

Točkasto elektrootporno zavarivanje raznorodnih čelika

Hlevnjak, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:518174>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alen Hlevnjak

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Alen Hlevnjak

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću, kao i dr. sc. Maji Jurici na korisnim savjetima tijekom izrade rada. Također, velike zahvale idu i tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje koji su mi pomogli oko eksperimenta.

Posebno se zahvaljujem obitelji na podršci tijekom studija.

Rad posvećujem djedu Ivanu koji me još u ranom djetinjstvu uveo u svijet strojarstva.

Alen Hlevnjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske 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: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

ALEN HLEVNJAK

Mat. br.: **0035185081**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**TOČKASTO ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE
RAZNORODNIH ČELIKA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

RESISTANCE SPOT WELDING OF DISSIMILAR STEELS

Opis zadatka:

Detaljno opisati elektrootporno zavarivanje i prikazati sve opcije izvođenja. Analizirati ključne parametre pri točkastom zavarivanju kao i njihov utjecaj na geometriju spoja i pojavnost nepravilnosti. Obrazložiti zavarljivost metalnih materijala za elektrootporno zavarivanje s naglaskom na mješovite spojeve nelegiranih i visokolegiranih čelika. Opisati utjecaj oblika elektrode na oblik i kvalitetu zavarenog točkastog spoja.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odrediti optimalne parametre zavarivanja tankih nelegiranih i visokolegiranih Cr-Ni čelika. Definirati plan pokusa za određivanje struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrode. Utvrditi kritične zone parametara koji uzrokuju pojavu naljeppljivanja uz primjenu minimalnih vremena zavarivanja. Potrebna razorna i nerazorna ispitivanja provesti na temelju HRN EN ISO 15614-12. Zaključno dati preporuke i parametre za zavarivanje raznorodnih spojeva uz primjenu točkastog elektrootpornog postupka.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

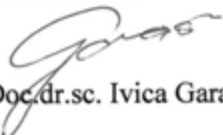
Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.


Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| POPIS SLIKA | 3 |
| POPIS TABLICA..... | 5 |
| POPIS OZNAKA | 6 |
| SAŽETAK..... | 7 |
| SUMMARY | 8 |
| 1. UVOD | 10 |
| 2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE..... | 12 |
| 2.1. Opcije izvođenja (vrste) elektrootpornog zavarivanja..... | 13 |
| 2.1.1. Točkasto elektrootporno zavarivanje..... | 13 |
| 2.1.2. Bradavičasto elektrootporno zavarivanje..... | 14 |
| 2.1.2.1. Prednosti, nedostaci i primjena bradavičastog zavarivanja..... | 14 |
| 2.1.3. Šavno elektrootporno zavarivanje..... | 15 |
| 2.1.3.1. Parametri šavnog zavarivanja | 16 |
| 2.1.3.2. Primjena šavnog zavarivanja..... | 17 |
| 2.1.3.3. Oprema za šavno zavarivanje | 17 |
| 2.1.4. Indukcijsko zavarivanje | 18 |
| 3. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE..... | 20 |
| 3.1. Općenito o postupku | 20 |
| 3.2. Elektrootporno točkasto indirektno zavarivanje | 23 |
| 3.3. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja | 23 |
| 3.4. Oprema za elektrootporno točkasto zavarivanje..... | 26 |
| 3.5. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje | 28 |
| 3.5.1. Funkcije elektroda..... | 30 |
| 3.5.2. Materijali elektroda..... | 30 |
| 3.6. Zavarljivost metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem | 31 |
| 3.7. Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja..... | 32 |
| 4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA | 33 |
| 4.1. Klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika | 34 |
| 4.2. Zaostala naprezanja zavarenih spojeva i deformacije konstrukcija iz raznorodnih čelika | 35 |
| 4.3. Difuzijski procesi pri zavarivanju raznorodnih čelika | 36 |
| 4.4. Zavarivanje nelegiranih čelika..... | 38 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5. Zavarivanje visokolegiranih čelika | 39 |
| 4.5.1. Martenzitni Cr – čelici | 40 |
| 4.5.2. Feritni čelici | 41 |
| 4.5.3. Austenitni čelici | 42 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO | 45 |
| 5.1. Materijali ispitnih uzoraka i norma | 45 |
| 5.2. Opis stroja | 46 |
| 5.3. Tijek eksperimenta | 51 |
| 5.3.1. Priprema ispitnih uzoraka | 51 |
| 5.3.2. Određivanje parametara zavarivanja | 52 |
| 5.3.2.1. Vrijeme zavarivanja | 52 |
| 5.3.2.2. Jakost struje zavarivanja | 53 |
| 5.3.2.3. Sila na elektrode | 53 |
| 5.3.3. Parametri za svaki pojedini uzorak | 54 |
| 5.3.4. Analiza dinamičke karakteristike | 55 |
| 5.3.5. Zavarivanje | 57 |
| 5.3.6. Izgled zavarenih uzoraka i vizualna analiza | 58 |
| 5.3.7. Razorno ispitivanje na kidalici | 61 |
| 5.3.7.1. Tijek ispitivanja na kidalici | 62 |
| 5.3.7.2. Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja na kidalici | 63 |
| 5.3.7.3. Rezultati ispitivanja na kidalici | 64 |
| 5.3.8. Ponavljanje zavarivanja uzorka s najvećom vlačnom silom | 65 |
| 5.3.8.1. Makroanaliza uzorka br. 2 | 65 |
| 6. ZAKLJUČAK | 71 |
| 7. LITERATURA | 72 |
| PRILOZI | 74 |

POPIS SLIKA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Podjela nekih od postupaka zavarivanja prema načinu zavarivanja [4] | 12 |
| Slika 2. Klasifikacija postupaka elektrootpornog zavarivanja | 13 |
| Slika 3. Shema bradavičastog zavarivanja [5] | 14 |
| Slika 4. Shema šavnog zavarivanja (dvostranog) [6] | 15 |
| Slika 5. Jednostrano šavno zavarivanje [5] | 15 |
| Slika 6. Šavno zavarivanje cijevi [7] | 17 |
| Slika 7. Bakrene kolutne elektrode za šavno zavarivanje [8] | 17 |
| Slika 8. Uređaj za šavno zavarivanje [9] | 18 |
| Slika 9. Shema indukcijskog zavarivanja [10] | 18 |
| Slika 10. Indukcijsko zavarivanje [11] | 19 |
| Slika 11. Shematski prikaz direktnog točkastog zavarivanja [14] | 20 |
| Slika 12. Električni otpori pri točkastom zavarivanju u ovisnosti o temperaturi [15] | 21 |
| Slika 13. Ilustracija indirektnog točkastog zavarivanja [16] | 23 |
| Slika 14. Dijagram ovisnosti sile zavarivanja i jačine struje o vremenu [17] | 24 |
| Slika 15. Istiskivanje [5] | 24 |
| Slika 16. Vremenski ciklusi pri elektrootpornom zavarivanju [12] | 26 |
| Slika 17. Shema uređaja za elektrootporno točkasto zavarivanje [5] | 27 |
| Slika 18. Uređaji za elektrootporno točkasto zavarivanje [20] | 27 |
| Slika 19. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje [21] | 28 |
| Slika 20. Tri najčešća tipa vrha elektrode [17] | 29 |
| Slika 21. Cilindrična ravna elektroda za elektrootporno točkasto zavarivanje [16] | 29 |
| Slika 22. Zavarivanje karoserije automobila [27] | 32 |
| Slika 23. Prikaz osnovnih načina podjela zavarenih konstrukcija iz raznovrsnih čelika [28] | 34 |
| Slika 24. Mikrostruktura feritnih čelika [30] | 41 |
| Slika 25. Stroj za elektrootporno točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment | 46 |
| Slika 26. Priključak komprimiranog zraka i rashladne vode s uređajem | 47 |
| Slika 27. Shematski prikaz ispona i razmaka [33] | 48 |
| Slika 28. Manometar, nauljivač i elektromagnetski razvodnik | 49 |
| Slika 29. Kontrolni ormarić tipa KD2-250 | 50 |
| Slika 30. Regulacija vremena | 52 |
| Slika 31. Regulacija jakosti struje zavarivanja | 53 |
| Slika 32. Regulacija sile na elektrode | 53 |
| Slika 33. Omjeri mijenjanih parametara zavarivanja po uzorcima | 54 |
| Slika 34. Oprema za snimanje dinamičke karakteristike | 55 |
| Slika 35. Osciloskop Tetronix TDS 210 | 55 |
| Slika 36. Dinamička karakteristika uzoraka 1-4 | 56 |
| Slika 37. Dinamička karakteristika uzoraka 5-8 | 56 |
| Slika 38. Pozicioniranje uzorka prije zavarivanja na stroju DZ-63 | 57 |
| Slika 39. Lice zavarene točke (kontakt: radni komad – gornja elektroda) | 58 |
| Slika 40. Naličje zavarene točke (kontakt: radni komad – donja elektroda) | 58 |
| Slika 41. Promjeri i srednja vrijednost promjera [35] | 59 |
| Slika 42. Prikaz srednjih promjera točke zavara | 60 |
| Slika 43. Prikaz srednjih promjera ZUT-a | 60 |
| Slika 44. Kidalica EU40MOD | 61 |
| Slika 45. Uzorak stegnut u čeljusti kidalice | 62 |

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Slika 46. Ispitni uzorak neposredno prije loma | 62 |
| Slika 47. Uzorci nakon ispitivanja na kidalici | 63 |
| Slika 48. Oprema za elektrokemijsko nagrivanje | 65 |
| Slika 49. Makrostruktura zavara | 66 |
| Slika 50. Dimenzije metala zavara | 67 |

POPIS TABLICA

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Podjela postupaka zavarivanja po skupinama [2] | 11 |
| Tablica 2. Ocjena međusobne zavarljivosti metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem [26] | 31 |
| Tablica 3. Svojstva različitih vrsta čelika [28] | 35 |
| Tablica 4. Temperatura predgrijavanja (T_0) pri zavarivanju nelegiranih čelika | 38 |
| Tablica 5. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [30] | 40 |
| Tablica 6. Kemijski sastavi čelika [31], [32]..... | 45 |
| Tablica 7. Iznos parametara zavarivanja po uzorcima | 54 |
| Tablica 8. Promjeri točke zavara i zone utjecaja topline (ZUT) | 59 |
| Tablica 9. Poredak uzoraka od veće vlačne sile prema manjoj..... | 64 |
| Tablica 10. Povećanje slike na mjestu nepravilnosti u metalu zavara | 69 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Q | J | Količina topline |
| I_Z | A | Struja zavarivanja |
| t_Z | s | Vrijeme zavarivanja |
| t_{pp} | s | Vrijeme pretpritisaka |
| t_d | s | Vrijeme držanja |
| t_s | s | Vrijeme stanke |
| F_e | N | Sila na elektrode |
| R_1, R_2 | Ω | Vlastiti otpori materijala |
| R_{1-E} | Ω | Otpor: materijal - gornja elektroda |
| R_{2-E} | Ω | Otpor: materijal - donja elektroda |
| R_{kl2} | Ω | Kontaktni otpor: materijal - materijal |
| S | mm ² | Površina presjeka vodiča |
| L | mm | Dužina vodiča |
| ρ | $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ | Specifični električni otpor |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| F_M | N | Maksimalna vlačna sila |
| A | mm ² | Površina |
| d_S | mm | Srednji promjer točke zavora |
| d | mm | Promjer točke dodira između dva zavarena lima |
| d_{ZUT_S} | mm | Srednji promjer zut-a |

SAŽETAK

U teorijskom dijelu ovoga rada detaljno je opisano elektrootporno zavarivanje i prikazane su sve opcije izvođenja s naglaskom na točkasto elektrootporno zavarivanje. Analizirani su ključni parametri pri točkastom zavarivanju kao i njihov utjecaj na geometriju spoja. Obrazložene su zavarljivosti metalnih materijala elektrootpornim zavarivanjem s naglaskom na mješovite spojeve visokolegiranih i nelegiranih čelika.

U eksperimentalnom su dijelu određeni optimalni parametri zavarivanja tankih nelegiranih i visokolegiranih čelika. Definiran je plan pokusa za određivanje struje zavarivanja, vremena zavarivanja i sile na elektrode. Na kraju su provedena razorna ispitivanja na temelju HRN EN ISO 15614-12.

Ključne riječi: točkasto elektrootporno zavarivanje raznorodnih materijala, visokolegirani čelici, nelegirani čelici, parametri zavarivanja, sila na elektrode, jakost struje zavarivanja, vrijeme zavarivanja

SUMMARY

In the theoretical part of this paper the resistance welding is described with all of its variations, but focus is on resistance spot welding. The main parameters of spot welding as well as their impact on geometry of joint are analysed. Weldability of metallic materials is explained with focus on high-alloyed and non-alloyed steels.

In the experimental part of this paper the optimal welding parameters are specified for welding of thin high-alloyed and non-alloyed steels. An experimental plan is defined to investigate the influence of the welding current, welding time and force on electrodes on the weld geometry and mechanical properties. Destructive tests are carried according to HRN EN ISO 15614-12.

Key words: resistance spot welding of dissimilar steels, high-alloyed steels, non-alloyed steels, welding parameters, the force on electrodes, welding current, welding time

TEORIJSKI DIO

1. UVOD

Za spajanje materijala u gotove proizvode već se dugo vremena koristi zavarivanje kao jedna od nezaobilaznih tehnologija. Većina postupaka zavarivanja otkrivena je u 20. stoljeću. Zavarivanje se kroz povijest razvijalo kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, oružja, posuda, nakita i građevina (ograde, vrata, mostovi, okovi, rešetke na prozorima, ...). Željezno doba, odnosno željezni predmeti se počinju nalaziti oko 1500. godine prije nove ere, a prvi zapisi o kovačkom zavarivanju željeza u staroj Grčkoj govore da je zavarivanje korišteno u 6. stoljeću prije nove ere za izradu postolja posuda. Najbolji mačevi iz čelika u srednjem vijeku bili su rađeni iz niskougličnog čelika, a na njihove rubove su kovački zavarivane (udarcima čekića u toplom stanju) oštrice (trake) od visokougličnog čelika, koje su uz određenu toplinsku obradu davale tvrde, čvrste i oštre bridove. Mačevi, vrhovi strijela i koplja, bodeži i drugo oružje kod kojih su primjenjivali kovačko zavarivanje bili su poznati u Grčkoj, Franačkoj državi, Kini, Japanu, Indoneziji, te u Siriji.

Pred, a posebno poslije Drugog svjetskog rata, počinje razvoj i primjena zavarivanja u zaštitnim plinovima. MIG zavarivanje se počinje primjenjivati 1948. kao SIGMA postupak (Shielded Inert Gas Metal Arc), a 1953. u bivšem SSSR se prvi puta primjenjuje MAG postupak s CO₂ zaštitnim aktivnim plinom. Hladno zavarivanje pod pritiskom se primjenjuje od 1948.g. Iza 1950. godine se razvijaju mnogi novi postupci kao što su: zavarivanje pod troskom (1951.), trenjem (1956.), snopom elektrona (1957.), ultrazvukom (1960.), laserom (1960.), plazmom (1961.) i drugi [1].

Postoji još mnogo različitih postupaka zavarivanja, ali svi imaju jedan cilj, a to je što bolje, učinkovitije i kvalitetnije spojiti dva ili više materijala.

Označivanje i klasifikacija postupaka zavarivanja definirana je normom HRN EN ISO 4063:2012: Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupaka i referentni brojevi, gdje je svaki postupak zavarivanja označen referentnim brojem. Oznaka može sadržavati najviše tri znamenke, uz moguće dodatne oznake. Definirano je 8 glavnih skupina (prikazano u tablici 1), od kojih je kao kriterij za podjelu postupaka zavarivanja odabran izvor topline, dok su u skupini 8 i 9 razvrstani srodni postupci [2].

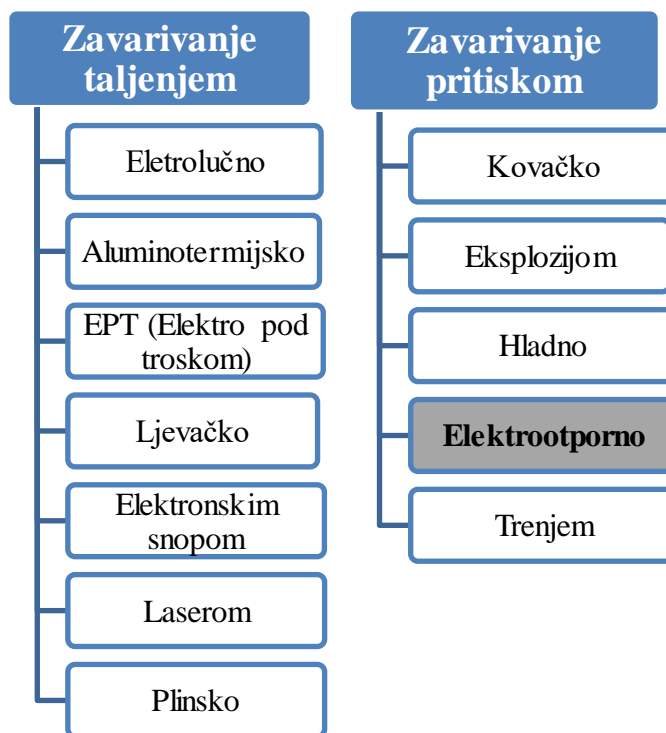
Tablica 1. Podjela postupaka zavarivanja po skupinama [2]

| | |
|-----------|------------------------------------------------|
| Skupina 1 | Elektrolučno zavarivanje |
| Skupina 2 | Elektrootporno zavarivanje |
| Skupina 3 | Plinsko zavarivanje |
| Skupina 4 | Zavarivanje pritiskom |
| Skupina 5 | Zavarivanje snopom |
| Skupina 7 | Ostali zavarivački postupci |
| Skupina 8 | Rezanje i žlijebljenje |
| Skupina 9 | Tvrdo i meko lemljenje i zavarivačko lemljenje |

2. ELEKTROOTPORNO ZAVARIVANJE

Elektrootporno zavarivanje jedan je od najčešće automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja, a obuhvaća grupu postupaka kod kojih se materijal zagrijava toplinom stvorenom električnim otporom. Zavareni spoj nastaje djelovanjem sile na elektrode. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu taljenja, kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Najčešće se koristi izmjenična struja niskog napona i visoke jakosti te kratkog trajanja [3].

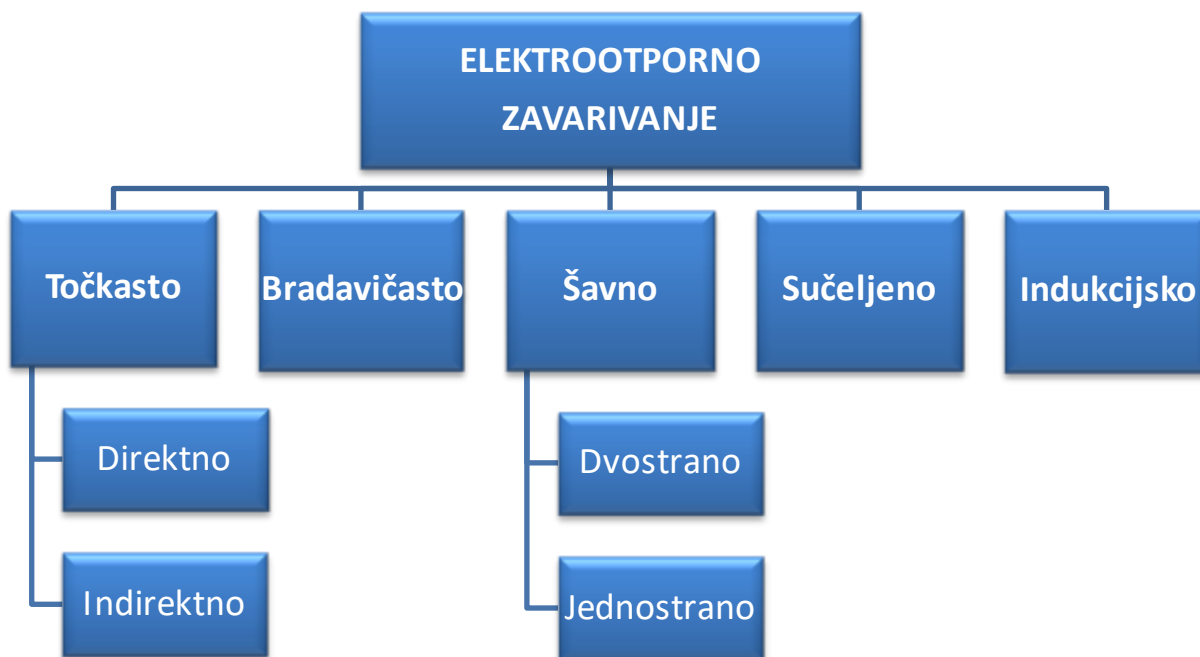
Ovaj postupak zavarivanja pripada skupini postupaka uz djelovanje pritiska, odnosno spajanje metalnih dijelova pritiskom i to bez korištenja dodatnog materijala, za razliku od druge skupine postupaka gdje se zavaruje taljenjem, odnosno spajanjem metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spajanja, s korištenjem ili bez korištenja dodatnog materijala, te bez djelovanja pritiska ili udaraca. Na slici 1 prikazana je podjela nekih od postupaka zavarivanja taljenjem te nekih od zavarivanja pritiskom.



Slika 1. Podjela nekih od postupaka zavarivanja prema načinu zavarivanja [4]

2.1. Opcije izvođenja (vrste) elektrootpornog zavarivanja

Elektrootporno se zavarivanje klasificira na nekoliko podvrsta (slika 2), a to su: točkasto, bradavičasto, šavno, sučeljeno i indukcijsko.



Slika 2. Klasifikacija postupaka elektrootpornog zavarivanja

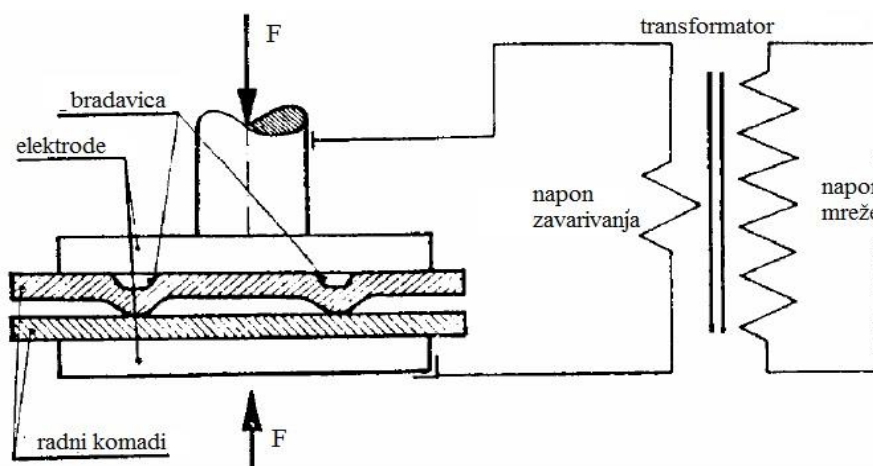
2.1.1. Točkasto elektrootporno zavarivanje

Elektrootporno točkasto zavarivanje je najzastupljenije od svih opcija izvođenja elektrootpornog zavarivanja, stoga će o njemu biti najviše riječi u ovom diplomskom radu i to u poglavlju broj 3.

