

Analiza zaostalih naprežanja pri zavarivanju čelika S355J2+N MCAW postupkom u zaštiti plina C6X1 i C12X2

Novina, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:310307>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Novina

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Tomislav Novina

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i pružanju pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu mag. ing. Mislavu Štefoku na pruženoj pomoći prilikom odrađivanja eksperimentalnog dijela rada.

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

Zahvaljujem se svojoj obitelji, zaručnici i prijateljima na podršci tijekom studija.

Tomislav Novina



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 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Novina**

JMBAG: 0035224801

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza zaostalih naprezanja pri zavarivanju čelika S355J2+N MCAW postupkom u zaštiti plina C6X1 i C12X2**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of residual stress during welding of S355J2+N steel with MCAW process using C6X1 and C12X2 shielding gases**

Opis zadatka:

Primjena metalnim prahom punjene žice (eng. MCAW) sve je više u primjeni zbog povećane produktivnosti i stabilnog prijenosa metala u električnom luku. Stoga, važno je analizirati i ostale posljedice primjene MCAW postupka pri zavarivanju konstrukcijskih čelika kvalitete S355J2+N. U uvodnom dijelu, detaljno opisati specifičnosti MCAW postupka zavarivanja, te usporediti s konvencionalnim MAG zavarivanjem punom žicom. Posebno obraditi područje zaštitnih plinova i kombinacija argona, ugljičnog dioksida i kisika.

U eksperimentalnom dijelu za zavarene spojeve s više kombinacija parametara i vrsti zaštitnog plina (C6X1 i C12X2) provesti ispitivanje zaostalih naprezanja XRD metodom na T-konfiguraciji zavarenog kutnog spoja za više različitih debljina. Na temelju makroizbrusaka odrediti stupanj miješanja i povezati s rezultatima mjerenja zaostalih naprezanja. Zaključno, odrediti utjecaj unosa topline i vrste zaštitne plinske mješavine na iznos i distribuciju zaostalih naprezanja, te mogući utjecaj na eksploatacijske značajke zavarene čelične konstrukcije.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

26. rujna 2024.

28. studeni 2024.

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. MIG/MAG ZAVARIVANJE	2
2.1. Oprema za MIG/MAG zavarivanje.....	2
2.2. Načini prijenosa metala.....	4
2.3. Tehnika rada.....	5
3. MCAW ZAVARIVANJE.....	6
3.1. Prednosti MCAW zavarivanja	6
3.2. Postupak proizvodnje metalnim prahom punjene žice	6
4. ZAŠTITINI PLINOVI.....	10
4.1. Inertni plinovi.....	11
4.2. Aktivni plinovi	12
4.3. Plinske mješavine.....	14
4.3.1. Dvokomponentne plinske mješavine	14
4.3.2. Trokomponentne mješavine.....	15
5. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA.....	18
5.1. Podjela i nastanak zaostalih naprezanja	18
5.2. Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih naprezanja	22
5.3. Utjecaj zaostalih naprezanja na zavarene konstrukcije.....	24
5.3.1. Deformacije u zavarenim konstrukcijama	25
5.4. Redukcija i uklanjanje zaostalih naprezanja	26
5.4.1. Broj prolaza i raspored zavara	27
5.4.2. Prednamještanje i prednaprezanje.....	27
5.4.3. Predgrijavanje	28
5.4.4. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja	28
5.4.5. Redukcija zaostalih naprezanja vibracijom	29
6. METODE MJERENJA ZAOSTALIH NAPREZANJA	30
6.1. Rendgenska difrakcija.....	31
6.2. Metode mjerenja rendgenskom difrakcijom	34
6.2.1. Metoda $\sin^2 \psi$	34
6.2.2. Metoda $\cos \alpha$	37
6.2.3. Prednosti $\cos \alpha$ metode	37
6.2.4. Pouzdanost mjerenja $\cos \alpha$ metodom.....	38

6.2.5.	Problematika prilikom mjerenja rendgenskom difrakcijom	39
6.2.6.	Utjecajni faktori kod mjerenja rendgenskom difrakcijom	40
6.2.6.1.	Početa priprema uzorka.....	41
6.2.6.2.	Sastav i homogenost uzorka.....	41
6.2.6.3.	Veličina zrna	41
6.2.6.4.	Veličina i oblik uzorka	42
6.2.6.5.	Hrapavost površine	42
6.2.6.6.	Temperatura	42
7.	EKSPERIMENTALNI DIO	43
7.1.	Oprema za zavarivanje	43
7.2.	Osnovni materijal	45
7.3.	Dodatni materijal.....	46
7.4.	Zaštitna atmosfera	47
7.5.	Proces zavarivanja.....	48
7.5.1.	Priprema kutnog spoja	48
7.5.2.	Parametri zavarivanja.....	48
7.6.	Mjerenje zaostalih naprezanja.....	51
7.6.1.	Uzorak 1F5.....	53
7.6.2.	Uzorak 2F5.....	56
7.6.3.	Usporedba zaostalih naprezanja uzoraka 1F5 i 2F5.....	59
7.6.4.	Uzorcima 2F1 i 1F1	60
7.6.4.1.	Usporedba točaka mjerenja uzorka 2F1 i 2F5	62
7.7.	Makroanaliza.....	63
8.	ZAKLJUČAK.....	69
	LITERATURA.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [2]	2
Slika 2. Načini prijenosa metala: a) kratkim spojevima, b) mješovitim lukom, c) štrcajućim lukom, d) impulsnim strujama [3]	4
Slika 3. Tehnike zavarivanja i profil zavara [2]	5
Slika 4. Postupak proizvodnje šavnih metalnim prahom punjenih žica [7]	7
Slika 5. Usporedni prikaz proizvodnje šavne i bešavne metalnim prahom punjene žice [8].....	7
Slika 6. Presjeci prahom punjenih žica: a) šavna s preklomom, b) šavna bez preklopa, c) bešavna [6]	8
Slika 7. Usporedba depozita postupaka MCAW, FCAW i MIG/MAG [9]	8
Slika 8. Usporedba oblika profila prilikom zavarivanja a) punom žicom, b) metalnim prahom punjenom žicom [6].....	9
Slika 9. Prikaz toplinske provodnosti različitih vrsta zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [2]	10
Slika 10. Profili penetracije za navedene zaštitne plinove [13]	12
Slika 11. Usporedba profila penetracije Ar, CO ₂ i mješavine Ar/CO ₂ 82/18 [10].....	12
Slika 12. Utjecaj CO ₂ i O ₂ na mješavine s Ar na profil zavara kod kutnih spojeva [19].....	16
Slika 13. Longitudinalno i transverzalno naprezanje u sučeljenom zavaru [21]	19
Slika 14. Pojednostavljeni model nastanka zaostalih napreznja [20].....	20
Slika 15. a) Prikaz tijeka zavarivanja, b) longitudinalna zaostala napreznja, c) temperatura [22]	21
Slika 16. Prikaz pojedinih redoslijeda zavarivanja i njihov utjecaj na intenzitet zaostalih napreznja u zavarenom spoju [25].....	23
Slika 17. Utjecaj vlačnih opterećenja na longitudinalna zaostala napreznja u sučeljeno zavarenom spoju [26]	24
Slika 18. Vrste deformacija tijekom i nakon zavarivanja [20].....	26
Slika 19. Prednamještanje i prednapreznje ranog komada [26]	27
Slika 20. 9-t dijagram žarenja za redukciju zaostalih napreznja [27].....	28
Slika 21. Podjela metoda mjerenja zaostalih napreznja [30].....	30
Slika 22. Braggov zakon [33].....	32
Slika 23. Shema uzorka u ravninskom stanju napreznja s prikazom različitih orijentacija kristalnih ravnina [32]	33
Slika 24. Shematski prikaz $\sin^2 \psi$ metode [36]	35
Slika 25. Primjer $\sin^2 \psi$, d dijagrama za pojedina napreznja [31].....	36
Slika 26. Dijagram $\sin^2 \psi$, d : a) nejednolike deformacije, b) usmjerena mikrostruktura [32].	36
Slika 27. Shematski prikaz $\cos \alpha$ metode [37]	37
Slika 28. Dijagram usporedbe pouzdanosti izmjerenih vrijednosti rendgenske difrakcije s metodama bušenja provrta [32].....	39
Slika 29. Utjecaj uniformnih i neuniformnih deformacija na položaj i širinu difrakcijskog vrha [38]	40
Slika 30. Daihen Varstroj, WB – P500L [39]	43
Slika 31. Traktor za automatizirano zavarivanje „BUG – O MDS 1002“	44
Slika 32. Karakteristike metalnim prahom punjene žice KX - 706M [42]	46
Slika 33. Boce korištenih plinskih mješavina C6 X1 i C12 X2	47
Slika 34. Pripreme kutnih spojeva.....	48
Slika 35. Uzorak 1F5 - izgled zavara	49
Slika 36. Uzorak 1F5 - profil zavara	50
Slika 37. Uzorak 1F5 - površina mjerenja zaostalih napreznja	50
Slika 38. Uzorak 1F1 - označene točke mjerenja	51

Slika 39. Uređaj za mjerenje zaostalih naprežanja Pulstec μ -X360s	52
Slika 40. Dijagram raspodjele naprežanja na poprečnoj liniji - uzorak 1F5	54
Slika 41. Dijagram raspodjele naprežanja na uzdužnoj liniji - uzorak 1F5	54
Slika 42. Dijagram raspodjele tangencijalnih naprežanja - uzorak 1F5.....	55
Slika 43. Prikaz Debye-Scherrerovog prstena za točke 10 i T5	55
Slika 44. Dijagram raspodjele naprežanja na poprečnoj liniji - uzorak 2F5	57
Slika 45. Dijagram raspodjele naprežanja na uzdužnoj liniji - uzorak 2F5	57
Slika 46. Dijagram raspodjele tangencijalnih naprežanja - uzorak 2F5.....	58
Slika 47. Debye-Scherrerovi prsteni za točke 9 i T5.....	58
Slika 48. Dijagram usporedbe zaostalih naprežanja uzoraka 1F5 i 2 F5	59
Slika 49. Dijagram raspodjele naprežanja sa devijacijama - uzorak 2F1.....	61
Slika 50. Debye-Scherrerovi prsteni: lijevo - točka 6, desno - točka 8.....	61
Slika 51. Dijagram usporedbe točaka 5, 6, 10 i 11 za uzorke 2F5 i 2F1.....	62
Slika 52. Prikaz mjesta rezanja uzoraka za mehanička ispitivanja [43].....	63
Slika 53. Makroizbrusak 1F1	64
Slika 54. Makroizbrusak 2F1	64
Slika 55. Makroizbrusak 2F5	65
Slika 56. Primjer mjerenja u programu <i>ImageJ</i>	65
Slika 57. Dijagram visina zavara i dubina penetracija zavara	67
Slika 58. Dijagram usporedbe stupnja miješanja zavara	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva i klasifikacija zaštitnih plinova za zavarivanje [11]	11
Tablica 2. Dvokomponentne mješavine prema HRN EN ISO 14175 [11]	15
Tablica 3. Trokomponentne Ar-CO ₂ -O ₂ plinske mješavine korištene kod MAG i MCAW zavarivanja [18]	17
Tablica 4. Tehničke karakteristike izvora struja Daihen Varstroj WB - P500L [39].....	44
Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S355J2+N [41]	45
Tablica 6. Kemijski sastav čelika S355J2+N [41]	45
Tablica 7. Specifikacije korištenih plinskih mješavina [18]	47
Tablica 8. Parametri zavarivanja pojedinih uzoraka	49
Tablica 9. Izmjerena naprezanja na poprečnoj liniji uzorka 1F5	53
Tablica 10. Izmjerena naprezanja na uzdužnoj liniji uzorka 1F5	53
Tablica 11. Izmjerena naprezanja na poprečnoj liniji uzorka 2F5	56
Tablica 12. Izmjerena naprezanja na uzdužnoj liniji uzorka 2F5	56
Tablica 13. Izmjerena longitudinalna naprezanja uzorka 2F1	60
Tablica 14. Prikaz mjerenih dimenzija zavora, površine i stupnja miješanja	66

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. " <i>Metal Inert Gas</i> ")
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. " <i>Metal Active Gas</i> ")
MCAW	Elektrolučno zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom (engl. " <i>Metal Cored Arc Welding</i> ")
Ar	Argon
CO ₂	Ugljikov dioksid
O ₂	Kisik
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. " <i>International Organization for Standardization</i> ") - međunarodne norme
EN	Europske norme (engl. " <i>European norm</i> ") - regionalne norme
HRN	Hrvatske norme - nacionalne norme
FCAW	Elektrolučno zavarivanje prahom punjenom žicom (engl. " <i>Flux Cored Arc Welding</i> ")
He	Helij
N ₂	Dušik
H ₂	Vodik
O ₃	Ozon
Cr ⁶⁺	Šesterovalentni krom
NO	Dušikov oksid
ZUT	Zona utjecaja topline
BRSL	Uklanjanje odjeljaka razdvajanjem i raslojavanjem (engl. " <i>Block Removal, Splitting and Laving</i> ")
2D-PSPC	Dvodimenzionalni proporcionalni brojači osjetljivi na položaj (engl. " <i>2D-Position Sensitive Proportional Counters</i> ")
EDM	Elektroerozija (engl. " <i>Electro Discharge Machining</i> ")

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
c	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
d	nm	Udaljenost kristalnih rešetki
d_0	nm	Udaljenost neopterećenih ravnina
d_n	nm	Udaljenost opterećenih ravnina
$d_{x/y}$	mm	Udaljenost mjerenih točaka
$D_{\sigma/\tau}$	MPa	Devijacija naprezanja
E	MPa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost struje zavarivanja
I_{kr}	A	Kritična struja
n	/	Red zračenja
Q	J/mm	Unos topline
R_e	MPa	Granica razvlačenja
T	°C	Temperatura štapa
T_0	°C	Početna temperatura štapa
T_t	K	Temperatura tališta
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
α	°	Azimutni kut
α_T	K ⁻¹	Koeficijent linearnog rastezanja
ε	/	Ukupna deformacija /relativno produljenje
$\varepsilon_{\Delta V}$	/	Volumenska deformacija uslijed faznih promjena materijala
ε_{el}	/	Elastična deformacija
ε_{pl}	/	Plastična deformacija
ε_{th}	/	Toplinska deformacija
ε_{Trp}	/	Plastična deformacija uslijed faznih promjena materijala
η	/	Stupanj iskoristivosti
θ	°	Difrakcijski kut
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
λ	nm	Valna duljina
ν	/	Poissonov faktor
σ_x	MPa	Longitudinalna naprezanja
σ_y	MPa	Transverzalna naprezanja
σ_z	MPa	Naprezanja u smjeru debljine zavara
τ_{xy}	MPa	Tangencijalna naprezanja
ψ	°	Simetralni kut
Ω	°	Upadni kut

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad opisuje analizu zaostalih napreznja kod zavarivanja konstrukcijskog čelika S355J2+N metalnim prahom punjenom žicom. Pomoću metode rendgenske difrakcije izmjerena su zaostala napreznja na T-zavarenim spojevima.

