

# Analiza zaostalih napreznja pri zavarivanju MCAW postupkom u zaštiti mješavine Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>

---

**Borevković, Borna**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:235:988077>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Borna Borevković**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Borna Borevković

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentu Mislavu Štefoku, mag. nav. arch. na pruženoj pomoći pri radu s opremom i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima laboratorija za zavarivanje na izradi uzoraka za potrebe ovog rada.

Posebno se zahvaljujem mojim roditeljima Božidaru i Dejani, sestri Evi, baki Ruži i svima ostalima u široj i užoj obitelji, a zatim i prijateljima na podršci tijekom svih ovih godina mog obrazovanja.

Borna Borevković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Borna Borevković**

JMBAG: 0035204810

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza zaostalih naprezanja pri zavarivanju MCAW postupkom u zaštiti mješavine Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of residual stress during MCAW welding process in shielding of Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixture**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati metode mjerenja zaostalih naprezanja s posebnim naglaskom na tehniku rendgenske difrakcije. Proučiti mehanizam zaostalih naprezanja u zavarenim spojevima kao i utjecajne faktore koji utječu na intenzitet istih. Specificirati glavne značajke zavarivanja metalnim prahom punjenom žicom te utjecaj sastava zaštitnog plina na geometriju i mehanička svojstva zavara.

U eksperimentalnom dijelu provesti mjerenja zaostalih naprezanja u zavarenim spojevima na više konfiguracija oblika i pripreme spoja. Uzorke zavariti na osnovnom materijalu S355 uz primjenu MCAW postupka i plinske mješavine Ar-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. Analizirati rezultate mjerenja te donijeti zaključke o utjecaju parametara i konfiguraciji spoja na intenzitet i distribuciju zaostalih naprezanja.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2023.

Datum predaje rada:

30. studenoga 2023.

Predviđeni datumi obrane:

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Iviča Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Iviča Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. MIG/MAG I MCAW POSTUPCI ZAVARIVANJA.....	2
2.1. MIG/MAG zavarivanje .....	2
2.2. Zaštitni plinovi i njihov utjecaj na svojstva zavara.....	5
2.2.1. Argon - Ar.....	5
2.2.2. Helij - He.....	6
2.2.3. Vodik – H <sub>2</sub> .....	7
2.2.4. Kisik – O <sub>2</sub> .....	7
2.2.5. Ugljikov dioksid – CO <sub>2</sub> .....	7
2.2.6. Plinska mješavina Ar – CO <sub>2</sub> – O <sub>2</sub> .....	8
2.3. MCAW postupak zavarivanja.....	9
3. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	12
3.1. Nastanak i vrste zaostalih naprezanja u zavarenom spoju .....	12
3.2. Utjecaj zaostalih naprezanja na zavarene konstrukcije.....	15
3.3. Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih naprezanja .....	16
3.4. Metode smanjenja zaostalih naprezanja.....	18
3.4.1. Broj i raspored zavarenih spojeva .....	18
3.4.2. Prednamještanje i prednaprezanje.....	19
3.4.3. Predgrijavanje .....	19
3.4.4. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja .....	20
3.4.5. Redukcija zaostalih naprezanja vibracijom.....	21
4. METODE MJERENJA ZAOSTALIH NAPREZANJA .....	22
4.1. Metoda mjerenja zaostalih naprezanja bušenjem provrta .....	23
4.2. Metoda cilindrične jezgre.....	25
4.3. Metoda mjerenja izrezivanjem proreza.....	26
4.4. Ultrazvučna metoda .....	27
4.5. Metoda rendgenske difrakcije .....	28
4.5.1. Tehnike mjerenja rendgenskom difrakcijom .....	31
4.5.1.1. Metoda $\sin^2 \psi$ .....	31
4.5.1.2. Metoda $\cos \alpha$ .....	33
4.5.2. Elektropoliranje.....	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	37
5.1. Oprema za zavarivanje i potrošni materijal .....	37

---

5.1.1.	Izvor struje za zavarivanje .....	37
5.1.2.	Osnovni materijal.....	39
5.1.3.	Dodatni materijal.....	40
5.1.4.	Zaštitni plin .....	41
5.2.	Zavarivanje uzorka kutnog spoja .....	42
5.2.1.	Priprema kutnog spoja .....	42
5.2.2.	Parametri zavarivanja kutnog spoja .....	42
5.3.	Mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja .....	44
5.3.1.	Mjerenje nakon čišćenja površine etanolom.....	44
5.3.2.	Mjerenje nakon elektropoliranja .....	47
5.4.	Mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku sučeljenog spoja .....	51
5.4.1.	Priprema sučeljenog spoja .....	51
5.4.2.	Parametri zavarivanja sučeljenog spoja .....	51
5.5.	Mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku sučeljenog spoja .....	54
5.5.1.	Mjerenje zaostalih naprezanja prije zavarivanja – brušena površina.....	54
5.5.2.	Mjerenje zaostalih naprezanja prije zavarivanja – elektropolirana površina .....	56
5.5.3.	Mjerenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja – brušena površina .....	59
5.5.4.	Mjerenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja – elektropolirana površina ...	62
6.	ZAKLJUČAK.....	66
	LITERATURA.....	68

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema opreme za MIG/MAG zavarivanje [3] .....	2
Slika 2.	Oblik električnog luka i penetracije argona i helija [6].....	6
Slika 3.	Profil penetracije zavarenog spoja za Ar, CO <sub>2</sub> i mješavinu Ar/CO <sub>2</sub> 82/18 [4] .....	8
Slika 4.	Utjecaj CO <sub>2</sub> i O <sub>2</sub> u mješavinama s Ar na profil penetracije kod zavarivanja kutnih spojeva [5] .....	9
Slika 5.	Prikaz presjeka pune žice i šavne te bešavne praškom punjene žice [8].....	9
Slika 6.	Usporedba razlike u depozitima između MCAW, FCAW i pune žice [12].....	10
Slika 7.	Longitudinalna i transverzalna naprezanja u sučeljenom zavarenom spoju [14]..	12
Slika 8.	Skica štapa kojem je onemogućeno toplinsko rastezanje i stezanje [13] .....	13
Slika 9.	Pod a) prikaz tijeka zavarivanja, pod b) longitudinalna zaostala naprezanja, pod c) temperatura [15] .....	14
Slika 10.	Uzrok vlačnog i tlačnog zaostalog naprezanja u zavarenom spoju [14] .....	15
Slika 11.	Utjecaj radnih vlačnih naprezanja na longitudinalna zaostala naprezanja u sučeljenom zavaru [7] .....	16
Slika 12.	Prikaz različitih redoslijeda zavarivanja i njihov utjecaj na raspodjelu i intenzitet zaostalih naprezanja u zavaru [14] .....	18
Slika 13.	Prikaz prednamještanja i prednaprezanja radnog komada [7].....	19
Slika 14.	$\vartheta$ - $t$ dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [17].....	20
Slika 15.	Podjela metoda mjerenja zaostalih naprezanja po razornosti i dubini prodiranja [20] .....	22
Slika 16.	Shema metode mjerenja zaostalih naprezanja bušenjem provrta [20] .....	24
Slika 17.	Shema metode cilindrične jezgre [20].....	25
Slika 18.	Shema metode mjerenja zaostalih naprezanja izrezivanjem prereza [20] .....	26
Slika 19.	Braggov zakon [24] .....	28
Slika 20.	Shema uzorka u ravninskom stanju naprezanja s prikazom različitih orijentacija kristalografskih ravnina [26] .....	29
Slika 21.	Shematski prikaz $\sin^2 \psi$ metode [27] .....	32
Slika 22.	Primjer $\sin^2 \psi$ , $d$ dijagrama za tlačno i vlačno naprezanje [24] .....	32
Slika 23.	Dijagram $\sin^2 \psi$ , $d$ - pod a) nejednolike deformacije, pod b) usmjerena mikrostruktura [26].....	33
Slika 24.	Shema $\cos \alpha$ metode [2] .....	34
Slika 25.	Raspodjela zaostalih naprezanja uslijed brušenja [7].....	35
Slika 26.	Shema elektropoliranja [30] .....	36
Slika 27.	Izvor struje za zavarivanje Daihen Varstroj WB-P500L s dodavačem žice .....	37
Slika 28.	Identifikacijska pločica izvora za zavarivanje Daihen Varstroj WB-500L.....	38
Slika 29.	Traktor za zavarivanje Bug-O Systems MSD-1002.....	39
Slika 30.	Plinska boca koja sadrži plinsku mješavinu Ferroline C12X2 proizvođača Messer .....	41
Slika 31.	Priprema kutnog zavarenog spoja [37].....	42
Slika 32.	Zavareni uzorak kutnog spoja .....	43
Slika 33.	Mjerenje zaostalih naprezanja na uzorku kutnog spoja.....	44
Slika 34.	Prikaz označenih točaka mjerenja u transverzalnoj ravnini .....	45
Slika 35.	Raspodjela $\sigma_x$ zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja.....	46
Slika 36.	Raspodjela zaostalih naprezanja kod zavarenog kutnog T-spoja [7] .....	46
Slika 37.	Raspodjela $\tau_{xy}$ naprezanja u uzorku kutnog spoja .....	47
Slika 38.	Elektropoliranje uzorka kutnog spoja.....	48
Slika 39.	Elektropolirane točke mjerenja na uzorku kutnog spoja .....	48



Slika 40.	Raspodjela $\sigma_x$ zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja nakon elektropoliranja .....	49
Slika 41.	Raspodjela $\tau_{xy}$ zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja nakon elektropoliranja .....	50
Slika 42.	Priprema sučeljenog spoja s podlogom [37] .....	51
Slika 43.	Stegnuti uzorak sučeljenog spoja prije zavarivanja .....	52
Slika 44.	Zavarivanje sučeljenog spoja - prvi prolaz pod a) i drugi prolaz pod b).....	52
Slika 45.	Sučeljeni spoj – pod a) nakon zavarivanja, pod b) nakon čišćenja etanolom .....	53
Slika 46.	Točke mjerenja zaostalih naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	54
Slika 47.	Raspodjela $\sigma_x$ naprezanja u brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja	55
Slika 48.	Raspodjela $\tau_{xy}$ naprezanja u brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja .....	56
Slika 49.	Elektropoliranje uzorka sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	56
Slika 50.	Raspodjela $\sigma_x$ naprezanja u elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	57
Slika 51.	Raspodjela $\tau_{xy}$ naprezanja nakon elektropoliranja sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	58
Slika 52.	Usporedba elektropolirane i brušene površine .....	58
Slika 53.	Usporedba Debye-Scherrerovog prstena u istoj točki - lijevo brušena površina, desno elektropolirana površina.....	59
Slika 54.	Točke mjerenja zaostalih naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	60
Slika 55.	Usporedba $\sigma_x$ naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja .....	61
Slika 56.	Usporedba $\tau_{xy}$ naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja .....	62
Slika 57.	Elektropoliranje nadvišenja zavara .....	62
Slika 58.	Točke mjerenja zaostalih naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	63
Slika 59.	Usporedba $\sigma_x$ naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	64
Slika 60.	Usporedba $\tau_{xy}$ naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	65

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva čelika S355 [34].....	39
Tablica 2. Kemijski sastav čelika S355 [34] .....	40
Tablica 3. Mehanička svojstva čistog metala zavara od elektrode Kisol KX-706M [35]... ..	40
Tablica 4. Kemijski sastav čistog metala zavara od elektrode Kisol KX-706M [35] .....	40
Tablica 5. Parametri zavarivanja uzorka kutnog spoja.....	43
Tablica 6. Izmjerena zaostala napreznja na uzorku kutnog spoja .....	45
Tablica 7. Izmjerena zaostala napreznja na elektropoliranom uzorku kutnog spoja.....	49
Tablica 8. Parametri zavarivanja uzorka sučeljenog spoja.....	53
Tablica 9. Izmjerena zaostala napreznja na brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	55
Tablica 10. Izmjerena zaostala napreznja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja.....	57
Tablica 11. Izmjerena zaostala napreznja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	60
Tablica 12. Izmjerena zaostala napreznja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja.....	63

---

**POPIS KRATICA**

Ar	Argon
BRSL	eng. Block Removal, Spliting and Layering – hrv. uklanjanje odjeljaka, cijepanje i raslojavanje
C	Ugljik
CO	Ugljikov monoksid
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
DC	eng. Direct current – hrv. Istosmjerna struja
FCAW	eng. Flux Core Arc Welding – hrv. Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom
Fe	Željezo
H <sub>2</sub>	Vodik
He	Helij
MAG	eng. Metal Active Gas – hrv. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
MCAW	eng. Metal Core Arc Welding – hrv. Elektrolučno zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom
MIG	eng. Metal Active Gas – hrv. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
Mn	Mangan
N	Dušik
O	Atomarni kisik
O <sub>2</sub>	Kisik
P	Fosfor
PA	Vodoravni položaj zavarivanja
PB	Horizontalno – vertikalni položaj zavarivanja
S	Sumpor
Si	Silicij

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_1$	°C	Temperatura fazne pretvorbe
$A_5$	%	Istezljivost
$c$	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$d$	nm	Udaljenost kristalnih rešetki
$d_0$	nm	Udaljenost između ravnina bez opterećenja
$d_1$	mm	Debljina lima uzorka kutnog zavarenog spoja
$d_2$	mm	Debljina lima uzorka sučeljenog zavarenog spoja
$d_n$	nm	Udaljenost između ravnina pod opterećenjem
$d_y$	mm	Udaljenost od sredine žljeba ili uzorka
$D_\sigma$	MPa	Devijacija izmjenjenog normalnog naprezanja
$D_\tau$	MPa	Devijacija izmjenjenog smičnog naprezanja
$d_{\phi\psi}$	nm	Udaljenost ravnina pod kutovima $\phi$ i $\psi$ pod opterećenjem
$d_\psi$	nm	Udaljenost ravnina pod kutom $\psi$ pod opterećenjem
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$I$	A	Jakost struje
$I_{1\max}$	A	Najveća dopuštena ulazna struja
$I_2$	A	Izlazna struja
$I_{kr}$	A	Kritična struja
$KV$	J	Udarni rad loma
$n$	/	Cijeli broj
$Q$	J/mm	Unos topline
$R_d$	MPa	Dinamička čvrstoća
$R_e$	MPa	Granica razvlačenja
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$t$	h	Vrijeme držanja
$T_t$	K	Temperatura tališta
$U$	V	Napon
$U_1$	V	Ulazni napon
$U_2$	V	Izlazni napon
$X$	%	Intermitencija
$\alpha$	°	Azimutni kut
$\alpha_T$	K <sup>-1</sup>	Koeficijent linearnog rastezanja
$\varepsilon$	/	Relativno produljenje
$\varepsilon_x$	/	Relativno produljenje u smjeru osi x
$\varepsilon_{\phi\psi}$	/	Relativno produljenje u smjeru kutova $\phi$ i $\psi$
$\theta$	°	Difrakcijski kut
$\vartheta$	°C	Temperatura

---

$\lambda$	W/mK	Toplinska vodljivost
$\lambda$	nm	Valna duljina
$\nu$	/	Poissonov faktor
$\sigma_1$	MPa	Vanjsko ili radno naprezanje
$\sigma_2$	MPa	Vanjsko ili radno naprezanje
$\sigma_x$	MPa	Longitudinalno naprezanje
$\sigma_y$	MPa	Transverzalno naprezanje
$\sigma_z$	MPa	Naprezanje u smjeru debljine zavara
$\sigma_\phi$	MPa	Naprezanje u smjeru ravnine pod kutom $\phi$
$\tau_{xy}$	MPa	Smično naprezanje
$\psi$	°	Simetralni kut
$\psi_0$	°	Kut detektora s obzirom na normalu površine
$\Omega$	°	Upadni kut

---

**SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu analizirana je raspodjela zaostalih naprezanja izmjenjenih metodom rendgenske difrakcije u različitim konfiguracijama zavarenog spoja. Raspodjela zaostalih naprezanja nakon zavarivanja mjerena je u uzorcima kutnog i sučeljenog zavarenog spoja od čelika S355. Uzorci su zavareni MAG postupkom uz korištenje žice punjene metalnim praškom.

U teorijskom dijelu opisan je princip rada i uspoređeni su postupci MIG/MAG i MCAW zavarivanja. Objasnjena su zaostala naprezanja, vrste i način nastanka te metode smanjenja zaostalih naprezanja prije, tijekom i nakon zavarivanja. Pojašnjene su i različite metode mjerenja zaostalih naprezanja s naglaskom na metodi mjerenja rendgenskom difrakcijom korištenjem  $\cos \alpha$  metode.

U eksperimentalnom dijelu cilj je bio analizirati raspodjelu zaostalih naprezanja nastalu nakon zavarivanja MCAW postupkom. Opisana je priprema i parametri zavarivanja te postupak mjerenja zaostalih naprezanja. U zaključku rada analizirani su dobiveni rezultati.

Ključne riječi: zavarivanje, MAG, MCAW, zaostala naprezanja, rendgenska difrakcija

**SUMMARY**

In this thesis, the distribution of residual stresses was analyzed and measured by a method of X-ray diffraction in different types of welding joints. The distribution of residual stresses was measured after welding using the MCAW process. One fillet and one butt weld joint sample were welded, each made out of S355 steel.

In the theoretical part, the working principles of MIG/MAG and MCAW welding processes are explained and compared. Mechanisms for the formation of different types of residual stresses are described. Methods that can be used to minimize residual stress before, during, and after welding are also described. The methods of measuring residual stresses are described, with an emphasis on an X-ray diffraction measurement technique called  $\cos \alpha$ .

In the experimental part, the goal was to analyze the distribution of residual stresses created after MCAW welding. The preparation and welding parameters are described, as well as the residual stress measurement procedure. At the conclusion of the work, the obtained results were analyzed.

Key words: welding, MAG, MCAW, X-ray diffraction, residual stresses

## 1. UVOD

Zavareni spojevi prisutni su u raznim proizvodima od rukohvata za stepeništa preko posuda pod tlakom do automobila i brodova. Jedan od najčešće korištenih postupaka za zavarivanje je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina, odnosno MIG/MAG. To je postupak s automatski reguliranim dovodom žice što povećava produktivnost i olakšava rukovanje opremom. Zbog jednostavnog rukovanja i niske cijene koristi se posvuda od jednostavnih do kompleksnih zavarenih konstrukcija. MAG postupak je za spajanje konstrukcijskih čelika vrlo je jeftin, ali ima i svoju još efikasniju verziju pod nazivom elektrolučno zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom tj. MCAW (eng. Metal Core Arc Wire). MCAW postupak ima veći depozit materijala u zavar od MAG postupka pri istoj jakosti struje. Brzina žice promjera 1,2 mm kod MAG postupka pri jakosti struje od 330 A je 12 m/min, a kod MCAW postupka iznosi 15 m/min [1]. MCAW postupak je skoro identičan MAG postupku stoga ga je lako primijeniti u proizvodnji, samo je cijena dodatnog materijala viša i potrebni su posebni kotačići za dovod žice. Kod svakog elektrolučnog postupka zavarivanja neizbježan je nejednoliki unos topline što uzrokuje zaostala naprezanja i deformacije. MCAW postupkom moguće zavariti neki spoj s manje prolaza nego s MAG postupkom. Motivacija za eksperimentalni dio ovog rada je činjenica da raspodjela zaostalih naprezanja u spojevima zavarenim MCAW postupkom nije toliko istražena kao kod MAG postupka. Cilj ovog rada je određivanje intenziteta i raspodjele zaostalih naprezanja u različitim pripremama spojeva od čelika S355 koji su zavareni MCAW postupkom. Za određivanje zaostalih naprezanja korištena je nerazorna metoda mjerenjem rendgenskom difrakcijom. Korištena je  $\cos \alpha$  metoda rendgenske difrakcije koja je vrlo brza i pouzdana [2].

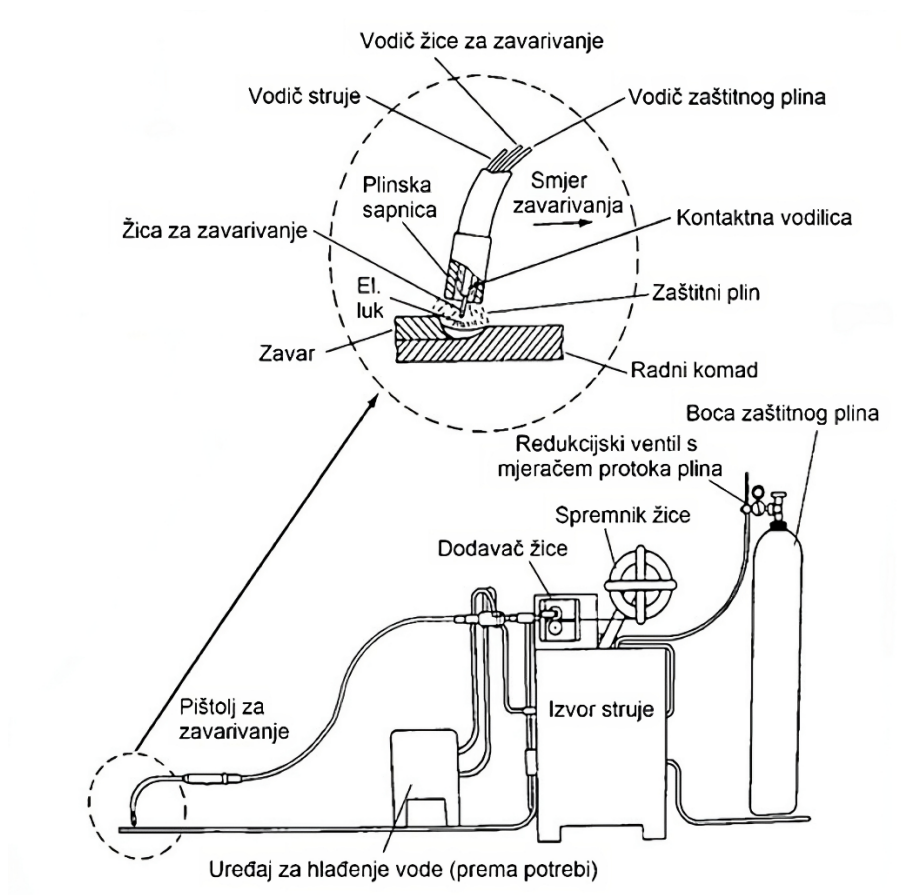


## 2. MIG/MAG I MCAW POSTUPCI ZAVARIVANJA

U navedenom poglavlju pobliže je opisan MIG/MAG postupak i varijanta postupka MCAW. Principa rada MIG/MAG postupka, opreme i parametara skoro je identičan MCAW postupku. Opisom MIG/MAG postupka stečen je preduvjet za razumijevanje razlika između ta dva postupka zavarivanja.

### 2.1. MIG/MAG zavarivanje

MIG/MAG je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina. Pod pojmom inertan ili aktivan plin podrazumijeva se da li neki zaštitni plin reagira s rastaljenim metalom tijekom zavarivanja. Tijekom zavarivanja MIG/MAG postupkom koristi se taljiva elektroda u obliku žice. Dodatni materijal u obliku žice namotan je u kolut. Kolut s dodatnim materijalom nalazi se u spremniku za žicu. Kolut se odmotava pomoću automatski reguliranog dodavača žice. Žica putuje kroz dodavač žice u polikabel koji povezuje pištolj za zavarivanje s ostalim elementima uređaja za MIG/MAG zavarivanje prikazanih na slici 1. Žica dolazi u vrh pištolja za zavarivanje gdje se nalazi kontaktna vodilica koja povezuje dodatni materijal i izvor struje [3].



Slika 1. Shema opreme za MIG/MAG zavarivanje [3]

Žica može biti spojena na istosmjernu struju pozitivnog ili negativnog polariteta ili na izmjeničnu struju. Najčešće se žica spaja na plus pol (+), a osnovni materijal tj. radni komad koji se zavaruje na minus pol (-) kada se koristi istosmjerna struja. Nakon uspostave mehaničkog i električnog kontakta između žice i kontaktne vodilice žica dalje prolazi kroz plinsku sapnicu kroz koju koaksijalno protječe zaštitni plin. Zaštitni plin štiti mjesto zavara od negativnog utjecaja atmosfere na kemijski sastav rastaljenog metala, sprječavajući oksidaciju. Zaštitni plin pomaže održavanju električnog luka i ovisno o odabiru plinske mješavine može utjecati na geometriju i mehanička svojstva zavara. Plin može biti inertan (argon ili helij) ili aktivan npr. ugljikov dioksid, kisik itd. U području koje je zaštićeno plinom tali se elektroda u obliku žice te nastaje električni luk između osnovnog i dodatnog materijala. U električnom luku tijekom zavarivanja se postiže temperatura između 6000 i 8000 K [4]. Energija unesena električnim lukom tali elektrodu i osnovni materijal. Nakon skrućivanja rastaljenog metala nastaje zavareni spoj. Kako bi se dobio dobar zavar potrebno je ispravno odabrati i podesiti parametre zavarivanja. MIG/MAG postupak ima razne parametre koji se mogu fino podesiti što znači da se postupak može prilagoditi raznim metalnim materijalima [3].

Parametri zavarivanja MIG/MAG postupkom (s vrijednostima za žicu promjera 1,2 mm) su [3]:

- vrsta struje i polaritet žice, može biti istosmjerna struja pozitivnog ili negativnog polariteta ili izmjenična struja,
- jakost struje, ( $I=80\div 400$  A), Jakost struje utječe na ukupni unos topline, što je struja jača to se u istoj jedinici vremena rastali više dodatnog materijala što se kompenzira ubrzanjem dovoda žice do mjesta zavarivanja,
- napon zavarivanja, ( $U=15\div 35$  V), (veći napon, veća duljina električnog luka),
- vrsta i protok plina, ( $12\div 20$  l/min),
- promjer žice, (0,8, 1, 1,2, 1,6 mm),
- tehnika rada – lijeva, neutralna i desna,
- slobodni kraj žice ( $10\div 20$  mm),
- brzina zavarivanja ( $20\div 50$  cm/min),
- induktivitet.

Parametar koji najviše utječe na penetraciju je jakost struje. Jakost struje utječe na način prijenosa metala kod zavarivanja. Vrijednosti navedene u primjerima raspona jakosti struje za određenu vrstu prijenosa metala odnosi se na promjer žice u iznosu 1,2 mm. Kod žice nekog drugog promjera iznos jakosti struje bio bi manji ili veći s obzirom na manji ili veći promjer žice. Prijenos metala može se podijeliti na tri glavne skupine:

- prijenos kratkim spojevima,
- mješoviti luk,
- štrcajući luk.

Prijenos kratkim spojevima javlja se kod nižih struja između 50 i 180 A, koristi se za zavarivanje tanjih limova ili kod zavarivanja korijena te omogućuje zavarivanje u svim položajima [3]. Niska je unesena energija što smanjuje deformacije, ali je i depozit materijala mali te može doći do nedovoljne penetracije. Dolazi do rasprskavanja što zahtjeva dodatno čišćenje. Kod mješovitog luka koji nastaje u rasponu jakosti struje od 180 do 240 A se povremeno metal prenosi kratkim spojem, a povremeno štrcajućim lukom. Kod mješovitog luka javlja se izraženo rasprskavanje te je nepredvidiv zbog čega se izbjegava zavarivanje mješovitim lukom. Ako se poveća iznos jakosti struje iznad 240 A nastaje štrcajući luk. Takav prijenos metala počinje kada jakost struje pređe vrijednost koja se naziva kritična struja  $I_{kr}$  koja je različita za svaki zaštitni plin [4]. Metalne kapljice putuju slobodnim letom bez dodira elektrode i osnovnog materijala. Postiže se veliki unos topline, a time i veliki depozit što pozitivno utječe na produktivnost. Koristi se kod zavarivanja debljih materijala u vodoravnom položaju. Izgled zavara je dobar nakon zavarivanja štrcajućim lukom [5]. Kod zavarivanja osim različitih načina prijenosa metala postoje i različite tehnike rada. Tehnike rada mogu se podijeliti na lijevu, neutralnu i desnu tehniku. Kod lijeve tehnike rada pištolj je nagnut od pet do deset stupnjeva u smjeru zavarivanja, a kod desne u suprotnom smjeru. Neutralna tehnika znači da je žica okomita na zavar. Lijeve tehnike rada unosi manje topline od desne što za uzvrat znači manju dubinu penetracije, ali je lakše zavarivati zbog bolje preglednosti [3].

Prednosti postupka su [3]:

- primjenjiv za zavarivanje raznih metala,
- velika mogućnost izbora parametara,
- širok raspon debljina koje se mogu zavariti,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju.

Nedostaci postupka su [3]:

- kompleksna oprema,
- otežan rad na terenu zbog velike i teške opreme te zbog vjetra,
- velik broj mogućih grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada.

## 2.2. Zaštitni plinovi i njihov utjecaj na svojstva zavara

Zaštitni plinovi koriste se kod MIG/MAG zavarivanja kako bi se zaštitio rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere. Zaštitni plinovi utječu na [4]:

- vrstu električnog luka tj. način prijenosa metala,
- svojstva i sastav taline,
- parametre zavarivanja.

