

Analiza zaostalih naprežanja pri MIG i TIG zavarivanju visokolegiranih Cr-Ni čelika

Semenjuk, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:079980>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Filip Semenjuk

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Filip Semenjuk

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću za svu pruženu pomoć tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentima Mislavu Štefoku, mag. ing. i dr. sc. Maji Jurici, mag. ing. na pomoći, savjetima i smjernicama prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanja na pruženoj pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Naposljetku, zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na podršci, strpljenju, razumijevanju i svemu što su učinili za mene.

Filip Semenjuk



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: 602-14/22-6/1 | |
| Ur. broj: 15-1703-22- | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **FILIP SEMENJUK** Mat. br.: 0035212125

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza zaostalih napreznja pri MIG i TIG zavarivanju visokolegiranih Cr-Ni čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of residual stress in MIG and TIG welding of high alloyed Cr-Ni steels**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati i analizirati fizikalne principe nastanka zaostalih napreznja u zavarenim konstrukcijama te proučiti metodu mjerenja intenziteta zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom. Posebno proučiti problematiku zavarljivosti visokolegiranih Cr-Ni čelika i utjecaj parametara zavarivanja na svojstva spoja. Za TIG i MIG postupke zavarivanja definirati način odabira dodatnih materijala i zaštitnih plinova te usporediti tehnološki pristup.

U eksperimentalnom dijelu odabrati odgovarajuću debljinu materijala te provesti zavarivanje TIG i MIG postupkom pri optimalnoj tehnologiji. Za svaki postupak provesti mjerenje zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom. Dodatno izmjeriti deformacije te naknadno provesti razorna ispitivanja mehaničkih svojstava. Zaključno, napraviti analizu rezultata i dati tehnološke smjernice u smislu mogućeg smanjenja zaostalih napreznja.

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

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predvideni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA | VII |
| POPIS KRATICA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | X |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. ZAOSTALA NAPREZANJA | 2 |
| 2.1. Klasifikacija zaostalih napreznja..... | 2 |
| 2.2. Uzrok nastajanja zaostalih napreznja | 4 |
| 2.3. Stvaranje napreznja tijekom zavarivanja..... | 5 |
| 3. RENDGENSKA DIFRAKCIJA..... | 8 |
| 3.1. Metode mjerenja rendgenskom difrakcijom | 10 |
| 3.1.1 $\text{Sin}^2\psi$ metoda..... | 11 |
| 3.1.2. $\text{Cos}\alpha$ metoda..... | 12 |
| 3.1.3. Prednosti $\text{cos}\alpha$ metode nad ostalim metodama | 13 |
| 3.1.4. Pouzdanost izmjerene vrijednosti napreznja $\text{cos}\alpha$ metodom | 15 |
| 3.2. Problematika s uzorcima prilikom mjerenja napreznja rendgenskom difrakcijom.. | 16 |
| 3.2.1. Početna priprema uzorka..... | 17 |
| 3.2.2. Sastav i homogenost uzorka..... | 17 |
| 3.2.3. Veličina zrna | 18 |
| 3.2.4. Veličina i oblik uzorka..... | 18 |
| 3.2.5. Hrapavost površine | 18 |
| 3.2.6. Temperatura | 19 |
| 3.2.7. Prevučeni uzorci..... | 19 |
| 4. PROBLEMATIKA ZAVARLJIVOSTI VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA | 20 |
| 4.1. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika | 21 |
| 4.1.1. Deformacija..... | 23 |
| 4.1.2. Tople pukotine | 23 |
| 4.1.3. Senzibilizacija | 24 |
| 4.1.4. Napetosna korozija..... | 25 |
| 4.2. Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika | 26 |
| 4.2.1. Hladne pukotine i vodikove pukotine | 27 |
| 4.3. Zavarljivost austenitno-feritnih nehrđajućih čelika | 27 |
| 4.4. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika..... | 29 |
| 4.5. Dodatni materijali | 31 |
| 4.5.1. Dodatni materijali kod TIG postupka zavarivanja | 32 |
| 4.5.2. Dodatni materijali kod MIG postupka zavarivanja..... | 33 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.6. | Zaštitni plinovi | 34 |
| 4.6.1. | Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja | 35 |
| 4.6.2. | Zaštitni plinovi kod MIG postupka zavarivanja | 36 |
| 5. | EKSPERIMENTALNI DIO | 37 |
| 5.1. | Zavarivanje uzorka TIG postupkom | 37 |
| 5.1.1. | Osnovni i dodatni materijal | 38 |
| 5.1.2. | Zaštitni plin | 39 |
| 5.1.3. | Priprema spoja | 39 |
| 5.1.4. | Parametri zavarivanja..... | 41 |
| 5.2. | Zavarivanje uzorka MIG postupkom | 43 |
| 5.2.1. | Osnovni i dodatni materijal..... | 43 |
| 5.2.2. | Zaštitni plin | 44 |
| 5.2.3. | Priprema spoja | 44 |
| 5.2.4. | Parametri zavarivanja..... | 45 |
| 5.3. | Mjerenje zaostalih napreznja..... | 47 |
| 5.3.1. | Debye prsten | 48 |
| 5.4. | Rezultati i analiza mjerenja zaostalih napreznja | 50 |
| 5.4.1. | Linija 1 (L1)..... | 50 |
| 5.4.2. | Linija 2 (L2)..... | 53 |
| 5.4.3. | Linija 3 (L3)..... | 56 |
| 5.4.4. | Linija 5 (L5)..... | 58 |
| 5.4.5. | Usporedba iznosa napreznja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja 60 | |
| 5.5. | Deformacije uzoraka | 64 |
| 5.6. | Makroizbrusci | 65 |
| 6. | ZAKLJUČAK..... | 67 |
| | LITERATURA..... | 69 |
| | PRILOZI..... | 71 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Klasifikacija zaostalih naprezanja [2] | 2 |
| Slika 2. | Prikaz djelovanja zaostalih naprezanja te podjela s obzirom na smjer djelovanja [3] | 3 |
| Slika 3. | $F - \Delta L$ dijagram [5] | 4 |
| Slika 4. | Shematski prikaz raspodjela temperatura tijekom zavarivanja [6] | 5 |
| Slika 5. | Shematski prikaz zona naprezanja koje se stvaraju tijekom zavarivanja [2] | 6 |
| Slika 6. | Shematski prikaz promjena temperature i longitudinalnih zaostalih naprezanja na različitim mjestima tijekom navarivanja [4] | 7 |
| Slika 7. | Podjela metoda za ispitivanje zaostalih naprezanja [2] | 8 |
| Slika 8. | Shematski prikazi mjerenja naprezanja pomoću rendgenske difrakcije te različiti difrakcijski kutovi: a) θ [7] i b) 2θ [8] | 10 |
| Slika 9. | Shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja $\sin^2\psi$ metodom [8] | 11 |
| Slika 10. | Shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskim zrakama $\cos\alpha$ metodom [8] | 12 |
| Slika 11. | Promjena dubine prodiranja u ovisnosti o upadnom kutu ψ_0 pri različitim azimutnim kutovima α [7] | 13 |
| Slika 12. | Primjena uređaja za mjerenje zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom: ... | 14 |
| Slika 13. | Usporedba vrijednosti izmjerenih rendgenskom difrakcijom s vrijednostima dobivenim metodama bušenja provrta [11] | 15 |
| Slika 14. | Utjecaj uniformnih i neuniformnih deformacija na položaj i širinu difrakcijskog vrha: a) nedeformirani uzorak, b) uniformna deformacija unutar uzorka i c) neuniformna deformacija unutar uzorka [2] | 16 |
| Slika 15. | Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [16] | 21 |
| Slika 16. | Tople pukotine: a) tijekom skrućivanja i b) u području u zone utjecaja topline ili osnovnog materijala [17] | 23 |
| Slika 17. | Shematski prikaz najčešćih mjesta na kojima se pojavljuju pukotine uzrokovane napetosnom korozijom [18] | 25 |
| Slika 18. | Mikrostruktura potpuno feritnog nehrđajućeg čelika [19] | 26 |
| Slika 19. | Mikrostruktura duplex nehrđajućeg čelika [20] | 28 |
| Slika 20. | Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [21] | 29 |
| Slika 21. | Dodatni materijali za zavarivanja: a) obložene elektrode [23], b) žice [23], c) šipke [23] i d) prašak [24] | 32 |
| Slika 22. | Različiti načini dovođenja dodatnog materijala: a) ručno [26] i b) automatizirano [25] | 33 |
| Slika 23. | Uređaj za dodavanje žice slikan u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu | 33 |
| Slika 24. | Izvor struje za zavarivanje MagicWave 230i i pripadajuća identifikacijska pločica | 37 |
| Slika 25. | Kemijski sastav ploča od austenitnog nehrđajućeg čelika 304 | 38 |
| Slika 26. | Argon 5.0 | 39 |
| Slika 27. | V priprema spoja bez nosa | 39 |
| Slika 28. | Bakrena podloška s žljebom | 40 |
| Slika 29. | Uzorak s zavarenom ulaznom i izlaznom pločicom | 40 |
| Slika 30. | Izgled TIG uzorka neposredno nakon zavarivanja | 41 |
| Slika 31. | Izgled korijenja zavara i donje površine TIG uzorka | 42 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 32. | Izgled gornje površine i lica zavara TIG uzorka | 42 |
| Slika 33. | Izvor struje za zavarivanje WB-W400 AC MIG i pripadajuća identifikacijska pločica | 43 |
| Slika 34. | Inoxline C2 | 44 |
| Slika 35. | Priprema spoja kod MIG uzorka | 44 |
| Slika 36. | Izgled MIG uzorka neposredno nakon zavarivanja i smjer zavarivanja | 46 |
| Slika 37. | Izgled korijena zavara i donje površine MIG uzorka | 46 |
| Slika 38. | Izgled gornje površine i lica zavara MIG uzorka | 47 |
| Slika 39. | Uređaj za mjerenja zaostalih naprezanja μ -X360s | 47 |
| Slika 40. | Prikaz izgleda Debye prstena u ovisnosti o veličini i vrsti zrna [32] | 48 |
| Slika 41. | Mjesta mjerenja zaostalih naprezanja: a) gornja površina TIG uzorka, b) donja površina TIG uzorka, c) gornja površina MIG uzorka i d) donja površina MIG uzorka | 49 |
| Slika 42. | Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L1 | 50 |
| Slika 43. | Primjer valjanog iznosa zaostalih naprezanja | 50 |
| Slika 44. | Usporedba glavnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L1 | 51 |
| Slika 45. | Primjer nevaljanih iznosa zaostalih naprezanja zbog prevelike standardne devijacije | 51 |
| Slika 46. | Usporedba smičnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L1 | 52 |
| Slika 47. | Usporedba smičnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L1 | 52 |
| Slika 48. | Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L2 | 53 |
| Slika 49. | Izgled Debye prstena kod: a) valjanog rezultata (točka 10. TIG uzorka) i b) nevaljanog rezultata (točka 4. TIG uzorka) | 53 |
| Slika 50. | Usporedba glavnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L2 | 54 |
| Slika 51. | Prikaz: a) mjesta mjerenja kritične točke 10, b) iznosa naprezanja kritične točke 10. i c) pripadajući izgled Debye prstena | 54 |
| Slika 52. | Usporedba smičnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L2 | 55 |
| Slika 53. | Usporedba smičnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L2 | 55 |
| Slika 54. | Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L3 | 56 |
| Slika 55. | Usporedba glavnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L3 | 56 |
| Slika 56. | Usporedba smičnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L3 | 57 |
| Slika 57. | Usporedba smičnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L3 | 57 |
| Slika 58. | Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L5 | 58 |
| Slika 59. | Usporedba glavnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L5 | 58 |
| Slika 60. | Usporedba smičnih longitudinalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L5 | 59 |
| Slika 61. | Usporedba smičnih transverzalnih naprezanja MIG i TIG uzorka na L5 | 59 |
| Slika 62. | Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja | 60 |
| Slika 63. | Izgled mjernog mjesta: a) prije elektropoliranja i b) poslije elektropoliranja | 60 |
| Slika 64. | Usporedba glavnih transverzalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja | 61 |
| Slika 65. | Izgled Debye prstena u točki 12 MIG uzorka: a) prije elektropoliranja i b) nakon elektropoliranja | 61 |
| Slika 66. | Usporedba smičnih longitudinalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja | 62 |
| Slika 67. | Usporedba smičnih transverzalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja | 62 |
| Slika 68. | Deformacija: a) TIG uzorka i b) MIG uzorka | 64 |
| Slika 69. | Rezanje uzoraka na tračnoj pili | 65 |
| Slika 70. | Elektronagrizanje makroizbrusaka | 65 |

Slika 71. Izgled i dimenzije: a) TIG makroizbruska i b) MIG makroizbruska 66

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Usporedba karakteristika zavarivanja između argona, plinske mješavine argon – helij i helija [25] | 35 |
| Tablica 2. Mehanička i fizička svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika 304 [29]..... | 38 |
| Tablica 3. Parametri zavarivanja svakog prolaza | 41 |
| Tablica 4. Parametri zavarivanja svakog prolaza | 45 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis oznake |
|---------------|------------------------|--|
| d | μm | Razmak između susjednih rešetki |
| d_0 | μm | Razmak nedeformiranih rešetki |
| F | N | Sila |
| T | μm | Dubina prodiranja rendgenskih zraka |
| θ | $^\circ$ | Difrakcijski kut deformiranih kristala |
| θ_0 | $^\circ$ | Difrakcijski kut nedeformiranih kristala |
| α | $^\circ$ | Azimutni kut |
| ψ_0 | $^\circ$ | Upadni kut rendgenskih zraka |
| λ | m | Valna duljina rendgenske zrake |
| Δd | μm | Razmak nastao zbog deformacije rešetke |
| ΔL | mm | Produljenje |
| ε | MPa | Deformacija |
| σ_L | MPa | Longitudinalno naprezanje |
| σ_N | MPa | Normalno naprezanje |
| σ_T | MPa | Transverzalno naprezanje |
| σ_x | MPa | Glavno naprezanje |
| τ_{xy} | MPa | Smično naprezanje |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|---|
| EDM | <i>Electro Discharge Machining</i> – Metoda rezanja materijala |
| EPP | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška |
| FN | <i>Ferrite number</i> – Sadržaj ferita u zavaru |
| FWHM | <i>Full width at half maximum</i> – Statistički parametar |
| IPs | Slikovne ploče |
| MAG | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina |
| MIG | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina |
| PWHT | <i>Post weld heat treatment</i> – Toplinska obrada nakon zavarivanja |
| REL | Ručno elektrolučno zavarivanje |
| SCC | <i>Stress corrosion cracking</i> – Pucanje uzrokovano napetosnom korozijom |
| TIG | Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina |

SAŽETAK

U diplomskom radu obrađena je tema analize zaostalih naprezanja pri MIG i TIG zavarivanju visokolegiranih Cr-Ni čelika. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada detaljno su opisani pojmovi vezani uz nastanak zaostalih naprezanja u zavarenim konstrukcijama te je dan pregled metoda mjerenja zaostalih naprezanja s posebnim naglaskom na mjerenje rendgenskom difrakcijom. Nadalje, proučena je problematika zavarljivosti visokolegiranih Cr-Ni čelika te su za TIG i MIG postupke zavarivanja definirani načini odabira dodatnih materijala i zaštitnih plinova.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje sučeljenog spoja od austenitnog nehrđajućeg čelika TIG i MIG postupkom zavarivanja te je za svaki postupak provedeno mjerenje zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom. Provedena je analiza rezultata zaostalih naprezanja. Također, na uzorcima je provedeno mjerenje deformacija kao i makro analiza.

Ključne riječi: zaostala naprezanja, rendgenska difrakcija, zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika

SUMMARY

The topic of residual stress analysis during MIG and TIG welding of high-alloyed Cr-Ni steel was dealt within the thesis. The thesis consists of a theoretical and an experimental part.

In the theoretical part of the paper, concepts related to the occurrence of residual stress in welded structures are described in detail, and there is an overview of residual stress measurement methods with special emphasis on X-ray diffraction measurement. Furthermore, the issue of weldability of high-alloyed Cr-Ni steels was studied, and methods of selecting filler materials and shielding gases were defined for TIG and MIG welding processes.

In the experimental part of the thesis, the butt joint was welded from austenitic stainless steel using the TIG and MIG welding process, and the residual stresses were measured by X-ray diffraction for each process. An analysis of the residual stress results was carried out. Also, the deformation measurements and macro analysis were performed on the samples.

Key words: residual stresses, X-ray diffraction, weldability of high-alloyed Cr-Ni steels

1. UVOD

Zaostala naprezanja su neizbježan pojam u strojarstvu jer ih gotovo sve konstrukcije i strojevi sadrže. Zaostala naprezanja igraju vitalnu ulogu u održavanju sigurnosti zavarenih konstrukcija i njihove okoline jer mogu uzrokovati neočekivane kvarove tijekom eksploatacije. Zbog tih razloga je važno razumjeti mehanizme nastajanja zaostalih naprezanja kako bi se to nastajanje spriječilo. Mehanizme stvaranja zaostalih naprezanja je moguće predvidjeti i izmjeriti, ali razvoj mjernih metoda koje to mogu je vrlo zahtjevan [1], [2].

Jedna od takvih metoda je metoda mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom. Metoda rendgenske difrakcije je poznata kao jedan od najpouzdanijih nerazornih alata za mjerenje zaostalih naprezanja u polikristalnim materijalima te je zbog svojih naprednih karakteristika pronašla široku upotrebu u praksi kao i u laboratorijskim istraživanjima [1].

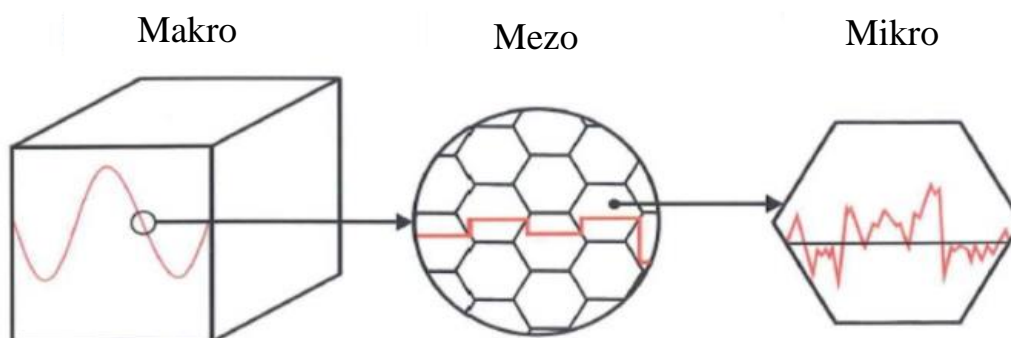
Zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika je vrlo kompleksan pojam kojemu treba prići odgovorno i oprezno. Razlog tomu je što se visokolegirani Cr-Ni čelici, zbog svojih izvrsnih svojstava poput odlične otpornosti na koroziju i otpornosti na trošenje, primjenjuju u raznim procesima gdje postoje strogi zahtjevi vezani za sigurnu proizvodnju i konzumaciju hrane, pića ili farmaceutskih proizvoda. Pravilan izbor dodatnih materijala i zaštitnih plinova za zavarivanje je od iznimne važnosti za postizanje kvalitetnog i sigurnog zavarenog spoja [1], [3].

2. ZAOSTALA NAPREZANJA

Zaostala napreznja su unutarnja napreznja koja postoje u materijalu nakon uklanjanja svih vanjskih opterećenja. Tijekom postupaka obrade metala, poput rezanja, zavarivanja, prešanja, montaže te toplinske obrade, različite razine zaostalih napreznja se mogu generirati unutar obratka. Ta napreznja utječu na mehaničko ponašanje materijala tako što mogu smanjiti ili povećati životni vijek materijala, smanjiti ili povećati otpornost na koroziju i tako što mogu dovesti do neočekivane deformacije ili pucanja materijala [1], [2].

2.1. Klasifikacija zaostalih napreznja

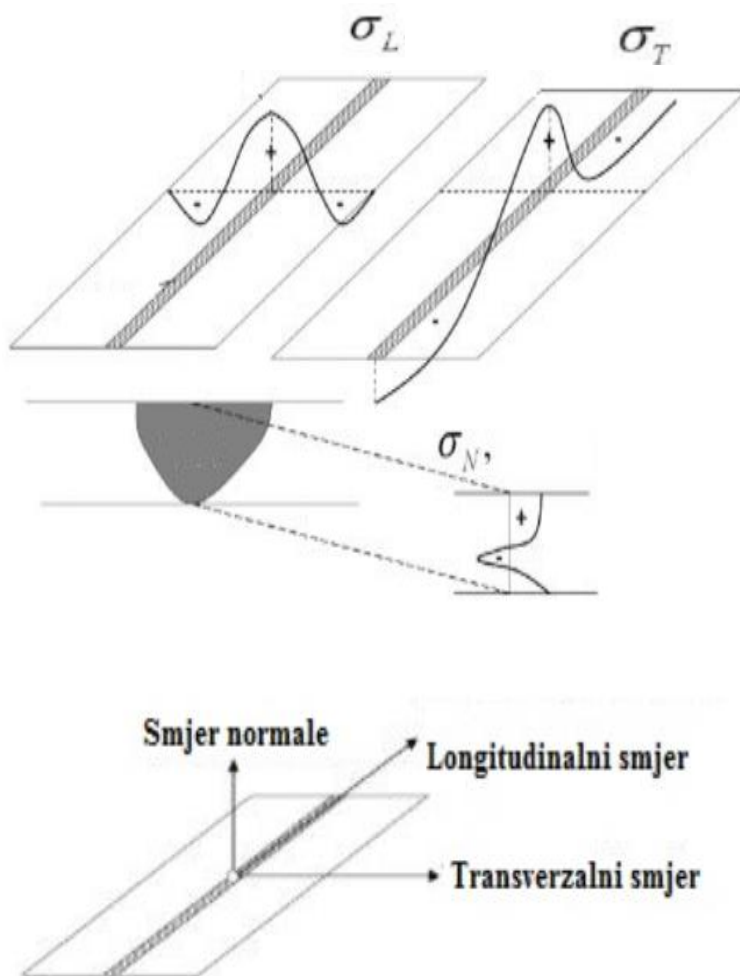
Zaostala napreznja se na temelju njihove veličine, klasificiraju na 3 vrste kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Klasifikacija zaostalih napreznja [2]

Prva vrsta zaostalih napreznja se referira na makro napreznja. Razina veličine ove kategorije je dovoljno velika da pokrije sve faze prisutne u materijalu. Druga vrsta zaostalih napreznja se odnosi na mezo napreznja koja djeluju između susjednih kristalnih zrna u materijalu. Najčešći uzrok pojave mezo napreznja je postojanje gradijenta deformacije (ili temperaturnog gradijenta) između zrna. Treća vrsta zaostalih napreznja se odnosi na mikro napreznja koja djeluju na međuatomskoj razini. Proces oslobođenja od makro i mezo napreznja uzrokuje makroskopsku promjenu oblika materijala dok se oslobađanjem od mikro napreznja ta promjena ne uzrokuje [2].

Zaostala naprezanja se također mogu podijeliti, ovisno o smjeru njihovog djelovanja, na longitudinalna, transverzalna i normalna zaostala naprezanja. Longitudinalna zaostala naprezanja djeluju u smjeru osi zavarivanja, a transverzalna okomito na os zavarivanja. Normalna zaostala naprezanja djeluju u smjeru debljine materijala. Slika 2. prikazuje navedena zaostala naprezanja te njihov smjer djelovanja [3].

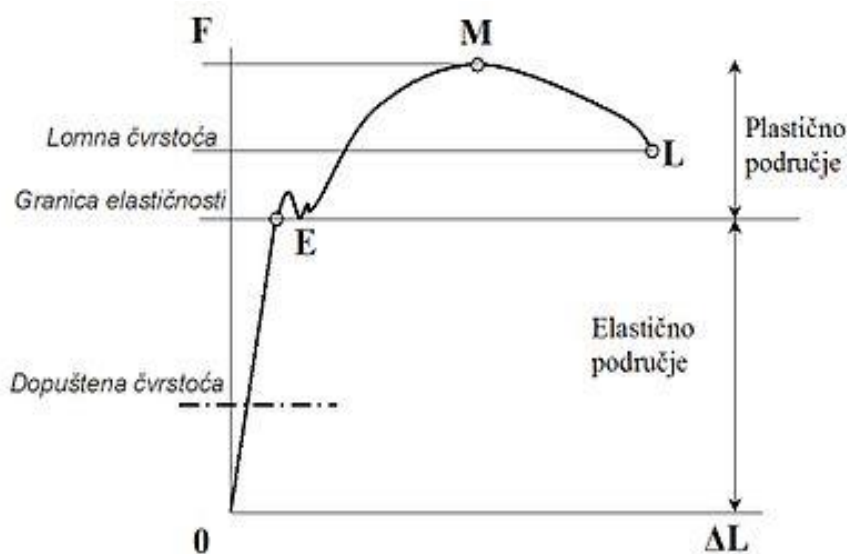


Slika 2. Prikaz djelovanja zaostalih naprezanja te podjela s obzirom na smjer djelovanja [3]

2.2. Uzrok nastajanja zaostalih napreznja

Zaostala napreznja nastaju zbog nekompatibilnosti ili neusklađenosti između različitih područja materijala unutar neke komponente ili sklopa. Prevelika sfera zarobljena unutar šupljine u velikom homogenom tijelu od istog materijala se može navesti kao najjednostavniji primjer nastanka polja zaostalog napreznja. Podrijetla zaostalih napreznja mogu biti plastična deformacija, transformacija faze i toplinska podrijetla [4].

Plastična deformacija se javlja u duktilnim materijalima kada su opterećeni iznad njihove granice elastičnosti. Ova vrsta deformacije općenito je nepovratna, tj. materijal se, uklanjanjem opterećenja, nikad neće vratiti u prvobitan oblik. Nadalje, uklanjanjem opterećenja, materijal se može oporaviti od elastičnih deformacija [2]. Na slici 3. prikazan je $F - \Delta L$ dijagram nekog čelika gdje se može vidjeti razlika elastičnog i plastičnog područja.



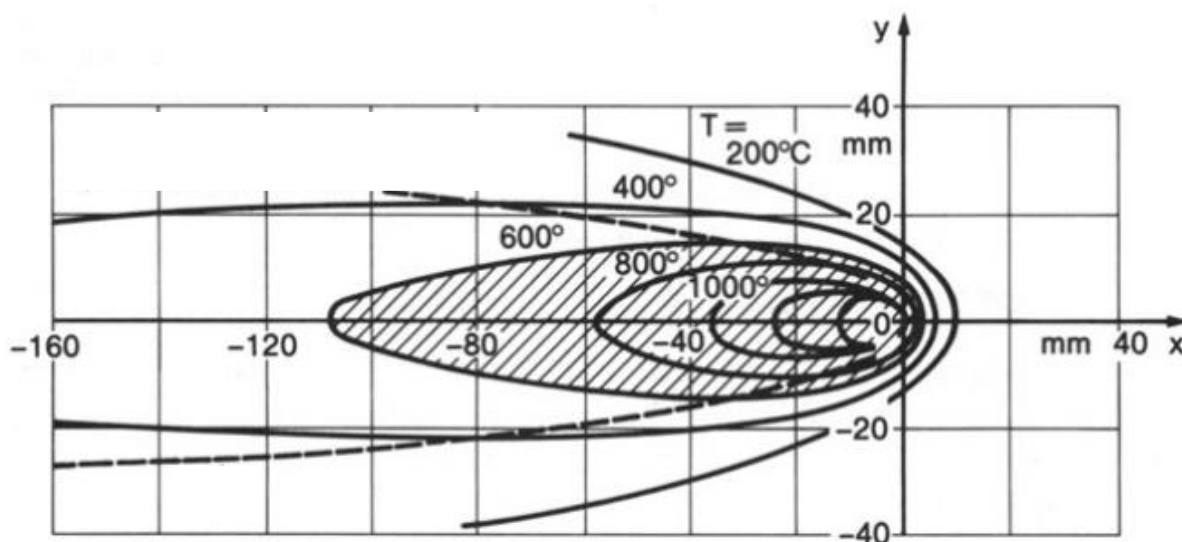
Slika 3. $F - \Delta L$ dijagram [5]

Transformaciju faze karakterizira brza distorzija kristalne rešetke iz jedne strukture u drugu, stvarajući neusklađenosti između transformiranih i netransformiranih područja koja mogu dovesti do zaostalih napreznja kao i iznenadnih makroskopskih promjena oblika materijala [4].