2.1.2. Bradavičasto elektrootporno zavarivanje

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

Kada poteče električna struja, izbočina se slegne. Na tom se mjestu materijal rastali, te nastane točkasti zavar, sličan onom koji se dobije točkastim zavarivanjem. Slika 3 prikazuje shemu bradavičastog zavarivanja kada se jednim ciklusom ostvare zavari na dva mjesta istovremeno. Moguće je tako odjednom napraviti n zavara [5].



Slika 3. Shema bradavičastog zavarivanja [5]

2.1.2.1. Prednosti, nedostaci i primjena bradavičastog zavarivanja

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

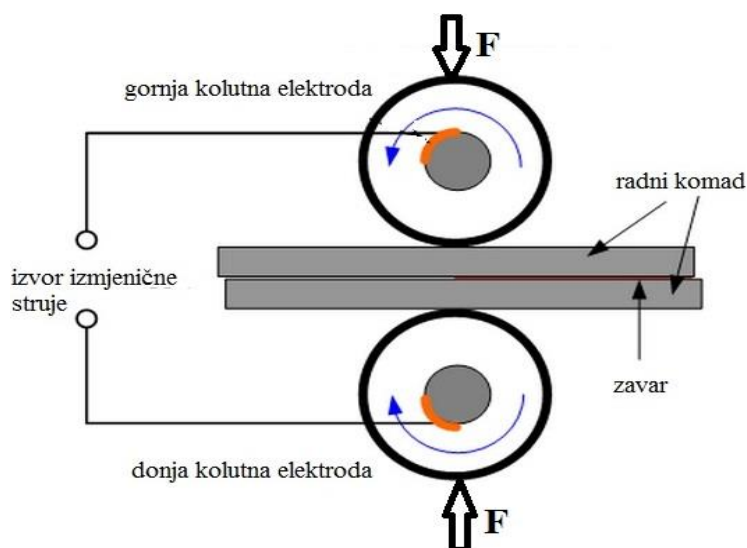
Nedostatak bradavičastog zavarivanja je potreba za velikom snagom i silom pritiska, što dodatno komplicira i poskupljuje sam uređaj za zavarivanje. Zahtijeva se precizna predpriprema osnovnog materijala (ploča) prije samog zavarivanja.

Koristi se u strojogradnji za privarivanje vijaka i matica, čepova, kutnika, te u industriji igračaka, bijele tehnike (gdje je zavarivanje u velikim količinama). Metali koji se najčešće ovako zavaruju su pocinčani limovi, aluminij i bronca [5].

2.1.3. Šavno elektrootporno zavarivanje

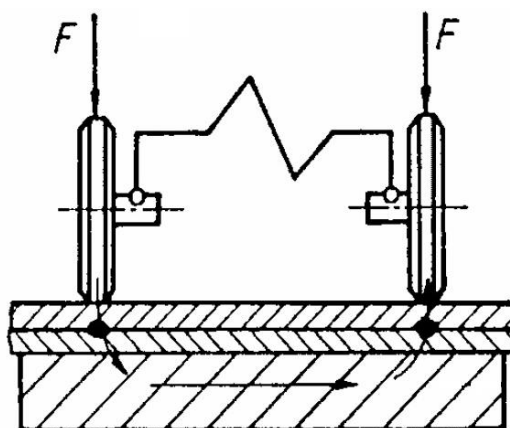
Elektrootporno šavno zavarivanje je postupak spajanja metala kombiniranim djelovanjem topline dobivene električnim otporom između dva lima pritisnuta elektrodama u obliku diska (koluta) i sile na njih. Pri tome nastaje spoj (šav) koji se može shvatiti kao niz točkaka koje mogu i ne moraju biti djelomično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

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



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

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



Slika 5. Jednostrano šavno zavarivanje [5]

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

Zbog oštećenja komada i brzog trošenja elektroda neprekidno šavno zavarivanje se rijetko primjenjuje. Pauze kod prekidnog zavarivanja poboljšavaju hlađenje elektroda smanjujući njihovo pregrijavanje [5].

2.1.3.1. Parametri šavnog zavarivanja

Osnovni parametri šavnog zavarivanja su:

- sila na elektrode,
- jačina i vrijeme djelovanja struje,
- promjer i korak elektrode i
- brzina zavarivanja.

Sila na elektrode, jačina i vrijeme djelovanja struje povezani su na sličan način kao kod točkastog zavarivanja. Korak diskova (kolutnih elektroda) ovisi o debljini materijala i režimu zavarivanja. Prekomjerno prekrivanje diskova je nepoželjno jer smanjuje čvrstoću spoja. Promjer pojedinih diskova ovisi o debljini materijala, profilu radnog dijela elektroda i režimu zavarivanja [5].

2.1.3.2. Primjena šavnog zavarivanja

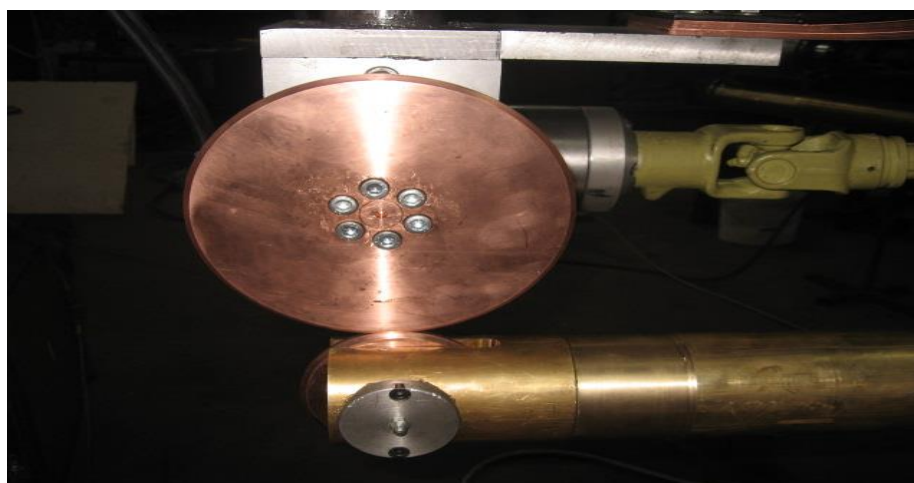
Šavno elektrootporno zavarivanje koristi se za privarivanje ojačanja spremnika goriva ili njihovo zavarivanje, zavarivanje karoserija automobila, vagona, cijevi (slika 6), posuda, bubnjeva strojeva za pranje, radijatora i slično.



Slika 6. Šavno zavarivanje cijevi [7]

2.1.3.3. Oprema za šavno zavarivanje

Uređaji za šavno zavarivanje su slični uređajima za točkasto zavarivanje, s tim da imaju veću snagu i umjesto šipkaste elektrode imaju elektrodu u obliku diska, prikazano na slici 7. Materijal elektroda je praktično isti kao kod točkastog zavarivanja. Na slici 8 prikazan je stroj za elektrootporno šavno zavarivanje.



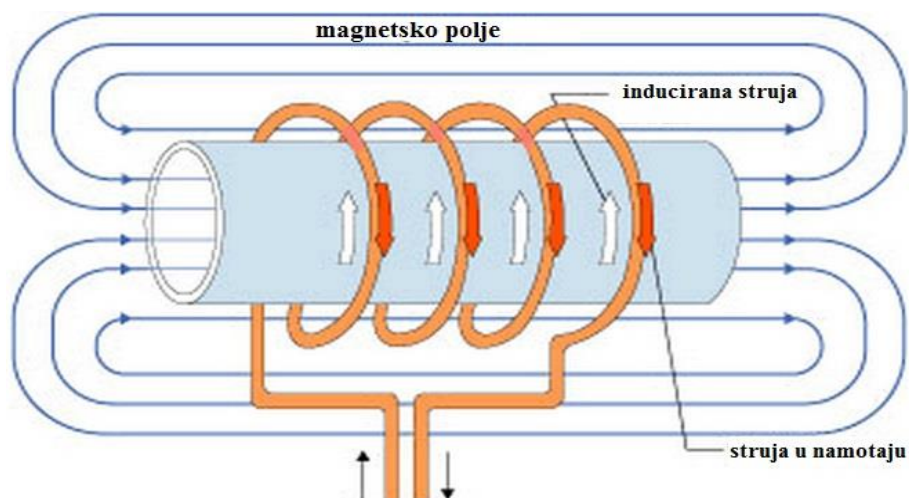
Slika 7. Bakrene kolutne elektrode za šavno zavarivanje [8]



Slika 8. Uređaj za šavno zavarivanje [9]

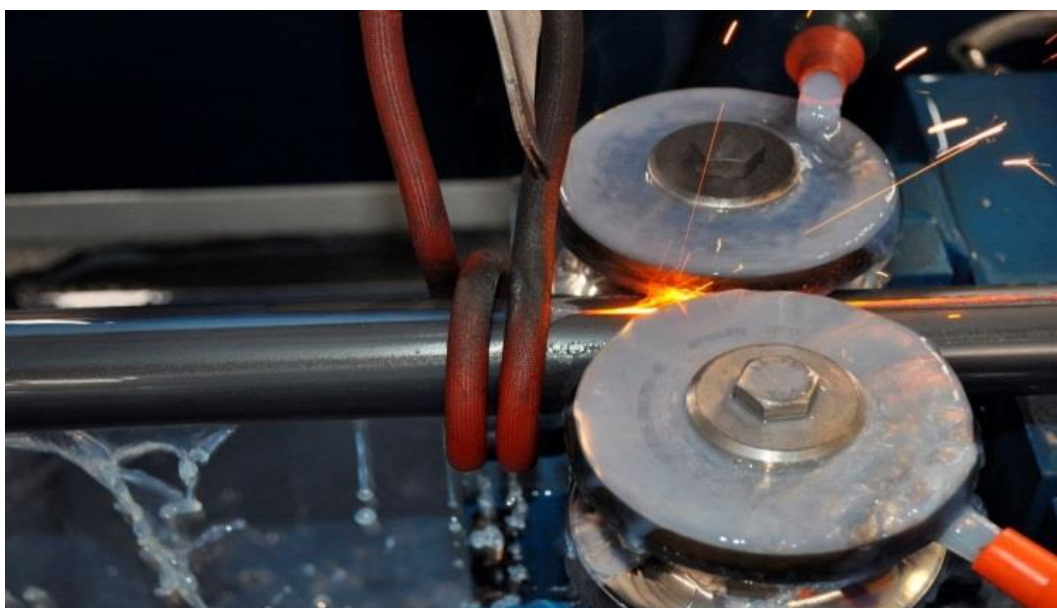
2.1.4. Indukcijsko zavarivanje

Indukcijsko zavarivanje, shematski prikazano na slici 9, je vrsta elektrootpornog zavarivanja gdje se mjesto zavora zagrijava visokofrekventnim induciranim strujama kratkog spoja što ih u zavarivanim dijelovima inducira izmjenično magnetsko polje indukcijske zavojnice (induktora).



Slika 9. Shema indukcijskog zavarivanja [10]

Zavarivanje se postiže pritiskom ili bez njega. Visokofrekventna struja stvara jako magnetsko polje, a teče putem najniže induktivnosti. Najgušći tok magnetskih silnica je na mjestu najmanje zračnosti, gdje je i zagrijavanje najveće. Usljed zagrijavanja dolazi do lokalnog taljenja i omekšanja, te uz djelovanje pritiska do trenutnog spajanja. Primjenjuje se za izradu konstrukcijskih profila, šavnih cijevi, pločastih izmjenjivača topline i drugo. Šavne cijevi se tim postupkom izrađuju iz trake neograničene duljine, namotane na kolut. Na slici 10 prikazano je indukcijско zavarivanje u praksi [5].



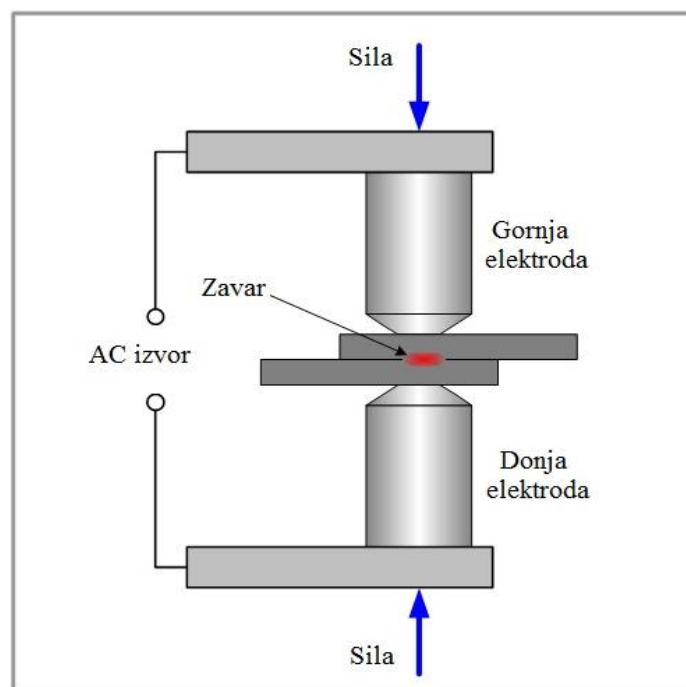
Slika 10. Indukcijsko zavarivanje [11]

3. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE

Elektrootporno točkasto zavarivanje je najzastupljeniji i jedan je od najstarijih postupaka električnog zavarivanja u današnjoj industriji. Zavar nastaje kombinacijom triju faktora, a to su: toplina (koja se dobije kombinacijom napona, struje zavarivanja i električnog otpora), pritisak i vrijeme. Iznosi ovih faktora ovise o vrsti materijala koji se zavaruje, stanju njegove površine te o debljini samog materijala [12].

3.1. Općenito o postupku

Kao što i sam naziv kaže, elektrootporno se zavarivanje zasniva na električnom otporu koji uzrokuje tzv. *Jouleovu toplinu*¹ između dviju elektroda gdje se nalazi radni komad pritisnut silom F . Na slici 11 shematski je ilustrirano direktno (klasično) elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna nasuprot drugoj pritišćući radni komad [13].



Slika 11. Shematski prikaz direktnog točkastog zavarivanja [14]

¹ Jouleova toplina - toplina koju proizvede električna struja prolaskom kroz vodič tijekom nekoga vremena, nazvana po engleskom fizičaru Jamesu Prescottu Jouleu (Salford, 1818. - Sale, 1889.)

Količina topline koja nastaje pri zavarivanju električnim otporom određuje se prema Jouleovom zakonu:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt \quad (1)$$

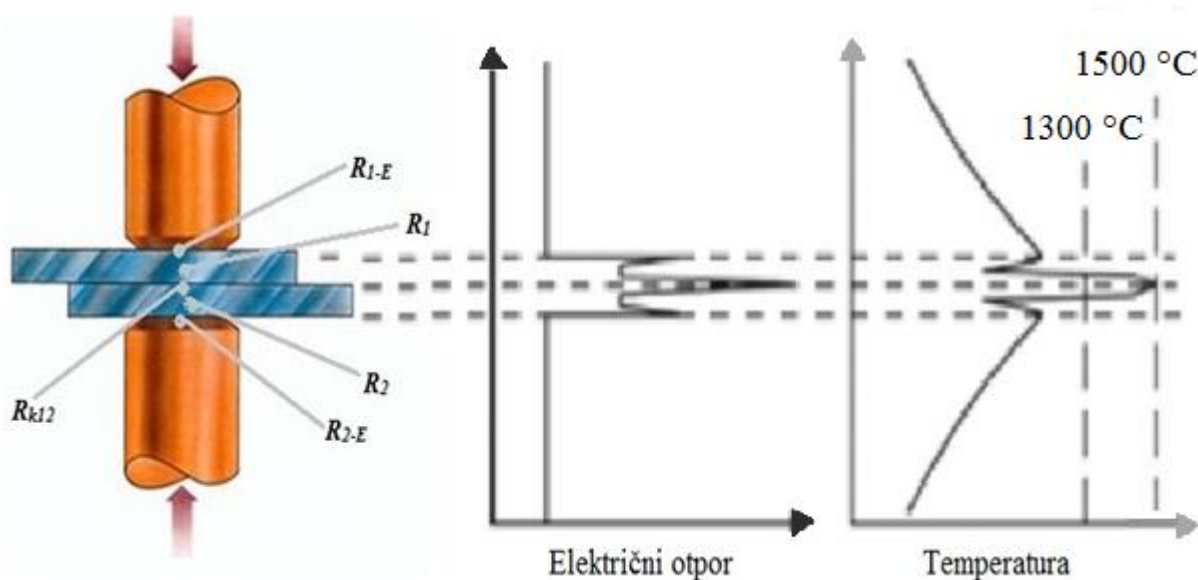
pri čemu je:

- I_z - struja zavarivanja [A],
- t - vrijeme zavarivanja [s],
- R - ukupni omski otpor između elektroda [Ω], koji se može definirati kao zbroj pojedinih otpora: $R = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E}$

gdje su:

- R_1 i R_2 – vlastiti otpori materijala,
- R_{1-E} – otpor: materijal - gornja elektroda,
- R_{2-E} – otpor: materijal - donja elektroda i
- R_{k12} – kontaktni otpor: materijal - materijal.

Na slici 12 prikazani su električni otpori, odnosno njihove pozicije u ovisnosti s temperaturom.



Slika 12. Električni otpori pri točkastom zavarivanju u ovisnosti o temperaturi [15]

U početku zavarivanja najveći je kontaktni otpor R_{k12} , uslijed nehomogenosti i hrapavosti dodirnih površina. Kontakt se ostvaruje na mjestu dodira, tj. lokalnih ispupčenja, što znači da struja teče samo kroz mali dio presjeka. Iz tog razloga se na mjestu dodira javlja veliki kontaktni otpor. Ako se istovremeno djeluje odgovarajućom silom na elektrode, površina kontakta se povećava, a kontaktni otpor smanjuje. Povišenjem temperature kontaktni otpor se također smanjuje, što je posljedica rasta specifičnog otpora sloja metala uz kontakt, smanjenja otpora oksidnog sloja te povećanja broja i površine fizičkih kontakata među elektrodama kao i plastične deformacije zagrijanog metala. Kontaktni otpori materijal – elektroda (R_{1-E} i R_{2-E}) zadržavaju približno konstantne vrijednosti za vrijeme zavarivanja. Ovi kontaktni otpori su znatno manji od kontaktnog otpora R_{k12} jer elektrode dobro provode električnu struju.

Vlastiti otpori materijala R_1 i R_2 se određuju izrazom:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

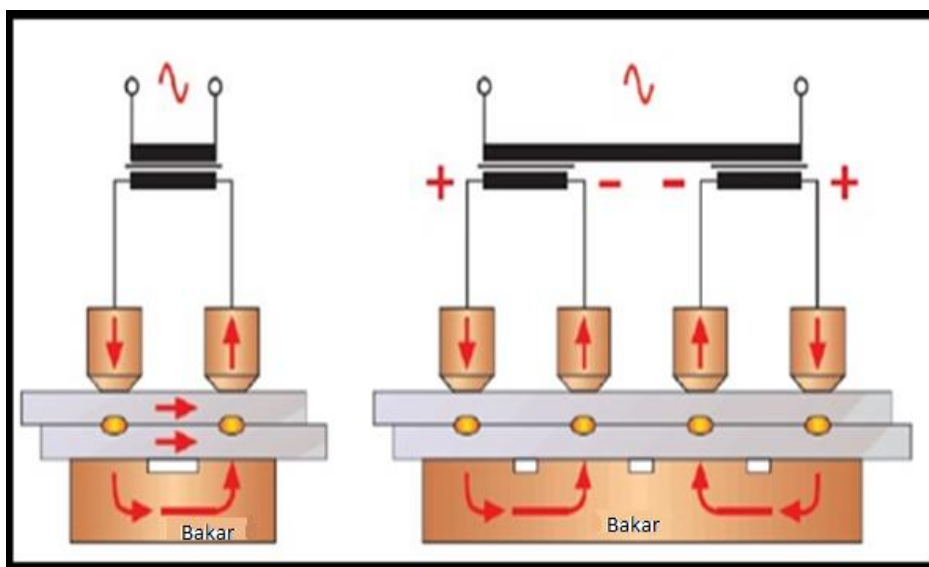
pri čemu je:

- S – površina presjeka vodiča, [mm^2],
- l – dužina vodiča, [mm] i
- ρ – specifični električni otpor, [$\Omega_{\text{mm}}^2/\text{m}$] (raste s porastom temperature).

Specifični električni otpor je najvažnija termo-fizikalna karakteristika materijala pri elektrootpornom zavarivanju jer omogućuje da se izvor topline od pretežno površinskog (u početnoj fazi zavarivanja, koja traje do trenutka vremena t_i , kada kontaktni otpori postaju zanemarivi) promijeni u zapreminski (poslije t_i). Specifični otpor legura je određen njihovim sastavom (veći je nego kod čistih metala) i termomehaničkom obradom, a u manjoj mjeri i mikrostrukturom. Prema tome, kontaktni otpor djeluje kratkotrajno i brzo opada do zanemarive vrijednosti, kada je ukupni otpor minimalan (trenutak t_i), dok se vlastiti otpor povećava do maksimalne vrijednosti, poslije čega se njegova vrijednost smanjuje [5].

3.2. Elektrootporno točkasto indirektno zavarivanje

Postoji i indirektno elektrootporno točkasto zavarivanje kod kojeg se elektrode nalaze jedna pored druge, a ispod njih je bakrena podloga. Koristi se u slučajevima kada je teško s obje strane direktnim postupkom pritisnuti radni komad. Lijevo na slici 13 se nalazi jedan par elektroda, a desno više parova elektroda spojenih na zajednički izvor struje za indirektno zavarivanje [16].



Slika 13. Ilustracija indirektnog točkastog zavarivanja [16]

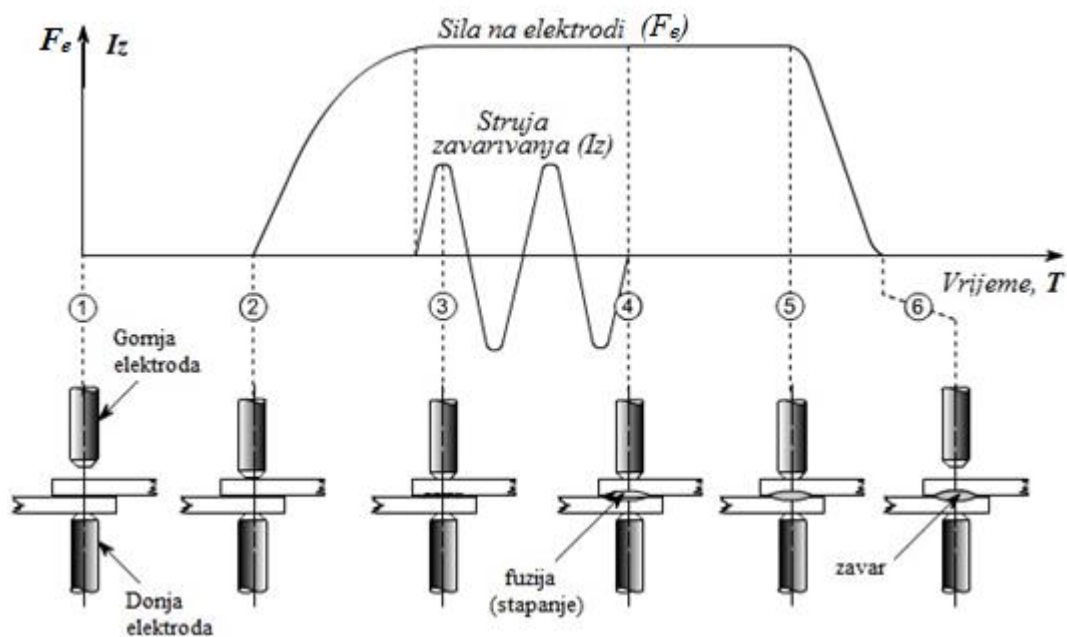
3.3. Parametri elektrootpornog točkastog zavarivanja

Na kvalitetu elektrootporno zavarenih spojeva najviše utječu:

- jačina struje zavarivanja, I_Z [A]
- sila na elektrode, F_e [N]
- vrijeme zavarivanja, t_Z [s]
- dimenzije vrhova elektroda, d_e [mm]
- vrijeme prijanjanja elektroda, t_P [s] i
- vrijeme održavanja sile na elektrodama (držanje), t_D [s].