Zaštitni plinovi mogu se podijeliti na inertne i aktivne plinove. Inertni plinovi ne reagiraju s rastaljenim metalom. Inertni zaštitni plinovi su argon, helij i njihove mješavine. Koriste se kod zavarivanja metala koji su osjetljivi na utjecaj atmosfere npr. aluminij, bakar, krom-nikal čelici i titanij. Kod zavarivanja konstrukcijskih čelika primjenjuju se aktivni plinovi. [4]

### 2.2.1. Argon - Ar

Argon čini nešto manje od jedan posto Zemljine atmosfere. Argon je inertan i neutrovan plin bez boje, mirisa i okusa i za 40 % je gušći od zraka. Argon je jednoatomni plin te zbog toga ima malu energiju ionizacije koja doprinosi stabilnosti električnog luka. Kod zavarivanja konstrukcijskih čelika ne preporuča se MIG zavarivanje u 100 % čistom argonu jer rastaljeno željezo ima veliku površinsku napetost. Zbog toga se rastaljeni metal teško razlijeva po površini i dobiva se konveksan zavar nepravilnog oblika. Željezni oksidi imaju bolje kvašenje zato se koriste plinske mješavine argona s ugljičnim dioksidom ili kisikom kako bi rastaljeni metal bio manje viskozan. Argon ima nižu toplinsku vodljivost od ostalih zaštitnih plinova. Zbog toga električni luk zaštićen argonom ima dvije zone: vruću usku jezgru i hladniju široku vanjsku zonu električnog luka. Različiti oblici zona električnog luka direktno utječu na izgled, tj. profil penetracije zavarenog spoja. Argon daje profil penetracije sa širim gornjim dijelom, a uskim i dubokim donjim dijelom. [4], [6]

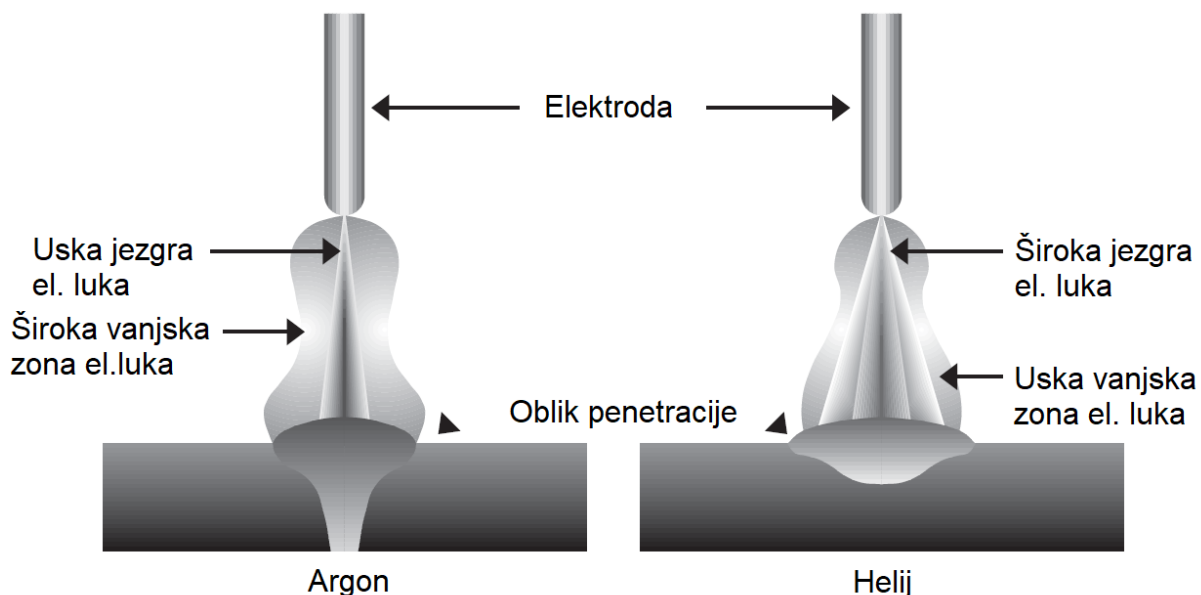
Za inertan plin se češće koristi argon od helija jer [7]:

- pruža bolju stabilnost i lakše paljenje električnog luka,
- ima manju dubinu penetracije – korisno kod zavarivanja tankih limova,
- pomaže kod čišćenja oksida pri zavarivanju aluminija i magnezija,
- manja cijena i veća dostupnost,
- potreban je manji protok plina za dobru zaštitu – pokriva područje oko zavara.

### 2.2.2. Helij - He

Helij je drugi najlakši kemijski element nakon vodika. To je jednoatomni plin. Gustoća mu je oko sedam puta manja od gustoće zraka. Također je drugi najčešće korišten inertan zaštitni plin kod zavarivanja [7]. Svojstva helija u usporedbi s argonom su [6], [7]:

- potrebno je više energije za ionizaciju tj. viši napon, zbog toga je teže pokrenuti i održati električni luk,
- potreban je dva do tri puta veći protok plina pri zavarivanju s He nego s Ar,
- najčešće se koristi za zavarivanje nehrđajućeg čelika i aluminija,
- ne podržava štrcajući luk,
- lakši od zraka – odličan za zavarivanje u nadglavnom položaju,
- helij ima veću toplinsku vodljivost od argona, stoga daje električni luk koji ima širu jezgru električnog luka i više temperature s užom vanjskom zonom, skica električnog luka kod upotrebe He i Ar prikazana je na slici 2.,
- upotreba He daje širok profil penetracije zbog široke jezgre luka,
- prilikom zavarivanja čelika debljine šest milimetara s He se dobiva dubina penetracije od četiri i pol milimetra pri sobnoj temperaturi, dok se ista dubina penetracije postiže s Ar uz temperaturu predgrijavanja od 400 °C.



Slika 2. Oblik električnog luka i penetracije argona i helija [6]

### 2.2.3. **Vodik – H<sub>2</sub>**

Vodik je najlakši kemijski element. To je dvoatomni zapaljivi plin. Dodaje se u neke dvokomponentne i trokomponentne plinske mješavine npr. pomiješan s Ar u udjelu od jedan do pet posto. Koristi se zbog iznimno velike toplinske vodljivosti. Koristi se kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika i legura od nikla. Pruža bolje razlijevanje taline i kvašenje korijena zavara. Električni luk mora biti kraći nego kod zavarivanja s čistim Ar. Omogućuje veće brzine zavarivanja. Preko pet posto može uzrokovati poroznost visokolegiranih čelika. Previše vodika u zavaru može uzrokovati vodikovu bolest i negativno utjecati na mehanička svojstva zavara. [5], [6]

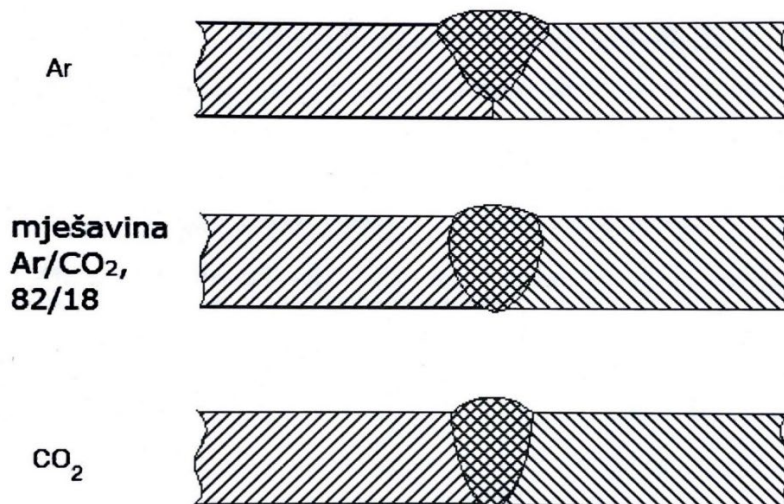
### 2.2.4. **Kisik – O<sub>2</sub>**

Kisik čini 50 % Zemljine kore i 21 % atmosfere po volumenu. Kisik reagira s gotovo svim kemijskim elementima osim s inertnim plinovima. Podržava gorenje [6]. U mješavinama zaštitnih plinova kisik se miješa se s argonom u udjelu od jedan do pet posto [5]. Željezni oksidi smanjuju površinsku napetost rastaljenog metala i poboljšavaju kvašenje zato se koriste plinske mješavine Ar i CO<sub>2</sub> ili Ar i O<sub>2</sub> kako bi rastaljeni metal bio manje viskozan. Željezni oksidi zbog boljeg kvašenja smanjuju nadvišenje i poboljšavaju izgled zavara [7]. Također nastaju sitnije kapljice zbog čega se poboljšava prijenos metala i smanjuje se kritična struja  $I_{kr}$  za postizanje štrcajućeg luka [4].

### 2.2.5. **Ugljikov dioksid – CO<sub>2</sub>**

Ugljikov dioksid je plin koji je 50 % gušći od zraka. To je plin bez boje i mirisa s pomalo kiselkastim okusom. U povišenim koncentracijama postaje otrovan za čovjeka. Ne podržava gorenje. To je najčešće korišten aktivni zaštitni plin. Relativno je jeftin. CO<sub>2</sub> je troatomni plin. Dvoatomni i troatomni plinovi trebaju više energije kako bi se ionizirali i time postali vodljivi za razliku od jednoatomnih kao što je Ar. Dvoatomni i troatomni plinovi trebaju manje energije za ionizaciju, ali kada nakon disocijacije molekule plina dođu u kontakt s hladnijim osnovnim materijalom razdvojene komponente npr. CO i O se rekombiniraju nazad u CO<sub>2</sub> i oslobađa se toplinska energija koja dodatno zagrijava metal što čini zavarivanje efikasnijim. Preveliko stvaranje željeznih oksida tijekom zavarivanja regulira se dodavanjem Si i Mn u dodatni materijal koji reagiraju s O<sub>2</sub> umjesto Fe. Zavarivanjem sa 100 % CO<sub>2</sub> uzrokuje pojačano rasprskavanje što smanjuje efikasnost tj. povećava troškove materijala i rada zbog potrebnog dugotrajnijeg čišćenja nakon zavarivanja. [5], [6]

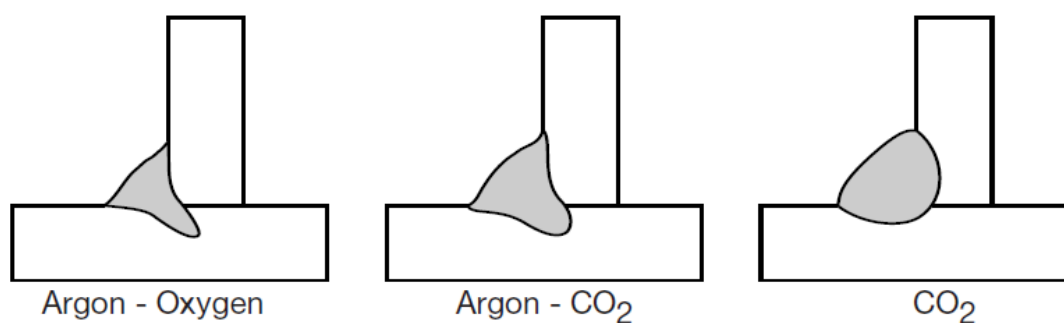
Uz to zavarivanje sa 100 % CO<sub>2</sub> ima lošiju stabilnost luka od Ar i povećava kritičnu struju za postizanje štrcajućeg luka. CO<sub>2</sub> daje uzak, ali dubok profil penetracije. Najčešće korištena dvokomponentna plinska mješavina je mješavina Ar i CO<sub>2</sub> u omjeru 82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>. Taj omjer daje odličan kompromis profila penetracije sa širokim vrhom i dobrom dubinom penetracije zbog dodanog CO<sub>2</sub>. Na slici 3. prikazana je usporedba profila penetracije kod korištenja 82/18 mješavine i njezinih pojedinačnih komponenti. Uz navedeno CO<sub>2</sub> smanjuje mogućnost nastanka ugorina, a električni luk je stabilan i bez pretjeranog rasprskavanja. [4], [7]



Slika 3. Profil penetracije zavarenog spoja za Ar, CO<sub>2</sub> i mješavinu Ar/CO<sub>2</sub> 82/18 [4]

### 2.2.6. Plinska mješavina Ar – CO<sub>2</sub> – O<sub>2</sub>

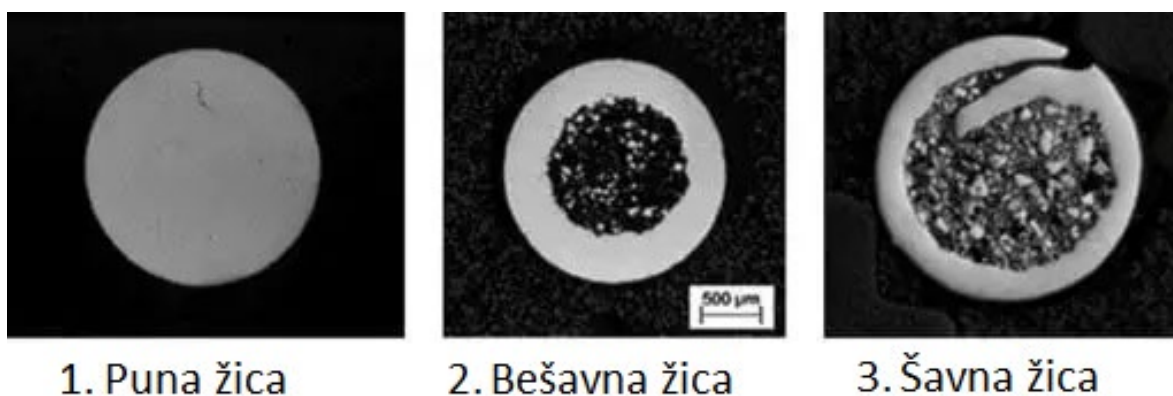
Plinska mješavina Ar s udjelom CO<sub>2</sub> do 20 % i O<sub>2</sub> do pet posto je svestrana mješavina koja se može koristiti pri zavarivanju tankih i debelih konstrukcijskih čelika. Ova plinska mješavina podržava sve vrste prijenosa metala. Kod zavarivanja tanjeg materijala s kratkim spojevima O<sub>2</sub> pruža dobru stabilnost električnog luka pri nižoj jakosti struje od 30 do 60 A, to u konačnici omogućuje zavarivanje s električnim lukom koji je kratak i lako upravljiv. Mali unos topline kod prijenosa kratkim spojevima smanjuje mogućnost propaljivanja tankih limova i njihovu pretjeranu deformaciju. Plinska mješavina Ar – CO<sub>2</sub> – O<sub>2</sub> primjenjuje se najčešće kod štrcajućeg luka zbog O<sub>2</sub> koji smanjuje kritičnu struju i omogućuje veće brzine zavarivanja i tako dodatno povećava produktivnost kod zavarivanja štrcajućim lukom. CO<sub>2</sub> daje dobru dubinu penetracije koja je bitna kod zavarivanja debljih materijala, dok visok udio Ar smanjuje mogućnost pretjeranog rasprskavanja. Učinak CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> pomiješanih s Ar na profil penetracije prikazan je na slici 4. [4], [6]



Slika 4. Utjecaj CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> u mješavinama s Ar na profil penetracije kod zavarivanja kutnih spojeva [5]

### 2.3. MCAW postupak zavarivanja

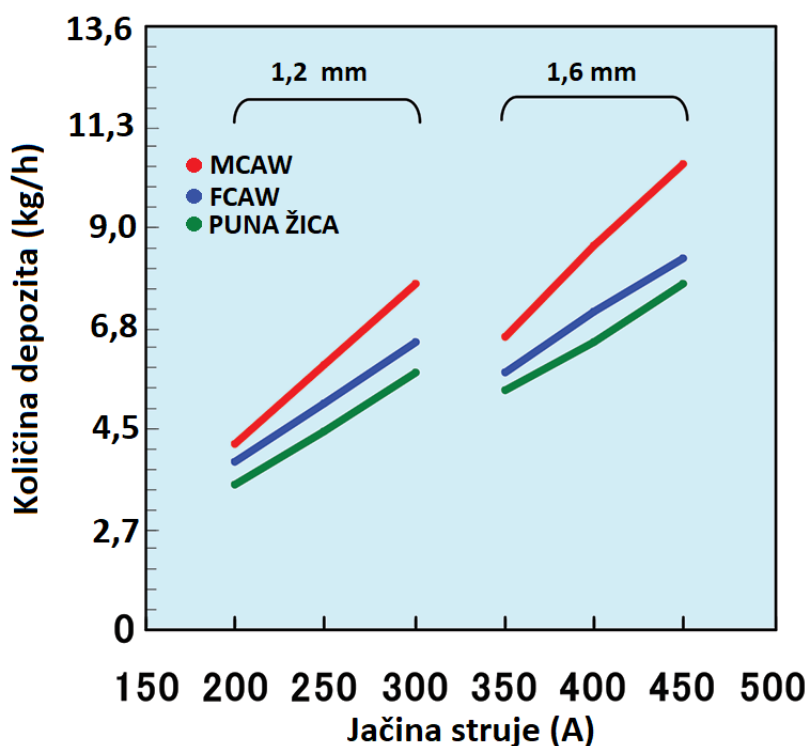
MCAW zavarivanje tj. zavarivanje metalnim praškom punjenom žicom je postupak zavarivanja koji se razlikuje od MAG zavarivanja po tome što je dodatni materijal šuplja žica punjena metalnim praškom. Tijekom MCAW zavarivanja kao i kod MAG zavarivanja koriste se aktivni plinovi. Taljiva elektroda u obliku šuplje žice za MCAW postupak obavlja metalni prašak poput plašta te struja teče samo kroz presjek u obliku kružnog vijenca za razliku od obične žice za zavarivanje koja ima puni kružni presjek. To znači da je gustoća struje po presjeku žice veća što za uzvrat znači više nastale topline na kraju žice. Posljedica toga je veća brzina taljenja žice, tj. veći depozit i veća produktivnost. Veća produktivnost je glavna karakteristika koja razlikuje ovaj postupak zavarivanja od drugih. Žice mogu imati razne oblike presjeka i načine zatvaranja žice, najčešće su sa i bez šava. Bešavne žice dobre su za korištenje u vlažnim uvjetima jer hermetički zatvoren prašak osigurava nizak udio vodika u metalnom prašku. Presjek pune, šavne i bešavne žice prikazan je na slici 5. [8], [9]



Slika 5. Prikaz presjeka pune žice i šavne te bešavne praškom punjene žice [8]



Žice za MCAW zavarivanje nemaju iste parametre zavarivanja kao i pune žice. Postoje razlike i specifične karakteristike MCAW postupka u odnosu na MAG postupak zavarivanja. Kod MCAW postupka manja je kritična struja  $I_{kr}$  za postizanje štrcajućeg luka. Prilikom zavarivanja sa MCAW žicom raspon jakosti struje pri kojem nastaje mješoviti luk je uzak. Prijelaz iz kratkog u štrcajući luk je skoro pa trenutni kod povećanja jakosti struje [10]. MCAW postupkom se može raditi s prijenosom kratkim spojevima te u svim pozicijama zavarivanja. MCAW postupak se uglavnom koristi zbog veće produktivnosti stoga ima više smisla koristiti MCAW postupak kod debljih materijala i položaja zavarivanja koji zahtijevaju i podržavaju rad sa štrcajućim lukom [11]. Kod štrcajućeg luka MCAW postupak ima veći depozit od MAG postupka i od postupka zavarivanja praškom punjenom žicom (eng. FCAW – Flux Core Arc Welding). Kod zavarivanja punom žicom promjera 1,2 mm depozit je od 3,6 do 4,5 kg/h dok je kod MCAW žice depozit iznosi od 5,4 do 6,4 kg/h što je povećanje od 40 do 50 % [12]. Odnosi između depozita u ovisnosti o jakosti struje kod pune, FCAW i MCAW žice prikazani su na slici 6.



Slika 6. Usporedba razlike u depozitima između MCAW, FCAW i pune žice [12]

Veći depozit rezultira većom brzinom zavarivanja. Kod MCAW postupka zavarivanja zbog većeg depozita tj. veće brzine žice se preporuča veći slobodni kraj žice. Tijekom zavarivanja MCAW žicom električni luk je širi nego kod pune žice jer se žica tali iz plašta što omogućuje bolje razlijevanje i sprječava naljepljivanje i nedovoljno protaljšivanje. Široki električni luk

omogućuje zavarivanje spojeva s većim zazorom zbog dobrog razlijevanja. Geometrija zavara je također bolja zbog manjeg nadvišenja. Ostali pozitivni utjecaji na pojavnost grešaka su manja mogućnost stvaranja poroznosti zbog dezoksidanata dodanih u metalni prašak koji reagiraju sa zaostalom hrđom i premazima na površini osnovnog materijala. Dezoksidanti u metalnom prašku omogućuju da se zavaruju nešto hrđaviji materijali što skraćuje vrijeme pripreme. Kod MCAW zavarivanja skoro pa u potpunosti nema rasprskavanja materijala i nema troske što smanjuje vrijeme čišćenja zato je postupak vrlo pogodan za automatizaciju [11]. Odlično svojstvo je da tijekom zavarivanja nastaje vrlo malo štetnih plinova što čini radno mjesto ugodnijim i sigurnijim za rad zavarivača. Što se ostalih parametara zavarivanja tiče za konstrukcijske čelike se za zaštitni plin koriste mješavine Ar i CO<sub>2</sub> te Ar, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>. Za tehniku rada preporuča se desna tehnika kod sučeljenih spojeva zbog veće dubine penetracije, a lijeva kod kutnih spojeva zbog bolje preglednosti. Nedostaci ovog postupka su skuplji dodatni materijal i potreba za dodatnim podešavanjem parametara pošto većina aparata za zavarivanje ima parametre samo za pune žice. Ovaj postupak ima više prednosti nego nedostataka. Nedostaci više cijene materijala i potreba za nabavkom posebnih kotačića za dovod žice može se opravdati većom produktivnošću, tj. manjim troškovima rada. [12]

### 3. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM SPOJEVIMA

U ovom poglavlju opisani su mehanizmi nastanka zaostalih napreznja kod zavarenih spojeva. Opisan je utjecaj zaostalih napreznja na zavarene konstrukcije te metode za smanjenje zaostalih napreznja.

#### 3.1. Nastanak i vrste zaostalih napreznja u zavarenom spoju

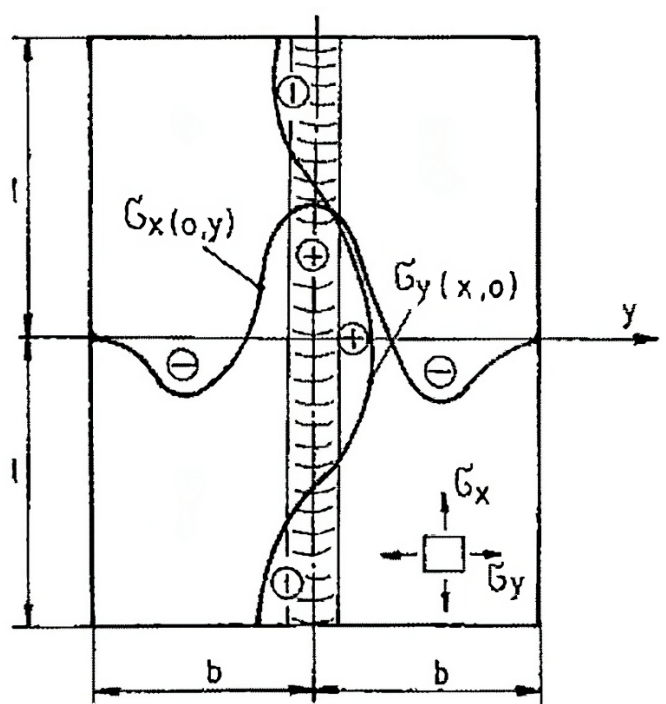
Zaostala napreznja su unutarnja napreznja u konstrukcijskom elementu. To su prisilno nastala napreznja koja su u ravnoteži sama sa sobom. Vrste zaostalih napreznja mogu se podijeliti [13]:

a) prema dimenzijama djelovanja zaostalih napreznja:

- I. vrste – makro dimenzije tj. u područjima većim od jednog milimetra,
- II. vrste – mikro dimenzijama u rasponu od jednog milimetra do 0,01 mm – u kristalnim zrnima,
- III. vrste – submikroskopskih dimenzija od  $10^{-2}$  do  $10^{-6}$  mm – napreznja nastala uslijed nepravilnosti unutar kristalnih rešetki.

b) prema smjeru napreznja:

- $\sigma_x$  – u longitudinalnom smjeru tj. u smjeru zavarivanja (slika 7.),
- $\sigma_y$  – u transverzalnom smjeru (slika 7.),
- $\sigma_z$  – u smjeru debljine zavara, postaju značajna kod materijala debljih od 25 mm.

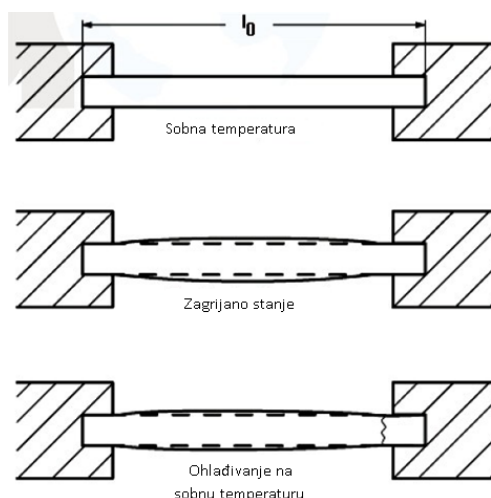


Slika 7. Longitudinalna i transverzalna napreznja u sučeljenom zavarenom spoju [14]

c) prema načinu nastanka:

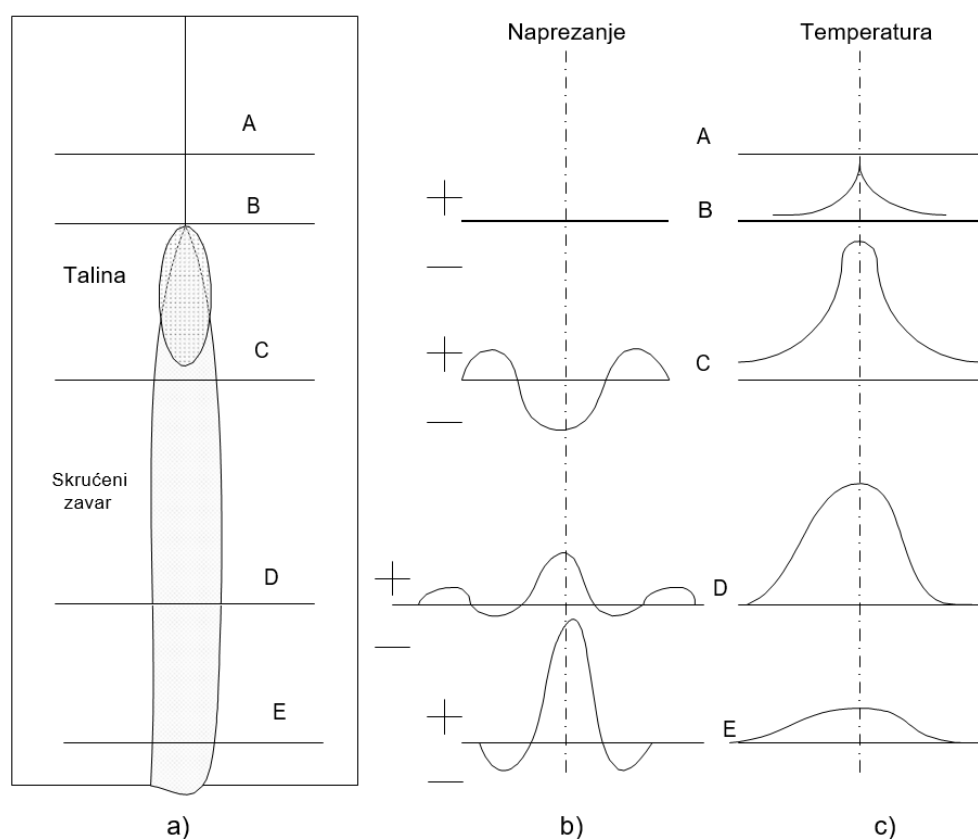
- strukturna,
- toplinska.