U teorijskom dijelu opisan je MIG/MAG i MCAW postupak zavarivanja i njihova usporedba. Navedeni su i objašnjeni zaštitni plinovi korišteni u navedenim postupcima i njihove mješavine. Zatim je razrađena tema zaostalih napreznja u zavarenom spoju i metode mjerenja zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom od kojih je izdvojena $\cos \alpha$ metoda.

U eksperimentalnom dijelu provedena je analiza rezultata zaostalih napreznja mjerenih rendgenskom difrakcijom na uzorcima zavarenim MCAW postupkom uz zaštitnu atmosferu Ar-CO₂-O₂ plinskih mješavina. Također provedena je makroanaliza i određen stupanj miješanja, te je određen utjecaj unosa topline i vrste zaštitne plinske mješavine na zaostala napreznja.

Ključne riječi: zavarivanje, rendgenska difrakcija, MIG/MAG, MCAW, $\cos \alpha$ metoda, Ar-CO₂-O₂ plinske mješavine

SUMMARY

This master thesis describes the analysis of residual stresses during welding of structural steel S355J2+N with metal cored arc wire. Residual stresses on T configurations of welded joints were measured using X-ray diffraction.

The theoretical part describes the MIG/MAG and MCAW welding process and their comparison. The shielding gases used in the mentioned procedures and their mixtures are listed and explained. Then the subject of residual stresses in the welded joint and methods of measuring residual stresses by X-ray diffraction were elaborated, of which the $\cos \alpha$ method was individually explained.

In the experimental part, the analysis of the results of residual stresses measured by X-ray diffraction on samples welded by the MCAW process with shielding gas mixture of Ar-CO₂-O₂. A macro analysis was also performed, and the degree of mixing was determined, as was the influence of heat input and the type of shielding gas mixture on residual stresses.

Key words: welding, X-ray diffraction, MIG/MAG, MCAW, $\cos \alpha$ method, Ar-CO₂-O₂ gas mixture

1. UVOD

U današnjoj industrijskoj proizvodnji, zavarivanje je jedna od najzastupljenijih tehnologija spajanja materijala. Zavarivanje se koristi kod jednostavnih konstrukcija, kao što su ograde, podesti i slično pa sve do kompliciranijih, npr. oprema pod tlakom, brodogradnja i ostalo. Od postupaka zavarivanja izdvaja se MIG/MAG (engl. *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) postupak zavarivanja, odnosno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina. Jedan je od najčešće korištenih postupaka, ali i najproduktivnijih. Pruža dobru kvalitetu zavarenog spoja, rukovanje je jednostavno, a mogućnost automatizacije postupka dodatno povećava primjenu ovog postupka, najviše u automobilskoj industriji. Iz MIG/MAG postupaka zavarivanja razvijene su mnoge inačice koje povećavaju kvalitetu i produktivnost. Jedan od tih postupaka je MCAW (engl. *Metal Core Arc Welding*), to jest elektrolučno zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom. Zbog veće količine depozita, mogu se postići veće brzine zavarivanja i time se postiže veća produktivnost. Razlika kod samog postupka zavarivanja je u korištenju modificiranog dodatnog materijala, metalnim prahom punjene žice. [1]

Na kvalitetu zavarenog spoja utječe i izbor zasitnog plina. Razvojem tehnologije zavarivanja razvile su se i mnoge plinske mješavine koje daju bolju zaštitu i svojstva samog zavara. Sve je više zastupljenije korištenje dvokomponentnih i trokomponentnih plinskih mješavina, pogotovo kod zavarivanja konstrukcijskih čelika, gdje omogućuju postizanje željene kvalitete zavarenog spoja. [2]

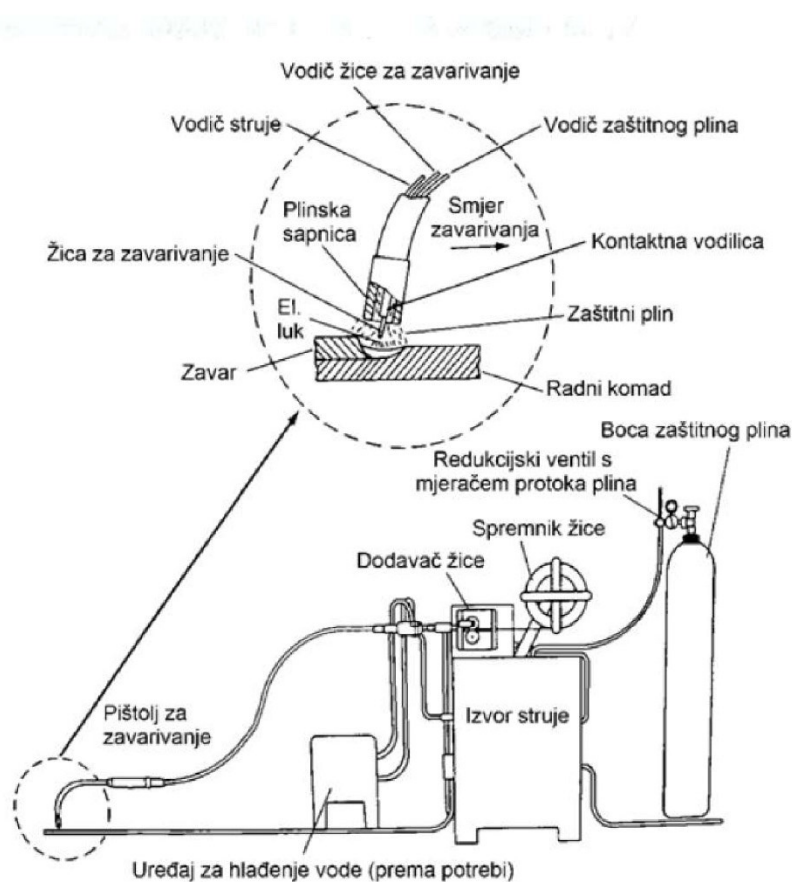
Zavarivanje kao postupak spajanja ima brojne prednosti, ali i nedostatke, a to su zaostala naprezanja i deformacije do kojih dolazi zbog nejednolikog i prebrzog hlađenja tijekom i nakon zavarivanja i neprikladne tehnologije zavarivanja. Zaostala naprezanja mogu narušiti stabilnost zavarene konstrukcije i prouzrokovati ozbiljna oštećenja. Zbog toga je potrebno provesti ispitivanje materijala u cilju utvrđivanja zaostalih naprezanja. Postoje brojne metode mjerenja zaostalih naprezanja, a jedna od njih je rendgenska difrakcija. Rendgenska difrakcija je pogodna zbog toga jer ne oštećuje materijal i daje pouzdane rezultate. Pomoću rezultata mjerenja poduzimaju se određene radnje povodom smanjenja utjecaja zaostalih naprezanja. [1]

2. MIG/MAG ZAVARIVANJE

Ovaj postupak predstavlja elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u obliku žice u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina. Prema normi HRN EN ISO 4063:2023, oznaka za MIG postupak je 131, a za MAG postupak je 135. [1]

2.1. Oprema za MIG/MAG zavarivanje

Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja sastoji se od izvora struje, spremnika žice, sustava za dovod žice, boce zaštitnog plina sa redukcijskim ventilom i mjerачem protoka plina, polikabelom (kabel za vodiče struje, žice i plina) i pištolja za zavarivanje. Slika 1. prikazuje svu opremu potrebnu za zavarivanje MIG/MAG postupkom. [2]



Slika 1. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [2]

Preko sustava za dovod žice, dodatni materijal koji je namotan u kolut dodaje se kroz polikabel do pištolja za zavarivanje. Kroz kontaktnu vodilicu spaja se na električnu struju te se u blizini osnovnog materijala stvara električni luk koji tali žicu. Struja za zavarivanje može biti izmjenična ili istosmjerna. Najčešće se koristi istosmjerna i to tako da se elektroda spaja na pozitivan (+) pol, a radni komad, odnosno osnovni materijal na minus (-) pol. Sve se to odvija u zaštitnoj atmosferi koja štiti metal zavara od štetnih vanjskih utjecaja iz atmosfere. Plinovi koji se koriste za stvaranje zaštitne atmosfere su inertni kao što su argon i helij te aktivni kao što su ugljikov dioksid, kisik. Inertni plinovi ne reagiraju sa rastaljenim metalom zavara, dok aktivni stvaraju kemijske reakcije. Kako bi spoj bio kvalitetno zavaren, potreban je ispravan odabir parametara zavarivanja. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja postoji velik broj parametara koji se podešavaju ovisno o vrsti metala i ostalim karakteristikama. [2]

Parametri zavarivanja MIG/MAG postupka su [2]:

- promjer žice
- jakost struje
- vrsta struje i polaritet žice
- napon zavarivanja
- vrsta i protok plina
- brzina zavarivanja
- tehnika rada
- slobodni kraj žice
- induktivitet.

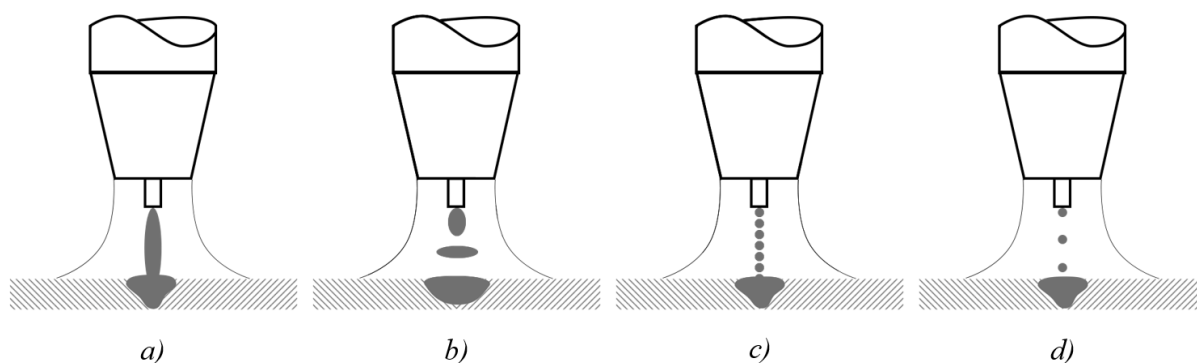
Navedeni parametri zavarivanja najviše ovise o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje, o njegovom kemijskom sastavu i debljini. Na primjer kod tanjih metala koriste se manji promjeri žice i manje struje, a kod debljih se koriste veći promjeri žice i veće jakosti struja. Podešavanjem parametara zavarivanja kao što je jakost struje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku.

2.2. Načini prijenosa metala

Jakost struje je najznačajniji parametar jer o njemu ovisi penetracija tijekom zavarivanja. Ovisno o jakosti struje postoje tri prirodna načina prijenosa metala tijekom zavarivanja. To su prijenosi metala: [2]

- kratkim spojevima (niska jakost struje)
- mješoviti luk (srednje jakosti struje)
- štrcajući luk (velike jakosti struje).

