni otpor i provodljivost na mjestu zavara što se postiže primjenom odgovarajuće sile na elektrode. Radni komadi koji se zavaruju moraju imati međusobni kontakt i prije ostvarivanja pritiska. Ispitivanja su pokazala da preveliki pritisak uzorkuje smanjenje otpora u točki kontakta između vrha elektrode i radnog komada, odnosno da se povećanjem sile na elektrode smanjuje omski otpor. Da bi se osigurala dobra kvaliteta zavara, povećanje sile potrebno je popratiti i povećanjem struje zavarivanja. U slučaju prevelike struje i premalog pritiska može doći do nepoželjne pojave – prskanja. [10,11,12]

3.5.2. Dimenzije vrha elektrode

Za određivanje promjera vrha elektrode razni standardi ili autori daju različite empirijske obrasce koji, u krajnjem, daju približne rezultate. Prema DVS-u (Deutscher Verband für Schweisstechnik), obrazac za određivanje promjera vrha elektrode glasi:

$$d_e = (5 \dots 10) \cdot \sqrt{s} \text{ [mm]} \quad (5)$$

Gdje je s debljina komada koji se zavaruje [mm]. [8]

U slučaju da je vrh elektrode premalog promjera, zavar će biti malen i slab. U slučaju da je prevelikog promjera, postoji opasnost od pregrijavanja osnovnog metala pri čemu dolazi do stvaranja praznina i plinskih džepova. [11]

3.5.3. Vrijeme pritiska

Vrijeme pritiska je vrijeme između primjene sile na elektrode i početka korištenja struje. Služi za odgodu početka zavarivanja dok se ne ostvari potrebna sila pritiska. [10]

3.5.4. Vrijeme zavarivanja

Vrijeme zavarivanja je vrijeme protjecanja struje kroz radne komade. S obzirom da se prilikom elektrootpornog zavarivanja koristi struju izuzetno velike jakosti koja prolazi kroz komade relativno visokog otpora, vrijeme potrebno za dobivanje zahtijevane količine topline je prilično kratko. Točno vrijeme potrebno za dobivanje optimalne kvalitete zavara uglavnom je teško predvidjeti.

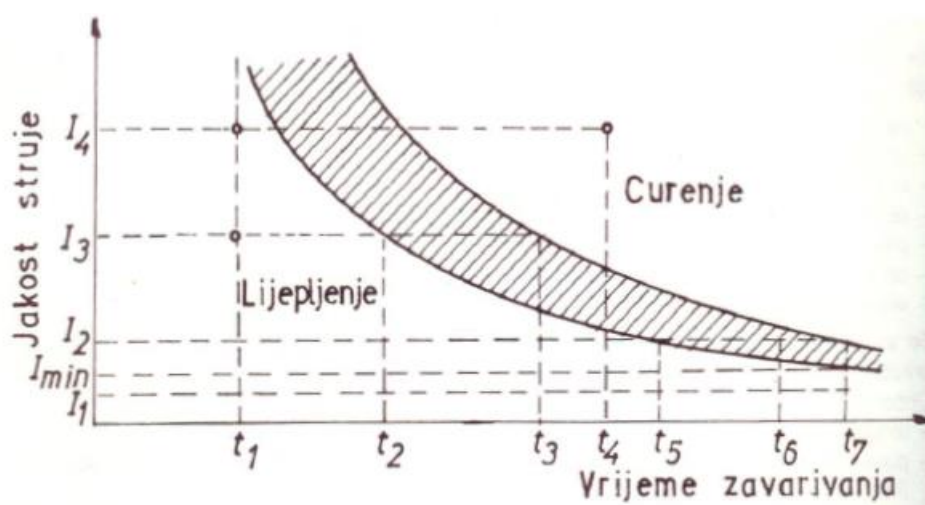
Vrijeme zavarivanja vrlo je važno. Ako je vrijeme zavarivanja predugo, može doći stvaranja prevelike količine topline što će dovesti do prskanja (ili čak vrenja) materijala koji se zavaruje. Konačan zavar bit će porozan i nekvalitetan. U ekstremnim slučajevima može doći i do izbacivanja rastaljenog metala iz zavarenog spoja što će smanjiti presjek zavara i oslabiti zavar. Kraće vrijeme zavarivanja smanjuje mogućnost prekomjernog zagrijavanja radnog komada na mjestu zavara te smanjuje zonu utjecaja topline. [11]

3.5.5. Vrijeme držanja

Vrijeme držanja je vrijeme nakon zavarivanja u kojem elektrode, još uvijek spojene s radnim komadom, hlade mjesto zavara. Vrijeme držanja omogućuje skrućivanje zavara prije oslobađanja zavarenih komada, ali ne smije biti dugo jer u postoji mogućnost da toplina sa zavarenog mjesta pređe na elektrodu čime će ona biti više izložena trošenju. Nadalje, ako je vrijeme držanja predugo, a sadržaj ugljika u materijalu visok (iznad 0,1%) postoji rizik da zavar postane krhak. U slučaju da se zavaruju pocinčani ugljični čelici preporučeno je raditi s dužim vremenom držanja. [11]

3.5.6. Struja zavarivanja

Jakost struje i vrijeme zavarivanja međusobno su povezani parametri, a njihov odnos definiran je već prije navedenom izrazom za količinu topline (1). Kako uvijek postoji minimalna jačina struje potrebna za dobivanje zavarenog spoja, vrijeme zavarivanja ne može se povećavati preko neke vrijednosti. Minimalna vrijednost jačine struje zavisi od karakteristika osnovnog materijala, debljina limova i stanja njihovih površina, dimenzija vrha elektrode i sile pritiska, kao i temperature metala na mjestu gdje se površine dodiruju. Vrijednost jakosti struje i vremena zavarivanja pri kojima je moguće dobiti zavareni spoj definirana je šrafiranim djelom na slici 8. [9]



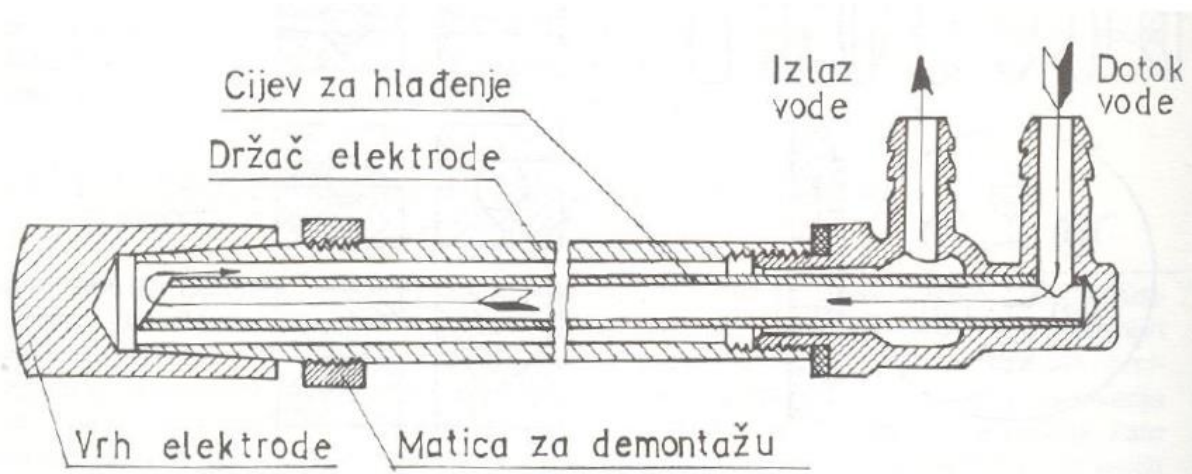
Slika 8. Ovisnost jakosti struje i vremena zavarivanja kod točkastog zavarivanja (dijagram karakterističan za svaki metal) [8]

Zavareni spoj neće nastati ukoliko se odaberu vrijednosti struje i vremena zavarivanja koje se nalaze lijevo od šrafiranog dijela već će se tada pojaviti efekt "lijepljenja" spojeva. U području koje se nalazi desno od šrafiranog dijela, uslijed prekomjerne topline doći će do prskanja rastaljenog materijala što pogoršava kvalitetu zavarenog spoja. [9]

3.6. Elektrode

Elektrode za zavarivanje su dijelovi sekundarnog strujnog kruga. Od njihovog pravilnog izbora i eksploatacije ovisi njihova trajnost i proizvodnost u procesu zavarivanja i svojstva zavarenog spoja. U toku procesa zavarivanja ovi dijelovi stroja izloženi su visokim strujnim, toplinskim i mehaničkim opterećenjima. Zato se oni najčešće izrađuju od bakra i legura bakra, a u specijalnim slučajevima i od nekih drugih materijala i legura.

Trajnost elektroda za elektrootporno zavarivanje ovisi od njihovog materijala i konstrukcije, režima zavarivanja i uvjeta hlađenja. Visoka kvaliteta elektroda jedan je od osnovnih uvjeta za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja. Cilindrična ravna elektroda za točkasto zavarivanje prikazana je na slici 9. [4]



Slika 9. Cilindrična ravna elektroda za točkasto zavarivanje [8]

Elektrode za elektrootporno zavarivanje u svom najširem značenju obavljaju ove funkcije: [8]

1. prenose silu do zone zavarivanja i određuju pritisak u njoj prije protoka struje
2. provode struju zavarivanja na mjesto kontakta, određuju gustoću struje na mjestu zavarivanja te određuju promjer zavarene jezgre
3. odvede toplinu iz zone zavarivanja tokom prolaza struje i poslije njenog isključenja
4. određuju položaj izratka te često služe kao nosači izratka (kod bradavičastog zavarivanja)

Na temelju iznesenog, materijali za izradu elektroda trebaju imati ove karakteristike: [8]

- visoku električnu provodljivost
- visoku toplinsku provodljivost

- visoku tvrdoću pri radnoj temperaturi
- visoku mehaničku otpornost
- homogenost strukture
- postojana mehanička i električka svojstva

Pored već navedenih zahtjeva od materijala elektroda za točkasto elektrootporno zavarivanje traži se što manja količina neželjenih legirajućih elemenata te dobra mehanička i tehnološka svojstva. Na postojanost materijala elektroda utječu i parametri zavarivanja kao što su način promjene struje zavarivanja, vrijeme zavarivanja, učestalost impulsa struje i veličina sile između elektroda.

U zavisnosti od konstruktivnog oblika dijelova koji se zavaruju, dimenzija i materijala tih dijelova, elektrode za točkasto elektrootporno zavarivanje mogu imati različite oblike i dimenzije. Izgled elektroda za elektrootporno zavarivanje prikazan je na slici 10. [4]

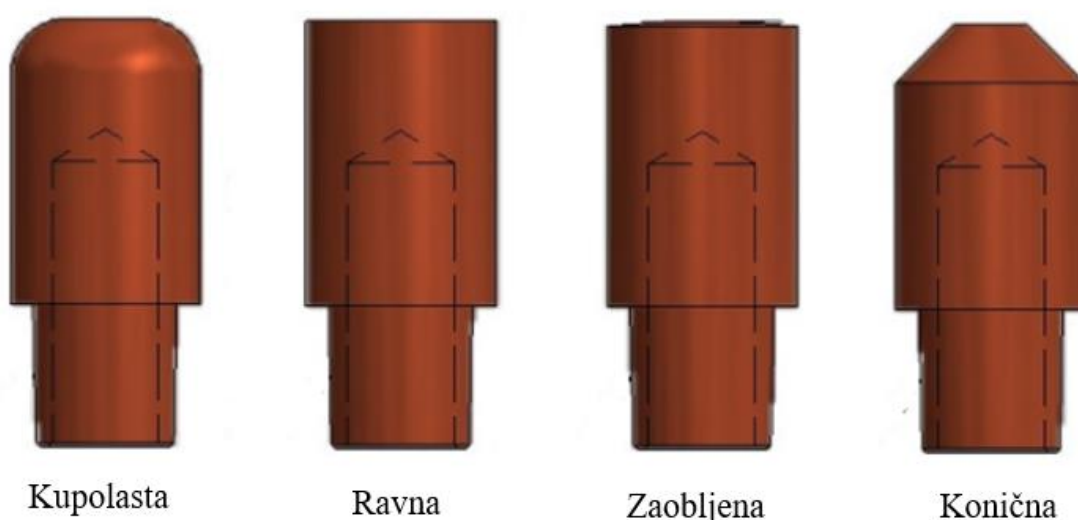


Slika 10. Elektrode za elektrootporno zavarivanje [13]

Oblik vrha elektrode ima bitan utjecaj na oblikovanje i izgled zavarene točke. Vrh elektrode može biti ravan ili zaobljen, a za pojedine specifične slučajeve izrađuju se i elektrode specijalnog oblika.