Zaostala naprezanja uzrokovana toplinskim porijeklom nastaju zbog gradijenta temperature unutar tijela. Na primjer, kod procesa kaljenja se vanjski dio materijala, koji se inače najbrže hladi, prirodno skupi zbog pada temperature. Zbog otpora kojeg pruža toplija unutrašnjost materijala, na vanjskom dijelu se stvaraju vlačna naprezanja, a u unutrašnjosti tlačna naprezanja. Obično ta naprezanja nestanu kad tijelo kao cjelina dostigne istu temperaturu. Ako su gradijenti temperature dovoljno jaki da generiraju značajnija naprezanja ili se granica tečenja unutrašnjosti smanjila zbog povišene temperature, tada može doći do plastične deformacije u područjima gdje je granica tečenja materijala prekoračena [4].

2.3. Stvaranje naprezanja tijekom zavarivanja

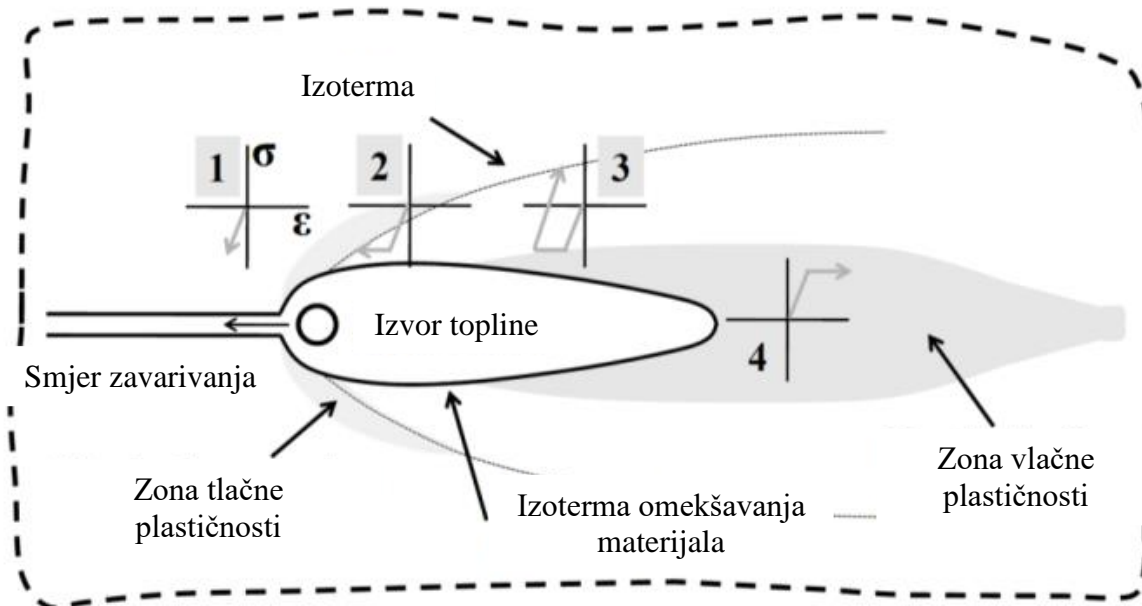
Proces zavarivanja uzrokuje nejednoliko zagrijavanje dijelova koji se spajaju. Područje materijala u blizini zavarivačkog luka se zagrijava do temperature bliske temperaturi taljenja materijala, a zatim se hladi, odvođeći toplinu u ostatak materijala kao što je vidljivo na slici 4. Sa svakim novim uzastopnim prolazom, toplinski ciklus će uvesti lokalno taljenje, transformacije faze, rast zrna te rekristalizaciju što dovodi do sve kompliciranijeg stanja naprezanja [2].



Slika 4. Shematski prikaz raspodjela temperatura tijekom zavarivanja [6]

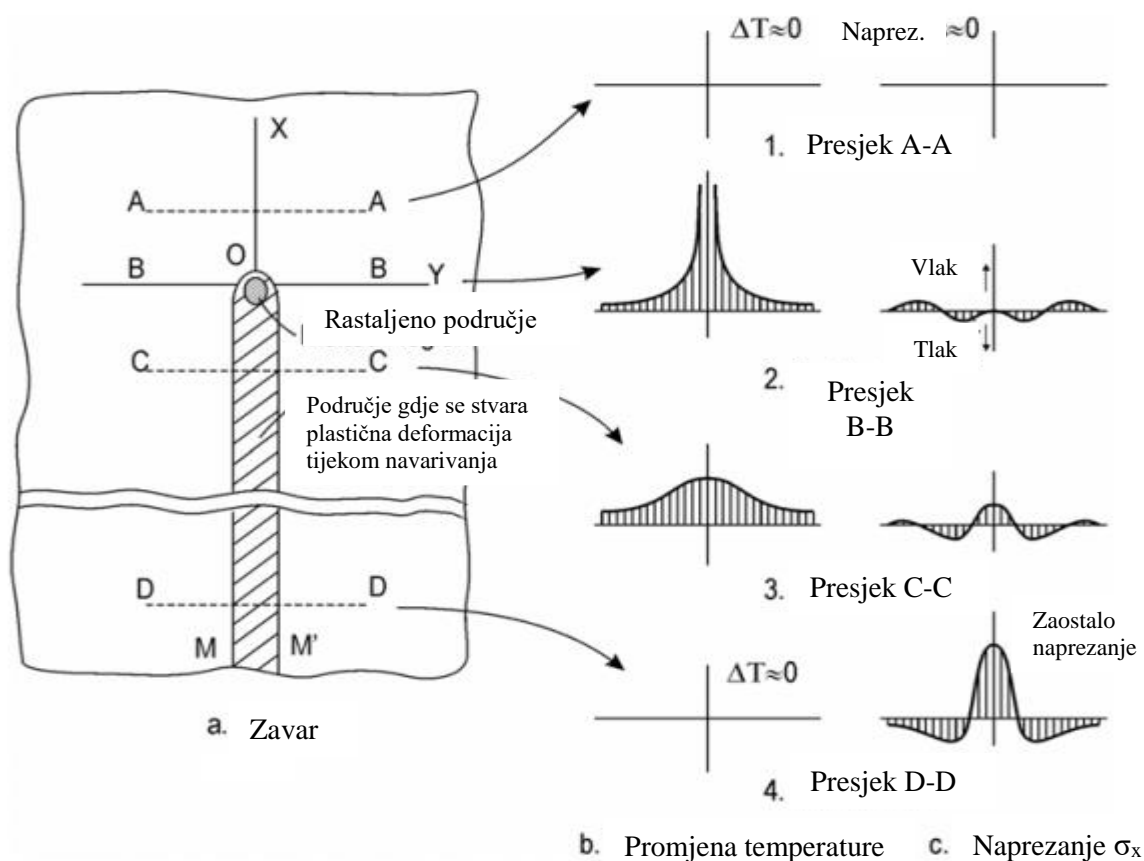
Slika 5. shematski prikazuje zone naprezanja koje se stvaraju tijekom zavarivanja. Karakteristične točke 1., 2. i 3. se nalaze duž šava zavora te predstavljaju uzastopni razvoj naprezanja u točki koja leži na nekoj udaljenosti od linije zavora. Tijekom zavarivanja, materijal je najprije izložen elastičnoj kompresiji (točka 1.) koja se javlja zbog ograničenog širenja zagrijanog materijala. Do plastične kompresije dolazi kada naprezanja premaše granicu tečenja (točka 2.). Nadalje, plastična kompresija se također javlja u području ispred zavora zbog zagrijavanja materijala tijekom zavarivanja. Tijekom hlađenja, kad se izvor topline udalji, se rasterećuju elastična naprezanja (točka 3.) [2].

Točka 4. predstavlja područje gdje se dodatni materijal dodaje u utor za zavarivanje. To područje se podvrgava samo vlačnom naprezanju budući da tamo materijal nije bio prisutan prije zavarivanja. Materijal u zavarivačkom bazenu gubi svu čvrstoću nakon taljenja. Tijekom hlađenja se taj materijal skuplja što dovodi do toga da je skrnuti materijal u zoni taljenja izložen vlačnim naprezanjima [2].



Slika 5. Shematski prikaz zona naprezanja koje se stvaraju tijekom zavarivanja [2]

Slika 6. prikazuje promjenu temperature i longitudinalnih zaostalih napreznja na različitim mjestima tijekom navarivanja. Kod presjeka A-A, koji se nalazi neposredno ispred izvora topline, ne dolazi do promjene temperature što rezultira gotovo nikakvim napreznjima u tom području. Kod presjeka B-B, koji se nalazi točno ispod izvora topline, temperatura je najviša, ali napreznja skoro ni nema jer rastaljeni metal ne može podnijeti opterećenje. Međutim, u zoni utjecaja topline postoje tlačna napreznja, a vlačna napreznja se pojavljuju na mjestima daleko od zavara radi održavanja mehaničke ravnoteže. Kod presjeka C-C, koji se nalazi neposredno iza izvora topline, zavar i zona utjecaja topline su se znatno ohladili. Ta područja su se tijekom hlađenja pokušala skupiti što je rezultiralo pojavom vlačnih napreznja. Ova vlačna napreznja su uravnotežena pojavom tlačnih napreznja na mjestima daleko od zavara. Vrlo daleko iza izvora topline (presjek D-D) zavar se potpuno ohladio, a raspodjela zaostalih napreznja je takva da zaostala vlačna napreznja postoje u šavu zavara te u zoni utjecaja topline, s zaostalim tlačnim napreznjima u nepromijenjenom osnovnom metalu radi održavanja mehaničke ravnoteže [1].

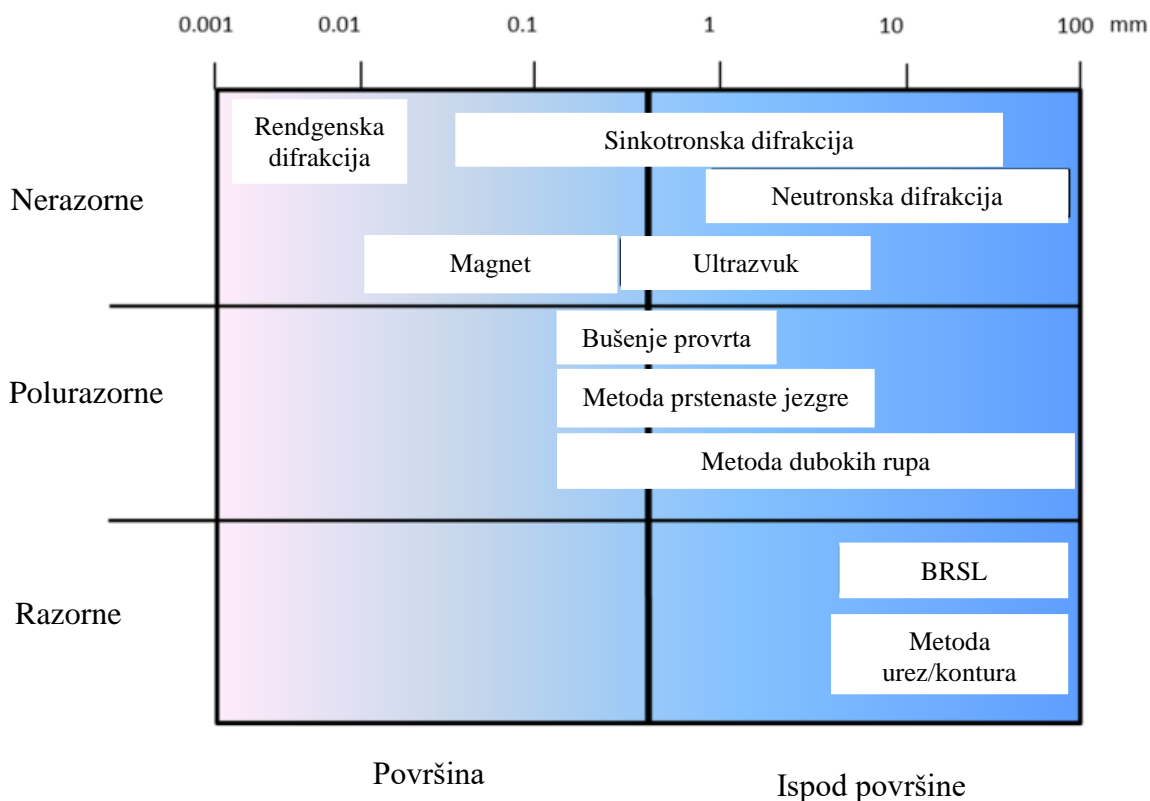


Slika 6. Shematski prikaz promjena temperature i longitudinalnih zaostalih napreznja na različitim mjestima tijekom navarivanja [4]

3. RENDGENSKA DIFRAKCIJA

Gotovo sve konstrukcije i strojevi u strojarstvu sadrže zaostala naprezanja koja igraju važnu ulogu kod pojave umora i neočekivanih kvarova tih konstrukcija. Mehanizme stvaranja zaostalih naprezanja nije lako zaustaviti, ali ih je zato moguće predvidjeti i izmjeriti. Predviđanje zaostalih naprezanja je ponekad vrlo teško, a razvoj mjernih tehnika koje to mogu je vrlo zahtjevan [7].

Na slici 7. se mogu vidjeti tri kategorije u koje se metode ispitivanja zaostalih naprezanja mogu svrstati, a to su: nerazorne, polurazorne i razorne. Polurazorne i razorne tehnike se temelje na narušavanju stanja ravnoteže zaostalih naprezanja uslijed rezanja, obrade ili bušenja obratka. Preraspodjela unutarnjih sila dovodi do lokalnih naprezanja, koja se mogu mjeriti kako bi se procijenilo polje zaostalih naprezanja. Polurazorne tehnike djelomično unište ispitivani uzorak dok se kod razornih tehnika ispitivani uzorak potpuno uništi [2].



Slika 7. Podjela metoda za ispitivanje zaostalih naprezanja [2]

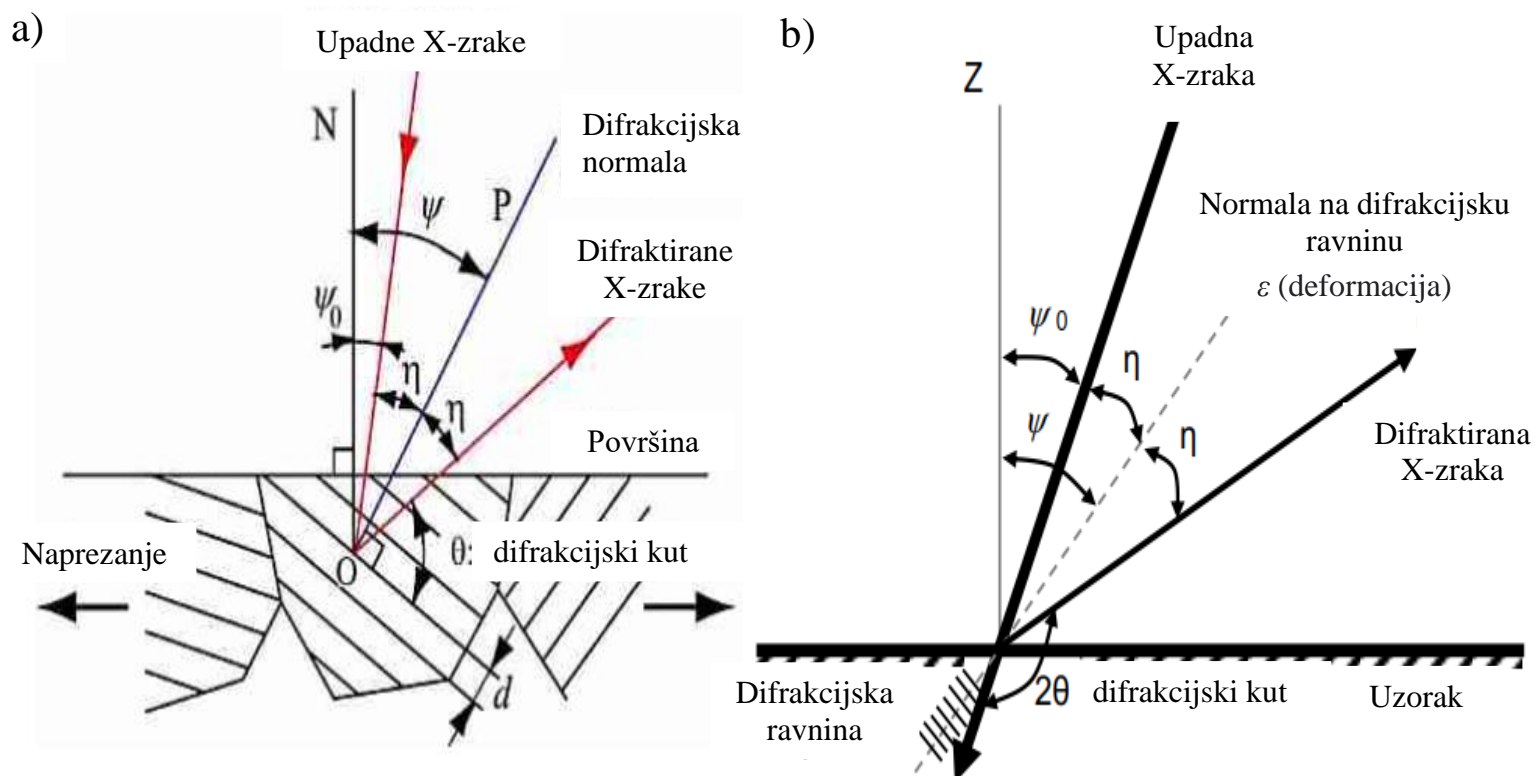
Metoda rendgenske difrakcije (engl. *X-ray diffraction*) poznata je kao jedan od najpouzdanijih nerazornih alata za mjerenje zaostalih naprezanja u polikristalnim materijalima i široko je korištena u praksi kao i u laboratorijskim istraživanjima. Princip mjerenja naprezanja rendgenskim zrakama temelji se na Braggovom zakonu difrakcije rendgenskih zraka po kristalima. Kada monokromatski snop rendgenskih zraka pada na polikristale, difrakcija na kristalima se odvija pod kutovima koji zadovoljavaju jednadžbu (1) gdje λ predstavlja valnu duljinu rendgenske zrake, d predstavlja razmak između susjednih rešetki, a θ predstavlja difrakcijski kut [7].

$$\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Usljed djelovanja nekog opterećenja, razmak rešetki se mijenja od početne vrijednosti d_0 koja ne sadrži deformacije do neke vrijednosti $d_0 + \Delta d$ koja sadrži deformacije. Budući da je valna duljina λ konstantna, deformacija ε u smjeru normale od difrakcijske ravnine se dobiva iz promjene difrakcijskog kuta prema jednadžbi (2) gdje je θ_0 difrakcijski kut nedeformiranih kristala dok θ predstavlja difrakcijski kut deformiranih kristala. Kada difrakcija dolazi od mnogo zrna sa slučajnom orijentacijom kristala, deformacija rešetke mjerene difrakcijom X-zraka odgovara makroskopskoj elastičnoj deformaciji i povezana je s naprežanjem pomoću izotropne elastičnosti [7].

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta - \theta_0) \quad (2)$$

Na slici 8. prikazani su shematski prikazi mjerenja naprezanja pomoću rendgenske difrakcije te različiti difrakcijski kutovi. Postoje dvije različite oznake difrakcijskih kutova koje se koriste u literaturi. Difrakcijski kut oznake θ predstavlja kut između okomice na difrakcijsku normalu i difraktirane X-zrake, a difrakcijski kut oznake 2θ predstavlja kut između produžetka upadne X-zrake u uzorku i difraktirane X-zrake.



Slika 8. Shematski prikazi mjerenja naprezanja pomoću rendgenske difrakcije te različiti difrakcijski kutovi: a) θ [7] i b) 2θ [8]

3.1. Metode mjerenja rendgenskom difrakcijom

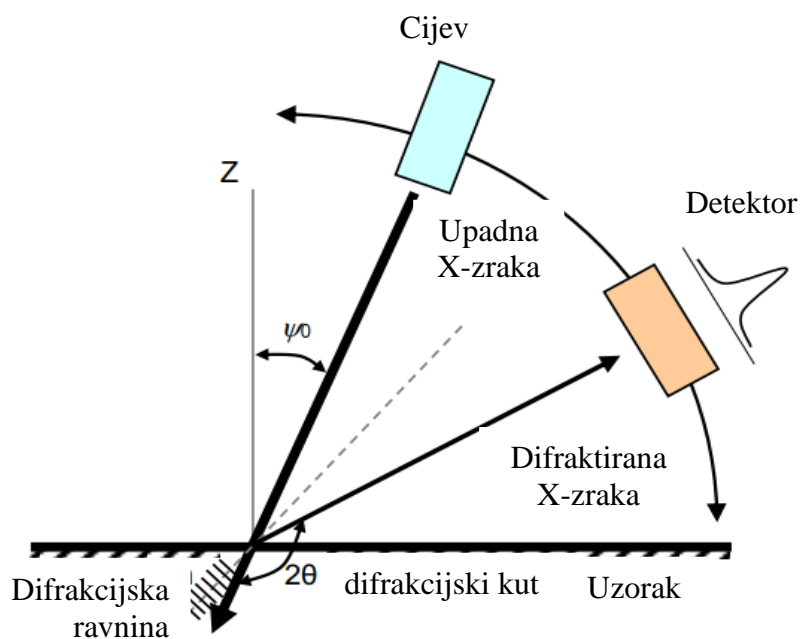
U mjerenju zaostalih naprezanja u polikristalima, $\sin^2\psi$ metoda se često koristi. Kako bi se zadovoljila potražnja mjerenja na licu mjesta, proizvedeno je nekoliko vrsta komercijalnih analizatora naprezanja. Ti uređaji su manji, lakši te brže mjere naprezanja što ih čini praktičnijim od prijašnjih verzija. Detektori X-zraka koji se koriste u analizatorima na temelju $\sin^2\psi$ metode su nultodimenzionalni ili jednodimenzionalni detektori. U posljednja dva desetljeća, dvodimenzionalni detektori poput slikovnih ploča IPs (engl. *imaging plates*) se sve više koriste u komercijalnim rendgenskim analizatorima naprezanja. Jedan od njih koristi IPs i usvaja metodu $\cos\alpha$ za određivanje naprezanja [7].

3.1.1 $\sin^2\psi$ metoda

Razmak između ravnina rešetke se povećava ili smanjuje ovisno o smjeru i kutu ravnine rešetke s obzirom na smjer naprezanja. U metodi $\sin^2\psi$, varijacija razmaka između ravnina rešetke otkriva se promjenom upadnog kuta X-zraka ψ_0 . U standardnom mjerenju naprezanja rendgenskom difrakcijom preporučuje se korištenje sedam različitih smjerova (kutova) upadnih X-zraka. Kutovi upada rendgenskih zraka i detektor za detektiranje difraktiranih rendgenskih zraka se tijekom mjerenja moraju mijenjati na način da ih se rotira oko mjesta zračenja. Da bi se postigla točnost rada tijekom mjerenja, ovakav sustav treba visoku stabilnost i stroge tolerancije prilikom postavljanja i tijekom procesa mjerenja [8].

U slučaju da zrna imaju preferiranu kristalografsku orijentaciju (što je najuobičajeniji slučaj) ili da su zrna relativno velika u usporedbi s područjem ozračenim rendgenskim zrakama, mjerenja i izračun zaostalih naprezanja korištenjem $\sin^2\psi$ metode su otežani budući da se gubi podudarnost između upadnih i difraktiranih rendgenskih zraka [8].

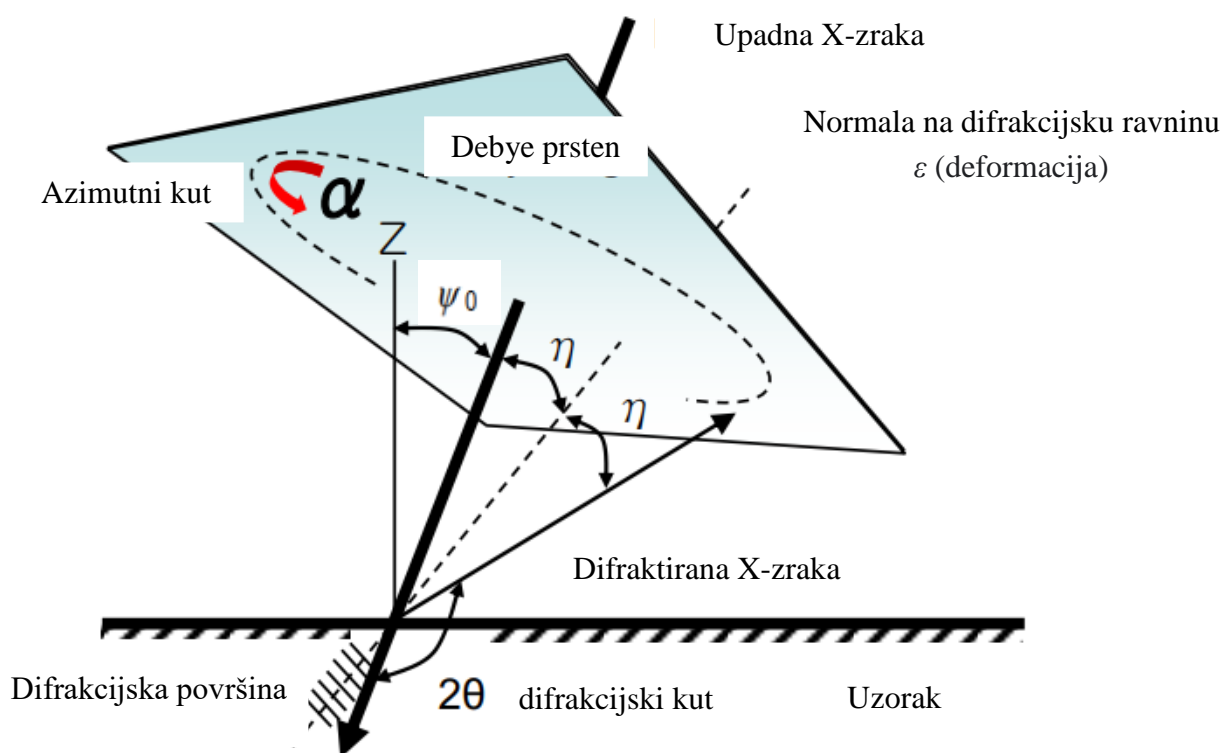
Na slici 9. prikazan je shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskim zrakama $\sin^2\psi$ metodom. Cijev koja proizvodi rendgenske zrake i detektor koji detektira difraktirane rendgenske zrake se rotiraju oko mjesta zračenja [8].