Osim navedenih parametara, mora se voditi računa o karakteristikama osnovnog materijala, zahtjevima za vanjski izgled zavarenih spojeva, potrebnoj klasi kvalitete spoja, kvaliteti opreme i uređaja za zavarivanje te njihovoj kontroli.

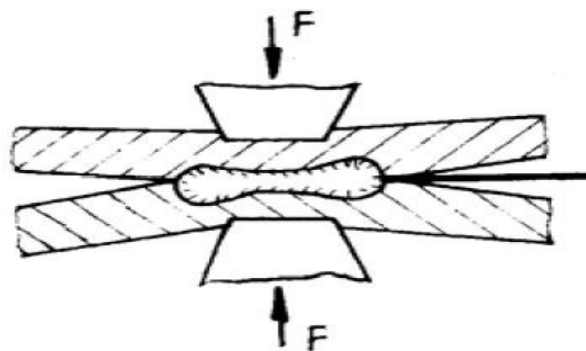
Jačina struje i vrijeme zavarivanja su međusobno povezani parametri, a u kombinaciji sa silom na elektrode njihov se odnos može prikazati dijagramom, kakav je na slici 14. Njihov se odnos može definirati integralnim izrazom za količinu topline (Jouleova toplina), kao što je to navedeno u poglavlju 3.1.



Slika 14. Dijagram ovisnosti sile zavarivanja i jačine struje o vremenu [17]

Iz dijagrama prikazanog na slici 14 vidljivo je da ciklus zavarivanja počinje pritiskanjem gornje elektrode o donju nepomičnu elektrodu zbog potrebe za fiksacijom radnog komada smještenog između dviju elektroda. Pri tome je važno osigurati dovoljnu silu na elektrode jer će se u suprotnom pojaviti nepoželjna pojava, tzv. istiskivanje (slika 15).

Istiskivanje se uočava na početku procesa pri relativno brzom zagrijavanju i nedovoljnoj sili na elektrode, ali i na kraju procesa uslijed prekomjernog zagrijavanja.



Slika 15. Istiskivanje [5]

Kada se radni komad pritisne i postane fiksiran, uključuje se struja vrlo visoke jakosti. Površine radnog komada koje su u kontaktu zagrijavaju se vrlo brzo na visoku temperaturu jer je upravo na tom mjestu najveći otpor u strujnom krugu. Kombinacijom sile ne elektrode i vrućeg (rastaljenog) metala koji se hladi pod pritiskom, nakon čega se elektrode razdvoje, dobije se točkasto zavareni spoj.

Kako uvijek postoji minimalna jačina struje potrebna za dobivanje zavarenog spoja, vrijeme zavarivanja ne može se povećati preko neke vrijednosti. Minimalna vrijednost jačine struje ovisi o karakteristikama osnovnog materijala, debljini limova i stanju njihovih površina, dimenziji vrha i sile elektrode, kao i o temperaturi metala na mjestu gdje se površine dodiruju. U većini slučajeva koristi se struja od nekoliko tisuća ampera (nekoliko kA). Tako visoka vrijednost struje koja teče kroz relativno visoku otpornost osnovnog materijala uzrokuje jako zagrijavanje u kratkom vremenu.

Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio točke (jezgra). Na vrijeme zavarivanja utječe debljina radnog komada, sila na elektrode i promjer elektroda.

U početnoj fazi zagrijavanja u jezgri počinje skupljanje krupnih zrna pod djelovanjem sile pritiska, tj. zavarivanje bez taljenja. Daljnjim zagrijavanjem jezgra se tali, a njezinim očvršćivanjem nastaje zavarena točka. Ako se struja isključi prije dostizanja temperature taljenja tada u strukturi zavarene točke nema šupljina i pora, ali nastaju krupno zrno i nemetalni uključci koji smanjuju žilavost spoja. Suprotno tome, tijekom taljenja i očvršćivanja jezgre ispunjavaju se šupljine i pore, što se može spriječiti djelovanjem sile na elektrode. Stoga smanjenje sile na elektrodama treba kasniti u odnosu na isključenje struje za vrijeme t_k , dovoljno za završetak kristalizacije. Povećanjem debljine komada, hlađenje i kristalizacija se usporavaju, a vrijeme t_k se produžuje. Kod debljih limova (čelik deblji od 6 mm) sila na elektrodama ne samo da mora djelovati duže, već se treba povećati da bi se spriječila pojava šupljina i pora.

Da bi se ostvario kvalitetan zavar potrebno je kontrolirati upravo vrijeme zavarivanja koje i jest najčešća upravljiva varijabla, pošto je jačina struje često ekonomski nepraktična za kontrolu, ali i nepredvidiva. Na slici 16 prikazana su četiri karakteristična vremena pri elektrootpornom zavarivanju čiji zbroj daje jedan vremenski ciklus zavarivanja [18].



Slika 16. Vremenski ciklusi pri elektrootpornom zavarivanju [12]

„Off Time“ – vrijeme kad su elektrode razdvojene kako bi se omogućilo premještanje materijala za zavarivanje sljedeće točke.

Teško je odrediti točnu vrijednost vremena zavarivanja. Ono mora biti što je kraće moguće. Ako je vrijeme zavarivanja predugo, dolazi do prevelike točke ili prevelikog udubljenja radnog komada na mjestu zavara što nije prihvatljivo [19].

3.4. Oprema za elektrootporno točkasto zavarivanje

Strojevi za elektrootporno točkasto zavarivanje su konstruirani s fleksibilnim kablovima, kliještama na kojima su elektrode, a u njihovom transformatoru postoji minimalan električni otpor da bi se dobila što veća učinkovitost na izlazu, odnosno na mjestu zavarivanja gdje je i otpor strujnog kruga najveći.

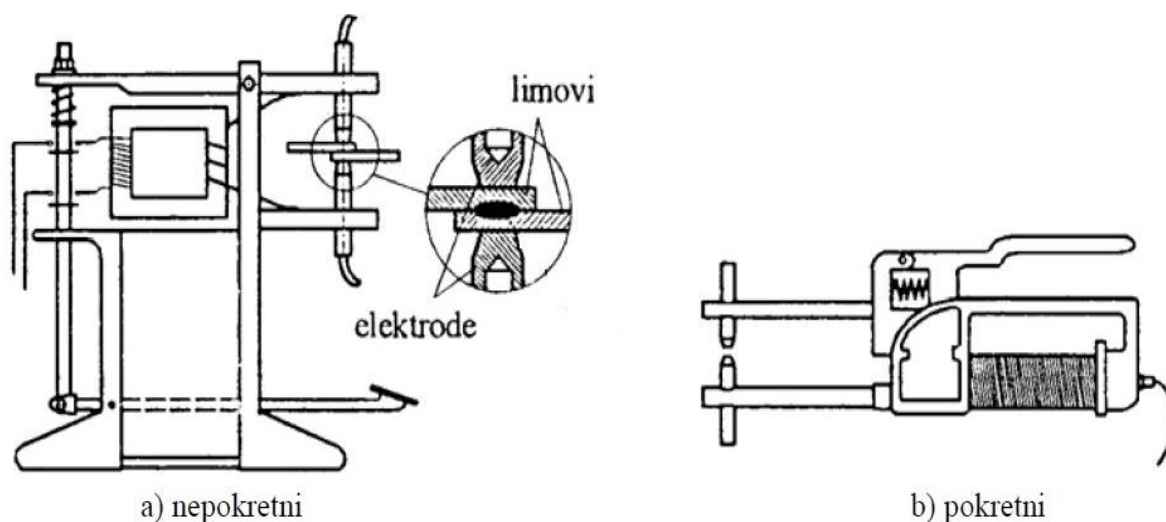
Uređaji se sastoje od sljedećih dijelova:

- prekidača za uključivanje i isključivanje struje,
- dvije elektrode i elemenata za dovođenje struje,
- „papuče“ i mehanizma za ostvarivanje sile na elektrode,
- transformatora koji smanjuje napon sa 380 V ili 220 V na 0,5 V – 10 V.

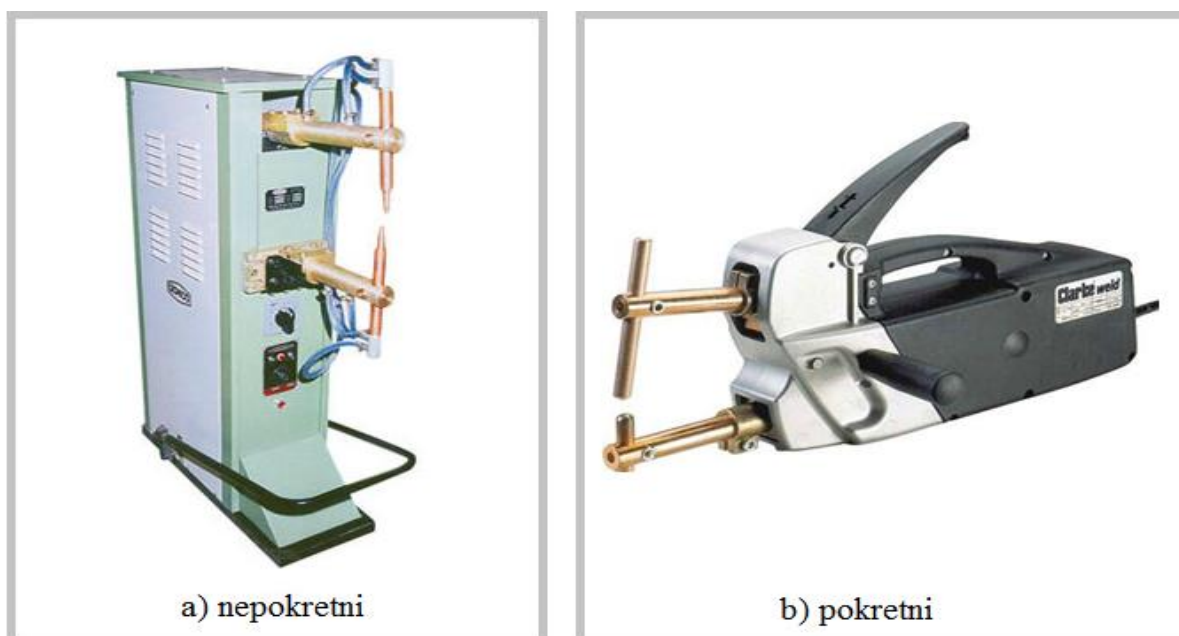
Sila na elektrode može se ostvariti:

- mehanički (nogom, slika 17.a, ili rukom, slika 17.b)
- automatski (hidraulično, električno ili pneumatski) [5].

Postoje izvedbe nepokretnog i pokretnog izvora struje. Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Kod nepokretnog je glavna prednost što može ostvariti veću silu na elektrode, dok je kod pokretnog glavna prednost njegova mobilnost, odnosno mogućnost zavarivanja na terenu. Na slici 17 shematski su prikazana ova dva tipa uređaja, dok su na slici 18 prikazane njihove fotografije.



Slika 17. Shema uređaja za elektrootporno točkasto zavarivanje [5]



Slika 18. Uređaji za elektrootporno točkasto zavarivanje [20]

3.5. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje

Elektrode su vrlo važan dio same opreme. Postoje u raznim veličinama i oblicima kao što je to prikazano na slici 19, a funkcija im je svima jednaka – što učinkovitije prihvatiti i zavariti radni komad.



Slika 19. Elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje [21]

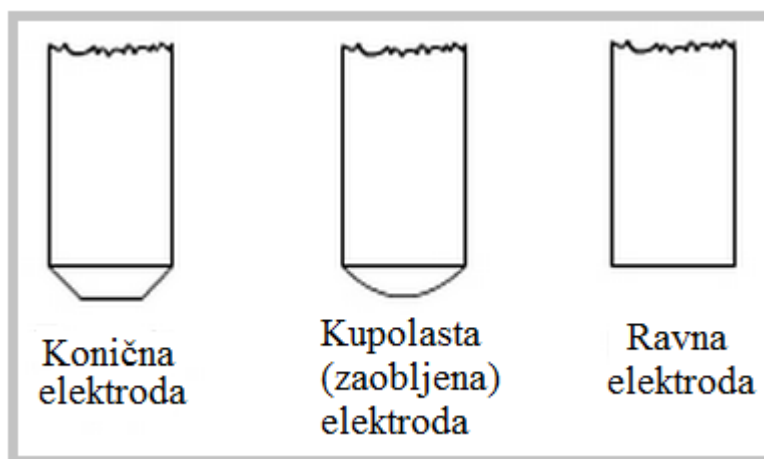
Kao što se vidi na slici 19, oblika ima mnogo, ali mogu se izdvojiti tri najvažnija, a to su elektrode s vrhom u obliku:

- krnjeg stošca, tj. konične elektrode,
- kupole, tj. zaobljene elektrode,
- ravne plohe.

Konične elektrode imaju kut konusa u iznosu od 120° do 140° , a koriste se za zavarivanje feritnih materijala kao što su niskougljični, ugljični i nehrđajući čelik, lijevano i kovano željezo [22].

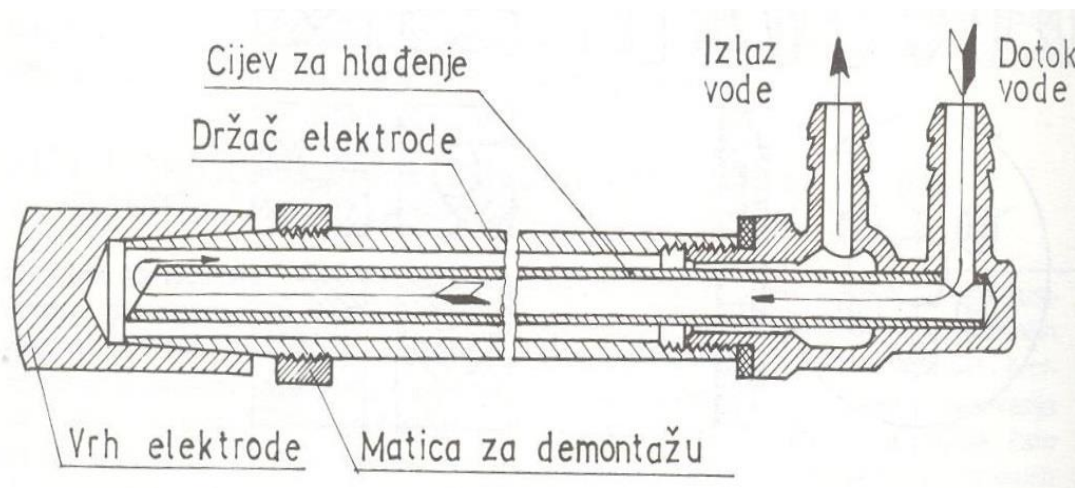
Kupolaste elektrode, čiji radijus kupole varira od 50 mm do 100 mm, mogu izdržati veća opterećenja i temperature bez pojave oštećenja te se obično koriste za zavarivanje neferitnih metala, kao što su aluminij, magnezij, titan, cink [23].

Elektrode s ravnim vrhom koriste se u uvjetima gdje je zahtijevan minimalan otisak zavarenog spoja, odnosno tzv. nevidljivim zavarima na čijoj je površini zavarena točka slabo uočljiva [17]. Na slici 20 shematski su prikazana tri tipa elektroda.



Slika 20. Tri najčešća tipa vrha elektrode [17]

Elektrode za elektrootporno zavarivanje često su konstruirane s kanalom kojim cirkulira hladna voda iz razloga da bi se smanjila radna temperatura same elektrode i povećao njen radni vijek. Na slici 21 prikazani su glavni dijelovi cilindrične ravne elektrode za elektrootporno točkasto zavarivanje.



Slika 21. Cilindrična ravna elektroda za elektrootporno točkasto zavarivanje [16]

3.5.1. Funkcije elektroda

Elektrode za elektrootporno zavarivanje obavljaju nekoliko funkcija. Najvažnija od njih je prijenos sile do zone zavarivanja uz reguliranje sile na elektrode u zoni prije samog protoka struje. Pritisak ne smije biti ni prevelik, ni premalen. Sljedeća funkcija je da provode električnu struju zavarivanja na mjesto kontakta uz zagrijavanje i stvaranje zavarenog spoja. Elektrode, također reguliraju gustoću struje na mjestu zavarivanja i određuju promjer zavarene jezgre. Na kraju, uz određivanje položaja izratka, odvođe toplinu iz zone zavarivanja tokom prolaza struje i poslije isključenja [16].

3.5.2. Materijali elektroda

Elektrode se najčešće izrađuju od legura bakra, a moraju imati sljedeće karakteristike:

- visoka električna i toplinska provodljivost,
- visoka tvrdoća pri radnoj temperaturi,
- visoka mehanička otpornost,
- homogenost strukture,
- postojana mehanička i električna svojstva.

Prvi zahtjev najbolje ispunjava čisti bakar, ali je njegova tvrdoća, posebno na povišenim temperaturama, nedovoljna. Zato se iz gore spomenutih razloga, za izradu elektroda najčešće koriste legure bakra, a prema RWMA² moguće ih je podijeliti u 3 grupe:

- **Grupa A**, sadrži gotovo čisti bakar, a dijeli se u dva razreda:
 - **Razred 1**: 99 % bakar + 1 % kadmij čija kombinacija ima provodljivost od 92 % i zato se preporučuje za zavarivanje aluminijских i magnezijevih legura, bakra, mjeda i slično.
 - **Razred 2**: 99,2 % bakar + 0,8 % krom uz provodljivost od 82 %. Koristi se kod većine materijala.
- **Grupa B**, sadrži vatrostatne metale [24]. Oni imaju ekstremno visoku točku taljenja, a to su molibden, tantal, wolfram i renij [25].
- **Grupa C**, sadrži posebne materijale kao što su ojačane disperzije bakra [24].

² RWMA = Resistance Welding Manufacturers Association

3.6. Zavarljivost metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem

Teoretska i praktična iskustva pokazuju da zavarljivost metala i legura elektrootpornim točkastim zavarivanjem ovise o mnoštvu utjecajnih faktora. Višegodišnja istraživanja su pokazala da se ocjena zavarljivosti metala i legura može dati prema tablici 2.

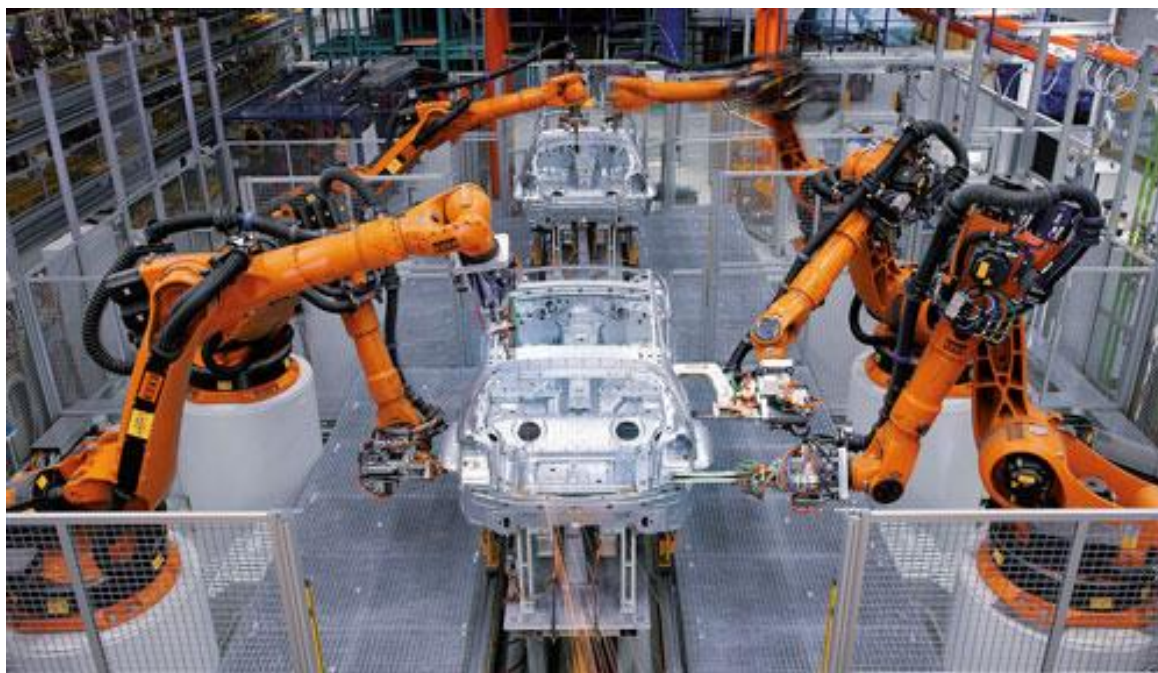
Tablica 2. Ocjena međusobne zavarljivosti metala elektrootpornim točkastim zavarivanjem [26]

| | Aluminij | Nerhdajući čelik | Mjed | Bakar | Pocinčani čelik | Čelik | Olovo | Nikal | Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni) | Čink | Fosforna bronza | Novo srebro |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|---------------------------|----------|-----------------|-------------|
| 1 – odlično 2 – dobro 3 – podnošljivo 4 – loše 5 – nedovoljno 6 – nemoguće | | | | | | | | | | | | |
| Aluminij | 2 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 6 |
| Nerhdajući čelik | 5 | 1 | 5 | 5 | 2 | 1 | 6 | 3 | 3 | 6 | 4 | 4 |
| Mjed | 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 |
| Nikal | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 2 | 6 | 3 | 2 |
| Krom-nikal (20%Cr, 80%Ni) | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 6 | 4 | 2 |
| Čink | 3 | 6 | 5 | 5 | 3 | 6 | 3 | 6 | 6 | 3 | 4 | 6 |
| Fosforna bronza | 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 |

Kod zavarivanja čelika s vrlo niskim sadržajem ugljika (0,05 % - 0,1 %) mehanička svojstva zavara praktično su jednaka mehaničkim svojstvima zavarivanog materijala. S povećanjem sadržaja ugljika iznad 0,1 % zapaža se neznatan utjecaj zakaljene strukture što dovodi do povećanja čvrstoće zavara i omogućuje 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 35 % metalografska ispitivanja pokazuju prisustvo martenzita u jezgri zavarene točke. To dovodi do pojave krhkosti pa ako zavarena točka nije naknadno toplinski obrađena spoj postaje neupotrebljiv. Iz tog se razloga često provodi naknadno zagrijavanje [26].