Kod upotreba elektroda s ravnim vrhom mora se paziti na to da komad koji se zavaruje bude paralelan s površinom vrha elektrode. Kod tih elektroda promjer zavarene točke može dostići i veličinu otiska vrha elektrode. Kod primjene elektrode sa zaobljenim vrhom promjer zavarene točke uvijek je manji nego površinski otisak elektrode.

Kod zavarivanja komada različitih debljina poželjno je, radi koncentracije struje, na mjestu zavarivanja za deblji lim uzeti manji radijus zaobljenja vrha elektrode, a za tanji lim veći radijus zaobljenja. Svaka promjena vrha elektrode zahtjeva korekciju jakosti struje i drugih parametara zavarivanja. Prikaz najčešće korištenih tipova elektroda za točkasto elektrootporno zavarivanje nalazi se na slici 11. [4]



Slika 11. Najčešće korištene elektrode za točkasto elektrootporno zavarivanje [14]

3.7. Strojevi za elektrootporno točkasto zavarivanje

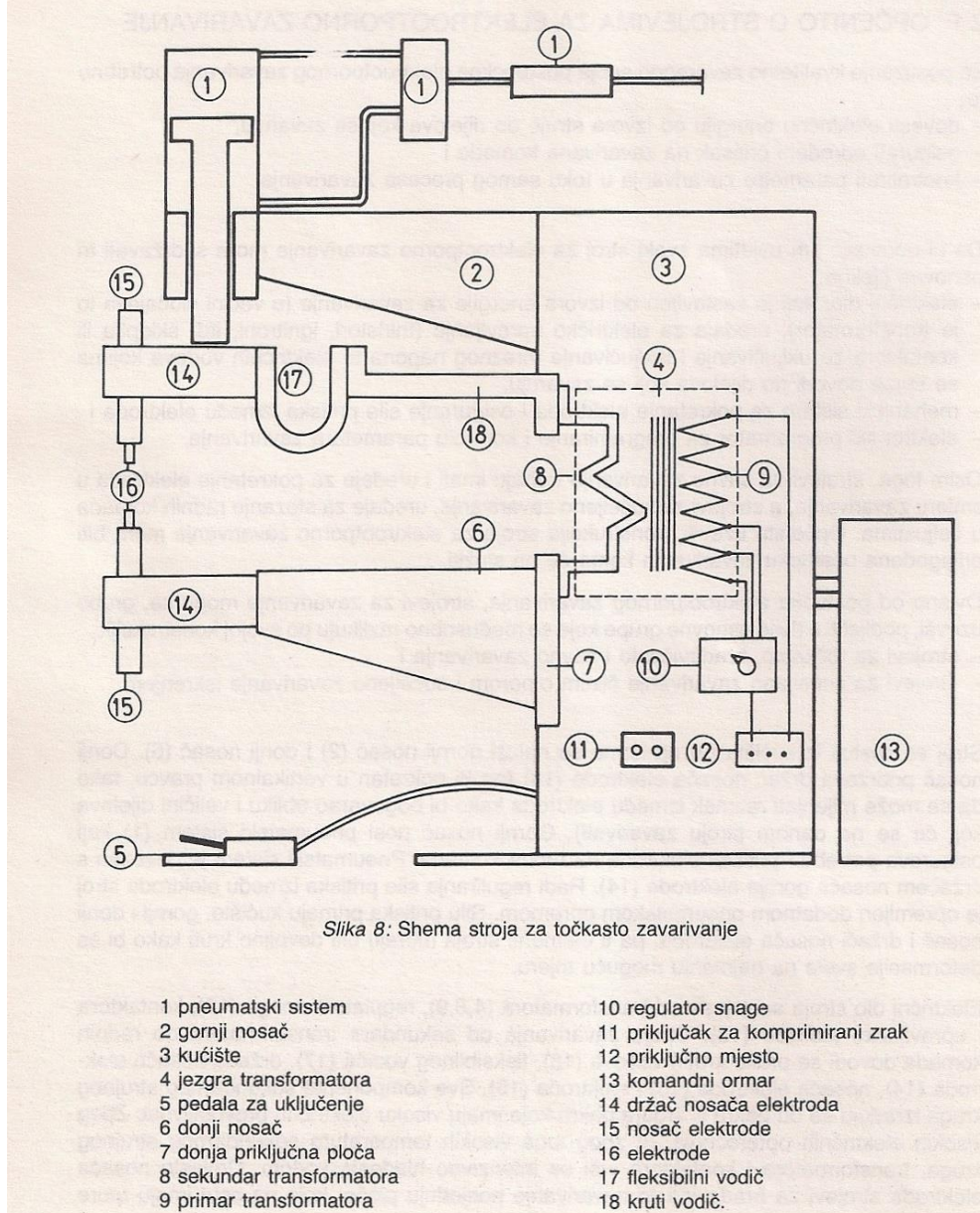
Strojevi za elektrootporno zavarivanje sastoje se od tri osnovne cjeline:

- električni dio, koji je sastavljen od izvora energije za zavarivanje (većini slučajeva to je transformator), uređaja za električno upravljanje sklopke ili kontaktora za uključivanje i isključivanje mrežnog napona te električnih vodova kojima se struja dovodi do dijelova koji se zavaruju
- mehanički sistem za pokretanje elektroda i osiguranje sile pritiska i
- elektronski programator za programiranje i kontrolu parametara zavarivanja.

Stroj se sastoji od kućišta (3) na kojem se nalazi gornji nosač (2) i donji nosač (6). Donji nosač pridržava držač elektrode (14) koji je pokretan u vertikalnom pravcu, tako da se može

mijenjati razmak između elektroda kako bi odgovarao obliku i veličini dijelova koji će se na danom stroju zavarivati. Gornji nosač nosi pneumatski sistem (1) koji osigurava potreban pritisak elektroda na radne komade. Pneumatski sistem je povezan s držačem nosača gornje elektrode (14). Radi reguliranja sile pritiska između elektroda stroj je opremljen dodatnom pneumatskom opremom. Silu pritiska primaju kućište, gornji i donji nosač i držači nosača elektroda, pa ti elementi stroja moraju biti dovoljno kruti kako bi se deformacije svele na najmanju moguću mjeru. Pokretanje elektroda izvodi se pomoću pedale (5).

Električni dio stroja sastoji se od transformatora (4,8,9), regulatora snage (10), kontaktora i upravljačke jedinice (13). Kontaktori su elektromagnetni prekidači koji imaju sposobnost da izvrše uključenje ili isključenje kruga pri višim opterećenjima nego releji. Struja zavarivanja od sekundara transformatora do radnih komada dovodi se preko krutih vodova (18), fleksibilnog vodiča (17), držača nosača elektroda (14), nosača elektroda (15) i elektroda (16). Sve komponente sekundarnog strujnog kruga izrađuju se od bakra ili legura bakra koje imaju visoku električnu provodljivost. Intenzivno hlađenje vodom vrši se zbog visokih strujnih opterećenja, a samim time i visokih temperatura sekundarnog strujnog kruga. Numerirani dijelovi stroja za točkasto elektrootporno zavarivanje prikazani su na slici 12. [4]



Slika 12. Shema stroj za točkasto zavarivanje s naznačenim djelovima [4]

3.7.1. Vrste strojeva za elektrootporno zavarivanje

Strojevi za elektrootporno zavarivanje međusobno se razlikuju prema vrsti struje za zavarivanje, broju spojeva koji se mogu istodobno zavariti, načinu montiranja itd.

S obzirom na vrstu struje koja se koristi strojevi za elektrootporno zavarivanje mogu biti istosmjerni, izmjenični (s frekvencijom od 50 Hz i niskofrekventni) i kondenzatorski (strojevi s akumulacijom). Kao što je već napomenuto, za elektrootporno zavarivanje primjenjuju se struje vrlo visoke jakosti i malog napona čija je proizvodnja vrlo otežana. Osim toga, izvedba jednostavnih prekidača za toliku istosmjernu struju, čiji je zadatak propuštanje struje u vrlo

kratkom vremenu, izuzetno je skupa. Zato se za elektrootporno zavarivanje uglavnom koristi izmjenična struja koja u odnosu na istosmjernu ipak ima veliki nedostatak, a to je veliki induktivni otpor koji može utjecati na proces zavarivanja. Proizvodnja izmjenične struje malog napona i velike jakosti moguća je pomoću stacionarnih transformatora. Transformatori za zavarivanje su najprošireniji i najviše upotrebljavani izvori struje za zavarivanje koji izmjeničnu električnu struju transformiraju u također izmjeničnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje. [4,15]

Prema načinu montiranja strojeva za elektrootporno točkasto zavarivanje razlikujemo strojeve u stabilnoj (fiksnoj) i prenosivoj (ručnoj) izvedbi. Stabilni strojevi posjeduju veću snagu i mogućnosti programiranja, dok ručni imaju veću mogućnost manevriranja i zavarivanja teže dostupnih mjesta. U ovisnosti o broju spojeva koji se mogu istodobno zavariti strojevi za elektrootporno točkasto zavarivanje mogu biti jedнотоčkasti ili višetoečkasti. S obzirom na putanju elektroda izvedba može biti linearna ili škarasta. Kod linearne izvedbe put elektroda je linearan, dok je kod škaraste u obliku kružnog luka. Potrebna sila na elektrode može se postići na pneumatski, hidraulički, električni ili mehanički način. Standardne izvedbe strojeva za točkasto elektrootporno zavarivanje prikazane su na slikama 13,14 i 15. [12,16]



Slika 13. Stroj za elektrootporno zavarivanje s lučnim putem elektroda [17]



Slika 14. Stroj za elektrootporno zavarivanje s linearnim putem elektroda [12]



Slika 15. Ručni stroj za elektrootporno zavarivanje [18]

3.8. Zavarljivost materijala elektrootpornim zavarivanjem

Zavarljivost je sposobnost materijala da se pri određenim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj. Na zavarljivost utječu kemijski sastav, dimenzije dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala, priprema spoja itd.

Ocjena zavarljivosti je najčešće kvalitativna (zadovoljavajuća / ne zadovoljavajuća), ali može biti i kvantitativna. Kvalitativna zavarljivost se opisuje riječima ili se uspoređuje zavarljivost više materijala uz primjenu iste tehnologije zavarivanja. Kvantitativna zavarljivost se određuje tako da se eksperimentalnim metodama dobiju podaci o svojstvima zavarenih spojeva i svojstvima osnovnog materijala. [19,20]

Kod zavarivanja ugljičnih čelika s vrlo niskim sadržajem ugljika (0,05 – 0,10%) mehanička svojstva zavara praktično su jednaka mehaničkim svojstvima zavarenog materijala. S povećanjem sadržaja ugljika iznad 0,10% zapaža se neznatan utjecaj zakaljene strukture što dovodi do povećanja čvrstoće i omogućava postizanje zavarenih spojeva čija čvrstoća ponekad premašuje čvrstoću osnovnog materijala. Utjecaj zakaljene strukture vrlo brzo se povećava s povećanjem sadržaja ugljika, ali se istodobno zapaža smanjenje plastičnosti zavarenog spoja. Kod zavarivanja čelika sa sadržajem ugljika iznad 0,35% metalografska ispitivanja pokazuju prisustvo martenzita u jezgri zavarene točke. To dovodi do pojave krhkosti pa ako zavarena točka nije toplinski naknadno obrađena spoj postaje neupotrebljiv. Iz tog razloga često se provodi naknadno zagrijavanje. [4]

Iako aluminij ima toplinsku vodljivost i električni otpor blizak bakru, talište aluminija je niže, što znači da je zavarivanje moguće. Međutim, zbog malog specifičnog otpora materijala, pri zavarivanju aluminija potrebno je koristiti struje mnogo više jakosti u odnosu na ostale materijale. Jakost struje potrebne za zavarivanje aluminijskih limova je i dva do tri puta veća nego kod čelika jednake debljine. Težnja aluminija prema legiranju s bakrom zahtjeva redovito čišćenje i održavanje elektroda.