Strukturna i toplinska zaostala naprezanja nastaju prilikom neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja. Najbolji primjer nastanka strukturnih zaostalih naprezanja je kaljenje. Prilikom kaljenja brzine ohlađivanja su značajno veće nego u unutrašnjosti predmeta koji se kali. Na površini tijekom kaljenja nastaje martenzit čija kristalna rešetka ima veći volumen od ferita i perlita koji se nalaze u unutrašnjosti kaljenog predmeta. Toplinska zaostala naprezanja nastaju kod neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja kao npr. tijekom zavarivanja. Rastezanje i stezanje zagrijanog materijala u zavaru nije moguće zbog puno hladnijeg materijala u blizini zavara što uzrokuje pojavu zaostalih naprezanja u zavaru. Ako neki štap ima mogućnost toplinskog rastezanja, ali ne i stezanja onda će se javiti zaostala naprezanja u materijalu te će doći do smanjenja poprečnog presjeka ako je u pitanju duktilni materijal ili do nastanka pukotina ili loma u slučaju da je materijal krhak. Bitno je napomenuti da u tom slučaju naprezanja ostaju u štapu nakon hlađenja. U obrnutom slučaju kada nije moguće toplinsko rastezanje, ali je moguće stezanje onda prilikom zagrijavanja na štapu nastaju deformacije u obliku bubrenja, slika 8. Hlađenjem štapa on se skraćuje, deformacija ostaje, ali naprezanje nestaje jer štap nije opterećen s jedne strane pošto mu je omogućeno stezanje. Kod zavarivanja ekvivalentna situacija bi bila gdje štapu nije omogućeno niti rastezanje uslijed dovođenja topline niti stezanje uslijed hlađenja. U tom slučaju nastaje bubrenje presjeka koje je zapravo posljedica razgradnje tlačnog naprezanja zbog onemogućenog rastezanja. Kod hlađenja ostaju vlačna zaostala naprezanja u materijalu što se manifestira kao smanjenje prethodno nastale deformacije bubrenja presjeka. [13]



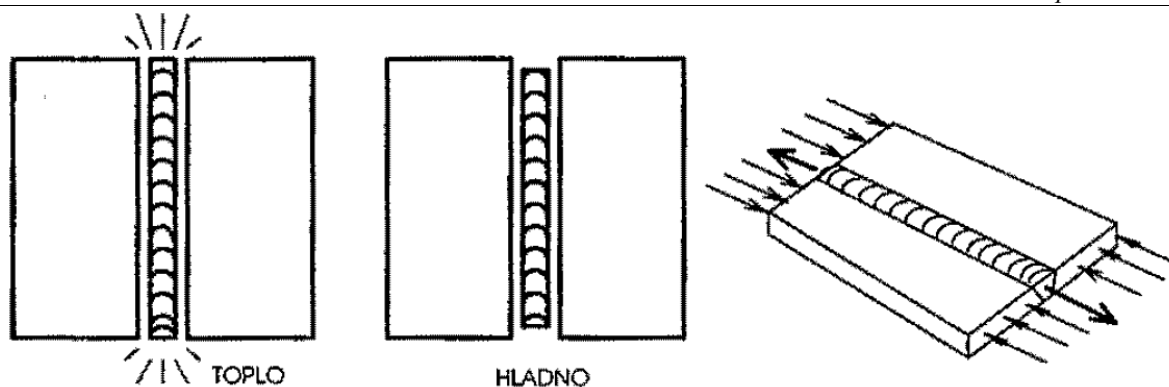
**Slika 8. Skica štapa kojem je onemogućeno toplinsko rastezanje i stezanje [13]**

Na slici 9. prikazano je da se materijal na početku zavarivanja zagrijava do temperature taljenja, a susjedni osnovni materijal približno do temperature taljenja. Zagrijani osnovni materijal se pokušava rastegnuti u svim smjerovima, ali to nije moguće zbog susjednog hladnijeg osnovnog materijala zavora. Zbog toga uglavnom nastaje tlačno zaostalo naprezanje u području osnovnog materijala. Nakon nekog vremena tlačno zaostalo naprezanje doseže svoju najvišu vrijednost, a onda počinje opadati zbog smanjenja granice razvlačenja  $R_e$  te dolazi do deformacije u obliku bubrenja. U susjednim hladnijim područjima također nastaju tlačna naprezanja, koja prelaze granicu razvlačenja  $R_e$  i koja se razgrađuju plastičnom deformacijom. Tijekom hlađenja zavar se počinje skupljati i granica razvlačenja  $R_e$  se povećava te nastaju vlačna zaostala naprezanja koja ostaju u materijalu. Materijal u samom zavaru pokušava se skupiti, ali ne može jer je povezan s osnovnim materijalom koji se u potpunosti skupio. Materijal zavora zato tlači susjedni osnovni materijal što objašnjava pojavu zaostalog tlačnog naprezanja u osnovnom materijalu. [13], [15]



**Slika 9. Pod a) prikaz tijeka zavarivanja, pod b) longitudinalna zaostala naprezanja, pod c) temperatura [15]**

Slika 10. prikazuje kako materijal zavora u kojem djeluju vlačna zaostala naprezanja uzrokuje reakciju u osnovnom materijalu zavarenog spoja u obliku tlačnog zaostalog naprezanja.



Slika 10. Uzrok vlačnog i tlačnog zaostalog naprezanja u zavarenom spoju [14]

### 3.2. Utjecaj zaostalih naprezanja na zavarene konstrukcije

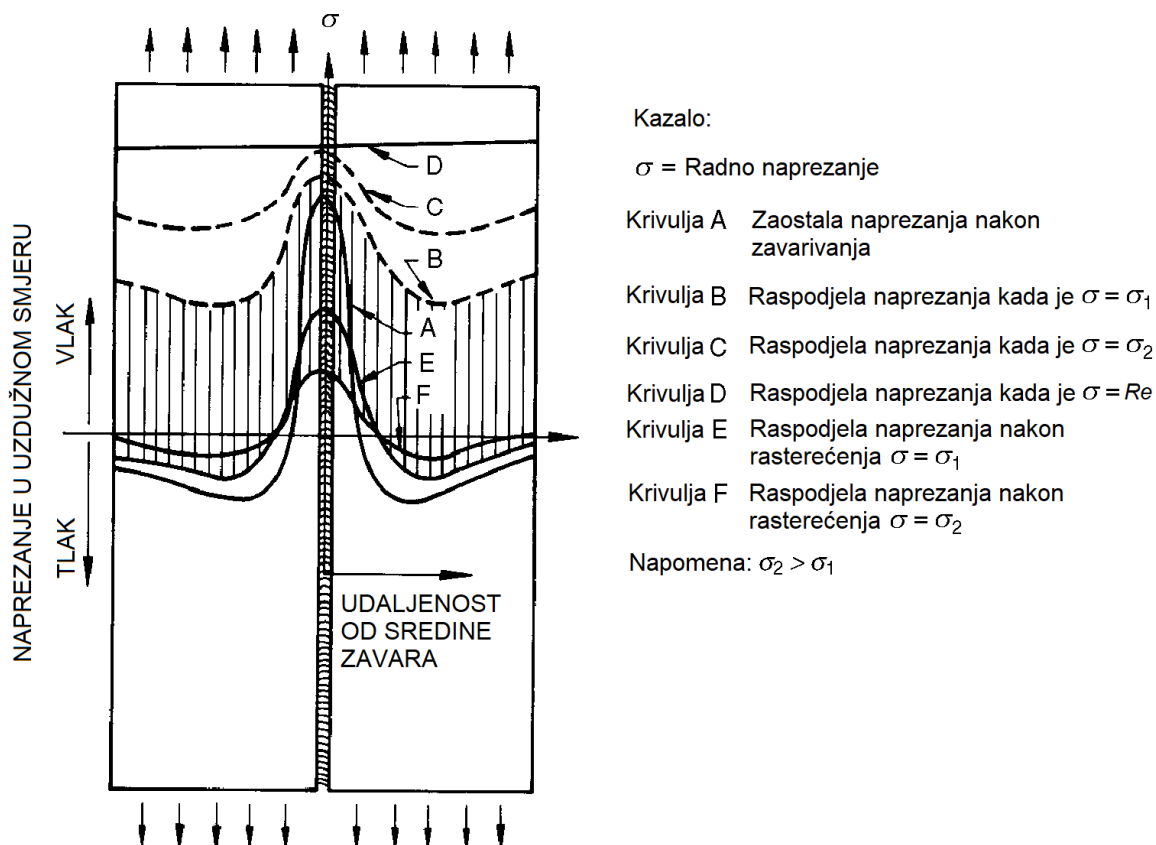
Zaostala naprezanja utječu na čvrstoću, dimenzijsku stabilnost i mehaničku izvedbu zavarenih spojeva. Učinci zaostalih naprezanja se najčešće primjećuju prilikom završetka zavarivanja nekog spoja ili u određenom razdoblju nakon zavarivanja. Radna i zaostala naprezanja se međusobno zbrajaju ako su istog tipa npr. vlačno opterećenje i vlačna zaostala naprezanja. Kada zaostala naprezanja budu veća od granice razvlačenja  $R_e$  razgrađuju se pojavom plastičnih deformacija. Troosna zaostala naprezanja koja se javljaju kod deblostijenih konstrukcija povećavaju osjetljivost konstrukcije na krhki lom te olakšavaju inicijaciju i propagaciju pukotina. Na inicijaciju i propagaciju pukotina najviše utječu vlačna naprezanja koja zbog toga negativno utječu na dinamičku čvrstoću konstrukcije  $R_d$ , MPa. [14], [15]

Vlačna zaostala naprezanja utječu na radni vijek konstrukcije u kombinaciji s pojavama za koje nisu potrebna velika radna naprezanja kako bi nastupile, a one su [7]:

- krhki lom,
- umor materijala,
- napetosna korozija.

Što su vlačna radna naprezanja veća to je utjecaj zaostalih naprezanja manji. Ako su vlačna radna naprezanja veća od granice razvlačenja  $R_e$  onda je utjecaj zaostalih naprezanja na zavarene konstrukcije zanemariv. Kada je zavarena konstrukcija ciklički vlačno opterećena nakon prestanka opterećenja dolazi do popuštanja zaostalih naprezanja. Na slici 11. prikazan je utjecaj radnih vlačnih naprezanja na longitudinalna zaostala naprezanja u sučeljenom zavarenom spoju. Krivulja A predstavlja raspodjelu zaostalih naprezanja nakon zavarivanja. Krivulja B je raspodjela naprezanja u zavaru pri djelovanju radnog vlačnog naprezanja  $\sigma_1$ . Radno naprezanje se zbraja sa zaostalim naprezanjem koje je bilo prisutno u zavaru prije

primjene radnog naprezanja. U zavaru je prisutna ista distribucija naprezanja, ali je iznos uvećan za  $\sigma_1$ . Krivulja C predstavlja slično što i B, ali umjesto radnog naprezanja  $\sigma_1$  u tom slučaju djeluje radno naprezanje  $\sigma_2$  koje je veće od  $\sigma_1$ . Iz slike 11. može se vidjeti da što je radno naprezanje veće to je raspodjela naprezanja u zavaru sve više jednolika. Ako se primjeni još veće naprezanje koje je jednako po iznosu granici razvlačenja  $R_e$  tada je naprezanje u zavaru jednoliko raspoređeno tj. ujednačeno u longitudinalnom smjeru predstavljeno krivuljom D. Ako se sučeljeni zavar rastereti od naprezanja  $\sigma_1$  ili  $\sigma_2$ , što prikazuju krivulje E i F, također se dobiva ujednačenija raspodjela naprezanja manjeg intenziteta od početnog. [7]



Slika 11. Utjecaj radnih vlačnih napreznja na longitudinalna zaostala napreznja u sučeljenom zavaru [7]

### 3.3. Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih napreznja

Važno je znati koji sve faktori utječu na intenzitet napreznja zaostalih u materijalu. Poznavanjem tih faktora može se procijeniti intenzitet zaostalih napreznja i sukladno tomu primijeniti metode prije zavarivanja koje bi ublažile zaostala napreznja nastala tijekom zavarivanja. Također poznavanje tih faktora olakšava odabir prikladne metode za uklanjanje zaostalih napreznja. Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih napreznja su [1], [16]:

a) svojstva materijala – od kojih najviše:

- koeficijent linearnog rastezanja  $\alpha_T$ ,  $K^{-1}$  – što je veće rastezanje veća su zaostala naprezanja,
- temperatura tališta  $T_t$ , K – što je temperatura tališta veća to je veća temperaturna razlika rastaljenog metala i osnovnog materijala tj. veći je raspon temperatura kod kojih dolazi do toplinskog stezanja,
- modul elastičnosti  $E$ , MPa – što je veći modul elastičnosti veća su zaostala naprezanja,
- granica razvlačenja  $R_e$ , MPa – mogući intenzitet zaostalih naprezanja u materijalu ograničen je granicom razvlačenja,
- toplinska vodljivost  $\lambda$ , W/mK – što je toplinska vodljivost manja to je neujednačenost temperatura tijekom zavarivanja veća što rezultira intenzivnijim zaostalim naprezanjima,
- specifični toplinski kapacitet  $c$ , J/kgK – veći toplinski kapacitet rezultira većim temperaturnim gradijentom oko zavara i većim unosom topline za postizanje iste temperature,

b) unos topline  $Q$ , J/mm – ovisi o postupku i parametrima,

c) dimenzije spoja i vrsta pripreme zavarenog spoja – da li je npr. V, U ili X priprema spoja, što je veći volumen koji mora popuniti rastaljeni metal to su zaostala naprezanja veća,

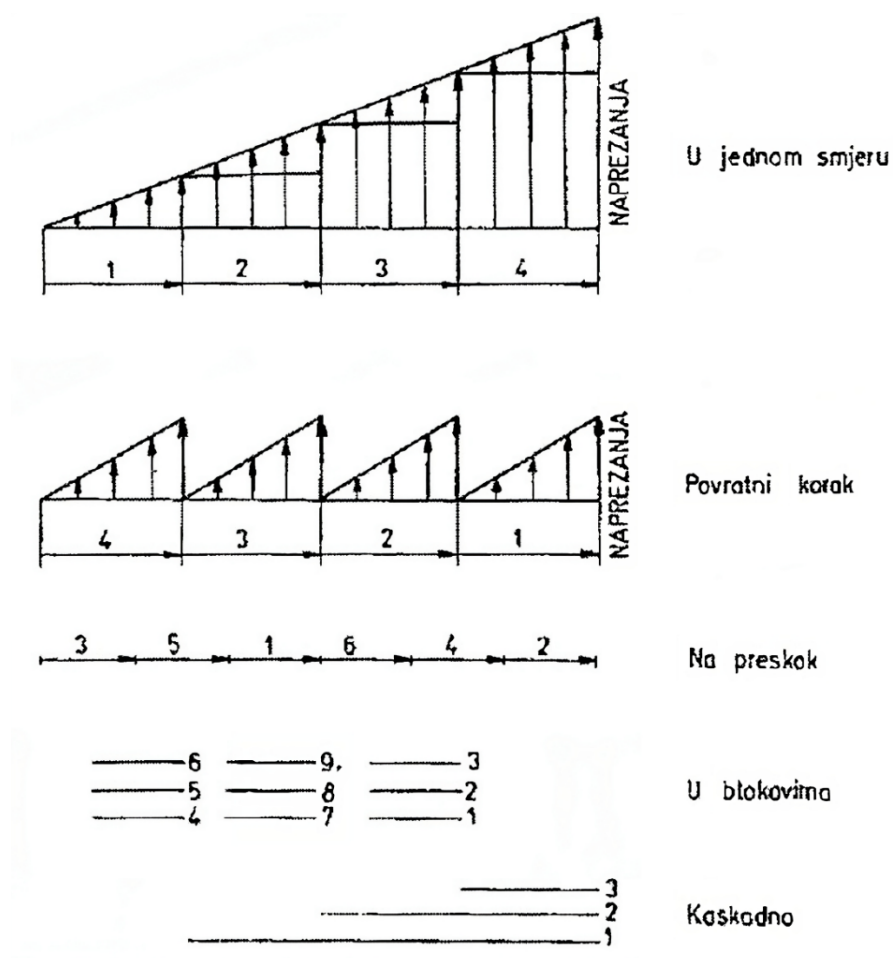
d) broj prolaza – manji broj prolaza rezultira manjim zaostalim naprezanjima,

e) redoslijed zavarivanja [3], [14]:

- kontinuirano – najveće deformacije i zaostala naprezanja,
- na preskok,
- povratnim korakom,
- na preskok povratnim korakom,
- u blokovima,
- kaskadno.

Na slici 12. prikazani su različiti redoslijedi zavarivanja te utjecaj redoslijeda na intenzitet i raspodjelu zaostalih naprezanja po duljini zavara. Zavarivanje u jednom smjeru rezultira najvećim iznosom naprezanja u zavaru. Zaostala naprezanja mogu se smanjiti zavarivanjem povratnim korakom i njihova raspodjela po duljini zavara je ujednačenija (slika 12.) [14].





Slika 12. Prikaz različitih redosljeda zavarivanja i njihov utjecaj na raspodjelu i intenzitet zaostalih napreznja u zavaru [14]

### 3.4. Metode smanjenja zaostalih napreznja

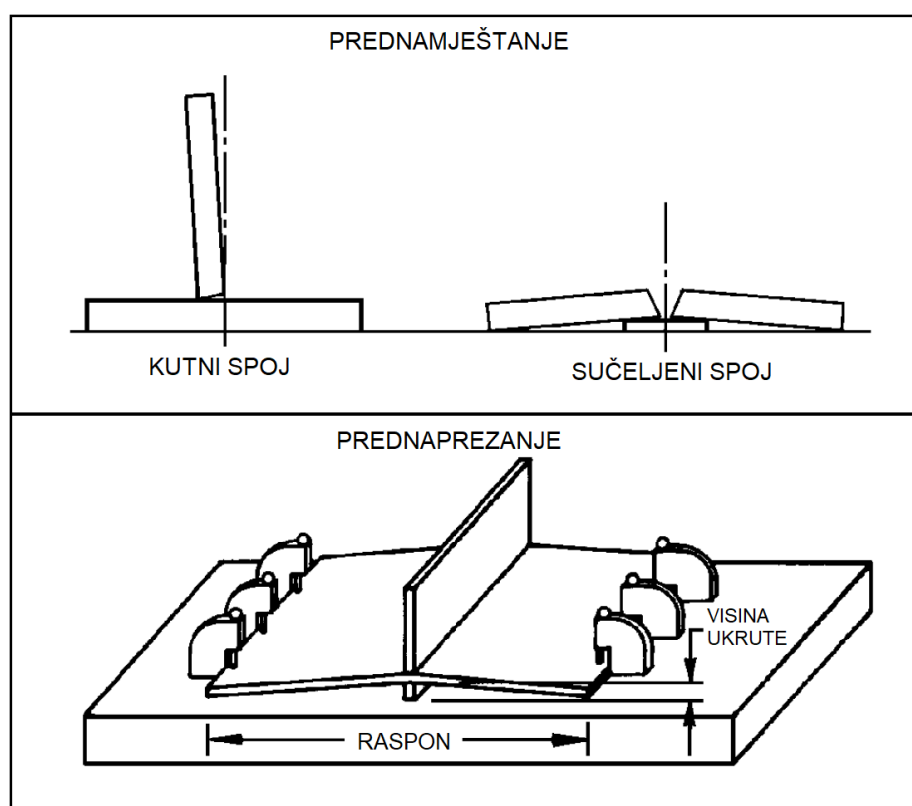
Kada se odrede ili očekuju prevelika zaostala napreznja mogu se poduzeti određene radnje prije, tijekom i nakon zavarivanja kako bi se smanjila zaostala napreznja ili pojava prevelikih deformacija. [7]

#### 3.4.1. Broj i raspored zavarenih spojeva

Prije zavarivanja pažljivom pripremom spoja mogu se izbjeći neželjene deformacije i zaostala napreznja nastala uslijed zavarivanja ili ispravljanja deformacija. Prva i najefikasnija metoda je prilikom razvoja zavarene konstrukcije. Poželjno je težiti što manjem broju zavara i izbjegavati njihovo gomilanje. Raspoređivanje zavara blizu neutralne osi radnog komada i simetričan raspored zavara doprinosi smanjenju nastalih zaostalih napreznja i deformacija. Također tijekom razvoja konstrukcije može se odabrati pogodniji oblik žljebova tj. odabir manjeg volumena koji treba popuniti metal zavara. [7], [14]

### 3.4.2. Prednamještanje i prednaprezanje

Druga metoda je prednamještanjem radnih komada u poziciju suprotnu od smjera stezanja zavara. Na taj način postiže se dimenzijska točnost i manje naprezanja u usporedbi sa stezanjem radnog komada jer je dozvoljeno skupljanje zavara čime se razgrađuju zaostala naprezanja. Elastično prednaprezanje ili predsavijanje je slično prednamještanju. Razlika je što se tom metodom unose elastična naprezanja na način da se zavare ukrute koje drže radni komad u željenoj poziciji prije i tijekom zavarivanja. Nakon zavarivanja ukrute se uklanjaju i radni komad elastičnim povratom poprima konačan oblik. Razlike između namještanja radnih komada prednamještanjem i prednaprezanjem prikazane su na slici 13. [3], [7], [14]



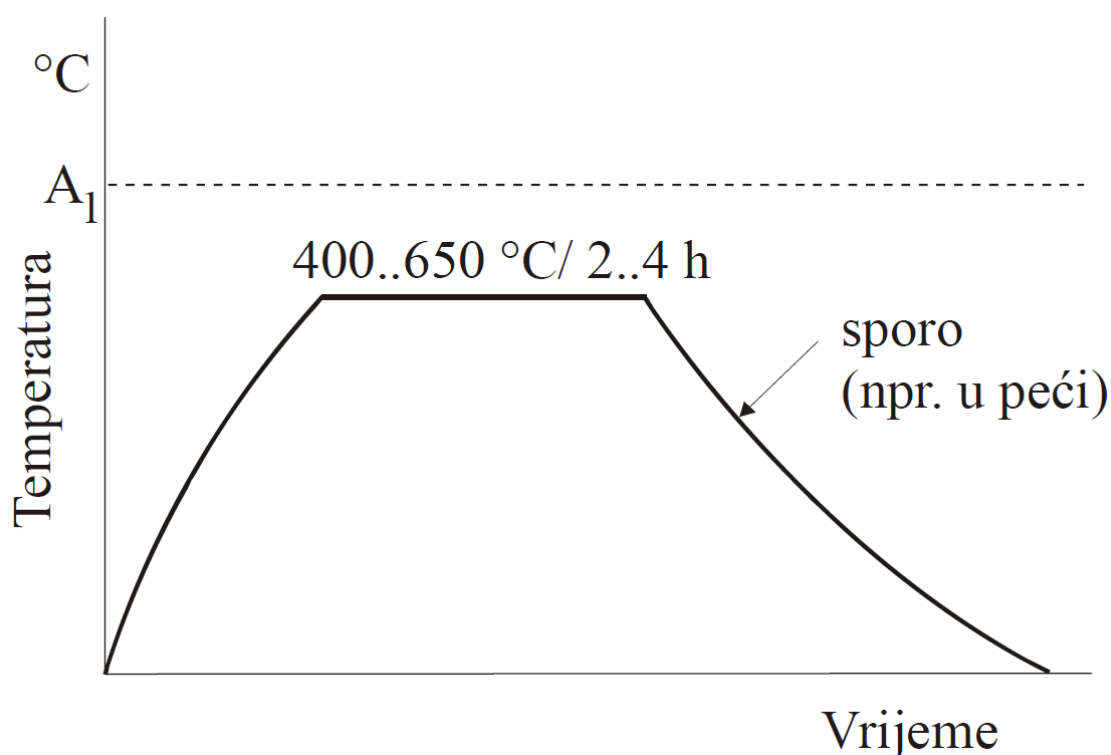
Slika 13. Prikaz prednamještanja i prednaprezanja radnog komada [7]

### 3.4.3. Predgrijavanje

Predgrijavanjem smanjuje se brzina hlađenja zavarenog spoja što se prvenstveno koristi za sprječavanje nastanka tvrdih i krhkih faza u zoni utjecaja topline. Sekundarni efekt predgrijavanja je takav da se smanjuju zaostala naprezanja i deformacije jer je temperaturna razlika između zavara i osnovnog materijala manja. Predgrijani osnovni materijal toplinski se rasteže, a tokom hlađenja postupno se skuplja u isto vrijeme kao i dodatni materijal što smanjuje vlačna i tlačna zaostala naprezanja u materijalu. [15]

### 3.4.4. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja je žarenje I. vrste, što znači da nema strukturnih promjena u materijalu jer se odvija na temperaturi ispod  $A_1$  temperature. Radni komad koji se žari za redukciju zaostalih naprezanja zagrijava se do temperature u rasponu od 400 do 650 °C i drži se na temperaturi žarenja od dva do četiri sata, a ponekad i do osam sati. Temperatura žarenja i vrijeme držanja ovise o vrsti materijala i planiranom intenzitetu redukcije zaostalih naprezanja. Na slici 14. prikazan je dijagram postupka toplinske obrade temperatura-vrijeme, odnosno  $\vartheta$ - $t$  dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. Porastom temperature radnog komada granica razvlačenja  $R_e$  se smanjuje zbog čega se zaostala naprezanja mogu razgraditi u obliku plastičnih deformacija. Nakon držanja na temperaturi žarenja radni komad se mora sporo hladiti npr. u peći kako se ne bi ponovno unijela zaostala naprezanja u žareni komad. Zaostala naprezanja mogu se smanjiti do deset posto iznosa granice razvlačenja zavara. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja uz to što smanjuje zaostala naprezanja doprinosi i stabilizaciji dimenzija te smanjuje mogućnost nastanka krhkog loma. [14], [17]



Slika 14.  $\vartheta$ - $t$  dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [17]

### 3.4.5. **Redukcija zaostalih naprezanja vibracijom**

Zaostala naprezanja mogu se popustiti metodom vibracije. Radni komad u kojemu je potrebno smanjiti zaostala naprezanja omogućeno je da slobodno vibrira tako da se izolira od poda stavljanjem gumenih jastučića ispod radnog komada. Vibracije se generiraju davačem sile koji se sastoji od elektromotora s mehanizmom ekscentra. Na udaljenosti od jednog metra stavlja se akcelerometar koji mjeri jačinu vibracija radnog komada. Frekvencija vibracija koju proizvodi davač sile se postupno povećava dok se ne otkrije rezonantna frekvencija radnog komada. Redukcija zaostalih naprezanja vibracijom ne provodi se na rezonantnoj frekvenciji zbog opasnosti od nastanka umora materijala, stoga se postupak izvodi na nešto nižoj frekvenciji. Nakon utvrđene frekvencije za redukciju naprezanja davač sile vibrira radni komad u trajanju od 15 do 30 minuta. Zatim se ponovno vibrira radni komad, ako je redukcija zaostalih naprezanja uspješno provedena radni komad će imati malo drugačiju rezonantnu frekvenciju te će radni komad vibrirati većom amplitudom nego prije redukcije zaostalih naprezanja. [18], [19]

U usporedbi sa žarenjem za redukciju zaostalih naprezanja prednosti su [18], [19]:

- jeftina i jednostavna oprema,
- mogućnost provođenja postupka popuštanja zaostalih naprezanja na terenu zbog lake opreme,
- moguće je provesti popuštanje u više faza proizvodnje,
- mali utrošak energije,
- nema unosa topline,
- veličina radnog komada nije ograničena veličinom peći,
- nema plastičnih deformacija,
- postiže se u nekim slučajevima bolja dimenzijska točnost,
- nema nastanka oksida zbog izlaganja visokim temperaturama.

Nedostaci su [19]:

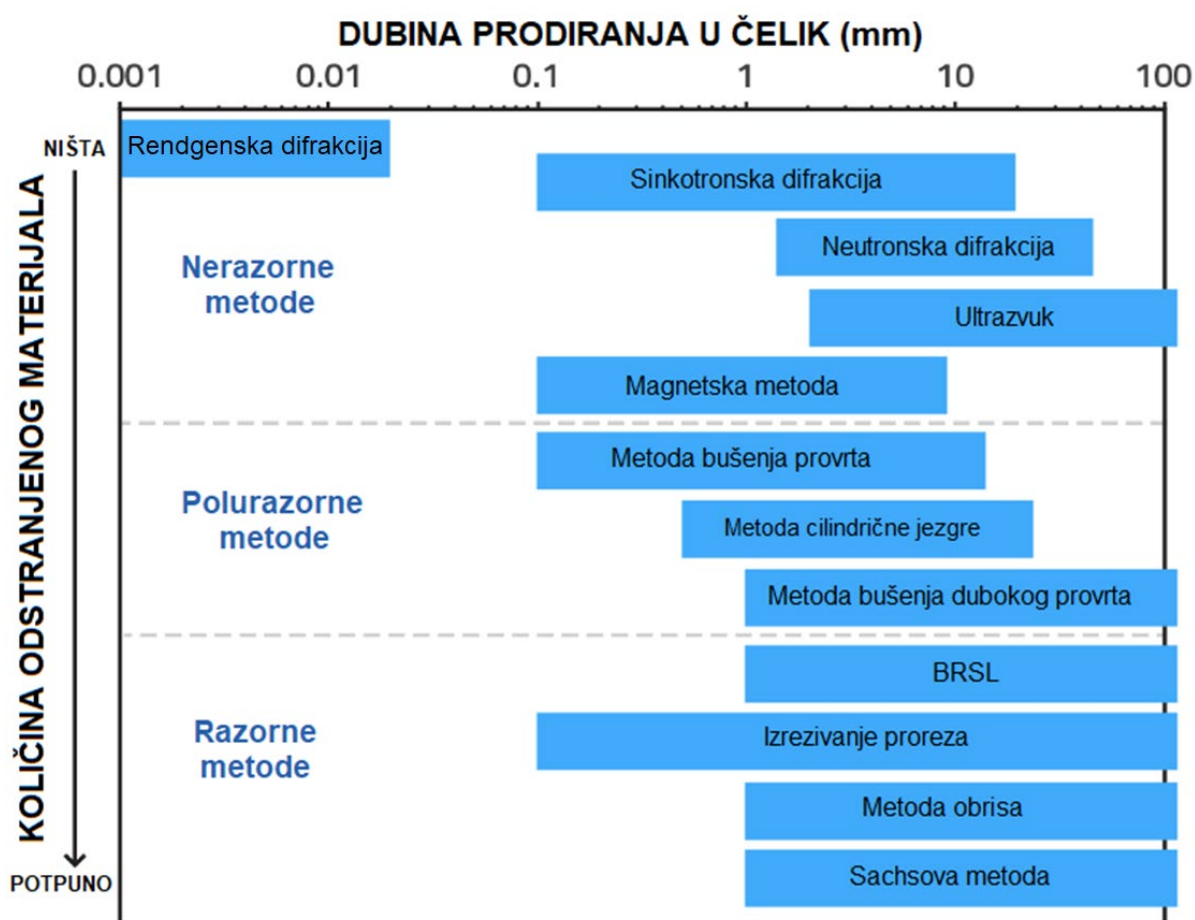
- mogućnost povećanja zaostalih naprezanja na čvršćim mjestima konstrukcije,
- čvršće konstrukcije ne mogu vibrirati na rezonantnoj frekvenciji,
- metoda nije toliko poznata kao žarenje za redukciju zaostalih naprezanja.