Prijenos metala kratkim spojevima (50-170 A) koristi se kod zavarivanja gdje je potrebna mala penetracija i manji unos topline, kao što je zavarivanje tankih limova, korijena zavara i sl. Mješoviti luk se izbjegava zbog velikog prskanja i nestabilnog električnog luka. Raspon jakosti struje je od 170-235 A. Korištenjem struje veće od otprilike 240 A, što ovisi o promjeru žice, prijenos metala vrši se štrcajućim lukom. Prijenos metala štrcajućim lukom odvija se tako da velika jakost struje tali dodatni materijal stvarajući kapljice metala koje direktno završavaju u metalu zavara, uz minimalno rasprskavanje. Zbog unosa topline daje najveću dubinu penetracije, a time i čvrst i kvalitetan spoj. Također, postoji modificirani način prijenosa štrcajućim lukom koji se naziva impulsno zavarivanje. To je kontrolirani proces zavarivanja gdje vremenski impulsi diktiraju odvajanje kapljica dodatnog materijala. U tim vremenskim razmacima struja se konstantno povećava i smanjuje, ovisno o generiranom impulsu. Takva struja naziva se impulsna struja. Ona omogućuje manji unos topline, stabilniji električni luk, a time i bolju kvalitetu zavarenog spoja. Slika 2. prikazuje prethodno navedene načine prijenosa metala. [2]

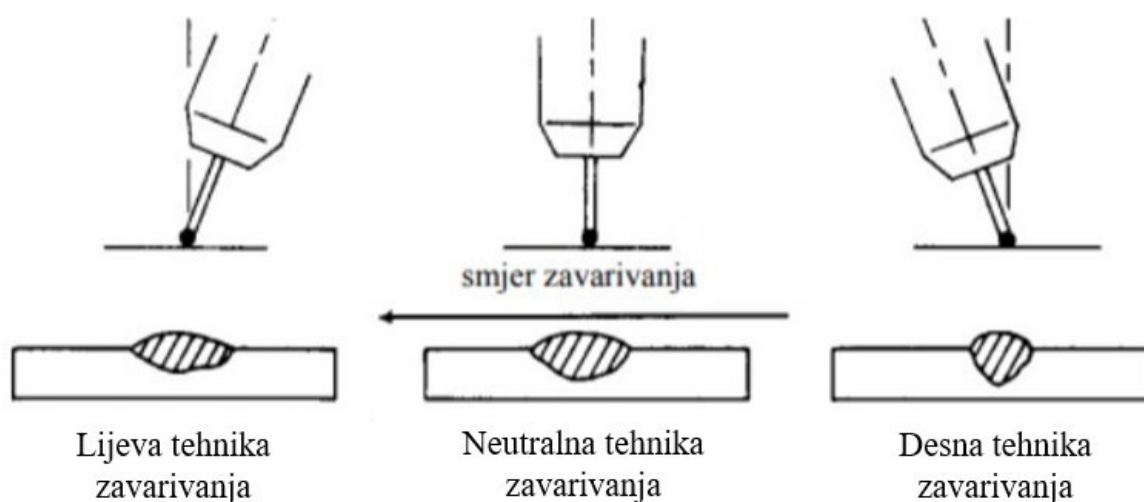


Slika 2. Načini prijenosa metala: a) kratkim spojevima, b) mješovitim lukom, c) štrcajućim lukom, d) impulsnim strujama [3]

Također postoji veliki broj modificiranih postupaka zavarivanja poput CMT (engl. „*Cold Metal Transfer*“), STT (engl. „*Surface Tension Transfer*“), FastROOT i ostali. To su postupci koji koriste različite prijenose metala dobivene razvojem izvora struje i opreme za zavarivanje. [4]

2.3. Tehnika rada

Tehnika rada može biti lijeva, neutralna ili desna. Tijekom zavarivanja desnom tehnikom rada pištolj za zavarivanje nagnut je u smjeru zavarivanja do otprilike 30 °. Električni luk nalazi se uvijek na već zavarenom metalu zvara čime ga dodatno zagrijava. To uzrokuje sporije hlađenje zvara, velike unose topline, a time i veliku dubinu penetracije. Kod lijeve tehnike rada pištolj je nagnut u suprotnom smjeru, a električni luk je ispred zvara. Taljenjem dodatnog materijala, metal zvara se odmah skrućuje i hladi. Unos topline je manji jer nema dodatnog zagrijavanja, profil zvara je širi, a dubina penetracije je manja. Problem prilikom zavarivanja ovom tehnikom je taj što je pištolj za zavarivanje iznad samog zvara. Moguće je otežano zavarivanje zbog topline prisutne u metalu zvara koja bi mogla rezultirati opeklinama zavarivača. Lijeve tehnika se većinom koristi kod zavarivanja tanjih materijala, a desna kod zavarivanja debljih materijala zbog veće penetracije. Ukoliko je za zavarivanje potrebna umjerena penetracija, unos topline i širina profila zvara, koristi se neutralna tehnika rada kod koje je pištolj pozicioniran okomito na radni komad. Slika 3. prikazuje navedene tehnike zavarivanja, te dobiveni profil zvara za pojedinu tehniku. [2]



Slika 3. Tehnike zavarivanja i profil zvara [2]

3. MCAW ZAVARIVANJE

Jedina razlika između zavarivanja metalnim prahom punjenom žicom i MIG/MAG postupka zavarivanja jest u dodatnom materijalu. Kod MCAW postupka zavarivanja, kao dodatni materijal koristi se metalnim prahom punjena žica koja zahtijeva posebne kotačiće u sustavu za dovod žice. Prema normi HRN EN ISO 4063:2023 oznaka MCAW postupka je 138. [5]

3.1. Prednosti MCAW zavarivanja

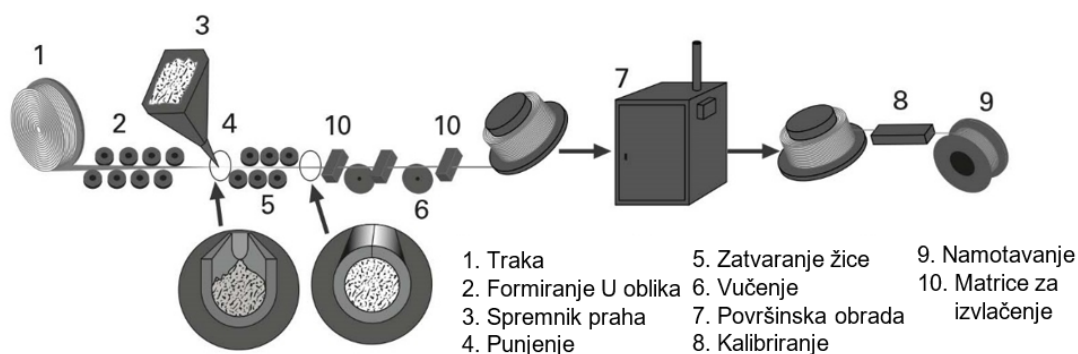
Prednosti zavarivanja metalnim prahom punjenim žicama su[6] :

- visoka produktivnost (velike količine depozita)
- manja mogućnost stvaranja poroznosti
- odlična zavarljivost
- malo rasprskavanje
- gotovo nema troske
- pogodno za zavarivanje kutnih zavara
- pogodno za robotizirano i automatizirano zavarivanje
- mogućnost zavarivanja u više prolaza bez prekida zavarivanja
- lako se uspostavlja i održava električni luk
- visok koeficijent iskoristivosti topline električnog luka (85-95 %).

Jedini nedostatak su veliki početni investicijski troškovi i potreba za dodatnim podešavanjem parametara.

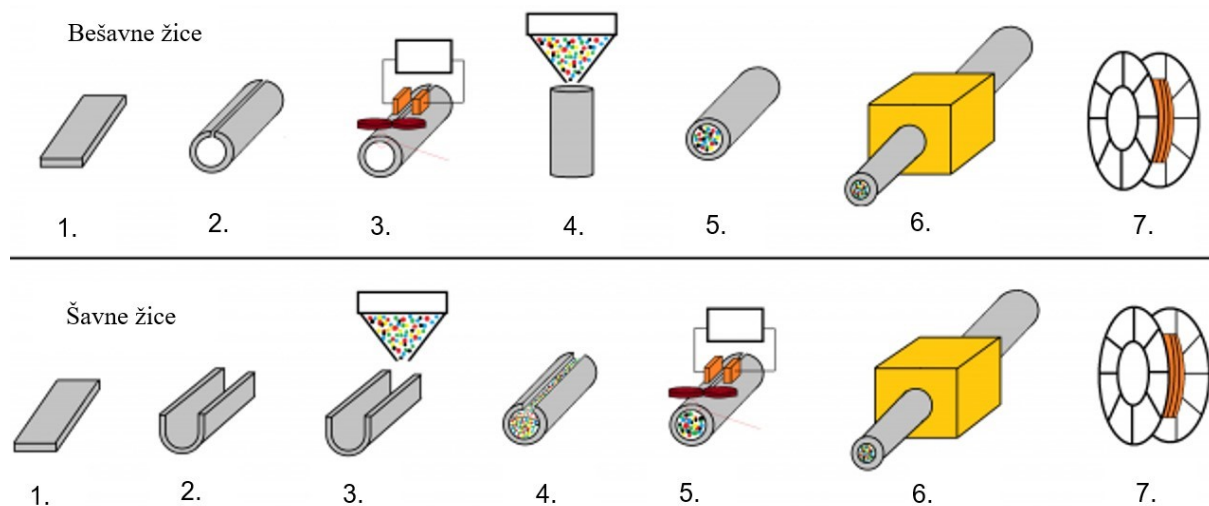
3.2. Postupak proizvodnje metalnim prahom punjene žice

Metalnim prahom punjene žice sastoje se od metalnog plašta (metalne trake) i punila. Punilo žica je sačinjeno od metalnog praha, koji se sastoji od feromangana, ferotitana i ferosilicija, i u manjim količinama od stabilizatora električnog luka koji sadrže natrij i kalij, te ostali dezoksidanti. Ovisno o osnovnom materijalu, mogući su dodaci legiranih elemenata u prah, što omogućuje zavarivanje visokolegiranih čelika. Žice mogu biti šavne i bešavne. Šavne prahom punjene žice se proizvode tako da se duge metalne trake oblikuju u oblik slova „U“, zatim se pune prahom, a nakon toga se zatvaraju u cilindrični oblik. Postupak je prikazan na slici 4. [6]

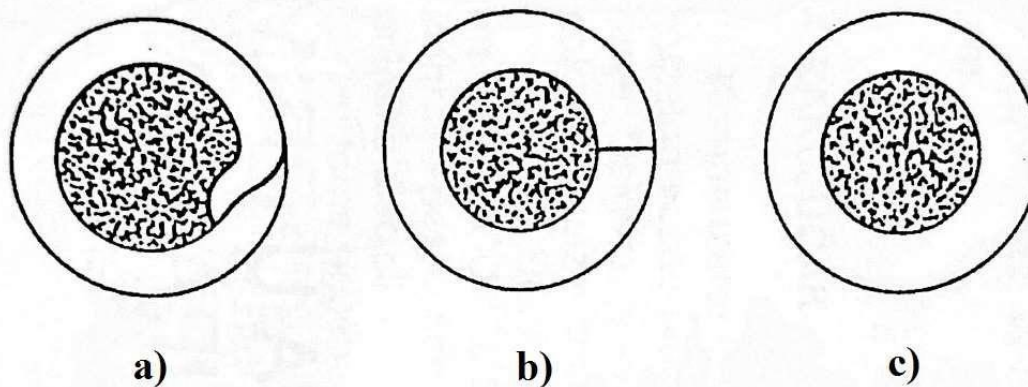


Slika 4. Postupak proizvodnje šavnih metalnim prahom punjenih žica [7]

Bešavne žice su proizvedene na način da se metalne trake prvo oblikuju u cilindrični oblik te se zatim zavari šav. Nakon toga slijedi žarenje šuplje žice, a zatim punjenje i izvlačenje na određeni promjer uz nekoliko postupaka među žarenja. Iako su skuplje od šavnih i punih žica, bešavne žice nude mnoge prednosti, kao što su nemogućnost puknuća šava, nema kontaminacije vodikom jer vlaga ne može doprijeti do praha. Prije namotavanja, žice se prevlače bakrom ili niklom zbog otpornosti na koroziju i bolje električne vodljivosti i stabilnosti. Slika 5. prikazuje usporedbu proizvodnje bešavne i šavne žice, a slika 6. prikazuje moguće presjeke prahom punjenih žica. [1], [6]

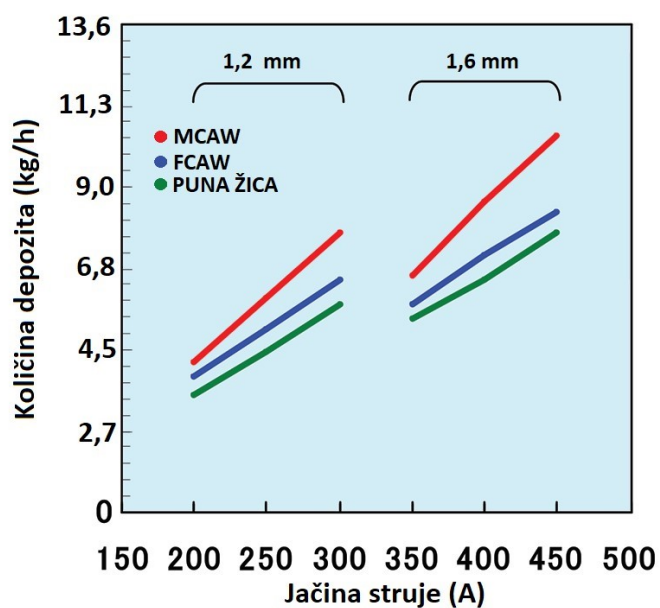


Slika 5. Usporedni prikaz proizvodnje šavne i bešavne metalnim prahom punjene žice [8]



Slika 6. Presjeci prahom punjenih žica: a) šavna s preklopom, b) šavna bez preklopa, c) bešavna [6]