Slika 9. Shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja $\sin^2\psi$ metodom [8]

3.1.2. *Cosa* metoda

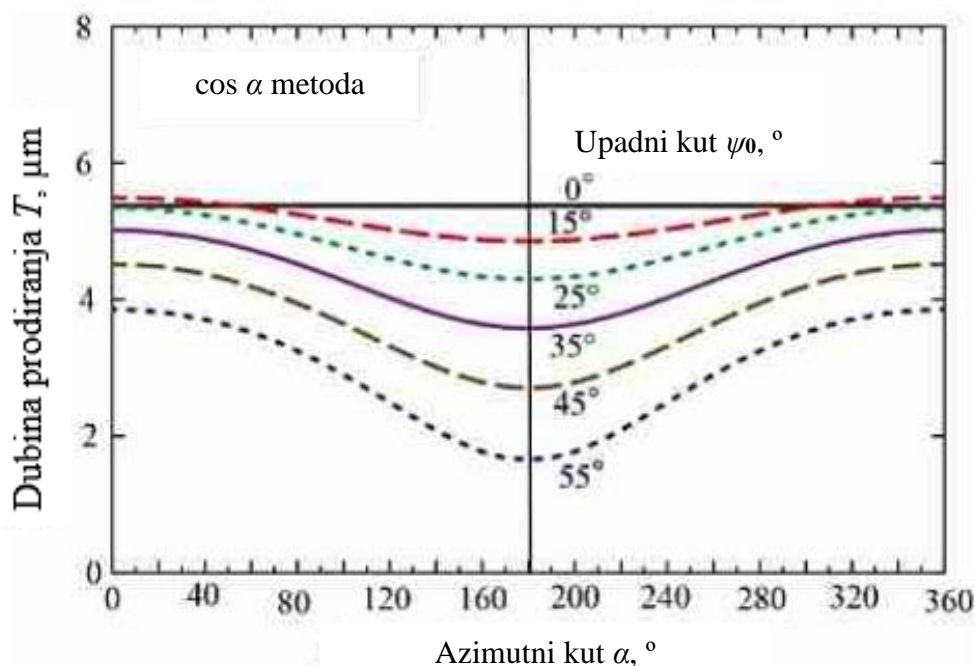
U $\cos\alpha$ metodi, rendgenske zrake se difraktiraju od polikristalne strukture uzorka u više smjerova pod 360° oko putanje upadnih X-zraka. Difraktirane zrake odmah detektira dvodimenzionalni detektor. Zaostalo naprezanje se određuje iz promjene difrakcijskog kuta 2θ zbog djelovanja zaostalog naprezanja na interplanarne udaljenosti unutar kristalne strukture zrna. Slika 10. prikazuje shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskim zrakama $\cos\alpha$ metodom [8].



Slika 10. Shematski prikaz mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskim zrakama $\cos\alpha$ metodom [8]

Azimutni kut α je kutna mjera u sferičnom koordinatnom sustavu Debye prstena, a predstavlja kut između dvaju dužina smještenih na prstenu. Obje dužine počinju u središtu prstena (točka upadnih X-zraka), a završavaju na obodu prstena. Prva dužina završava u referentnoj točki (koja je radi jednostavnosti dogovorena na nuli), a druga u točki gdje je detektirana difraktirana X-zraka. Raspon veličine azimutnog kuta je od $\alpha = 0^\circ$ do $\alpha = 360^\circ$.

$\text{Cos}\alpha$ metodom se mogu određivati ravninsko dvoosno stanje naprezanja i troosno stanje naprezanja. Zbog toga što je dubina prodiranja rendgenskih zraka u površinu plitka, naprezanje se u većini slučajeva može smatrati dvoosno, tj. da nema visinsku komponentu. Slika 11. prikazuje promjenu dubine prodiranja T u ovisnosti o upadnom kutu ψ_0 pri različitim azimutnim kutovima α . Dubina opada s povećanjem upadnog kuta, a maksimalni iznosi prodiranja se postižu pri azimutnim kutovima $\alpha = 0^\circ$ i $\alpha = 360^\circ$, a minimalni pri azimutnom kutu $\alpha = 180^\circ$ [7].



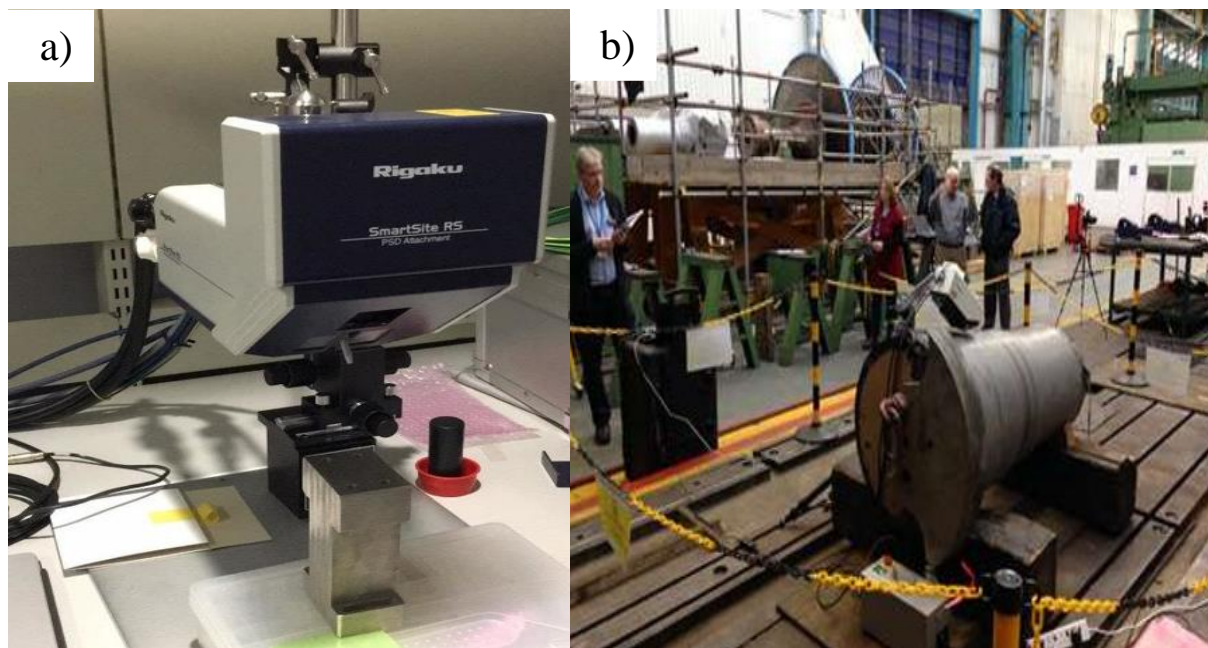
Slika 11. Promjena dubine prodiranja u ovisnosti o upadnom kutu ψ_0 pri različitim azimutnim kutovima α [7]

3.1.3. Prednosti cosa metode nad ostalim metodama

U usporedbi s drugim metodama mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskim zrakama, prednosti cosa metode koja koristi dvodimenzionalne detektore su sljedeće [7]:

- 1) Za određivanje naprezanja nije potrebna egzaktna vrijednost difrakcijskog kuta izmjerenog na uzorku koji nije deformiran.
- 2) Jednokratnim izlaganjem uzorka rendgenskim zrakama, ravninska normalna i posmična naprezanja se mogu dobiti iz nagiba $\text{cos}\alpha$ i $\text{sin}\alpha$ dijagrama. Linearnost ovih dijagrama ukazuje na pouzdanost izmjerenih vrijednosti naprezanja.

- 3) Zbog toga što se mjerenje može provesti jednokratnim izlaganjem uzorka rendgenskim zrakama, optički sustav je jednostavniji i ne zahtijeva dodatne mehanizme za skeniranje. Stoga, analizatori napreznja postaju manji, lakši i praktičniji za korištenje i za mjerenja na licu mjesta (npr. u laboratoriju) i za mjerenja na terenu (npr. u proizvodnoj hali) kao što je vidljivo na slici 12.



**Slika 12. Primjena uređaja za mjerenje zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom:
a) u laboratoriju [9] i b) u proizvodnoj hali [10]**

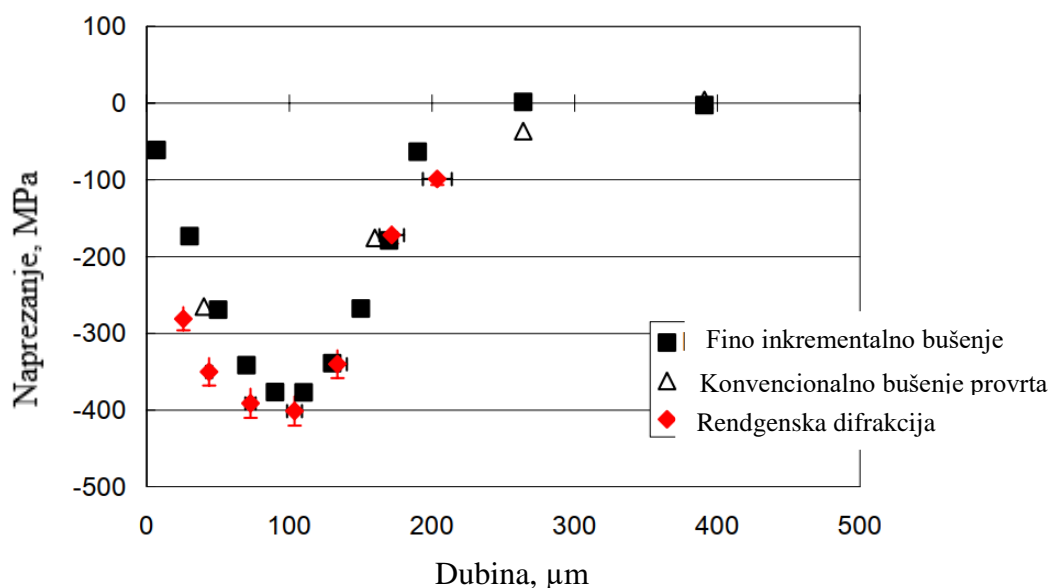
- 4) Vrijeme potrebno za provedbu jednog mjerenja je kraće zbog jednokratne ekspozicije te iznosi samo 60 s.
- 5) $\text{Cos}\alpha$ metoda je pogodna za mjerenje napreznja na lokalno malom području te na uskim dijelovima konstrukcija jer se ozračeno područje ne mijenja tijekom jedne ekspozicije.
- 6) Značajke Debye-Scherrer prstenova pružaju informacije o mikrostrukturi kao što su veličina zrna i tekstura.
- 7) Jednokratnom ekspozicijom je moguće istovremeno snimanje više difrakcija od sastavnih faza što je moguće primijeniti za određivanje količine zaostalog austenita u čelicima.

3.1.4. Pouzdanost izmjerene vrijednosti naprezanja $\cos\alpha$ metodom

Jedan od načina za procjenu pouzdanosti naprezanja je usporedba izmjerene vrijednosti naprezanja $\cos\alpha$ metodom s vrijednosti dobivenom nekom drugom metodom. Dokazano je da je točnost mjerenja naprezanja $\cos\alpha$ metodom ekvivalentna onoj dobivenom pomoću $\sin^2\psi$ metode za različite materijale, kao što su [7]:

- čelici
- nehrđajući čelici
- legure nikla
- legure aluminija.

Slika 13. prikazuje usporedbu vrijednosti izmjerenih rendgenskom difrakcijom (koja je nerazorna metoda) s vrijednostima dobivenih konvencionalnom i finom inkrementalnom metodom bušenja provrta (koje su polurazorne metode) na strojno obrađenom uzorku aluminija [11].

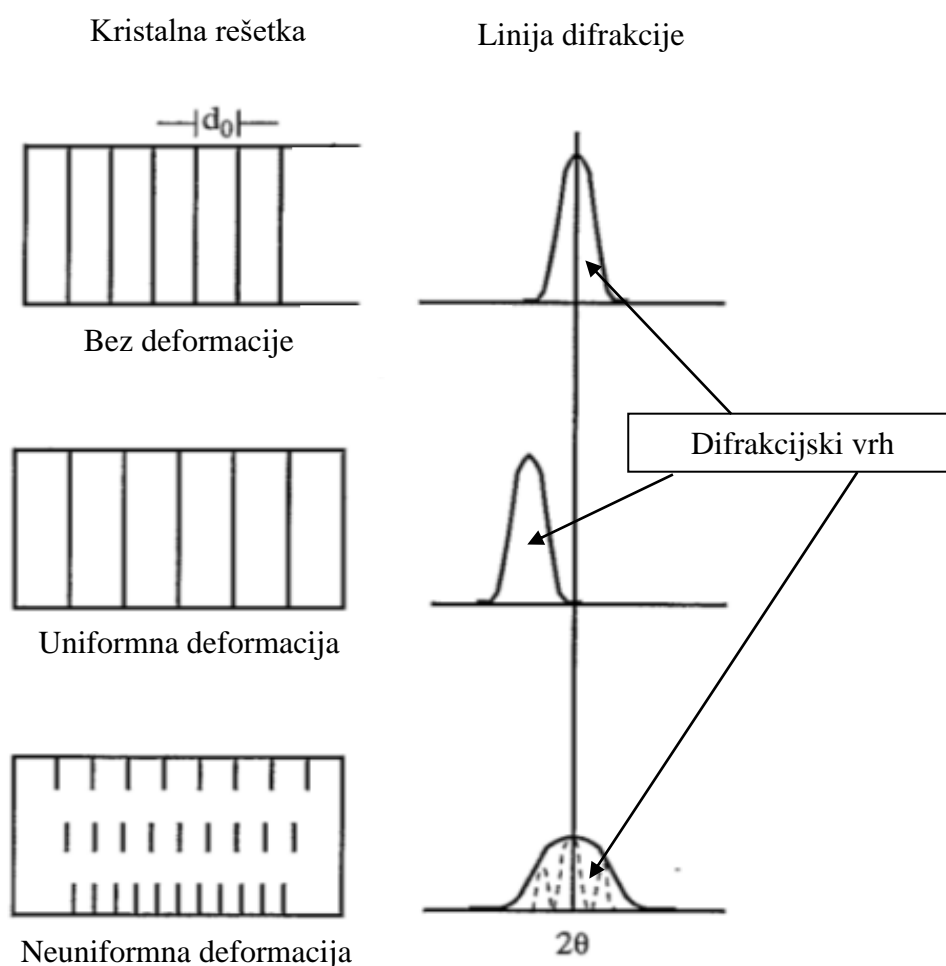


Slika 13. Usporedba vrijednosti izmjerenih rendgenskom difrakcijom s vrijednostima dobivenim metodama bušenja provrta [11]

Drugi način procjene pouzdanosti je mjerenje naprezanja na površini uzorka nakon ispitivanja savijanjem u četiri točke i uspoređivanje tih podataka s onima izračunatim iz primijenjenog opterećenja [7].

3.2. Problematika s uzorcima prilikom mjerenja napreznja rendgenskom difrakcijom

Pogreške u određivanju napreznja pomoću rendgenske difrakcije ovise o nekoliko faktora. Za opremu koja se koristi prilikom mjerenja napreznja rendgenskom difrakcijom, instrumentalni faktori poput poravnanja, središta rotacije i problema pozadinskih smetnji su od iznimne važnosti jer se difrakcijski kut 2θ mora odrediti precizno. S obzirom na određivanje razmaka rešetke d_0 , kemijski sastav materijala igra važnu ulogu tako što se promjenom kemijskog sastava može promijeniti zaostalo napreznje. Osim toga, prisutnost deformacija u uzorku može dovesti do pomaka i širenja difrakcijskog vrha kao što je prikazano na slici 14. [2].



Slika 14. Utjecaj uniformnih i neuniformnih deformacija na položaj i širinu difrakcijskog vrha: a) nedeformirani uzorak, b) uniformna deformacija unutar uzorka i c) neuniformna deformacija unutar uzorka [2]

3.2.1. Početna priprema uzorka

Prije bilo kakvog mjerenja zaostalih napreznja, potrebno je očistiti površinu uzorka na kojoj će se mjerenje provesti. Čišćenje bi se po mogućnosti trebalo provesti pranjem ili upotrebom sredstva za odmašćivanje. Mehaničke metode poput brušenja i strojne obrade treba izbjegavati jer one uvode dodatna površinska zaostala napreznja u uzorak koji se mjeri. Ovo je posebno važno jer je prodor X-zraka u većinu materijala u rasponu od 5 – 50 μm [11].

Ako je moguće, na uzorcima se treba mjeriti u stanju u kakvom su primljeni od proizvođača. Materijali koji bi se u nekom trenutku obojali se prvo trebaju izmjeriti u zaprimljenom stanju, budući da prisutnost sloja boje samo rezultira gubitkom intenziteta mjerenja. Međutim, slojevi boje mogu se ukloniti kemijskim putem ako je za to baš potrebno. Ako su mjerenja zaostalih napreznja potrebna na površini uzoraka koji pokazuju površinska oštećenja, tada može biti zahtijevano lagano brušenje ili elektropoliranje za dobivanje boljeg stanja površine. Naravno, uz rizik promjene stanja zaostalih napreznja uzorka [11].

Rezanje uzoraka bi se trebalo izbjegavati. Ako je rezanje neophodno, onda to treba izvesti pažljivo kako bi se izbjeglo mijenjanje postojećih zaostalih napreznja. EDM (engl. *Electro Discharge Machining*) je korisna metoda za rezanje materijala koja izbjegava značajno unošenje zaostalih napreznja, ali treba biti oprezan jer pretjeranim zagrijavanjem uzorka može doći do popuštanja zaostalih napreznja. Poželjno je pratiti promjenu zaostalih napreznja tijekom i nakon rezanja [11].

3.2.2. Sastav i homogenost uzorka

Razmak rešetki, koji se koristi za mjerenje napreznja u materijalu, se također može promijeniti kao rezultat promjene sastava unutar uzorka. Zbog toga, volumni sastav materijala treba biti konstantan unutar volumena koji se zrači. Glavni zahtjevi prilikom odabira materijala za rendgensko mjerenje zaostalih napreznja su da materijal mora biti kristalni ili polukristalni te da je difrakcijski kut 2θ u rasponu od 125 - 170° [11].

Ako je materijal višefazni, tada jedno izmjereno zaostalo naprezanje proizlazi samo iz jedne određene faze, a ukupno zaostalo naprezanje uzorka je povezano s naprezanjima u svakoj fazi i njihovim volumnim udjelima [11].

3.2.3. Veličina zrna

Veće veličine zrna uzrokuju probleme zbog činjenice da, unutar ozračenog volumena, samo nekoliko zrna pridonose difrakcijskom vrhu, tj. samo nekoliko zrna poštuje Braggov zakon. Velika veličina zrna znači manji broj zrna koja doprinose što rezultira smanjenjem intenziteta difrakcijskog vrha i manjom točnošću lokacije tog vrha [11].

Za slučaj $\sin^2\psi$ metode kod koje se upotrebljavaju nultodimenzionalni detektori, minimalni broj potrebnih zrna unutar ozračenog područja za dobivanje pouzdanih mjerenja naprezanja iznosi oko 1000 do 5000 zrna. Ovaj broj može ovisiti o pogrešnoj orijentaciji zrna i uvjetima mjerenja [7].

3.2.4. Veličina i oblik uzorka

Za bilo koji uzorak treba odabrati prikladno ravno područje za mjerenje zaostalih naprezanja. Kako bi se izbjegao učinak opuštanja zaostalih naprezanja, to područje treba biti barem jedan do dva milimetra udaljeno od ruba uzorka. Za mjerenje zaostalih naprezanja, oblik i veličina uzorka nisu kritični. Posebno za prijenosne sustave kod kojih ne postoji gornja granica veličine uzorka koji se mogu ispitivati jer se stroj prenosi do uzorka. Interakcija između upadnih i difraktiranih zraka s uzorkom mora biti bez blokiranja [11].

3.2.5. Hrapavost površine

S obzirom na to da se na površini ne smiju vršiti nikakve izmjene, određivanje zaostalih naprezanja se još uvijek mogu provoditi na hrapavijoj površini, Međutim, potrebno je pažljivo tumačenje rezultata, budući da će izmjerena zaostala naprezanja biti pod snažnijim utjecajem „viših“ područja hrapave površine [11].

3.2.6. Temperatura

Općenito, temperatura uzorka bi se trebala držati konstantnom tijekom mjerenja zaostalih naprezanja kako bi se izbjegle dodatne promjene u rešetci zbog toplinskog širenja materijala. Razlika od nekoliko °C vjerojatno neće utjecati na točnost mjerenja zaostalih naprezanja [11].

Ako se iz nekog razloga mjerenja zaostalih naprezanja moraju provoditi na povišenim temperaturama, onda je potrebno osigurati da temperatura bude konstantna i tijekom mjerenja i na samom uzorku. Zbog visoke temperature, uzorak treba biti relativno malen. Nadalje, znanje o temperaturnoj varijaciji elastičnih konstanti je potrebno radi pretvaranja izmjerenih deformacija u naprezanja [11].

3.2.7. Prevučeni uzorci

Prevučeni uzorci se mogu relativno jednostavno mjeriti difrakcijom X-zraka, ali pod uvjetom da se difrakcijski vrhovi povezani sa samim premazom mogu identificirati [11].

4. PROBLEMATIKA ZAVARLJIVOSTI VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA

Zavarljivost je jedan vrlo kompleksan pojam koji obuhvaća velik broj raznih parametara i objedinjuje ih u jednu cjelinu koja definira nekakav konačni proizvod. Ti parametri se radi pojednostavljenja mogu grupirati u tri glavna čimbenika, a to su: materijal, tehnologija i konstrukcija. Ukratko, treba brinuti o tome da li je odabrani materijal podoban za zavarivanje, da li je taj materijal moguće zavariti odabranom tehnologijom i kako će taj zavareni spoj utjecati na sigurnost konstrukcije [12].

Visokolegirani Cr-Ni čelici, koji se još nazivaju nehrđajući čelici, su zbog svojih svojstava našli široku upotrebu u proizvodnim procesima gdje postoje strogi zahtjevi za sigurnu proizvodnju i konzumaciju proizvoda poput hrane, pića, farmaceutskih proizvoda i slično. Ne samo da je nehrđajući čelik manje sklon fizičkim oštećenjima, već je i otporan na koroziju kao i na trošenje što rezultira smanjenjem troškova u smislu održavanja. Što se tiče ostalih svojstava, dobro je obradiv, izvrsno je zavarljiv te sadrži izvrsna mehanička svojstva uz odlične estetske karakteristike [13], [14].

Nehrđajući čelici se dijele prema njihovoj razlici u mikrostrukturi na [15]:

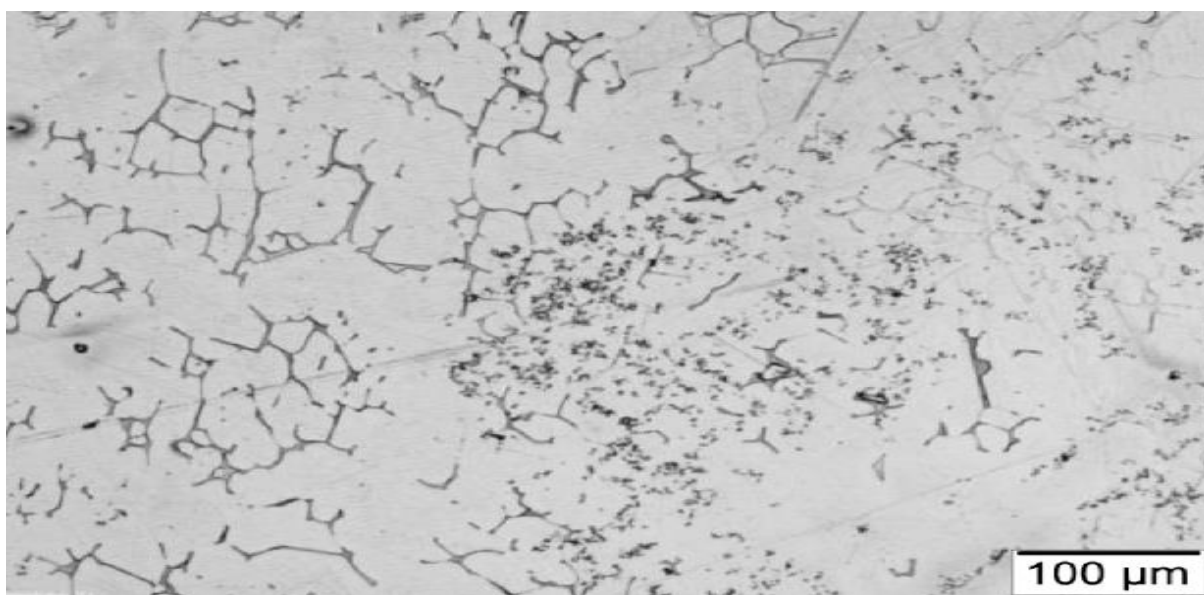
- austenitne nehrđajuće čelike
- feritne nehrđajuće čelike
- austenitno-feritne nehrđajuće čelike
- martenzitne nehrđajuće čelike.

Kako na korozijsku otpornost zavarenih spojeva od nehrđajućih čelika značajno utječe stanje njihove površine, čišćenje nakon zavarivanja je od značajne važnosti. Tijekom zavarivanja se na površini mogu pojaviti toplinska obojenja u obliku oksida koji se moraju ukloniti procesima poput četkanja, brušenja i elektropoliranja [15].

4.1. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Prema kemijskom sastavu austenitnih nehrđajućih čelika, oni sadrže najmanje 16,5 % kroma uz dovoljan postotak nikla i/ili mangana, ugljika i dušika za stvaranje austenitne mikrostrukture. Također mogu sadržavati dodatke drugih legiranih elemenata kao što su molibden, titanij, niobij, silicij, sumpor ili bakar za poboljšanje specifičnih svojstava poput obradivosti, otpornosti na koroziju i otpornosti na oksidaciju [15].

Mikrostrukture austenitnih nehrđajućih čelika (slika 15.) su regulirane ravnotežom feritnih i austenitnih stabilizirajućih elemenata te se iz ravnoteže tih elemenata može predvidjeti struktura koja će se formirati u metalu zavara. Glavni stabilizirajući elementi ferita su krom, molibden i silicij, dok su nikel, dušik, ugljik i mangan glavni elementi za stabilizaciju austenita. Austenitni čelici se sastoje od austenitne matrice koja može sadržavati male količine delta ferita koje se mogu smanjiti postupkom žarenja [15].



Slika 15. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [16]

Austenitni nehrđajućii čelici se dijele na dvije skupine, a to su [15]:

- 1) standardni austenitni nehrđajućii čelici
- 2) potpuno austenitni nehrđajućii čelici.

Većina standardnih austenitnih nehrđajućih čelika nisu potpuno austenitna, ali mogu tvoriti malu količinu delta ferita nakon zavarivanja bez dodatnog metala. Sadržaj ugljika u standardnim austenitnim nehrđajućim čelicima obično je manji od 0,06 % [15].

Potpuno austenitni nehrđajući čelici, zbog svojeg ravnotežno prilagođenog sastava (potpuno austenitne strukture u svakom trenutku), imaju specifična svojstva poput niske magnetske propusnosti (nemagnetičnosti), povećane otpornosti na koroziju i otpornosti na puzanje/oksidaciju pri visokim temperaturama. Superaustenitni nehrđajući čelici spadaju u potpuno austenitne nehrđajuće čelike [15].

Austenitni i superaustenitni nehrđajući čelici posjeduju izuzetno visoku otpornost na koroziju i zbog očuvanja te otpornosti zahtijevaju posebnu pažnju tijekom zavarivanja. Svi uobičajeni postupci zavarivanja navedeni u EN 1011-1 su prikladni za zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika, a to su [15]:

- 111 – REL
- 114 – samozaštićujuća praškom punjena žica
- 12 - EPP
- 131 – MIG
- 135 – MAG
- 136 – praškom punjena žica pri zaštiti aktivnog plina
- 137 – praškom punjena žica pri zaštiti inertnog plina
- 141 – TIG
- 15 – plazma.

Tijekom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, treba pripaziti da unos topline bude nizak kako bi se smanjio rizik od pojave deformacija, vrućih pukotina i senzibilizacije. Zbog ovih razloga je potrebno izbjegavati predgrijavanje površine austenitnih čelika kao i toplinsku obradu nakon zavarivanja PWHT (engl. *Post weld heat treatment*). Zbog svoje visoke duktilnosti i žilavosti, austenitni nehrđajući čelici su vrlo otporni na stvaranje hladnih pukotina nakon zavarivanja [15].