#### 4. METODE MJERENJA ZAOSTALIH NAPREZANJA

U ovom poglavlju opisane su različite metode mjerenja zaostalih napreznja. Opisani su principi metoda s navedenim prednostima i nedostacima. Poseban naglasak usmjeren je na metodu mjerenja rendgenskom difrakcijom. Opisana je najčešća metoda  $\sin^2 \psi$  i metoda  $\cos \alpha$ , koja je korištena za mjerenje zaostalih napreznja u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Metode mjerenja zaostalih napreznja mogu se podijeliti na [20]:

- nerazorne,
- polurazorne,
- razorne.

Dubina prodiranja pojedinih nerazornih, polurazornih i razornih metoda prikazana je na slici 15.



Slika 15. Podjela metoda mjerenja zaostalih napreznja po razornosti i dubini prodiranja [20]

Nerazornim metodama mjere se fizičke veličine materijala čiji se iznos ili promjena iznosa može preračunati u zaostala naprezanja u materijalu. Neke od nerazornih metoda su [20]:

- rendgenska difrakcija,
- neutronska difrakcija,
- sinkotronska difrakcija,
- ultrazvučna metoda,
- magnetska metoda.

Polurazorne metode su metode koje uklanjaju mali, ali dovoljan dio materijala da se mogu utvrditi zaostala naprezanja bez remećenja funkcije dijela na kojem se provodi mjerenje.

Polurazorne metode su:

- bušenje provrta,
- cilindrična jezgra,
- bušenje dubokog provrta.

Razorne i polurazorne metode zasnivaju se na istom principu. Uklanjanjem materijala dolazi do elastične deformacije zbog popuštanja zaostalih naprezanja oko mjesta uklonjenog materijala. Mjerenjem nastalih deformacija mogu se izračunati popuštena zaostala naprezanja u materijalu. Nedostatak ovih metoda je što djeluju razorno, kod razornih metoda dio na kojem se provodi mjerenje potpuno gubi svoju funkciju. [7], [20]

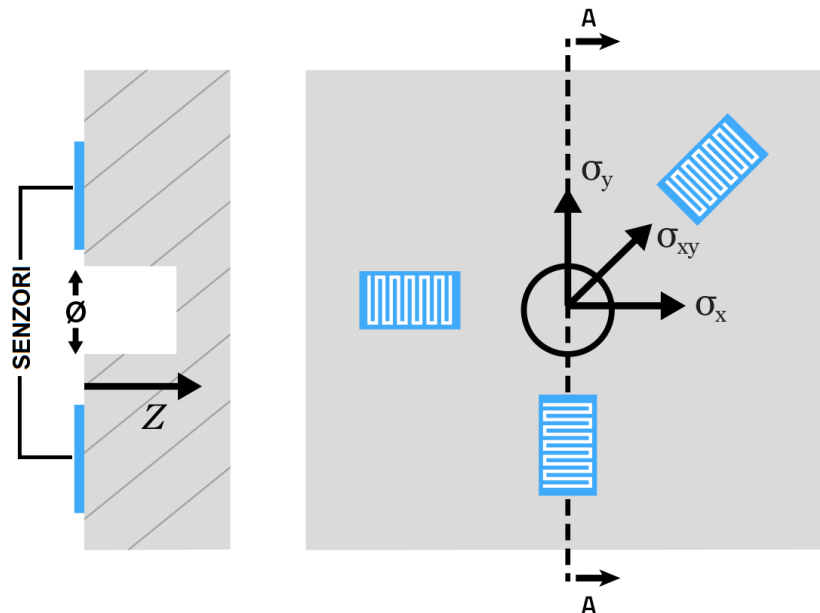
Neke od razornih metoda mjerenja zaostalih naprezanja su [20]:

- BRSL (eng. Block Removal, Splitting and Layering) – na hrvatskom: uklanjanje odjeljaka, cijepanje i raslojavanje,
- izrezivanje proreza,
- metoda obrisa,
- Sachsova metoda.

#### **4.1. Metoda mjerenja zaostalih naprezanja bušenjem provrta**

Metoda mjerenja bušenjem provrta je polurazorna metoda koja mjeri ravninsko stanje naprezanja. Metoda se provodi tako da se prvo očisti površina materijala. Zatim se zalijepi mjerna rozeta koja na sebi ima tri senzora tj. tenzometra koji mjere deformacije. Senzori su najčešće postavljeni tako da je svaki idući senzor zamaknut za 120°. Nakon postavljanja mjerne rozete u sredini se buši provrt promjera od jednog, dva ili četiri milimetra. Provrt se buši inkrementalno po 0,1 mm. Nakon svakog bušenja provodi se mjerenje nakon čega opet slijedi

bušenje za 0,1 mm i mjerenje deformacija. Koraci se ponavljaju dok se ne dođe do dubine od dva milimetra ili dok se u potpunosti ne izbuši provrt ako je uzorak tanji od dva milimetra. Nakon toga se analiziraju prikupljeni podaci pomoću koji se određuje raspodjela zaostalih naprezanja. Shema metode bušenja provrta prikazana je na slici 16. [20]



Slika 16. Shema metode mjerenja zaostalih naprezanja bušenjem provrta [20]

Prednosti metode su [20], [21], [22]:

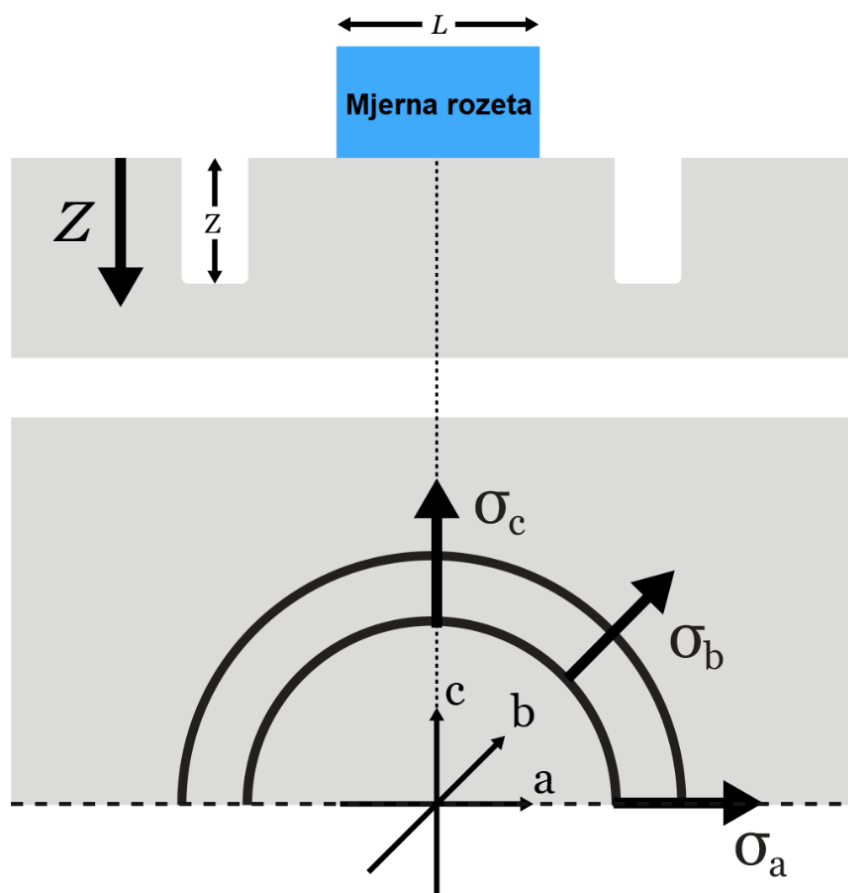
- jednostavna metoda,
- visoka točnost, pouzdana metoda,
- moguća primjena u laboratoriju i na terenu,
- šteta uzrokovana metodom je mala, ne remeti funkciju ispitanog dijela,
- može se primijeniti na raznim izotropnim metalnim i nemetalnim materijalima.

Nedostaci metode su [20], [22]:

- polurazorna metoda,
- osjetljiva na koncentričnost rupe s obzirom na mjernu rosetu,
- najdublje se mjeri do dva milimetra u materijal,
- što se dublje buši to svaki inkrement manje doprinosi konačnoj deformaciji na površini,
- uglavnom se može primijeniti samo na ravnoj površini,
- zahtjeva dobru pripremu površine,
- ne može se izmjeriti naprezanje koje djeluje u smjeru okomitom na površinu,
- netočna mjerenja ako je prisutan veliki gradijent naprezanja.

#### 4.2. Metoda cilindrične jezgre

Metoda cilindrične jezgre je polurazorna metoda mjerenja zaostalih napreznja. To je druga varijanta metode bušenja provrta što znači da se također mjeri samo ravninska napreznja. Razlika je u tome što se kod metode bušenja provrta uklanja volumen u obliku cilindra dok kod metode cilindrične jezgre uklanja materijal u obliku kružnog vijenca tj. prstena. Nakon uklanjanja materijala ostaje tzv. jezgra u obliku cilindra, kao što je prikazano na slici 17. Razlika je i u pozicioniranju mjerne rozete koja se kod ove metode lijepi na jezgru. Ova metoda provodi se tako da se prvo očisti površina na koju se lijepi mjerna rozeta. Zatim se odstranjuje tj. buši materijal u obliku prstena. Najveća dubina bušenja je pet milimetara. Nakon što se napravi jezgra inkrementalnim ili kontinuiranim bušenjem mjere se deformacije jezgre iz kojih se izračunavaju zaostala napreznja prisutna prije bušenja. Metodom cilindrične jezgre može se postići dubina od 25 mm ako se odstrani prethodna jezgra. Uklanjanjem prvotne jezgre može se ponovno izbušiti dodatnih pet milimetara u materijal i tako napraviti nova jezgra. Metoda cilindrične jezgre je nešto bolja od metode bušenja provrta jer daje detaljnije rezultate s boljim odnosom signal-šum te je relativno jeftina s obzirom na postignutu dubinu. [20]

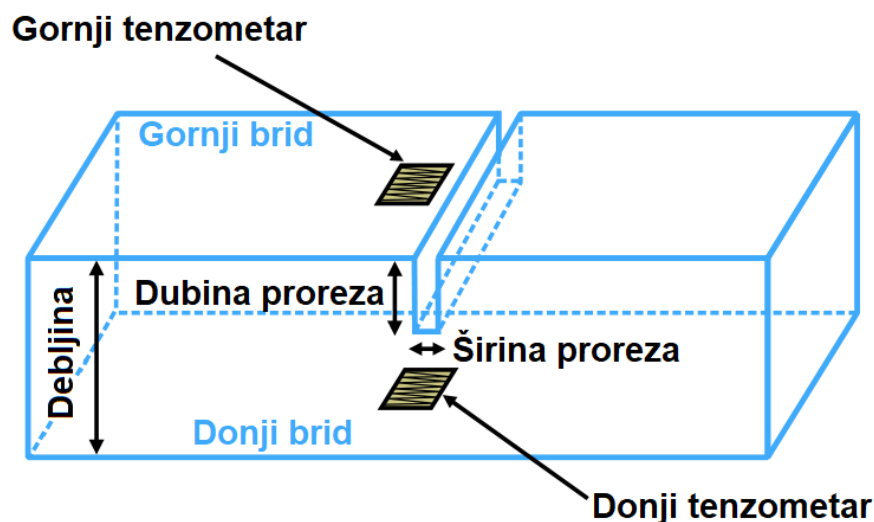


Slika 17. Shema metode cilindrične jezgre [20]



### 4.3. Metoda mjerenja izrezivanjem proreza

Metoda mjerenja zaostalih naprezanja izrezivanjem proreza svrstava se među razorne metode i prikazana je shemom na slici 18. Koristi se za utvrđivanje zaostalih naprezanja u jednom smjeru na dijelovima pravokutnog presjeka. Provodi se inkrementalnim izrezivanjem proreza do određene dubine. Prvi korak kod provođenja metode je da se prvo očiste površine gdje će se nalijepiti tenzometrijski senzori. Ako se lijepi samo jedan senzor onda se može zalijepiti na gornjoj površini pored proreza ili se može zalijepiti direktno ispod proreza. Najtočniji rezultati dobivaju se kada se zalijepi i na jednu i na drugu površinu. Nakon što su senzori postavljeni oni se zaštite od vode jer se prorez izrezuje elektroerozijom koja ne unosi nova zaostala naprezanja tijekom izrezivanja. Nakon svakog novog izrezivanja provodi se mjerenje dok se ne dođe do najviše 90 % širine mjerenog dijela. [22]



Slika 18. Shema metode mjerenja zaostalih naprezanja izrezivanjem proreza [20]

Prednosti metode su [20]:

- jednostavna i jeftina metoda,
- precizni i detaljni rezultati,
- može se primijeniti na metalnim i nemetalnim materijalima,
- hrapavost i struktura zrna ne utječe na rezultat.

Nedostaci metode su [20]:

- razorna metoda,
- samo za primjenu u laboratoriju,
- može utvrditi samo zaostala naprezanja u jednom smjeru,
- najprikladnije samo za dijelove pravokutnog presjeka.

#### 4.4. Ultrazvučna metoda

Ultrazvučna metoda je nerazorna metoda mjerenja zaostalih napreznja. Ultrazvuk je zvuk na frekvencijama od 20 kHz do 10 GHz. Zasniva se na svojstvu da brzina zvuka u nekom krutom tijelu ovisi o ukupnim tj. radnim i zaostalim napreznjima u materijalu. To je brza i jednostavna metoda. Oprema je jeftina i vrlo kompaktna u usporedbi s drugim metodama mjerenja zaostalih napreznja. Može se koristiti u i laboratoriju i na terenu. [22], [23]

Opremu čine [23]:

- sonda – određuje frekvenciju zvuka koja se koristi tijekom postupka,
- osciloskop ili računalo – obrađuje podatke prikupljene pomoću sonde,
- kontaktno sredstvo – služi za uklanjanje zraka između sonde i uzorka,
- etalon ili uzorak bez zaostalih napreznja – služi za usporedbu s ispitivanim uzorkom.

Zvuk se može širiti kroz krute tvari longitudinalnim i transverzalnim valovima. Kod longitudinalnih valova čestice titraju u smjeru propagiranja vala. Dok kod transverzalnih valova čestice se gibaju okomito na smjer propagiranja vala. Za razliku od longitudinalnih valova koji se pojavljuju u sva tri agregatna stanja, transverzalni valovi mogući su samo u krutom sredstvu. Sonde mogu biti ravne i kutne. Ravna sonda generira longitudinalne valove u materijalu, dok kutna sonda može generirati longitudinalne i transverzalne valove u isto vrijeme ili pojedinačno ovisno o kutu sonde. Longitudinalnim valovima mogu se detektirati zaostala napreznja koja su usmjerena okomito s obzirom na površinu materijala. Transverzalni valovi mogu detektirati napreznja u smjeru paralelnom s površinom materijala koji se ispituje uključujući i napreznja u samoj površini. Zaostala napreznja utvrđuju se usporedbom koliko je vremena potrebno zvučnom valu da se reflektira i vrati u sondu u uzorku bez i sa zaostalim napreznjima. [20], [23]

Prednosti metode su [20]:

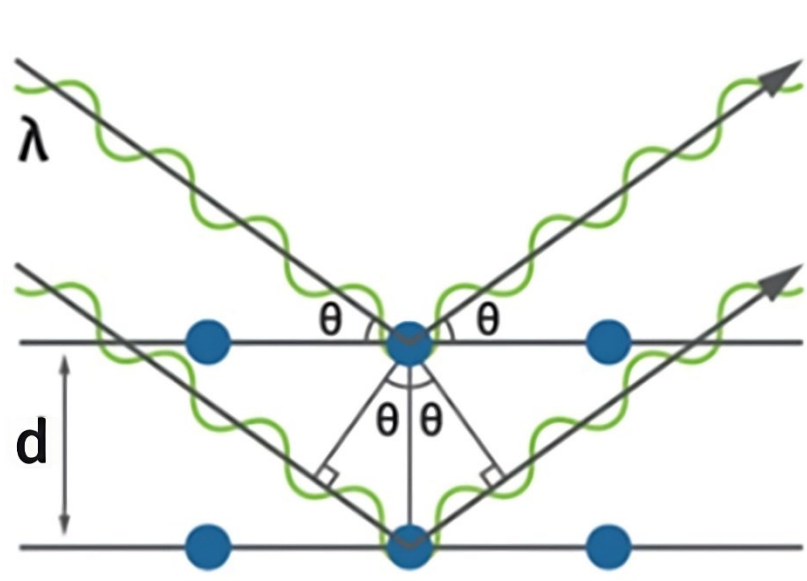
- nerazorna metoda,
- brza i jednostavna,
- prijenosna oprema,
- može se koristiti u i izvan laboratorija,
- moguće je odrediti troosno stanje napreznja,
- može se koristiti na raznim materijalima,
- mjeri u rasponu od šest do preko 100 milimetara dubine,
- mjeri radna i zaostala napreznja.

Nedostaci metode su [20]:

- potreban je etalon ili uzorak bez zaostalih napreznaja,
- daje prosječan iznos zaostalih napreznaja za relativno veliki volumen,
- ne može se primijeniti na hrapavim i zakrivljenim površinama.

#### 4.5. Metoda rendgenske difrakcije

Tehnika mjerenja rendgenskom difrakcijom je metoda nerazornog ispitivanja. Rendgenske zrake prodiru do dubine od oko 50  $\mu\text{m}$ . Zbog toga što je nerazorna metoda korisna je za određivanje zaostalih napreznaja na dijelovima na kojima bi oštećenja nastala ispitivanjem mogla utjecati na njihovu funkcionalnost, npr. zakaljena površina zupčanika. Tehnika rendgenskom difrakcijom je precizna, ekonomična te se može koristiti i u laboratoriju i na terenu ako je u pitanju prijenosna oprema za rendgensku difrakciju. Postoji više različitih tehnika kod mjerenja zaostalih napreznaja rendgenskom difrakcijom, ali sve se zasnivaju na istom principu – Braggovom zakonu. Kada na površinu polikristalnog materijala upadne rendgenska zraka pod određenim kutom dolazi do difrakcije rendgenske zrake od ravnine kristalne rešetke materijala. Zraka koja upadne na drugu ravninu ispod površine prelazi duži put kao što je prikazano na slici 19. Ako je taj prijeđeni put duži za višekratnik valne duljine doći će do konstruktivne interferencije te će se intenzitet izlazne zrake povećati. Slika nastala uslijed konstruktivne i destruktivne interferencije se naziva ogibna slika. Braggov zakon opisuje ovisnost udaljenosti između ravnina kristalne rešetke, upadnog kuta rendgenskih zraka i njihove valne duljine. [24], [25]



Slika 19. Braggov zakon [24]

Izraz za Braggov zakon je [26]:

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

Gdje su:

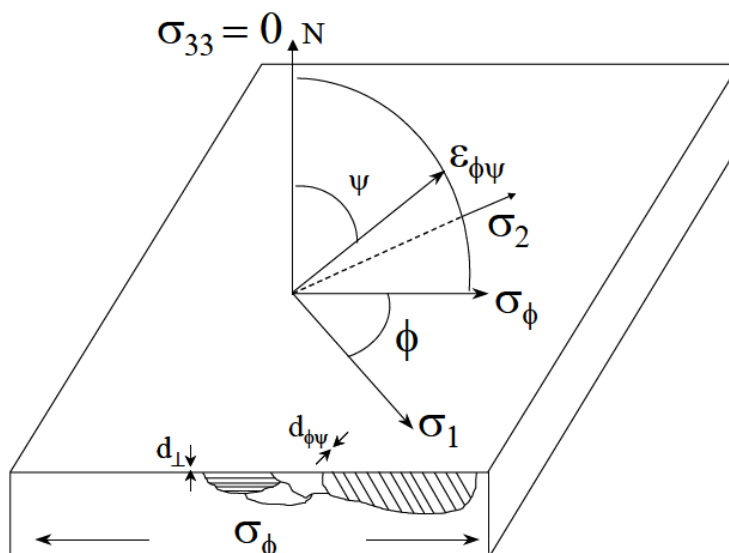
- $n$ , / – cijeli broj,
- $\lambda$ , nm – valna duljina,
- $d$ , nm – udaljenost kristalnih rešetki,
- $\theta$ , ° – upadni kut.

Ako znamo kako izgleda ogibna slika za neki neopterećeni materijal možemo ju usporediti s ogibnom slikom materijala pod opterećenjem. Kod materijala pod opterećenjem će ravnine kristalne rešetke biti na različitoj udaljenosti što će rezultirati različitom ogibnom slikom. Iz usporedbe dvaju ogibnih slika možemo utvrditi relativno produljenje  $\varepsilon$  izrazom (2) [26]:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (2)$$

Gdje su:

- $\varepsilon$ , / – relativno produljenje,
- $d_0$ , nm – udaljenost između ravnina bez opterećenja,
- $d_n$ , nm – udaljenost između ravnina pod opterećenjem.



**Slika 20.** Shema uzorka u ravninskom stanju naprezanja s prikazom različitih orijentacija kristalografskih ravnina [26]

U stvarnosti kristalne rešetke zrna su u nasumičnim orijentacijama u prostoru kako je prikazano na slici 20. Za određivanje relativnog produljenja potrebno je dovesti izvor i detektor rendgenskih zraka pod više različitih kutova koji se podudaraju s orijentacijom ravnina u kristalnim zrnima. Na slici 20. nasumična orijentacija kristalnih zrna u prostoru prikazana je kutovima  $\phi$  i  $\psi$ . Izraz (3) za relativno produljenje u ravninama pod kutovima  $\phi$  i  $\psi$  glasi [26]:

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (3)$$

Gdje su:

- $\varepsilon_{\phi\psi}$ , / – relativno produljenje u smjeru kutova  $\phi$  i  $\psi$ ,
- $d_{\phi\psi}$ , nm – udaljenost između ravnina pod kutovima  $\phi$  i  $\psi$  kada djeluje opterećenje,
- $d_0$ , nm – udaljenost između ravnina bez opterećenja.

Kada je utvrđeno produljenje može se saznati i naprezanje. Taj odnos naprezanja i produljenja naziva se Hookeovim zakonom. Za naprezanje u smjeru osi x dan je izraz (4) za Hookeov zakon [26]:

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x \quad (4)$$

Gdje su:

- $\sigma_x$ , MPa – naprezanje u smjeru osi x,
- $E$ , MPa – modul elastičnosti,
- $\varepsilon_x$ , / – relativno produljenje u smjeru osi x.

Daljnijim izvođenjem dobiva se izraz (5) kojim se može izračunati naprezanje u bilo kojoj orijentaciji u uzorku označenim na slici 20 sa  $\sigma_{\phi}$  [26]:

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1 + \nu) \cdot \sin^2 \psi} \cdot \left( \frac{d_{\psi} - d_n}{d_n} \right) \quad (5)$$

Gdje su:

- $\sigma_\phi$ , MPa – naprezanje u ravnini uzorka pod kutom  $\phi$ ,
- $E$ , MPa – modul elastičnosti,
- $\nu$ , / – Poissonov faktor,
- $\psi$ , ° – kut kristalografskih ravnina s obzirom na normalu površine uzorka,
- $d_n$ , nm – udaljenost između ravnina pod opterećenjem,
- $d_\psi$ , nm – udaljenost između ravnina pod opterećenjem i kutom  $\psi$ . [24], [26], [27]

#### 4.5.1. Tehnike mjerenja rendgenskom difrakcijom

Postoje razne tehnike mjerenja rendgenskom difrakcijom. Najčešće korištena je  $\sin^2 \psi$  metoda. To je najstarija metoda i na njoj se zasnivaju sve ostale metode. Opisati će se  $\sin^2 \psi$  metoda i modernija metoda  $\cos \alpha$  koja korištena u eksperimentalnom dijelu rada. [26]

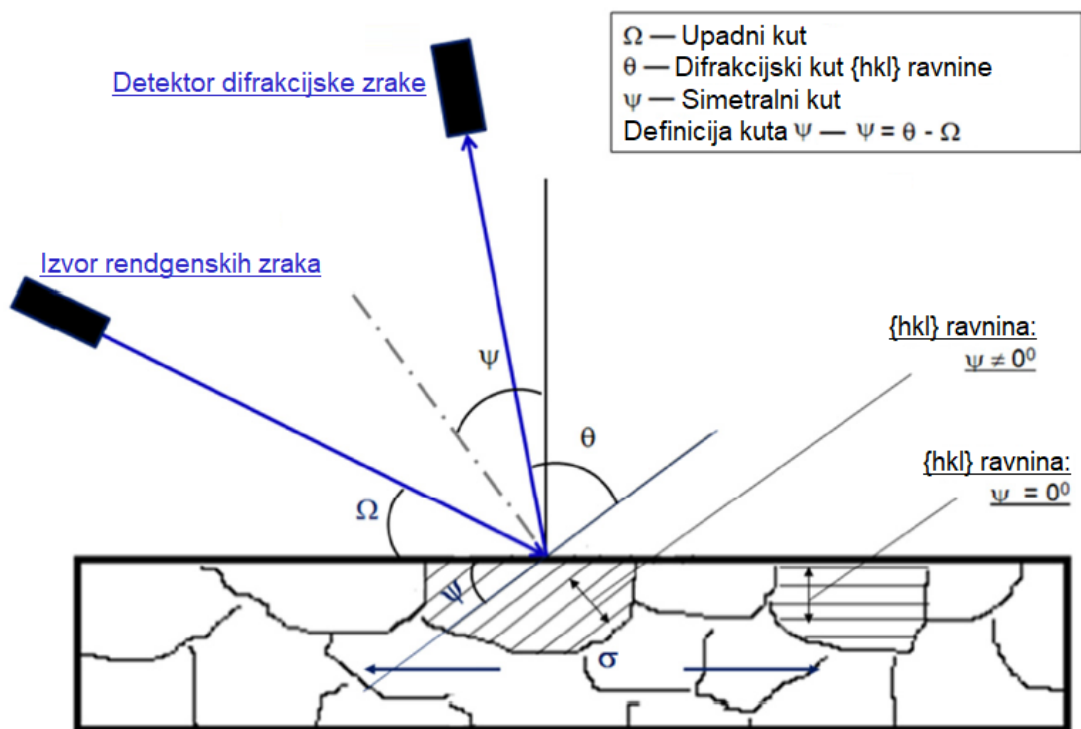
##### 4.5.1.1. Metoda $\sin^2 \psi$

Kod te metode mjerenja bitna su tri kuta [21], [27]:

- upadni kut  $\Omega$ , ° – kut između upadne zrake koja dolazi iz izvora zračenja rendgenskih zraka i površine uzorka,
- difrakcijski kut  $\theta$ , ° – kut između ravnine kristalne rešetke i odbijene rendgenske zrake koja nakon odbijanja ulazi u detektor,
- simetralni kut  $\psi$ , ° – kut između normale na ravninu kristalne rešetke i normale na površinu uzorka.