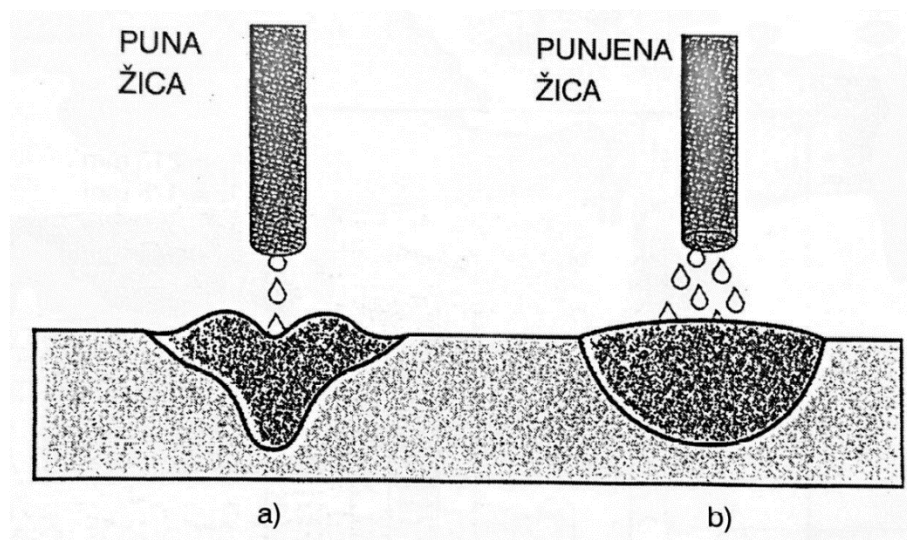
Pošto je žica šuplja, struja teče kroz presjek u obliku kružnog vijenca, za razliku od pune žice koja ima puni poprečni presjek. Zbog toga je gustoća struje po presjeku žice veća i na kraju žice se stvara više topline. To daje veći depozit zbog veće brzine taljenja žice, odnosno daje veću produktivnost, što je glavna karakteristika MCAW postupka zavarivanja. Metalnim prahom punjene žice nemaju iste parametre zavarivanja kao i pune žice. Kod MCAW postupka zavarivanja postoje razlike i specifične karakteristike u odnosu na MAG postupak zavarivanja. Kritična struja I_{kr} štrcajućeg luka je manja zbog čega je prijelaz iz kratkog u štrcajući luk gotovo trenutno, jer mješoviti luk ima vrlo uzak raspon jakosti struje. Štrcajući luk kod MCAW postupka zavarivanja daje veći depozit od MIG/MAG i FCAW (engl. „*Flux-cored Arc Welding*“) postupka zavarivanja što je prikazano dijagramom na slici 7. prahom. [9]



Slika 7. Usporedba depozita postupaka MCAW, FCAW i MIG/MAG [9]

Prema dijagramu vidljivo je da je MCAW vodeći po količini depozita, npr. kod zavarivanja punom žicom promjera 1,2 mm depozit je od 3,6 do 4,5 kg/h dok metalnim prahom punjenom žicom depozit iznosi od 5,4 do 6,4 kg/h što je povećanje od 40 do 50 % [9].

Posljedica veće količine depozita je mogućnost većih brzina zavarivanja, zbog čega se preporuča veći slobodni kraj žice. Za razliku od pune žice, metalnim prahom punjena žica prilikom zavarivanja ima širi električni luk jer se žica tali iz plašta (slika 8.). Time je ostvareno bolje razlijevanje taline te je spriječeno nedovoljno protaljivanje i naljepljivanje. Stvara se manje nadvišenje i širi profil zavara. Za zaštitnu atmosferu najčešće se koriste dvokomponentne ili trokomponentne mješavine plinova Ar, CO₂ i O₂. Preporuča se desna tehnika rada kod sučeljenih spojeva zbog veće dubine penetracije, a lijeva kod kutnih spojeva zbog bolje preglednosti. [9]



Slika 8. Usporedba oblika profila prilikom zavarivanja a) punom žicom, b) metalnim prahom punjenom žicom [6]

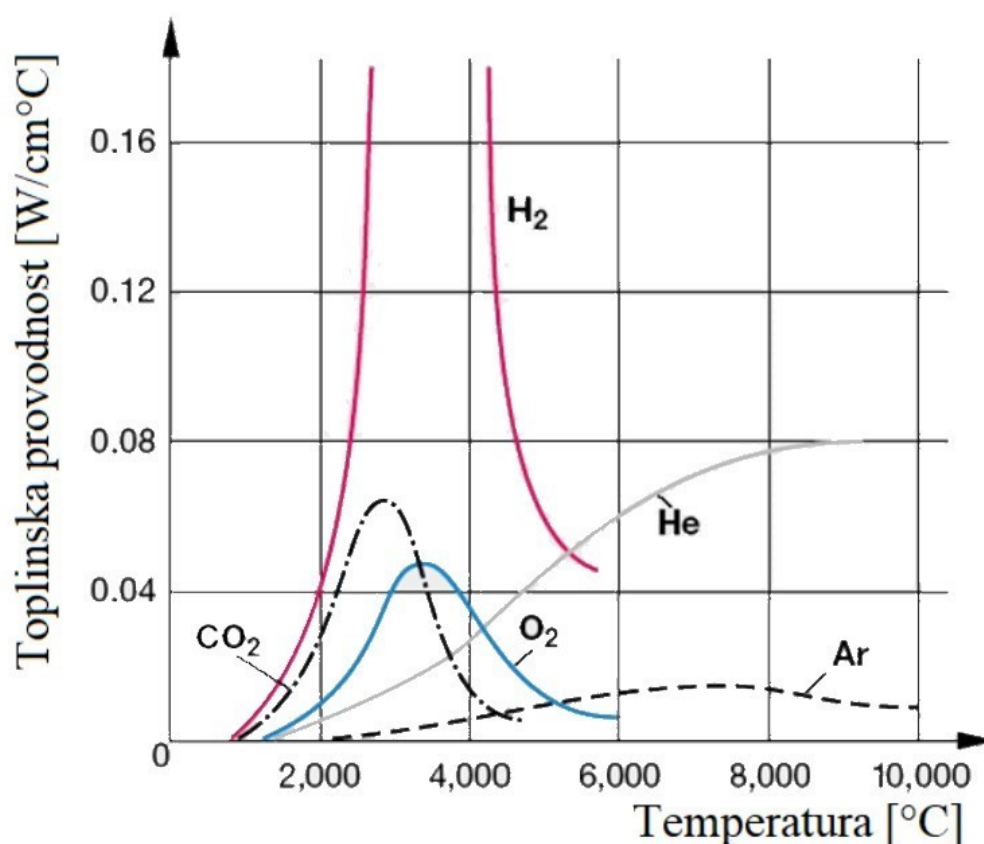
4. ZAŠTITINI PLINOV I

Kvaliteta zavora uvelike ovisi i o vrsti i protoku zaštitnog plina. Zaštitni plinovi utječu na parametre zavarivanja, svojstva i sastav taline, te na vrstu i oblik električnog luka, što daje različitu penetraciju i oblik zavora. Kod niskougličnih i nelegiranih čelika koriste se aktivni zaštitni plinovi, a kod osjetljivijih metala koriste se inertni plinovi (visokolegirani čelici, aluminij i sl.)[10].

Zaštitni plinovi utječu na [10]:

- električno-fizikalna svojstva električnog luka, time i na prijenos metala s elektrode na radni komad
- metalurške procese u talini zavora
- tehnološke parametre.

Učinkovitost zaštite metala zavora uvelike ovisi o specifičnoj gustoći zaštitnog plina i toplinskoj provodnosti plinske atmosfere (slika 9.), što utječe na radijalne gubitke topline, a time i na oblik jezgre luka i njegovu geometriju. [10]



Slika 9., Prikaz toplinske provodnosti različitih vrsta zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [2]

Zaštitni plinovi klasificirani su prema normi HRN EN ISO 14175:2008. Tablica 1. prikazuje svojstva i simbole zaštitnih plinova. [11]

Tablica 1. Svojstva i klasifikacija zaštitnih plinova za zavarivanje [11]

Vrsta plina	Kemijski simbol	Gustoća (zrak=1,293) kg/m ³	Relativna gustoća kg/m ³	Vrelište na 0,101 MPa °C	Reakcije tijekom zavarivanja	Simboli (HRN EN ISO 14175)	
Argon	Ar	1,784	1,38	-185,9	Inertni	I1	I3
Helij	He	0,178	0,138	-268,9	Inertni	I2	
Ugljikov dioksid	CO ₂	1,977	1,529	-78,50	Oksidirajući	C	
Kisik	O ₂	1,429	1,105	-183	Oksidirajući	O	
Dušik	N ₂	1,251	0,968	-195,8	Minimalne	N	
Vodik	H ₂	0,09	0,07	-252,8	Reducirajući	R	
Mješavine						M1x, M2x, M3x	

4.1. Inertni plinovi

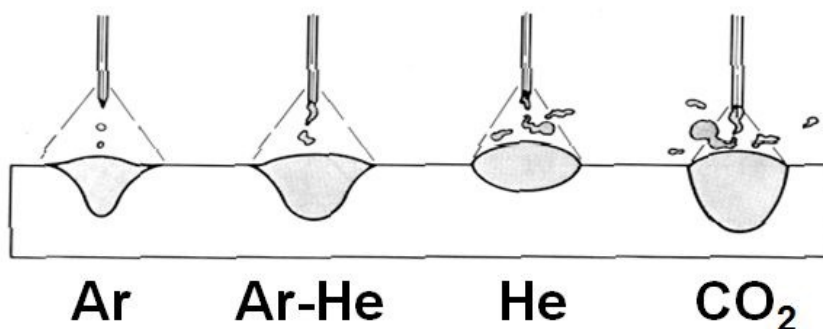
Argon (Ar) je inertan plin bez boje, okusa i mirisa te je 38 % gušći od zraka. Održava dobru stabilnost električnog luka jer ima malu energiju ionizacije. Profil zavara dobiven korištenjem argona izgleda kao ključanica. Donji dio zavara je uzak, dok je gornji dio širok. Zbog niske toplinske vodljivosti argonom zaštićen električni luk ima dvije zone, a to su: uska i toplija jezgra, te hladnija i široka vanjska zona. [10], [12]

Helij (He) je lakši od zraka, odnosno ima gustoću 7 puta manju od gustoće zraka. Ima veliku toplinsku vodljivost što se vidi na slici 9. Drugi je najčešće korišten inertni zaštitni plin, a većinom se koristi u mješavinama. Prednosti argona u odnosu na helij su [10]:

- pruža bolju stabilnost i lakše paljenje električnog luka
- ima manju dubinu penetracije (zavarivanje tankih limova)
- pomaže kod čišćenja oksida pri zavarivanju aluminijskog i magnezijevog
- manja cijena i veća dostupnost
- potreban je manji protok plina za jednaku zaštitu.

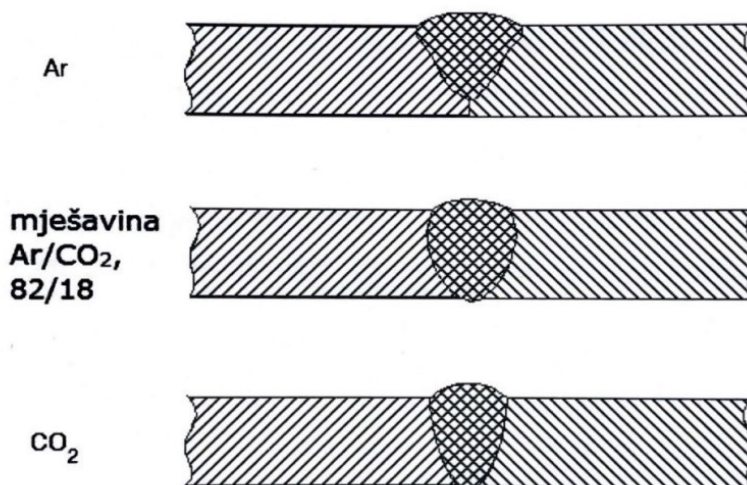
4.2. Aktivni plinovi

Ugljikov dioksid (CO_2) je plin 53 % gušći od zraka, nema boje i mirisa. Ne podržava gorenje i otrovan je za čovjeka u većim koncentracijama. Plin je jeftin i najčešće je korišten aktivni zaštitni plin. Pošto je troatomni plin, treba više energije za ionizaciju nego jednoatomni (Ar). Zato daje lošiju stabilnost električnog luka i potrebna je veća kritična struja za postizanje štrcajućeg luka. CO_2 daje duboki i uski profil penetracije, ali daje i veće rasprskavanje što smanjuje učinkovitost i povećava troškove rada zbog potrebnog čišćenja nakon zavarivanja. Profili penetracije plinova Ar, He i CO_2 prikazani su na slici 9. [12]



Slika 10. Profili penetracije za navedene zaštitne plinove [13]

CO_2 se često koristi u varijanti dvokomponentne plinske mješavine sa argonom u omjeru 82 % Ar i 18 % CO_2 . Navedena plinska mješavina spaja svojstva dvaju plinova što uzrokuje vrlo dobrom penetracijom. Profil penetracije ima dobru dubinu zbog CO_2 i dobru širinu vrha zbog Ar. Električni luk je stabilniji i smanjeno je rasprskavanje. Usporedba profila penetracija Ar, CO_2 i mješavine Ar/ CO_2 prikazana je na slici 10. [10]



Slika 11. Usporedba profila penetracije Ar, CO_2 i mješavine Ar/ CO_2 82/18 [10]

Kisik (O_2) čini 21% atmosfere po volumenu. Reagira sa svim kemijskim elementima osim inertnih plinova. Podržava gorenje, ali nije zapaljiv. Najčešće se koristi u mješavinama sa argonom i ugljikovim dioksidom [6]. Kisik stvara željezne okside koji smanjuju površinsku napetost rastaljenog metala i poboljšavaju kvašenje. Odnosno korištenjem kisika u mješavinama argona i ugljikovog dioksida smanjuje se nadvišenje zavara i poboljšava izgled zavara. Također vrlo dobro utječe na električni luk jer nastaju sitnije kapljice što poboljšava prijenos metala i smanjuje vrijednost kritične struje I_{kr} za postizanje štrcajućeg luka [10].