Zavarivanje bakra nije izvedivo konvencionalnim metodama s obzirom da će toplina stvorena između radnih komada biti gotovo jednaka onoj na vrhovima elektroda. Problem je moguće riješiti korištenjem elektroda izrađenih od materijala slabije vodljivosti kao što su volfram i molibden. U tom slučaju volfram daje bolje rezultate radi boljeg zagrijavanja i manje opasnosti od lijepljenja za bakar. Prednost molibdena jest da se lakše obrađuje s obzirom da je volfram praktično neobradiv klasičnim alatima.

Teoretska i praktična iskustva pokazuju da zavarljivost metala i legura postupcima elektrootpornog zavarivanja ovisi o mnoštvu utjecajnih faktora. Višegodišnja istraživanja su pokazala da se ocjena zavarljivosti metala i legura može dati prema tablici 2. [4, 21]

Tablica 2. Ocjena međusobne zavarljivosti metala i legura postupcima elektrootpornog zavarivanja [4]

1 - odlično 2 - dobro 3 - podnošljivo 4 - loše 5 - nedovoljno 6 - nemoguće	Aluminij	Nehrđajući čelik	Mesing	Bakar	Pocinčani lim	Čelik	Olovo	Nikl	Kromnikl (20% Cr, 80% Ni)	Cink	Fosforna bronca	Novo srebro
Aluminij	2	5	4	5	3	4	5	4	4	3	3	6
Nehrđajući čelik	5	1	5	5	2	1	6	3	3	6	4	4
Mesing	4	5	3	4	4	4	6	3	3	5	3	3
Bakar	5	5	4	5	5	5	5	4	4	5	3	3
Pocinčani lim	3	2	4	5	2	2	4	3	3	3	4	5
Čelik	4	1	4	5	2	1	6	3	3	6	3	4
Olovo	5	6	6	5	4	6	3	5	5	3	5	5
Nikl	4	3	3	4	3	3	5	1	2	6	3	2
Kromnikl (20% Cr, 80% Ni)	4	3	3	4	3	3	5	2	1	6	4	2
Cink	3	6	5	5	3	6	3	6	6	3	4	6
Fosforna bronca	3	4	3	3	4	3	5	3	4	4	2	2
Novo srebro	6	4	3	3	5	4	5	2	2	6	2	1

3.9. Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja

Točkasto elektrootporno zavarivanje odlikuje visoka učinkovitost i kratko trajanje postupka. Za razliku od ostalih postupaka zavarivanja, najzahtjevniji dio točkastog elektrootpornog zavarivanja nije njegovo izvođenje, već sama priprema postupka. Potrebno je precizno pozicionirati djelove i postaviti parametre, dok je samo trajanje postupka izuzetno kratko. Stoga primjenu pritiska i regulaciju vremena zavarivanja ne kontrolira operater, već je ono programirano na samom stroju. Nakon početnog podešavanja, cijeli proces zavarivanja odvija se automatski. Samim time krajnja kvaliteta zavara ne ovisi o vještini operatera već o poznavanju postupka i programiranju stroja. Navedene karakteristike čine elektrootporno zavarivanje izuzetno pogodnim za robotizaciju. Upotreba robota za zavarivanje u proizvodnji započela je 70-ih godina 20-tog. stoljeća upravo primjenom robota za elektrootporno zavarivanje. Primjena robota osigurava zahtijevanu čvrstoću i izgled zavara, a samim time i povećava kvalitetu krajnjeg proizvoda. Neki od najpoznatijih tvrtki za proizvodnju takvih

robota su ABB, Fanuc, Kuka i Motoman. Daljnji razvoj elektronike i kompjutorske tehnike omogućit će bolje upravljanje procesom zavarivanja, a time i širu primjenu robota. Prikaz robota za točkasto elektrootporno zavarivanje nalazi se na slici 16. [1, 22]



Slika 16. Robot za točkasto elektrootporno zavrivanje [23]

Točkasto elektrootporno zavarivanje naveliko se primjenjuje u industriji, a posebno je pogodno za masovnu i serijsku proizvodnju zbog dobre mogućnosti automatizacije, velike učinkovitosti, kratkog trajanja postupka i mogućnosti zavarivanja većeg broja spojeva istovremeno. Činjenica da prilikom postupka nije potrebno koristiti dodatni materijal i zaštitne plinove povećava njegovu ekonomičnost. Najveća primjena postignuta je u automobilskoj industriji pri spajanju limova u proizvodnji karoserija automobila. U elektroindustriji koristi se za zavarivanje limova pri izradi kutija, kućišta i nosača, a pritom se često zavaruju obojeni materijali poput mesinga. Kod zavarivanja pri proizvodnji elektromotora elektrootporno zavarivanje omogućilo je da se olakšaju rotacijski dijelovi i time postignu velike uštede u proizvodnji. U vojnoj industriji točkasto zavareni spojevi prisutni su na sanducima za municiju, pješadijskim minama, krilcima na stabilizirajućem repu granata teških topova i prstenovima za vješanje bombi. Od ostalih industrija elektrootporno

zavarivanje primjenjuje se i u zrakoplovnoj industriji, te industriji bijele tehnike. Ostali oblici elektrootpornog zavarivanja kao što su bradavičasto, sučeono i šavno također su često zastupljeni u navedenim industrijama. Na slici 17. prikazana je primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja u automobilskoj industriji. [1,4,21]



Slika 17. Primjena robotiziranog elektrootpornog točkastog zavarivanja u automobilskoj industriji [21]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zavareno je 18 komada tankih limova te je na taj način dobiveno 9 ispitnih uzoraka (epruveta). Na svim uzorcima zatim je provedeno nerazorno i razorno ispitivanje. Cilj eksperimenta bio je utvrditi utjecaj parametara točkastog elektrootpornog zavarivanja na izgled i kvalitetu zavarenog spoja.

4.1. Stroj za točkasto elektrootporno zavarivanje


Stroj korišten za točkasto elektrootporno zavarivanje radnih komada je TV-15 PKS proizvođača Servus d.o.o. iz Čakovca. Navedeni stroj ima mogućnosti zavarivanja velikog broja materijala kao što su limovi, žice, proizvodi od žice, konstrukcijskih materijala, aluminija, bakra, plemenitih materija i pocinčanih materijala. Korišteni stroj TV-15 PKS prikazan je na slici 18.



Slika 18. Stroj za točkasto elektrootporno zavarivanje TV – 15 PKS

Stroj ima stabilnu mehaničko - pneumatsku izvedbu. Potrebna sila na elektrode, kao parametar zavarivanja, dobiva se stlačenim zrakom. Elektrode su postavljene u „škarastoj izvedbi“ što znači da put elektroda prilikom zatvaranja nije linearan već je u obliku kružnog luka. Kod škaraste izvedbe ovog uređaja, pneumatski cilindar nalazi se na donjoj (temeljnoj) ploči stroja i silu zavarivanja prenosi preko mehanizma dizanja i gibljivog držača elektroda na same elektrode. Stoga je gornja ručica, za razliku od donje, gibljiva i sa zavarivačkim transformatorom povezana preko fleksibilnih lamela. Donja ručica, s držačem elektroda, povezana je sa zavarivačkim transformatorom preko koljena ručice i donje ploče sekundara. Također, donja ručica može se podešavati visini. Treba imati na umu da se povećanjem razmaka između gornje i donje ručice povećava put koji prolazi struja zavarivanja, te će ona u tom slučaju biti manja na vrhovima elektroda.

U unutarnjem dijelu naprave nalazi se energetski dio s transformatorom i energetika sa tiristorom koje je, kao i držače elektroda, potrebno hladiti vodom. Specifikacije stroja prikazane su na slici 19.

Proizvođač: SERVUS d.o.o. Dr.Ivana Novaka 32 HR-40000 ČAKOVEC	Zaštitni znak:  		
Standard: DIN ISO 669	Serijski broj: 2438017		
Tip naprave: TV-15PKS/320 daN			
Nazivni primarni napon U_1	<input type="text" value="3~50 Hz"/>	U_{1n}	<input type="text" value="400"/> V
Pomoćni napon U_a	<input "="" type="text" value="="/>	U_a	<input type="text" value="24"/> V
Nazivna snaga kod 50% intemitencije		S_n	15 kVA
Makismalna nazivna snaga		S_{max}	18,5 kVA
Napon praznog hoda U_{20} od	do 3,5 V	kontinuirana	
Maksimalni sekundarni tok kratkog spoja transformatora	I_{2cc}	45 kA	
Razmak ručica	e	od 200 do 360 mm	
Raširanje ručica	i	350 mm	
Maks. sila na eletrodi	F_{max}	od do 3200 N	
Min. sila na elektrodi	F_{min}	500 N	
Primarni pritisak	p_a	0,5-6,3 bar	
Protok medija za hlađenje	Q	4 l/min	

Slika 19. Specifikacije stroja

Upravljačka jedinica smještena je u gornjem bočnom dijelu naprave, a pored nje se nalazi i glavni prekidač. Sastoji se od tri osnovna dijela:

- Mikroprocesorske jedinice
- Tiristorskog energetskeg bloka
- Kabela za povezivanje

Mikroprocesorska jedinica 1010-T s LCD ekranom izrađena je na bazi mikroprocesora ugrađenog u kućište s folijskom tastaturom. Služi za izbor funkcija i unos parametara zavarivanja, te optičkom signalizacijom prikazuje status naprave. Tiristorski energetske blok je energetske dio upravljanja. To je poluvodički element koji provodi ili ne provodi struju u propisanom smjeru. Kod prolaza struje kroz „nulu“ tiristor se zatvara i ne propušta struju do nailaska sljedećeg upravljačkog signala kojeg daje jedinica za upravljanje. Kabel za povezivanje je višežilni kabel, opremljen konektorima, koji MPC – jedinicu i tiristorski energetske blok povezuje u jednu cjelinu. Upravljačka jedinica stroja prikazana je na slici 20. [16]



Slika 20. Upravljačka jedinica stroja

4.2. Ispitni uzorci i njihova priprema

Materijal od kojeg su načinjeni ispitni uzorci je lim tankog nehrđajućeg čelika prethodno izrezan na dimenzije 110x50x1,3 mm. Uzorci su zavarivani u nađenom stanju i njihova površina prije zavarivanja nije obrađivana. Analiza kemijskog sastava provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala ručnim Delta XRF (X-ray fluorescence) analizatorom tvrtke Olympus. [24] Oprema za analizu kemijskog sastava čelika prikazana na slici 21.