Simetralni kut definiran je izrazom (6) i prikazan na shemi  $\sin^2 \psi$  prikazanoj na slici 21.:

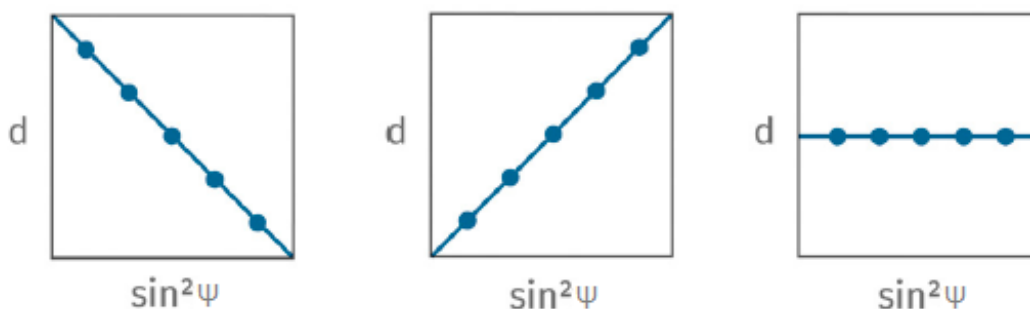
$$\psi = \theta - \Omega \quad (6)$$



Slika 21. Shematski prikaz  $\sin^2 \psi$  metode [27]

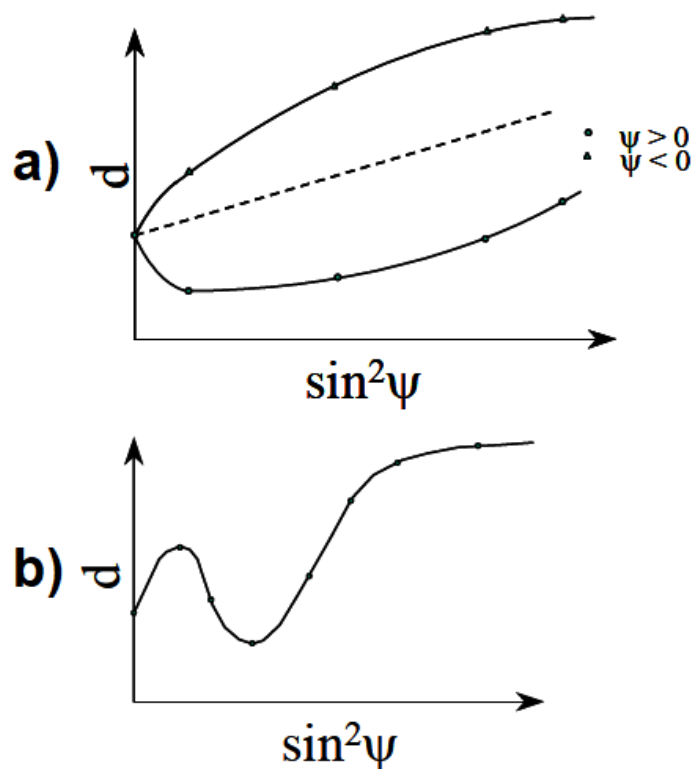
Metoda se zasniva na principu da različite kristalne ravnine različitom jačinom difraktiraju rendgenske zrake pod određenim kutom. Svaka kristalna rešetka ima svoj spektar vrhova difraktiranih zraka s obzirom na upadni kut. Metoda  $\sin^2 \psi$  provodi se mjerenjem razmaka kristalnih ravnina pod različitim simetralnim kutovima  $\psi$  te se moraju provesti mjerenja s najmanje dva različita simetralna kuta. Udaljenosti  $d$  koje su davale najveći intenzitet difraktiranih zraka za neki simetralni kut  $\psi$  prikazuju se na dijagramu  $\sin^2 \psi, d$  kako bi se mogla utvrditi vrsta i intenzitet naprezanja. Dijagram sa slike 22. na ordinati prikazuje udaljenost  $d$  koja ima linearnu ovisnost o  $\sin^2 \psi$  pod uvjetom da djeluju samo normalna naprezanja. [21], [26], [27]

**Tlačno naprezanje   Vlačno naprezanje   Bez naprezanja**



Slika 22. Primjer  $\sin^2 \psi, d$  dijagrama za tlačno i vlačno naprezanje [24]

Ovisnost te dvije veličine nije uvijek linearna. Ako materijal ima nejednolike deformacije dolazi do razdvajanja krivulje (gornji dijagram, slika 23.) ili do oscilacija krivulje (donji dijagram, slika 23.) ako je mikrostruktura usmjerena što uzrokuje nehomogena naprezanja u materijalu. [26]



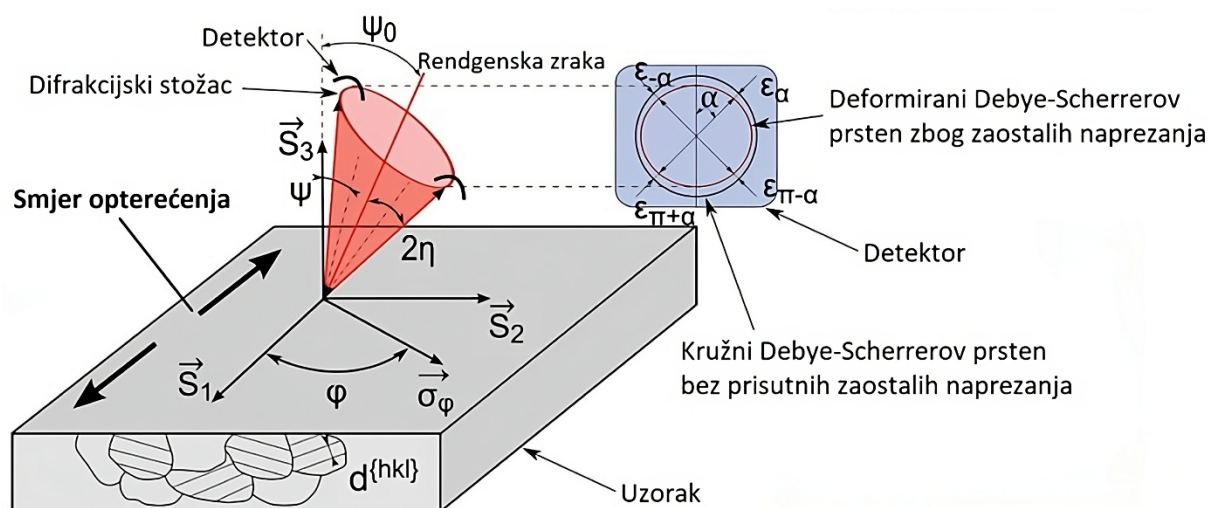
Slika 23. Dijagram  $\sin^2 \psi$ ,  $d$  - pod a) nejednolike deformacije, pod b) usmjerena mikrostruktura [26]

#### 4.5.1.2. Metoda $\cos \alpha$

Metoda  $\cos \alpha$  nije najčešće korištena metoda, ali ima brojne prednosti nad najčešće korištenom  $\sin^2 \psi$  metodom. Koristi se kod polikristalnih materijala jer kada rendgenska zraka upadne na površinu polikristalnog materijala ima puno sitnih kristalnih zrna koja zadovoljavaju Braggov zakon. Difraktirane zrake se šire od površine uzorka pod kutom koji zadovoljava Braggov zakon u svim smjerovima. Zato se zrake šire od površine u obliku stošca kao što prikazuje slika 24. Za svaku skupinu različito orijentiranih kristalnih ravnina nastaje zaseban stožac tj. prsten. Metodom  $\cos \alpha$  se prikupljaju podaci s cijelog Debeye-Scherrerovog prstena pomoću dvodimenzionalnog senzora za razliku od  $\sin^2 \psi$  metode gdje se jednim mjerenjem prikuplja samo jedna točka s Debeye-Scherrerovog prstena. Nije potrebno mjeriti iz više kutova kao kod  $\sin^2 \psi$  metode i samo trajanje mjerenja je kraće primjenom  $\cos \alpha$  metode. Trajanje mjerenja



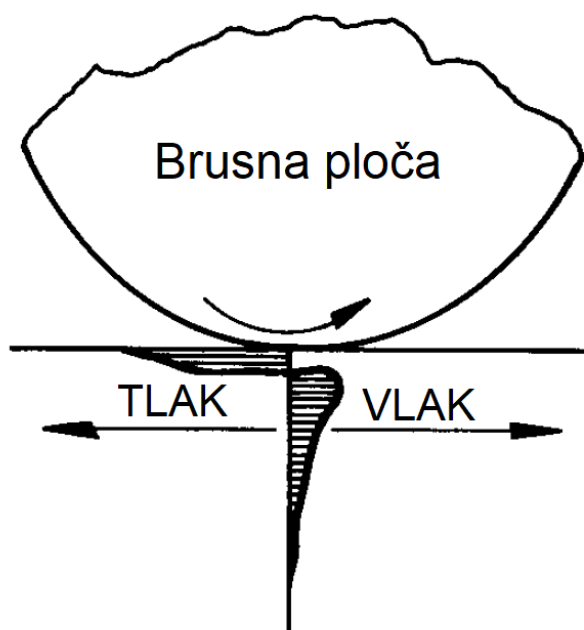
iznosi oko 60 sekundi za feritne uzorke. Uspoređuje se izmjereni deformirani prsten sa nedeformiranim prstenom u bazi podataka. Oblik prstena ukazuje na određeno produljenje tj. deformacije. Kako bi se odredile deformacije potrebno je imati mjerenja u dvije nasuprotne točke na prstenu na zamišljenoj ravnoj liniji koja je pod određenim azimutnim kutom  $\alpha$ . Oblik prstena može ukazivati na prisutna naprezanja, orijentaciju i veličinu zrna. Ova metoda kompleksnija je za primjenu kod grubozrnatih materijala. Zbog veličine zrna njihov broj na ozračenoj površini je nedovoljan da se formira cjeloviti, tj. kontinuirani Debye-Scherrerov prsten. Zaostala naprezanja kod grubozrnate mikrostrukture mogu se odrediti s  $\cos \alpha$  metodom na više načina. Prvi način je pomicanjem uzorka tako da površina ostaje u istoj ravnini, drugi je promjenom nagiba uzorka i treći je promjena nagiba upadne zrake između svakog novog mjerenja. Optički sustav za mjerenje ne treba imati goniometar po kojem se kreću izvor zrake i detektor kao kod  $\sin^2 \psi$  metode. Cijeli sustav za mjerenje je lagan što omogućava mjerenje i u laboratoriju i na terenu. Metoda  $\cos \alpha$  je prikladna za mjerenje malih površina jer nije potrebno mijenjati kutove, kod mjerenja  $\sin^2 \psi$  metodom što je kut plići povećava se mjerena površina. Ova metoda omogućuje određivanje troosnog naprezanja te je postupak mjerenja puno jednostavniji. Metoda  $\cos \alpha$  precizna je jednako kao i  $\sin^2 \psi$  metoda. Metoda se može koristiti za mjerenje ispod površine pomoću elektropoliranja koje ne utječe na raspodjelu zaostalih naprezanja u uzorku. [2], [28], [29]



Slika 24. Shema  $\cos \alpha$  metode [2]

#### 4.5.2. Elektropoliranje

Elektropoliranje je postupak obrade površine koji se u nekim slučajevima koristi zajedno s metodom mjerenja zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom. Elektropoliranje je postupak koji uklanja materijal bez unošenja novih zaostalih napreznja za razliku od mehaničkih metoda poliranja. Ako je neki uzorak u kojem se trebaju utvrditi zaostala napreznja bio npr. brušen tada su u kristalnim zrnima blizu površine unesena tlačna napreznja. Površinska tlačna napreznja unesena nekim postupkom obrade odvajanjem čestica onemogućuju mjerenje zaostalih napreznja prisutnih prije obrade. Pošto metoda mjerenja zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom prodire u materijal do najviše 50  $\mu\text{m}$  mora se ukloniti najgornji sloj materijala u kojem vladaju napreznja unesena mehaničkom obradom površine. Raspodjela tlačnih i vlačnih zaostalih napreznja unesena u gornji sloj materijala nekog obratka brušenjem prikazana su slikom 25. [7], [26]



Slika 25. Raspodjela zaostalih napreznja uslijed brušenja [7]

Elektropoliranje je elektrokemijski postupak uklanjanja materijala. Radni komad koji je potrebno elektropolirati stavlja se u poseban elektrolit za elektropoliranje. Odabir elektrolita ovisi o tome koji materijal se elektropolira, a postoji puno različitih elektrolita. Radni komad je anoda što znači da se spaja na pozitivan pol DC izvora struje, dok se katoda spaja na negativan pol. Katoda i anoda se uranjaju u elektrolit i uključuje se DC izvor struje. Struja teče od radnog komada tj. anode prema katodi. Metalni ioni se prvo selektivno odvajaju od vrhova profila

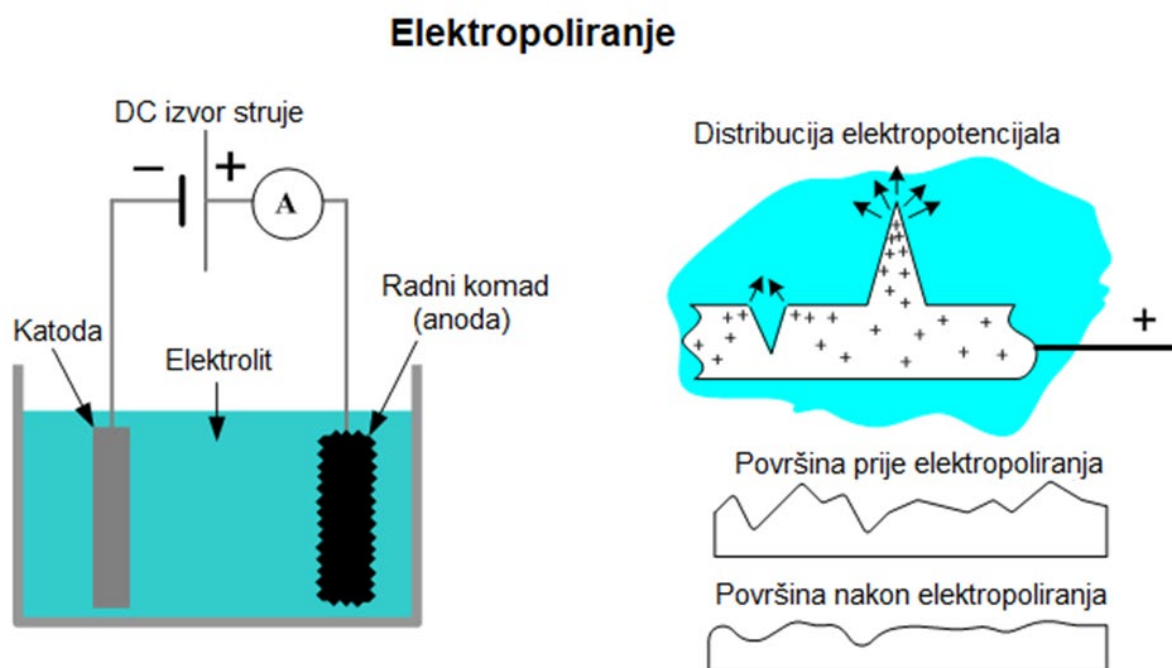
hrapavosti (slika 26.) zbog većeg elektropotencijala na vrhovima metala što smanjuje hrapavost radnog komada. [30], [31]

Prednosti postupka su [30], [31]:

- ne utječe na raspodjelu zaostalih naprezanja i ne unosi nova zaostala naprezanja,
- hrapavost je bolja u usporedbi s mehaničkim metodama poliranja,
- smanjuje faktor trenja polirane površine i do 75 % u usporedbi s mehaničkim poliranjem,
- ne utječe negativno na vlačnu čvrstoću  $R_m$  za razliku od mehaničkih metoda poliranja,
- ne ostavlja mrlje,
- ne zaostaju čestice abraziva zaglavljene u površini jer se koristi samo elektrolit.

Nedostaci postupka su [30], [31]:

- uklanja materijal samo do dubine od 200  $\mu\text{m}$ ,
- ne može odstraniti velika odstupanja površine,
- višefazni materijali mogu nakon poliranja ispasti hrapavi zbog različitih brzina poliranja različitih faza,
- potrebno je pažljivo podesiti parametre gustoće struje i vremena kako bi se mogla dobiti glatka površina.



Slika 26. Shema elektropoliranja [30]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom poglavlju opisan je eksperimentalni dio ovog rada. Eksperimentalni rad proveden je s ciljem utvrđivanja raspodjele i intenziteta zaostalih naprezanja u sučeljenom i kutnom spoju od čelika S355 koji su zavareni MCAW postupkom. Zaostala naprezanja izmjerena su  $\cos \alpha$  metodom rendgenske difrakcije. Rezultati mjerenja navedeni su u tablicama i grafički prikazani te su analizirani.

### 5.1. Oprema za zavarivanje i potrošni materijal

U početnom dijelu poglavlja opisano je sve što je korišteno za izradu uzoraka zavarenog spoja. Pod to spadaju uređaji, osnovni i dodatni materijal te plinska mješavina.

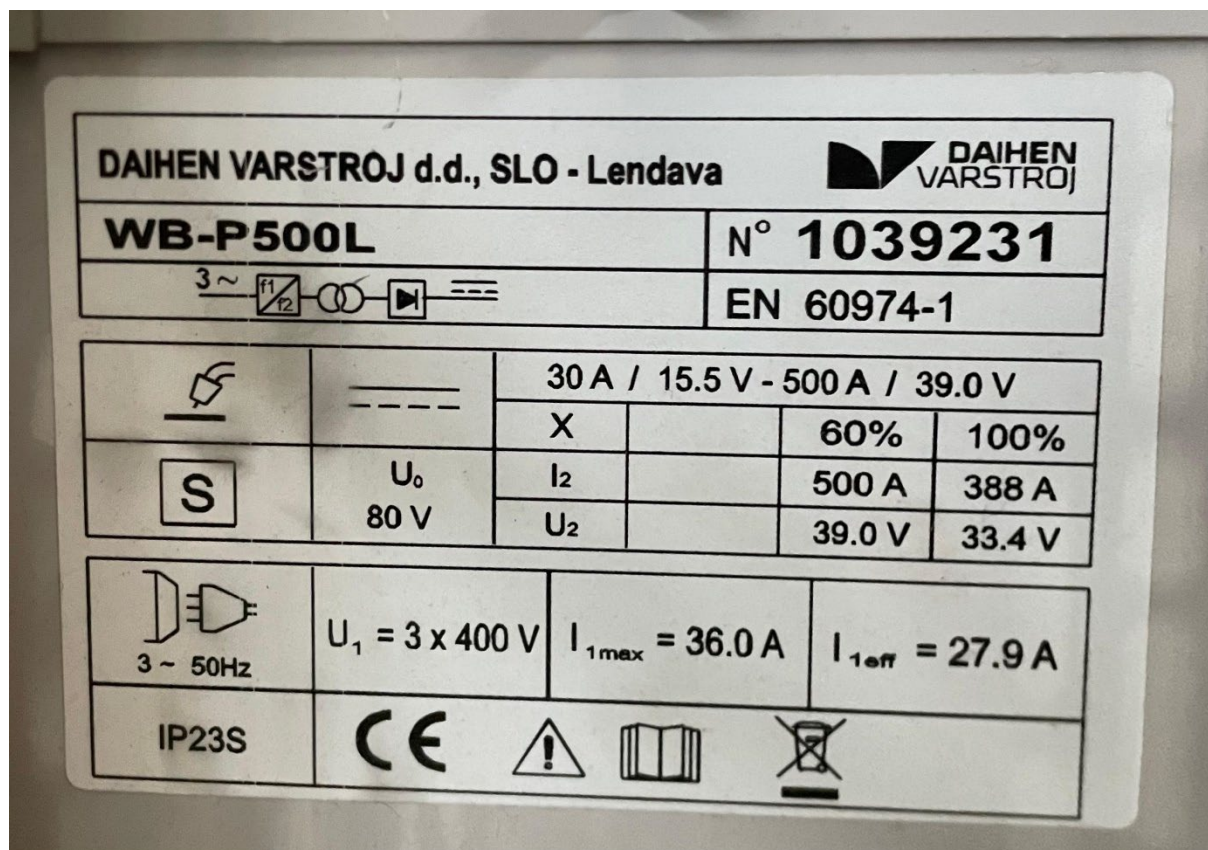
#### 5.1.1. Izvor struje za zavarivanje

Uzorci su zavareni izvorom struje za zavarivanje proizvođača Daihen Varstroj. Model WB-P500L izvora struje s dodavačem žice koji je korišten za zavarivanje prikazan je na slici 27.



Slika 27. Izvor struje za zavarivanje Daihen Varstroj WB-P500L s dodavačem žice

To je invertorski izvor struje za zavarivanje. Identifikacijska pločica izvora na slici 28. prikazuje da je opseg vršnih vrijednosti jakosti izlazne struje  $I_2$  od 30 A pri izlaznom naponu  $U_2$  u iznosu od 15,5 V do jakosti izlazne struje  $I_2$  od 500 A pri izlaznom naponu  $U_2$  u iznosu od 39,0 V. Radni ciklus, tj. intermitencija  $X$  iznosi 100 % kada izlazna jakost struje  $I_2$  iznosi 388 A pri izlaznom naponu  $U_2$  u iznosu od 33,4 V. Pri vršnim vrijednostima izlazne struje i napona intermitencija je 60 %. Najveća dopuštena ulazna jakost struje  $I_{1max}$  iznosi 36 A pri ulaznom naponu  $U_1$  od 400 V.



Slika 28. Identifikacijska pločica izvora za zavarivanje Daihen Varstroj WB-500L

Način zavarivanja uzoraka bio je mehanizirani za što je korišten traktor za zavarivanje od proizvođača Bug-O Systems model MDS-1002 prikazan na slici 29. Može rezati ili zavarivati po pravcu. Koristi se za točno pozicioniranje i upravljanje brzinom zavarivanja. Može se postaviti na točnu udaljenost sapnice od radnog komada te ima mogućnost mijenjanja kuta nagiba pištolja za zavarivanje. Traktor za zavarivanje omogućuje točno i precizno postavljanje parametara za zavarivanje uzoraka MIG/MAG uređajem. Raspon brzina zavarivanja i rezanja je od 51 do 3048 mm/min. U hvataljci može držati opremu mase do 27 kg [32].



Slika 29. Traktor za zavarivanje Bug-O Systems MSD-1002

### 5.1.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal koji je korišten za izradu uzoraka je toplovaljani konstrukcijski čelik S355. Za izradu prvog uzorka kutnog spoja korištena su dva komada lima jednakih dimenzija debljine 30 mm, širine 150 mm i duljine 340 mm. Za drugi uzorak sučeljenog spoja korištena su dva komada lima debljine 15 mm i duljine 320 mm. Jedan lim je širok 150 mm, a drugi 140 mm. Mehanička svojstva čelika navedena su u tablici 1., a kemijski sastav u tablici 2. Čelik S355 je često korišten feritni čelik zbog svoje dobre zavarljivosti uslijed niskog udjela ugljika i dobre obradivosti [33].

Tablica 1. Mehanička svojstva čelika S355 [34]

Mehanička svojstva	Za uzorak debljine lima $d_1 = 15 \text{ mm}$	Za uzorak debljine lima $d_2 = 30 \text{ mm}$
Granica razvlačenja $R_e$ , MPa	355	345
Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	490 ÷ 630	490 ÷ 630
Istezljivost $A_5$ , %	22	22
Udarni rad loma $KV$ , J	27	27

Tablica 2. Kemijski sastav čelika S355 [34]

Kemijski element	C	Mn	Si	P	S	N
Maseni udio, %	0,23	1,7	0,6	0,055	0,055	0,011

### 5.1.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal korištena je metalnim praškom punjena žica. Korištena je žica promjera 1,2 mm proizvođača Kiswel model KX-706M. To je žica namijenjena za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čija granica razvlačenja nije veća od 490 MPa. Čelik koji će se zavarivati je nelegirani čelik S355 s granicom razvlačenja od 355 MPa što ovu žicu čini prikladnom za zavarivanje čelika S355. Korištena žica ima dobru dubinu penetracije, visoku otpornost nastanka poroziteta, dobro razlijevanje rastaljenog metala zavara i nizak udio vodika u zavaru. Elektroda se spaja isključivo na istosmjernu struju pozitivnog polariteta. Predviđena je za korištenje u PA položaju odnosno za sučeljeni spoj u horizontalnom položaju i predviđena je za PB položaj tj. za kutni spoj u horizontalnom položaju. Mehanička svojstva žice su navedena u tablici 3., a kemijski sastav u tablici 4. [35]

Tablica 3. Mehanička svojstva čistog metala zavara od elektrode Kiswel KX-706M [35]

Mehanička svojstva	Iznos
Granica razvlačenja $R_e$ , MPa	480
Vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	540
Istezljivost $A_5$ , %	29
Udarni rad loma $KV$ , J	70

Tablica 4. Kemijski sastav čistog metala zavara od elektrode Kiswel KX-706M [35]

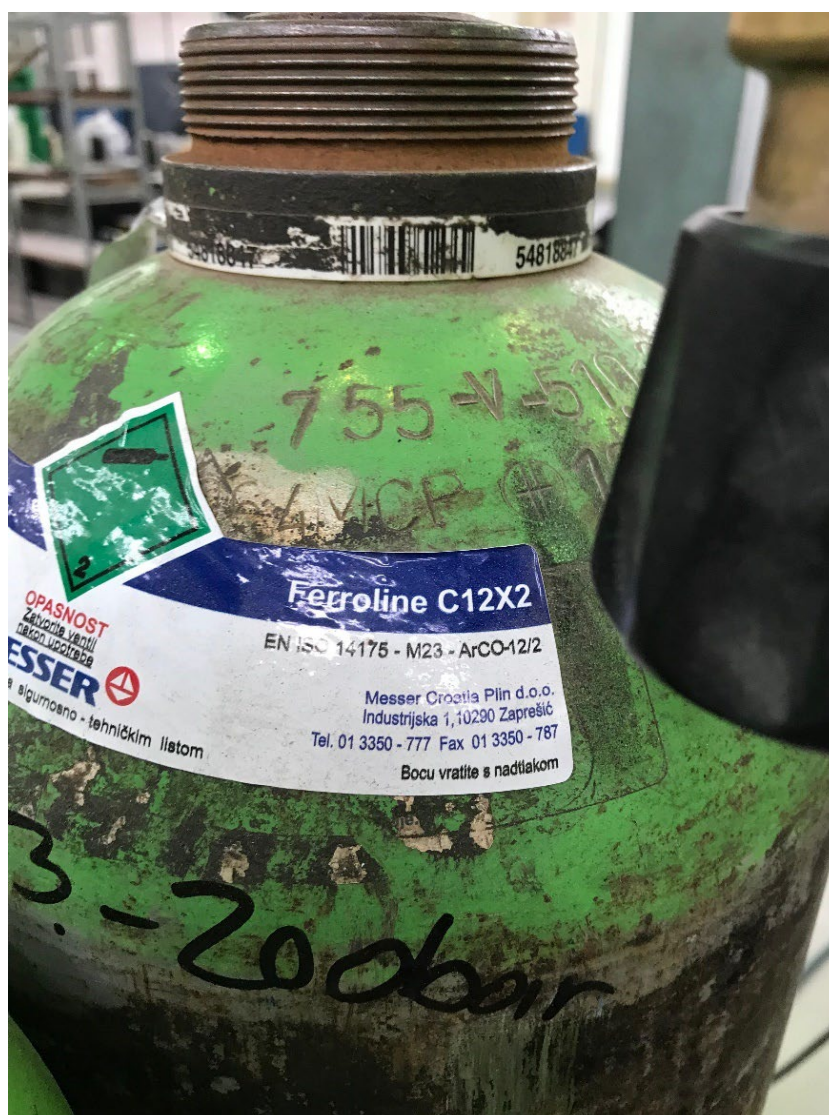
Kemijski element	C	Mn	Si	P	S
Maseni udio, %	0,04	1,5	0,6	0,014	0,01

#### 5.1.4. Zaštitni plin

Tijekom zavarivanja MCAW postupkom za zaštitni plin je korištena trokomponentna plinska mješavina Ferroline C12X2 proizvođača Messer. Plinska boca korištene mješavine prikazana je na slici 30. Komponente plinske mješavine su:

- Argon s masenim udjelom od 86 %,
- CO<sub>2</sub> s masenim udjelom od 12 %,
- O<sub>2</sub> s masenim udjelom od 2 %.

Ova plinska mješavina predviđena je za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Može se koristiti za zavarivanje limova debljih od deset milimetara. Prisutnost O<sub>2</sub> u plinskoj mješavini omogućuje veću brzinu zavarivanja, dok CO<sub>2</sub> poboljšava dubinu penetracije, a visok udio Ar smanjuje intenzitet rasprskavanja. [36]



Slika 30. Plinska boca koja sadrži plinsku mješavinu Ferroline C12X2 proizvođača Messer

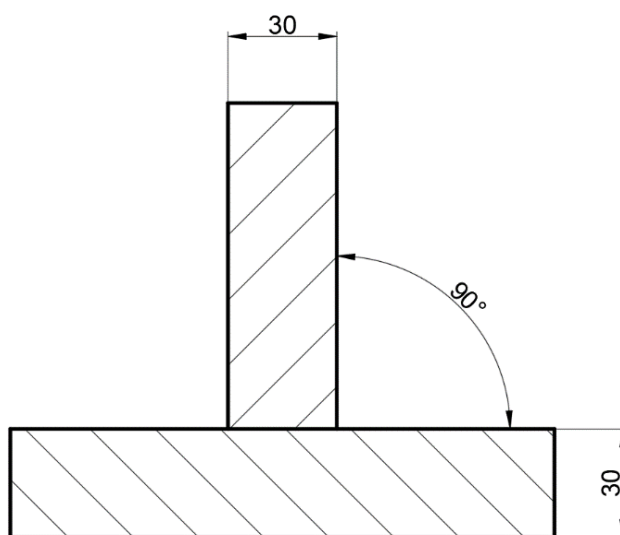


## 5.2. Zavarivanje uzorka kutnog spoja

U ovom poglavlju opisana je priprema kutnog spoja prije zavarivanja i parametri MCAW postupka koji su korišteni za zavarivanje uzorka. Opisan je način i rezultati mjerenja zaostalih naprezanja.