Dušik (N_2) je najzastupljeniji plin u atmosferi s 78 % udjela. Plin je bez boje, okusa i mirisa, nije zapaljiv, ne podržava gorenje i lakši je od zraka. Najčešće se koristi kod zavarivanja visokolegiranih dupleks i austenitnih čelika te legura nikla. Pospješuje stvaranje austenita tijekom zavarivanja, što kod navedenih metala sprječava rupičastu koroziju. Često se primjenjuje za korijensku zaštitu zavara od atmosferskih utjecaja. Koristi se u plinskim mješavinama s argonom s udjelom do 3 % N_2 . [14]

Vodik (H_2), koji je najlakši kemijski element, zapaljiv je, a dodaje se u neke plinske mješavine zbog velike toplinske provodljivosti, što omogućuje i veće brzine zavarivanja. Koristi se prilikom zavarivanja legura nikla i austenitnih visokolegiranih čelika. Zbog vodikovih pukotina, udio vodika u plinskoj mješavini mora biti manji od 5 %. [12]

4.3. Plinske mješavine

Kako je i prethodno u poglavlju 4.2. spomenuto, za zaštitnu atmosferu mogu se koristiti plinske mješavine. Plinske mješavine pružaju bolju učinkovitost i kvalitetu zavarivanja. Ovisno o sastavu plinske mješavine i omjeru plinova, moguće je kombinirati svojstva pojedinih plinova i tako postići optimalna svojstva zaštitne atmosfere. Slika 11. prikazuje primjer plinske mješavine. Kombiniranjem svojstava argona i ugljikovog dioksida dobivena je optimalna penetracija zavarenog spoja i veći depozit. Potrebna količina pojedinog plina ovisi o sastavu zaštitne atmosfere, odnosno mješavine. Poželjno je imati veći udio gušćeg plina u mješavini kako bi imala veću krutost, odnosno otpornost na poprečna strujanja. Primjenom plinskih mješavina, zbog boljih zaštitnih učinaka, mogu se postići znatne uštede. Vrijeme zavarivanja je kraće i manji su troškovi dodatnog materijala zbog manjeg rasprskavanja. [15]

Analiza utjecaja zaštitnih plinova općenito se svodi na operativno tehnološke značajke, ali ne smije se zanemariti utjecaj na emitiranje opasnih para, plinova i čestica. Ozon (O_3) i šesterovalentni krom (Cr^{6+}) kod zavarivanja visokolegiranih čelika, izazivaju najveće opasnosti tijekom procesa zavarivanja. Zbog toga danas se u zaštitne plinove, u malim udjelima (<1 %), dodaje dušikov oksid (NO). [16]

4.3.1. Dvokomponentne plinske mješavine

Dvokomponentne plinske mješavine sastoje se od dva plina. Moguće su mješavine inertnog s aktivnim plinom, ili samo aktivnih plinova i samo inertnih plinova. Prema normi HRN EN ISO 14175:2008 moguće su mješavine argona i helija, argona i ugljikovog dioksida, argona i kisika, ugljikovog dioksida i kisika, argona i vodika, argona i dušika, te dušika i vodika. Tablica 2. prikazuje dvokomponentne mješavine i njihov omjer. [11]

Tablica 2. Dvokomponentne mješavine prema HRN EN ISO 14175 [11]

Simbol	Omjer plinova	
I3	$0,5 \leq \text{He} \leq 95$	Ar - ostatak
M12	$0,5 \leq \text{CO}_2 \leq 5$	
M13	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 3$	
M20	$5 \leq \text{CO}_2 \leq 15$	
M21	$15 \leq \text{CO}_2 \leq 25$	
M22	$3 \leq \text{O}_2 \leq 10$	
M31	$25 \leq \text{CO}_2 \leq 50$	
M32	$10 \leq \text{O}_2 \leq 15$	
C2	$0,5 \leq \text{O}_2 \leq 30$	CO2 - ostatak
R1	$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 15$	Ar - ostatak
R2	$15 \leq \text{H}_2 \leq 50$	
N2	$0,5 \leq \text{N}_2 \leq 5$	
N3	$5 \leq \text{N}_2 \leq 50$	
N5	$0,5 \leq \text{H}_2 \leq 50$	N2 - ostatak

Od dvokomponentnih mješavina najčešće se koriste Ar-O₂, Ar-CO₂ i Ar-He mješavine. Ar-He mješavina primjenjuje se kod zavarivanja metala velike toplinske vodljivost kao što su aluminij, bakar i njihove legure. Mješavine argona s kisikom i ugljičnim dioksidom koriste se kod zavarivanju ugljičnih i niskolegiranih čelika. [17]

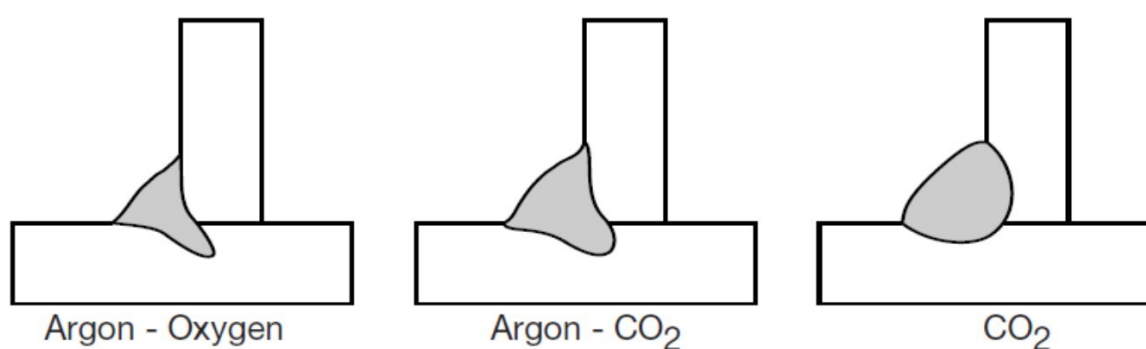
4.3.2. Trokomponentne mješavine

Mješavinom triju ili više plinova, mogu se postići željena svojstva zaštitne atmosfere zbog čega su i najpogodnije za korištenje tijekom zavarivanja. Plinske mješavine od argona, 15-35 % helija i 1-2 % ugljikovog dioksida omogućuju i do 20 % veće brzine zavarivanja, manje deformacije tankih materijala i bolji profil zavara u usporedbi s dvokomponentnim plinskim mješavinama. Trokomponentne plinske mješavine najčešću primjenu pronalaze kod zavarivanja ugljičnih i visokolegiranih čelika, te legura nikla. Dodatkom helija u mješavinu argona i ugljikovog dioksida pospješuje se prijenos metala kratkim spojevima. Helij omogućuje veću toplinsku vodljivost za taj prijenos metala i daje širi profil zavara.[18]

Prednosti trokomponentnih mješavina[18]:

- smanjeno rasprskavanje
- poboljšana viskoznost taline
- ravni i položeniji izgled zavora
- stabilniji električni luk.

Kod konvencionalnog MAG postupka, kao i MCAW postupka zavarivanja, najčešće se koriste mješavine ugljikovog dioksida s argonom i kisikom. Time je ostvarena velika produktivnost i željena svojstva zavora. Spomenute mješavine pogodne su za zavarivanje konvencionalnim i impulsnim načinom prijenosa metala. Mješavina s udjelom od 5-10 % ugljikovog dioksida, 1-6 % kisika te ostatak argon, primjenjuje se uglavnom kod zavarivanja ugljičnih i niskolegiranih čelika. Podržava sve vrste prijenosa metala te je zbog toga omogućeno zavarivanje konstrukcijskih čelika svih debljina. Kod zavarivanja tankih limova kratkim spojevima, kisik ima veliku ulogu jer ostvaruje dobru stabilnost električnog luka pri niskim jakostima struje, od 30 do 60 A. Električni luk je stabilniji i kraći, što sve zajedno rezultira smanjenjem protaljivanja i izobličenja zbog malog unosa topline. Kisik također pozitivno utječe i na prijenos metala štrcajućim lukom jer smanjuje kritičnu struju i omogućuje veće brzine zavarivanja, što dodatno povećava produktivnost. Ugljikov dioksid u spomenutoj mješavini doprinosi postizanju veće penetracije, što je poželjno kod debljih materijala, a visok udio argona smanjuje mogućnost pretjeranog rasprskavanja i daje malo širi oblik profila zavora. Utjecaj ugljikovog dioksida i kisika u plinskoj mješavini s argonom na profil zavora prikazan je na slici 12. [18]



Slika 12. Utjecaj CO₂ i O₂ na mješavine s Ar na profil zavora kod kutnih spojeva [19]

Popis trokomponentnih Ar – CO₂ – O₂ mješavina prikazan je u tablici 3. Prikazan je i komercijalni naziv mješavina, udio pojedinog zaštitnog plina i primjena kod zavarivanja čelika MAG, odnosno MCAW postupkom. [18]

Tablica 3. Trokomponentne Ar-CO₂-O₂ plinske mješavine korištene kod MAG i MCAW zavarivanja [18]

Naziv proizvoda	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio [%]			Primjena (čelici)
		Ar	CO ₂	O ₂	
Inoxline C3 X1	M14	96	3	1	Visokolegirani, na bazi Ni
Ferroline C5 X5	M23	90	5	5	Nelegirani i niskolegirani
Ferroline C6 X1	M24	93	6	1	Nelegirani i niskolegirani
Ferroline C12 X2	M24	86	12	2	Nelegirani i niskolegirani

5. ZAOSTALA NAPREZANJA U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA

Unos topline, koji se unosi u osnovni materijal tijekom procesa zavarivanja, uzrokuje plastične deformacije u materijalu, a time i posljedično zaostala naprezanja. Iznos tih zaostalih naprezanja je, u općem slučaju, približno jednak iznosu granice tečenja materijala. Zaostala naprezanja prilikom zavarivanja mogu imati velik utjecaj na radni vijek, a deformacije nastale nakon zavarivanja mogu stvarati probleme pri montaži zbog geometrijskih odstupanja. [20]

5.1. Podjela i nastanak zaostalih naprezanja

Naprezanja koja nastaju tijekom zavarivanja pripadaju unutarnjim napreznjima u materijalu. Nastaju bez djelovanja vanjskih sila i mogu se podijeliti prema vijeku trajanja, dimenzijama djelovanja, smjeru i podrijetlu.

Prema vijeku trajanja unutarnja naprezanja dijele se na:

- privremena
- zaostala (trajna).

Privremena naprezanja se javljaju samo u određenom trenutku prilikom nestacionarnog zagrijavanja i hlađenja zavarene konstrukcije, a zaostala naprezanja ostaju trajno u materijali i nakon hlađenja na sobnu temperaturu. [20]

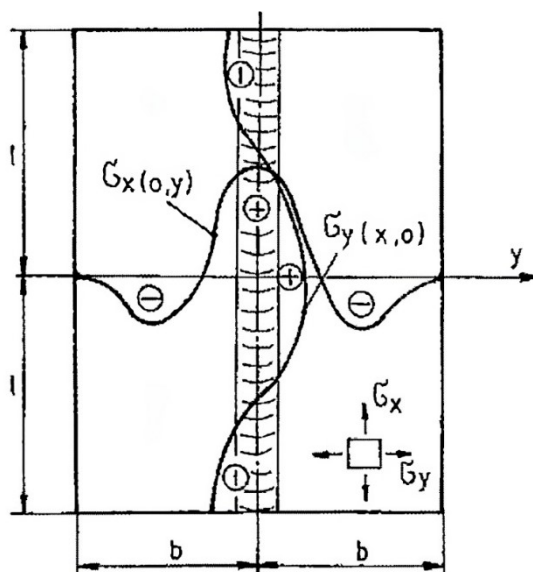
Prema dimenzijama djelovanja postoje zaostala naprezanja [21]:

- 1. vrste – makro dimenzije (područja veća od jednog milimetra)
- 2. vrste – mikro dimenzijama (0,01 mm – 1 mm) – u kristalnim zrnima
- 3. vrste – submikroskopskih dimenzija (10^{-6} – 10^{-2} mm) – nepravilnosti unutar kristalnih rešetki.

Prema smjeru djelovanja razlikuju se:

- σ_x – longitudinalna naprezanja
- σ_y – transverzalna naprezanja
- σ_z – u smjeru debljine zavara (kod debljih materijala, >25 mm).