4.1.1. Deformacija

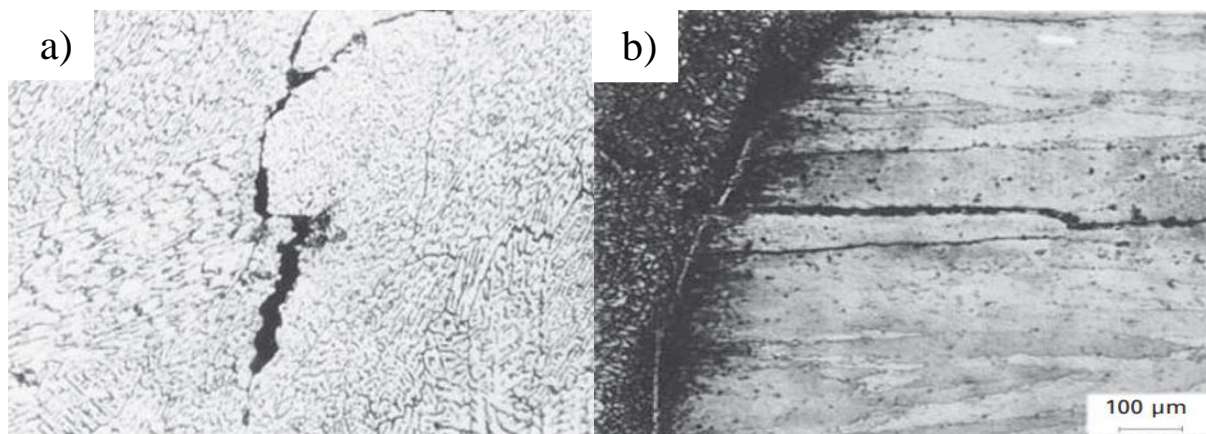
Deformacija zavarenog spoja nastaje zbog neuniformnog širenja i skupljanja metala zavara tijekom zavarivanja. Kod austenitnih nehrđajućih čelika, ova pojava je puno izraženija nego kod ugljičnih i drugih nehrđajućih čelika zbog niže toplinske provodljivosti i povećanog toplinskog širenja. Deformacija zavarenog spoja se može minimizirati smanjenjem volumena metala zavara, smanjenjem unosa topline, smanjenjem broja prolaza zavarivanja te stezanjem [15].

4.1.2. Tople pukotine

Zavareni spojevi od austenitnog nehrđajućeg čelika su podložni pojavi toplih pukotina (slika 16.), što uključuje pucanje tijekom skrućivanja (engl. *solidification cracking*) i pucanje u području zone utjecaja topline ili osnovnog materijala (engl. *liquation cracking*) [15].

Prihvaćena teorija pucanja tijekom skrućivanja u zavarenim spojevima je da koherentna mreža krutine odvojena tankim filmovima kapljevine puca zbog vlačnih naprezanja koja proizlaze iz toplinske kontrakcije. Ako je dovoljno kapljevito materijala prisutno u blizini formiranja pukotina, pukotine se mogu ispuniti i zaliječiti. Ako dovoljno kapljevito materijala nije prisutno, pojavljuju se tople pukotine [1].

Pucanje u području zone utjecaja topline ili osnovnog materijala je povezano s nečistoćama (poput sumpora i fosfora) koje se segregiraju do granice zrna kako bi formirali faze niskog tališta. Ta područja imaju nisku duktilnost kojom se ne mogu oduprijeti vlačnim naprezanjima [1], [15].



Slika 16. Tople pukotine: a) tijekom skrućivanja i b) u području u zone utjecaja topline ili osnovnog materijala [17]

Tople pukotine ovise i o nekim parametrima zavarivanja poput jakosti struje i brzine zavarivanja zbog čega je potrebno naći optimalne uvjete zavarivanja. Superaustenitni nehrđajući čelici su podložniji pojavi vrućih pukotina od austenitnih nehrđajućih čelika jer se oni tijekom faze skrućivanja mogu skrutnuti samo u austenitnu fazu dok se austenitni nehrđajući čelici mogu skrutnuti u fazu koja sadrži ferit koji je otporniji na pojavu vrućih pukotina. Zbog toga se u kemijskom sastavu standardnih austenitnih nehrđajućih čelika želi postići sadržaj ferita veći od 3 FN (engl. *ferrite number*) [15].

Pojava toplih pukotina se može izbjeći na slijedeće načine [15]:

- za standardne austenitne nehrđajuće čelike odabrati dodatne materijale s obzirom na sadržaj ferita između 3 FN i 15 FN
- za potpuno austenitne nehrđajuće čelike odabrati dodatne materijale s niskim razinama nečistoća te povećanim sadržajem mangana
- osigurati optimalnu čistoću
- smanjiti stezanje spoja
- koristiti male unose topline
- izbjegavati široke bazene taline
- smanjiti međuprolaznu temperaturu (maksimalno 150 °C).

4.1.3. Senzibilizacija

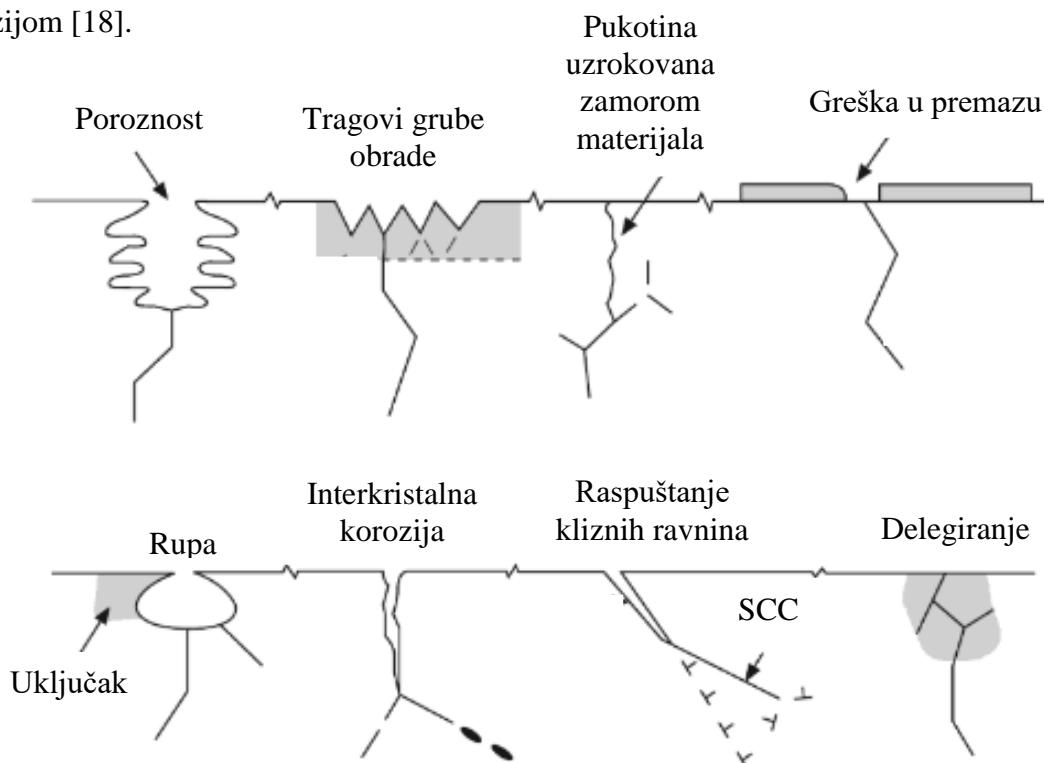
Austenitni nehrđajući čelici koji sadrže više od 0,1 % ugljika su često osjetljivi na interkristalnu koroziju u području zone utjecaja topline bilo kojeg zavara. Fenomen je poznat kao senzibilizacija (zbog načina na koji legura postaje osjetljiva na korozivno djelovanje) ili propadanje zavara (zbog načina na koji je osjetljivo područje u zoni utjecaja topline izjedeno korozijom). Senzibilizacija je uzrokovana precipitacijom karbida duž granica zrna čime se to područje osiromašuje kromom i rezultira smanjenjem korozijske otpornosti. Brzina stvaranja karbida je najbrža u rasponu temperatura između 600 i 850 °C [1].

Rizik od senzibilizacije se svodi na minimum korištenjem varijanti austenitnih nehrđajućih čelika s niskim udjelom ugljika ($< 0,03\%$) ili korištenjem stabiliziranih (titanij, niobij, tantal) čelika i dodatnih materijala [15].

4.1.4. Napetosna korozija

Do pucanja uzrokovanih napetosnom korozijom SCC (engl. *Stress corrosion cracking*) može doći u austenitnim nehrđajućim čelicima kad su izloženi kombinacijama nepovoljnih uvjeta, uključujući agresivne medije, povišene temperature i utjecaj vlačnih naprezanja. Zaostala naprezanja od zavarivanja ili nekakve mehaničke obrade mogu često biti dovoljni za uzrokovanje napetosne korozije, ako su i okolišni kriteriji nepovoljni. Stoga treba osigurati da se tijekom proizvodnje zaostala naprezanja svedu na minimum kako bi se smanjila osjetljivost na ovaj oblik korozije [1].

Pukotine uzrokovane napetosnom korozijom mogu nastati i na mjestima gdje već postoji nekakva nepravilnost poput drugog oblika korozije ili pukotine. Slika 17. prikazuje shematski prikaz najčešćih mjesta na kojima se pojavljuju pukotine uzrokovane napetosnom korozijom [18].

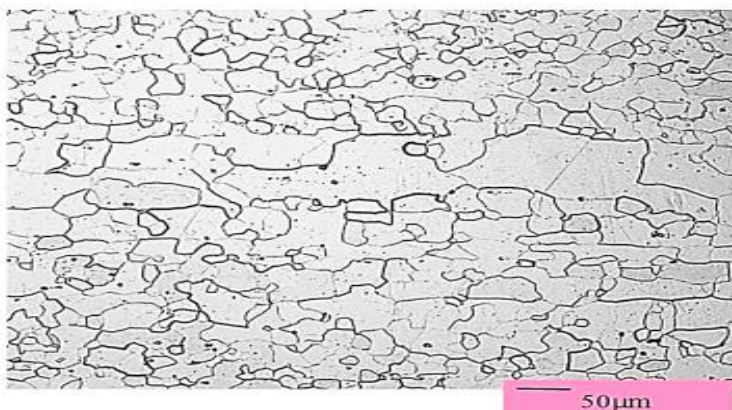


Slika 17. Shematski prikaz najčešćih mjesta na kojima se pojavljuju pukotine uzrokovane napetosnom korozijom [18]

4.2. Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika

Prema kemijskom sastavu feritnih nehrđajućih čelika, oni općenito sadrže između 10,5 % i 30 % kroma i do 0,08 % ugljika. Neki tipovi feritnih nehrđajućih čelika sadrže jedan ili više sljedećih elemenata: do 4,5 % molibdena, 1,6 % nikla, 2,1 % aluminija i titanija, niobija/tantala i cirkonija za stabilizaciju [15].

Ovisno o omjeru tvorbenih elemenata ferita i austenita, mikrostruktura ovih čelika sastoji se od ferita (potpuno feritna mikrostruktura) ili od ferita s martenzitom (poluferitna mikrostruktura). Potpuno feritna mikrostruktura (slika 18.) je osjetljiva na rast zrna pri temperaturama od oko 950 °C i višim što rezultira smanjenjem žilavosti. Rast zrna ovisi o najvišoj temperaturi zavarivanja, vremenu provedenom na toj temperaturi i broju prolaza tijekom zavarivanja. Zbog toga se dijelovi od potpuno feritnog nehrđajućeg čelika mogu zavarivati samo do debljine stijenke od maksimalno 2,5 mm. Zavari u debljim dijelovima poluferitnih nehrđajućih čelika pokazuju poboljšanu žilavost u odnosu na potpuno feritne nehrđajuće čelike. Kada se brzo ohlade s temperature zavarivanja, kromovi karbidi se talože u osnovni i odgovarajući metal zavara što rezultira smanjenjem duktilnosti i smanjenjem otpornosti na interkristalnu koroziju [15].



Slika 18. Mikrostruktura potpuno feritnog nehrđajućeg čelika [19]

Postupci zavarivanja prikladni za zavarivanje feritnih nehrđajućih čelika su [15]:

- 111 – REL
- 131 – MIG
- 135 – MAG
- 141 – TIG
- 15 – plazma.

Tijekom zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika, treba pripaziti da unos topline bude što manji jer su ti čelici osjetljivi na prekomjerni rast zrna. Kod poluferitnih nehrđajućih čelika s debljinom iznad 3 mm, temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura trebaju iznositi između 200 °C i 300 °C [15].

Što se tiče PWHT, žarenje u rasponu temperatura od 700 °C do 800 °C poboljšava duktilnost i smanjuje zaostala naprezanja. Feritni nehrđajući čelici pate od interkristalne korozije, osim ako se ne izbjegne osiromašenje kroma izuzetno niskim sadržajem ugljika i dušika, stabilizacijom ili žarenjem. Deformacija kod feritnih nehrđajućih čelika nije toliko izražena kao kod austenitnih. Tople pukotine kod feritnih nehrđajućih čelika obično nisu problem, ali zato hladne pukotine i vodikove pukotine jesu [15].

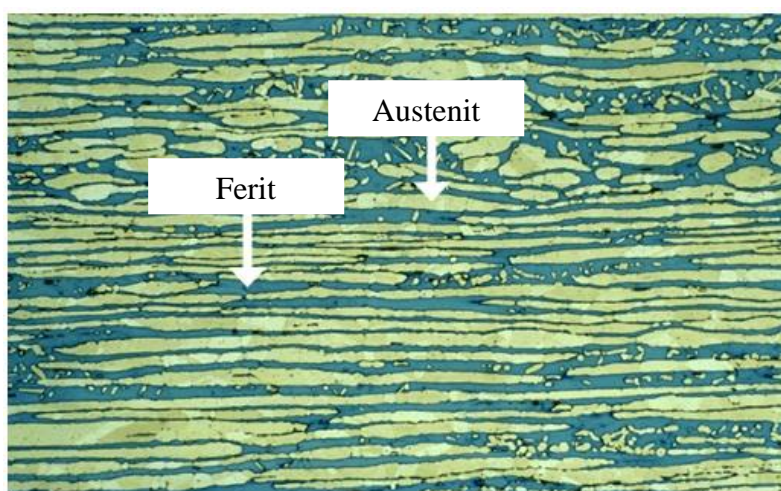
4.2.1. Hladne pukotine i vodikove pukotine

Do pojave hladnih i vodikovih pukotina dolazi primarno zbog utjecaja vlačnih naprezanja na martenzitnu mikrostrukturu koju karakterizira niska duktilnost. Obje vrste pukotina se javljaju dosta kasno nakon završetka procesa zavarivanja, tj. javljaju se kad proces solidifikacije završi i kad se materijal ohladi na temperaturu blisku sobnoj temperaturi. Glavna razlika je u tome što je kod vodikovih pukotina potrebna prisutnost vodika. Vodik, otopljen u čeliku, ima tendenciju uzrokovati krhkost materijala. Vodik se procesom zavarivanja može unijeti u zavar (kao sam vodik ili kao vodena para u zaštitnom plinu) preko dodatnog materijala, preko površine zavarenog spoja (disocijacijom bilo kojeg oblika vode) ili iz okoline (vlažnost ili kiša). Bez obzira gdje se nalazi u zavarenom spoju, vodik ima podmuklo ponašanje migriranja uz gradijent vlačnog naprezanja u područje najvećeg naprezanja gdje inducira pukotine [1].

4.3. Zavarljivost austenitno-feritnih nehrđajućih čelika

Austenitno-feritni nehrđajući čelici, poznati još i kao duplex nehrđajući čelici, općenito sadrže 21 % do 28 % kroma, 3,5 % do 8 % nikla, 0,1 % do 4,5 % molibdena i 0,05 % do 0,35 % dušika. Duplex nehrđajući čelici se sastoje od feritne matrice s približno 45 % do 60 % austenita (slika 19.) [15].

Austenitno-feritni nehrđajući čelici se dijele na tri skupine: niskolegirani, srednjelegirani i visokolegirani duplex nehrđajući čelici. Niskolegirane duplex nehrđajuće čelike karakterizira vrlo nizak sadržaj molibdena. Njihova glavna upotreba je kao zamjena uobičajenim austenitnim nehrđajućim čelicima tamo gdje oni pucaju uslijed naprezanja uzrokovanih korozijom. Srednjelegirani duplex nehrđajući čelici su najčešće korišteni duplex nehrđajući čelici. To su čelici opće namjene koji se uglavnom koriste za kemijske, petrokemijske i offshore primjene. Visokolegirani duplex nehrđajući čelici, u usporedbi sa srednjelegiranim, sadrže više kroma, molibdena i dušika te se zbog toga koriste u izrazito korozivnim okruženjima [15].



Slika 19. Mikrostruktura duplex nehrđajućeg čelika [20]

Postupci zavarivanja prikladni za zavarivanje duplex nehrđajućih čelika su isti kao i ranije navedeni postupci za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. Unos topline za duplex nehrđajuće čelike mora biti unutar određenih granica. Premali unos topline dovodi do velike brzine hlađenja što može rezultirati visokim razinama ferita, a preveliki unos topline može rezultirati precipitacijom interkristalnih faza [1].

Niskolegirane i srednjelegirane vrste se zavaruju s unosom topline u rasponu od 0,5 kJ/mm do 2,5 kJ/mm s međuprolaznom temperaturom nižom od 250 °C. Za visokolegirane vrste, unos topline iznosi od 0,2 kJ/mm do 1,5 kJ/mm s međuprolaznom temperaturom između 100 °C i 150 °C. PWHT nije potreban za ovu vrstu nehrđajućih čelika [15].

Deformacija kod duplex nehrđajućih čelika nije toliko izražena kao kod austenitnih, ali ih je teže izravnati. Zbog ferita u mikrostrukturi, duplex nehrđajući čelici imaju nisku osjetljivost na tople pukotine. Na drugu stranu, zbog previše ferita se mogu pojaviti vodikove pukotine. Dobra otpornost na rupičastu i napetosnu koroziju im je povezana s njihovom mikrostrukturom i kemijskim sastavom. Duplex nehrđajući čelici s visokim udjelom dušika su skloniji stvaranju poroznosti nego austenitni [15].

4.4. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika

Prema svom kemijskom sastavu, martenzitni nehrđajući čelici sadrže između 13 % i 17 % kroma s do 4 % nikla i do 1 % ugljika te se mogu podijeliti u tri različite vrste: martenzitni nehrđajući čelici, martenzitno-austenitni nehrđajući čelici i precipitacijsko očvršnuti martenzitni nehrđajući čelici. Martenzitni nehrđajući čelici sadrže potpuno martenzitnu mikrostrukturu (slika 20.) na sobnoj temperaturi što ih čini vrlo tvrdim i krhkim. Kaljenjem se ti problemi eliminiraju tako što im se poboljšava duktilnost i žilavost, ali smanjuje vlačna čvrstoća. Martenzitno-austenitne nehrđajuće čelike karakterizira niska razina ugljika (manje od 0,1 %) zbog koje u martenzitnoj matrici sadrže 5 % do 25 % austenita. Rezultat takve strukture je poboljšana duktilnost, ali smanjena tvrdoća i čvrstoća. Precipitacijsko očvršnuti martenzitni nehrđajući čelici se dobivaju na način da se martenzitni nehrđajući čelici legiraju s bakrom, titanijem, niobijem, aluminijem i molibdenom u svrhu precipitacijskog očvršćivanja što rezultira s povećanjem čvrstoće od otprilike 50 % [15].



Slika 20. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [21]

Postupci zavarivanja koji se općenito koriste za zavarivanje duplex nehrđajućih čelika su REL (111) i TIG (141). Za specifične primjene, postupci EPP (12), MIG (131), MAG (135) i plazma (15) se mogu koristiti. Kod zavarivanja ove vrste nehrđajućeg čelika treba izbjegavati pretjerano visoke ili pretjerano niste unose topline. Normalan unos topline kod REL-a iznosi od 0,5 kJ/mm do 2,5 kJ/mm. Martenzitni nehrđajući čelici se obavezno predgrijavaju u rasponu temperatura između 200 °C i 300 °C. Predgrijavanje kod martenzitno-austenitnih čelika debljina manjih od 8 mm nije obavezno, dok se kod debljih dijelova predgrijavanje provodi između 100 °C i 200 °C [15].

Precipitacijsko očvrnuti martenzitni nehrđajući čelici se ne predgrijavaju. Martenzitni nehrđajući čelici, ako su zavareni s austenitnim dodatnim materijalom, obično ne zahtijevaju PWHT. Ako su zavareni s martenzitnih dodatnim materijalom, PWHT se provodi kako bi se postigla optimalna svojstva. Martenzitno-austenitni nehrđajući čelici ne zahtijevaju PWHT. Zavarivanje precipitacijsko očvrnutih martenzitnih čelika se provodi stanju tretiranom otopinom koja služi kao PWHT [15].

Deformacija kod martenzitnih nehrđajućih čelika nije toliko izražena kao kod austenitnih. Ovi nehrđajući čelici imaju nisku osjetljivost na tople pukotine. Podložnost hladnim pukotinama raste s povećanjem sadržaja ugljika, a smanjuje s predgrijavanjem. Martenzitno-austenitni nehrđajući čelici su manije osjetljiviji na hladne pukotine od ostalih vrsta. Otpornost na koroziju općenito je niža u usporedbi s austenitnim nehrđajućim čelicima. Martenzitne vrste su podložne rupičastoj koroziji. Ovi čelici imaju visok otpor na trošenje i kavitaciju. Korozijska otpornost martenzitno-austenitnih vrsta je bolja nego kod martenzitnih vrsta [15].

4.5. Dodatni materijali

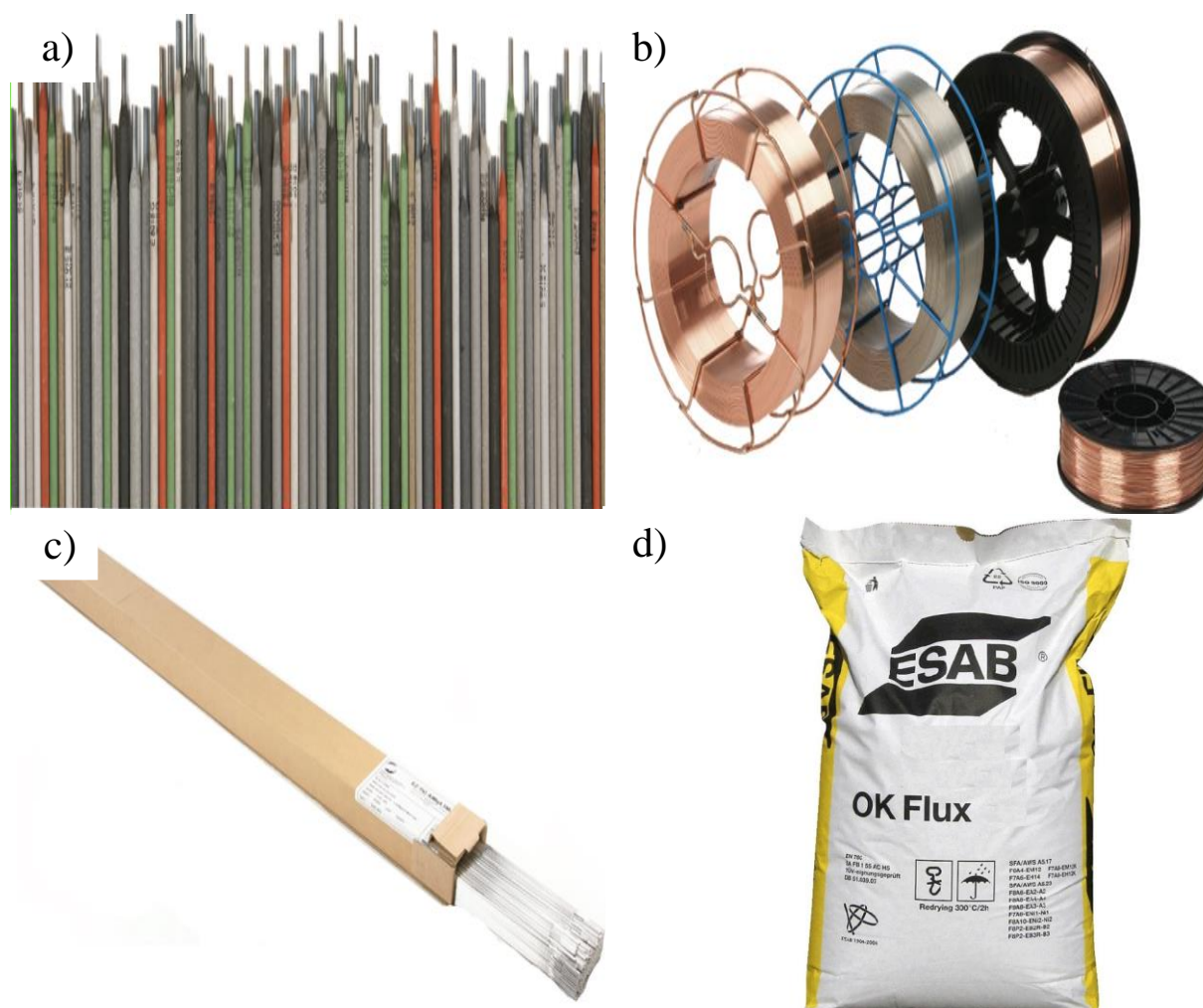
Unutar zavarivanja taljenjem, specifični procesi se mogu podklasificirati prema tome je li dodatni materijal potreban za provođenje zavarivanja i ako jest, je li on istog ili različitog sastava kao osnovni materijal. Kada kod procesa zavarivanja dodatni materijal nije potreban, onda se taj proces naziva autogeni proces. Izvor materijala potrebnog za popunjavanje praznina nastalih kod pripreme spoja dolazi od samog otopljenog osnovnog materijala. Kako bi kod autogenih procesa zavareni spojevi bili kvalitetni i sigurni, osnovni materijali koji čine spoj moraju biti vrlo kompatibilni. Priprema spoja kod ovih procesa igra vitalnu ulogu [1].

Kada je kod procesa zavarivanja dodatni materijal potreban, onda se ti procesi nazivaju homogeni i heterogeni. Da bi proces bio homogen, svi dijelovi koji čine zavareni spoj moraju imati isti sastav. Ako su elementi koji čine zavareni spoj različitog sastava, dodatni materijal mora biti kompatibilan sa svim tim elementima i onda se taj proces naziva heterogenim. Kemijski sastav dodatnog materijala obično je blago više legiran u odnosu na osnovni materijal, kako bi se optimizirala otpornost na koroziju kompenziranjem učinka segregacije, pojave uključaka te pojave površinskih nesavršenosti u metalu zavara [1].

Dodatni materijali su često potrebni u zavarivanju kako bi se nadoknadio volumen u zavarenom spoju koji kompenzira proces skupljanja koji gotovo uvijek prati skrućivanje rastaljenog metala [1].

Dodatni materijali za zavarivanje (slika 21.) općenito dolaze u obliku ovisnom o postupku zavarivanja koji se koristi i stupnju automatizacije tog postupka, a to su [22]:

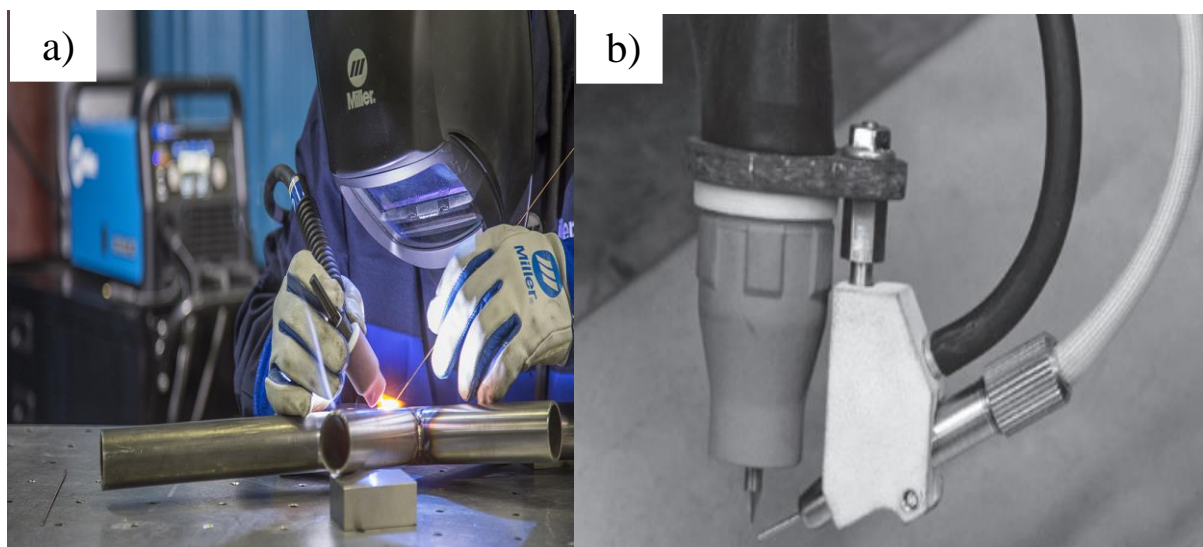
- obložene elektrode
- žice (metalom ili praškom punjene)
- šipke
- prašak.