3.7. Primjena elektrootpornog točkastog zavarivanja

Elektrootporno točkasto zavarivanje je zbog svoje brzine zavarivanja, učinkovitosti te pogodnosti za automatizaciju i robotizaciju pronašlo široku primjenu u mnogim granama industrije, posebice tamo gdje se treba zavariti velik broj spojeva. Vrlo je pogodno za masovnu i serijsku proizvodnju. Najviše se primjenjuje u industriji vozila, naročito u automobilskoj, zrakoplovnoj i industriji tračničkih vozila. Točkastog zavarivanja ima i u prehrambenoj industriji te u industriji bijele i ratne tehnike, kao i u nuklearnoj, raketnoj i svemirskoj tehnici. Na slici 22 prikazan je klasičan primjer robotiziranog točkastog zavarivanja karoserije automobila tako da više robota istovremeno obavlja, svaki svoj, programirani zadatak.



Slika 22. Zavarivanje karoserije automobila [27]

4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

U postrojenjima procesne, kemijske, energetske te nuklearne industrije postoje različiti uvjeti rada opreme koja je izložena bitno različitim razinama mehaničkih i toplinskih naprezanja kao i različitom korozijskom okolišu. Da bi se zadovoljili konstrukcijski i gospodarski zahtjevi u takvim uvjetima rada primjenjuju se različite vrste materijala koje pri ugradnji zahtijevaju primjenu raznorodnih spojeva. Suvremena strojogradnja, a naročito izrada energetskih, kemijskih i postrojenja za preradu nafte primjenjuje najrazličitije kombinacije čelika i drugih metala. S obzirom da je pri izradbi postrojenja kao i tijekom njihovog održavanja u radu zavarivanje osnovni oblik spajanja, potrebno je istaknuti složenost zavarivanja različitih raznovrsnih čelika.

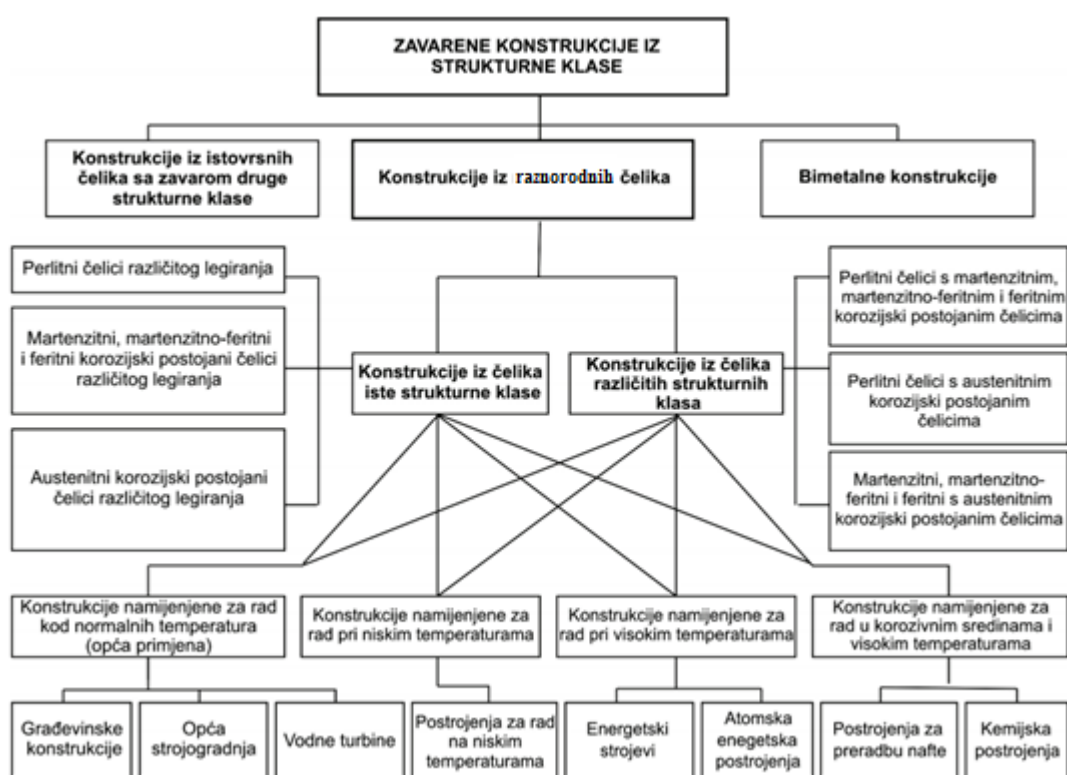
Osim zavarivanja prisutno je i navarivanje, oblaganje – platanje³ gdje je osnovna ideja osigurati mehaničku otpornost (nosivost) s pomoću jeftinijeg niskougličnog (nelegiranog ili niskolegiranog) čelika, a površinu tog nosivog dijela konstrukcije protiv kemijske agresije nerazdvojivo obložiti – platurati metalnim korozijski postojanim materijalom. Danas se iz raznovrsnih i platuranih materijala izrađuju reaktori i izmjenjivači topline u kemijskoj industriji, generatori pare i reaktori u energetici i atomskoj tehnici, tlačni spremnici za skladištenje agresivnih kemikalija kao i cjevovodi većih promjera i debljina stjenke.

Tehnologija zavarivanja raznorodnih čelika je daleko složenija od one čelika iste strukturne klase. Ova složenost je rezultat zavarivanja čelika različitih strukturnih, mehaničkih i fizikalno kemijskih svojstava a što se iskazuje kemijskom i strukturnom raznorodnošću unutar zavarenog spoja. Navedeni faktori imaju odlučujuću ulogu pri izboru postupka zavarivanja, tehnike i izbora dodatnog materijala. Odabrana tehnologija također treba smanjiti difuziju ugljika u zoni staljivanja tijekom zavarivanja te moguće toplinske obrade. Posebnu pažnju kod zavarivanja raznorodnih čelika treba usmjeriti na predgrijavanje osnovnih materijala prije zavarivanja kao i na toplinsku obradbu nakon zavarivanja [28].

³ Platanje je postupak nanošenja tankog sloja plemenitijeg materijala na nelegirane i mikrolegirane konstrukcijske čelike u svrhu postizanja antikorozivnog sloja. Na deblji osnovni materijal se zavaruje platuran sloj debljine 3 – 7 mm, a to se izvodi toplim valjanjem, zavarivanjem eksplozijom ili se navaruje pod prahom. Platurani sloj može biti od CrNi legure, Cr nehrđajućih čelika, Ni – legure, Cu – legure i ostalo. Dodatni materijal mora odgovarati mehaničkim svojstvima osnovnog materijala te antikorozivnim svojstvima platuranog sloja. Ako je dodatni materijal čvršći od osnovnog, zona taljenja će biti čvršća u ZUT-u i zoni taljenja (ZT) te će nastati visoka zaostala naprezanja te ako nema istežljivosti doći će do pukotina u ZT koje se mogu proširiti i do ZUT-a [29].

4.1. Klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika

Jedna od mogućih klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika prikazana je na slici 23. Navedene klasifikacije predstavljaju osnovne načine podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika. Naravno da je ovisno o posebnostima radnih uvjeta (temperatura, agresivnost okoliša) moguće unutar navedenih grupa provesti i daljnju klasifikaciju [28].



Slika 23. Prikaz osnovnih načina podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika [28]

4.2. Zaostala naprezanja zavarenih spojeva i deformacije konstrukcija iz raznorodnih čelika

Naprezanja, kao stanje elastičnih deformacija koje su uravnotežene unutar materijala, mogu nastati u zavarenom spoju raznorodnih čelika:

- u tijeku zavarivanja, uslijed neravnomjerne raspodjele topline (toplinskog polja) pri zavarivanju te krutosti zavarenih elemenata koja sprječava toplinske deformacije tako da nastaju plastične deformacije,
- kod postupka toplinske obradbe,
- u uvjetima rada pri cikličkoj promjeni temperature.

Na nastajanje naprezanja utječu i mehanička i fizikalna svojstva čelika koji se zavaruje, kao što su: koeficijent linearnog istezanja, toplinska vodljivost, modul elastičnosti itd. Usporedna svojstva ugljičnih i visokolegiranih čelika prikazana su u tablici 3. Usporedbom koeficijenta linearnog istezanja čelika različite strukturne vrste, uočena je najveća razlika (35 %) između čelika austenitne i feritno-perlitne strukture. Što je veća razlika u koeficijentima linearnog istezanja materijala koji se zavaruju bit će i veći stupanj nastalih naprezanja. Uslijed znatne razlike u koeficijentima linearnog istezanja, pri toplinskoj obradbi radi uklanjanja naprezanja dolazi do deformacije konstrukcije i do nastanka novih naprezanja. Na nastanak novih naprezanja može također utjecati i znatna razlika u vrijednostima modula elastičnosti osnovnog materijala i metala zavara.

Tablica 3. Svojstva različitih vrsta čelika [28]

| VRSTA ČELIKA SVOJSTVO | Austenitni Cr-Ni čelici | Feritni Cr čelici | Martenzitni Cr čelici | Precipitacijom očvrstivi čelici | Ugljični čelici |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Gustoća, ρ /kg m ⁻³ | 7800-8000 | 7800 | 7800 | 7800 | 7800 |
| Koeficijent linearnog istezanja (0-500 °C), $\alpha/10^{-6} \text{K}^{-1}$ | 17,0-19,2 | 11,2-12,1 | 11,6-12,1 | 11,9 | 11,7 |
| Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), $\lambda/\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 18,7-22,8 | 24,2-26,3 | 28,7 | 21,8-23,0 | 60 |
| Specifični električki otpor / $10^{-6}\Omega\text{m}$ | 69-102 | 59-67 | 55-72 | 77-102 | 12 |
| Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C), $c/\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ | 460-500 | 460-500 | 420-460 | 420-460 | 480 |
| Vlačni modul elastičnosti, E/GPa | 190-200 | 200 | 200 | 200 | 210 |
| Područje taljenja /°C | 1400-1450 | 1480-1530 | 1480-1530 | 1400-1440 | 1538 |

U slučaju kombinacije feritno-perlitnog materijala i austenitnog metala zavara bilježi se razlika od 10 % vrijednosti modula elastičnosti u korist austenitnog metala zavara. Da bi se spriječila pojava pukotina zbog napetostne korozije, konstrukcija zavarena raznorodnim čelicima izložena korozivnoj sredini treba biti prethodno zavarena s minimalnim naprezanjima. Kod zavarenih raznorodnih spojeva kod kojih su izrazite razlike u koeficijentima linearnog istezanja za vrijeme rada mogu se pojaviti pukotine uslijed toplinskog zamora zbog cikličkih promjena temperature (velike i česte promjene). U tom slučaju preporuča se takav izbor dodatnog materijala čiji je koeficijent linearnog istezanja približno jednak onom kod ugljičnog konstrukcijskog čelika (npr. nikal-legure). U tom slučaju najviša opterećenja će se javljati na strani korozivski postojanog čelika gdje će se zbog više razine duktilnosti materijala ukupna razina naprezanja sniziti plastičnom deformacijom.

4.3. Difuzijski procesi pri zavarivanju raznorodnih čelika

Difuzijski procesi predstavljaju jedan od najvećih problema kod zavarivanja raznorodnih čelika. Difuzija je kretanje atoma kroz materijal te time dolazi do nastanka kemijskih i strukturnih neravnomjernosti što vrlo utječe na kvalitetu zavarenog spoja raznorodnih čelika. Do procesa difuzije dolazi prilikom samog zavarivanja, naknadne toplinske obrade i pri radu na visokim temperaturama.

Gibanje atoma kroz materijal događa se raznim oblicima difuzije:

- gibanje atoma kroz kristalnu rešetku (volumna difuzija),
- gibanje atoma po površini (površinska difuzija),
- gibanje atoma kroz granice zrna,
- gibanje atoma duž dislokacija i drugih površinskih i linijskih nepravilnosti.

Na visokim temperaturama je osim volumne difuzije zbog smanjenog volumena granica kristala i dislokacija prisutna i difuzija po granicama zrna. Posljedica difuzije i migracije najpokretljivijih elemenata, prvenstveno ugljika te ostalih karbidotvornih elemenata (Cr, Mo, V) iz materijala s nižim stupnjem legiranja u onaj s višim je stvaranje karbidima bogate zone niske plastičnosti (pougljičenje) u više legiranom materijalu te zone s niskim sadržajem ugljika i niskom čvrstoćom (razugljičenje) u niže legiranom materijalu posebno ako je zavareni spoj podvrgnut povišenoj temperaturi kroz duže vrijeme.

Odvojeno od ugljika, dušik i kisik također migriraju prema višelegiranom materijalu tako da ispražnjena zona postaje ekstremno čista. Zbog toga, temperatura rekrystalizacije pada na vrlo nisku razinu koja je za feritni čelik na oko 500 °C. Premda ova zona nije jako široka, ona može imati nisku vlačnu čvrstoću i tvrdoću. Tendencija stvaranja razugličene zone zbog veće topljivosti ugljika u austenitu u odnosu na ferit je snažnija u feritno-austenitnim nego li u svim feritnim spojevima.

U cilju smanjenja kemijske i strukturne heterogenosti spoja, provode se razni načini sprečavanja migracije ugljika. Neki od njih su:

- legiranje ugljičnog čelika elementima koji stvaraju karbide, kao što su Ti i Nb, a jači su karbidotvorci od Cr. Prisutnost ovih elemenata u ugljičnom čeliku utječe na vezivanje ugljika u stabilne karbide te se na taj način sprječava njegova difuzija u austenitni materijal.
- oblaganje strane ugljičnog čelika austenitnim materijalom ili uporaba materijala na osnovi nikla (razina difuzije u niklu je niska te je rast razugličenog sloja ograničen i nakon dužeg izlaganja visokim temperaturama).

Navedena rješenja kod zavarivanja raznorodnih čelika nisu dovoljno učinkovita posebno kad je riječ o zavarivanju čelika povišene čvrstoće kao i konstrukcija koje su pri radu izložene povišenim temperaturama. Mehanička svojstva statički opterećenih zavarenih spojeva raznorodnih čelika razugličanjem nisu snižena ako je radna temperatura spoja ispod 300 °C. Zbog moguće strukturne i kemijske heterogenosti kao i visokih naprežanja toplinske naravi, učinkovito rješenje pri zavarivanju raznorodnih čelika može biti i primjena prijelaznih dijelova odgovarajućeg presjeka (cijev, ploča, traka, šipka). Uporaba prijelaznih elemenata je takvo rješenje koje rezultira u zavarivanju čelika jednakih strukturnih klasa [28].

4.4. Zavarivanje nelegiranih čelika

Najvažniji prateći kemijski element kod nelegiranih čelika je ugljik. Njegov sadržaj je od 0,1 % C do 0,6 % C. Ostali prateći elementi su uglavnom: 0,5 % Si, 0,8 % Mn, 0,05 % S, 0,05 % P, 0,1 % Al, 0,1 % Ti i 0,25 % Cu. Za razliku od nelegiranih čelika, niskolegirani čelici sadrže do 5 % legiranih elemenata (Ni, Cr, Mo, V i ostali).

U čeličani se mogu proizvesti:

- Neumireni čelik, bez dezoksidacije s nepoželjnim segregacijama, ali mekanom površinom što je pogodno za duboko vučenje,
- Poluumireni čelik s djelomičnom dezoksidacijom, ima manje izražene segregacije,
- Umireni čelik, umiruju se većim količinama dezoksidansa,
- Posebno umireni, takvi čelici sadrže i Al kao dezoksidans te sadržaj mora biti veći od 0,02 %, Al_2O_3 služi kao tvorac klica kristalizacije pa se dobiva sitnozrnata mikrostruktura koja rezultira visoku udarnu žilavošću te otpornošću na starenje.

Problemi koji se javljaju kod zavarivanja nelegiranih čelika su: pukotine, poroznost, starenje i krhkost materijala zbog visokog sadržaja sumpora te fosfora u samoj leguri nehrđajućih čelika. Za sadržaj sumpora i fosfora je vrlo bitan način proizvodnje samog čelika. Zbog toga umireniji čelici imaju bolju zavarljivost, ali su i skuplji. Mjere pomoću kojih se postižu kvalitetniji zavareni spojevi su predgrijavanje osnovnog materijala, zavarivanje s većim unosom topline, primjena bazičnih elektroda, optimalno oblikovanje konstrukcije te popuštanje zaostalih napreznja. Kod predgrijavanja čelika vrlo je bitan sadržaj ugljika u leguri i ostalih elemenata, debljina stjenke, napreznja i sadržaj difuzijskog vodika. Predgrijavanjem se postiže smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja temperature i zone taljenja, izlazak difuzijskog vodika te se smanjuju zaostala napreznja. Predgrijavanje čelika se odnosi na zagrijavanje mjesta zavarivanja iznad temperature okoliša te održavanjem temperature prilikom zavarivanja. U tablici 4 prikazane su temperature predgrijavanja u ovisnosti o sadržaju ugljika [29].

Tablica 4. Temperatura predgrijavanja (T_0) pri zavarivanju nelegiranih čelika

| %C | T_0 [°C] |
|-------------|------------|
| 0,20 – 0,30 | 100 – 150 |
| 0,30 – 0,45 | 150 – 275 |
| 0,45 – 0,80 | 275 – 425 |

4.5. Zavarivanje visokolegiranih čelika

Visokolegirani čelici su u konstantom razvoju. Danas su jako usavršeni. Najveći porast visokolegiranih čelika je u zadnjih 40 godina zbog uvođenja toplog i hladnog valjanja, široke upotrebe kontinuiranog lijevanja te uvođenje sekundarne metalurgije. Proizvodnja visokolegiranih čelika u zadnjih 25 godina se udvostručila, jedino još aluminij pokazuje sličan rast. Čelici koji posjeduju sadržaj legirajućih elemenata veći od 5 % spadaju u skupinu visokolegiranih čelika.

Visokolegirane čelike može se podijeliti prema strukturi materijala dobivenoj hlađenjem na zraku nakon visokotemperaturnog zagrijavanja:

- martenzitni čelici (meko martenzitni),
- martenzitno-feritni čelici,
- austenitno-martenzitni čelici,
- austenitno-feritni čelici (*duplex*),
- feritni čelici (super-feritni),
- austenitni čelici (super-austenitni).

Novije skupine čelika su meko martenzitni čelici jer su im posebnim legiranjem znatno poboljšana svojstva. S obzirom prema primjeni visokolegirani čelici se dijele na korozijski postojane, vatrootporne itd. Prema sustavima legiranja dijele se na krom čelike, krom-nikal čelike, krom-mangan čelike itd. Svaka od navedenih skupa ima svoje probleme kod zavarivanja i eksploataciji zavarenih spojeva. Kod zavarljivosti visokolegiranih čelika važna su i njihova fizikalna svojstva koja utječu na njihovo ponašanje prilikom zavarivanja, a to su toplinska vodljivost, električni otpor, temperaturno rastezanje i modul elastičnosti. U tablici 5 su prikazana fizikalna svojstva pojedinih grupa visokolegiranih čelika [30].

Tablica 5. Fizikalna svojstva nelegiranih čelika i glavnih grupa visokolegiranih čelika [30]

| VRSTA ČELIKA | | Fizikalna svojstva | | | | |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| | | α $10^{-6} \times K^{-1}$ (100 °C – 500 °C) | λ W/(m x K) (20 °C) | Ω $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C) | E kN/mm ² (20 °C) | Magne- tičnost |
| VISOKOLEGIRANI ČELICI | Feritni | 10,5 – 12,0 | 29 | 0,60 | 210 | + |
| | Martenzitni | 10,5 – 12,0 | 30 | 0,60 | 210 | + |
| | Austenitni | 16 – 18 | 15 | 0,73 | 200 | - |
| | Austenitno- -feritni (duplex) | 12,5 – 13 (do 300 °C) | 14 | 0,79 | 206 | + |
| Nelegirani čelici | | 13 | 47 | 0,15 | 205 | + |

4.5.1. Martenzitni Cr – čelici

Martenzitni Cr - čelici su legirani s 13 % do 18 % kroma, imaju povišeni udio ugljika (0,2 % - 1,0 %) te mogu sadržavati 2,5 % nikla i 1,3 % molibdena. Zbog najvećeg udjela kroma se i nazivaju martenzitni kromni čelici. Dije se u dvije skupine, a to su konstrukcijski čelici i alatni čelici. Konstrukcijski čelici sadrže do 0,25 % C te se poboljšavaju, kod njih se posebna pažnja usmjerava na otpornost prema koroziji. Alatni čelici sadrže više od 0,3 % C i potrebno ih je popuštati nakon kaljenja. Kod alatnih čelika postoji dodatni zahtjev prema abrazivskom trošenju. Njihova korozijska postojanost je nešto niža zbog dvofazne mikrostrukture koju posjeduju (martenzit + karbidi).

Kod zavarivanja martenzitnih Cr – čelika u praksi se koriste materijali s postotkom ugljika manjim od 0,15 %. Kod većih udjela ugljika može doći do hladnih pukotina i zakaljivanja u zoni utjecaja topline (ZUT) što rezultira povećanjem tvrdoće, čvrstoće, pada duktilnosti i gubitka korozijske postojanosti.

Pri zavarivanju martenzitnih Cr – čelika s približno 0,15 % C preporučuje se:

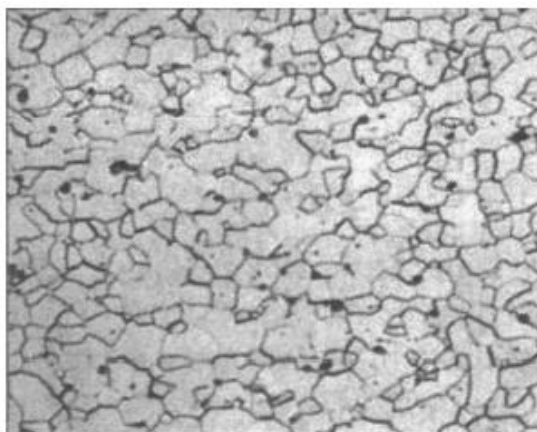
1. Koristiti sušene elektrode, odnosno prašak za zavarivanje,
2. Temperaturu predgrijavanja i međuslojnu temperaturu održavati od 200°C do 300°C,

3. Vrste dodatnog materijala

- Austenitni dodatni materijal, ali prilikom naknadne toplinske obrade može doći do pojave krhkosti zavarenog spoja,
- Za postizanje određene čvrstoće, dinamičke izdržljivosti te, ako se boja zavara ne smije razlikovati od osnovnog materijala, koriste se istovrsni ili slični dodatni materijali. Prilikom korištenja takvih dodatnih materijala potrebno je provoditi toplinsku obradu popuštanjem na 700 – 750 °C zbog loše duktilnosti jer se nakon zavarivanja metal zavara sastoji od martenzita, delta ferita i djelomično zaostalog austenita [30].

4.5.2. Feritni čelici

Feritni čelici imaju feritnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi bez sposobnosti fазne transformacije i usitnjenja zrna. Sadrže od 13 % Cr do 30 % Cr i manje od 0,1 % C. Za povećanje njihove otpornosti na koroziju dodaje se Mo, a za bolju zavarljivost legiraju se s Ti i Nb. S obzirom na austenitne čelike imaju veću otpornost na napetosnu koroziju u kloridnim medijima, a jeftiniji su od njih. Na slici 24 je prikazana mikrostruktura feritnih čelika.



Slika 24. Mikrostruktura feritnih čelika [30]

Grijanjem feritnih čelika iznad 850 °C dolazi do pogrubljenja zrna. To je najviše izraženo na područjima ZUT-a, gdje se javljaju visoke temperature prilikom zavarivanja. Već iznad 600°C počinje znatno rasti veličina zrna što rezultira s padom mehaničkih vrijednosti. Na većim temperaturama može doći do izlučivanja Cr po granicama zrna u ZUT-u što dovodi do pojave interkristalne korozije [30].