Longitudinalna naprezanja su paralelna sa smjerom zavara, a transverzalna su okomita na sam zavar. Kod debljih materijala značajnije je troosno naprezanje, gdje se javlja dodatna komponenta naprezanja u osi debljine materijala. Na slici 13. prikazano je dvoosno stanje naprezanja, smjer naprezanja i općenita raspodjela naprezanja u sučeljenom zavaru. [20], [21]



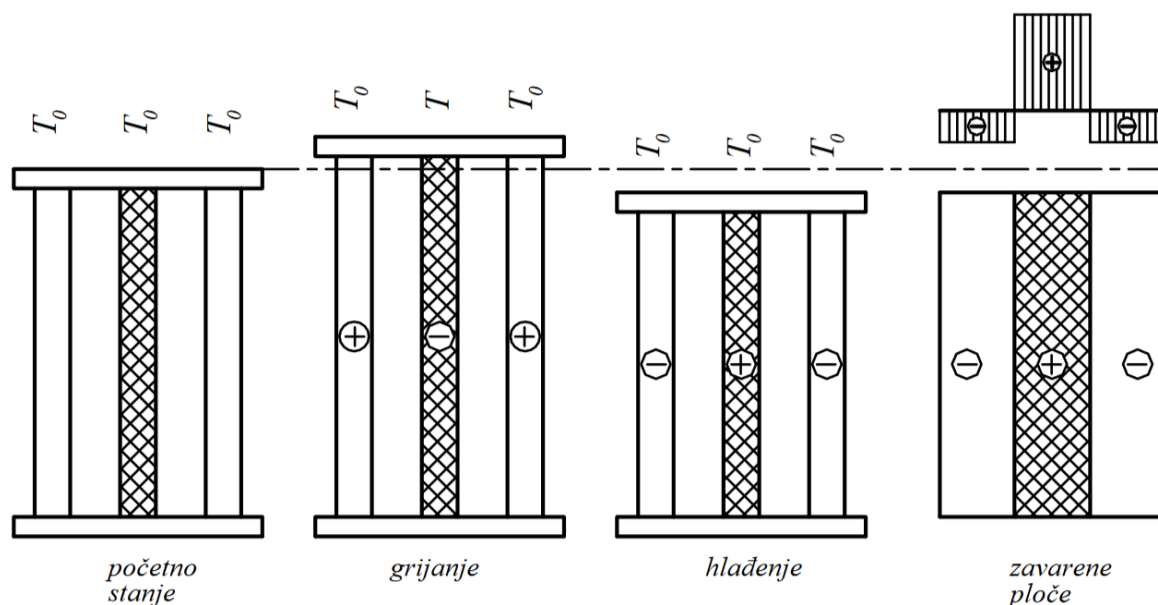
Slika 13. Longitudinalno i transverzalno naprezanje u sučeljenom zavaru [21]

Prema podrijetlu, zaostala naprezanja mogu se podijeliti na:

- toplinska naprezanja - nastala nejednolikom toplinskom raspodjelom
- naprezanja uzrokovana plastičnom deformacijom materijala
- naprezanja uzrokovana faznom promjenom materijala.

Naprezanja uzrokovana faznom promjenom materijala nisu značajna, a naprezanja uzrokovana plastičnom deformacijom materijala uvijek su prisutna u materijalu pa ne utječu na zavareni spoj. Toplinska naprezanja nastaju prilikom neravnomojnog zagrijavanja i hlađenja, kao naprimjer kod kaljenja. Brzine hlađenja značajno su veće izvana nego u unutrašnjosti pa oko površine nastaje martenzit čija je kristalna rešetka volumenski veća od rešetke ferita i perlita koji se nalaze u unutrašnjosti materijala. To donosi nepravilnosti u kristalnoj strukturi te dolazi do zaostalih naprezanja. Kod zavarivanja, toplinska naprezanja nastaju zbog velike razlike u temperaturi metala zavara i osnovnog materijala. Nije moguće rastezanje i stezanje zagrijanog materijala u zavaru zbog hladnijeg okolnog materijala. Općenito, takva naprezanja su troosna, ali ovisno o modelu mogu se svesti na dvoosna ili jednoosna. Kako zaostala naprezanja nastaju vidljivo je na slici 14., na primjeru pojednostavljenog modela.

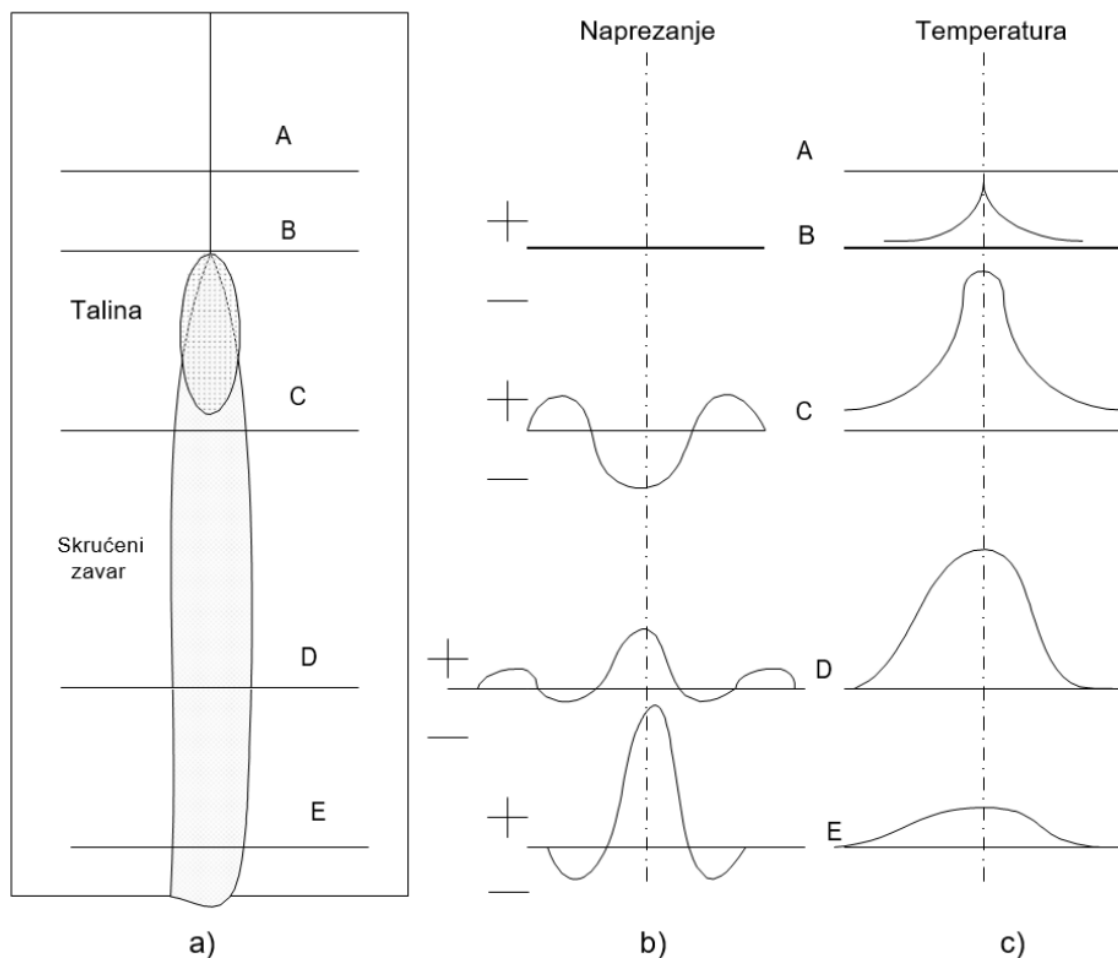
[20]



Slika 14. Pojednostavljeni model nastanka zaostalih naprezanja [20]

Pojednostavljeni model se sastoji od tri jednaka štapa, na krajevima nepomično učvršćenim krutim pločama. Gornja ploča je pomična, u smjeru štapova, a donja je fiksna. U početnom stanju nema naprezanja jer su temperature (T_0) štapova jednake, a zagrijavanjem srednjeg štapa, stanje u modelu se mijenja. Prilikom grijanja srednjeg štapa na temperaturu $T > T_0$, dolazi do produljenja svih štapova. Pri tome su bočni štapovi opterećeni na vlak, a srednji štap na tlak zbog veće tendencije produljenju, koja nije moguća zbog bočnih štapova. Ako temperatura T dostigne dovoljno veliku vrijednost da time tlačna naprezanja postanu veća od granice tečenja materijala, nakon hlađenja u srednjem štapu ostaju trajne plastične deformacije. Ukoliko temperatura ne prijeđe taj prag, štap će se vratiti u prvobitno stanje i naprezanja u svakom štapu bit će jednaka nuli. Prilikom procesa hlađenja srednjeg štapa, duljina mu se smanjuje. Otpor tome daju bočni štapovi koji su zbog toga opterećeni na tlak, a srednji je štap opterećen na vlak zbog nemogućnosti dodatnog smanjenja. Opisan model vrijedi i za sučeljeno zavarene ploče, pri čemu se područje zavara poistovjećuje sa srednjim štapom, a područje oko zavara s bočnim štapovima. Pojednostavljeni dijagram zaostalih naprezanja prikazan je na slici 14. iznad primjera zavarene ploče. [20]

Sam proces nastanka zaostalih naprezanja prilikom postupka zavarivanja prikazuje slika 15. Vidljiv je tijek procesa zavarivanja, nastanak longitudinalnih naprezanja i temperatura u pojedinom trenutku zavarivanja. [22]



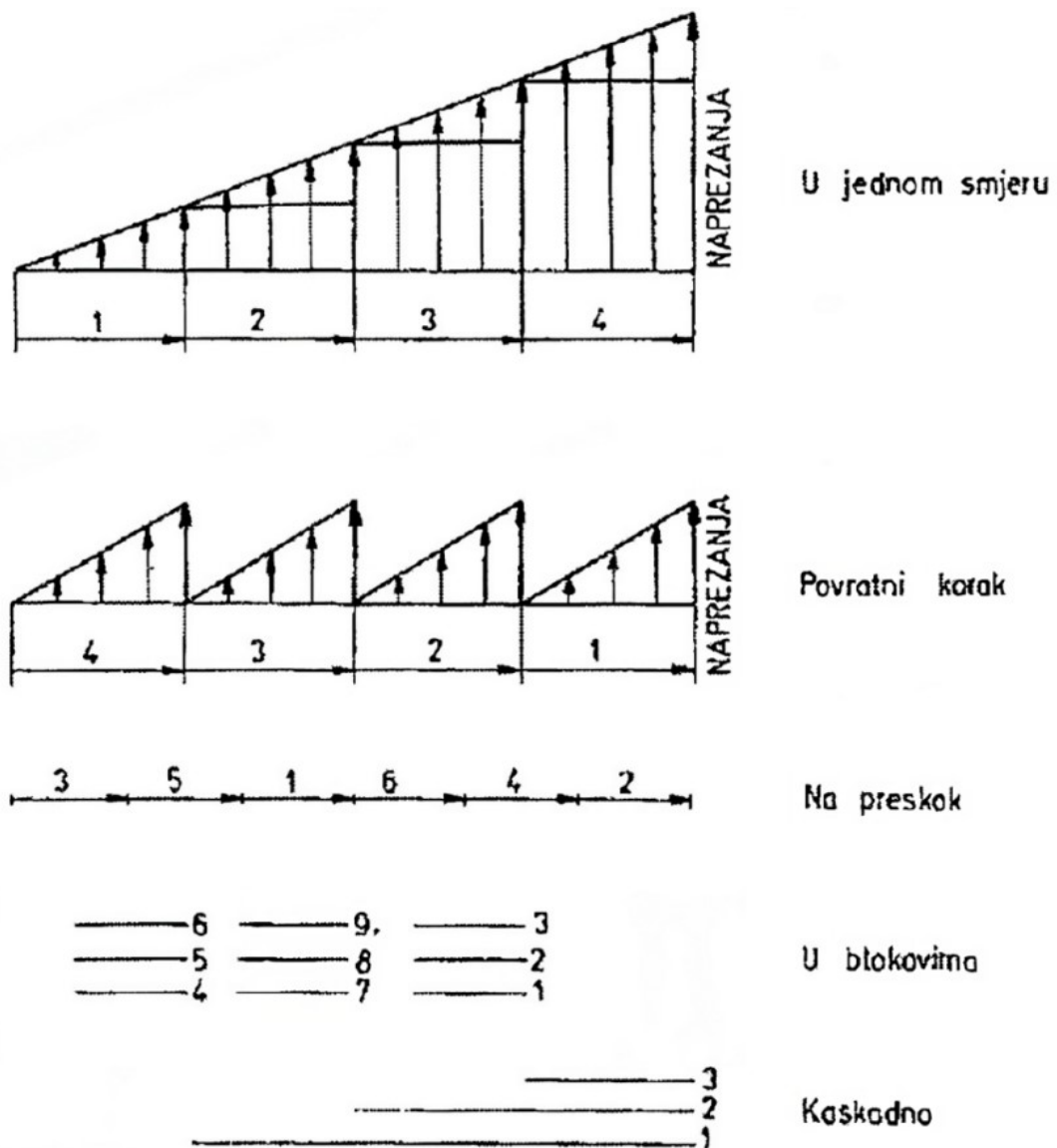
Slika 15. a) Prikaz tijeka zavarivanja, b) longitudinalna zaostala naprezanja, c) temperatura [22]