Slika 21. Dodatni materijali za zavarivanja: a) obložene elektrode [23], b) žice [23], c) šipke [23] i d) prašak [24]

4.5.1. Dodatni materijali kod TIG postupka zavarivanja

Dodatni materijali koji se koriste kod TIG postupka zavarivanja dolaze u obliku ovisnom o stupnju automatiziranosti postupka. Kod ručnog načina zavarivanja, zavarivač u jednoj ruci drži pištolj za zavarivanje koji sadrži netaljivu volframovu elektrodu, a u drugoj ruci dodatni materijal u obliku šipke. Kod automatiziranog načina zavarivanja, dodatni materijal u obliku žice se mehanizirano dovodi do rastaljenog metala u hladnom ili predgrijanom stanju. Različiti načini dovođenja dodatnog materijala prikazani su na slici 22. Automatizirani način dovođenja dodatnog materijala omogućuje veći depozit što rezultira znatnim povećanjem produktivnosti procesa [25].



Slika 22. Različiti načini dovođenja dodatnog materijala: a) ručno [26] i b) automatizirano [25]

4.5.2. Dodatni materijali kod MIG postupka zavarivanja

Dodatni materijali koji se koriste kod MIG postupka zavarivanja uvijek dolaze u obliku konstantno dobavljane žice. Dodavanje žice kod MIG postupka zavarivanja se provodi identično neovisno radi li se o ručnom ili automatiziranom načinu zavarivanja. Žica se, iz uređaja za dodavanje žice (koji se sastoji od bubnja za namatanje, permanentnog magnetnog motora i specijalnih pogonskih valjaka), kroz izolirani polikabel i pištolj za zavarivanje dovodi do rastaljenog metala. Primjer uređaja za dodavanje žice prikazan je na slici 23. [22]



Slika 23. Uređaj za dodavanje žice slikan u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

4.6. Zaštitni plinovi

Tijekom elektrolučnih postupaka zavarivanja dolazi do reakcije između rastaljenog metala i atmosferskih plinova što negativno utječe na estetiku i svojstva zavara. Kako bi se spriječili ti negativni utjecaji, rastaljeni metal se od atmosferskog utjecaja štiti uz pomoć zaštitnih plinova. Zaštitni plinovi također pomažu kod uspostavljanja i održavanja električnog luka. Tijekom zavarivanja reagiraju s dodatnim materijalom s čime pridonose strukturalnim promjenama u metalu zavara i utječu na svojstva poput korozijske postojanosti i čvrstoće [22].

Pri izboru zaštitnog plina kod zavarivanja se osvrćemo na kriterije poput vrste postupka zavarivanja, debljine i stanja osnovnog materijala (prisutnost korozije ili oksida na površini), željenih mehaničkih svojstava zavara, položaja zavarivanja i cijene. Razumijevanjem ponašanja i utjecaja zaštitnih plinova se olakšava njihov izbor. Prema vrsti zaštitnih plinova, oni se mogu podijeliti na [22]:

- pojedinačne plinove
- dvokomponentne plinske mješavine
- trokomponentne plinske mješavine
- četverokomponentne plinske mješavine.

Kao samostalni zaštitni plinovi se koriste argon, helij, i ugljični dioksid dok se kisik, vodik i dušik koriste u malim postotcima u zaštitnim plinskim mješavinama jer bi njihova pretjerana prisutnost donijela više štete nego koristi [22].

Kod zavarivanja cijevi i spremnika od ugljičnih i nehrđajućih čelika, zaštita korijena zavara formir plinom je obavezna radi osiguranja korozijske postojanosti tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Korijen zavara i zona utjecaja topline se ispiru zaštitnim formir plinom koji istiskuje atmosferu koja sadrži kisik. Formir plinovi su najčešće dvokomponentne plinske mješavine s oko 90 % dušika i 10 % vodika. Formiranje korijena zavara može se provesti i s trokomponentnim plinskim mješavinama argona, vodika i dušika [27].

4.6.1. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja

Zaštitni plinovi koji se najčešće koriste kod zavarivanja TIG postupkom su argon, helij i njihova kombinacija. U nekim slučajevima dušik i/ili vodik se dodaju radi ostvarenja specifičnih svojstava [28].

Argon je najkorišteniji inertni plin današnjice jer se može koristiti i samostalno i u kombinaciji s drugim plinovima u praktički svim elektrolučnim procesima zavarivanja. Argon je plin bez boje, mirisa i okusa koji nije otrovan ni zapaljiv. Karakterizira ga niska energija ionizacije koja doprinosi uspostavljanju i održavanju električnog luka. Pošto je otprilike 1,4 puta gušći od zraka, kad izađe iz sapnice potiskuje zrak i štiti kupku rastaljenog metala. Helij je inertni plin manje gustoće (otprilike 14% gustoće zraka) i mnogo veće cijene od argona zbog čega se u Europi gotovo i ne koristi. Zbog svoje velike toplinske vodljivosti, u zavarivanju se koristi tamo gdje je potreban veliki unos topline kako bi se omogućila veća brzina zavarivanja i dubina provara [22]. Tablica 1. prikazuje usporedbu karakteristika zavarivanja između argona, plinske mješavine argon - helij i helija.

Tablica 1. Usporedba karakteristika zavarivanja između argona, plinske mješavine argon – helij i helija [25]

| Karakteristika | Argon | Plinska mješavina argon-helij | Helij |
|--------------------|----------------|-------------------------------|------------------------|
| Brzina zavarivanja | manja | veća od 100 % argon | veća |
| Penetracija | manja | veća od 100 % argon | veća |
| Čišćenje oksida | dobro | sličnije 100 % argonu | loše |
| Uspostava luka | laka | bolja od 100 % helij | otežana |
| Stabilnost luka | dobra | bolja od 100 % helij | niža kod manjih struja |
| Oblik luka | uži, fokusiran | uži od 100 % helij | širi |
| Napon luka | manji | srednji | veći |
| Protok | manji | veći od 100 % argon | veći |
| Cijena | niža | veća od 100 % argon | veća od 100 % argon |

Dušik se koristi kod zavarivanja duplex nehrđajućih čelika radi poboljšavanja reformacije austenita. Dodatkom vodika u mješavine zaštitnih plinova se omogućuju veće brzine zavarivanja, dok redukcijaska narav vodika rezultira čistim zavarenim spojevima [15].

4.6.2. Zaštitni plinovi kod MIG postupka zavarivanja

Osnovni zaštitni plinovi koji se koriste kod zavarivanja MIG postupkom, kao i kod TIG postupka, su argon, helij i njihova kombinacija. Glavna razlika je u tome što se kod MIG postupka osnovnim plinovima dodaju manje količine kisika i ugljičnog dioksida [28].

Kisik je plin bez boje i mirisa koji je neotrovan i nezapaljiv. Kod zavarivanja povećava stabilnost električnog luka te smanjuje površinsku napetost. Dodavanjem kisika u rasponu od 1 % do 5 % se ubrzava stvaranje kapljica dodatnog materijala, smanjuje se njihov promjer i površina zavara je ravnija. Dodatkom argonu se povećava stabilnost luka i poboljšava oblikovanje šava zavara [22].

Dodavanjem ugljičnog dioksida u plinsku mješavinu s argonom, zbog njegovog velikog oksidacijskog potencijala, rezultira formiranjem dubljeg i šireg zavara te stvaranjem više troske na površini zavara. Ugljični dioksid je lako nabavljiv i ima nisku cijenu, ali to nužno ne rezultira većom ekonomskom isplativošću radi čimbenika poput prskanja. Uklanjanje tragova prskanja povećava i otpadnih plinova povećavaju cijenu zavara. Važno je napomenuti da su argon – ugljični dioksid najkorištenije dvokomponentne plinske mješavine jer podržavaju sve četiri tradicionalne metode prijenosa metala [22].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u svrhu određivanja i usporedbe zaostalih naprezanja pri zavarivanju ploča od visokolegiranog Cr-Ni čelika TIG i MIG postupcima zavarivanja. Eksperiment je proveden u laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

5.1. Zavarivanje uzorka TIG postupkom

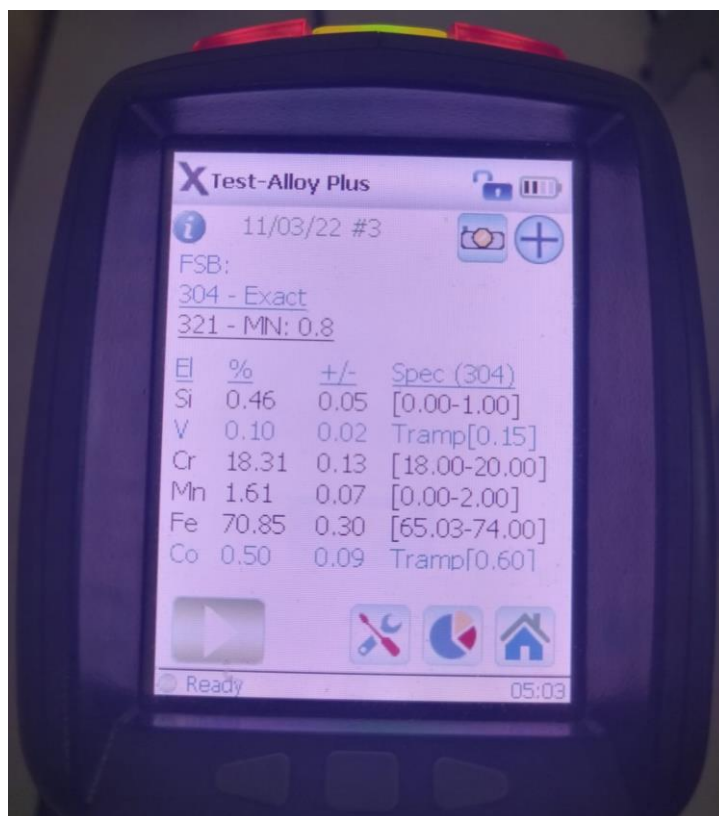
Zavarivanje uzorka TIG postupkom provedeno je na MagicWave 230i izvoru struje za zavarivanje proizvođača Fronius. Na slici 24. prikazan je navedeni uređaj i pripadajuća identifikacijska pločica.



Slika 24. Izvor struje za zavarivanje MagicWave 230i i pripadajuća identifikacijska pločica

5.1.1. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal pri zavarivanju su korištene ploče od austenitnog nehrđajućeg čelika 304 debljine od 11 mm. Ploče su izrezane na duljinu od 14,8 cm. Kemijski sastav osnovnog materijala prikazan je na slici 25., a mehanička i fizička svojstva osnovnog materijala u tablici 2.



Slika 25. Kemijski sastav ploča od austenitnog nehrđajućeg čelika 304

Tablica 2. Mehanička i fizička svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika 304 [29]

| Svojstva | Iznos |
|----------------------------|-----------|
| Vlačna čvrstoća, MPa | 520 - 720 |
| Granica razvlačenja, MPa | 210 |
| Gustoća, g/cm ³ | 8 |
| Talište, °C | 1450 |
| Modul elastičnosti, GPa | 193 |
| Toplinska vodljivost, W/mK | 16,2 |

Kao dodatni materijal se koristila šipka CastoTig 45500 W od austenitnog nehrđajućeg čelika 316L promjera 2 mm koja pruža odličnu otpornost na interkristalnu koroziju i dobru otpornost na oksidaciju pri temperaturama manjim od 800 °C. Šipku karakterizira nizak postotak ugljika u kemijskom sastavu ($< 0,03\%$) i vlačna čvrstoća veća od 580 MPa [30].

5.1.2. Zaštitni plin

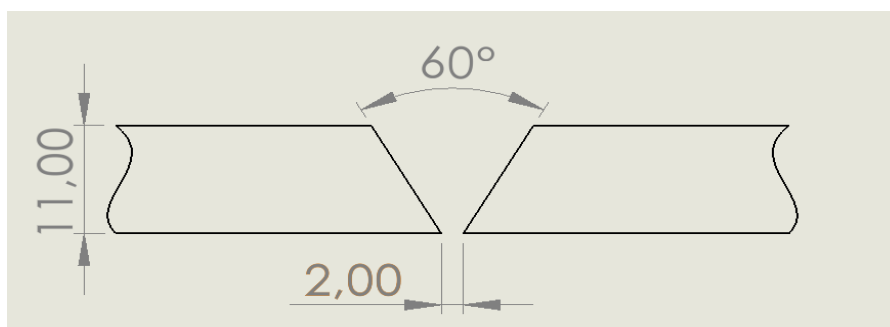
Kao zaštitni plin koristio se Argon 5.0 proizvođača Messer (slika 26.) koji je po sastavu čisti argon.



Slika 26. Argon 5.0

5.1.3. Priprema spoja

Priprema spoja prikazana je na slici 27. Rub svake ploče izrezan je pod 30 °, a razmak između ploča iznosio je 2 mm.



Slika 27. V priprema spoja bez nosa

Kao zaštita korijena zavara koristila se bakrena podloška s urezanim žljebom prikazana na slici 28. Kod pripreme spoja, važno je da se žljeb i dio osnovnog materijala gdje se formira korijen poklapaju. Prije početka zavarivanja, ploče su očišćene etilnim alkoholom i očetkane inox četkom. Bakrena podloška i korištene šipke su također očišćene etilnim alkoholom. Bakrena podloška i ploče su međusobno bile stegnute dvjema stegama koje su dijagonalno pozicionirane što je vidljivo na slici 30. Slika 29. prikazuje ulaznu i izlaznu pločicu koje su zavarene na ploče.



Slika 28. Bakrena podloška s žljebom



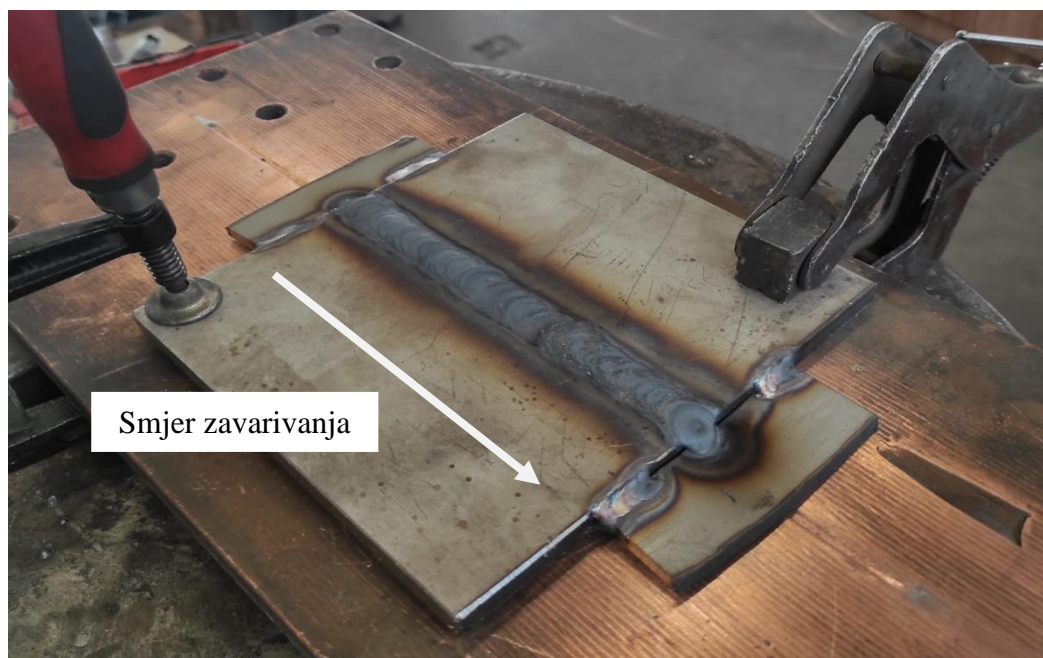
Slika 29. Uzorak s zavarenom ulaznom i izlaznom pločicom

5.1.4. Parametri zavarivanja

Zavarivanje je provedeno ručno, u PA položaju zavarivanja, u svega četiri prolaza. Protok zaštitnog plina iznosio je 8,5 l/min. Tijekom zavarivanja, na izvoru struje za zavarivanje praćene su prosječne vrijednosti jakosti struje i napona. Predgrijavanja zavara nije bilo, ali se pratilo da međuprolazna temperatura iznosi manje od 150 °C. Tablica 3. prikazuje parametre zavarivanja svakog prolaza. Kod trećeg prolaza je povećana jakost struje radi većeg depozita i bolje popune. Izgled TIG uzorka neposredno nakon zavarivanja i smjer zavarivanja prikazani su na slici 30.

Tablica 3. Parametri zavarivanja svakog prolaza

| Prolaz | Jakost struje, A | Napon, V | Brzina zavarivanja, cm/min |
|--------|------------------|----------|----------------------------|
| 1. | 150 | 10,5 | 5,29 |
| 2. | 150 | 10 | 3,55 |
| 3. | 200 | 11,5 | 4,93 |
| 4. | 200 | 12 | 5,07 |

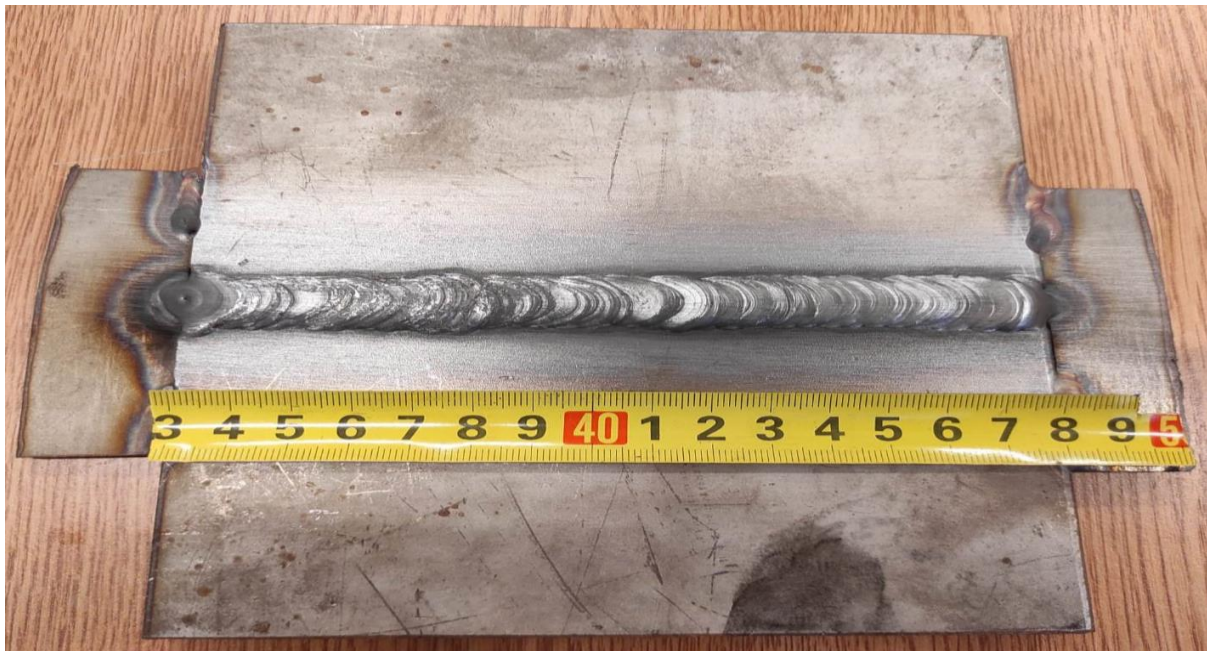


Slika 30. Izgled TIG uzorka neposredno nakon zavarivanja

Šav zavara i zona utjecaja topline su očetkani inox četkom radi očišćenja površine od oksida i ostalih tragova nastalih tijekom zavarivanja. Slika 31. prikazuje izgled korijena i donje površine TIG uzorka, a slika 32. prikazuje gornju površinu i lice zavara TIG uzorka.



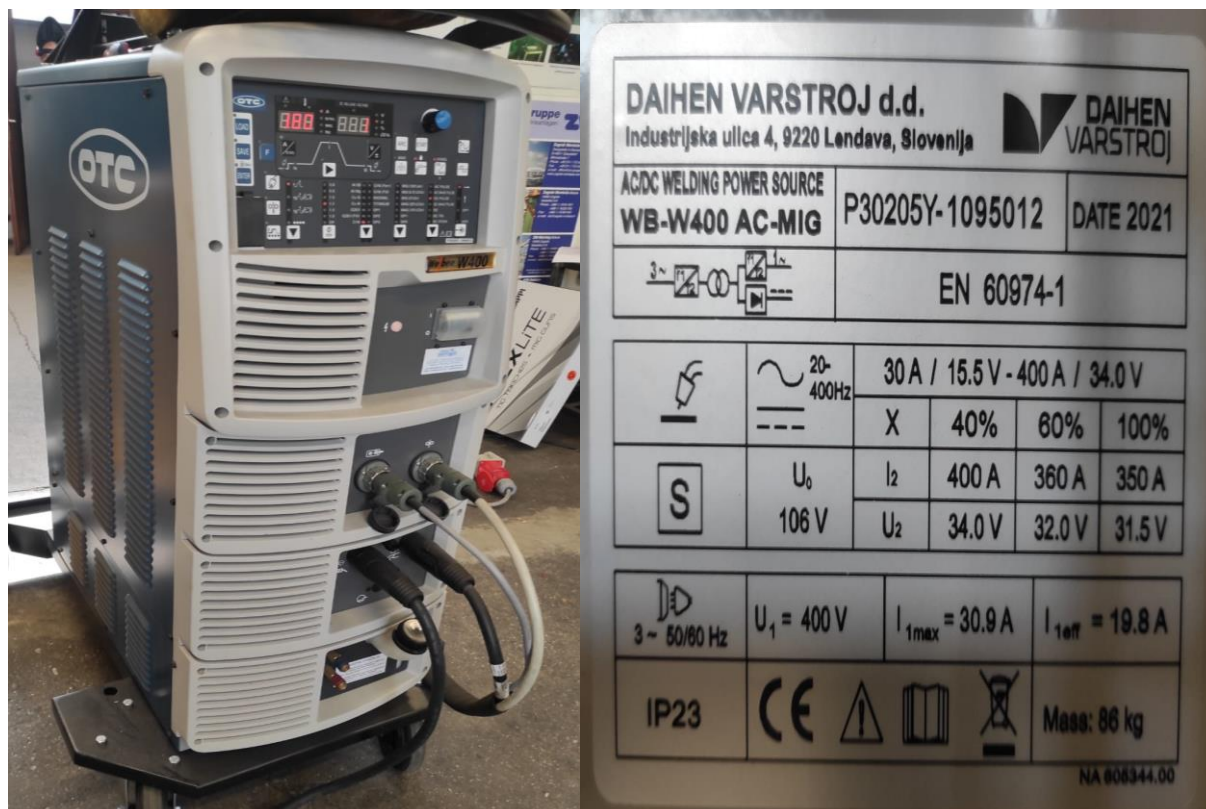
Slika 31. Izgled korijena zavara i donje površine TIG uzorka



Slika 32. Izgled gornje površine i lica zavara TIG uzorka

5.2. Zavarivanje uzorka MIG postupkom

Zavarivanje uzorka MIG postupkom provedeno je na WB-W400 AC MIG izvoru struje za zavarivanje proizvođača Daihen Varstroj. Na slici 33. prikazan je navedeni uređaj i pripadajuća identifikacijska pločica.



Slika 33. Izvor struje za zavarivanje WB-W400 AC MIG i pripadajuća identifikacijska pločica

5.2.1. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal je isti kao i kod TIG postupka zavarivanja. Kao dodatni materijal se koristila žica od austenitnog nehrđajućeg čelika 316L promjera 1,2 mm. Žicu karakterizira nizak postotak ugljika u kemijskom sastavu (< 0,03%) što poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju. Vlačna čvrstoća austenitnog nehrđajućeg čelika 316L iznosi više od 560 MPa [31].

5.2.2. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin korištena je dvokomponentna plinska mješavina Inoxline C2 proizvođača Messer (slika 34.) koja je po sastavu 98 % argon i 2 % ugljični dioksid.



Slika 34. Inoxline C2

5.2.3. Priprema spoja

Priprema spoja kod zavarivanja uzorka MIG postupkom provedena je identično kao i priprema spoja kod zavarivanja TIG postupkom. Priprema spoja prikazana je na slici 35.



Slika 35. Priprema spoja kod MIG uzorka

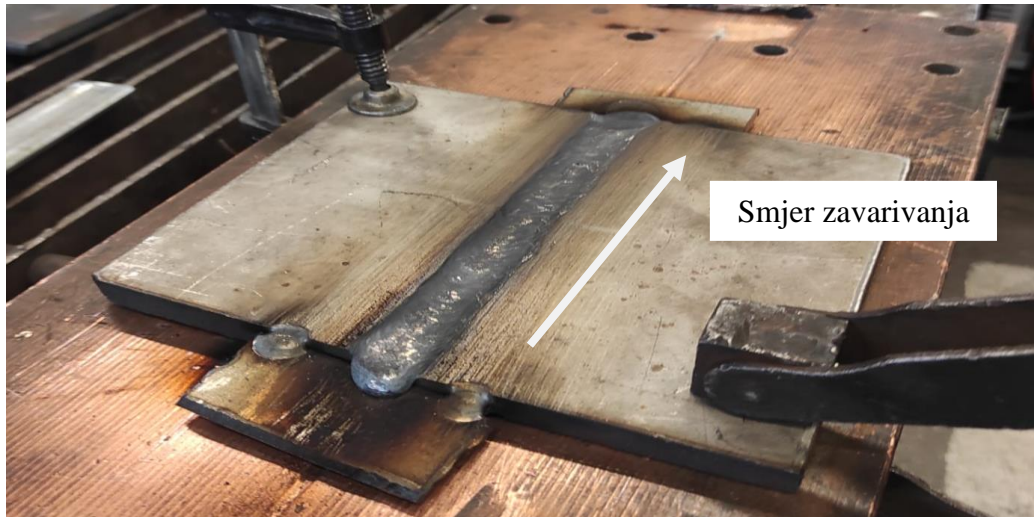
5.2.4. Parametri zavarivanja

Zavarivanje je provedeno ručno, u PA položaju zavarivanja, u svega tri prolaza. Protok zaštitnog plina iznosio je otprilike 16,2 l/min, a brzina dodavanja žice 6,5 m/min. Tijekom zavarivanja, na izvoru struje za zavarivanje praćene su prosječne vrijednosti jakosti struje i napona. Predgrijavanja zavara nije bilo, ali se pratilo da međuprolazna temperatura iznosi manje od 150 °C. Tablica 4. prikazuje parametre zavarivanja svakog prolaza.

Zavarivanje korijena je provedeno u dva dijela pri različitim parametrima radi optimizacije i sigurnosti, a svaki dio je iznosio otprilike pola duljine zavara. Ispostavilo se da je kod prvog dijela jakost struje bila prevelika. Kod drugog i trećeg prolaza se povećala jakost struje radi većeg depozita i bolje popune. Izgled MIG uzorka neposredno nakon zavarivanja i smjer zavarivanja prikazani su na slici 36.

Tablica 4. Parametri zavarivanja svakog prolaza

| Prolaz | Postavljena jakost struje, A | Stvarna jakost struje, A | Postavljeni napon, V | Stvarni napon, V | Brzina zavarivanja, cm/min |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|
| Korijenski 1. dio ploče | 180 | 198 | 24,8 | 23,6 | 24,67 |
| Korijenski 2. dio ploče | 150 | 167 | 23,5 | 22,6 | 20,18 |
| 2. | 180 | 200 | 24,8 | 23,8 | 18,5 |
| 3. | 180 | 207 | 24,7 | 23,7 | 14,8 |



Slika 36. Izgled MIG uzorka neposredno nakon zavarivanja i smjer zavarivanja

Šav zavara i zona utjecaja topline su očetkani inox četkom radi očišćenja površine od oksida i ostalih tragova nastalih tijekom zavarivanja. Slika 37. prikazuje izgled korijena i donje površine MIG uzorka, a slika 38. prikazuje gornju površinu i lice zavara MIG uzorka.