4.5.3. Austenitni čelici

Austenitni čelici su danas najraširenija grupa s gledišta primjene i proizvodnje, a karakterizira ih visoka duktilnost i niska čvrstoća kao i visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura. Posjeduju visoku duktilnost pri niskim temperaturama. Uglavnom sadrže 0,02 % – 0,15 %C. Dodaju im se još i određene količine Mo, Ti, Nb, Ta i N. Nikal i dušik djeluju na proširenje austenitnog područja. Nedostatak tih čelika je nisko naprezanje tečenja ($185 \text{ N/mm}^2 - 225 \text{ N/mm}^2$). Dodavanjem više od 18 % Cr, općenito se povećava otpornost prema koroziji. Titan i niobij u austenitnim čelicima služe za vezivanje s ugljikom prilikom sporog grijanja ili hlađenja te se time dobiva niski sadržaj ugljika (do 0,03 %) što sprječava interkristalnu koroziju. Za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj koroziji u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji.

Danas se austenitni čelici smatraju relativno zavarljivim materijalima. Bez obzira na njihovu veliku otpornost prema koroziji, prilikom zavarivanja može se povećati osjetljivost prema koroziji u procjepu, može doći do pojave toplih pukotina i ostalo. Za sprječavanje tih negativnih pojava vrši se pravilan odabir dodatnog materijala, osnovnog materijala te odgovarajuća tehnologija zavarivanja

- Kod austenitnih čelika koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50 % veći s obzirom na ostale čelike što utječe na pojavu deformacija i zaostalih naprezanja tijekom i nakon zavarivanja,
- Koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60 % manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja. Može se spriječiti eventualno bakrenim podlogama koje omogućuju brže odvođenje topline iz područja zavarivanja,
- Specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo.

Nepoštivanjem određenih zahtjeva tehnologije zavarivanja, dolazi do sljedećih problema koji se mogu svrstati u tri velike grupe:

1. Korozijske pojave,
2. Tople pukotine,
3. Izlučivanje $\sigma -$ faze

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su:

- izbor dodatnog materijala koji osigurava sadržaj δ – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- bitna vrsta i čistoća zaštitnih plinova te njihova mješavina,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavati, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100 °C do 150 °C,
- međuslojna temperatura do najviše 150 °C,
- odabrati takve uvjete zavarivanja koji osiguravaju miješanje s osnovnim materijalom manjim od 35 %,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- ne smije se ravnati s plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić i četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika [30].

EKSPERIMENTALNI DIO

5. EKSPERIMENTALNIDIO

U eksperimentalnom dijelu rada propisana je tehnologija elektrootpornog točkastog zavarivanja na limovima od visokolegiranog i nelegiranog čelika. Određeni su optimalni parametri zavarivanja među kojima su:

- struja zavarivanja (I_z),
- vrijeme zavarivanja (t_z) i
- sila na elektrode (F_e).

Uz primjenu norme HRN EN ISO 15614-12 načinjeni su odgovarajući ispitni uzorci, a potom je ispitana kvaliteta zavarenog spoja nerazornim i razornim ispitivanjem.

5.1. Materijali ispitnih uzoraka i norma

Materijali ispitnih uzoraka su:

- S355 – opći konstrukcijski čelik i
- 1.4404 (316) – visokolegirani nehrđajući čelik.

Kemijski sastavi oba čelika prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastavi čelika [31], [32]

| Čelik | Kemijski element [%] | | | | | | | |
|---------------|----------------------|-------|--------|--------|--------|-----------|---------|-------|
| | C | Mn | P | S | Si | Cr | Mo | Ni |
| S355 | ≤ 0,23 | ≤ 1,6 | ≤ 0,05 | ≤ 0,05 | ≤ 0,05 | - | - | - |
| 1.4404 | ≤ 0,07 | ≤ 2,0 | ≤ 0,05 | ≤ 0,02 | ≤ 1,00 | 16,5–18,5 | 2,0–2,5 | 10–13 |

Norma EN ISO 15614-12 sadrži niz pravila i propisa za elektrootporno točkasto zavarivanje. U ovome je radu korištena norma EN ISO 14273:2001 za pripremu ispitnih uzoraka podobnih za razorno ispitivanje vlačnom silom na kidalici i norma ISO 14329:2003 za ispitivanje dimenzija zavarenog spoja (promjer točke i promjer zone utjecaja topline).

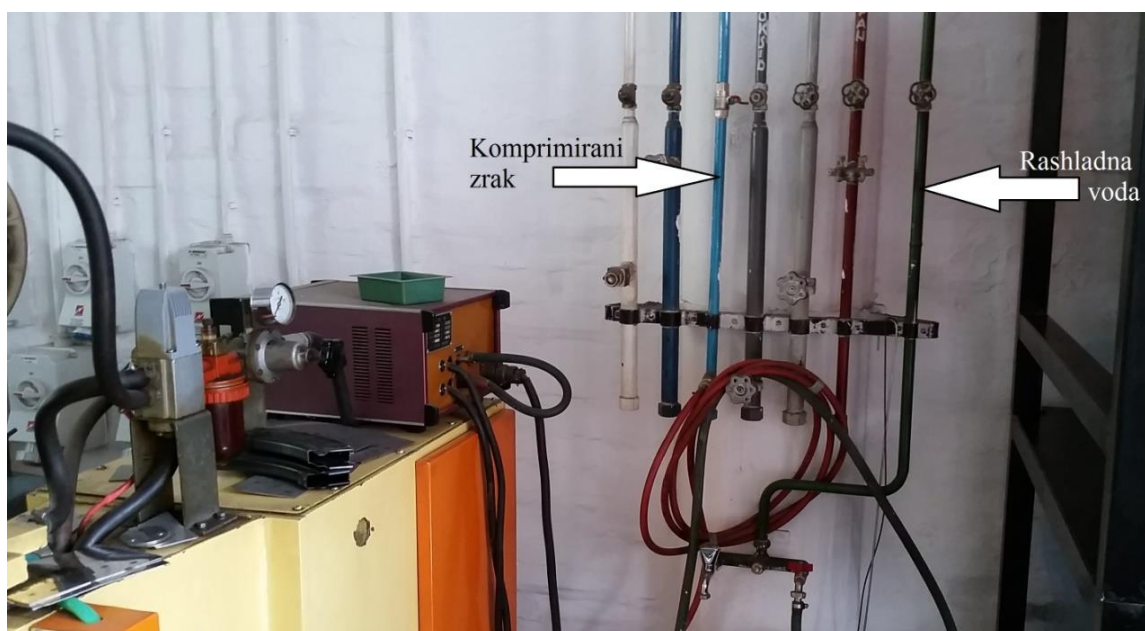
5.2. Opis stroja

Stroj za elektrootporno točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment, kineske je proizvodnje, tipa DZ-63, proizvođača „Chengdu Electric Welding Machine Works“. Sastoji se od: kućišta, okvira, gornje i donje konzole, pneumatskog transmisijskog mehanizma, sekundarnih vodiča, transformatora za zavarivanje, ispravljačkog sklopa, upravljačke kutije, nožne pedale, sustava zraka i rashladnog sustava [33]. Nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje, a prikazan je na slici 25.



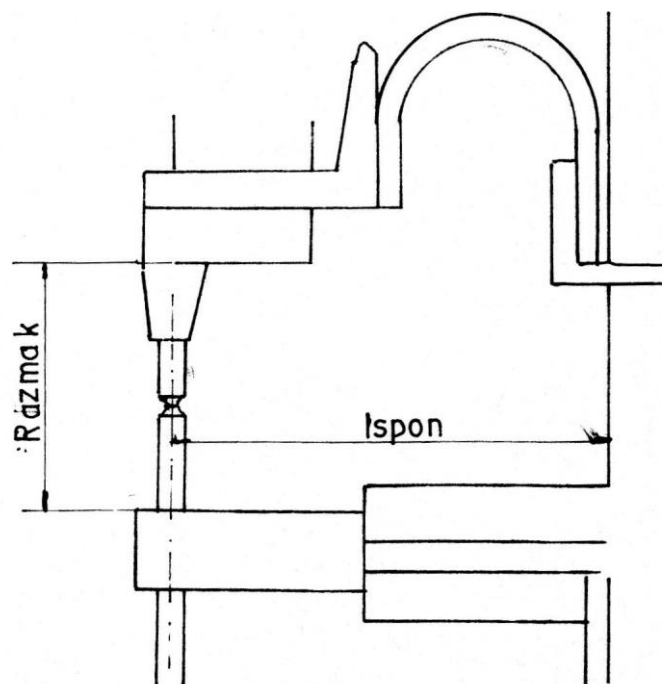
Slika 25. Stroj za elektrootporno točkasto zavarivanje na kojem je izveden eksperiment

Nominalna snaga stroja iznosi 63 kVA, a namijenjen je za elektrootporno točkasto zavarivanje s monofaznim priključkom na električnu mrežu 380 V (50 Hz) i istosmjernom strujom zavarivanja tako da se izmjenična struja na sekundarnoj strani transformatora pretvara u istosmjernu preko silicijskih dioda. Uz stroj, isporučen je i kontrolni ormarić tipa KD2-250 preko kojeg je stroj priključen na električnu mrežu, a preko cijevi i crijeva na komprimirani zrak i vodovodnu mrežu [33], što je prikazano slikom 26.



Slika 26. Priključak komprimiranog zraka i rashladne vode s uređajem

Vertikalna konzola koja nosi nosače elektroda je iz debelih limova međusobno zavarenih i strojno obrađenih s prednje strane. Donji i gornji nosač elektrode je zavarene izvedbe s minimumom lijevanih dijelova za provođenje struje zavarivanja. Gornji priključak elektrode, vezan na sekundarni izvod pomoću dilatatora, je iz bakrenih folija. Promjer tijela konične elektrode je 20 mm, a promjer vrha elektrode je 12 mm. Udaljenost kućišta od osi elektroda (ispon) iznosi 500 mm, a razmak između gornjeg nosača elektrode i paralelne plohe donjeg nosača elektrode je 295 mm, što je shematski prikazano na slici 27.



Slika 27. Shematski prikaz ispona i razmaka [33]

Bočne stranice zatvorene su vratima po cijeloj visini stroja, što omogućuje dobar pristup unutarnjim elementima (transformator, ispravljač, priključna ploča). Vrata se zatvaraju jednostavnom bravom bez ključeva što ponekada može predstavljati problem iz razloga sigurnosti (preferira se da svi elementi koji su pod visokim naponom budu pod ključem i nedostupni nekvalificiranim osobama).

Priključna ploča je vrlo jednostavne izvedbe. Oznake priključaka i vodiča su na papirićima smotanim oko kablova neposredno uz mjesto priključenja na pločici. Sa zadnje vanjske strane je priključak vode i zraka te sabirnica vode. Postoje četiri zasebna sustava hlađenja: krug za hlađenje transformatora, krug za hlađenje diodnog ispravljača, krug za hlađenje gornje elektrode te krug za hlađenje donje elektrode [33].

Sa stražnje strane stroja je i filtar za vodu (uobičajen kod korištenja komprimiranog zraka iz centralnih sustava kod kojih se često javlja kondenzacija vode). Na gornjoj strani stroja, slika 28, postavljeni su manometar u „MPa“ i nauljivač zraka, te elektromagnetski razvodnik za upuštanje i ispuštanje zraka iz cilindra.



Slika 28. Manometar, nauljivač i elektromagnetski razvodnik

Zbog sprječavanja zaostajanja vode u sustavu za hlađenje tijekom duljih prekida u zimskom periodu te posljedica koje mogu nastati zaleđivanjem vode u sustavu (lom tiristora, transformatora i slično), na rashladni je sistem spojen i zrak tako da se nakon prestanka rada ispuše voda iz sustava.

Napomena: potrebno je poštivati pravilo da se kod prekida rada prvo zatvara dovod vode, a onda dovod zraka, dok se kod puštanja u pogon prvo propušta zrak, a potom voda [33].

Na prednjoj strani kontrolnog ormarića KD2-250, slika 29, ugrađeni su svi potrebni elementi za regulaciju vremena i struje zavarivanja pomoću potenciometra.

Prekidača su tri:

- prvi za ukapčanje i iskapčanje programatora,
- drugi za pojedinačni ili automatski rad i
- treći za rad sa ili bez struje zavarivanja (kod podešavanja vrhova elektroda ili slično kada je potrebno probati bez struje zavarivanja).



Slika 29. Kontrolni ormarić tipa KD2-250

Iznad kodiranih sklopnika prikazan je shematiziran ciklus zavarivanja i postavljene su signalne LED diode s indikacijom pojedinog vremena. Blizu vrha kontrolnog ormarića nalaze se dvije žarulje koje označuju uključenost uređaja i signalizaciju eventualnog pregrijavanja [33].

Na kontrolnom ormariću podešavaju se 4 karakteristična vremena:

t_{pp} = vrijeme pretpritisaka – vrijeme od uključanja cilindra do početka protjecanja struje,

t_z = vrijeme zavarivanja – vrijeme prolaza struje zavarivanja,

t_a = vrijeme držanja – vrijeme nakon isključenja struje zavarivanja sve do prestanka djelovanja sila na elektrode,

t_s = vrijeme stanke – vrijeme između kraja jednog i početka drugog ciklusa u automatskom radu).

Upotrijebljeni su kodirani sklopnici, svi s mogućnošću podešavanja vremena od 1 do 99 perioda (0,02 do 1,98 sekundi) s podjelama po jedna perioda (1 per = 0,02 s).

Ovaj se stroj može upotrijebiti za zavarivanje konstrukcijskih čelika, čelika s prevlakom, nehrđajućih čelika, temperaturno otpornih legura, aluminija i njegovih legura, ali i za zavarivanje rijetkih metala kao što su titan, niobij, cirkonij, tantal i sl. Osobito je prilagodljiv za sljedeće industrije: zrakoplovstvo, nuklearna tehnika, radio industrija. DZ-63 može se uspješno upotrijebiti i za zavarivanje više čeličnih limova (4 pa i više) [33].

5.3. Tijek eksperimenta

U sljedećim je odlomcima detaljno opisan tijek eksperimenta po svim koracima.

5.3.1. Priprema ispitnih uzoraka

Limovi S355 i 1.4404 čelika, debljine 3 mm, izrezani su na sljedeće dimenzije:

- dužina uzorka: 140 mm,
- širina uzorka: 50 mm.

Preklop zavarenog spoja iznosi 45 mm. Nakon rezanja, oštri rubovi obrušeni su brusilicom. Neposredno prije samog postupka zavarivanja, uzorci su površinski očišćeni acetonom u svrhu skidanja prljavštine i masnoće.

5.3.2. Određivanje parametara zavarivanja

Prije samog postupka zavarivanja na stroju je potrebno podesiti parametre zavarivanja.

U ovom su eksperimentu kombinirana tri parametra, a to su:

- vrijeme zavarivanja (t_z),
- struja zavarivanja (I_z) i
- sila na elektroda (F_e).

5.3.2.1. Vrijeme zavarivanja

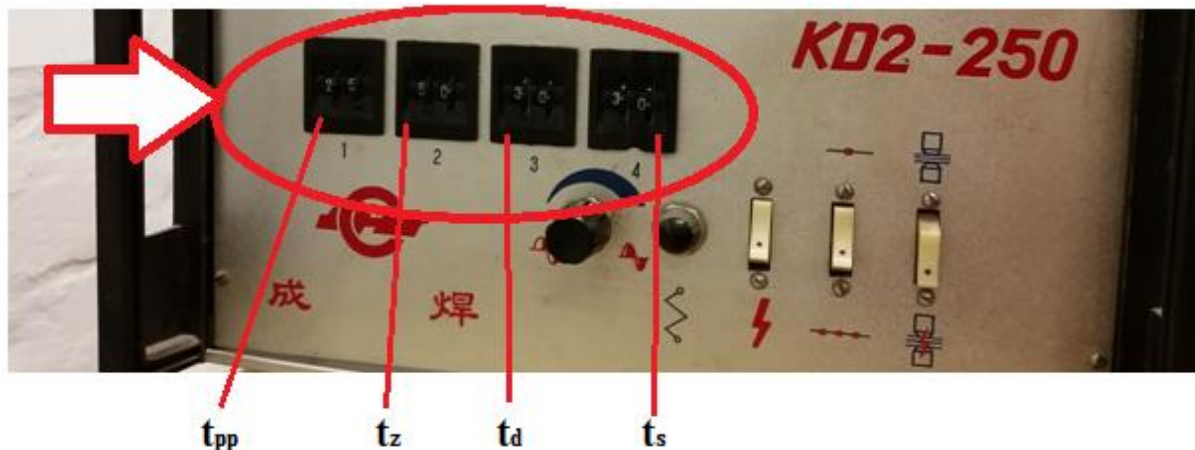
U eksperimentu su kombinirana dva vremena označena s " t_A ," i " t_B ,".

Vrijeme t_A iznosi 50 perioda (1,0 sekunda), a vrijeme t_B iznosi 99 perioda (1,98 sekundi).

Ostale tri komponente vremena bile su nepromijenjene tijekom cijelog eksperimenta, a njihov iznos je:

- $t_{pp} = 25$ per (0,5 sekundi) - vrijeme pretpritiska,
- $t_d = 30$ per (0,6 sekundi) - vrijeme držanja,
- $t_s = 10$ per (0,2 sekunde) - vrijeme stanke.

Navedena vremena namještaju se na kontrolnom ormariću, slika 30, tako da regulator vremena broj 1 označava vrijeme pretpritiska, broj 2 vrijeme zavarivanja (vrijeme tečenja električne struje), broj 3 vrijeme držanja (kad ne teče električna struja) i broj 4 vrijeme stanke između dva ciklusa pri automatskom načinu rada.



Slika 30. Regulacija vremena

5.3.2.2. Jakost struje zavarivanja

Kombinirane su dvije jakosti struje zavarivanja označene s „ I_A “ i „ I_B “:

Struja I_A iznosi 7,5 kA (50% od maksimalne vrijednosti jakosti struje na stroju za poziciju 2-2-1 noževa primara), a struja I_B 15 kA. Jakost struje se regulira pomoću potenciometra smještenog na kontrolnom ormariću prikazanog slikom 31.

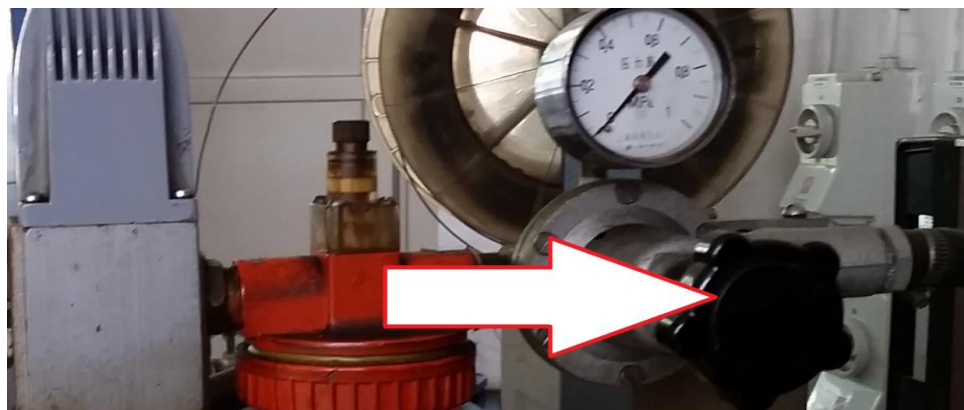


Slika 31. Regulacija jakosti struje zavarivanja

5.3.2.3. Sila na elektrode

Kombinirane su dvije sile na elektrode označene s „ F_{eA} “ i „ F_{eB} “:

Sila F_{eA} iznosi 3,4 kN što odgovara tlaku od 0,2 MPa, a sila F_{eB} iznosi 6,8 kN što odgovara 0,4 MPa. Sila, odnosno pritisak se regulira pomoću ventila (slika 32) iznad kojeg je manometar s brojevnom skalom u „MPa“.



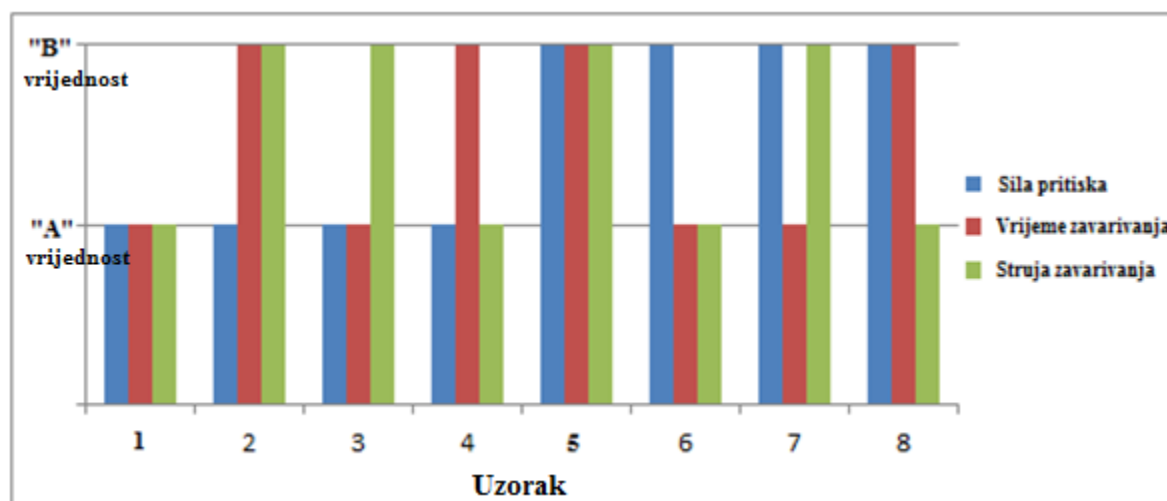
Slika 32. Regulacija sile na elektrode

5.3.3. Parametri za svaki pojedini uzorak

Ekspiriment je proveden na 8 ispitnih uzoraka (16 limova), a iznos parametara koji su mijenjani prikazan je u tablici 7. Iz tablice 7 i slike 33 je vidljivo da su za uzorak broj 1 sva tri mijenjana parametra niže vrijednosti, a za uzorak broj 5 više vrijednosti.