### 5.2.1. Priprema kutnog spoja

U eksperimentalnom dijelu prvi uzorak koji je zavaren je uzorak kutnog spoja. Priprema zavarenog spoja prikazana je na slici 31. Korištena su dva lima od čelika S355 debljine 30 mm. Limovi su bili jednakih dimenzija širine 150 mm i duljine 340 mm. Kut pod kojim su limovi postavljeni je  $90^\circ$  i bez razmaka između limova. Prije zavarivanja brusilicom je skinut sloj hrđe zatim su limovi očišćeni etilnim alkoholom.



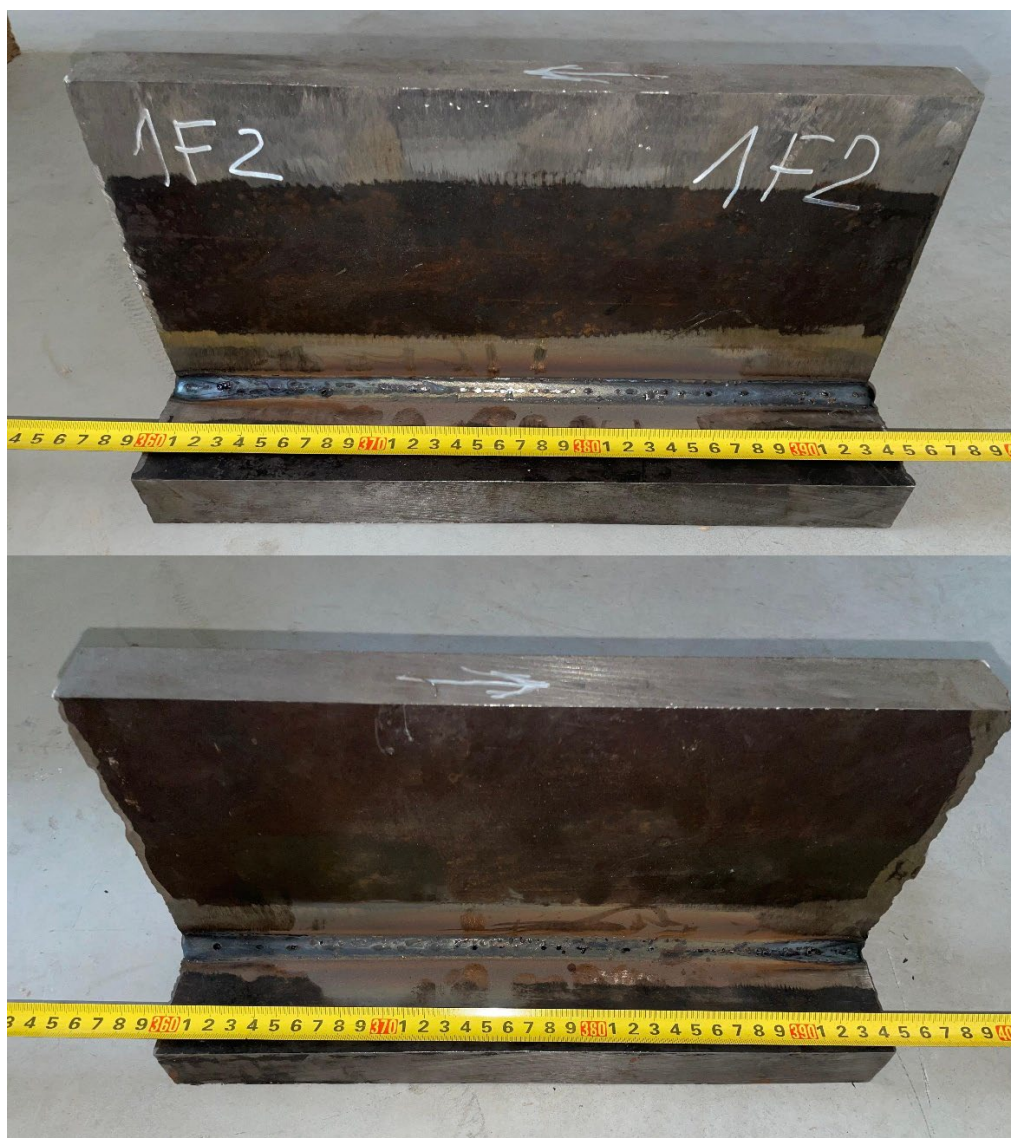
Slika 31. Priprema kutnog zavarenog spoja [37]

### 5.2.2. Parametri zavarivanja kutnog spoja

Kutni spoj zavaren je obostrano MCAW postupkom. Visina šava je pet milimetara. Zavar je sa svake strane napravljen u jednom prolazu u PA položaju. Kao zaštitni plin korištena je plinska mješavina Ferroline C12X2 proizvođača Messer. Korištena je istosmjerna struja s taljivom elektrodom spojenom na pozitivan pol izvora struje. Ostatak parametara prikazan je u tablici 5. Nakon zavarivanja zavar je iščetkan žičanom četkom i očišćen etanolom. Obje strane zavarenog uzorka prikazane su na slici 32.

Tablica 5. Parametri zavarivanja uzorka kutnog spoja

Parametri za oba prolaza	Iznos
Jakost struje, A	330
Napon, V	35
Brzina dodavanja žice, m/min	14,5
Brzina zavarivanja, cm/min	45
Unos topline, kJ/cm	12,32
Protok plina, l/min	20



Slika 32. Zavareni uzorak kutnog spoja

### 5.3. Mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja

U ovom poglavlju navedeni su rezultati mjerenja zaostalih naprezanja u uzorku kutnog zavarenog spoja. Prvo je provedeno mjerenje na površini očišćenoj etanolom. Nakon izmjerenih zaostalih naprezanja uzorak je elektropoliran te su ponovno izmjerena zaostala naprezanja.

#### 5.3.1. Mjerenje nakon čišćenja površine etanolom

Mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom su provedena pomoću uređaja  $\mu$ -X360s proizvođača Pulstec. Mjerni uređaj pričvršćen je na prihvatnicu industrijskog robota sa šest stupnjeva slobode gibanja Agilus KR 4 proizvođača KUKA. Industrijski robot omogućava precizno pozicioniranje mjernog uređaja. Navedeni mjerni uređaj koristi  $\cos \alpha$  metodu rendgenske difrakcije. Mjerni uređaj se mora pozicionirati na točno određenu visinu i kut nagiba mjernog uređaja s obzirom na normalu površine uzorka  $\psi_0$  koji za ferit iznosi  $35^\circ$ . Odabrana je donja površina uzorka za provedbu mjerenja zbog lakšeg mjerenja. Mjerni uređaj s robotom je prikazan na slici 33. tijekom mjerenja zaostalih naprezanja na donjoj površini uzorka.[38], [39]



Slika 33. Mjerenje zaostalih naprezanja na uzorku kutnog spoja

Donja površina uzorka je očišćena etanolom i zatim su točke mjerenja označene markerom. Mjerenja zaostalih naprezanja napravljena su u longitudinalnom smjeru u transverzalnoj ravnini u odnosu na zavar. Na sredini uzorka označeno je 14 točaka. Prva i zadnja točka su udaljene od ruba deset milimetara, a razmak između točaka također iznosi deset milimetara, slika 34. Izmjerena su longitudinalna normalna zaostala naprezanja  $\sigma_x$ , MPa i smična zaostala naprezanja

$\tau_{xy}$ , MPa. Rezultati mjerenja s devijacijama izmjerenih normalnih  $D_{\sigma}$ , MPa i smičnih  $D_{\tau}$ , MPa zaostalih naprezanja navedeni su u tablici 6. Iznosi izmjerenih zaostalih naprezanja prikazani su u ovisnosti o udaljenosti od sredine uzorka  $d_y$ , mm na slikama 35. i 37.

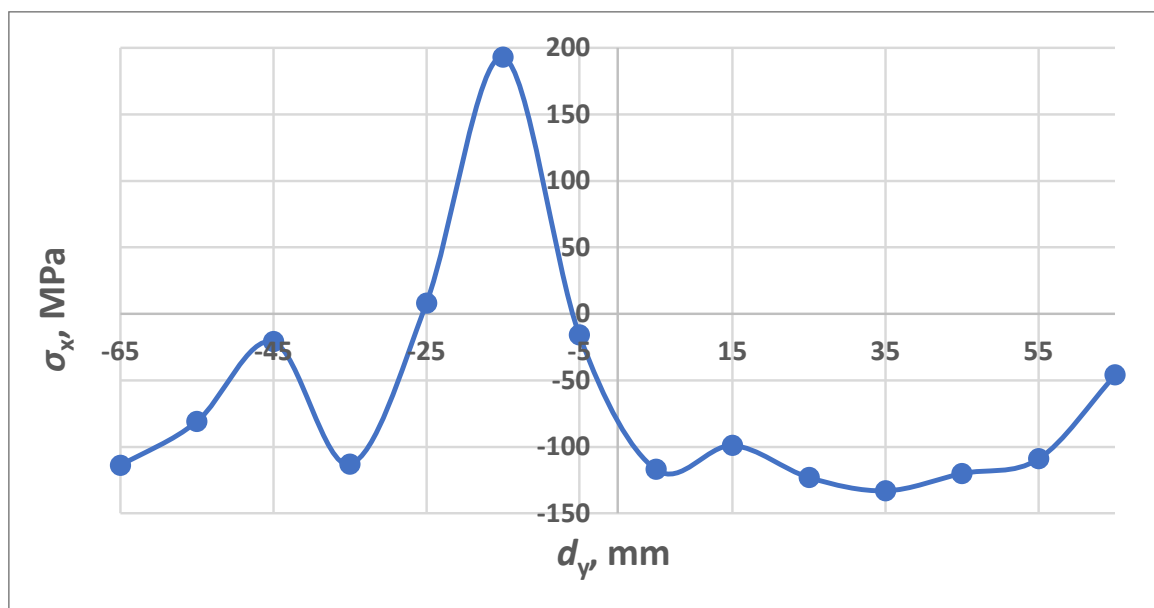


Slika 34. Prikaz označenih točaka mjerenja u transverzalnoj ravni

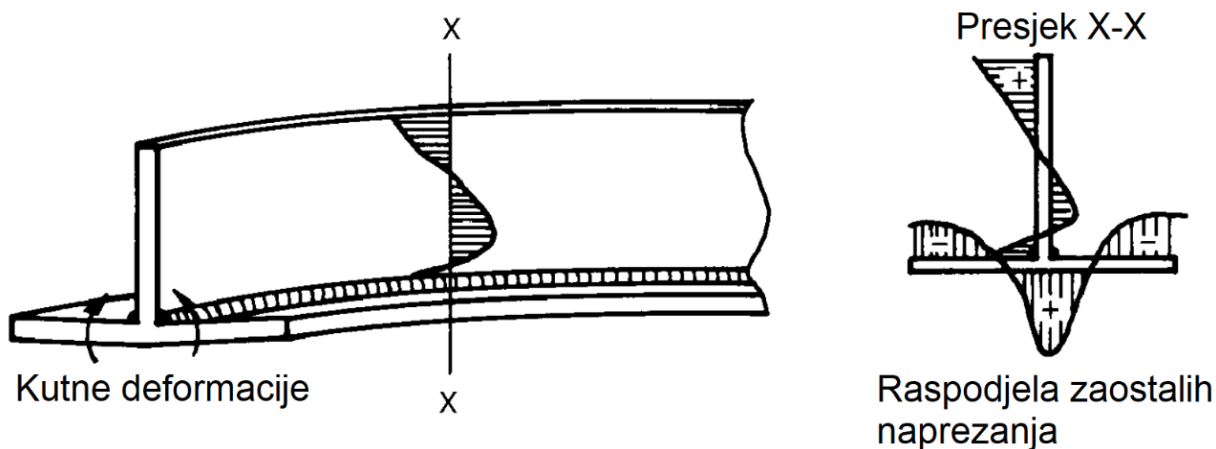
Tablica 6. Izmjerena zaostala naprezanja na uzorku kutnog spoja

Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_{\sigma}$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_{\tau}$ , MPa
1	65	-46	43	-59	52
2	55	-109	34	-14	35
3	45	-120	45	-19	35
4	35	-133	49	-12	57
5	25	-123	27	-42	48
6	15	-99	21	-47	41
7	5	-117	46	4	48
8	-5	-16	41	-164	70
9	-15	193	47	131	75
10	-25	8	35	95	35
11	-35	-113	41	-17	22
12	-45	-21	40	-26	36
13	-55	-81	39	-74	44
14	-65	-114	57	41	23

Najveća vrijednost normalnog longitudinalnog zaostalog naprezanja  $\sigma_x$  iznosi 193 MPa u točki 9. Vrsta naprezanja u točki 9 je vlačno naprezanje. Točka 9 nalazi se direktno ispod jednog prolaza zavara na udaljenosti koja iznosi 15 mm od sredine uzorka. Najveće tlačno naprezanje nalazi se u točki 4 na udaljenosti koja iznosi 35 mm u iznosu od -133 MPa. Devijacije su bile velike zbog hrapave površine uzorka. Ako površina ima preveliku hrapavost to može rezultirati nepouzdanim izmjerenim iznosom zaostalog naprezanja s velikom devijacijom. Iznos devijacija se kretao od 21 do 57 MPa. Najveća devijacija je izmjerena u točki 14. Raspodjela normalnih zaostalih naprezanja dobro se podudara s očekivanom raspodjelom zaostalnih naprezanja kod zavarenog T-spoja prikazanog iz literature na slici 36.

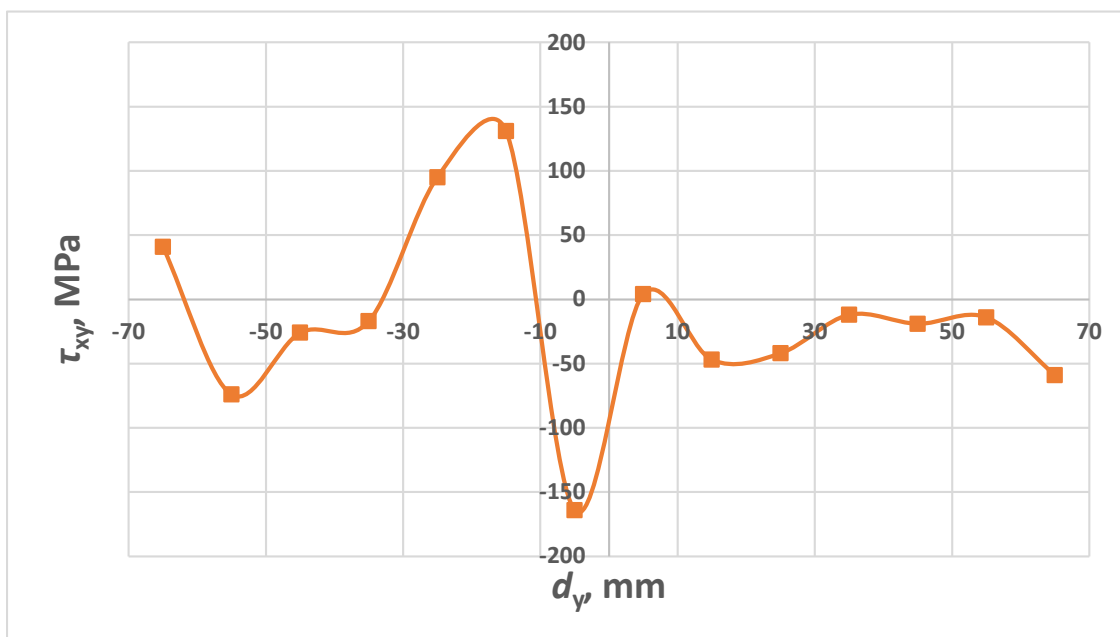


Slika 35. Raspodjela  $\sigma_x$  zaostalnih naprezanja u uzorku kutnog spoja



Slika 36. Raspodjela zaostalnih naprezanja kod zavarenog kutnog T-spoja [7]

Najveća vrijednost smičnog longitudinalnog zaostalog naprezanja  $\tau_{xy}$  iznosi -164 MPa u točki 8. Točka 8 nalazi se na udaljenosti koja iznosi pet milimetara od sredine uzorka. Devijacije smičnih zaostalih naprezanja također su bile velike. Devijacije su se kretale od 22 do 75 MPa. Najveća smična devijacija je izmjerena u točkama 8 i 9. U točki 8 smično naprezanje je -164 MPa, a u točki 9 iznosi 131 MPa. Devijacije su točkama 8 i 9 su ujedno najveće što ukazuje na problematiku mjerenja ovom metodom. Ostale izmjerene vrijednosti smičnih naprezanja su znatno niže kao što se i očekuje za iznose smičnih naprezanja.



Slika 37. Raspodjela  $\tau_{xy}$  naprezanja u uzorku kutnog spoja

### 5.3.2. Mjerenje nakon elektropoliranja

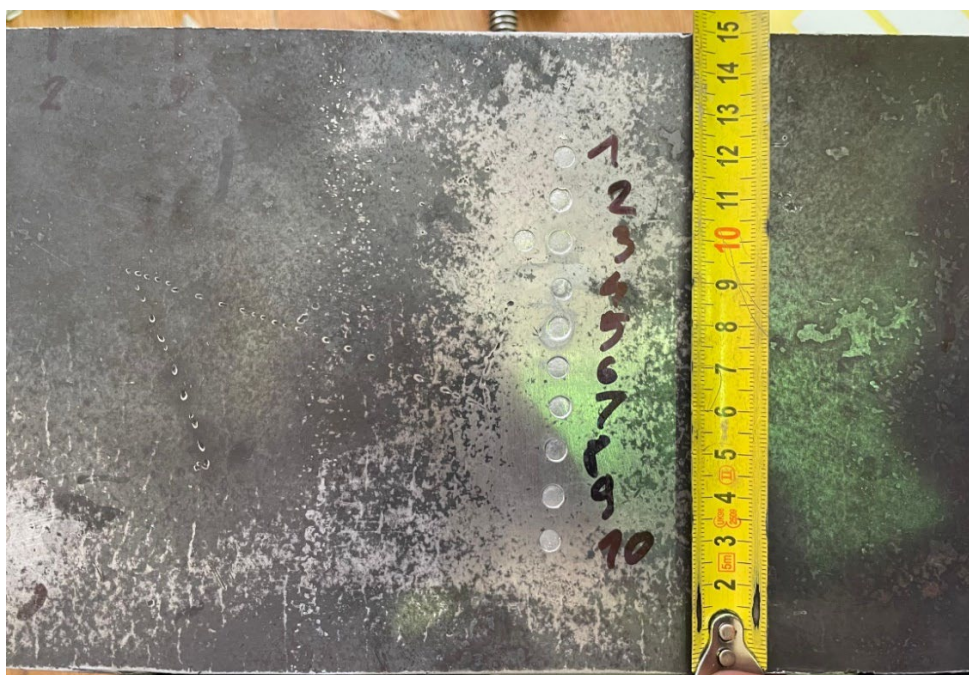
Nakon prvog mjerenja zaostalih naprezanja zbog velike devijacije provedeno je mjerenje zaostalih naprezanja nakon elektropoliranja. Prije elektropoliranja površina je pobrušena ručnim brušenjem korištenjem brusnog papira granulacije P180. Nakon ručnog brušenja površina je očišćena etanolom. Postupak elektropoliranja priprema se na način da se na čistu površinu zalijepi naljepnica (slika 38.) koja na sredini ima rupu određenog promjera. Za elektropoliranje uzorka kutnog zavarenog spoja korištena je naljepnica s rupom promjera pet milimetara. Zatim se na otvoreno dno posude za elektropoliranje koja sadrži katodu stavlja plastelin kako bi ne bi došlo do curenja elektrolita iz posude, slika 38. Elektrolitom se puni posuda do razine tako da elektrolit prekriva katodu. Radni komad se spaja na pozitivan pol DC izvora struje i uključuje se uređaj. Nakon određenog vremena prekida se strujni krug. Za elektropoliranje korišten je standardni elektrolit od proizvođača uređaja za mjerenje zaostalih

napreznja Pulstec. Na uređaju je podešena jakost struje na najvišu razinu, a trajanje elektropoliranja je za svaku točku iznosilo je 80 sekundi.



**Slika 38. Elektropoliranje uzorka kutnog spoja**

Na donjoj strani uzorka elektropolirano je deset točaka u transverzalnom smjeru u odnosu na zavar. Točke su od ruba površine udaljene 30 mm, dok je razmak između točaka deset milimetara, slika 39.



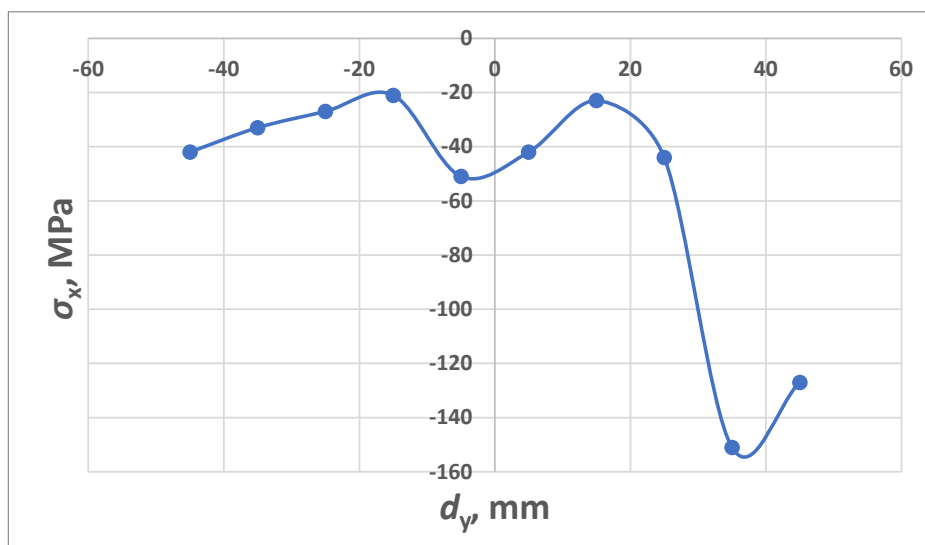
**Slika 39. Elektropolirane točke mjerenja na uzorku kutnog spoja**

Nakon elektropoliranja izmjerena su zaostala naprezanja u elektropoliranim točkama. Izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 7.

**Tablica 7. Izmjerena zaostala naprezanja na elektropoliranom uzorku kutnog spoja**

Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_\sigma$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_\tau$ , MPa
1	45	-127	41	31	47
2	35	-151	38	12	52
3	25	-44	55	-51	58
4	15	-23	54	-6	37
5	5	-42	63	-28	45
6	-5	-51	55	17	72
7	-15	-21	39	-27	30
8	-25	-27	66	-3	38
9	-35	-33	61	8	74
10	-45	-42	39	25	46

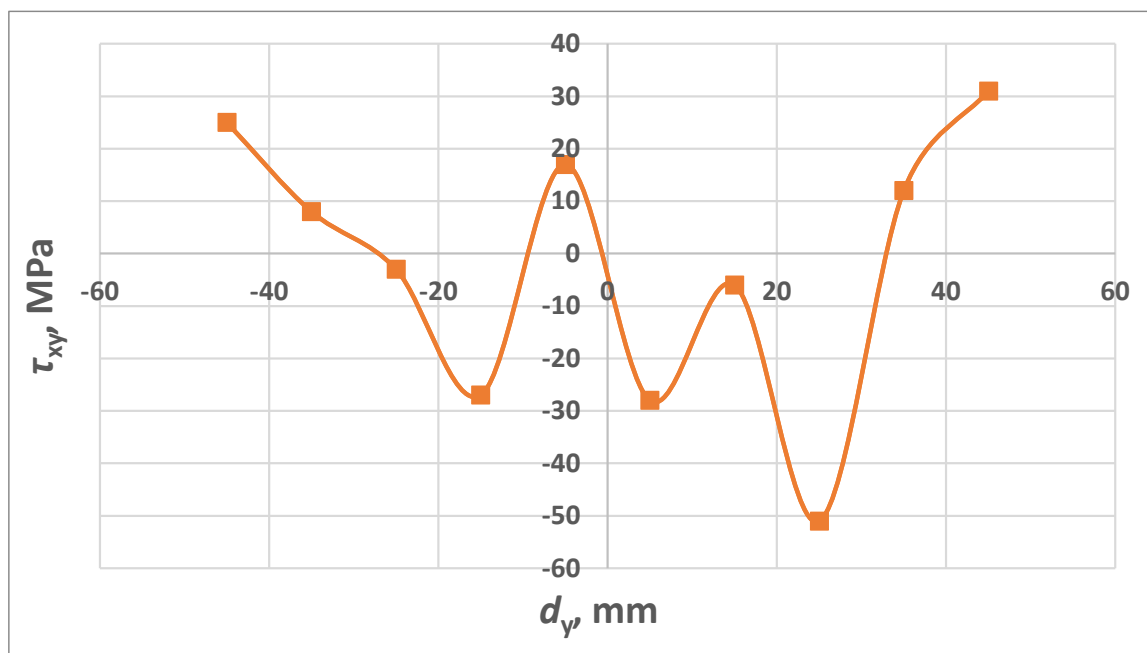
Slika 40. prikazuje izmjerena normalna longitudinalna zaostala naprezanja. Najveća izmjerena vrijednost normalnog naprezanja je izmjerena u točki 2 na udaljenosti 35 mm od sredine uzorka. Sva normalna zaostala naprezanja ispod površine su tlačna. Moguće je da nije dobivena očekivana raspodjela zaostalih naprezanja zbog ručnog brušenja koje utječe na raspodjelu zaostalih naprezanja ispod površine.



**Slika 40. Raspodjela  $\sigma_x$  zaostalih naprezanja u uzorku kutnog spoja nakon elektropoliranja**



Na slici 41. prikazana je raspodjela longitudinalnih smičnih zaostalih napreznja izmjerenih nakon ručnog brušenja i elektropoliranja. Najveće smično zaostalo napreznje izmjereno je u točki 3 i iznosi -51 MPa.



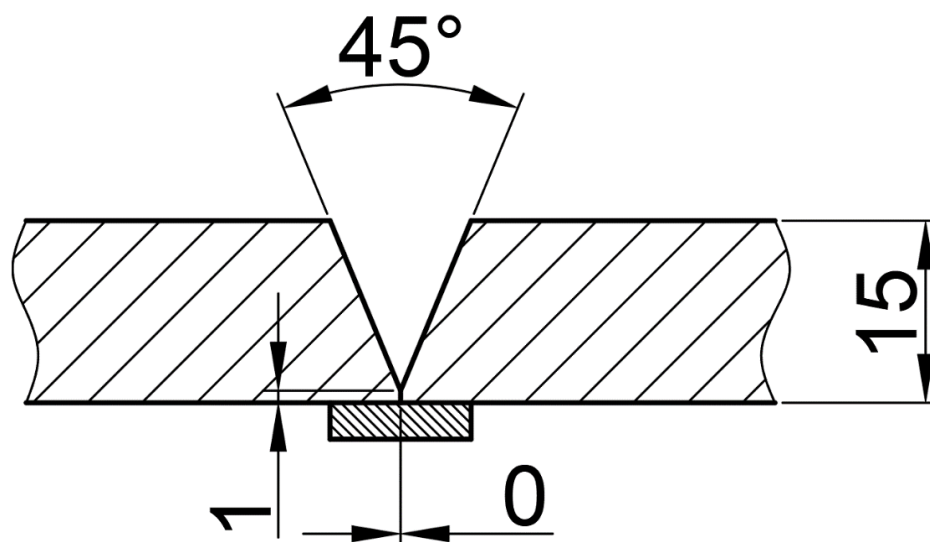
Slika 41. Raspodjela  $\tau_{xy}$  zaostalih napreznja u uzorku kutnog spoja nakon elektropoliranja

## 5.4. Mjerenje zaostalih naprezanja u uzorku sučeljenog spoja

U ovom poglavlju opisana je izrada uzorka sučeljenog spoja. Opisana je priprema spoja i navedeni su parametri zavarivanja te postupak pripreme površine i mjerenja zaostalih naprezanja. Dobiveni rezultati su analizirani i uspoređeni.