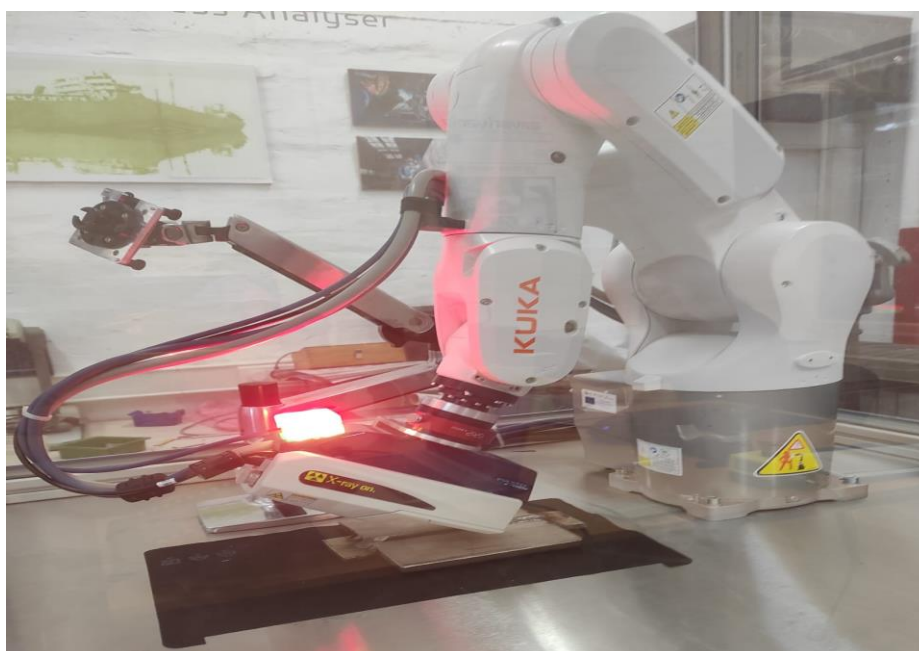
Slika 37. Izgled korijena zavara i donje površine MIG uzorka



Slika 38. Izgled gornje površine i lica zavora MIG uzorka

5.3. Mjerenje zaostalih napreznja

Mjerenje zaostalih napreznja na uzorcima je provedeno na uređaju za mjerenje zaostalih napreznja μ -X360s proizvođača Pulstec Industrial Co., Ltd. koji je montiran na robotsku ruku proizvođača KUKA (slika 39.).

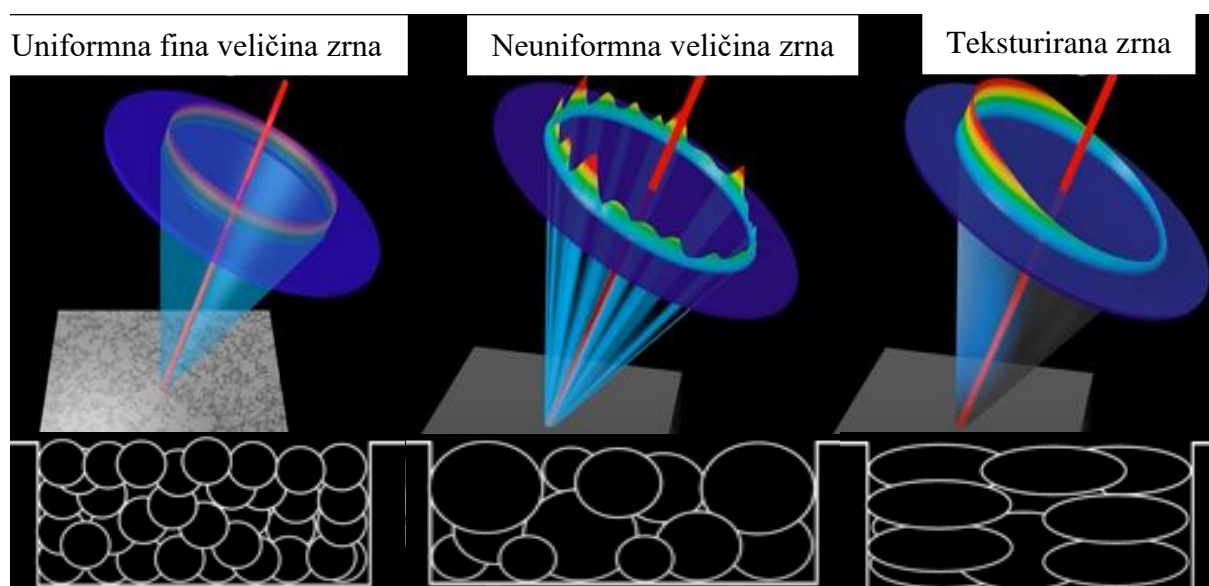


Slika 39. Uređaj za mjerenja zaostalih napreznja μ -X360s

Uređaj za mjerenje zaostalih napreznja μ -X360s se bazira na principu $\cos\alpha$ metode mjerenja rendgenskom difrakcijom. Rezultati mjerenja ovom metodom sadrže podatke o uvjetima mjerenja, informacije o uzorku, prikaz mjesta mjerenja, izgled Debye prstena (2D ili 3D), srednji iznos glavnih i posmičnih napreznja na ozračenom mjestu, standardne devijacije tih napreznja, iznos statističkog parametra za određivanje stupnja plastične deformacije FWHM (engl. *full width at half maximum*), kao i grafove vezane za napreznja i FWHM i sl. Kako raste stupanj plastične deformacije, tako raste i iznos FWHM.

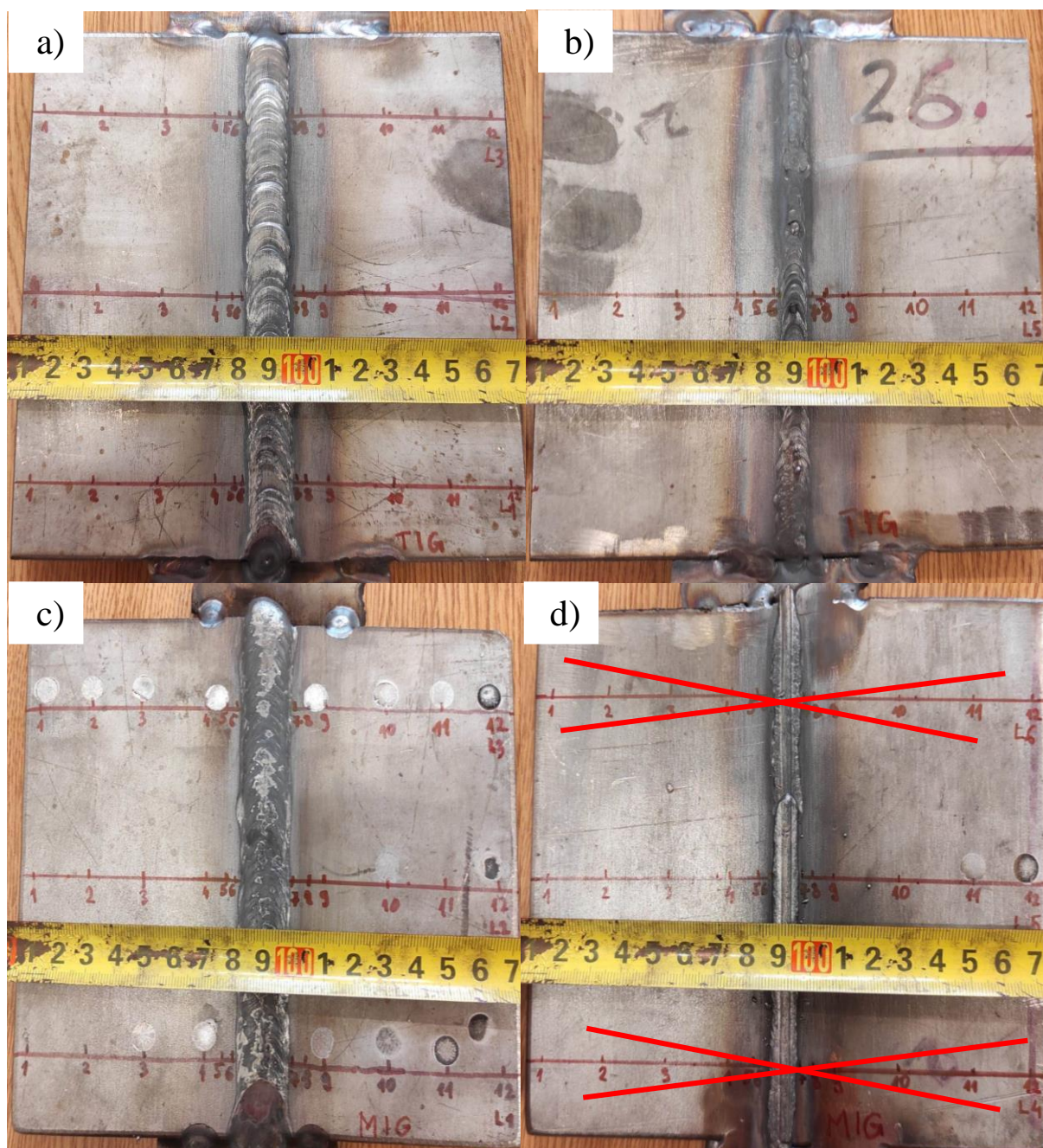
5.3.1. Debye prsten

U $\cos\alpha$ metodi, rendgenske zrake se difraktiraju od polikristalne strukture uzorka u više smjerova pod 360° koje odmah detektira dvodimenzionalni detektor. Detektirane rendgenske zrake detektor prikazuje u obliku Debye prstena. Iz distribucije intenziteta Debye prstena je moguće identificirati teksturu uzorka kao i razumjeti veličinu zrna (slika 40). Zaostalo napreznje se određuje iz promjene difrakcijskog kuta zbog učinka kojeg zaostala napreznja imaju na interplanarne udaljenosti unutar kristalne strukture zrna. $\cos\alpha$ metoda pretpostavlja kontinuirane Debye prstenove, ali ti prstenovi su ponekad točkasti kada ozračeno područje ne sadrži dovoljan broj zrna. Razlog tomu može biti da je ozračena površina premala ili da su zrna gruba, tj. da su prevelika. Da bi se dobili kontinuirani Debye prstenovi, ozračeno područje mora sadržavati dovoljan broj zrna [7], [8].



Slika 40. Prikaz izgleda Debye prstena u ovisnosti o veličini i vrsti zrna [32]

Mjerenje zaostalih napreznja je provedeno na način da se na svakom uzorku mjerilo četiri linija po 12 točaka na svakoj liniji. Tri linije (oznaka L1, L2 i L3) su se nalazile na gornjoj površini uzorka, a jedna (oznake L5) otprilike na sredini donje površine uzorka. Slika 41. prikazuje mjesta mjerenja zaostalih napreznja na uzorcima. Na svakoj točki izmjerena su longitudinalna i transverzalna napreznja.



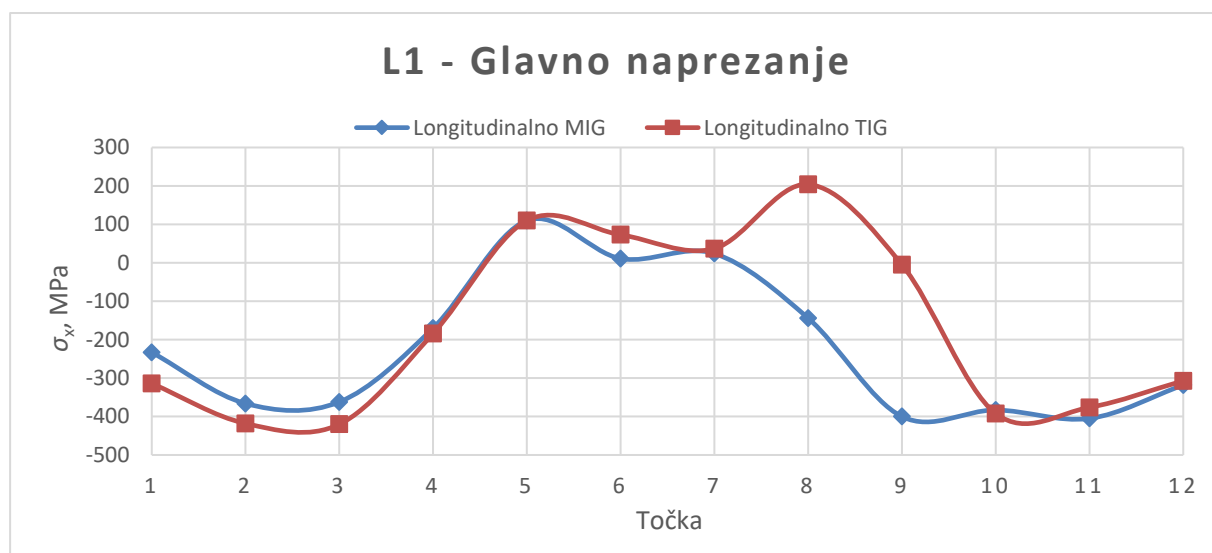
Slika 41. Mjesta mjerenja zaostalih napreznja: a) gornja površina TIG uzorka, b) donja površina TIG uzorka, c) gornja površina MIG uzorka i d) donja površina MIG uzorka

5.4. Rezultati i analiza mjerenja zaostalih napreznja

Negativni iznosi napreznja upućuju na to da se radi o tlačnim napreznjima, a pozitivni iznosi da se radi o vlačnim napreznjima.

5.4.1. Linija 1 (L1)

U rezultatima mjerenja dobiju se iznosi zaostalih napreznja, ali i njihove standardne devijacije. Na slici 42. prikazana je usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1. Glavna razlika na grafu su iznosi napreznja na točkama 8. i 9. Nadalje, u točki 8. su kod MIG uzorka tlačna napreznja, a kod TIG uzorka vlačna napreznja.



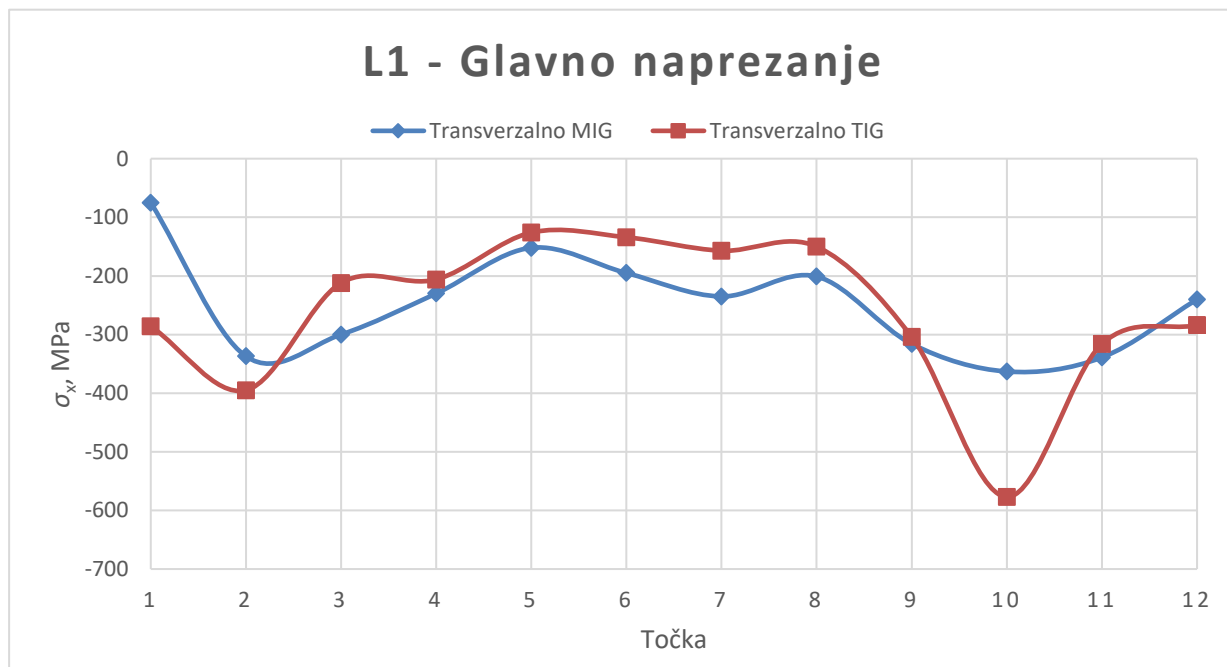
Slika 42. Usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1

Na slici 43. prikazan je primjer valjanog iznosa zaostalih napreznja gdje su standardne devijacije malog iznosa.

$$\begin{aligned} \text{Sigma}(x) & \underline{\hspace{10em}} -233 \text{ MPa} \\ (\text{Std. Dev. } & \underline{\hspace{10em}} 40 \text{ MPa}) \\ \text{Tau}(xy) & \underline{\hspace{10em}} 30 \text{ MPa} \\ (\text{Std. Dev. } & \underline{\hspace{10em}} 26 \text{ MPa}) \end{aligned}$$

Slika 43. Primjer valjanog iznosa zaostalih napreznja

Na slici 44. prikazana je usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1. Iznosi svih glavnih transverzalnih napreznja su negativni što znači da su sva zaostala napreznja tlačna.



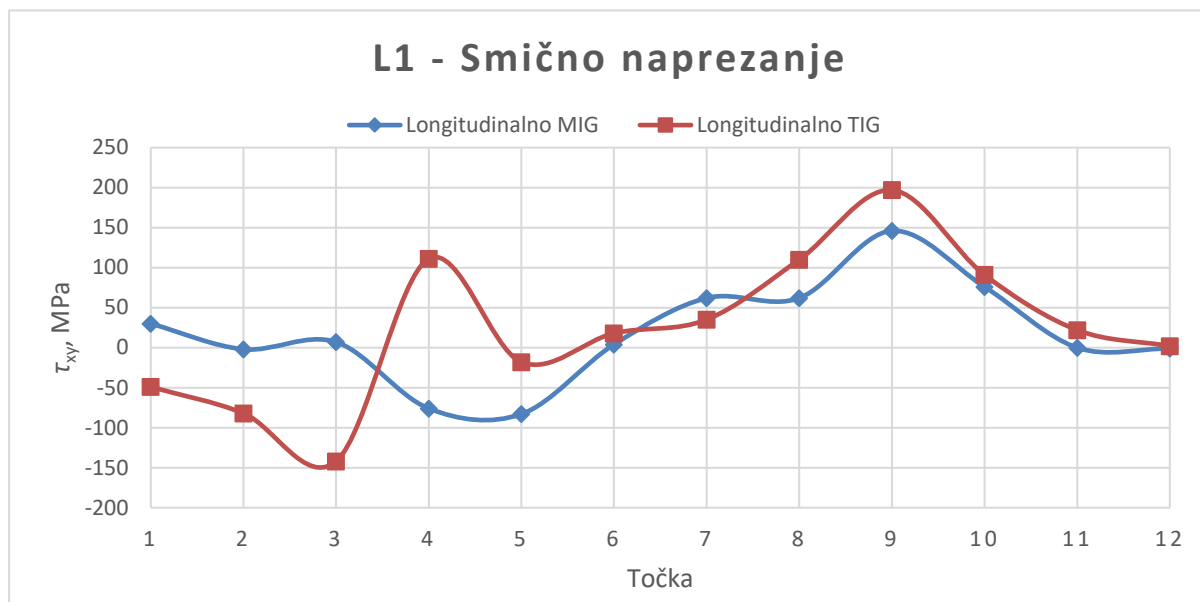
Slika 44. Usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1

Kad su standardne devijacije prevelikog iznosa, onda se može reći da iznos napreznja nije valjan. Takav je slučaj kod transverzalnih napreznja točke 4. i točke 10. što se vidi na slici 45. Da bi se dobili valjani rezultati zaostalih napreznja, točku mjerenja treba pomaknuti za par milimetara u stranu. Ako se i dalje ne mogu dobiti valjani rezultati, površnu uzorka treba elektropolirati.

| | | | |
|-------------------|----------|-------------------|----------|
| Sigma(x) _____ | -206 MPa | Sigma(x) _____ | -577 MPa |
| (Std. Dev. _____) | 609 MPa | (Std. Dev. _____) | 638 MPa |
| Tau(xy) _____ | -27 MPa | Tau(xy) _____ | 98 MPa |
| (Std. Dev. _____) | 542 MPa | (Std. Dev. _____) | 567 MPa |

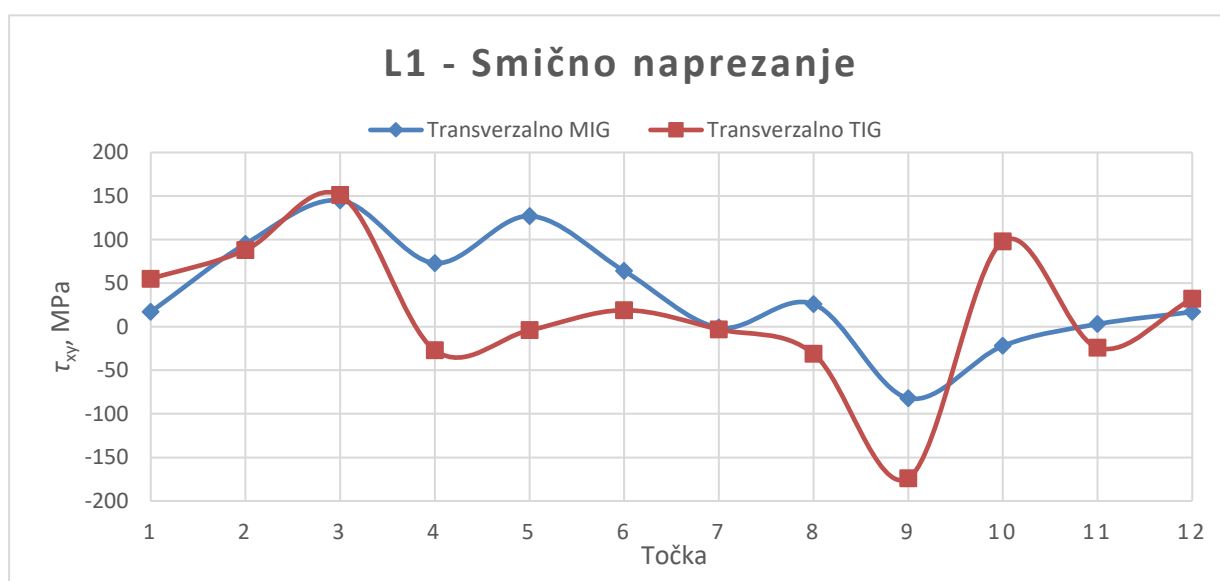
Slika 45. Primjer nevaljanih iznosa zaostalih napreznja zbog prevelike standardne devijacije

Na slici 46. prikazana je usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1. Krivulje iznosa napreznja su slične svugdje osim u dijelu od točke 3. do 5.



Slika 46. Usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1

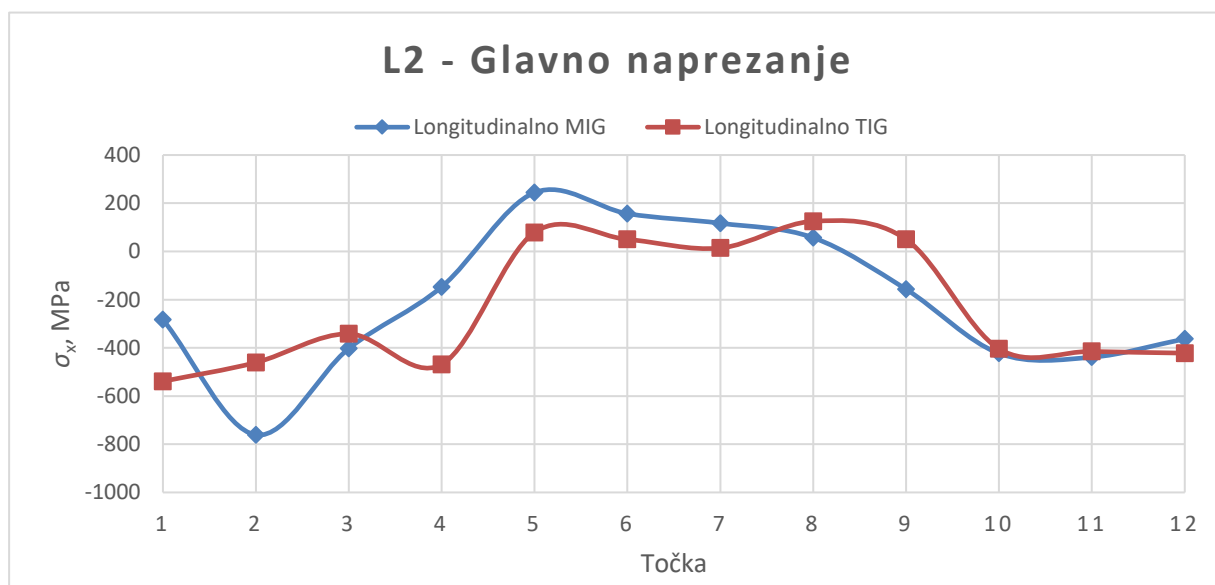
Na slici 47. prikazana je usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1. Krivulje iznosa zaostalih napreznja se razlikuju zbog utjecaja nevaljanih rezultata u točkama 4. i 10.



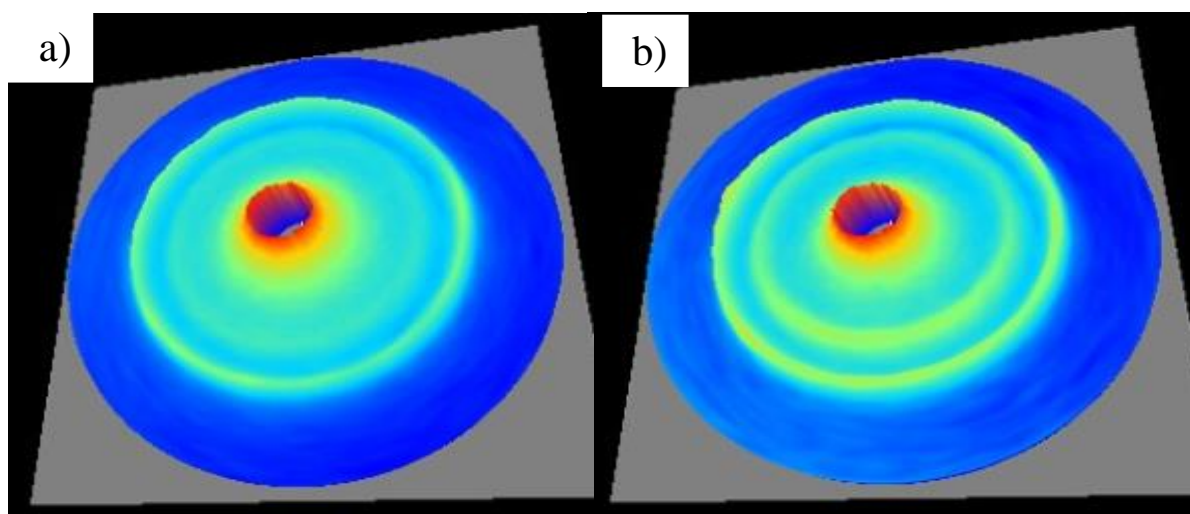
Slika 47. Usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L1

5.4.2. Linija 2 (L2)

Na slici 48. prikazana je usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2. Prevelike standardne devijacije postoje kod longitudinalnih napreznja točke 2. MIG uzorka i kod točke 4. TIG uzorka pa ti rezultati napreznja nisu valjani. S ispravnim vrijednostima krivulje iznosa napreznja bi se najvjerojatnije poklapale. Na slici 49. se vidi razlika u izgledu Debye prstena između valjanog (točka 10. TIG uzorka) i nevaljanog rezultata (točka 4. TIG uzorka).