Slika 21. Oprema za analizu kemijskog sastava čelika

Kemijski sastav korištenog čelika prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav materijala

Element	Udio, %	+/-
Fe	71,4	0,29
Cr	16,81	0,12
Ni	8,91	0,13
Mn	0,79	0,06
Ti	0,5	0,05
Co	0,45	0,08
Cu	0,38	0,03
Si	0,37	0,05
Mo	0,267	0,006
V	0,12	0,03

4.3. Zavarivanje uzoraka

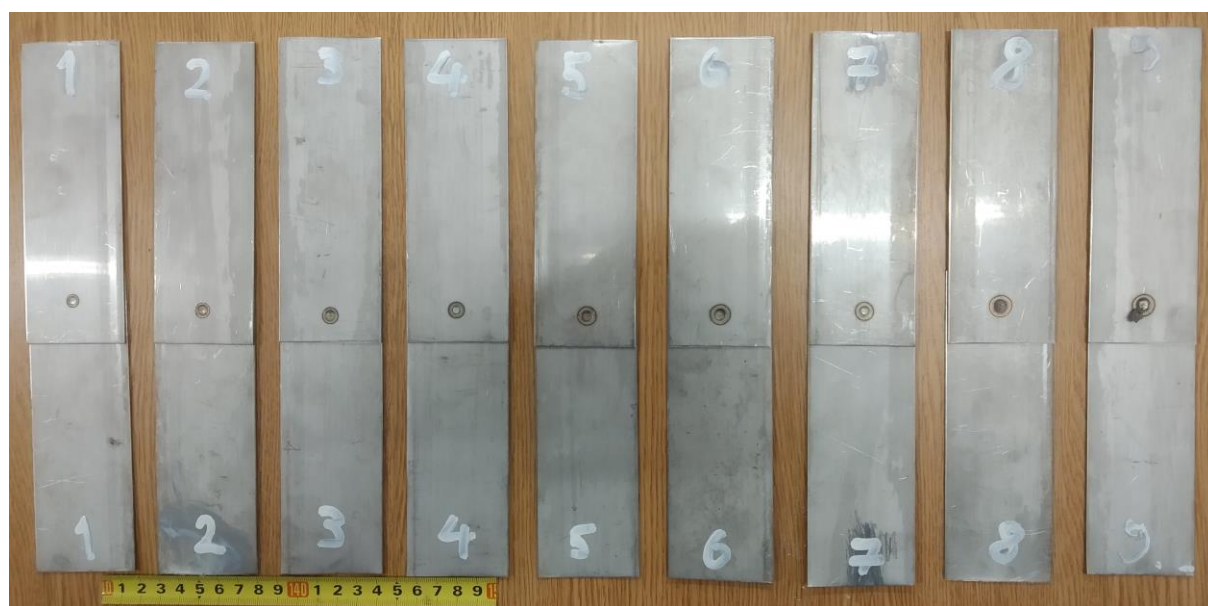
Nakon pripreme i ispitivanja kemijskog sastava materijala, uzorke je bilo potrebno zavariti. Prije aktivacije stroja i početka zavarivanja potrebno je podesiti željene parametre na upravljačkoj ploči. Aktivacija stroja izvodi se korištenjem pedale.

Varijabilni parametri u eksperimentu bili su vrijeme i struja zavarivanja. Ostali parametri kao što su vrijeme pritiska i držanja, te sila na elektrode bili su konstantni tijekom cijelog eksperimenta. Za podešavanje vremena zavarivanja odabire se broj perioda, pri čemu jedna perioda iznosi 20 milisekundi. Podešavanje struje izvodi se preko postotka snage stroja koju želimo koristiti u odnosu na maksimalnu snagu stroja. Kombinacijom 3 vrijednosti za svaki od dva varijabilna parametra dobiveno je 9 različitih zavara na 9 različitih ispitnih uzoraka. Korišteni parametri prikazani su u tablici 4.

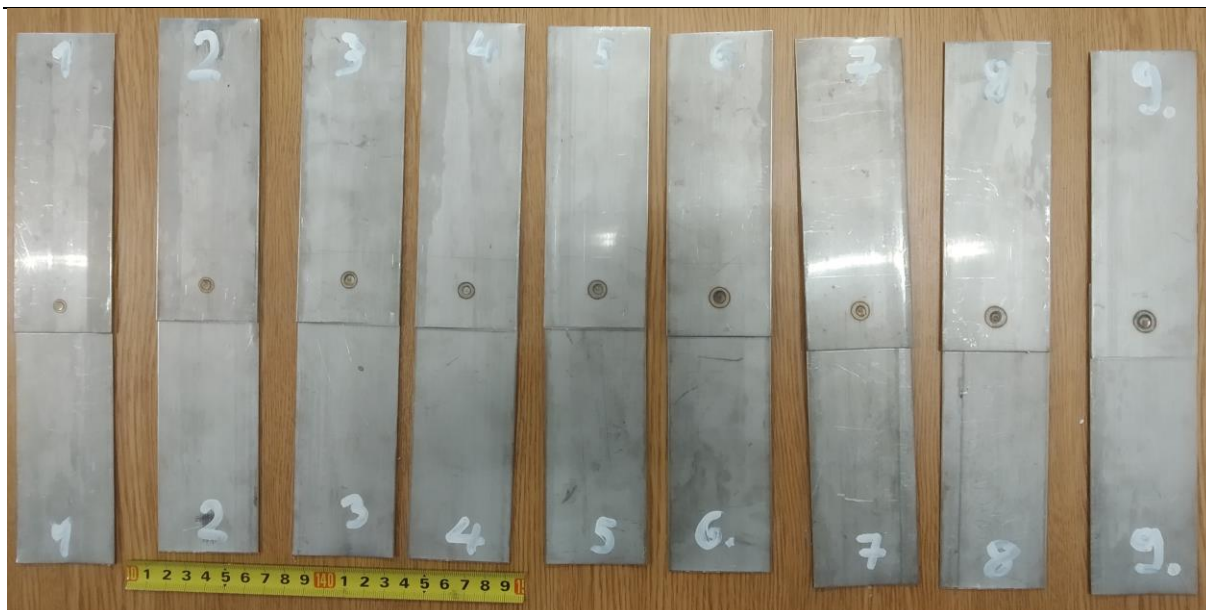
Tablica 4. Parametri zavarivanja pojedinih ispitnih uzoraka

Broj uzorka	t_z , s	I_z , kA
1	0,3	5,95
2	0,3	6,8
3	0,3	7,65
4	0,6	5,95
5	0,6	6,8
6	0,6	7,65
7	0,9	5,95
8	0,9	6,8
9	0,9	7,65

Izgled dobivenih ispitnih uzoraka prikazan je na slikama 22. i 23.

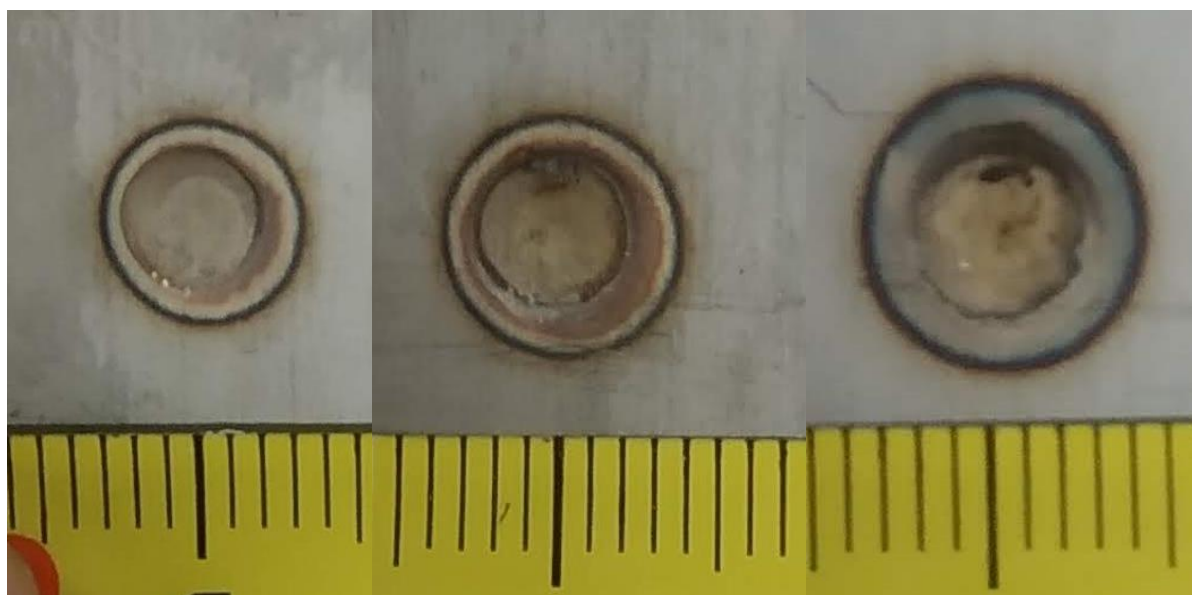


Slika 22. Donja strana ispitnih uzoraka (kontakt: radni komad – nepomična elektroda)



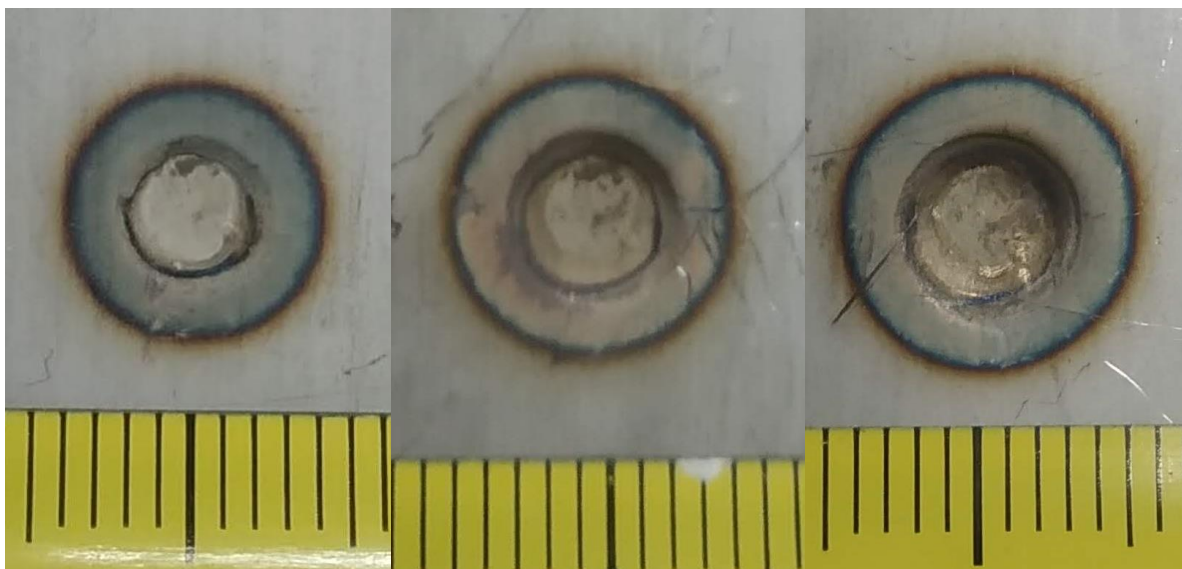
Slika 23. Gornja strana ispitnih uzoraka (kontakt: radni komad – pomična elektroda)

Uvećani prikaz zavara za ispitne uzorke 1, 2 i 3 prikazan je na slici 24.



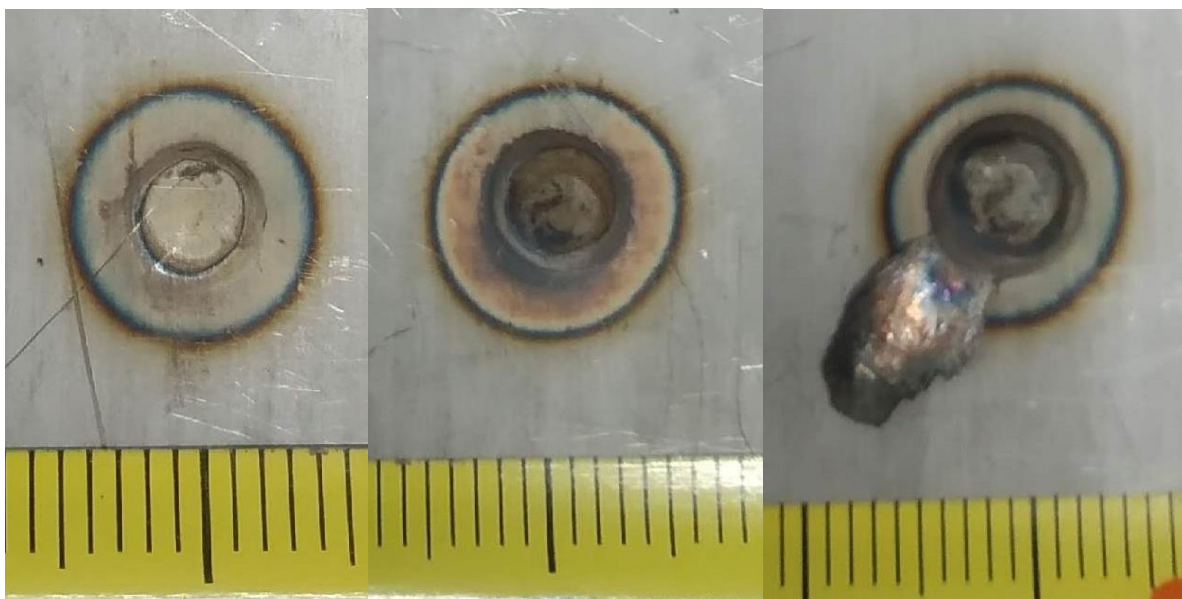
Slika 24. Prikaz zavara za ispitne uzorke 1, 2 i 3

Uvećani prikaz zavora za ispitne uzorke 4, 5 i 6 prikazan je na slici 25.