Tablica 7. Iznos parametara zavarivanja po uzorcima

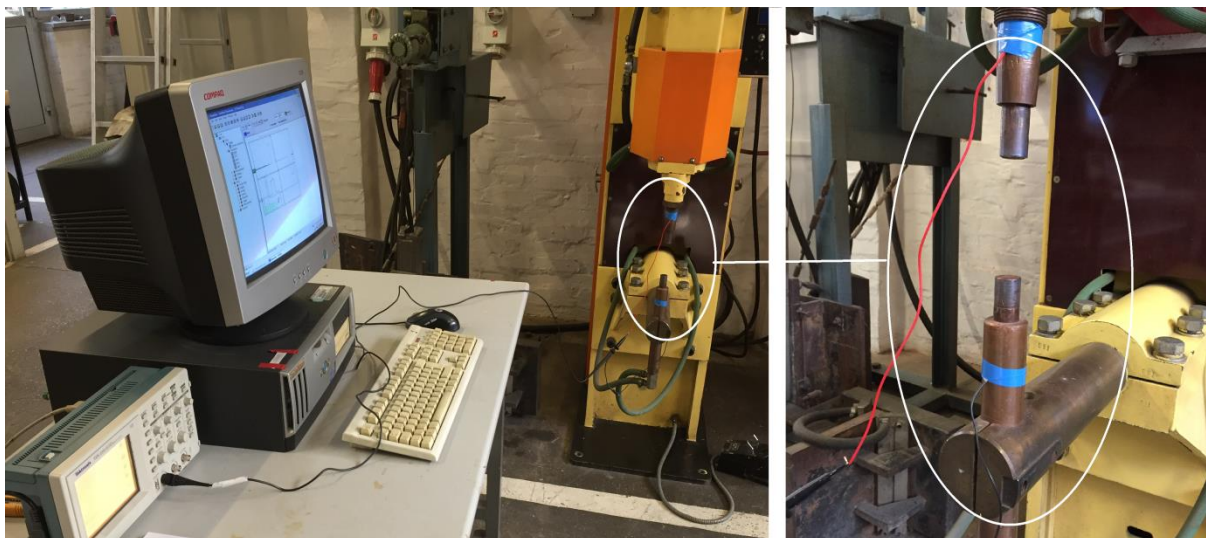
| Uzorak br. | Sila ne elektrode, F_e [kN] | Vrijeme zavarivanja, t_z [s] | Jakost struje, I_z [kA] |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1 | 3,4 | 1,0 | 7,5 |
| 2 | 3,4 | 1,98 | 15 |
| 3 | 3,4 | 1,0 | 15 |
| 4 | 3,4 | 1,98 | 7,5 |
| 5 | 6,8 | 1,98 | 15 |
| 6 | 6,8 | 1,0 | 7,5 |
| 7 | 6,8 | 1,0 | 15 |
| 8 | 6,8 | 1,98 | 7,5 |



Slika 33. Omjeri mijenjanih parametara zavarivanja po uzorcima

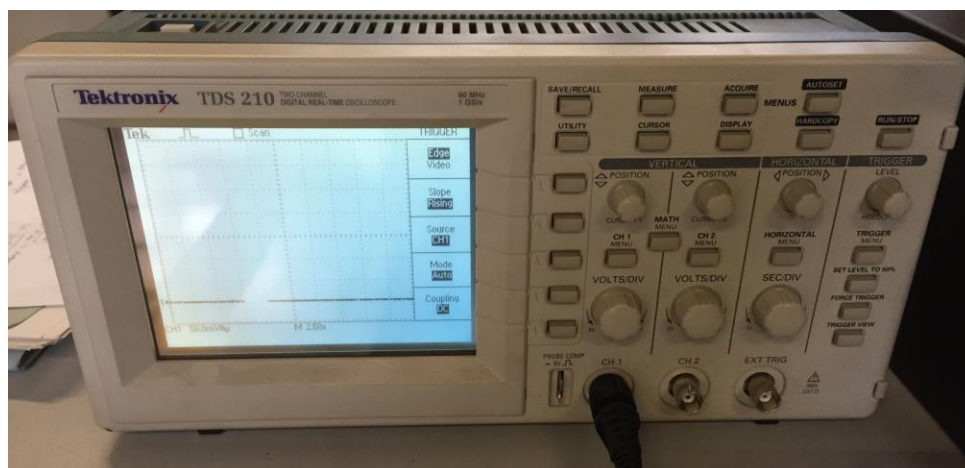
5.3.4. Analiza dinamičke karakteristike

Na slici 34 je vidljiv dio uređaja za zavarivanje, žice koje povezuju elektrode s osciloskopom koji mjeri dinamičku karakteristiku te računalo koje obrađuje sve važne podatke (oscilogram). Podaci dobiveni osciloskopom su prikazani i obrađeni pomoću programske aplikacije Wavestar.



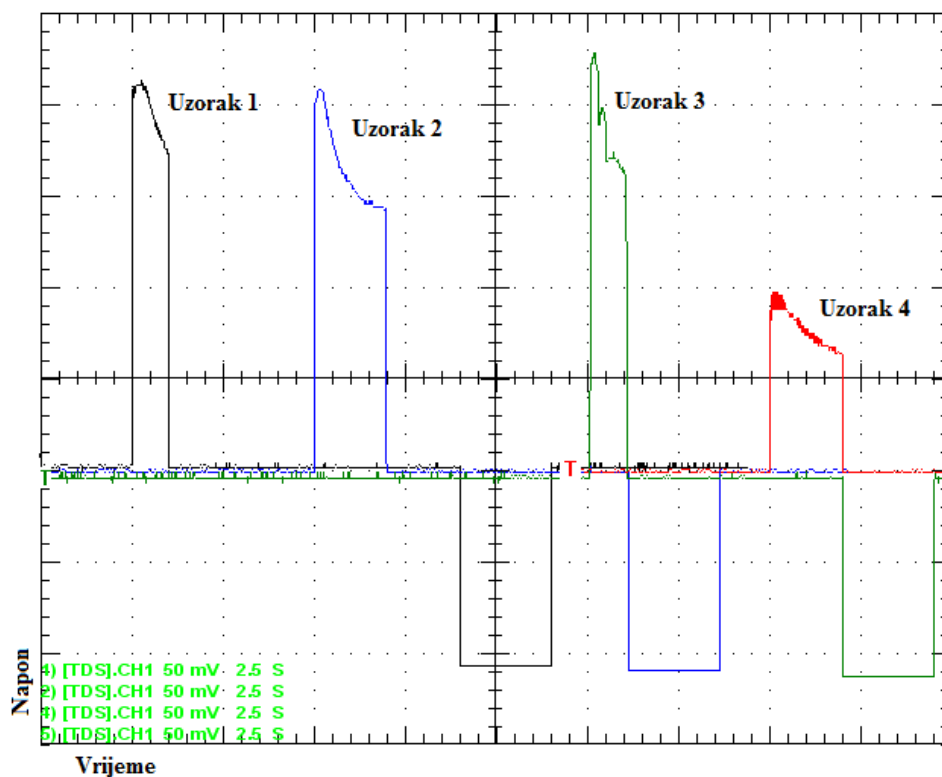
Slika 34. Oprema za snimanje dinamičke karakteristike

Slika 35 prikazuje osciloskop kojim su snimane dinamičke karakteristike napona i struje u eksperimentalnom dijelu rada. Radi se o dvokanalnom Tektronix TDS 210 osciloskopu. Ovaj osciloskop nudi veliko frekvencijsko područje, automatizaciju mjernih značajki i jednostavnost korištenja. Dva ulazna kanala su kontrolirana svaki zasebno pomoću potencijometara i prekidača [34].

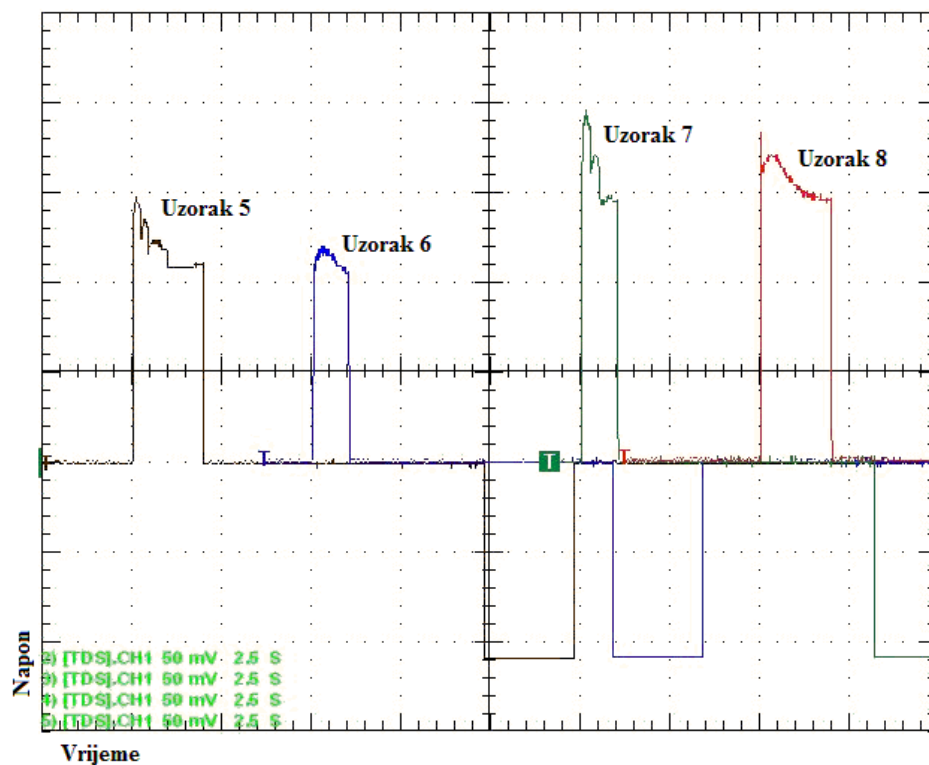


Slika 35. Osciloskop Tetronix TDS 210

Na slikama 36 i 37 prikazani su oscilogrami dinamičkih karakteristika svih uzoraka. Na osi apscisa je vrijeme zavarivanja, a na ordinati napon.



Slika 36. Dinamička karakteristika uzoraka 1-4



Slika 37. Dinamička karakteristika uzoraka 5-8

Iz prikazanih oscilograma na slici evidentan je pad napona zbog pada kontaktnog otpora između dvaju limova.

$$\text{Ohmov zakon: } I = \frac{U}{R} \leftrightarrow U = I \cdot R \quad (3)$$

Uslijed sile na elektrode i zagrijavanja smanjuju se površinske neravnine i time se kontaktna površina između dvaju limova povećava što uz konstantnu struju zavarivanja uzrokuje pad napona.

Iz oscilograma je isto tako vidljivo da su uzorci 1, 3, 6 i 7 zavarivani s duplo kraćim vremenom od uzoraka 2, 4, 5 i 8 što ukazuje da uređaj za zavarivanje radi korektno, prema unaprijed zadanim parametrima.

5.3.5. Zavarivanje

Na slici 38 prikazan je način elektrootpornog točkastog zavarivanja svih ispitnih uzoraka na stroju DZ-63. Gornja elektroda je zaobljena i određeno je da tijekom izrade ovog eksperimenta bude za sve uzorke u kontaktu s nelegiranim čelikom, dok je donja elektroda ravna i u kontaktu s visokolegiranim čelikom.



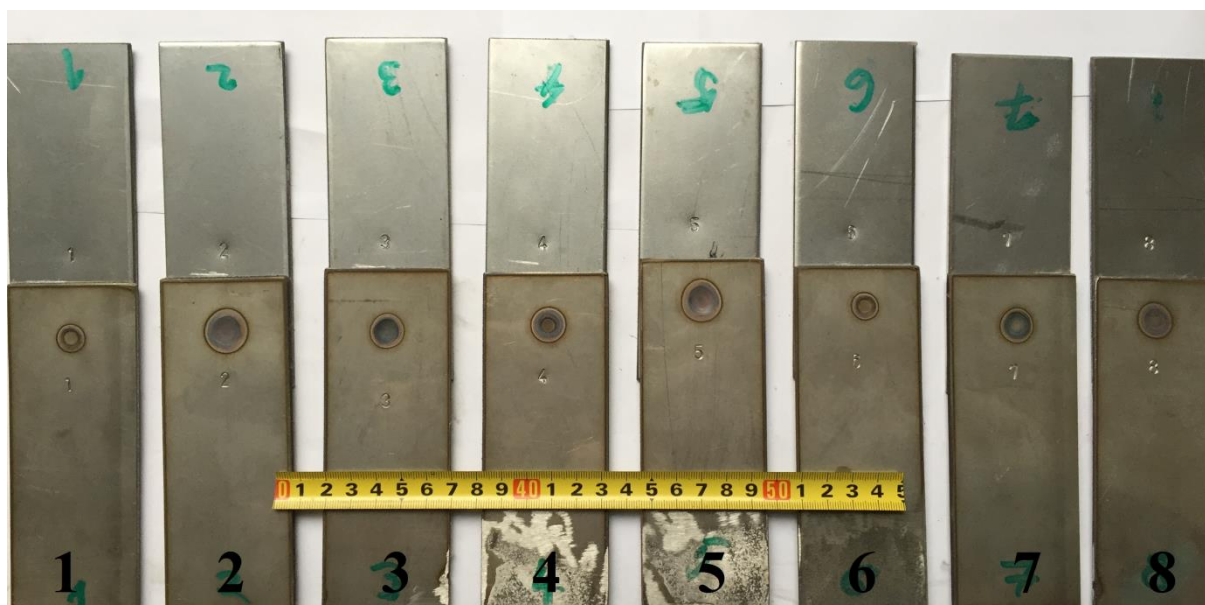
Slika 38. Pozicioniranje uzorka prije zavarivanja na stroju DZ-63

5.3.6. Izgled zavarenih uzoraka i vizualna analiza

Na slikama 39 i 40 prikazani su zavareni limovi. Slika 39 prikazuje točke zavara u dodiru radnog komada i gornje elektrode (lice), a slika 40 točke zavara u dodiru donje elektrode i radnog komada (naličje).

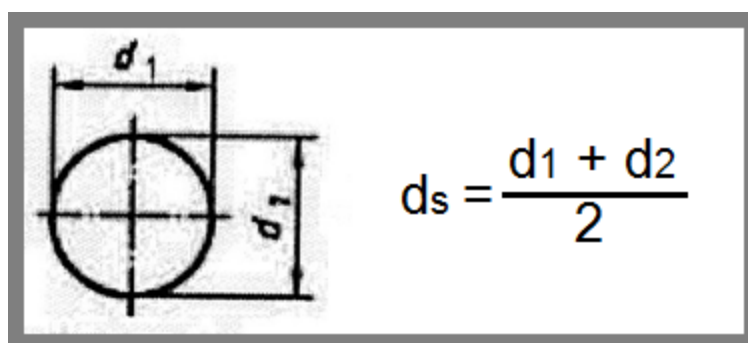


Slika 39. Lice zavarene točke (kontakt: radni komad – gornja elektroda)



Slika 40. Naličje zavarene točke (kontakt: radni komad – donja elektroda)

Zavareni spojevi su izmjereni pomoću *ImageJ* računalnog programa i to sa strane naličja (kontakt: radni komad – donja elektroda) iz razloga jer se s te strane jasno vide rubovi zavarene točke i zone utjecaja topline. Promjeri točke zavara i promjeri zone utjecaja topline izmjereni su po pravilima koje propisuje norma ISO 14329 : 2003.. Na slici 41 kvalitativno je prikazano pravilo mjerenja promjera točki. Zbrajanjem dvaju promjera i njihovim dijeljenjem na pola, dobivena je aritmetička sredina (srednja vrijednost) označena s d_s za promjer zavarene točke, a d_{ZUT_S} za promjer zone utjecaja topline. Sve vrijednosti prikazane su u tablici 8.



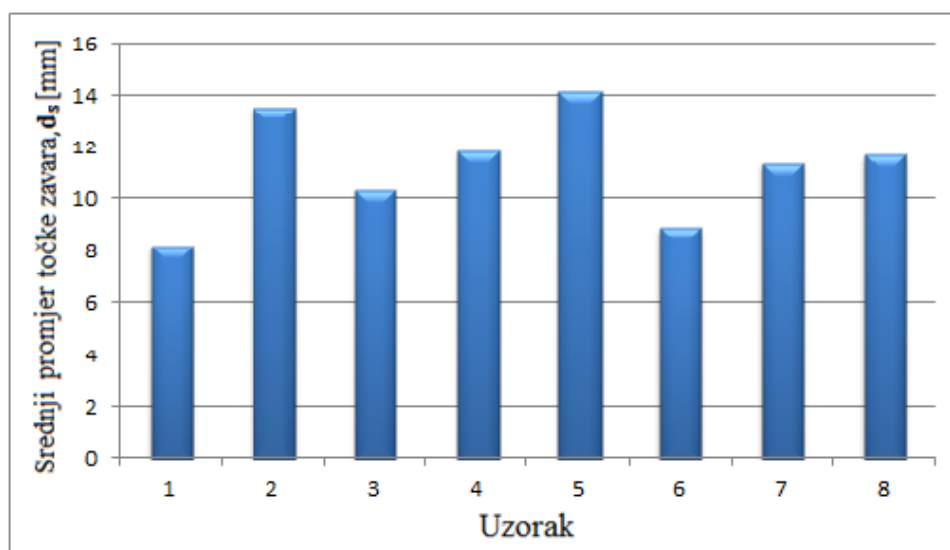
Slika 41. Promjeri i srednja vrijednost promjera [35]

Tablica 8. Promjeri točke zavara i zone utjecaja topline (ZUT)

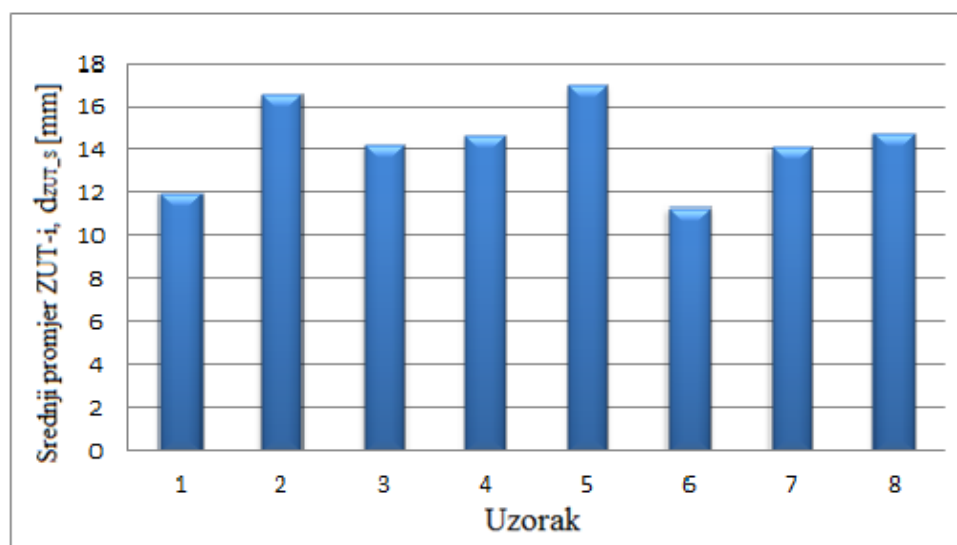
| Uzorak | d_1 | d_2 | d_s | d_{ZUT_1} | d_{ZUT_2} | d_{ZUT_S} |
|--------|--------|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 8,431 | 7,943 | 8,187 | 12,065 | 11,866 | 11,966 |
| 2 | 13,385 | 13,823 | 13,604 | 16,325 | 16,832 | 16,579 |
| 3 | 10,294 | 10,392 | 10,343 | 14,021 | 14,509 | 14,265 |
| 4 | 11,962 | 11,768 | 11,865 | 14,805 | 14,607 | 14,706 |
| 5 | 14,120 | 14,271 | 14,196 | 16,975 | 17,047 | 17,011 |
| 6 | 8,825 | 8,990 | 8,908 | 11,177 | 11,479 | 11,328 |
| 7 | 11,029 | 11,765 | 11,397 | 13,677 | 14,585 | 14,131 |
| 8 | 11,617 | 11,765 | 11,691 | 14,558 | 15,002 | 14,780 |

Napomena: sve vrijednosti promjera su u milimetrima [mm].

Analizom podataka iz tablice 7 u kojoj su navedeni iznosi parametara i tablice 8 u kojoj su navedeni promjeri točke zavora i ZUT-a dolazi se do zaključka da vrijeme zavarivanja ima najveći utjecaj na veličinu točke zavora kao i zone utjecaja topline (ZUT). Vrijeme zavarivanja kod uzoraka 2, 4, 5 i 8 bilo je za 50% duže nego kod ostalih uzoraka, a upravo navedeni uzorci imaju veće promjere točke zavora kao i veće promjere ZUT-a. Duže vrijeme zavarivanja u kombinaciji s jačom strujom zavarivanja, što je slučaj kod uzoraka 2 i 5, stvara veću točku zavora, odnosno promjer ZUT-a. Sila na elektrode u ovoj je analizi imala zanemariv utjecaj na veličine promjera. Grafikon svih srednjih promjera točki zavora prikazan je na slici 42, a na slici 43 prikazan je grafikon srednjih promjera ZUT-a.



Slika 42. Prikaz srednjih promjera točke zavora



Slika 43. Prikaz srednjih promjera ZUT-a

5.3.7. Razorno ispitivanje na kidalici

U Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, vlačnim rastezanjem na kidalici EU40MOD, prikazanoj na slici 44, ispitivani su svi uzorci.



Slika 44. Kidalica EU40MOD

Oprema za ispitivanje mehaničkih svojstava sastoji se od uređaja za nametanje opterećenja, uređaja za mjerenje sile, uređaja za mjerenje deformacije i računala za prikaz rezultata ispitivanja (numerički i grafički). Dijagrami ispitivanja za svaki uzorak priloženi su na kraju ovog diplomskog rada.

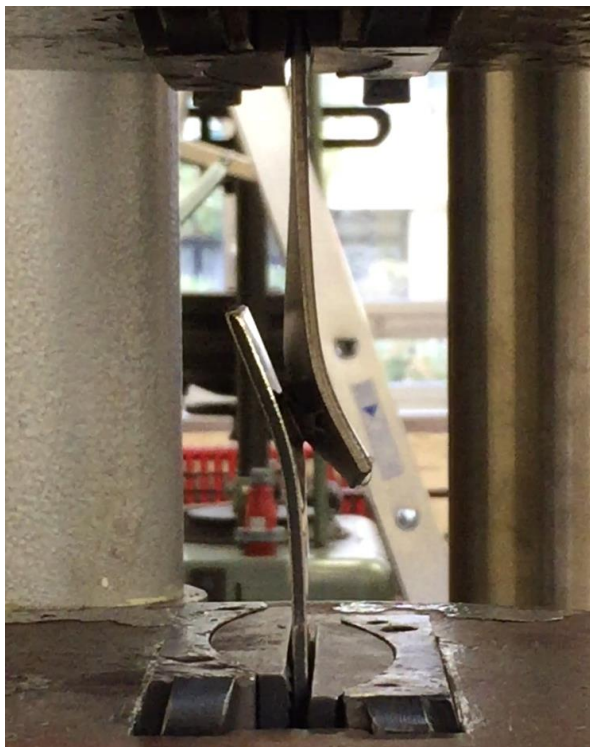
5.3.7.1. Tijek ispitivanja na kidalici

Svaki od uzoraka čvrsto je stegnut u čeljusti kidalice, slika 45, nakon čega se pomoću računalnog programa prati maksimalna sila, odnosno vlačna čvrstoća. Brzina prirasta opterećenja tijekom razornog ispitivanja na kidalici jednaka je za sve uzorke i iznosi 8 mm/min. Računalni program snima dijagram iz kojeg se mogu očitati traženi podaci.



Slika 45. Uzorak stegnut u čeljusti kidalice

Na slici 46 prikazan je uzorak stegnut u čeljusti kidalice neposredno prije loma tj. kada se dva lima potpuno razdvoje uslijed vlačne sile.



Slika 46. Ispitni uzorak neposredno prije loma

5.3.7.2. Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja na kidalici

Slika 47 prikazuje ispitne uzorke nakon ispitivanja na kidalici, odnosno nakon razdvajanja limova.



Slika 47. Uzorci nakon ispitivanja na kidalici

Iz slike je vidljivo da su uzorci 2, 3, 5 i 7 pretrpjeli najveću destrukciju, to jest njihov je zavar toliko izdržljiv na vlačno opterećenje da je mjesto zavara ostalo neslomljeno za razliku od osnovnog materijala koji nije izdržao vlačnu silu.