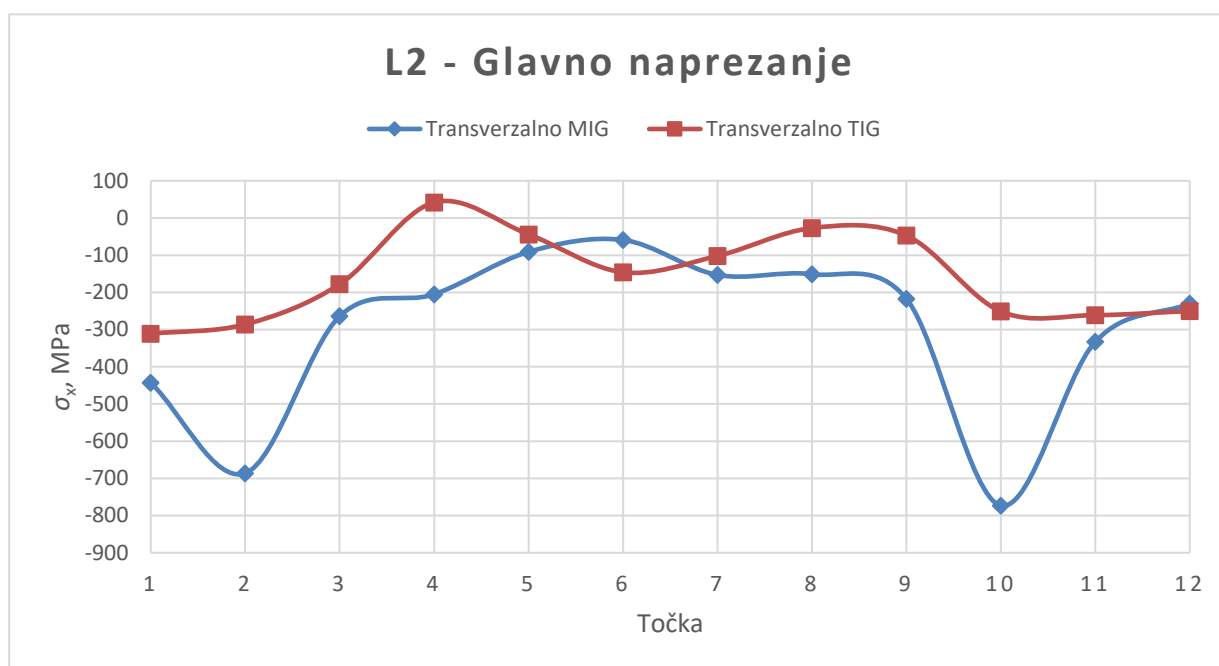


Slika 48. Usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2

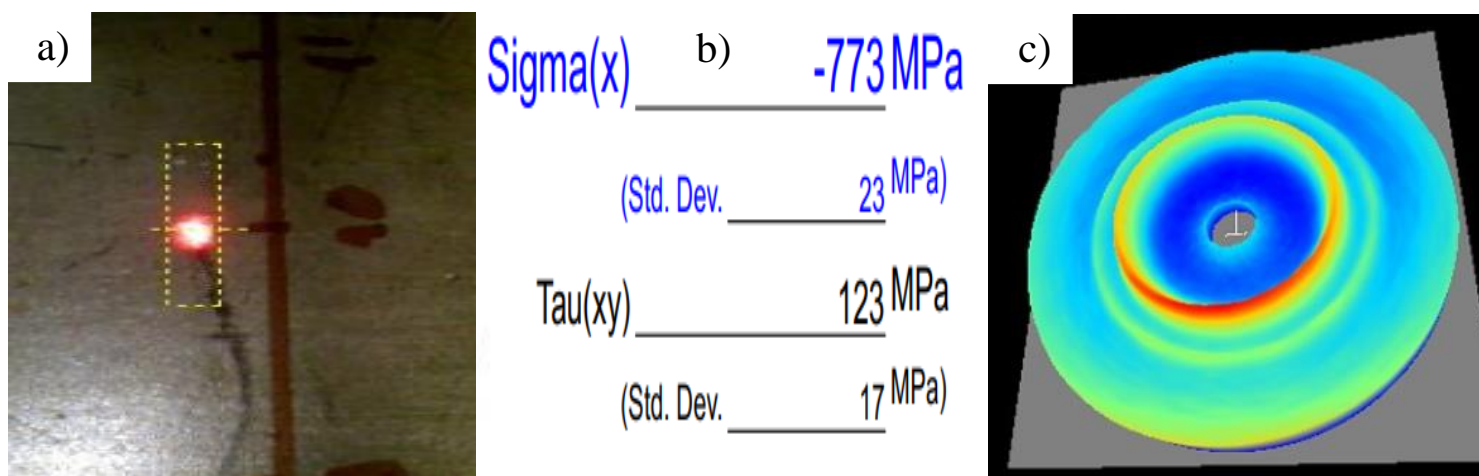


Slika 49. Izgled Debye prstena kod: a) valjanog rezultata (točka 10. TIG uzorka) i b) nevaljanog rezultata (točka 4. TIG uzorka)

Na slici 50. prikazana je usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2. Prevelike standardne devijacije postoje kod transverzalnih napreznja točke 1. i točke 2. MIG uzorka pa ti rezultati napreznja nisu valjani. Točka 10. je kritična točka jer je iznos tlačnog napreznja velik, a iznos standardne devijacije mali. Slika 51. prikazuje mjesto mjerenja točke 10. koje se nalazi na rubu ogrebotine koja nije nastala zavarivanjem, iznose napreznja točke 10. te pripadajući izgled Debye prstena.

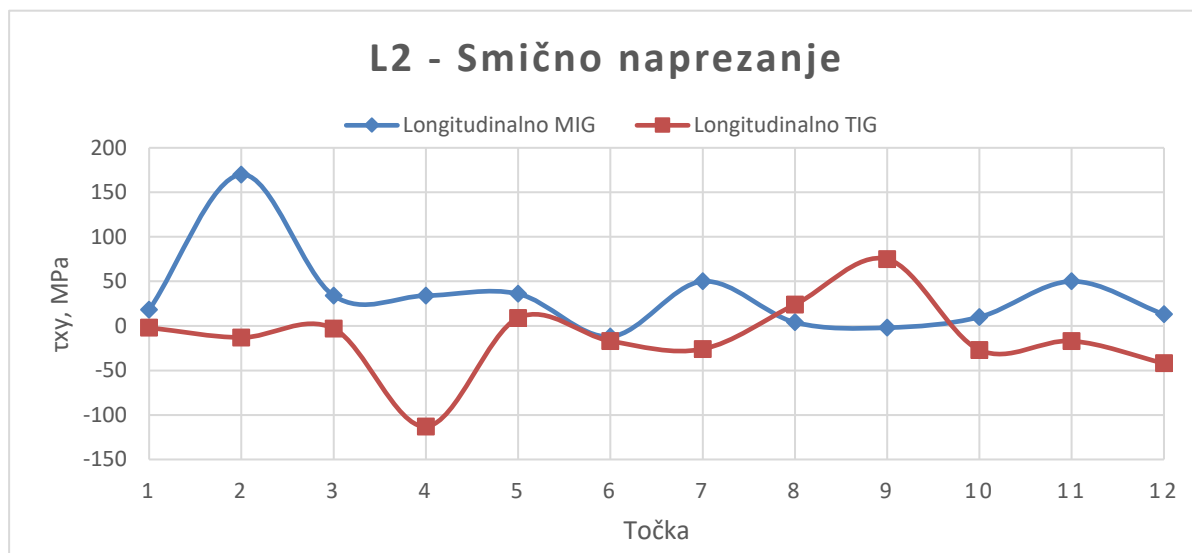


Slika 50. Usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2



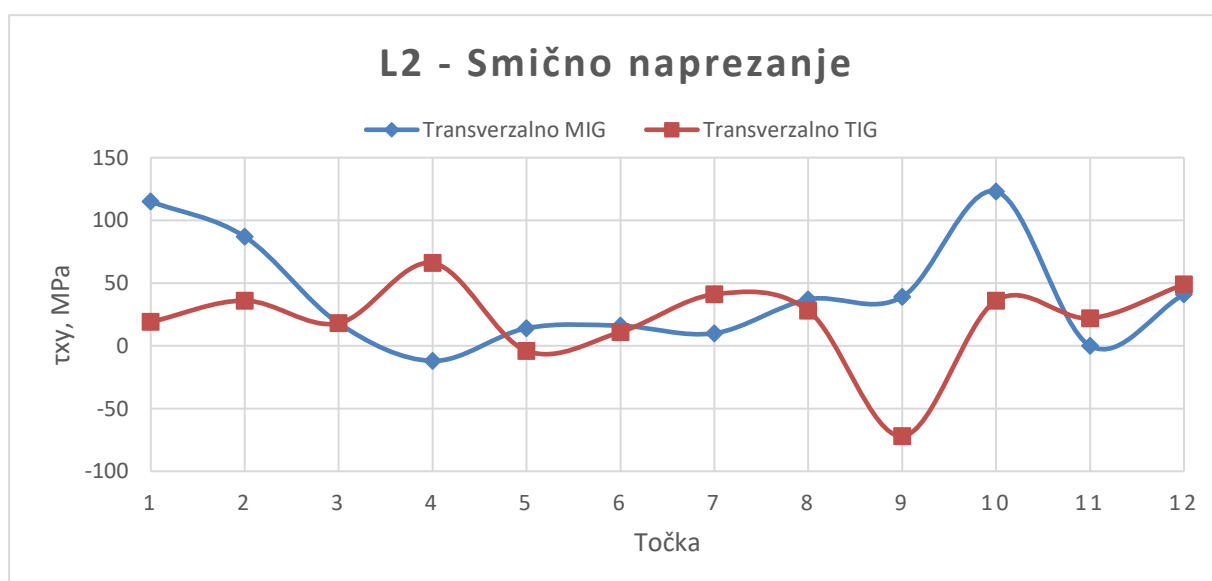
Slika 51. Prikaz: a) mjesta mjerenja kritične točke 10, b) iznosa napreznja kritične točke 10. i c) pripadajući izgled Debye prstena

Na slici 52. prikazana je usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2. Uzevši u obzir da rezultati napreznja u točki 2. kod MIG uzorka i točki 4. kod TIG uzorka nisu valjani, krivulje smičnih longitudinalnih napreznja na L2 se pretežito isprepliću unutar raspona od -100 MPa do 100 MPa.



Slika 52. Usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2

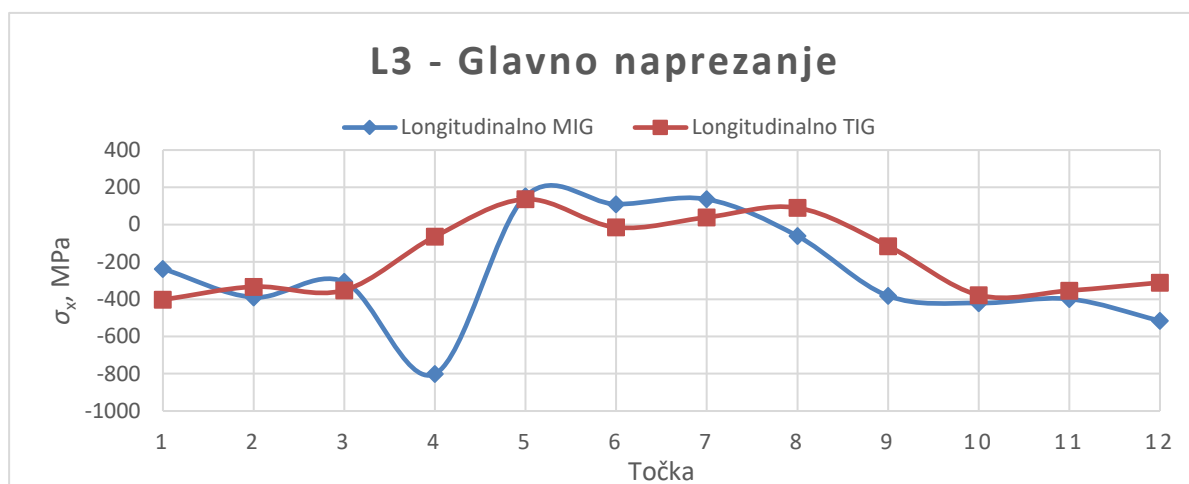
Na slici 53. prikazana je usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2. Iznosi smičnih transverzalnih napreznja na L2 su pretežito pozitivni ili negativni u blizini nule. Odskače točka 9. TIG uzorka kod koje postoji tlačno napreznje u iznosu od -72 MPa.



Slika 53. Usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L2

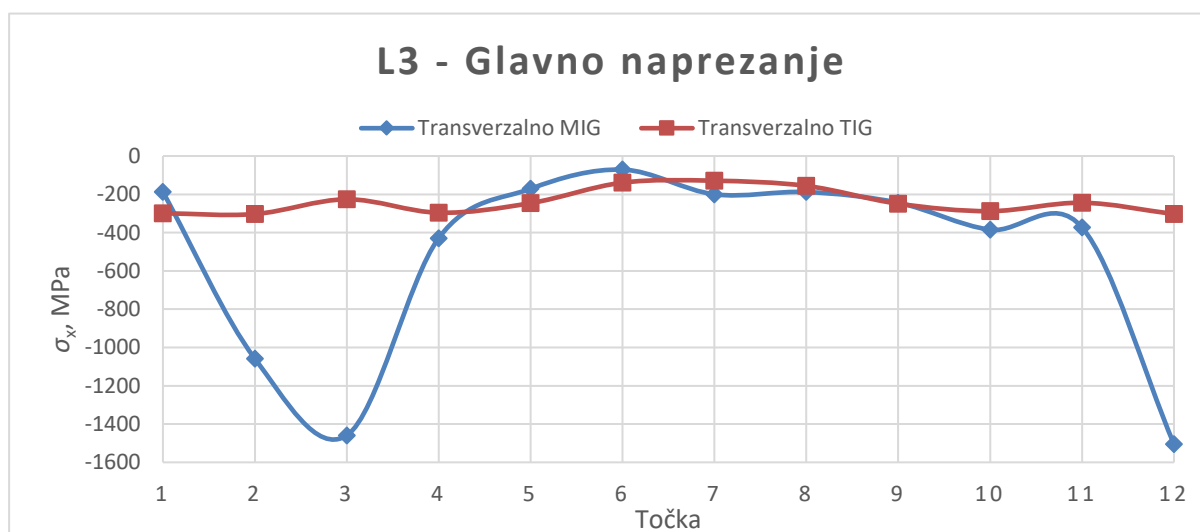
5.4.3. Linija 3 (L3)

Na slici 54. prikazana je usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3. Točka 4. kod MIG uzorka je kritična točka zbog površinskih oštećenja na mjerenom mjestu. Krivulje iznosa napreznja su dosta slične, jedino odstupa točka 4.



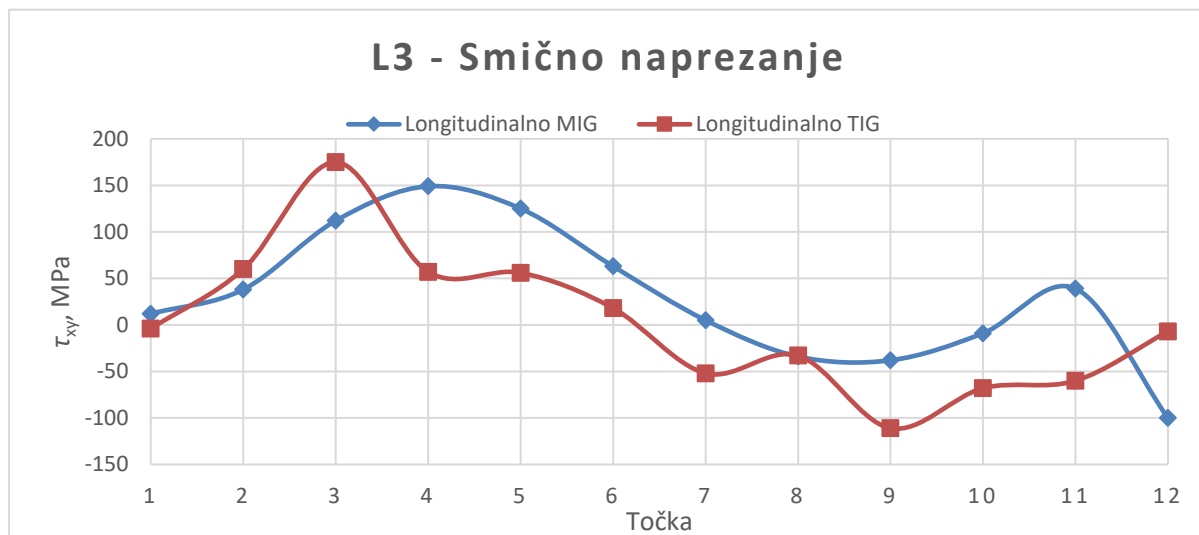
Slika 54. Usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3

Preveliki iznosi standardnih devijacija postoje kod transverzalnih napreznja u točkama 2., 3., 6. i 12. MIG uzorka pa ti rezultati nisu valjani. Ostala glavna transverzalna napreznja su sva tlačna zaostala napreznja. Prilikom mjerenja treba dobro pripaziti o veličini standardnih devijacija jer kriva mjerenja mogu kompletno poremetiti izgled grafa kao što je vidljivo na slici 55.



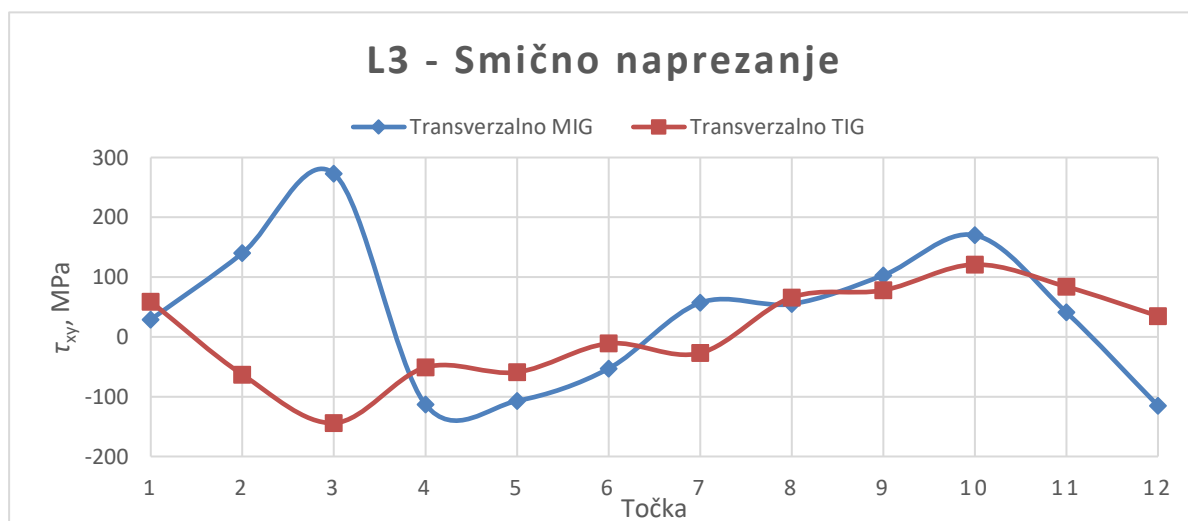
Slika 55. Usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3

Na slici 56. prikazana je usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3. Krivulje iznosa napreznja ne odstupaju previše. Više vlačnih napreznja je prisutno kod MIG uzorka, a tlačnih napreznja je nešto više kod TIG uzorka.



Slika 56. Usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3

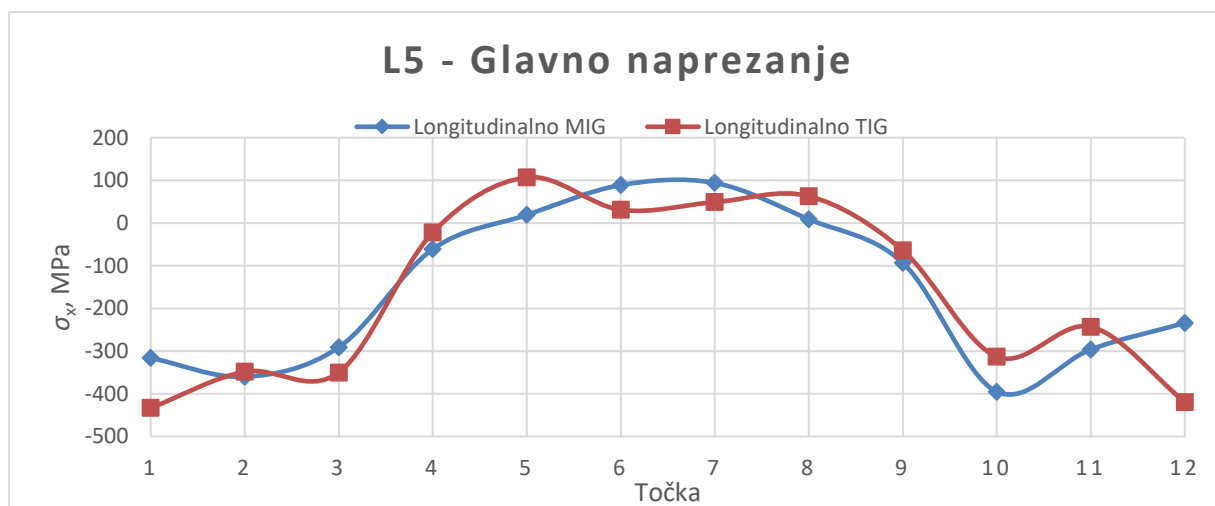
Na slici 57. prikazana je usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3. Krivulje iznosa napreznja su dosta slične, jedino odstupaju točke 2., 3., 6. i 12. MIG uzorka. Smična transverzalna napreznja TIG uzorka su unutar raspona od -150 MPa do 150 MPa.



Slika 57. Usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L3

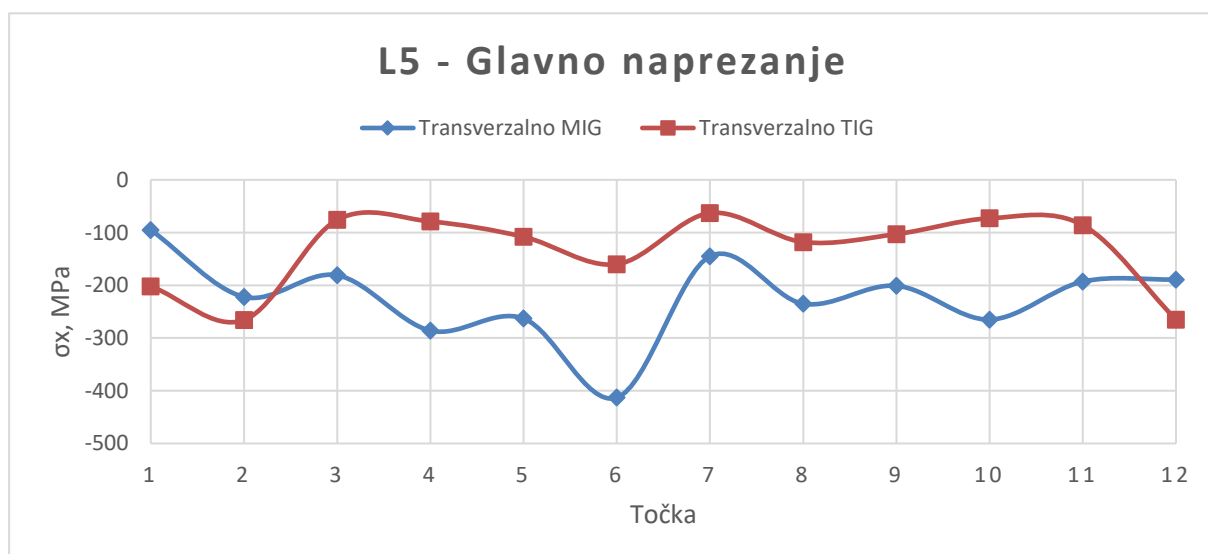
5.4.4. Linija 5 (L5)

Na slici 58. prikazana je usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5 koja se nalazi s donje strane uzorka. Krivulje glavnih longitudinalnih napreznja najviše odgovaraju činjenici da se tijekom zavarivanja vlačna napreznja formiraju u zoni utjecaja topline, a tlačna napreznja u osnovnom materijalu kao reakcija na vlačna napreznja.



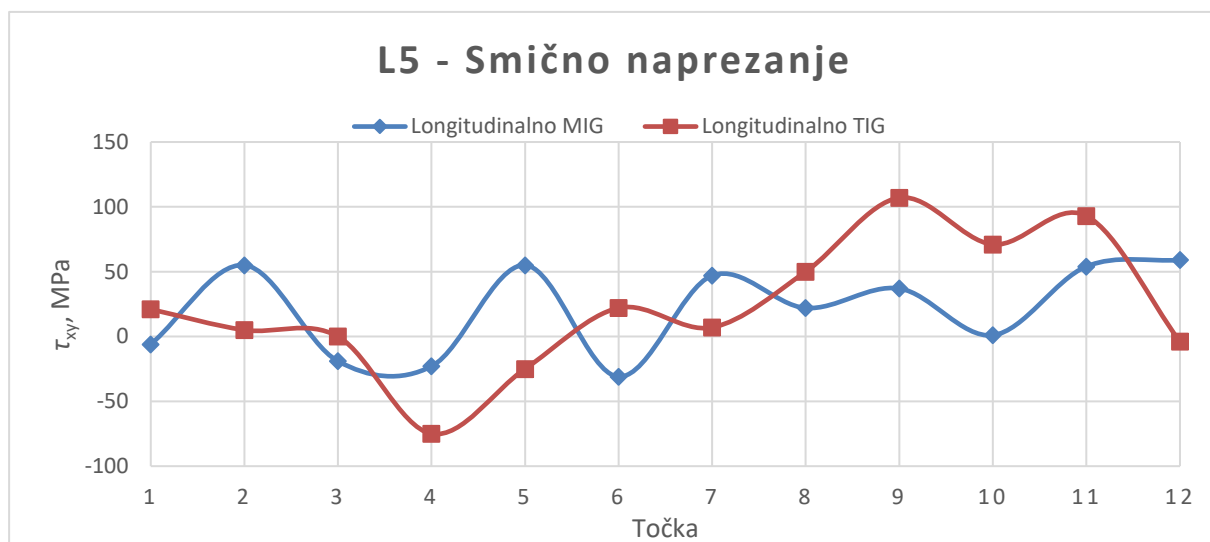
Slika 58. Usporedba glavnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5

Na slici 59. prikazana je usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5. Sva glavna transverzalna napreznja su tlačna napreznja kod kojih MIG uzorak sadrži nešto veće iznose u odnosu na TIG uzorak.



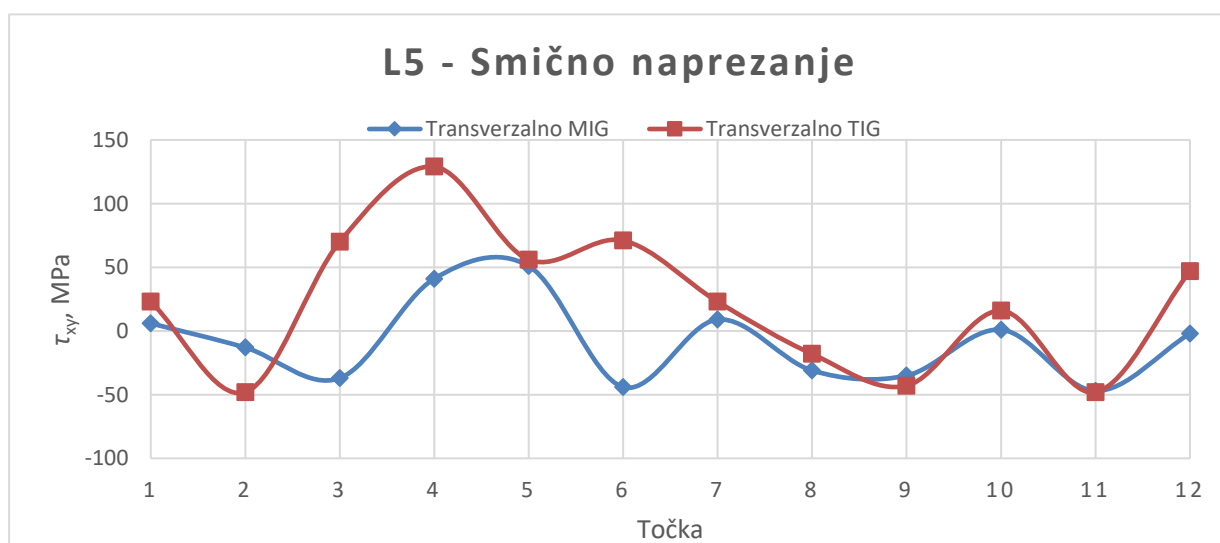
Slika 59. Usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5

Na slici 60. prikazana je usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5. Krivulje smičnih longitudinalnih napreznja na L5 se pretežito isprepliću unutar raspona od -75 MPa do 110 MPa. Iznosi napreznja kod TIG uzorka su nešto veći nego kod MIG uzorka.