Slika 25. Prikaz zavora za ispitne uzorke 4, 5 i 6

Uvećani prikaz zavora za ispitne uzorke 7, 8 i 9 prikazan je na slici 26.

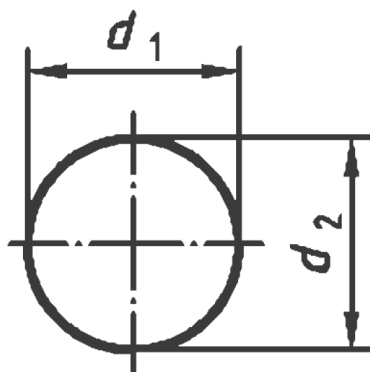


Slika 26. Prikaz zavora za ispitne uzorke 7, 8 i 9

4.4. Nerazorno ispitivanje uzoraka

Nerazorno ispitivanje izvršeno je vizualnom analizom fotografija ispitnih uzoraka koristeći softver za obradu fotografije *ImageJ*. Za svaki uzorak izmjereni su promjeri zavora (d_1 i d_2), te promjeri zone utjecaja topline (d_{zut1} i d_{zut2}) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Iz tih

mjerenja dobivene su vrijednosti srednjih promjera (d_s i d_{zuts}). Mjerenje promjera odrađeno je u prema normi ISO 14329 – 2003. Prikaz mjerenja promjera zavara nalazi se na slici 27.



Slika 27. Prikaz mjerenja promjera zavara prema normi ISO 14329 – 2003 [27]

Norma ISO 14329 – 2003 propisuje i izračun srednjeg promjera za simetrični oblik zavara koji je jednak aritmetičkoj sredini promjera odnosno:

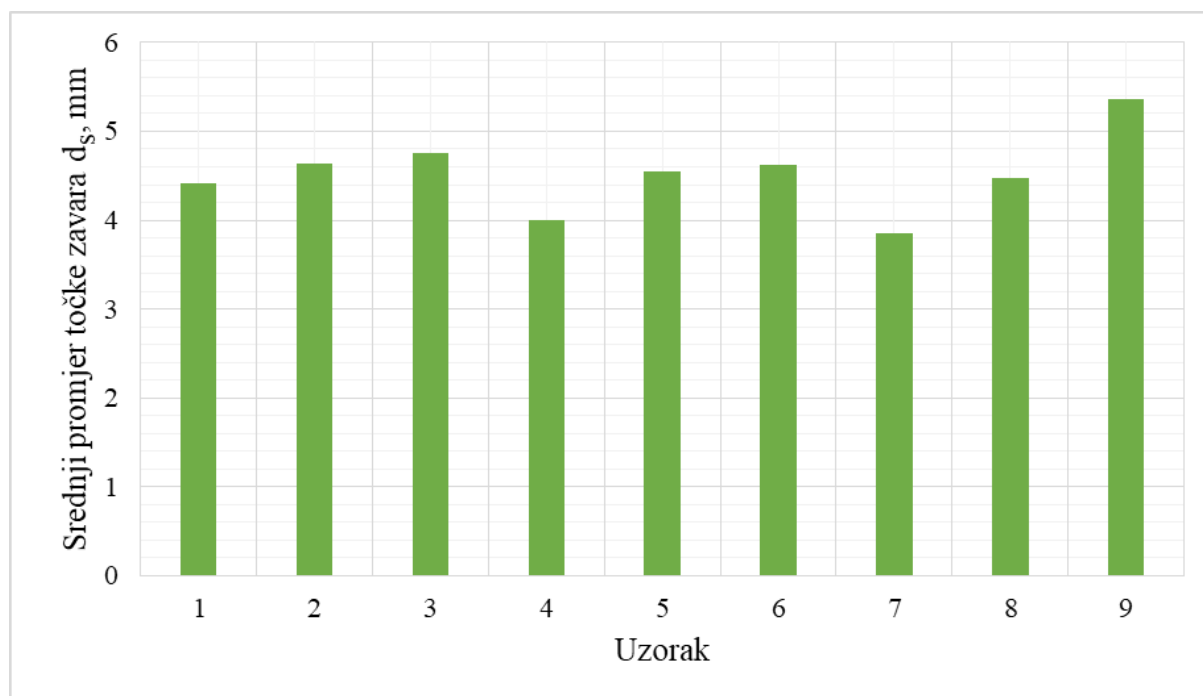
$$d_s = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

Rezultati nerazornog ispitivanja prikazani su u tablici 5.

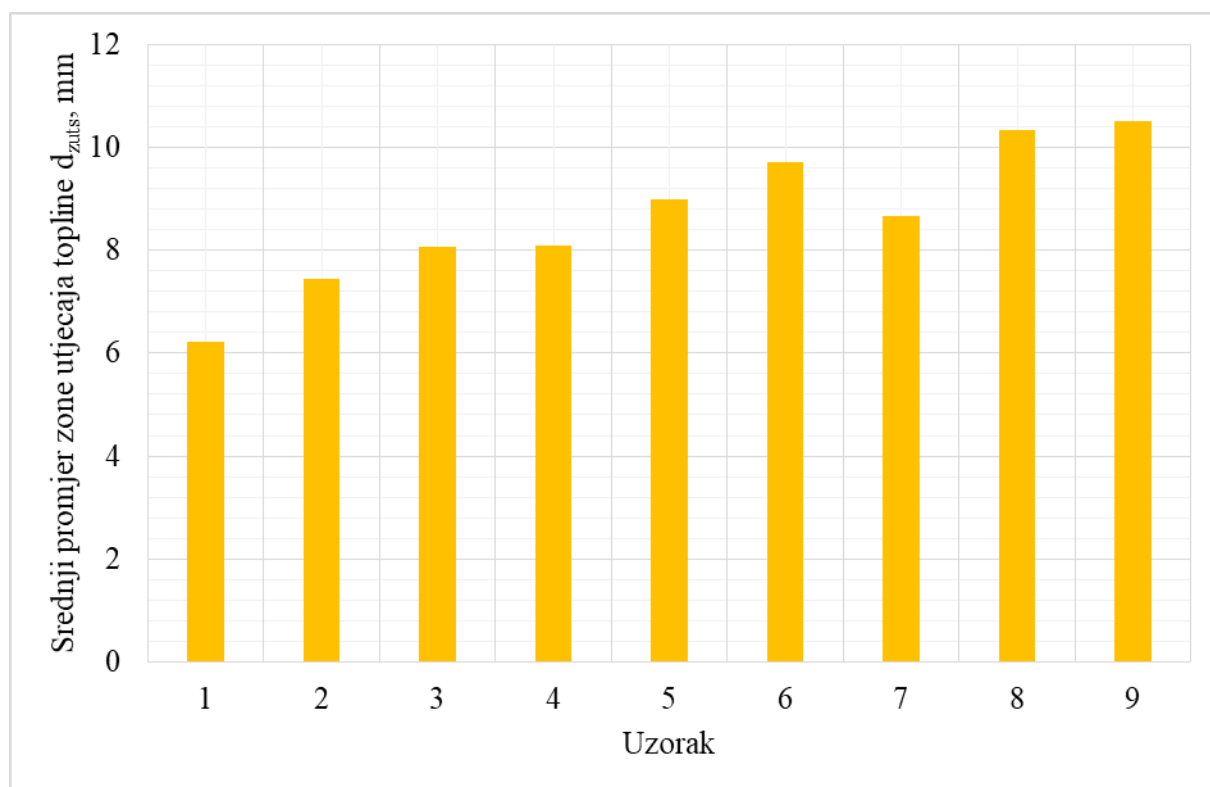
Tablica 5. Izmjereni promjeri točke zavara i zone utjecaja topline

Uzorak	d_1 , mm	d_2 , mm	d_{zut1} , mm	d_{zut2} , mm	d_s , mm	d_{zuts} , mm
1	4,567	4,262	6,323	6,120	4,415	6,222
2	4,601	4,672	7,388	7,503	4,637	7,446
3	4,739	4,785	7,929	8,225	4,762	8,077
4	4,117	3,887	8,067	8,103	4,002	8,085
5	4,546	4,560	9,011	8,984	4,553	8,998
6	4,815	4,427	9,663	9,768	4,621	9,716
7	3,625	4,072	8,491	8,830	3,849	8,661
8	4,500	4,439	10,278	10,384	4,470	10,331
9	5,315	5,421	10,396	10,608	5,368	10,502

Grafički prikaz dobivenih rezultata prikazan je na slikama 28. i 29.



Slika 28. Grafički prikaz srednjeg promjera točke zavara



Slika 29. Grafički prikaz srednjeg promjera zone utjecaja topline

Nakon tabličnog i grafičkog prikaza podataka o izmjerenim promjerima za korištene parametre, moguće je napraviti analizu dobivenih podataka. Možemo reći da jakost struje

zavarivanja ima najveći utjecaj na veličinu promjera točke zavara i zone utjecaja topline. Za slučaj konstante jakosti struje i varijabilnog vremena zavarivanja, promjer zone utjecaja topline rastao je u skladu s porastom vremena. Isto se dogodilo i u slučaju konstantnog vremena zavarivanja gdje je promjer zone utjecaja topline rastao s porastom jakosti struje. Vrijeme zavarivanja se također pokazalo kao utjecajan parametar. Za slučaj konstantnog vremena zavarivanja promjer zavarene točke rastao je s porastom jakosti struje. U slučaju konstante struje zavarivanja situacija je obrnuta, tamo je promjer zavarene točke padao s porastom vremena uz iznimku uzorka 9.

4.5. Razorno ispitivanje uzoraka

Razorno ispitivanje uzoraka provedeno je u na kidalici u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih sredstava. Na svim uzorcima dodana su ispučenja radi boljeg prianjanja na pakne same kidalice. Model kidalice koji se koristio je EU 40 mod, a prikazan je na slici 30.



Slika 30. Kidalica EU 40 mod

Svi uzorci montirani su na kidalicu te izloženi kontinuiranom vlačnom opterećenju. Brzina prirasta opterećenja za sve uzorke je iznosila 5 mm/min. Prirast opterećenja praćen je pomoću softvera na ekranu računala spojenog s kidalicom. Ispitni uzorci nakon ispitivanja na kidalici prikazani su na slici 31.