### 5.4.1. Priprema sučeljenog spoja

Drugi uzorak koji je zavaren za potrebe eksperimentalnog dijela je uzorak sučeljenog spoja. Korištena su dva lima od čelika S355 debljine 15 mm. Limovi su bili jednake duljine od 320 mm. Širina jednog lima je 150 mm, a drugog 140 mm. Napravljena je priprema V-spoja s kutom otvora žljeba od  $45^\circ$ . Visina grla je jedan milimetar bez razmaka u žljebu. Korištena je čelična podloga debljine tri milimetra. Na slici 42. prikazana je napravljena priprema spoja. Prije zavarivanja brusilicom je skinut sloj hrđe zatim oko žljeba površina očišćena etanolom.



Slika 42. Priprema sučeljenog spoja s podlogom [37]

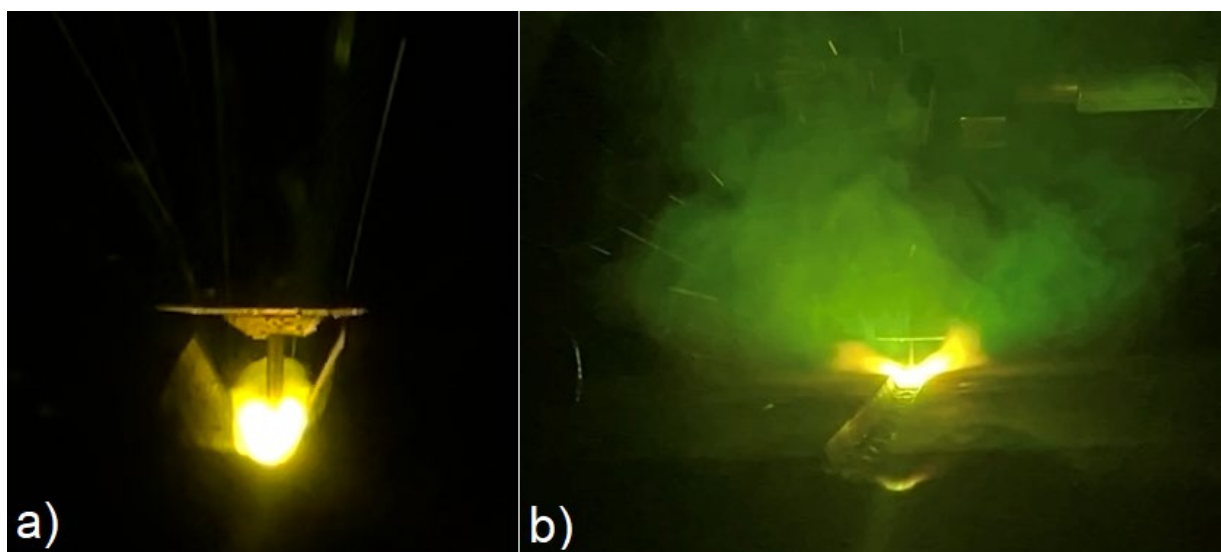
### 5.4.2. Parametri zavarivanja sučeljenog spoja

Sučeljeni zavareni spoj zavaren je MCAW postupkom. Zavar je napravljen u dva prolaza u PA položaju. Za zaštitni plin korištena je plinska mješavina Ferroline C12X2 proizvođača Messer. Način izrade spoja je mehanizirani pomoću traktora za zavarivanje. Tehnika rada je bila neutralna tj. nagib pištolja za zavarivanje je bio nula stupnjeva. Korištena je istosmjerna vrsta struje s taljivom elektrodom spojenom na pozitivan pol izvora struje. Ostatak parametara prikazan je u tablici 8. Stegnuti uzorak prije zavarivanja prikazan je na slici 43.

Slika 44. pod a) prikazuje uzorak tijekom zavarivanja prvog prolaza, a slika 44. pod b) prikazuje zavarivanje drugog prolaza.



Slika 43. Stegnuti uzorak sučeljenog spoja prije zavarivanja

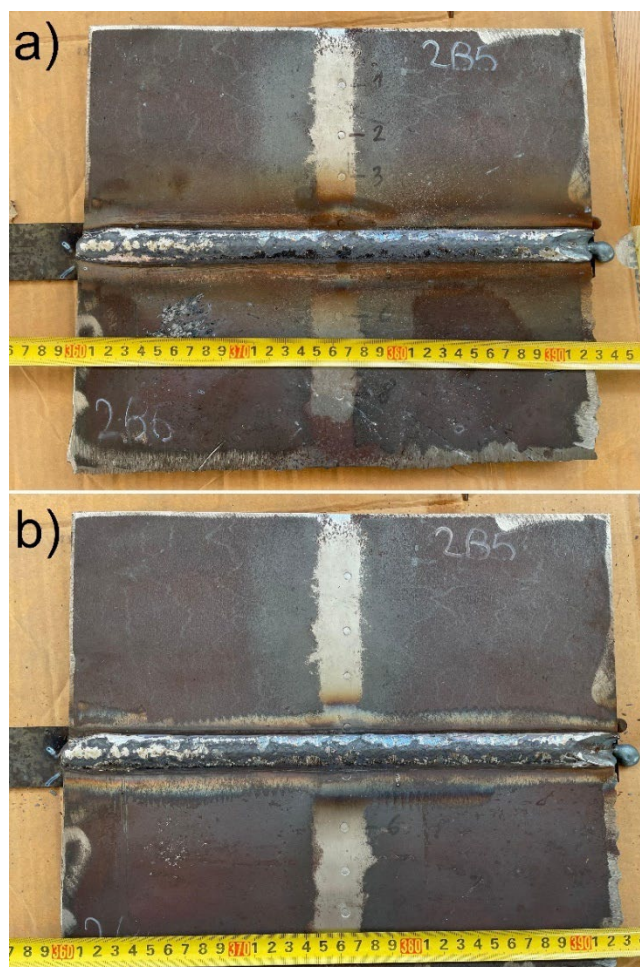


Slika 44. Zavarivanje sučeljenog spoja - prvi prolaz pod a) i drugi prolaz pod b)

Tablica 8. Parametri zavarivanja uzorka sučeljenog spoja

Broj prolaza	1.	2.
Stvarna jakost struje, A	270	362
Stvarni napon, V	28	31
Korekcija napona, V	+1,5	+5,0
Brzina zavarivanja, cm/min	65	22,5
Slobodan kraj žice, mm	10	20
Protok plina, l/min	20	20

Nakon zavarivanja zavar je iščetkan čeličnom žičanom četkom i očišćen etanolom. Zavar neposredno nakon zavarivanja je prikazan na slici 45. pod a), dok je na slici 45. pod b) prikazan zavar nakon čišćenja etanolom.



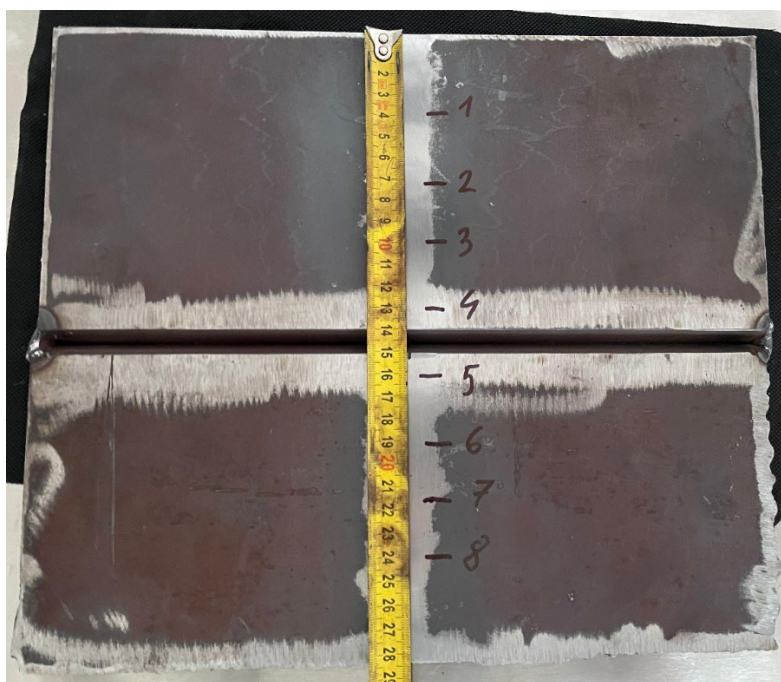
Slika 45. Sučeljeni spoj – pod a) nakon zavarivanja, pod b) nakon čišćenja etanolom

## 5.5. Mjerenje zaostalih napreznaja u uzorku sučeljenog spoja

Ukupno su izvedena četiri zasebna mjerenja zaostalih napreznaja u sučeljenom spoju u dva navrata. Prva dva mjerenja su izvedena prije zavarivanja, a druga dva nakon zavarivanja. U prvom i drugom navratu je prvo mjerena strojno i ručno brušena površina uzorka, a nakon toga elektropolirana površina.

### 5.5.1. Mjerenje zaostalih napreznaja prije zavarivanja – brušena površina

Površina uzorka prije zavarivanja bila je prekrivena slojem hrđe. Kako bi se omogućilo mjerenje hrđa je uklonjena strojnim brušenjem brusilicom. Zatim je površina ručno brušena korištenjem brusnog papira granulacije P180 i P600. Nakon brušenja površina je očišćena etanolom. Na uzorku je označeno osam točki u transverzalnoj ravnini u odnosu na žljeb. Najbliže sredini žljeba su točke 4 i 5 na udaljenosti 15 mm od sredine žljeba. Točke 3 i 6 su na udaljenosti 45 mm od sredine žljeba. Točke 2 i 7 su 70 mm od središta žljeba tj. približno na sredini od ruba lima i ruba žljeba. Točke 1 i 8 su na udaljenosti 100 mm od sredine žljeba tj. 40 mm od ruba lima. Točke mjerenja prikazane su na slici 46.



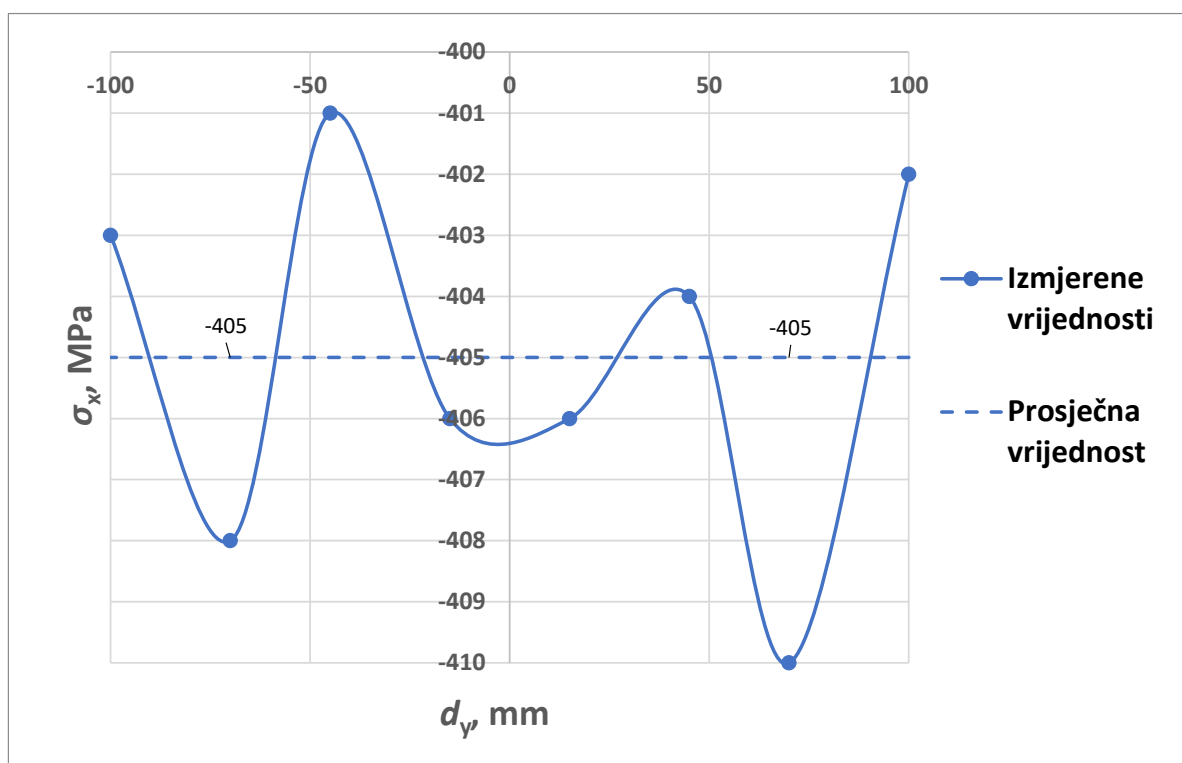
**Slika 46. Točke mjerenja zaostalih napreznaja na brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja**

Provedeno je mjerenje zaostalih napreznaja rendgenskom difrakcijom i dobiveni su rezultati navedeni u tablici 9. i grafički prikazani na slikama 47. i 48. Normalna napreznaja su tlačna i kreću se u rasponu od -401 MPa do -410 MPa. Tlačno napreznaje  $\sigma_x$  ujednačeno je po cijeloj mjerenoj površini. Izmjerena normalna napreznaja su približno iste vrijednosti i imaju malu devijaciju. Devijacije izmjerenih tlačnih napreznaja  $D_\sigma$  kreću se u rasponu od 4 do 7 MPa.

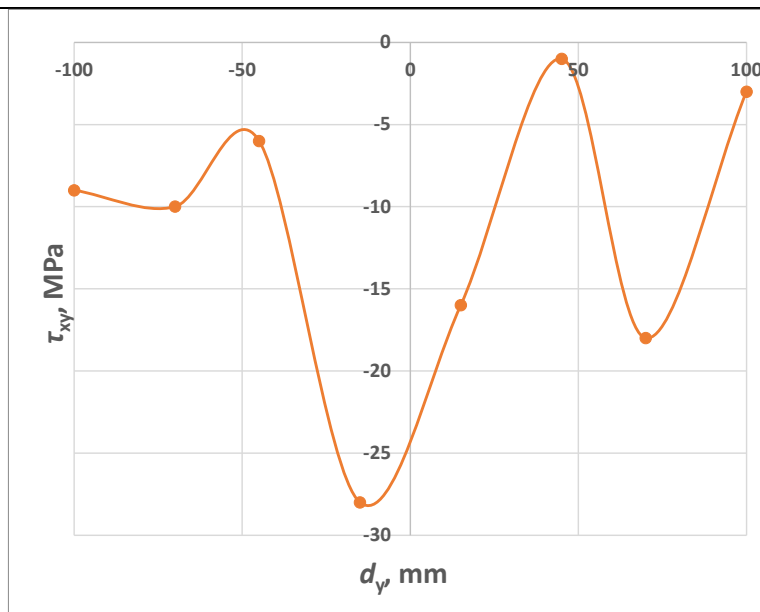
Raspodjela naprezanja je vrlo ujednačena pa se naprezanja mogu se svesti na prosječnu vrijednost u iznosu od -405 MPa. Površinsko tlačno zaostalo naprezanje nastalo je zbog uklanjanja hrđe brušenjem pomoću brusilice.

**Tablica 9. Izmjerena zaostala naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja**

Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_\sigma$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_\tau$ , MPa
1	100	-402	4	-3	5
2	70	-410	7	-18	3
3	45	-404	4	-1	4
4	15	-406	5	-16	5
5	-15	-406	4	-28	2
6	-45	-401	5	-6	5
7	-70	-408	7	-10	6
8	-100	-403	6	-9	5



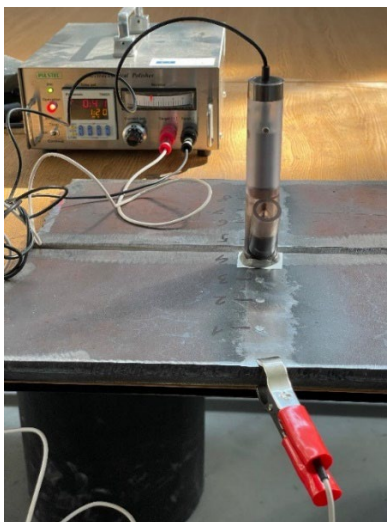
**Slika 47. Raspodjela  $\sigma_x$  naprezanja u brušenom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja**



Slika 48. Raspodjela  $\tau_{xy}$  naprezanja u brušenom uzorku sučelnog spoja prije zavarivanja

### 5.5.2. Mjerenje zaostalih naprezanja prije zavarivanja – elektropolirana površina

Nakon mjerenja zaostalih naprezanja na brušenoj površini utvrđeno je da su unesena tlačna naprezanja podjednako raspodijeljena po površini. Kako bi se utvrdila raspodjela zaostalih naprezanja koja nisu unesena brušenjem površina je elektropolirana. Elektropoliranjem se uklonio gornji stlačeni sloj materijala na istim točkama prethodnog mjerenja, slika 49.



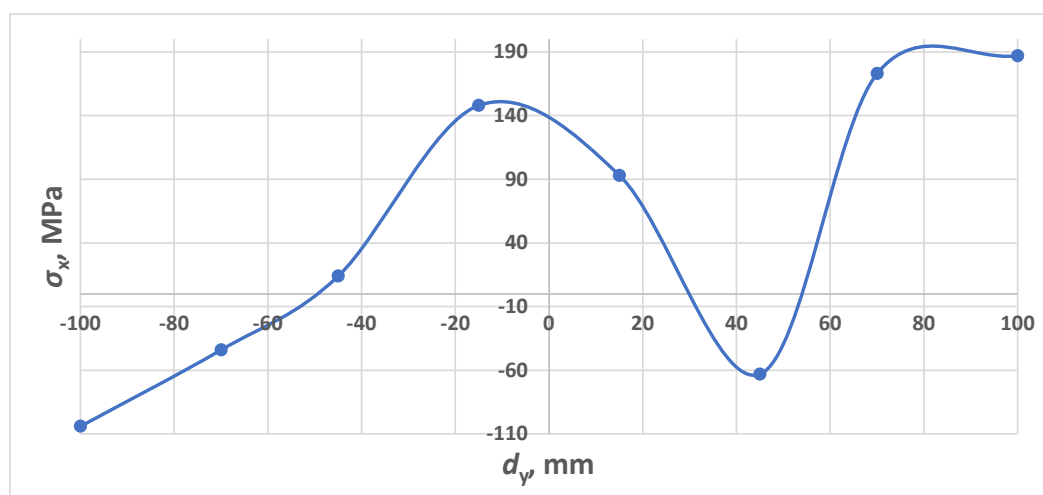
Slika 49. Elektropoliranje uzorka sučelnog spoja prije zavarivanja

Izmjerene vrijednosti zaostalih naprezanja (tablica 10.) ukazuju na nepravilnu raspodjelu zaostalih naprezanja. Normalna naprezanja  $\sigma_x$  su vlačna na jednoj strani žljeba od točke 1 do točke 2. U tim točkama su izmjerena najviša naprezanja u iznosu od 187 i 173 MPa. U točki 3

vlada tlačno naprezanje koje iznosi -63 MPa. U točkama najbližim žljebu označenim brojevima 4 i 5 ponovno raste iznos naprezanja koje se nalazi se u vlačnom području. Zatim na drugoj strani prema rubu lima naprezanje po iznosu pada i postaje tlačno. Smična naprezanja  $\tau_{xy}$  su manja i nešto ujednačenije raspodjele. Na jednoj strani žljeba u točkama od 1 do 4 prevladavaju smična naprezanja u pozitivnom smjeru. Na drugoj strani žljeba u točkama od 5 do 8 smična naprezanja usmjerena su u negativnom smjeru. Dijagrami izmjerenih iznosa s obzirom na udaljenost od sredine zavora  $d_y$  prikazani su na slikama 50. i 51. Na slici 50. se može jasno uočiti utjecaj elektropoliranja na izmjerene vrijednosti, što ukazuje na to da su tlačna naprezanja nastala uslijed brušenja te da djeluju samo u kristalnim zrnima blizu površine.

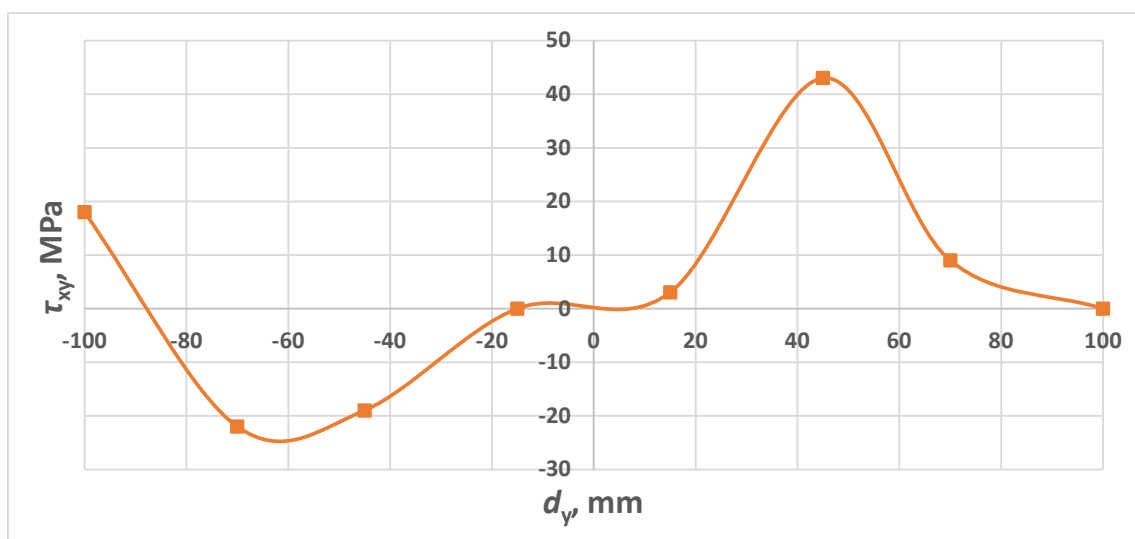
**Tablica 10. Izmjerena zaostala naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja**

Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_\sigma$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_\tau$ , MPa
1	100	187	40	0	26
2	70	173	30	9	28
3	45	-63	28	43	43
4	15	93	38	3	28
5	-15	148	19	0	30
6	-45	14	52	-19	31
7	-70	-44	28	-22	49
8	-100	-104	40	18	39



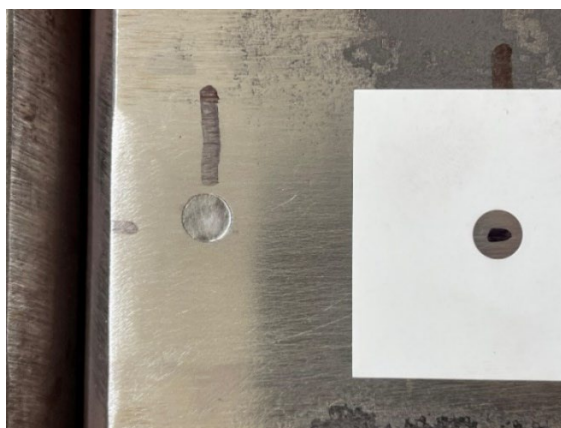
**Slika 50. Raspodjela  $\sigma_x$  naprezanja u elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja prije zavarivanja**





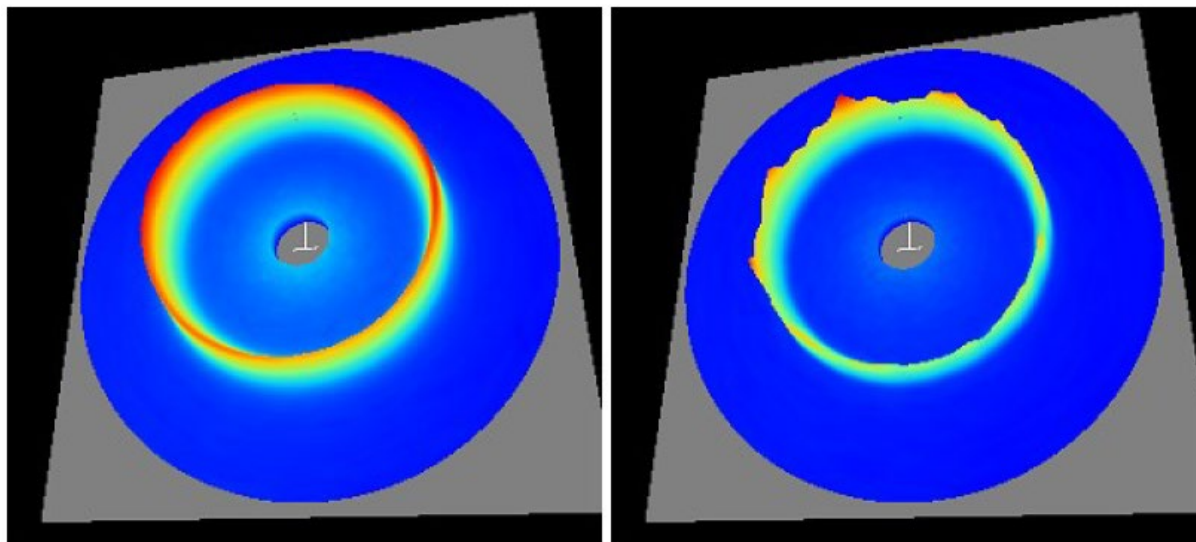
**Slika 51. Raspodjela  $\tau_{xy}$  naprezanja nakon elektropoliranja sučeljenog spoja prije zavarivanja**

Kod mjerenja zaostalih naprezanja na elektropoliranoj površini dobiveni su rezultati s većom devijacijom za normalna naprezanja  $D_\sigma$  u rasponu od 19 do 52 MPa. Devijacije smičnih naprezanja  $D_\tau$  kreću se u rasponu od 26 do 49 MPa. Kod brušene površine devijacija je i do deset puta manja nego kod elektropolirane površine. Hrapavija površina kod elektropoliranja je uzrok većih devijacija rezultata. Razlika između hrapavosti površina je ugrubo uspoređena dodiranjem, ali je i vidljiva kao što se može vidjeti na slici 52. Razlika je još vidljivija ako se usporedi izgled polirane površine i samo brušene površine koja je pripremljena za poliranje unutar rupe na naljepnici za elektropoliranje. Napravljeno je elektropoliranje s različitim jakostima struje i utvrđeno je da je najjača struja davala najgladju površinu, ali i dalje previše hrapavu za postizanje pouzdanijih rezultata. Iako su mjerenja bila nešto više nepouzdana dobio se uvid u raspodjelu zaostalih naprezanja ispod površine.



**Slika 52. Usporedba elektropolirane i brušene površine**

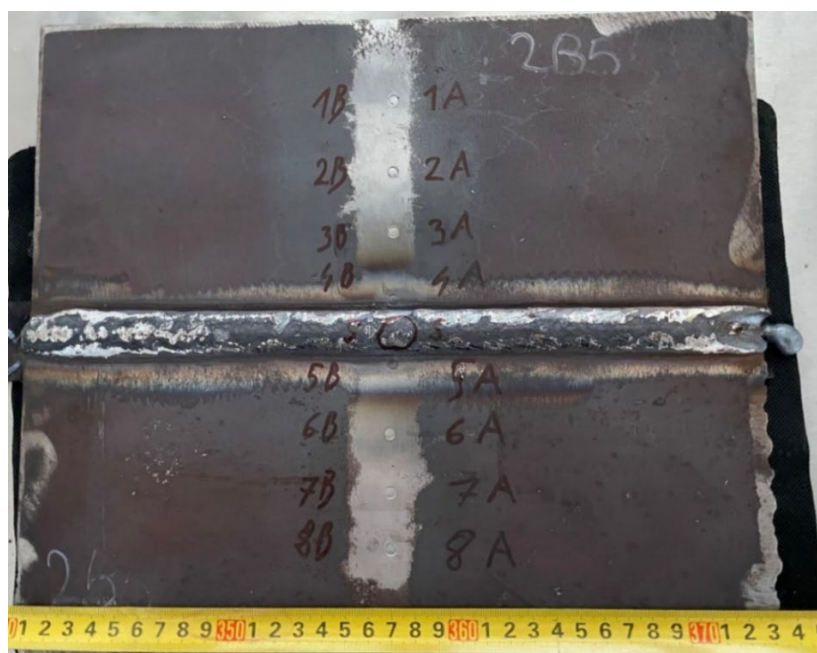
Na pregrubu površinu ukazivao je i izgled Debye-Scherrerovog prstena na kojem se vidi neujednačeni intenzitet difraktiranih rendgenskih zraka. Uzrok neujednačenog intenziteta rendgenskih zraka je zbog hrapave površine koja je raspršila rendgenske zrake zbog čega nisu jednoliko raspoređene na površini detektora. Debye-Scherrerovi prstenovi nakon brušenja i nakon elektropoliranja u točki 8B uzorka sučeljenog spoja prikazani su na slici 53.