Radni komad se slomio na mjestu nelegiranog (S355) čelika čija je vlačna čvrstoća ($470 \text{ N/mm}^2 \dots 630 \text{ N/mm}^2$) niža od vlačne čvrstoće visokolegiranog (316) čelika ($530 \text{ N/mm}^2 \dots 730 \text{ N/mm}^2$) [36], [37].

Sva četiri gore navedena uzorka koja su izdržala najveća naprezanja zavarena su sa strujom jakosti 15 kA.

5.3.7.3. Rezultati ispitivanja na kidalici

U tablici 9 poredani su uzorci od najveće maksimalne vlačne sile (F_M) prema najmanjoj te su prikazani parametri za svaki pojedini uzorak.

Maksimalna vlačna sila je krajnja sila koju ispitni uzorak može izdržati, a da ne dođe do loma.

Analiziranjem rezultata ispitivanja iz tablice 9, zaključuje se da je jakost struje imala najveći utjecaj na iznos maksimalne vlačne sile, odnosno uzorci zavareni jačom strujom podnijeli su veću vlačnu silu.

Tablica 9. Poredak uzoraka od veće vlačne sile prema manjoj

| Maksimalna vlačna sila F_M [kN] | Broj uzorka | Par uzorka | PARAMETRI ZAVARIVANJA | | |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| | | | Sila na elektrode F_e [kN] | Jakost struje zavarivanja I_z [kA] | Vrijeme zavarivanja t_z [s] |
| 35,634 | 2 | A | 3,4 | 15 | 1,98 |
| 34,648 | 5 | | 6,8 | 15 | 1,98 |
| 32,978 | 3 | B | 3,4 | 15 | 1 |
| 32,130 | 7 | | 6,8 | 15 | 1 |
| 27,211 | 4 | C | 3,4 | 7,5 | 1,98 |
| 26,168 | 8 | | 6,8 | 7,5 | 1,98 |
| 23,983 | 1 | D | 3,4 | 7,5 | 1 |
| 23,644 | 6 | | 6,8 | 7,5 | 1 |

Iz tablice 9 je vidljivo da su uzorci 2 i 5 (takozvani „par A“) zavareni jednakom strujom (15 kA) u jednakom vremenu (1,98 s), odnosno jedino je sila na elektrode (3,4 kN i 6,8 kN) različita. Isto vrijedi i za ostale parove uzoraka, pa tako uzorci 3 i 7 („par B“), 4 i 8 („par C“) te 1 i 6 („par D“) imaju iste kombinacije iznosa jakosti struja zavarivanja i vremena zavarivanja, a iz rezultata maksimalnih vlačnih sila zaključuje se da je veća sila na elektrode negativno utjecala na iznos maksimalne vlačne sile, odnosno onaj par uzorka na koji je djelovala manja sila na elektrode izdržao je veću maksimalnu vlačnu silu i obrnuto – uzorak, tj. par uzorka na koji je djelovala veća sila na elektrode izdržao je manju vlačnu silu.

5.3.8. Ponavljanje zavarivanja uzorka s najvećom vlačnom silom

Uzorak broj 2 pokazao se najizdržljivijim na vlačno opterećenje jer je izdržao najveću maksimalnu vlačnu silu. Njegovi parametri su sljedeći:

- sila na elektrode: 3,4 kN,
- jakost struje zavarivanja: 15 kA,
- vrijeme zavarivanja: 1,98 s.

5.3.8.1. Makroanaliza uzorka br. 2

Makroanaliza uzorka je kontrola razaranjem kojom su na makro razini vidljive karakteristike zavora kao što su: dubina penetracije, linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala, veličina zone utjecaja topline, broj prolaza, veličina i raspodjela uključaka, poroznost te ostale greške koje se pojavljuju u zavarenim spojevima. Za potrebe makroanalize potrebno je provesti kvalitetnu obradu uzorka. Nakon ponavljanja zavarivanja uzorka br. 2 uslijedilo je poprečno rezanje po sredini točke zavora. Nakon rezanja uzorak je najprije brušen na rotirajućoj brusilici, a zatim ručno s tri različite granulacije brusnog papira. Najprije s granulacijom 180, zatim 320 i na kraju s granulacijom 500. Poslije brušenja, u svrhu bolje vidljivosti strukture zavora, uzorak je u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, nagrizan u kromovoj kiselini sastava:

- **10 g CrO₃ u 100 ml H₂O.**

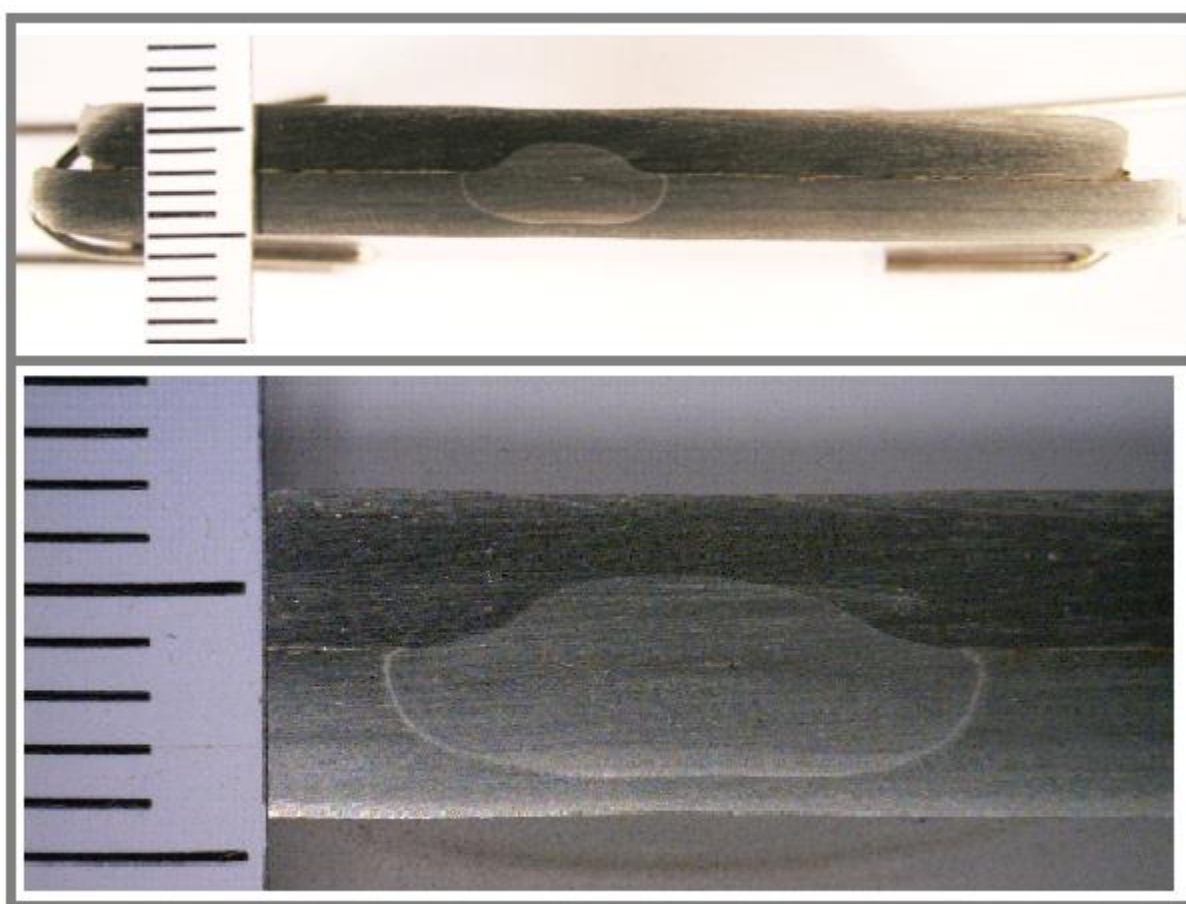
Nagrizanje je trajalo 15 sekundi pri struji 8 A i naponu 6 V. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje sastoji se od jedinice za podešavanje napona i struje te aluminijskog spremnika s elektrolitom, a prikazana je na slici 48.



Slika 48. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje

Nakon nagrizanja je vidljiva makrostruktura ispitnog uzorka (slika 49).

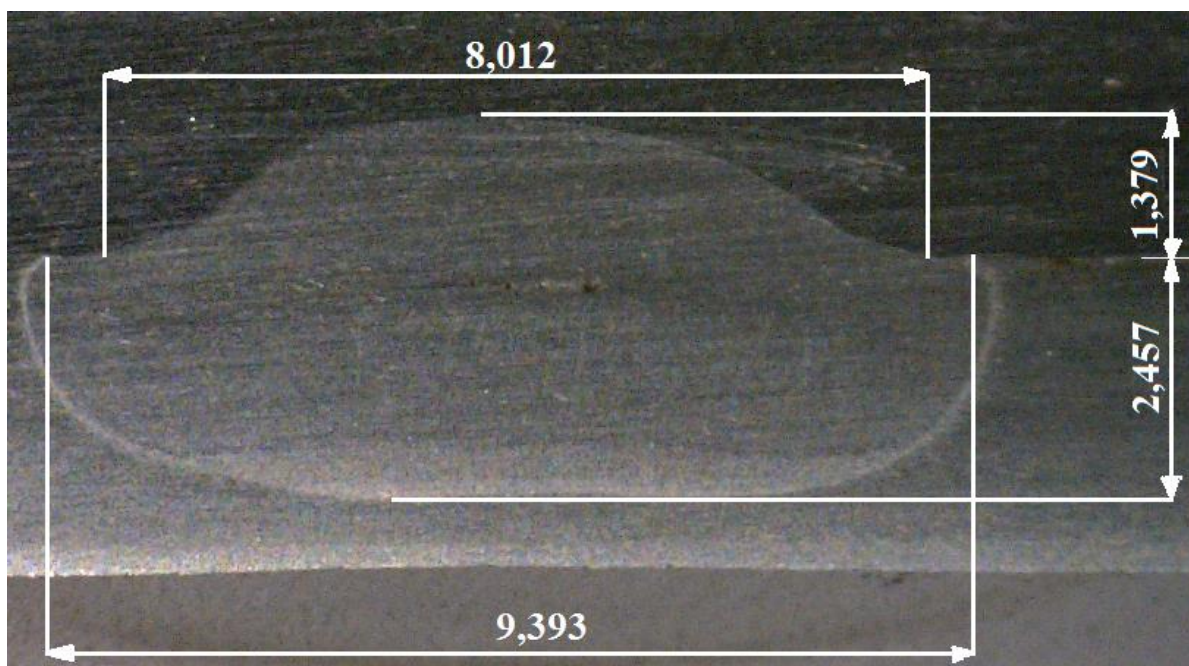
Iz slike je uočljivo da je poprečni presjek točke zavora zvonolikog oblika iz razloga jer se gornji materijal (nelegirani čelik „S355“) manje rastopio jer ima veću toplinsku provodljivost (25 W/mK) i manji specifični otpor ($0,55 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) od donjeg materijala (visokolegirani čelik „316“) čija je toplinska provodljivost iznosi 15 W/mK, a specifični otpor $0,75 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ [38], [39]. Zbog razlike u specifičnom otporu i toplinskoj provodljivosti ovih dvaju raznorodnih materijala dobije se nesimetričan oblik točke zavora.



Slika 49. Makrostruktura zavora

Iz slike 49 još je vidljivo da nije došlo do pojave naljeppljivanja, odnosno postoji čvrsta strukturalna veza u metalu zavora što znači da je izvršena pravilna priprema spoja uz odabrane ispravne parametre zavarivanja.

Pomoću *ImageJ* programa izmjerene su dimenzije metala zavara (promjer točke dodira, dubina penetracije). Dimenzije su prikazane na slici 50.



Slika 50. Dimenzije metala zavara

Iz slike 50 je vidljivo da je dubina penetracije veća u visokolegiranom čeliku (2,457 mm) u odnosu na nelegirani čelik (1,379 mm) zbog razlike u specifičnom otporu i toplinskoj provodljivosti ovih dvaju raznorodnih materijala.

Za računanje vlačne čvrstoće korišten je manji izmjereni promjer (8,012 mm) koji je za 5,592 mm manji od srednjeg promjera točke zavara (13,604 mm) mjenog na površini uzorka

Na temelju podataka o maksimalnoj vlačnoj sili izmjerenoj na kidalici i promjeru točke dodira između dva metala, može se izračunati vlačna čvrstoća (oznaka: R_m ili σ_m) koja je omjer sile (F_M) i površine (A) okomite na smjer djelovanja sile. Vlačna čvrstoća je uz granicu razvlačenja osnovno mehaničko svojstvo materijala na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti na naprezanje.

$$R_m = \frac{F_M}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

Površina kružnog presjeka računa se prema izrazu:

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

pri čemu je:

- d = promjer točke dodira između dva zavarena lima [mm],
- $\pi \approx 3,14159$.

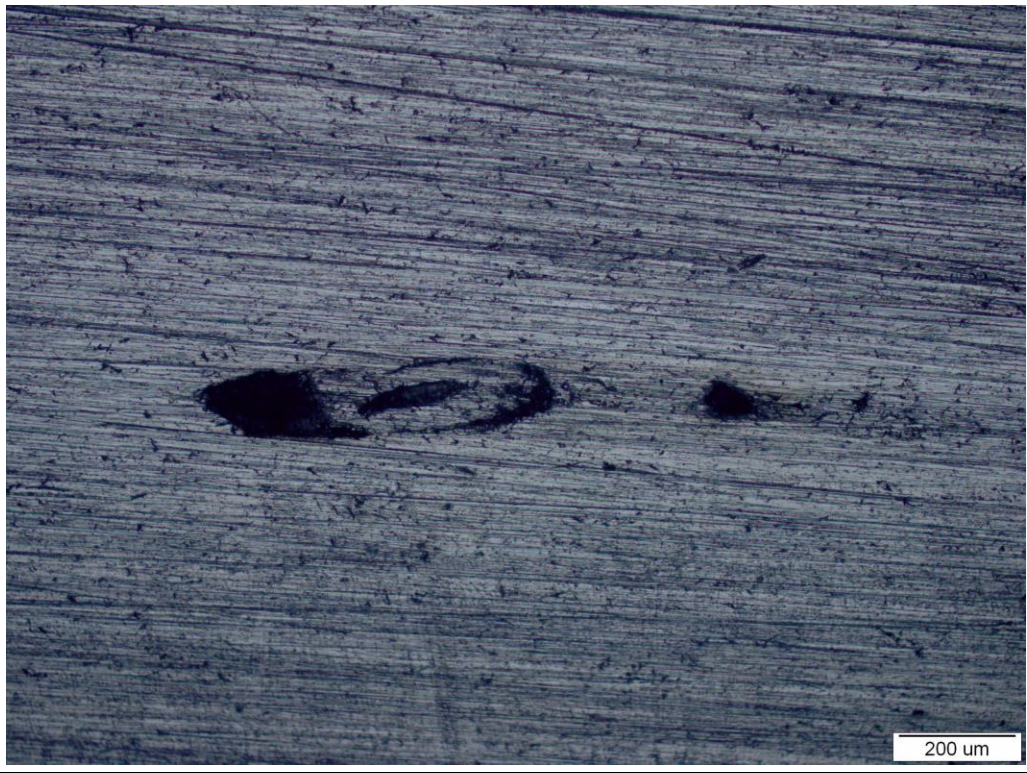
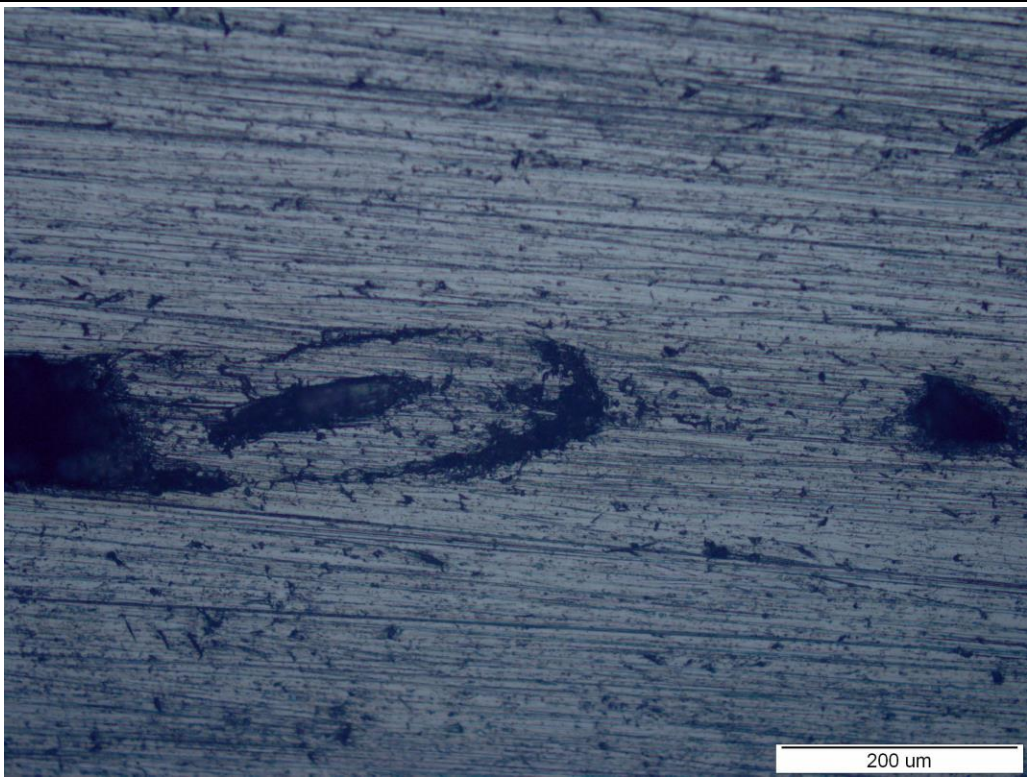
Uvrštavanjem potrebnih podataka o maksimalnoj vlačnoj sili i površine kružnog presjeka u izraz (3), dobije se:

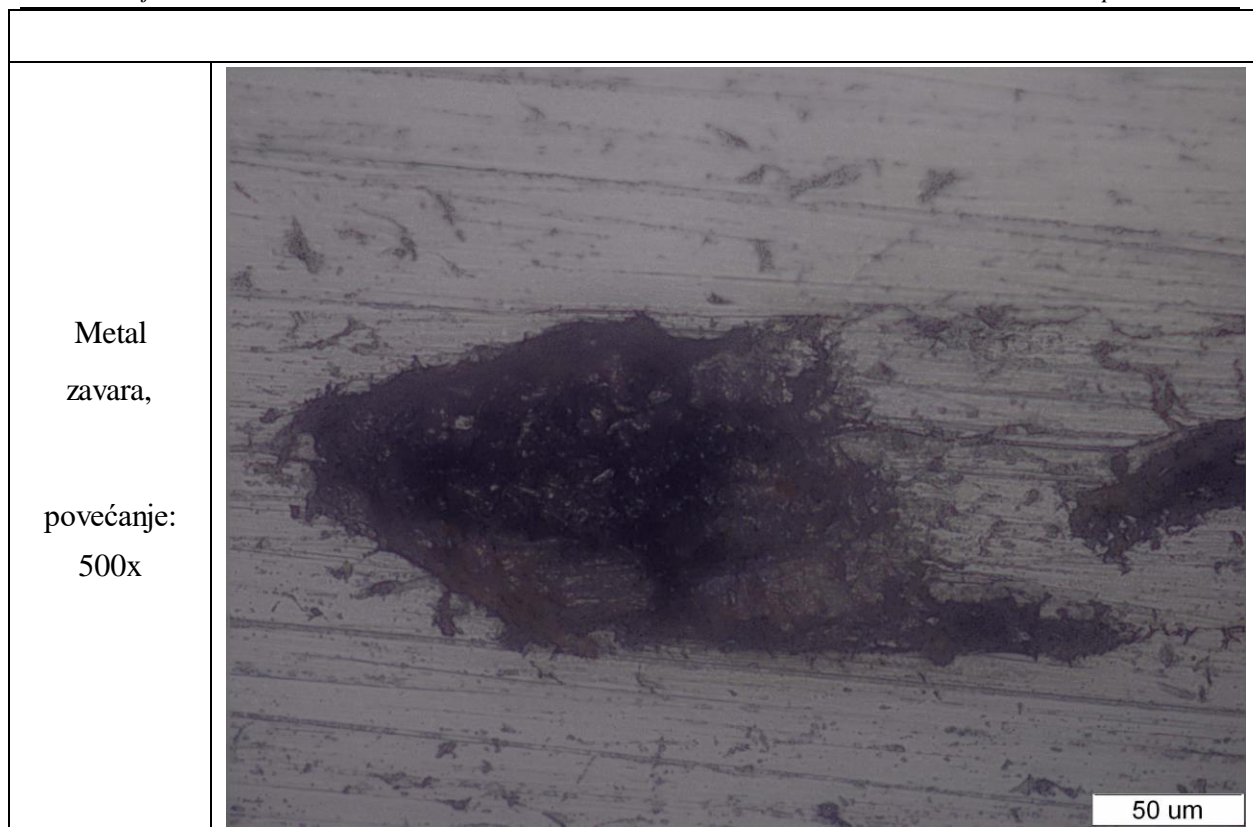
$$R_m = \frac{35,634 \cdot 10^3}{\frac{8,012^2 \cdot \pi}{4}} \approx 707 \text{ N/mm}^2$$

Vlačna čvrstoća uzorka br. 2 iznosi 707 N/mm², što se razlikuje od vlačnih čvrstoća osnovnog materijala i zato nije došlo do loma u metalu zavara, nego u osnovnom, manje izdržljivom materijalu na vlačno opterećenje, u ovom slučaju – nelegiranom (S355) čeliku. Vlačna čvrstoća nelegiranog čelika kreće se u rasponu 470 N/mm²...630 N/mm², a visokolegiranog čelika 530 N/mm²...730 N/mm² [36], [37].

U svrhu dobivanja što boljeg uvida u strukturu metala zavara na mjestu nepravilnosti, a time i donošenja ispravnog zaključka, provedeno je povećanje slike. Slike metala zavara za tri iznosa povećanja (100x, 200x i 500x) prikazane su u tablici 10.

Tablica 10. Povećanje slike na mjestu nepravilnosti u metalu zavara

| | |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Metal zavara, povećanje: 100x</p> |  |
| <p>Metal zavara, povećanje: 200x</p> |  |



Analizom povećanih slika zaključuje se da je u metalu zavara prisutna nečistoća koja hlađenjem zavarenog spoja pri toplinskom naprezanju može uzrokovati pojavu tzv. toplih pukotina.

Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju i u pravilu nisu dopuštene zbog tendencije propagacije kao i vrlo složene mogućnosti predviđanja širenja koja ovisi o svojstvu pukotinske žilavosti. Pukotine su posebno opasne ako su položene poprijeko u odnosu na smjer naprezanja što dovodi do smanjenja nosivog presjeka zavarenog spoja, a time i smanjenja čvrstoće. Mehanizam nastanka pukotina raznovrstan je i u određenim situacijama vrlo složen, tako da je njihovo proučavanje danas od primarnog interesa u znanstveno-istraživačkoj zajednici. Tople pukotine kod zavarivanja nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zavara, ali moguće su i u zoni utjecaja topline. Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava toplih pukotina posebno je povezana s nečistoćama u materijalu, ali i legiranjem, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žlijeba i nepravilnim izborom dodatnog materijala [2].