Slika 31. Ispitni uzorci nakon ispitivanja na kidalici

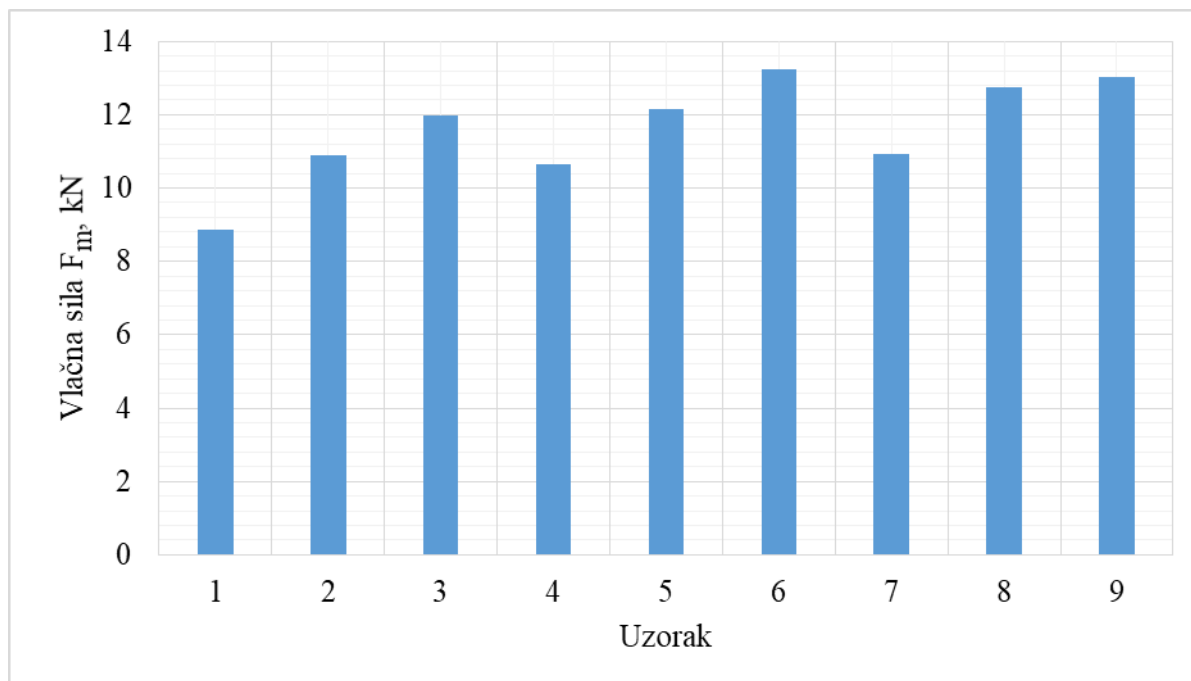
Ispitivanjem je utvrđena maksimalna vlačna sila F_m koju ispitni uzorak može podnijeti. Za sve uzorke dobiveni su dijagrami ispitivanja koji se nalaze u prilogu završnog rada. Karakteristične vlačne sile uzoraka prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Maksimalne vlačne sile ispitnih uzoraka

Uzorak	Maksimalna vlačna sila F_m , kN
1	8,87
2	10,899
3	11,966
4	10,655
5	12,14
6	13,229
7	10,921

8	12,739
9	13,022

Grafički prikaz maksimalnih vlačnih sila ispitnih uzoraka prikazan je na slici 32.



Slika 32. Grafički prikaz vlačnih sila uzoraka

Nakon utvrđivanja maksimalne vlačne sile F_m moguće je izračunati vlačnu čvrstoću zavarenog spoja te tako dobiti uvid u njegova svojstva i kvalitetu. Vlačna čvrstoća općenito se računa prema sljedećoj formuli:

$$R_m = \frac{F_m}{A} \quad (7)$$

gdje je R_m vlačna čvrstoća [N/mm^2], F_m maksimalna vlačna sila [N], a A površina zavora [mm^2]. Površina zavora dobiva se iz standardne formule za površinu kruga:

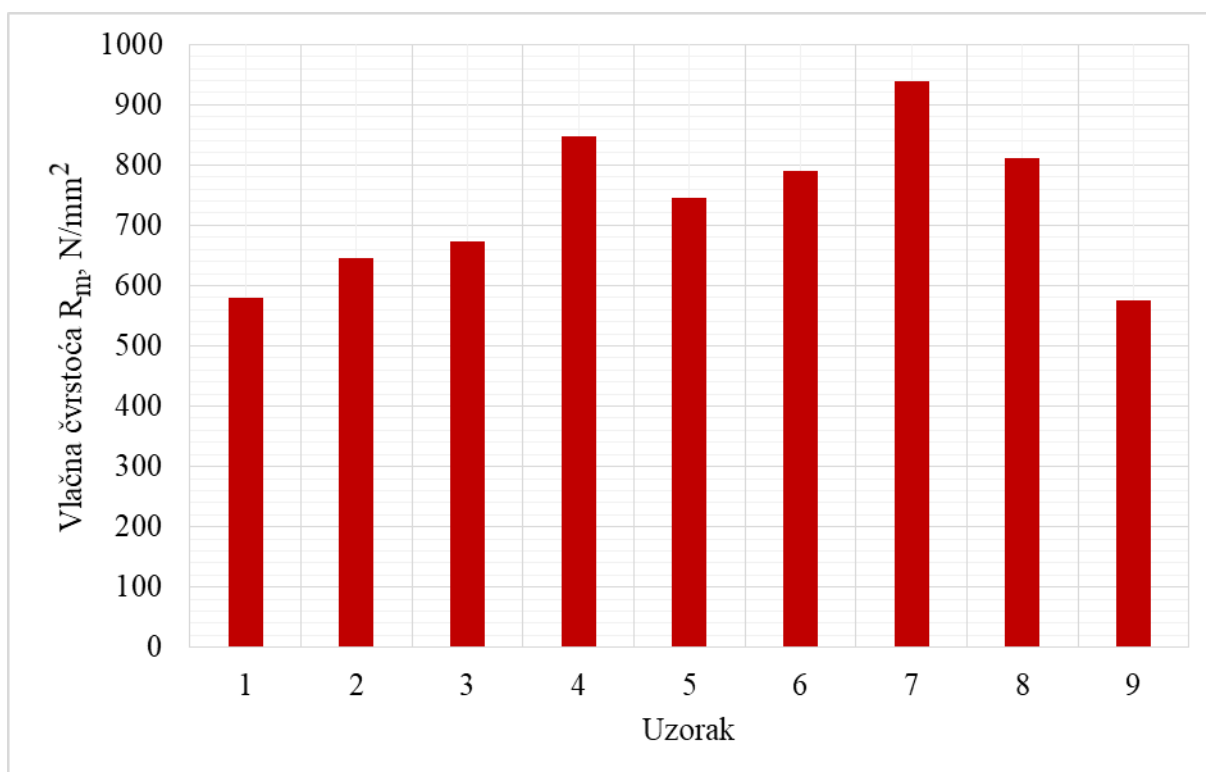
$$A = \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4} \quad (8)$$

gdje je A površina kruga [mm^2], d_s srednji promjer točke zavora [mm], a faktor π približno jednak $\pi = 3,14159$. Provođenjem gore navedenog izračuna dobivene su vlačne čvrstoće svih uzoraka i prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Vlačna čvrstoća uzoraka

Uzorak	$R_m, \text{N/mm}^2$
1	579,701
2	645,714
3	672,209
4	847,451
5	746,021
6	789,179
7	939,037
8	812,177
9	575,685

Grafički prikaz vlačnih čvrstoća ispitnih uzoraka prikazan je na slici 33.



Slika 33. Grafički prikaz vlačne čvrstoće uzoraka

Analizom rezultata razornog ispitivanja moguće je zaključiti da se najboljim zavarom pokazao onaj s najmanjim vremenom zavarivanja ($t_z = 0,6$ s) i najvećom strujom ($I_z = 5,95$ kA). Prilikom zavarivanja korištenjem navedenim parametrima dobivaju se optimalna svojstva zavara za navedeni materijal. Vlačna čvrstoća zavara tada je jednaka $R_m = 939,037$ N/mm². Najslabiji rezultat dobiven je na ispitnom uzorku 9 kod kojeg su korišteni parametri zavarivanja imali najveću vrijednost. Razlog tome najvjerojatnije prevelika količina topline stvorena odabirom tako visokih postavki zavarivanja. Tu tvrdnju potvrđuje i činjenica da se tijekom zavarivanja komadić materijala odvojio od spoja što se jasno vidi i na fotografijama ispitnih uzoraka. Gotova ista svojstva postignuta su i na ispitnom uzorku 1. Vrijednosti korištenih parametara na tom uzorku bili su premali da bi se postigla dobra kvaliteta zavarenog spoja. Možemo reći da veći utjecaj na konačna svojstva spoja imala jakost struje zavarivanja, s obzirom da su za manje promjene vrijednosti tog parametra dobivene veće razlike u konačnim svojstvima zavarenog spoja nego što je to slučaj s vremenom zavarivanja. Za daljnje istraživanje utjecaja parametara zavarivanja na konačna svojstva zavara preporučljivo povećati varijabilnost pokusa korištenjem dodatnih vrijednosti zadanih parametara. Takvim ispitivanjem, na većem broju uzorka, dobili bismo bolje razumijevanje procesa točkastog elektrootpornog zavarivanja.

5. ZAKLJUČAK

Točkasto elektrootporno zavarivanje već godinama nalazi svoju primjenu u industriji. Ponajviše se koristi u masovnoj proizvodnji zahvaljujući jednostavnosti robotizacije i kratkom trajanju postupka. U modernoj autoindustriji uglavnom se koristi u serijskoj proizvodnji za spajanje limova prilikom izrade karoserija automobila.

Zavar se dobiva korištenjem Joul-ove topline nastale uslijed otpora materijala prolasku struje. Najbitniji parametri ovog postupka su sila na elektrode, stanje površine, jakost struje zavarivanja te vrijeme pritiska, zavarivanja i držanja. Svi parametri su međusobno zavisni, te se promjenom jednog utječe i na ostale. Korištena struja je velike jakosti, a vrijeme trajanja kratko.

Eksperimentalni dio završnog rada sastojao se od zavarivanja tankih limova nehrđajućeg čelika, te razornog i nerazornog ispitivanja istih. Nerazorno ispitivanje mjerenjem promjera pokazalo je proporcionalni odnos promjera zone utjecaja topline s vremenom zavarivanja i jakosti struje. Nešto je drugačija situacija s promjerom točke zavara koji se s navedenim parametrima imao obrnuto proporcionalan, odnosno proporcionalan odnos. Kao najutjecajni parametar ispitivanja pokazala se vrijednost jakosti struje zavarivanja.

Razornim ispitivanjem izvršenim na kidalici ustanovljeno je da se optimalna svojstva spoja za dani materijal dobivaju korištenjem vremena zavarivanja $t_z = 0,6$ s i jakosti struje $I_z = 5,95$ kA. Najveća vlačna čvrstoća zavarenog spoja tada je jednaka $R_m = 939,037$ N/mm². Kao najutjecajni parametar ispitivanja ponovno se pokazala struja zavarivanja. Eksperiment je moguće proširiti korištenjem većeg broja parametara i ispitnih uzoraka. Takvo ispitivanje zahtijevalo bi veće materijalne, vremenske i financijske investicije, ali bi pružilo pravi uvid u utjecaj parametara točkastog elektrootpornog zavarivanja na krajnju kvalitetu zavara.