Slika 60. Usporedba smičnih longitudinalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5

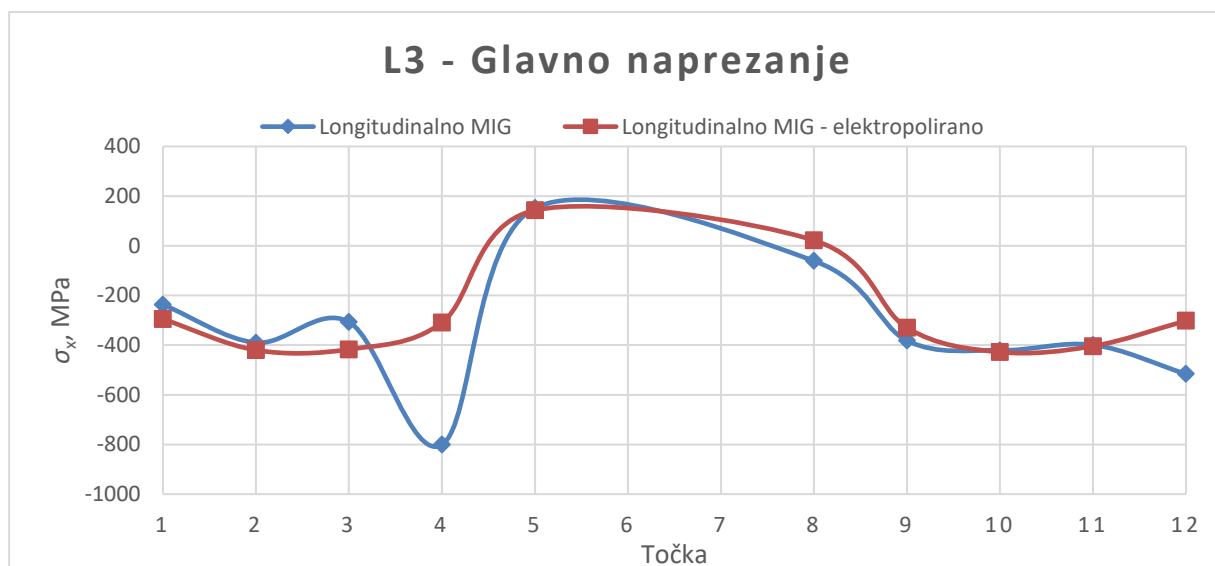
Na slici 61. prikazana je usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5. Krivulje se u prvom dijelu grafa ponašaju dosta različito pa se nakon točke 7. ponašaju dosta slično. Iznosi napreznja su nešto veći kod TIG uzorka.



Slika 61. Usporedba smičnih transverzalnih napreznja MIG i TIG uzorka na L5

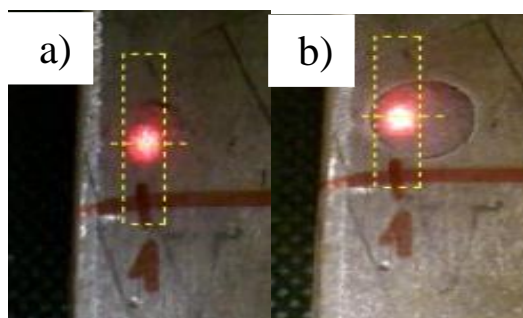
5.4.5. Usporedba iznosa naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja

Na slici 62. se može se vidjeti usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja. Nakon elektropoliranja, na svim točkama kojima su prijašnja mjerenja bila nevaljana ili kritična su izmjereni valjani rezultati. Na točkama gdje su prijašnje izmjereni valjani rezultati, nakon elektropoliranja nije došlo do velike promjene u iznosima. Elektropoliranje je provedeno na uređaju Electrochemical Polisher proizvođača Pulstec. Vrijeme trajanja svakog elektropoliranja je iznosilo deset sekundi, a jakost struje je iznosila otprilike šest ampera. Na točkama 6. i 7. nije moguće izmjeriti naprezanja radi blizine točaka šavu zavara.



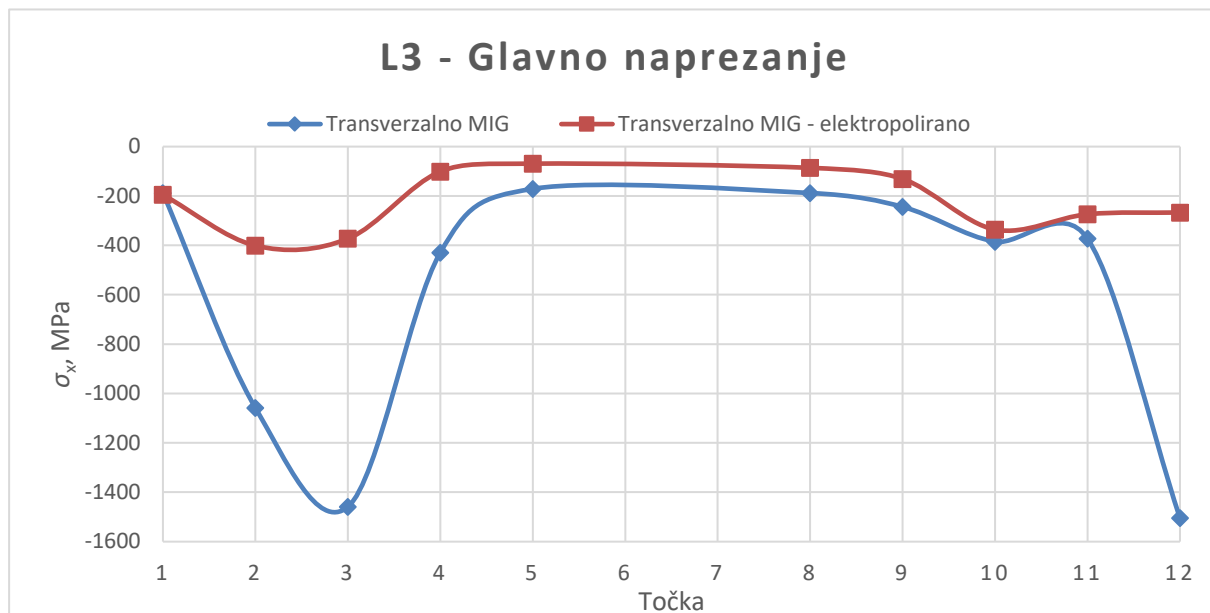
Slika 62. Usporedba glavnih longitudinalnih naprezanja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja

Na slici 63. prikazana je usporedba izgleda mjernog mjesta prije i poslije elektropoliranja.



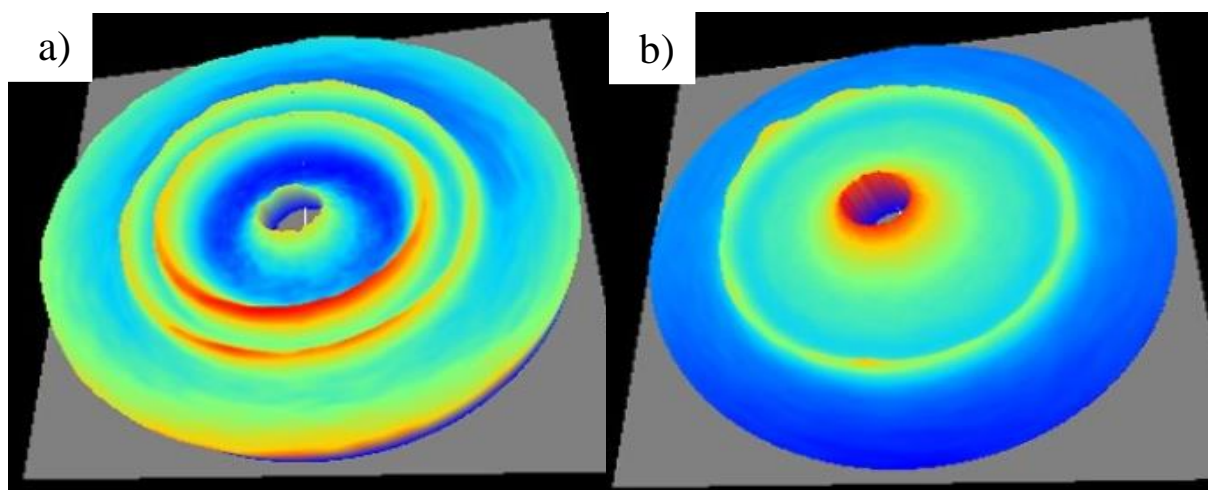
Slika 63. Izgled mjernog mjesta: a) prije elektropoliranja i b) poslije elektropoliranja

Slika 64. prikazuje usporedbu glavnih transverzalnih napreznja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja. Skoro svi iznosi glavnih transverzalnih tlačnih napreznja su se smanjili nakon elektropoliranja i svi rezultati su valjani.



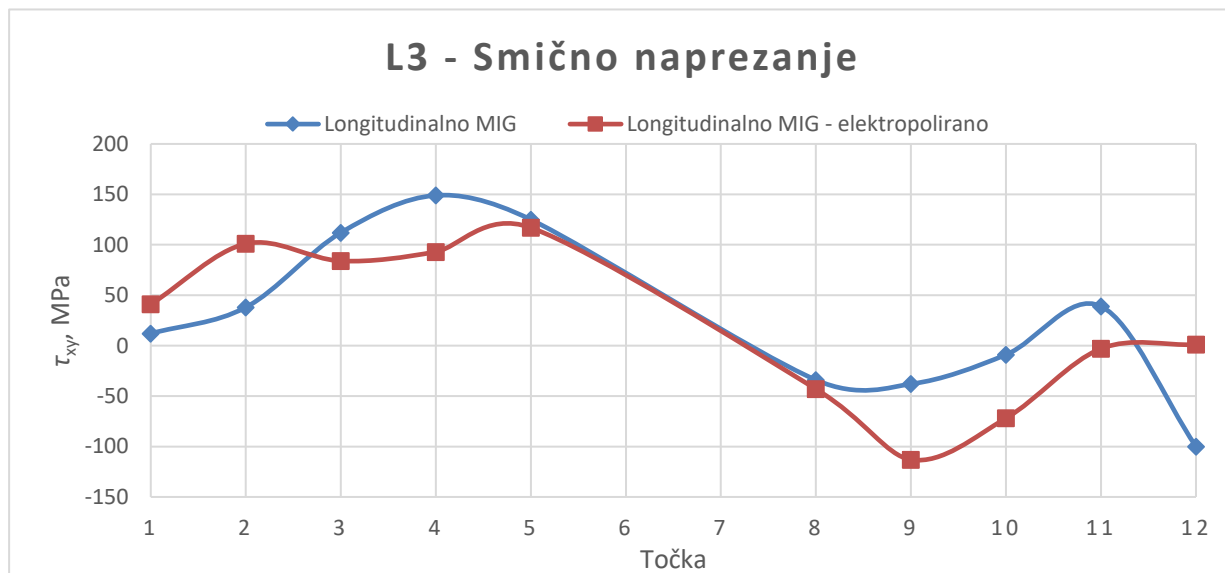
Slika 64. Usporedba glavnih transverzalnih napreznja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja

Na slici 65. prikazana je usporedba izgleda Debye prstena u točki 12. MIG uzorka prije i poslije elektropoliranja. Debye prsten je prije elektropoliranja bio neuniforman.



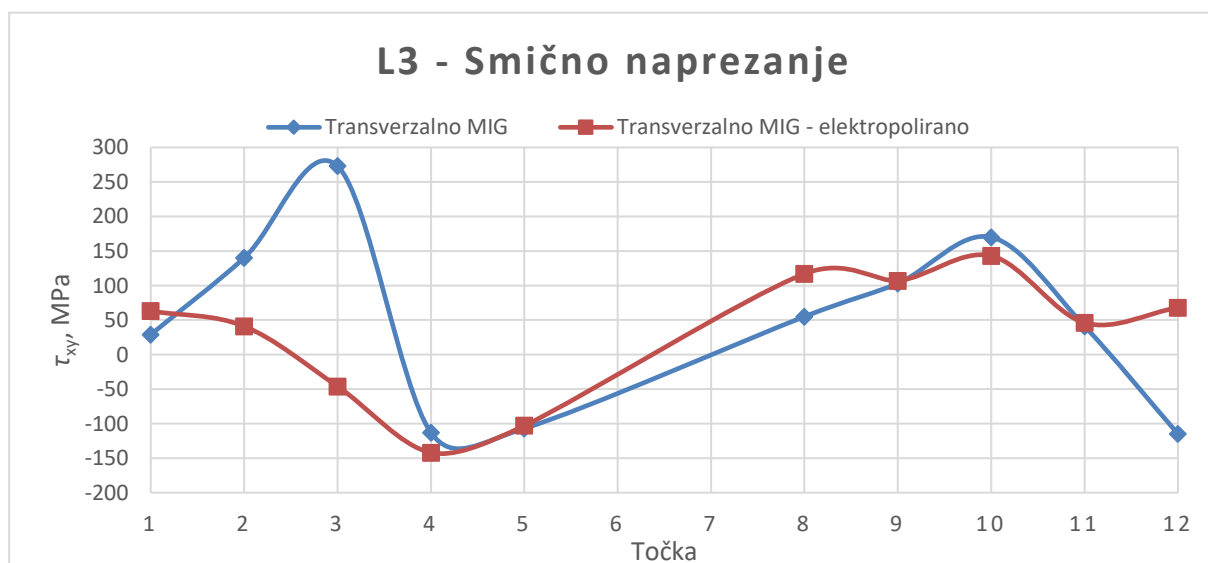
Slika 65. Izgled Debye prstena u točki 12 MIG uzorka: a) prije elektropoliranja i b) nakon elektropoliranja

Slika 66. prikazuje usporedbu smičnih longitudinalnih napreznaja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja. Na nekim točkama su se iznosi napreznaja povećali nakon elektropoliranja.



Slika 66. Usporedba smičnih longitudinalnih napreznaja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja

Slika 67. prikazuje usporedbu smičnih transversalnih napreznaja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja. Iznosi napreznaja su slični u većini slučajeva osim kod točaka 3. i 12. gdje su se napreznaja znatno smanjila.



Slika 67. Usporedba smičnih transversalnih napreznaja MIG uzorka na L3 prije i poslije elektropoliranja

Analizom zaostalih naprezanja uočeno je da se kod longitudinalnih zaostalih naprezanja pretežno vlačna naprezanja formiraju u zoni utjecaja topline, a tlačna naprezanja u nepromijenjenom osnovnom metalu radi održavanja mehaničke ravnoteže. Transverzalna zaostala naprezanja su pretežno tlačna naprezanja. U usporedbi s glavnim naprezanjima, iznosi smičnih naprezanja su općenito nešto manji.

Nakon elektropoliranja, na svim točkama u kojima su prijašnja mjerenja bila nevaljana ili kritična (zbog prevelikih standardnih devijacija ili površinskih oštećenja) su izmjereni valjani rezultati. Na točkama gdje su prijašnje izmjereni valjani rezultati, nakon elektropoliranja nije došlo do velike promjene u iznosima naprezanja. Nadalje, izgled Debye prstena se popravio nakon elektropoliranja.

5.5. Deformacije uzoraka

Uzorci su prije zavarivanja bili pod pravim kutem, ali su se zbog utjecaja topline tijekom zavarivanja deformirali. Deformacije uzoraka prikazane su na slici 68. gdje se vide kutovi između površine zavarenog spoja i ravnala koji je pod pravim kutem. Kutovi su izmjereni u ImageJ programu. MIG uzorak se više deformirao u odnosu na TIG uzorak.



Slika 68. Deformacija: a) TIG uzorka i b) MIG uzorka

5.6. Makroizbrusci

Nakon završetka mjerena zaostalih naprezanja, uzorci se režu na tračnoj pili (slika 69.). Nakon rezanja uzorci su redom podvrgnuti procesima brušenja, poliranja i naposljetku elektronagrizanja. Elektronagrizanje (slika 70.) je provedeno u desetpostotnoj oksalnoj kiselini pri jakosti struje u iznosu od četiri ampera i naponu u iznosu od osam volta. Vrijeme elektronagrizanja TIG uzorka je trajalo 30 s, a MIG uzorka 45 s. Nakon elektronagrizanja, oba uzorka su isprani u vodi.

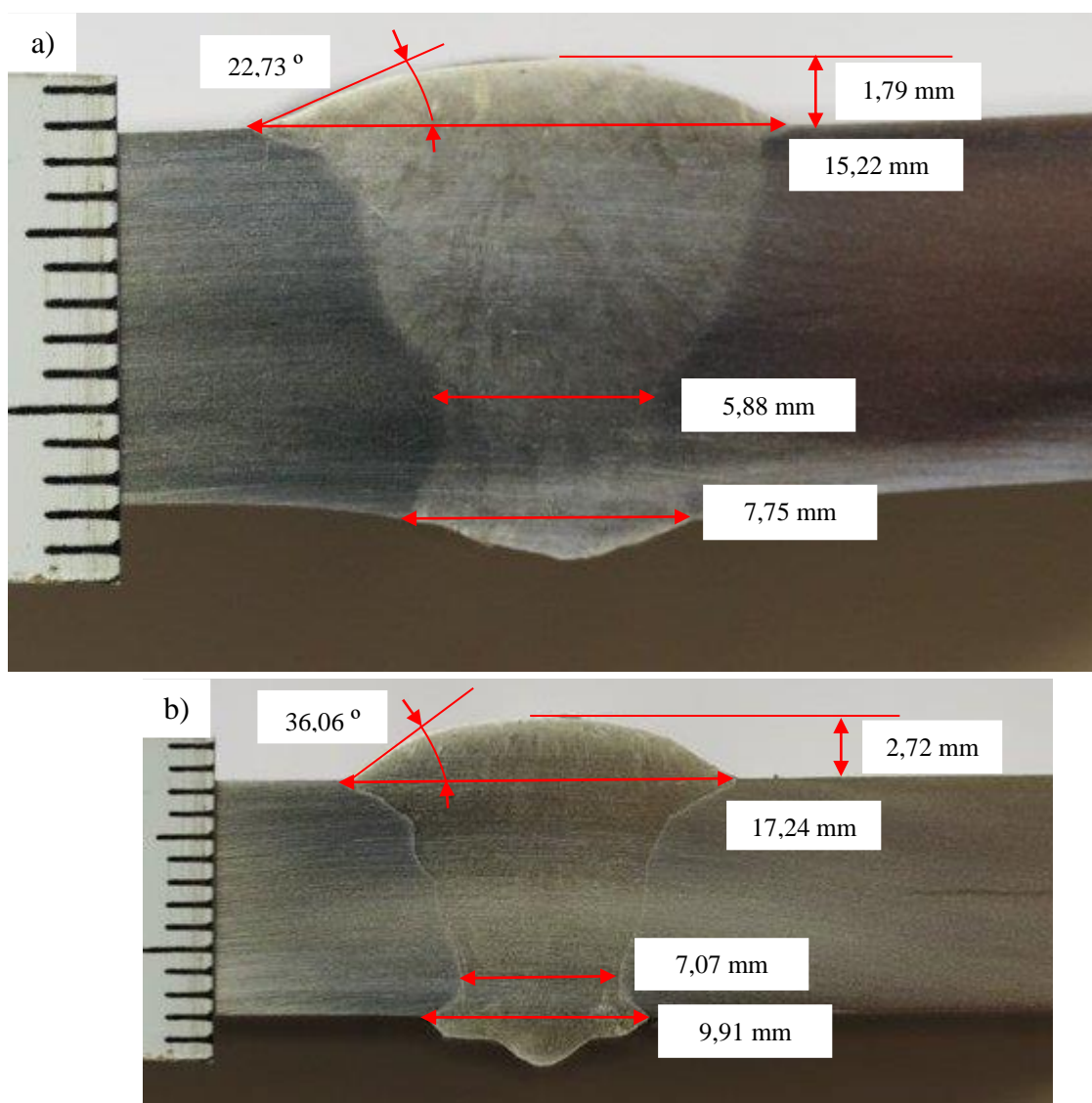


Slika 69. Rezanje uzoraka na tračnoj pili



Slika 70. Elektronagrizanje makroizbrusaka

Na makroizbruscima se jasno vide šavovi zavora, ali ne i zona utjecaja topline. Analizom makrostrukture nisu uočene nepravilnosti poput šupljina, pora, uključaka, naljepljivanja ili pukotina. Dimenzije šavova zavora su izmjerene u programu ImageJ, a prikazane su na slici 71. Kod MIG makroizbruska se jasnije vidi izgled šava zavora te su dimenzije šava nešto veće nego kod TIG makroizbruska. Također, kut uzvišenja je veći kod MIG makroizbruska. Izgled korijena zavora kod MIG uzorka odgovara profilu utora na bakrenoj podlošci.



Slika 71. Izgled i dimenzije: a) TIG makroizbruska i b) MIG makroizbruska

6. ZAKLJUČAK

Zaostala naprezanja u zavarenim konstrukcijama nastaju zbog nejednolikog zagrijavanja dijelova koji se spajaju. Područje materijala u blizini zavarivačkog luka se prvo zagrijava do temperature bliske temperaturi taljenja, a zatim se hladi, odvođeći toplinu u ostatak materijala. Naprezanja uzrokovana promjenom temperature unutar tijela obično nestanu kad tijelo kao cjelina dostigne istu temperaturu, ali ako su ta naprezanja značajnijeg iznosa, tada može doći do plastične deformacije tamo gdje je granica tečenja materijala prekoračena.

Metoda rendgenske difrakcije $\cos\alpha$ je poznata kao jedna od najpouzdanijih i najbržih nerazornih metoda za mjerenje zaostalih naprezanja u polikristalnim materijalima. Vrijeme potrebno za provedbu jednog mjerenje u kojem se dobivaju glavna i smična naprezanja iznosi samo 60 s. Zbog toga što se mjerenje može provesti jednokratnim izlaganjem uzorka rendgenskim zrakama, optički sustav je jednostavan i ne zahtijeva dodatne mehanizme za skeniranje što omogućuje lakše i praktičnije mjerenje i na licu mjesta i na terenu.

U eksperimentalnom dijelu rada uspješno su zavareni uzorci od austenitnog nehrđajućeg čelika MIG i TIG postupkom zavarivanja. Tijekom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, treba pripaziti da unos topline bude nizak kako bi se smanjio rizik od pojave deformacija, vrućih pukotina i senzibilizacije.

Analizom zaostalih naprezanja uočeno je da se kod longitudinalnih zaostalih naprezanja pretežno vlačna naprezanja formiraju u zoni utjecaja topline, a tlačna naprezanja u nepromijenjenom osnovnom metalu radi održavanja mehaničke ravnoteže. Transverzalna zaostala naprezanja su pretežno tlačna naprezanja. U usporedbi s glavnim naprezanjima, iznosi smičnih naprezanja su nešto manji. Nakon elektropoliranja, na svim točkama u kojima su prijašnja mjerenja bila nevaljana ili kritična (zbog prevelikih standardnih devijacija ili površinskih oštećenja) su izmjereni valjani rezultati. Na točkama gdje su prijašnje izmjereni valjani rezultati, nakon elektropoliranja nije došlo do velike promjene u iznosima naprezanja. Nadalje, izgled Debye prstena se popravio nakon elektropoliranja.

Analizom deformacija uzoraka se ispostavilo da se MIG uzorak više deformirao u odnosu na TIG uzorak, ali ne za puno. Analizom makrostrukture nisu uočene nepravilnosti poput šupljina, pora, uključaka, naljepljivanja ili pukotina. Na makroizbruscima se jasno vide šavovi zavara, ali ne i zona utjecaja topline. Kod MIG makroizbruska se jasnije vidi izgled šava zavara te su dimenzije šava nešto veće nego kod TIG makroizbruska. Također, kut uzvišenja je veći kod MIG makroizbruska.

LITERATURA

- [1] Robert W, Messler Jr. Principles of welding. Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. Rensselaer Polytechnic Institute. 1999.
- [2] Gao H. Residual Stress Development due to High-Frequency Post Weld Impact Treatments for High-Strength Steels [doctoral thesis]. Mechanical, Maritime and Materials Engineering; 2014 Available from: <https://doi.org/10.4233/uuid:2029863f-4967-4796-ba4f-199dca8c7212> (cited 2.11.2022.)
- [3] Zgurić M. Analiza deformacija pri zavarivanju austenitnih Cr-Ni čelika primjenom programa Visual Weld [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [4] Withers P J. Residual stress and its role in failure. Reports on Progress in Physics. 2007 Nov;70:2211-2264. doi. 10.1088/0034-4885/70/12/R04
- [5] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja (dostupno 5.11.2022.)
- [6] Dieter R. Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Berlin: Springer-Verlag; 1992.
- [7] Tanaka K. The $\cos\alpha$ method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector. Mechanical Engineering Reviews. 2019; Vol.6, No.1
- [8] Residual Stress Analyzer μ -X360s Ex General description Operating manual, Pulstec Industrial Co., Ltd.
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Residual-stress-measurement-by-X-Ray-Diffraction-Rigaku-Smart-Site-R5_fig4_333223255 (dostupno 17.11.2022.)
- [10] <https://phys.org/news/2015-04-npl-off-site-x-ray-residual-stress.html> (dostupno 17.11.2022.)
- [11] Fitzpatrick ME, Fry AT, Holdway P, Kandil FA, Shackleton J, Souminen L. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2. Measurement Good Practice Guide. 2015;No. 52
- [12] Garašić I. Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [13] <https://www.iise.org/details.aspx?id=887> (dostupno 18.11.2022.)
- [14] <https://www.wieland-diversified.com/blog/use-stainless-steel-food-processing-industry/> (dostupno 18.11.2022.)

- [15] HRN EN 1011-3:2018 – Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 3. dio: Elektrolučno zavarivanje nehrđajućih čelika
- [16] https://www.researchgate.net/figure/Cast-microstructure-of-austenitic-stainless-steel-with-6-of-d-ferrite-and-Al-2-O-3_fig3_304003875 (dostupno 18.11.2022.)
- [17] Katayama S. Defect formation mechanisms and preventive procedures in laser welding. Handbook of Laser Welding Technologies. 2013;332-373. doi. 10.1533/9780857098771.2.332
- [18] Raja VS, Shoji T. Stress corrosion cracking. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011.
- [19] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferritic-stainless-steel> (dostupno 19.11.2022.)
- [20] <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php> (dostupno 19.11.2022.)
- [21] Ziewiec A, Zielinska-Lipiec A, Tasak E. Microstructure of welded joints of X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) martensitic stainless steel after heat treatment. Archives of metallurgy and materials. 2014;59(3). doi. 10.2478/amm-2014-0162
- [22] Garašić I. Autorizirana predavanja iz kolegija „Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija“. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [23] Katalog tvornice dodatnih materijala za zavarivanje Elektroda Zagreb d.d. 2018.
- [24] <https://www.sigmat.hr/de/zusatzliche-materialien/2492-prasak-esab-ok-flux-1081> (dostupno 21.11.2022.)
- [25] Horvat M, Kondić V, Brezovečki D. Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. Technical journal. 2014;8(4):426-432
- [26] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tig-it-how-a-tig-welder-works-and-when-to-tig-weld> (dostupno 21.11.2022.)
- [27] <https://www.messer.hr/formir-plinovi> (dostupno 21.11.2022.)
- [28] https://www.eurotehnika.hr/wp-content/uploads/2022/09/Katalog_Schweisszusatz_E_20 (dostupno 21.11.2022.)
- [29] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2867> (dostupno 27.11.2022.)
- [30] <https://www.castolin.com/product/castotig-45500-w-tig-rods> (dostupno 27.11.2022.)
- [31] <https://www.lenntech.com/stainless-steel-316l.htm> (dostupno 27.11.2022.)
- [32] <https://www.youtube.com/watch?v=zrIT2mSQFe4> (dostupno 22.11.2022.)

PRILOZI

I. CD-R disk