Prilikom taljenja materijala, u samoj talini, temperatura je najveća (točka B), odnosno jednaka je temperaturi taljenja, a materijal u blizini taline je nešto hladniji. Zagrijano područje zavara ima tendenciju rastezanja, ali zbog hladnijeg okolnog područja u materijalu rastezanje nije moguće. U području zavara prisutno je tlačno naprezanje, dok je okolno područje opterećeno na vlak (točka C). Tijekom daljnjeg hlađenja, tlačno naprezanje u metalu zavara doseže maksimalnu vrijednost i počne opadati zbog smanjenja granice razvlačenja R_e te dolazi do deformacije u obliku bubrenja. U hladnijem području oko zavara, vlačna naprezanja prelaze u tlačna naprezanja zbog hlađenja zavara. Ona prelaze granicu razvlačenja R_e i razgrađuju se plastičnom deformacijom. Daljnjim hlađenjem zavar se skuplja, a granica razvlačenja R_e se povećava i području zavara nastaju trajna vlačna zaostala naprezanja. Kako se materijal u zavaru pokušava skupiti, time tlači okolni materijal, te u njemu ostaju tlačna naprezanja. [22], [23]

5.2. Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih naprezanja

Faktori koji utječu na intenzitet zaostalih naprezanja su brojni. Smanjenjem njihovih utjecaja na zavareni spoj, smanjuje se mogućnost deformacija, odnosno moguće je smanjiti zaostala naprezanja koja nastaju prilikom zavarivanja. Prema faktorima intenziteta zaostalih naprezanja odabiru se i metode za uklanjanje zaostalih naprezanja. Ti faktori su [1], [24]:

- unos topline Q , J/mm – ovisi o postupku zavarivanja i parametrima
- broj prolaza – proporcionalan sa zaostalima napreznjima (više prolaza, veća naprezanja)
- svojstva materijala:
 - koeficijent linearnog rastezanja α_T , K^{-1} – veće rastezanje, veća naprezanja
 - temperatura tališta T_t , K – veća temperatura tališta, veća temperaturna razlika rastaljenog metala i osnovnog materijala
 - modul elastičnosti E , MPa – veći modul elastičnosti, veća naprezanja
 - granica razvlačenja R_e , MPa – intenzitet zaostalih naprezanja ograničen je granicom razvlačenja
 - toplinska vodljivost λ , W/mK – mala toplinska vodljivost rezultira većom neujednačenosti temperatura tijekom zavarivanja, time su zaostala naprezanja veća
 - specifični toplinski kapacitet c , J/kgK – za veći toplinski kapacitet potreban je veći unos topline.
- volumen rastaljenog materijala – veći volumen, veća naprezanja
- dimenzije i oblik konstrukcije
- redoslijed zavarivanja (slika 16.):
 - kontinuirano – najveće deformacije i zaostala naprezanja
 - na preskok
 - povratnim korakom
 - na preskok s povratnim korakom
 - u blokovima
 - kaskadno.



Slika 16. Prikaz pojedinih redosljeda zavarivanja i njihov utjecaj na intenzitet zaostalih naprezanja u zavarenom spoju [25]

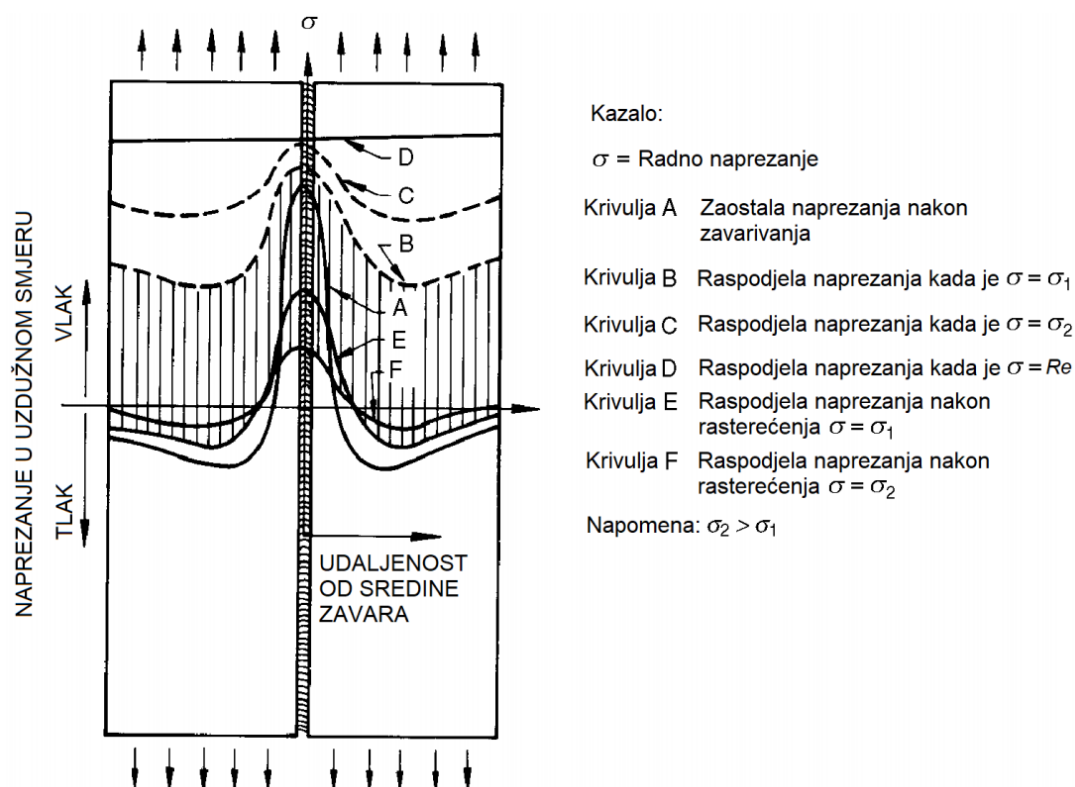
Kod kontinuiranog zavarivanja u jednom smjeru prisutna su najintenzivnija zaostala naprezanja u zavarenom spoju. Poželjno je koristiti neki drugi redosljed zavarivanja, ukoliko to dozvoljavaju konstrukcijski zahtjevi. [25]

5.3. Utjecaj zaostalih napreznja na zavarene konstrukcije

Zaostala napreznja utječu na čvrstoću, dimenzijsku stabilnost i mehaničku izvedbu zavarenih spojeva. Posljedice zaostalih napreznja se najčešće vidljive neposredno nakon zavarivanja ili u određenom razdoblju nakon zavarivanja. Radna i zaostala napreznja se međusobno zbrajaju ako su istog tipa, npr. vlačno opterećenje i vlačna zaostala napreznja (slika 17.). Kada zaostala napreznja budu veća od granice razvlačenja R_e razgrađuju se pojavom plastičnih deformacija. Kod debelostjenih konstrukcija javljaju se troosna zaostala napreznja koja povećavaju osjetljivost konstrukcije na krhki lom te potiču inicijaciju i propagaciju pukotina. Na inicijaciju i propagaciju pukotina najviše utječu vlačna napreznja. [22]

Vlačna zaostala napreznja utječu na radni vijek konstrukcije u kombinaciji s pojavama za koje nisu potrebna velika radna napreznja kako bi nastupile, a one su [26]:

- krhki lom
- umor materijala
- napetosna korozija.



Slika 17. Utjecaj vlačnih opterećenja na longitudinalna zaostala napreznja u sučeljeno zavarenom spoju [26]

Vanjska vlačna opterećenja smanjuju utjecaj zaostalih napreznja. Ukoliko su vlačna opterećenja (radna napreznja) veća od granice zavlčenja R_e , onda je utjecaj zaostalih

naprezanja na zavarenu konstrukciju zanemariv. Kod cikličkih vlačnih opterećenja u zavarenoj konstrukciji, nakon prestanka opterećenja dolazi do popuštanja zaostalih naprezanja u samom zavarenom spoju (slika 17.). Na slici 17. krivulja A predstavlja raspodjelu zaostalih naprezanja nakon zavarivanja. Djelovanjem vlačnog radnog naprezanja σ_1 , naprezanja se zbrajaju i nastaje krivulja B koja ima blažu distribuciju naprezanja. Ukoliko se opterećenje poveća na σ_2 , krivulja naprezanja postaje sve više jednolika (krivulja C). Ako se zavareni spoj optereti s još većim opterećenjem koje je jednako granici razvlačenja R_e , naprezanje u zavarenom spoju postaje ujednačeno u longitudinalnom smjeru (krivulja D). Također, rasterećivanjem zavarano spoja od naprezanja σ_1 i σ_2 , zaostala naprezanja se smanjuju i raspodjela naprezanja je ujednačenija. To prikazuju krivulje E i F na slici 17. [26]

5.3.1. Deformacije u zavarenim konstrukcijama

Deformacije u konstrukciji su posljedice zaostalih naprezanja koje se javljaju tijekom zavarivanja. Kao i zaostala naprezanja, deformacije mogu biti trajnog ili privremenog karaktera. Ukupna deformacija se može izraziti (1):

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\Delta V} + \varepsilon_{Trp} \quad (1)$$

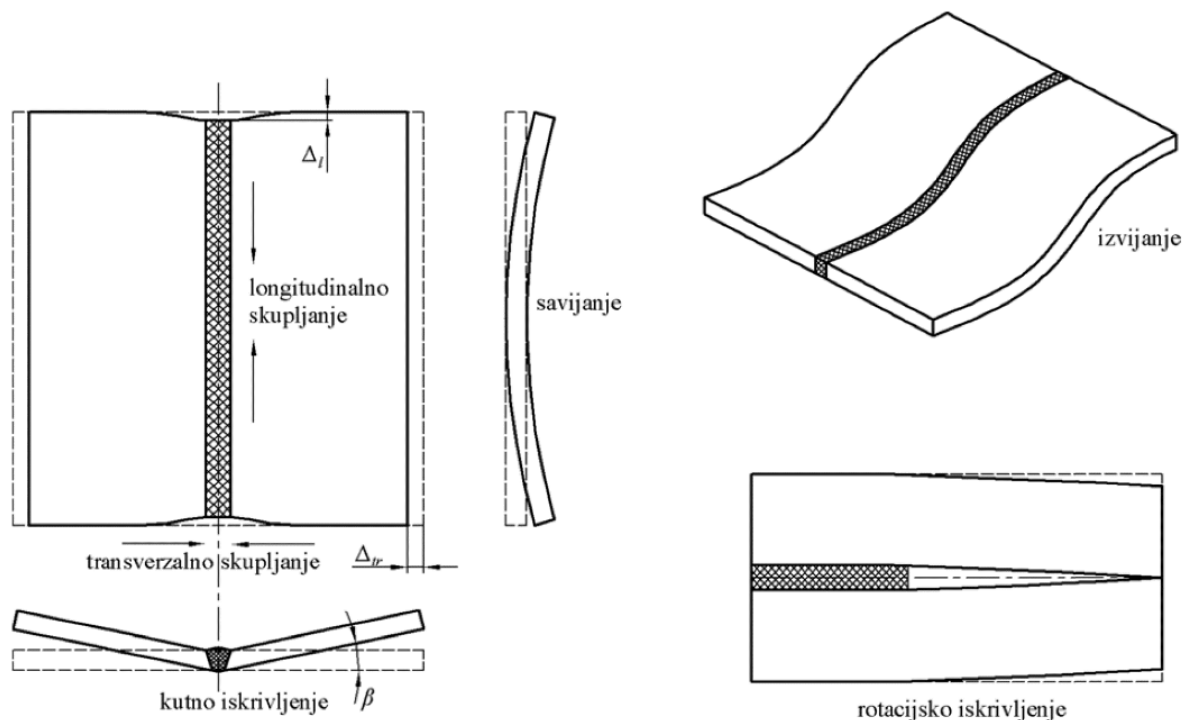
pri čemu su:

- ε_{el} – elastična deformacija,
- ε_{pl} – plastična deformacija,
- ε_{th} – toplinska deformacija,
- $\varepsilon_{\Delta V}$ – volumenska deformacija uslijed faznih promjena materijala,
- ε_{Trp} – plastična deformacija uslijed faznih promjena materijala.

Deformacije u zavarenoj konstrukciji mogu se podijeliti na (slika 18.) [20]:

- longitudinalno skupljanje (skupljanje u smjeru linije zavara)
- transverzalno skupljanje (skupljanje u smjeru okomito na središnju liniju zavara)
- kutno iskrivljenje (iskrivljenje uzrokovano neujednačenom raspodjelom temperature po debljini zavara), tj. rotacija oko linije zavara
- rotacijsko iskrivljenje (kutno iskrivljenje u ravnini ploča koje nastaje zbog toplinskog stezanja ili širenja)
- savijanje (iskrivljenje u ravnini koja prolazi kroz liniju zavara i okomita je na ploče)

- izvijanje (iskrivljenje uzrokovano longitudinalnim tlačnim napreznjima, posebno kod tankih ploča).