LITERATURA

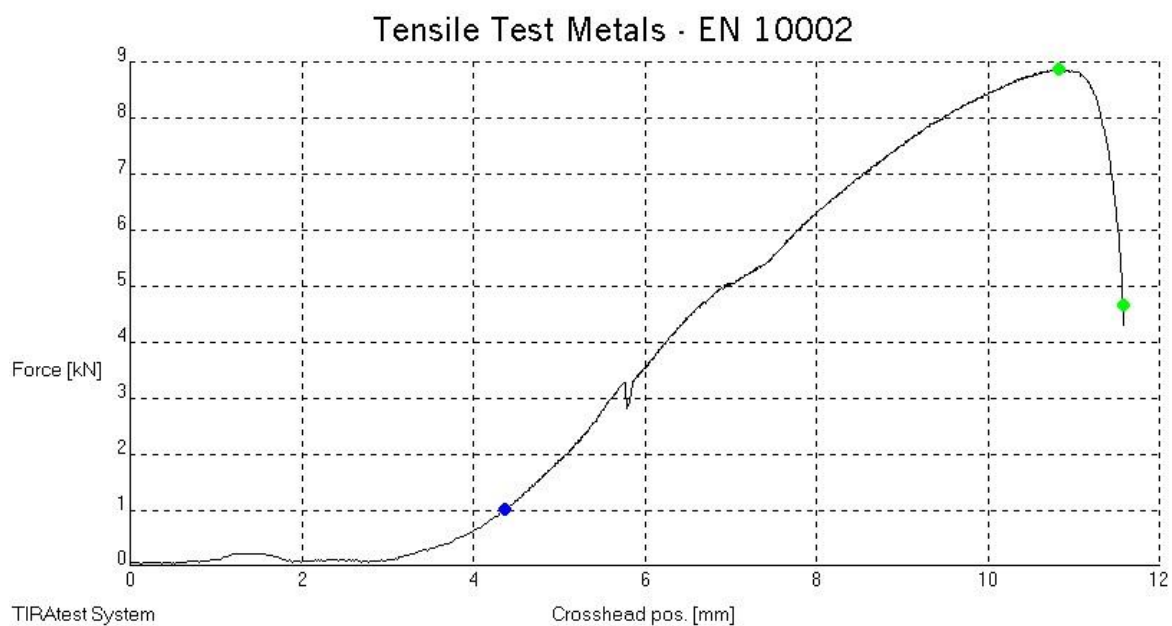
- [1] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, priručnik, Zagreb, 2015.
- [2] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [3] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/vr_spo.pdf (dostupno 04.02.2020)
- [4] Kordić, Z.: Elektrootporno zavarivanje, Zagreb, 1987.
- [5] A Review Paper on Optimization of Process Parameter of Resistance Spot Welding
<https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-Paper-on-Optimization-of-Process-Parameter-Tewari/5e5e5246f92a7aa14d8c89014acb139bbc25af48>
(dostupno 03.02.2020.)
- [6] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-typical-RSW-schedule-indicating-three-stages-of-weld-formation-1-Squeeze_fig3_324650193
(dostupno 04.02.2020.)
- [7] <https://www.quora.com/What-is-Spot-welding> (dostupno 04.02.2020.)
- [8] Garašić. I.: Elektrootporno zavarivanje prezentacija
- [9] Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000.
<http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf> (dostupno 05.02.2020.)
- [10] Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength
<http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409043714398.pdf> (dostupno 05.02.2020.)
- [11] Guidelines For Resistance Spot Welding
<https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/resistance.pdf>
(dostupno 05.02.2020.)
- [12] Priručnik za elektrootporno zavarivanje
<http://www.alatistherm.co.rs/pdf.tecna/PrirucnikPunktovanje.pdf> (dostupno 07.02.2020.)
- [13] <https://www.1stopweldingshop.com/Catalogue/Welding-Supplies/Spot-Welding>
(dostupno 05.02.2020.)
- [14] <https://www.cadicompany.com/products-electrodes-male-welding-caps-shanks.php>
(dostupno 10.02.2020.)
- [15] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html (dostupno 08.02.2020.)
- [16] Tehničke upute uređaja za elektrootporno zavarivanje TV – 15 PKS

- [17] <https://www.cruxweld.com/resistance-welding-equipments/pedal-operated-spot-welder>
(dostupno 10.02.2020.)
- [18] <https://www.supplyvan.com/telwin-spot-welding-machine-823016-230v/reviews>
(dostupno 10.02.2020.)
- [19] Podgorski L.: Tehnologija izrade cijevnog jarbola MAG postupkom zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, 2015.
- [20] https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/zav_mat.html (dostupno 05.02.2020.)
- [21] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding> (dostupno 11.02.2020.)
- [22] <https://www.robots.com/applications/spot-welding> (dostupno 12.02.2020.)
- [23] <https://www.directindustry.com/prod/abb-robotics/product-30265-1700107.html>
(dostupno 12.02.2020.)
- [24] [https://www.olympus-ims.com/en/xrf-xrd/delta-handheld/delta-alloy/#!cms\[focus\]=cmsContent11644](https://www.olympus-ims.com/en/xrf-xrd/delta-handheld/delta-alloy/#!cms[focus]=cmsContent11644) (dostupno 11.02.2020.)
- [25] Krček D.: Elektrootporno točkasto zavarivanje kod valovitih stranica distributivnih kotlova, Završni rad, Međimursko veleučilište u Čakovcu, 2018.
- [26] Hlevnjak A.: Točkasto elektrootporno zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [27] ISO 14329 - 2003 - Resistance welding - Destructive tests of welds - Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welds

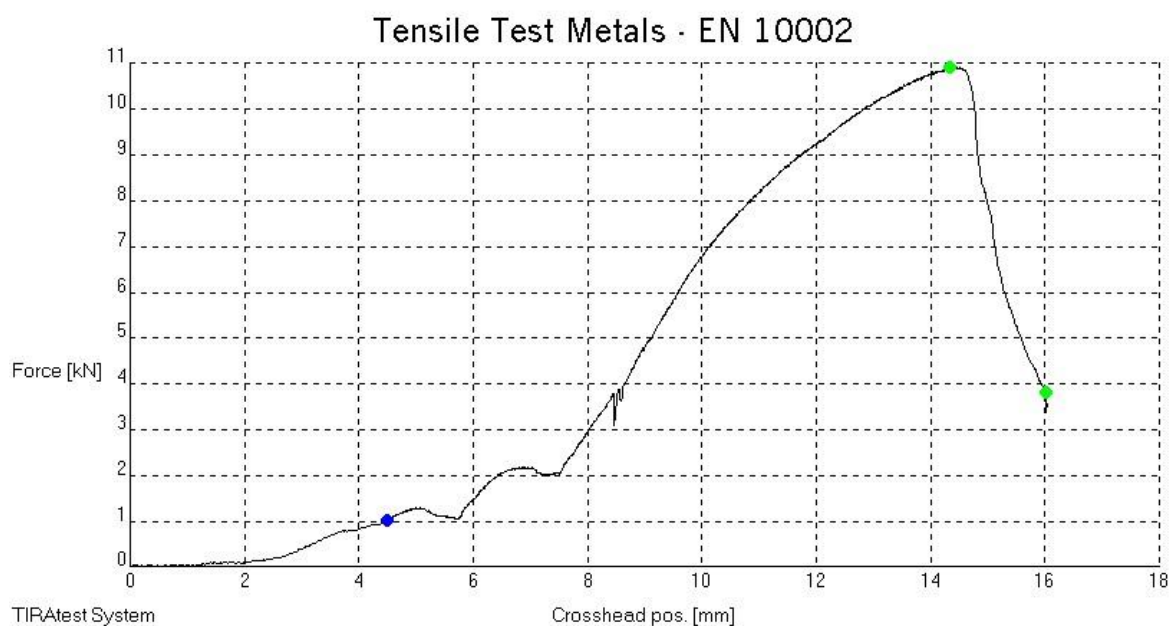
PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Rezultati i dijagrami ispitivanja uzoraka na kidalici EU 40 mod