Slika 53. Usporedba Debye-Scherrerovog prstena u istoj točki - lijevo brušena površina, desno elektropolirana površina

### 5.5.3. Mjerenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja – brušena površina

Nakon zavarivanja sučeljenog spoja prvo su izmjerena zaostala naprezanja na brušenoj površini koja je prije mjerenja očišćena etanolom. Mjerenja su provedena na točkama koje su raspoređene na istim udaljenostima od sredine spoja, samo su zamaknute u longitudinalnom smjeru od prethodnih točaka za oko sedam milimetara. Na slici 54. prikazane su točke korištene za mjerenje prije zavarivanja na desnoj strani označene su slovom „A“, dok su nove točke predviđene za mjerenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja označene slovom „B“. Tablica 11. prikazuje izmjerene vrijednosti zaostalih naprezanja na brušenoj površini. Za vrijednost normalnih naprezanja prije zavarivanja uzeta je prosječna vrijednost u iznosu od -405 MPa.



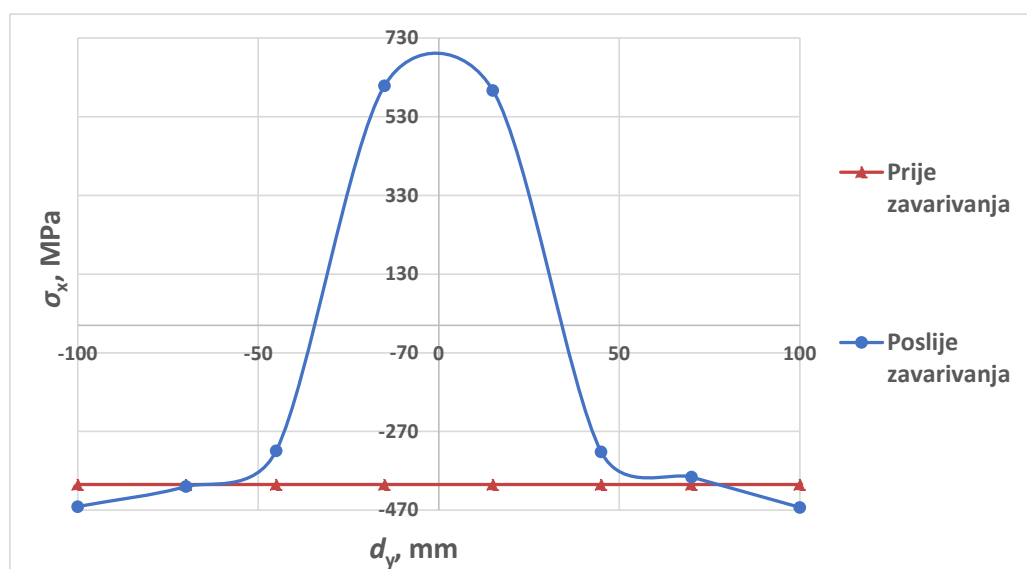
Slika 54. Točke mjerenja zaostalih napreznja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

Tablica 11. Izmjerena zaostala napreznja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_\sigma$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_\tau$ , MPa
1B	100	-463	4	-30	7
2B	70	-386	4	-33	5
3B	45	-322	4	-21	3
4B	15	597	3	-20	3
5B	-15	609	4	14	4
6B	-45	-319	7	14	6
7B	-70	-410	5	22	6
8B	-100	-461	5	-3	5

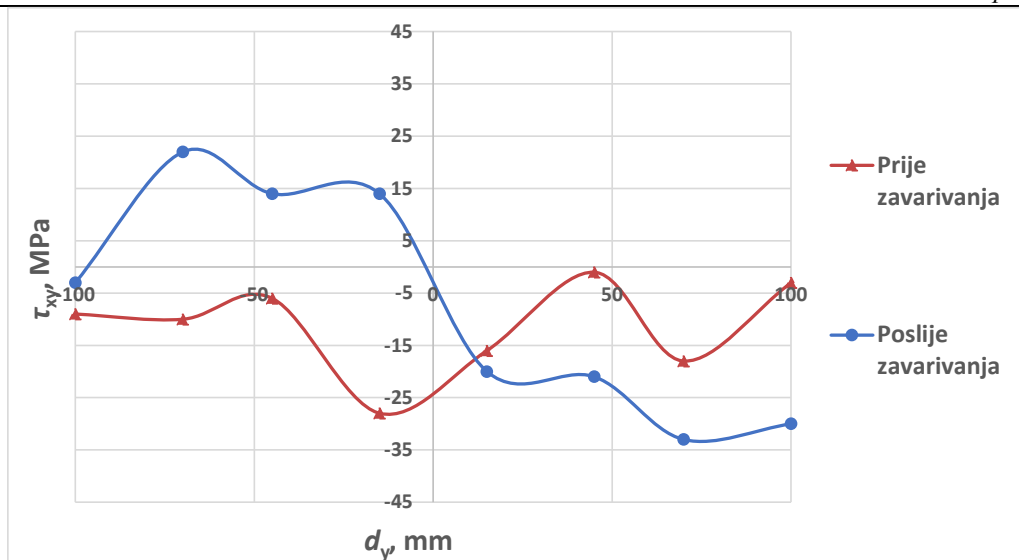
Prosječna vrijednost normalnih napreznja prije zavarivanja je prikazana na dijagramu na slici 55. Na slici 56. prikazana su izmjerena smična napreznja u svakoj točki. U obje slike napreznja prije zavarivanja su označena punom crvenom linijom. Izmjerene vrijednosti nakon zavarivanja prikazane su punom plavom linijom. Na slici 55. vidi se očekivana raspodjela zaostalih napreznja s vlačnim napreznjima uz sami zavar, a tlačna napreznja koja

prevladavaju dalje od zavara u osnovnom materijalu kao reakcija na materijal u zavaru koji se pokušava skupiti. U svim točkama osim onih najbližih zavaru označenih na uzorku kao 4B i 5B vlada vlačno naprezanje. Izmjerena su vlačna naprezanja oko 600 MPa što je skoro dvostruko veće od granice razvlačenja. Nakon elektropoliranja ponovno su mjerena zaostala naprezanja u istim točkama. U ostalim točkama izmjerena su tlačna naprezanja. Najjača tlačna naprezanja su na rubovima spoja i iznose oko -460 MPa. Na plavoj liniji može se vidjeti kako su naprezanja u točkama 3B i 6B i dalje tlačna, ali su manjeg intenziteta nego prije zavarivanja. U točkama 2B i 7B naprezanja su skoro jednake vrijednosti kao i prije zavarivanja. Naprezanja u točkama najudaljenijim od zavara su veća od početnog tlačnog naprezanja za oko 60 MPa. Devijacije vrijednosti normalnih naprezanja  $D_{\sigma}$  su male u iznosu od 3 do 7 MPa što omogućuje pouzdanu usporedbu zaostalih naprezanja prije i poslije zavarivanja.



Slika 55. Usporedba  $\sigma_x$  naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

Smična naprezanja nakon zavarivanja su nekoliko puta manja od normalnih naprezanja. Iz slike 56. vidljivo je da su smična naprezanja veća nakon zavarivanja u točkama označenim na uzorku od 1B do 4B. Na drugoj strani uzorka u točkama od 5B do 8B smična naprezanja su promijenila smjer i većeg su intenziteta. Devijacije izmjerenih vrijednosti smičnih naprezanja  $D_{\tau}$  su kao i kod normalnih naprezanja vrlo male. Vrijednosti devijacija smičnih naprezanja su u rasponu od 3 do 7 MPa.



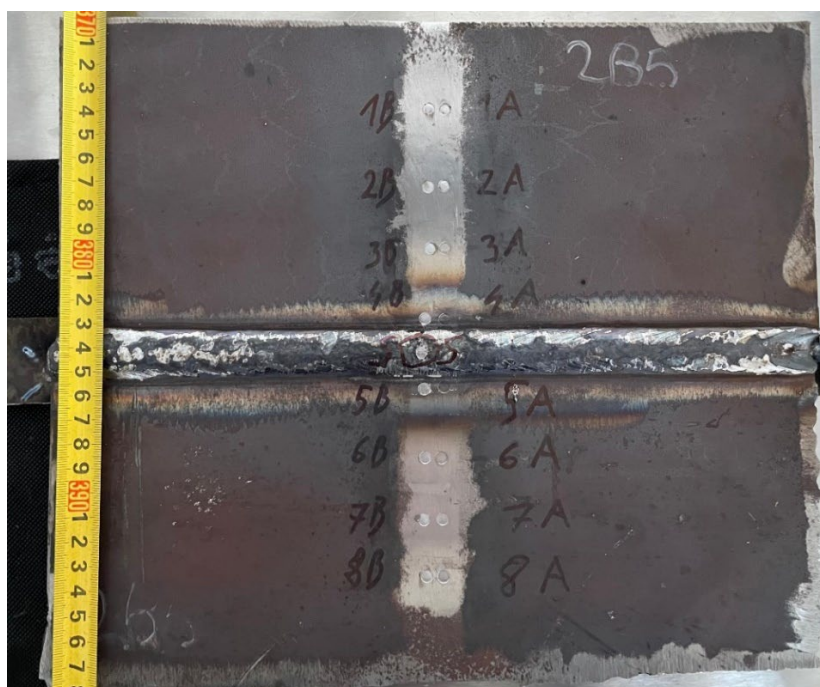
Slika 56. Usporedba  $\tau_{xy}$  naprezanja na brušenom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

#### 5.5.4. Mjerenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja – elektropolirana površina

Nakon mjerenja zaostalih naprezanja na brušenoj površini izmjerena su i na elektropoliranoj površini. Elektropoliranje uzorka je prikazano na slici 57. Elektropoliralo se kako bi se dobio uvid u raspodjelu naprezanja ispod brušene površine. Prethodno elektropolirana mjesta uz zavar bila su kontaminirana tijekom zavarivanja zbog čega je ponovo provedeno elektropoliranje. Elektropolirano je na istim točkama označenim slovom „B“ gdje su mjerena zaostala naprezanja na brušenoj površini nakon zavarivanja. Elektropolirana je i dodatna točka označena slovom „S“ na samom nadvišenju zavara, slika 58. Nakon elektropoliranja površina je očišćena etanolom.



Slika 57. Elektropoliranje nadvišenja zavara



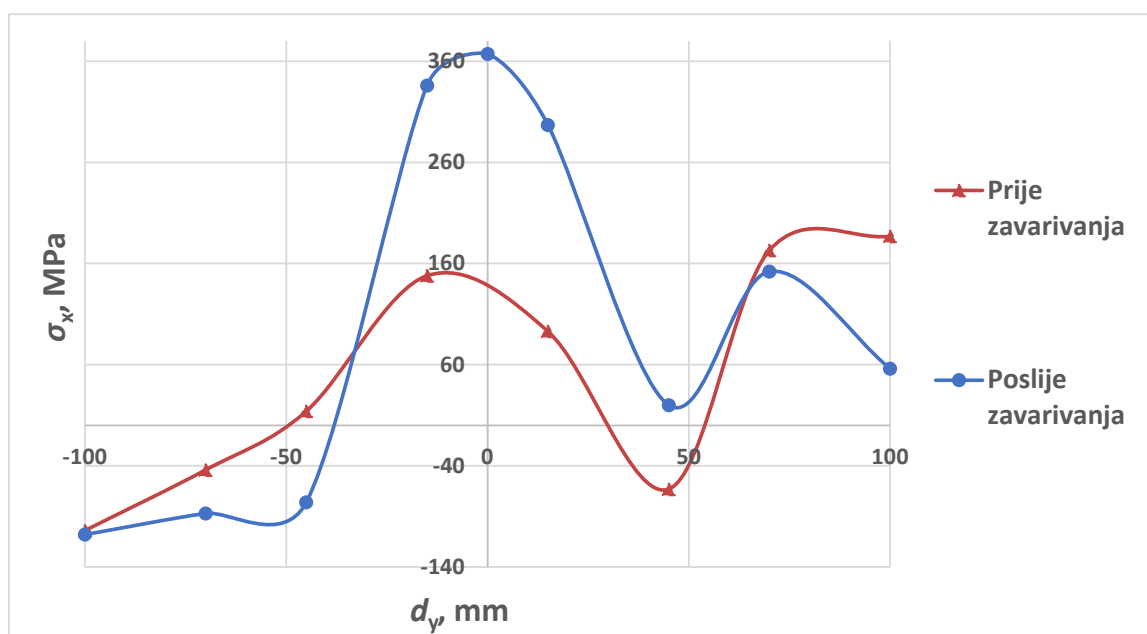
**Slika 58.** Točke mjerenja zaostalih naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja izmjerenih na elektropoliranim točkama navedeni su u tablici 12.

**Tablica 12.** Izmjerena zaostala naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

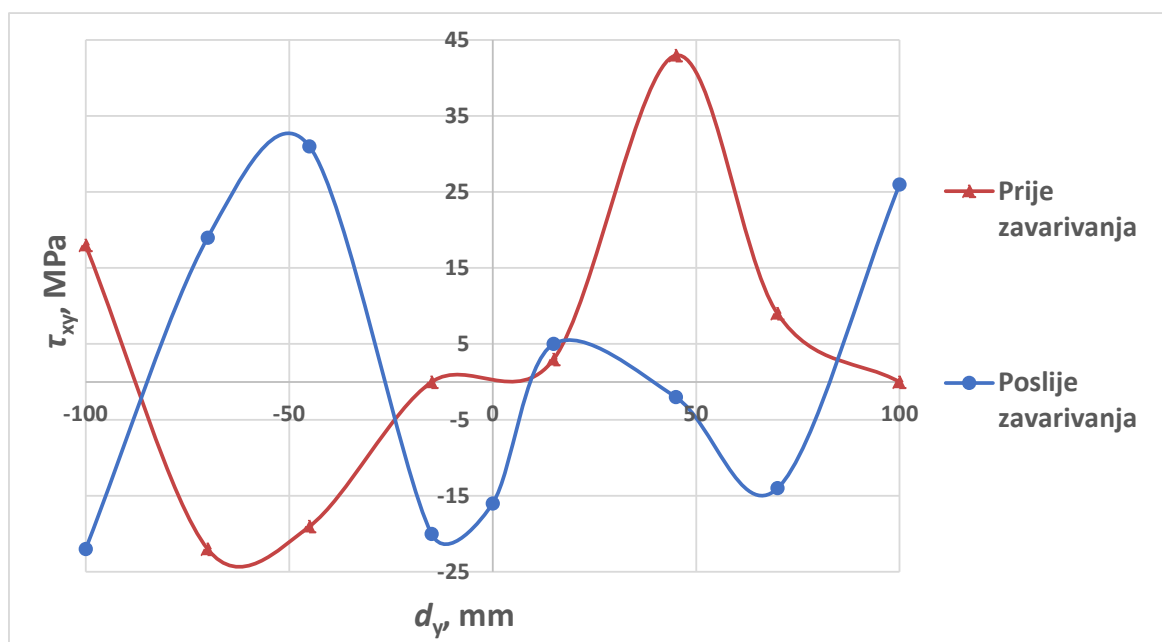
Red. br.	$d_y$ , mm	$\sigma_x$ , MPa	$D_\sigma$ , MPa	$\tau_{xy}$ , MPa	$D_\tau$ , MPa
1B	100	56	33	26	34
2B	70	152	44	-14	33
3B	45	20	33	-2	23
4B	15	297	47	5	35
S	0	367	37	-16	17
5B	-15	336	31	-20	31
6B	-45	-76	38	31	37
7B	-70	-87	47	19	22
8B	-100	-108	42	-22	33

Zaostala naprezanja nakon zavarivanja i elektropoliranja koja se nalaze ispod površine pokazuju da su najveća vlačna naprezanja u zavaru te uz sami zavar. Najveća vlačna naprezanja su očekivana na tim mjestima jer se metal zavara nije uspio do kraja skupiti zbog čega u njemu vlada vlačno naprezanje. Najveće vlačno naprezanje iznosi 367 MPa. U rubnim točkama 1B i 2B također je izmjereno vlačno naprezanje koje je manjeg iznosa nego prije zavarivanja. Vlačna naprezanja u tim točkama mogu se smatrati posljedicom zaostalih naprezanja nastalih tijekom proizvodnje osnovnog materijala s obzirom da su na tim mjestima i prije zavarivanja zaostala naprezanja bila vlačna. U točkama na drugoj strani od 6B do 8B su sva naprezanja tlačna osim u točki 5B uz zavar gdje vlada vlačno naprezanje, što je očekivano za sučeljeni zavareni spoj. Kod mjerenja na elektropoliranoj površini je kao i prije zavarivanja devijacija veća nego na brušenoj površini. Devijacija normalnih naprezanja  $D_{\sigma}$  iznosi od 31 do 47 MPa.



Slika 59. Usporedba  $\sigma_x$  naprezanja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja

Smična naprezanja nakon zavarivanja imaju najvišu izmjerenu vrijednost u točki označenoj sa 6B koje iznosi 31 MPa. Izmjerene vrijednosti smičnih naprezanja su kao i u prethodnim mjerenjima očekivano puno manja od normalnih naprezanja. Također se može uočiti kako su skoro sva izmjerena smična naprezanja promijenila smjer djelovanja nakon zavarivanja.



Slika 60. Usporedba  $\tau_{xy}$  napreznja na elektropoliranom uzorku sučeljenog spoja nakon zavarivanja



## 6. ZAKLJUČAK

Zaostala naprezanja su neizbježna pojava koja nastaje tijekom zavarivanja i drugih tehnoloških procesa kod kojih dolazi do neravnomjernog unosa topline. Ona mogu utjecati na nosivost, radni vijek i dimenzijsku stabilnost. Pogotovo kod zavarenih spojeva gdje u materijalu zavara nastaju vlačna zaostala naprezanja. Vlačna zaostala naprezanja doprinose inicijaciji i propagaciji pukotina koje mogu utjecati na konačni radni vijek zavarene konstrukcije. Zaostala naprezanja mogu se umanjiti pažljivim planiranjem izvedbe zavarivanja i odabirom parametara zavarivanja. Na intenzitet zaostalih naprezanja utječu svojstva materijala koji se zavaruje, unos topline te vrsta pripreme spoja i broj prolaza. MAG postupak zavarivanja je jedan od najčešće korištenih postupaka za zavarivanje konstrukcijskih čelika zbog svoje jednostavnosti, velike mogućnosti podešavanja parametara i odlične produktivnosti. MAG postupak ima razne varijacije kao što je MCAW postupak. MCAW postupkom se postiže još bolja produktivnost postupka zbog manje potrebe za čišćenjem spoja i manjim brojem prolaza zbog većeg depozita materijala. Kod MCAW postupka kao i kod ostalih elektrolučnih postupaka dolazi do nastanka zaostalih naprezanja. Tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela izmjerena su zaostala naprezanja u spojevima zavarenim MCAW postupkom za dvije različite pripreme spoja, na kutnom i sučeljenom spoju. Postoje razne metode mjerenja zaostalih naprezanja od razornih, polurazornih do nerazornih. Jedna od češće korištenih nerazornih metoda je metoda rendgenske difrakcije. Postoji više metoda rendgenske difrakcije od kojih  $\cos \alpha$  metoda pruža mogućnost prikupljanja podataka iz cijelog Debye-Scherrerovog prstena u jednom mjerenju. Tijekom mjerenja rendgenskom difrakcijom često se koristi elektropoliranje zbog male dubine prodiranja rendgenskih zraka u materijal. Elektropoliranje omogućuje uklanjanje materijala bez unošenja dodatnih zaostalih naprezanja za razliku od uklanjanja materijala obradom odvajanjem čestica. Uklanjanjem materijala elektropoliranjem omogućuje utvrđivanje raspodjele naprezanja ispod površine pod uvjetom da se ispravnom primjenom elektropoliranja postigne mala hrapavost površine. Veća hrapavost površine smanjuje pouzdanost metode mjerenja rendgenskom difrakcijom. Manja devijacija rezultata, tj. veća pouzdanost metode mjerenja postignuta je na strojno i ručno brušenoj površini. Elektropoliranjem površine nije postignuta toliko mala hrapavost površine kao nakon brušenja. Tekstura elektropolirane površine uzrokovala je smanjenje pouzdanosti izmjerenih vrijednosti. U eksperimentalnom dijelu rada izmjerene vrijednosti zaostalih naprezanja nakon zavarivanja u uzorku kutnog spoja pokazale su da je došlo do očekivane raspodjele zaostalih naprezanja na brušenoj površini. Na donjoj površini ispod zavara izmjerena su vlačna, a u osnovnom materijalu nešto dalje od zavara

tlačna longitudinalna naprezanja. Na elektropoliranoj površini izmjerena su tlačna naprezanja, ali zbog velike devijacije uzrokovane velikom hrapavošću površine nakon elektropoliranja moguće je da je raspodjela naprezanja bila znatno drugačija od izmjerene. Smična naprezanja u kutnom spoju su imala i na brušenoj i na elektropoliranoj površini malo manji intenzitet u usporedbi s normalnim naprezanjima. U sučeljenom spoju izmjerena su zaostala naprezanja prije i poslije zavarivanja na brušenoj i elektropoliranoj površini. Na brušenoj površini prije zavarivanja utvrđeno je da je prisutna jednolika raspodjela tlačnih naprezanja nastala uslijed brušenja površine. Nakon zavarivanja na brušenoj površini dobiven je očekivani oblik krivulje s vlačnim naprezanjima uz zavar, a što je udaljenost od zavara bila veća to je postupno bio veći intenzitet tlačnih naprezanja. Smična naprezanja nakon zavarivanja su bila nekoliko puta manja od normalnih naprezanja, ali je došlo do povećanja njihovog intenziteta u većini točaka mjerenja. Izmjerena vrijednost vlačnog zaostalog naprezanja na elektropoliranoj površini nadvišena zavara iznosi 367 MPa što je manje od granice razvlačenja dodatnog materijala koja iznosi 480 MPa. Tlačna zaostala naprezanja također su se povećala nakon zavarivanja, a određena vlačna naprezanja na rubu uzorka su se smanjila u odnosu na naprezanja izmjerena prije zavarivanja. Može se utvrditi da je došlo do očekivanog utjecaja zavarivanja na raspodjelu normalnih zaostalih naprezanja. Smična naprezanja su na elektropoliranoj površini po intenzitetu kao i na brušenoj površini bila manja nekoliko puta od normalnih zaostalih naprezanja. Za dodatno smanjenje zaostalih naprezanja tijekom MCAW zavarivanja preporuča se predgrijavanje koje u eksperimentalnom dijelu nije provedeno. Predgrijavanjem bi se smanjio gradijent temperature u zavaru tj. smanjile bi se razlike u toplinskom istežanju što bi rezultiralo manjim zaostalim naprezanjima.

**LITERATURA**

- [1] Perić M., Garašić I., Štefok M., Osman K., Čikić A., Tonković Z.: Metal-Cored Arc Welding of I-Profile Structure: Numerical Calculation and Experimental Measurement of Residual Stresses, MDPI Open Access Journals, 2023.
- [2] Delbergue D., Texier D., Levesque M., Bocher P.: Comparison of Two X-Ray Residual Stress Measurement Methods:  $\sin^2 \psi$  and  $\cos \alpha$ , Through the Determination of a Martensitic Steel X-Ray Elastic Constant, Interational Conference on Residual Stresses, Sydney, 2016.
- [3] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarivanje i montaža“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [4] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Priručnik Zavarivački i srodni postupci, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] Lincoln Electric: Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection  
[https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWire-s-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWire-s-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf)  
(Pristupljeno: 26.10.2023.)
- [6] Praxiar: Shielding Gases Selection Manual  
[https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure\\_vessels/Shielding\\_Gas\\_Manual.pdf](https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure_vessels/Shielding_Gas_Manual.pdf)  
(Pristupljeno: 27.10.2023.)
- [7] O'Brien A.: Welding Handbook Welding Processes Part 1  
American Welding Society, Miami, 2004.
- [8] Kumar S.: Metal Cored Welding, Material Welding, 2023.  
<https://www.materialwelding.com/metal-cored-welding-vs-flux-cored/>  
(Pristupljeno: 27.10.2023.)
- [9] ESAB: Dodatni materijal Dual Shield Prime 81Ni1 H4  
[https://esab.com/hr/eur\\_en/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/gas-shielded-flux-cored-wires-fcaw-mcaw/dual-shield-prime-81ni1m-h4/](https://esab.com/hr/eur_en/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/gas-shielded-flux-cored-wires-fcaw-mcaw/dual-shield-prime-81ni1m-h4/)  
(Pristupljeno: 27.10.2023.)
- [10] BOC: Smootharc Advance II MIG 200C  
<https://images.tgaabrasives.co.nz/wp-content/uploads/20200916145249/User-Guide-ADVANCE-II-200C-250C.pdf>  
(Pristupljeno: 27.10.2023.)

- [11] Lakota I., Bregant M., Šolar M.: Zavarivanje žicama koje su punjene metalnim prahom, 4. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje - Tehnologična primjena postupaka zavarivanja i zavarivanju srodnih tehnika u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda, Slavonski Brod, 2007.
- [12] Welding Engineers: Metal Cored Wires vs Solid Wire  
[https://weldingengineers.co.nz/wp-content/uploads/2023/06/Metal\\_Cored\\_Wires\\_vs\\_Solid\\_Wire.pdf](https://weldingengineers.co.nz/wp-content/uploads/2023/06/Metal_Cored_Wires_vs_Solid_Wire.pdf)  
(Pristupljeno: 27.10.2023.)
- [13] Bauer, B.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zaostala naprezanja i deformacije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [15] Parmar R. S.: Welding Engineering and Technology, Khanna publishers, Delhi, 2005.
- [16] Vrancken B., Wauthle R., Kruth J.-P., Van Humbeeck: Study of the Influence of Material Properties on Residual Stress in Selective Laser Melting, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Leuven, 2013.
- [17] Landek D.: Podloge za predavanja i vježbe „Proizvodni postupci – toplinska obrada“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [18] Vibratory Stress Relief  
<https://www.superiordieset.com/press/vibratory-stress-relief/>  
(Pristupljeno: 05.11.2023.)
- [19] Duspara M., Mijušković G., Kopač J., Pavić M., Stoić A.: Popuštanje zaostalih naprezanja metodom vibracija, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2011.
- [20] Veqter: Residual Stress Measurement  
<https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement>  
(Pristupljeno: 05.11.2023.)
- [21] Milković M., Gubeljak N., Vuherer T.: Usporedba dviju metoda za mjerenje zaostalih naprezanja u zavarima, Sveučilište u Mariboru, Fakultet za strojarstvo, Maribor, 2019.
- [22] Rossini N. S., Dassisti M., Benyounis K. Y., Olabi A. G.: Methods of Measuring Residual Stresses in Components, Mechanical and Management Engineering Department, Politecnico di Bari, Bari, 2012.
- [23] Markučić, D.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.

- [24] Stresstech, Stresstech Bulletin 12: Measurement Methods of Residual Stresses  
<https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testing-methods/>  
(Pristupljeno: 07.11.2023.)
- [25] Edukatorij: Ogib svjetlosti  
<https://edukatorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edukatorij/api/proxy-guest/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/ogib-svjetlosti.html>  
(Pristupljeno: 07.11.2023.)
- [26] Fitzpatrick M. E., Fry A. T., Holdway P.: Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction - Issue 2, National Physical Laboratory, London, 2005.
- [27] Luo Q., Yang S.: Uncertainty of the X-ray Diffraction (XRD)  $\sin^2 \psi$  Technique in Measuring Residual Stresses of Physical Vapor Deposition (PVD) Hard Coatings, Mechanical Behavior of Coatings and Engineered Surfaces, 2017.
- [28] Speakman S. A.: Basics of X-Ray Powder Diffraction  
<http://prism.mit.edu/xray/Basics%20of%20X-Ray%20Powder%20Diffraction.pdf>  
(Pristupljeno: 07.11.2023.)
- [29] Tanaka K.: The  $\cos \alpha$  method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector
- [30] Kopeliovich Dmitri: Electropolishing  
<https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electropolishing>  
(Pristupljeno: 08.11.2023.)
- [31] Gadalińska E., Wronicz W.: Electropolishing Procedure Dedicated to In-Depth Stress Measurements with X-Ray Diffractometry, Fatigue of Aircraft Structures, Varšava, 2016.
- [32] Bug-O Systems MDS-1002 traktor za zavarivanje  
[https://bugo.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/09/MDS\\_Bro\\_03\\_19.pdf](https://bugo.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/09/MDS_Bro_03_19.pdf)  
(Pristupljeno: 11.11.2023.)
- [33] Multi Metals: BS EN 10025-2 Grade S355 Structural Steel Plate  
<https://www.multimetalsindia.com/bs-en10025-s355-structural-steel-plate.html>  
(Pristupljeno: 11.11.2023.)
- [34] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema, Zagreb, 2009.
- [35] Elektroda Zagreb: Dodatni materijal KX – 706M  
<https://www.ezg.hr/download/prod/097%20KX-706M.pdf>  
(Pristupljeno: 11.11.2023.)

[36] Messer: Zaštitni plin Ferroline C12X2

<https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje>

(Pristupljeno: 11.11.2023.)

[37] Autodesk AutoCAD LT 2024

[38] Pulstec:  $\mu$ -X360s Portable X-ray Residual Stress Analyzer

<https://www.pulstec.net/products/xrd-residual-stress-analyzer/>

(Pristupljeno: 13.11.2023.)

[39] KUKA: Agilus KR 4

<https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-4-agilus>

(Pristupljeno: 13.11.2023.)