6. ZAKLJUČAK

Elektrootporno točkasto zavarivanje jedan je od najbolje automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja i kao takvo je zbog svoje učinkovitosti i brzine zavarivanja vrlo pogodno u uvjetima masovne proizvodnje. Najčešće se primjenjuje u automobilskoj, zrakoplovnoj i industriji tračničkih vozila.

Tri osnovna parametra koja utječu na kvalitetu zavarenog spoja su jačina struje zavarivanja, sila na elektrode i vrijeme zavarivanja. Ovi parametri moraju biti vrlo precizno kvantificirani da bi kvaliteta spoja bila što bolja. Promjenom bilo kojeg od parametara dobije se drugačija geometrija zavarene točke, a time i mehanička svojstva zavarenog komada.

U eksperimentu se dolazi do zaključka da je za ispitivane uzorke od nelegiranog i visokolegiranog čelika jakost struje zavarivanja najviše utjecala na svojstva zavara. Na sva 4 uzorka koja su zavarena većom strujom dobivena su bolja mehanička svojstva. Ne treba se strogo držati jakosti struje i povećavati je bez razloga misleći da je ona najvažniji parametar u svakoj situaciji i u bilo kojem radnom uvjetu ili za bilo koji materijal. Da bi se ostvario kvalitetan zavar potrebno je voditi računa i o vremenu zavarivanja koje i jest najčešća upravljiva varijabla, pošto je jačina struje često ekonomski nepraktična za kontrolu, ali i nepredvidiva. Što se tiče sile na elektrode, važno je osigurati dovoljnu silu jer će se u suprotnom pojaviti nepoželjna pojava, tzv. istiskivanje koje s uočava na početku procesa pri relativno brzom zagrijavanju i nedovoljnoj sili na elektrode, ali i na kraju procesa uslijed prekomjernog zagrijavanja. U eksperimentu su dobivena bolja mehanička svojstva zavarenog spoja u slučaju korištenja slabije sile na elektrode. Makroanalizom metala zavara uočena je nepravilnost koja se ispostavila kao nečistoća, dok naljepljivanja nije bilo. Zbog razlika u specifičnom otporu i toplinskoj provodljivosti zavarivanih raznorodnih materijala dobiven je zvonolik oblik poprečnog presjeka zavara.

7. LITERATURA

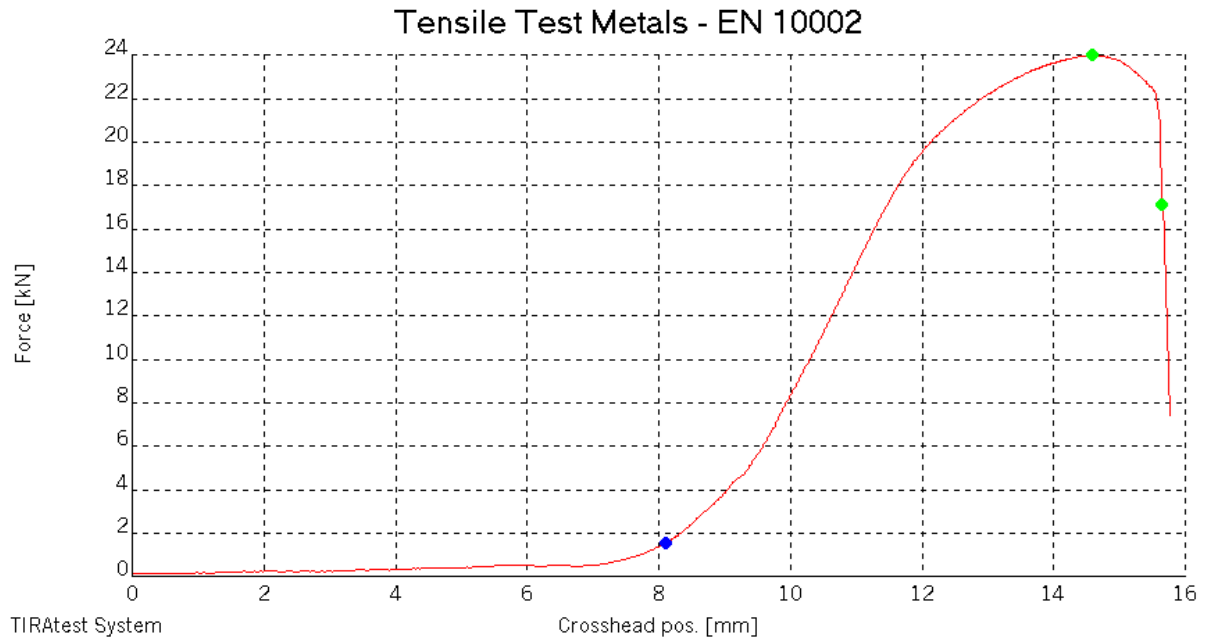
- [1] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tij/povije.html> (dostupno: listopad, 2016.)
- [2] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M., Garašić, I.: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [3] <http://www.welding.com/articles/waarticle19.asp> (dostupno: listopad, 2016.)
- [4] <http://www.ram-rijeka.com/Repository/Dokumenti/Osnovni-postupci-zavarivanja.pdf> (dostupno: listopad, 2016.)
- [5] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000
- [6] <http://t2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9K4VnJSYbS44ZoiEmXEC6wwYjgwJyEp82ew> (dostupno: listopad, 2016.)
- [7] http://t0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRu4YRCZJRc2uzrYhy__eyLKrS3XNizqXmIc5oW-oqHVOMqUDobw (dostupno: listopad, 2016.)
- [8] <http://www.premieringots.in/prd/seam-welding-electrodes.jpg> (dostupno: listopad, 2016.)
- [9] <http://t0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTuqvwvtolkjleh4ltmTTvAR7zOp3f64SzlQ> (dostupno: listopad, 2016.)
- [10] http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSm_rZvm4uxQHCBYseXOdrhKvmX5Loq-M-9s50AxUfIHhjEScRJ (dostupno: listopad, 2016.)
- [11] <http://www.directindustry.com/prod/termomacchine-srl/product-84929-1327825.html> (dostupno: listopad, 2016.)
- [12] <http://www.millerwelds.com/pdf/Resistance.pdf> (dostupno: listopad, 2016.)
- [13] <http://www.maneyonline.com/doi/pdfplus/10.1179/1362171813Y.0000000120> (dostupno: listopad, 2016.)
- [14] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw (dostupno: listopad, 2016.)
- [15] http://www.robot-welding.com/spot_welding.htm (dostupno: listopad, 2016.)
- [16] Garašić, I.: Prezentacija elektrootporno zavarivanje; ZiM, PS, PZ, Zagreb
- [17] <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (dostupno: listopad, 2016.)
- [18] <http://www.ruukki.com/~media/Files/Steel-products/Cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/Ruukki-Resistance-welding-manual.pdf> (dostupno: listopad, 2016.)
- [19] http://www.robot-welding.com/Welding_parameters.htm#ElectrodeForce (dostupno: listopad, 2016.)

- [20] <http://gemcowelding.tradeindia.com/spot-welding-machine-390475.html> (dostupno: listopad, 2016.)
- [21] http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/spot-welding-electrode-119595-6526287.jpg (dostupno: listopad, 2016.)
- [22] <http://www.castlemetalseurope.com/blog/ferrous-nonferrous-metals-uses/> (dostupno: listopad, 2016.)
- [23] <http://www.engineershandbook.com/Materials/nonferrous.htm> (dostupno: listopad, 2016.)
- [24] <http://www.weldguru.com/resistance-weld.html> (dostupno: listopad, 2016.)
- [25] <http://www.steelforge.com/literature/ferrousnon-ferrous-materials-textbook/non-ferrous-metals/refractory-metals/> (dostupno: studeni, 2016.)
- [26] Kordić, Z.: Elektrootporno zavarivanje, Zagreb, 1987.
- [27] <https://www.oelcheck.de/en/knowledge-from-a-z/lubricants-on-duty/industrie/kuka-all-that-moves-in-automation.html> (dostupno: studeni, 2016.)
- [28] Đunder, M., Mateša, B., Samardžić, I.: „Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler – ovog dijagrama“, Slavonski Brod, 2011.
- [29] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
- [30] Zidarić, K.: Zavarivanje raznorodnih čelika – Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [31] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> (dostupno: studeni, 2016.)
- [32] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2868> (dostupno: studeni, 2016.)
- [33] Gordić, M.: Izvještaj o ispitivanju stroja za elektrootporno točkasto zavarivanje istosmjernom strujom DZ-63, Zagreb, 1989.]
- [34] Babić, N.: Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja – Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [35] ISO 14329:2003 – Resistance welding – Destructive tests of welds – Failure types and geometric measurements for resistance spot, seam and projection welding, Geneva
- [36] http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/articles/en_steel_standards.pdf (dostupno: studeni, 2016.)
- [37] <http://www.brownmac.com/en/products/stainless-steel-plate/316-316l-stainless-steel> (dostupno: studeni, 2016.)
- [38] <http://www.steelgr.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/s355.html> (dostupno: studeni, 2016.)
- [39] http://www.valbrunanordic.se/wp-content/uploads/2014/10/EN_1_4404_-1408_Valbruna_Nordic_english.pdf (dostupno: studeni, 2016.)

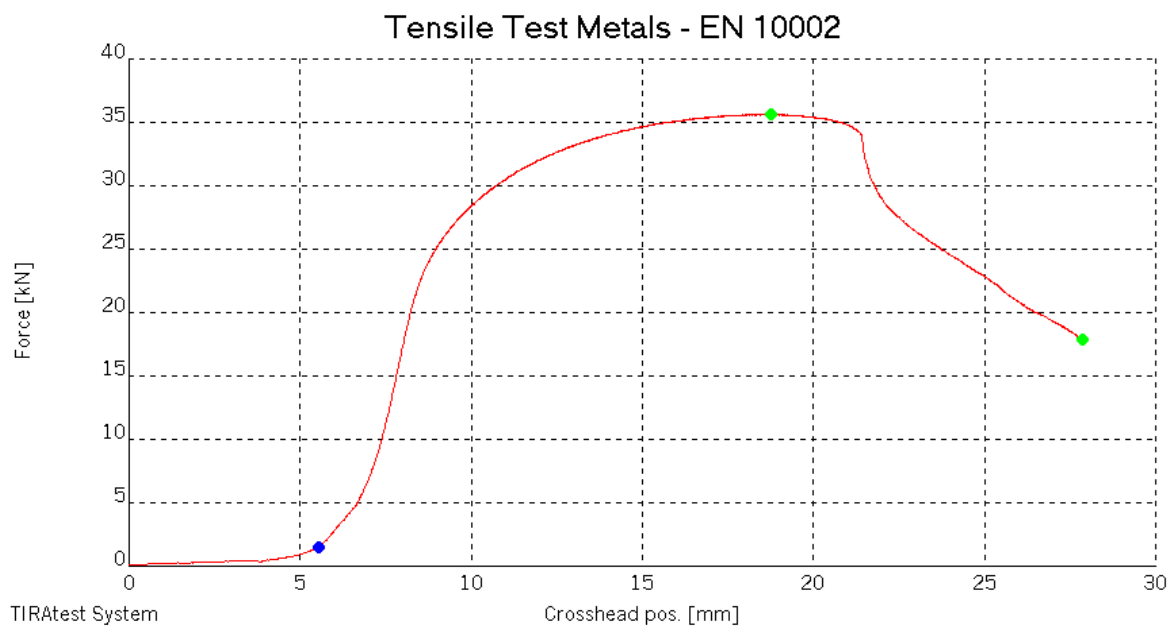
PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Dijagrami vlačnih sila i produljenja za svaki ispitni uzorak snimljeni nakon ispitivanja na kidalici EU40MOD

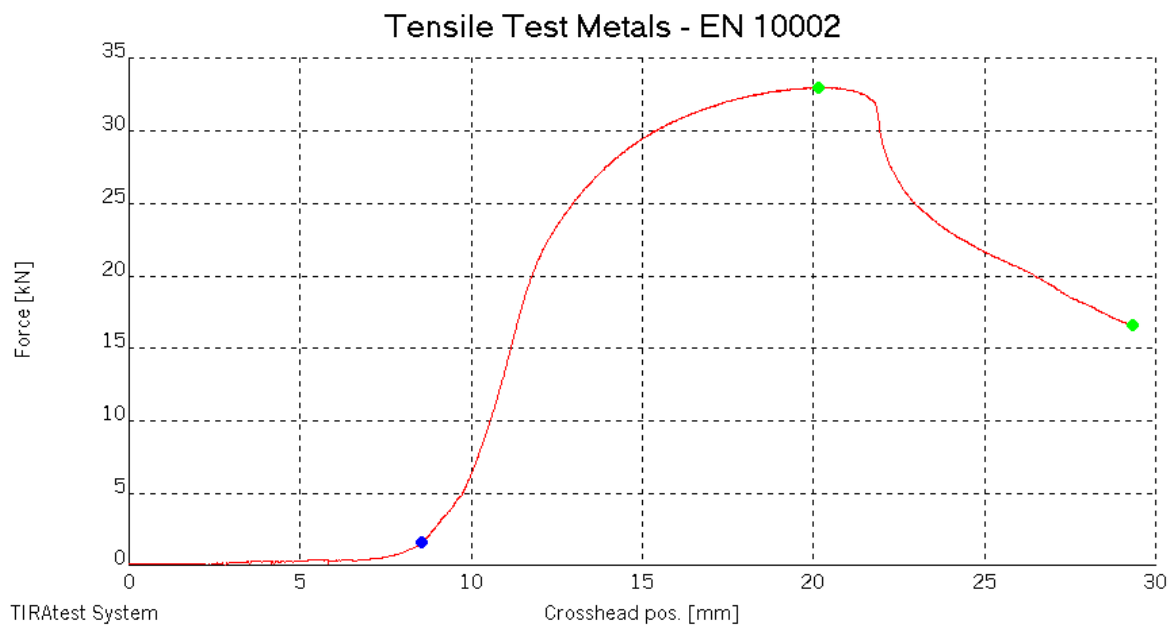
Uzorak #1



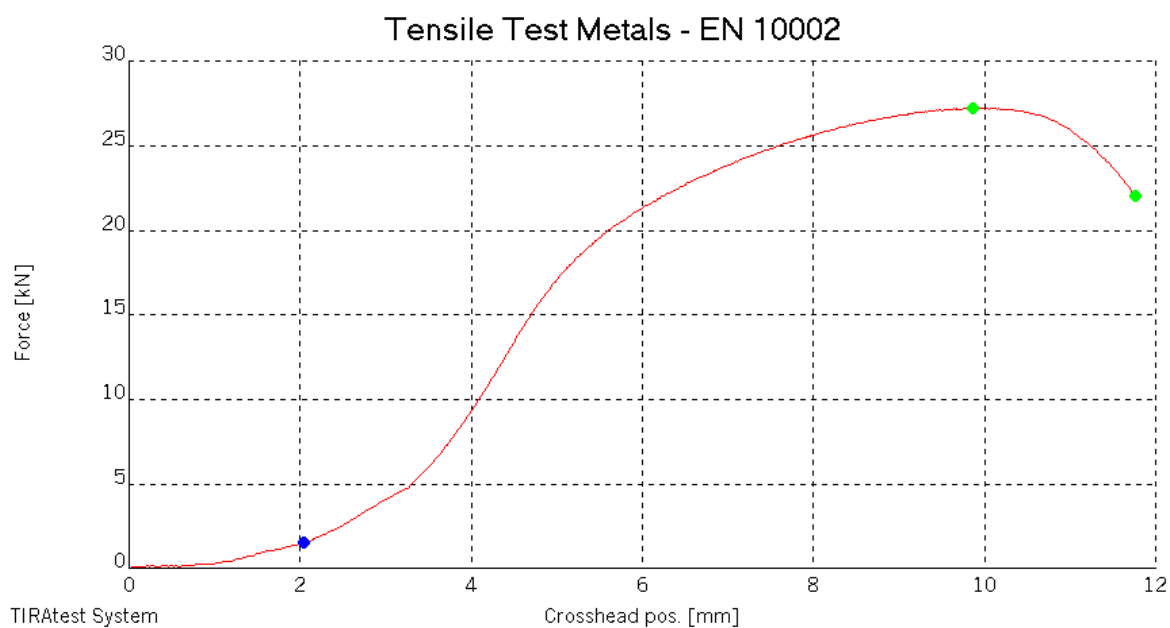
Uzorak #2



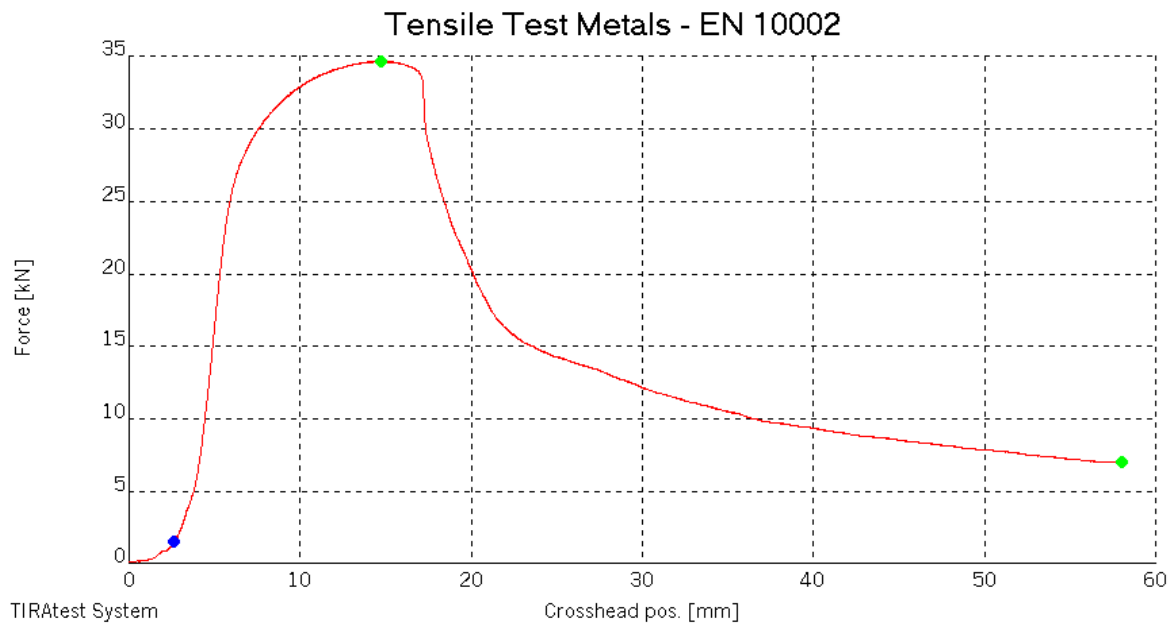
Uzorak #3



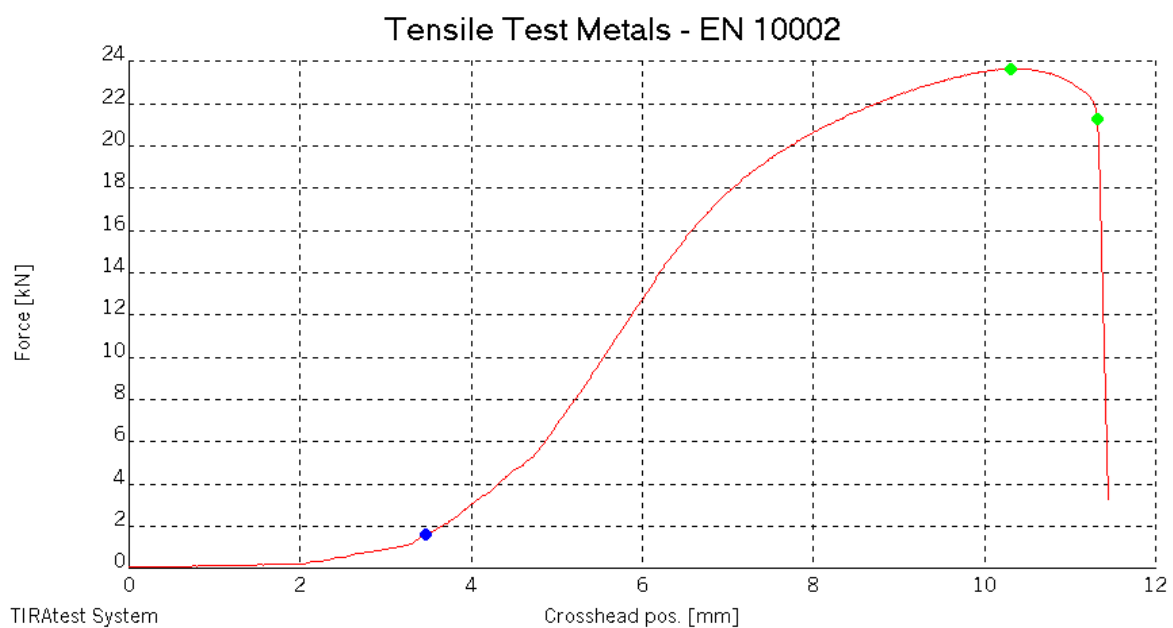
Uzorak #4



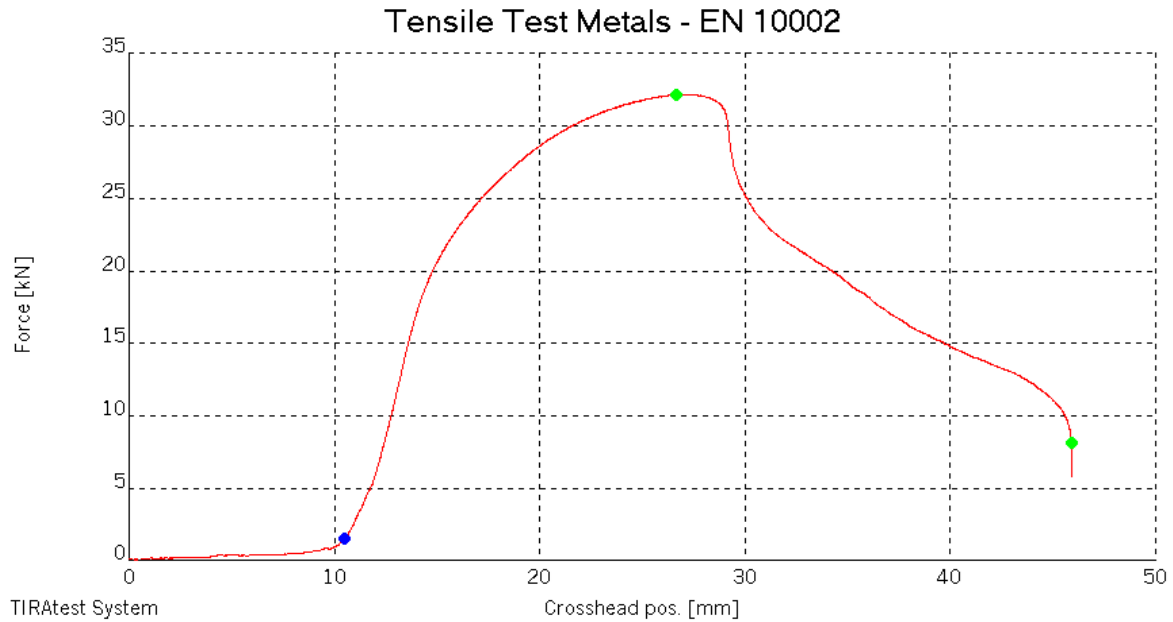
Uzorak #5



Uzorak #6



Uzorak #7



Uzorak #8