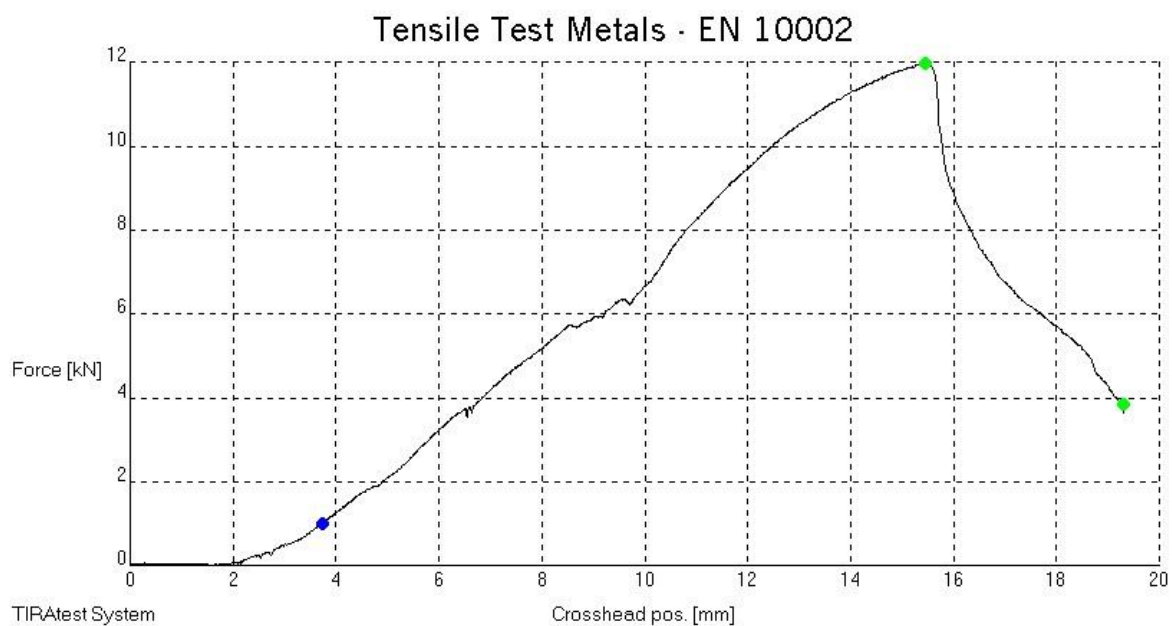
Uzorak 1



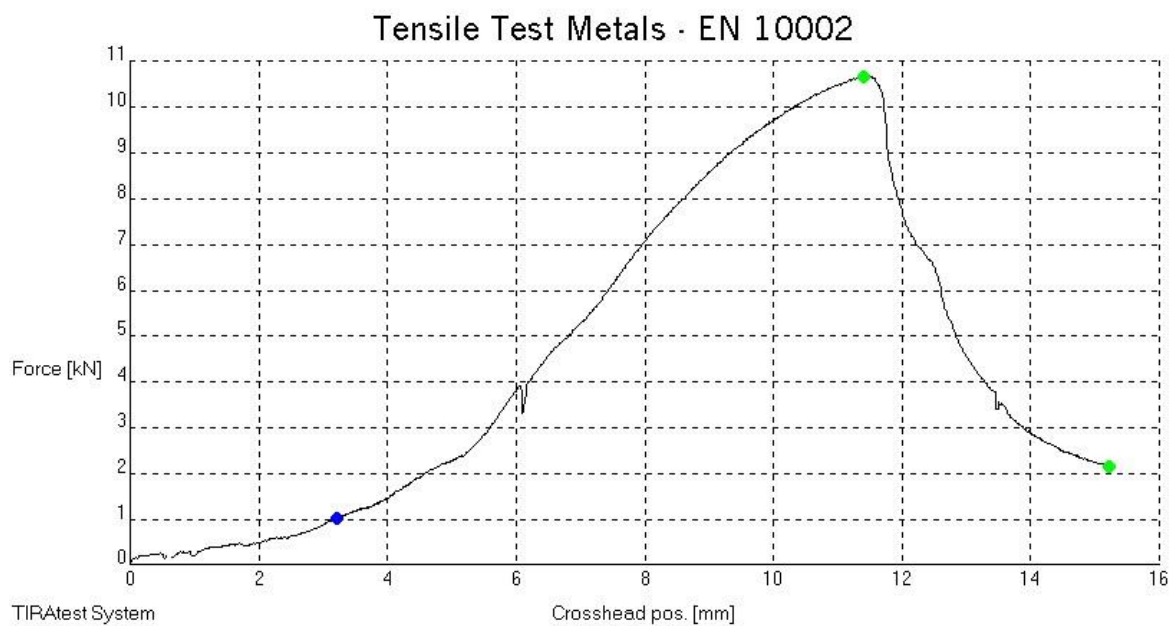
Uzorak 2



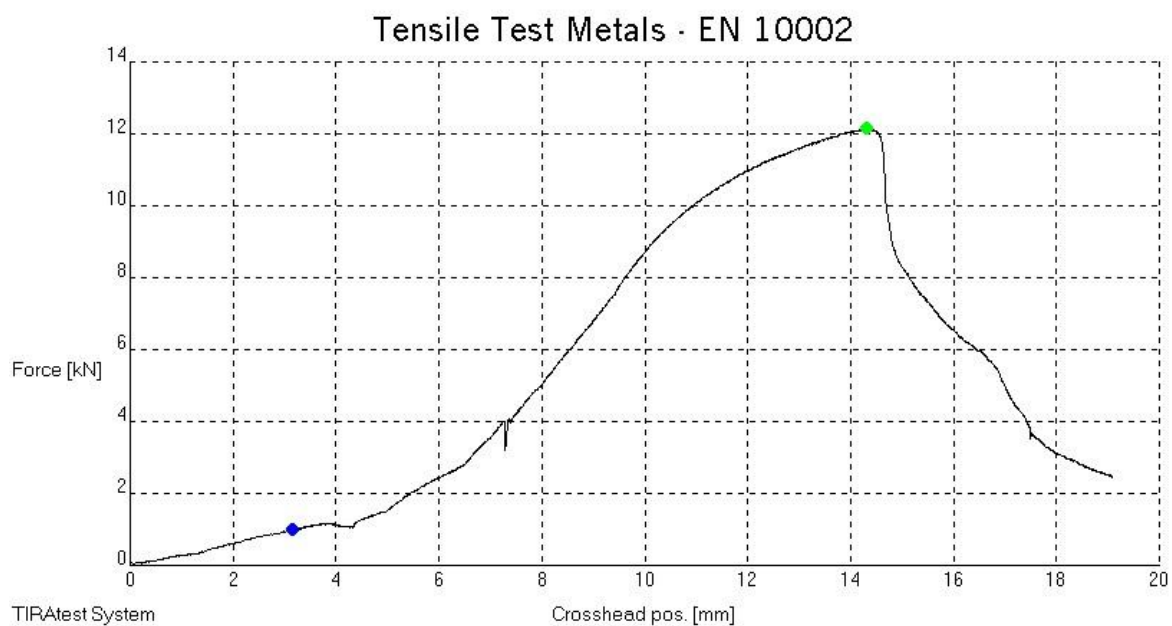
Uzorak 3



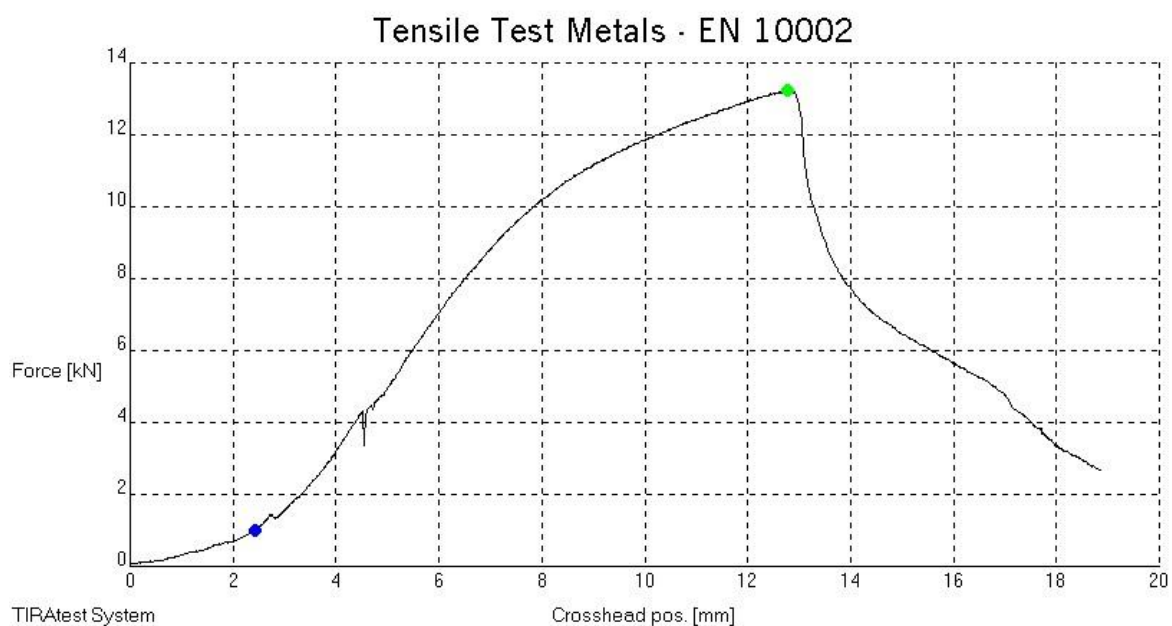
Uzorak 4



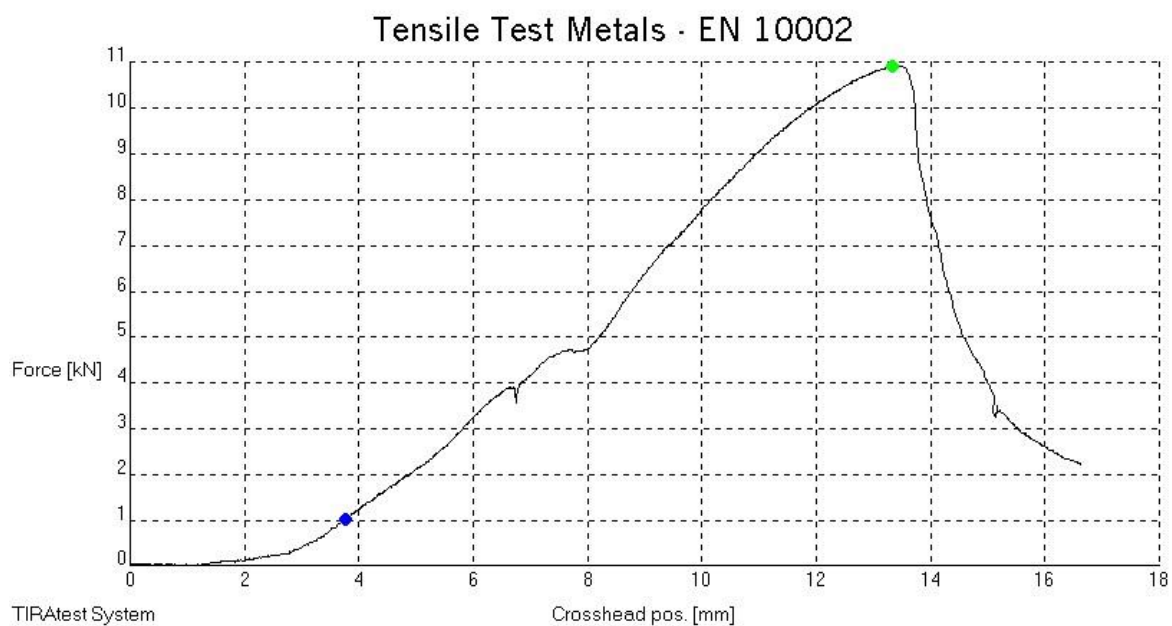
Uzorak 5



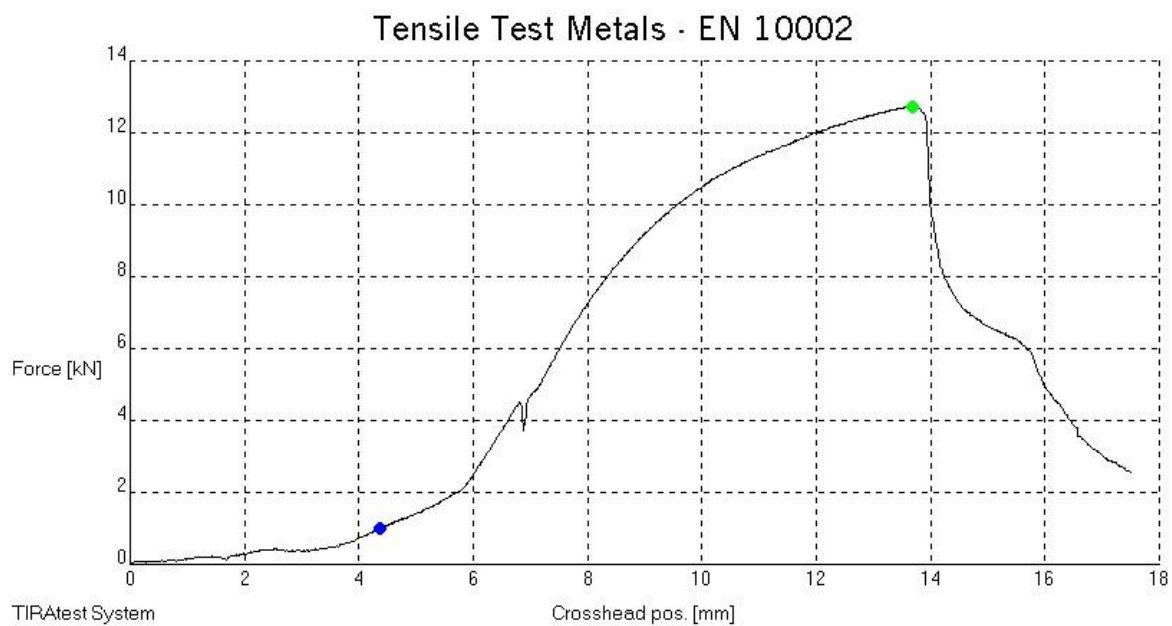
Uzorak 6



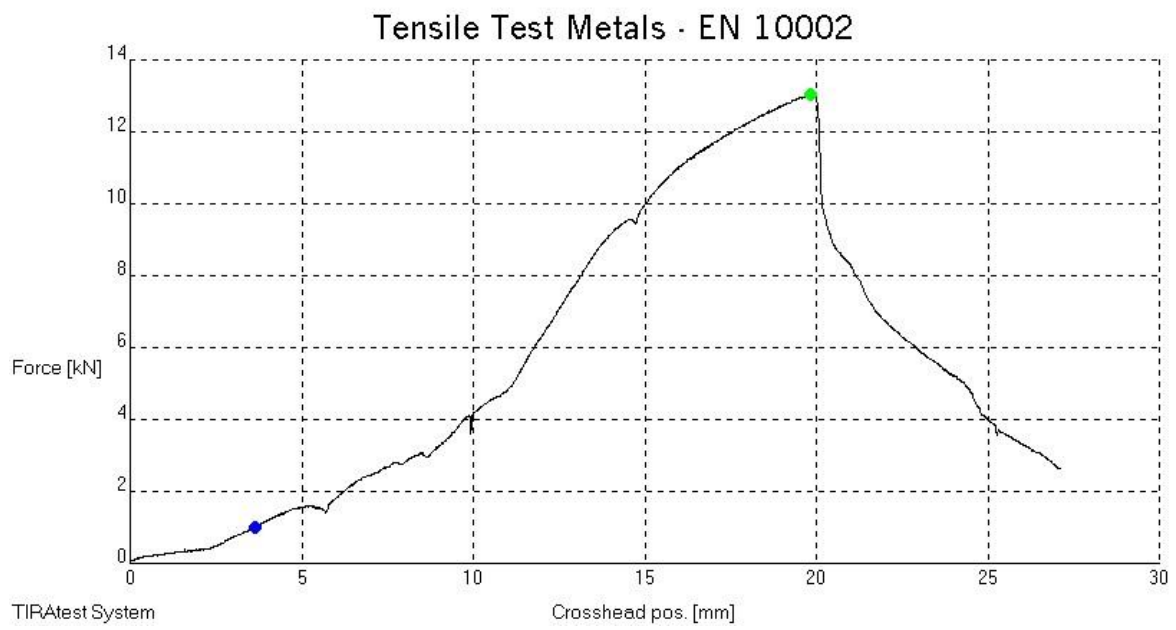
Uzorak 7



Uzorak 8



Uzorak 9



Test parameters

Test: Tensile Test Metals - EN 10002
UTM type: EU 40 mod
Load cell: 400 kN
Extensometer: XHd.pos.
Sample dimensions: a = 1.3 mm; b = 50 mm
Length data: Lo = 60 mm; Le = 130 mm
Test rates: V0 = 10 mm/min; V1 = 5 mm/min; V2 = 5 mm/min
Rate switch points: F0 = 1000 N; U12 = 400000 N

Test results

	Date	Time	Fm kN
1	11.12.19	09:10	8.870
2	11.12.19	09:16	10.899
3	11.12.19	09:24	11.966
4	11.12.19	09:29	10.655
5	11.12.19	09:34	12.140
6	11.12.19	09:40	13.229
7	11.12.19	09:44	10.921
8	11.12.19	09:48	12.739
9	11.12.19	09:52	13.022

Statistics n = 9

	Fm kN
Mean value	11.605
Standard deviation	1.401
Variation coeff.	0.012