Slika 18. Vrste deformacija tijekom i nakon zavarivanja [20]

5.4. Redukcija i uklanjanje zaostalih napreznja

Vlačna zaostala napreznja zajedno s vlačnim radnim opterećenjem mogu znatno smanjiti nosivost i radni vijek zavarene konstrukcije. Ukoliko je u konstrukciji prisutna pukotina, vlačna napreznja su još opasnija jer mogu propagirati rast pukotine. U tom slučaju samo tlačna zaostala napreznja imaju pozitivan utjecaj na konstrukciju. Posljedica deformacija i zaostalih napreznja su nepravilnosti u izradi zavarene konstrukcije. Sanacija tih nepravilnosti uzrokuje gubitak vremena, a time i financijske troškove. Zbog toga poželjno je ukloniti ili barem maksimalno reducirati zaostala napreznja u fazama proizvodnje, a to su [20]:

- faza projektiranja – pravilni izbor tehnologije zavarivanja, broj prolaza i raspored zavarenih spojeva, dimenzija konstrukcije, oblik zavara, predeformiranje i sl. – reduciranje prije samog zavarivanja
- faza zavarivanja – prednamještanje i prednapreznje, predgrijavanje – smanjuje deformacije, ali povećava zaostala napreznja

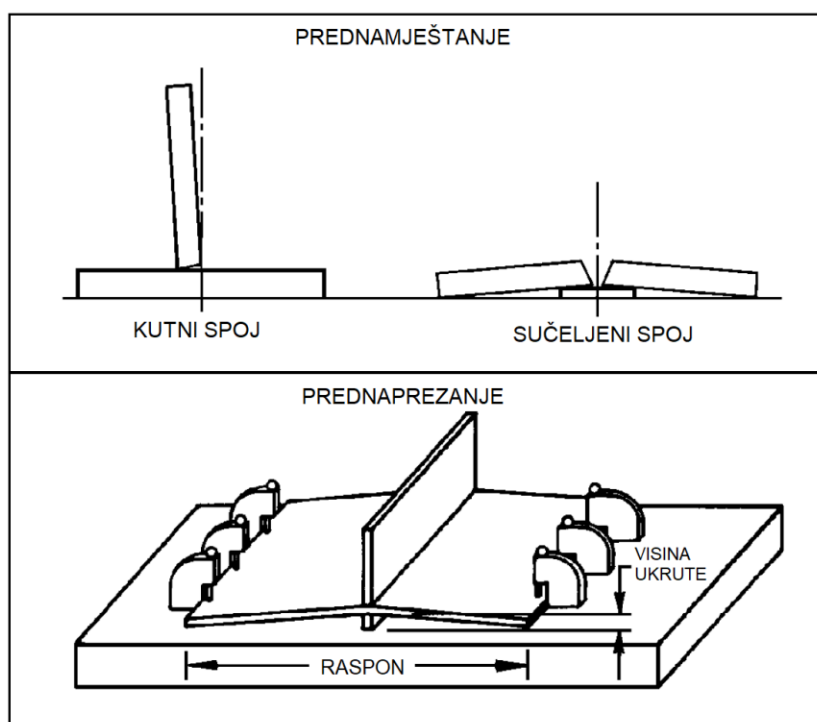
- faza nakon zavarivanja – prisilno mehaničko ispravljanje deformiranja (vibracija, čekićanje i sl.), smanjenje zaostalih napreznja toplinskom obradom.

5.4.1. Broj prolaza i raspored zavora

U fazi projektiranja, prije zavarivanja, važno je definirati pripremu spoja i broj prolaza. Poželjno je odrediti što manje broja prolaza i samih zavora, te time izbjeći nepoželjne deformacije i zaostala napreznja. Simetričan raspored zavora i zavarivanje blizu neutralne osi radnog komada doprinosi reduciranju zaostalih napreznja. Važno je odbrati pripremu spoja za koju je potreban minimalni volumen rastaljenog metala. [25], [26]

5.4.2. Prednamještanje i prednapreznje

Kod faze zavarivanja moguće je prednamještanjem radnih komada ukloniti deformacije. Radni komad se namjesti u poziciju suprotnu od smjera stezanja zavora čime se postiže dimenzijska točnost i smanjuje napreznje u usporedbi sa stezanjem komada. Dozvoljeno je skupljanje zavora i time se razgrađuju zaostala napreznja. Kod prednapreznja zavaruju se ukrute koje drže komad u željenoj poziciji tijekom samog procesa zavarivanja. Nakon zavarivanja ukrute se uklanjaju, a radni komad elastičnim povratom poprima konačan oblik. Slika 19. prikazuje prednamještanje i prednapreznje. [25], [26]



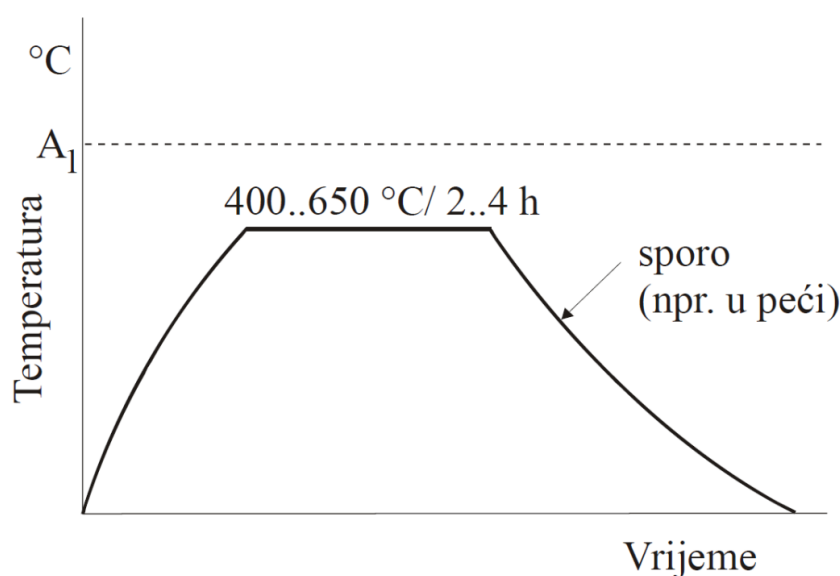
Slika 19. Prednamještanje i prednapreznje ranog komada [26]

5.4.3. Predgrijavanje

Predgrijavanje pozitivno utječe na smanjenje zaostalih naprezanja jer se smanjuje brzina hlađenja metala zavara. To primarno sprječava nastanak tvrdih i krhkih faza u zoni utjecaja topline (ZUT). Kako je temperaturna razlika između osnovnog materijala i metala zavara manja, reducirana su i zaostala naprezanja i deformacije. Predgrijani osnovni materijal se rasteže, a nakon zavarivanja se sporije hladi što smanjuje vlačna i tlačna zaostala naprezanja u zavarenom spoju. [22]

5.4.4. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja odvija se ispod temperature A_1 , što znači da ne dolazi do strukturnih promjena u materijalu. Radni komad koji se žari zagrijava se na temperaturu od 400 do 650 °C i drži se na toj temperaturi dva do četiri sata, ponekad i duže. Točan iznos temperature i vremena žarenja ovisi o vrsti materijala i planiranom intenzitetu redukcije zaostalih naprezanja. Dijagram postupka toplinske obrade, ϑ - t dijagram, prikazan je na slici 20. Kako temperatura radnog komada raste, tako se granica razvlačenja materijala R_e smanjuje. Zbog toga se zaostala naprezanja razgrađuju u obliku plastičnih deformacija. Radni komad se nakon držanja na temperaturi žarenja mora sporo hladiti kako se ne bi pojavila promjena u strukturi, odnosno zaostala naprezanja. Žarenjem je moguće ostvariti smanjenje naprezanja do deset posto od iznosa granice razvlačenja zavara. Uz to, žarenje doprinosi stabilizaciji dimenzija i smanjuje mogućnost nastanka krhkog loma. [25], [27]



Slika 20. ϑ - t dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [27]

5.4.5. **Redukcija zaostalih naprezanja vibracijom**

Metodom vibracije reduciraju se zaostala naprezanja tako da radni komad slobodno vibrira, izoliran od poda pomoću gumenih jastučića. Vibracije su generirane davačem sile koji je sastavljen od elektromotora s mehanizmom ekscentra (vibromotor). Frekvencija vibracija se postupno povećava dok se ne otkrije rezonantna frekvencija radnog komada. Vibriranje radnog komada mjeri akcelerometar koji se postavlja na udaljenosti od jednog metra od radnog komada. Zbog opasnosti od nastanka umora materijala, redukcija vibriranjem ne provodi se na rezonantnoj frekvenciji, nego na nešto nižoj frekvenciji. Tom frekvencijom vibromotor vibrira radni komad u trajanju od 15 do 30 minuta. Postupak se ponavlja dok se rezonantna frekvencija radnog komada ne promijeni, što znači da su zaostala naprezanja u materijalu popuštena jer radni komad vibrira većom amplitudom. [28], [29]

Prednosti redukcije zaostalih naprezanja vibracijom naspram žarenja su [28], [29]:

- 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
- nema plastičnih deformacija
- veličina radnog komada nije ograničena veličinom peći
- u nekim slučajevima postiže se bolja dimenzijska točnost
- nema nastanka oksida zbog izlaganja visokim temperaturama.

Nedostaci [29]:

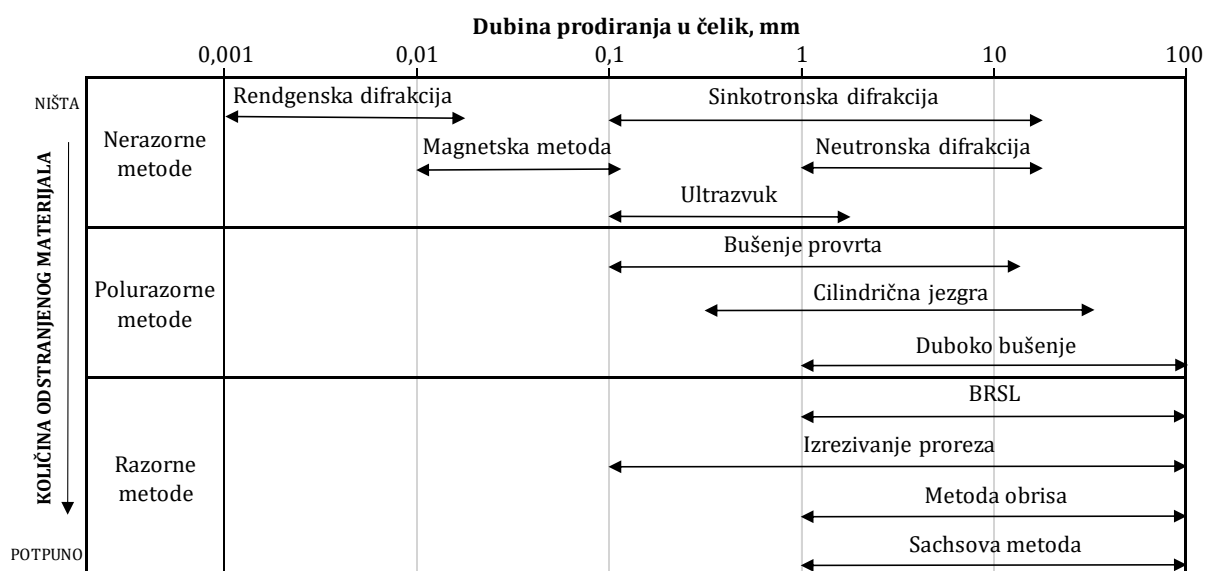
- mogućnost povećanja zaostalih naprezanja na čvršćim mjestima konstrukcije
- čvršće konstrukcije ne mogu vibrirati na rezonantnoj frekvenciji
- metoda nije toliko poznata kao žarenje za redukciju zaostalih naprezanja.

6. METODE MJERENJA ZAOSTALIH NAPREZANJA

Zaostala naprežanja uvijek su prisutna u zavarenim konstrukcijama i nije ih moguće izbjeći. Kako bi se smanjio njihov utjecaj na samu konstrukciju, potrebno je znati njihov iznos i smjer, što se ostvaruje mjerenjem zaostalnih naprežanja. Razvojem same tehnologije i procesa zavarivanja, razvile su se i razne metode mjerenja zaostalnih naprežanja koje se mogu podijeliti na tri glavne skupine [30]:

- nerazorne metode,
- polurazorne metode i
- razorne metode.

Spomenute metode i njihova raspodjela prikazane su na slici 21. [30]



Slika 21. Podjela metoda mjerenja zaostalnih naprežanja [30]

Pomoću nerazornih metoda mjere se fizičke veličine materijala čiji se iznos ili promjena iznosa mogu preračunati u zaostala naprežanja u materijalu. Podjela nerazornih metoda [30]:

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

Polurazornim metodama uklanja se mali dio materijala, koji je dovoljan za utvrditi zaostala naprezanja bez narušavanja funkcionalnosti konstrukcije ili dijela konstrukcije na kojim se provodi mjerenje. Polurazorne metode su [30]:

- bušenje provrta,
- cilindrična jezgra
- duboko bušenje.

Kod razornih metoda princip mjerenja je isti kao i kod polurazornih, ali kod razornih se narušava funkcionalnost konstrukcije. Kako se materijal uklanja, dolazi do elastične deformacije radi popuštanja zaostalih naprezanja oko mjenog mjesta. Te nastale deformacije mjere se i preko njih se izračunavaju zaostala naprezanja. Velik nedostatak ovih metoda mjerenja je uklanjanje materijala, odnosno narušavanje konstrukcije. [30]

Od razornih metoda izdvajaju se [30]:

- BRSL (engl. „*Block Removal, Splitting and Layering*“) – uklanjanje odjeljaka, razdvajanjem i raslojavanjem
- izrezivanje proreza,
- metoda obrisa,
- Sachsova metoda.

6.1. Rendgenska difrakcija

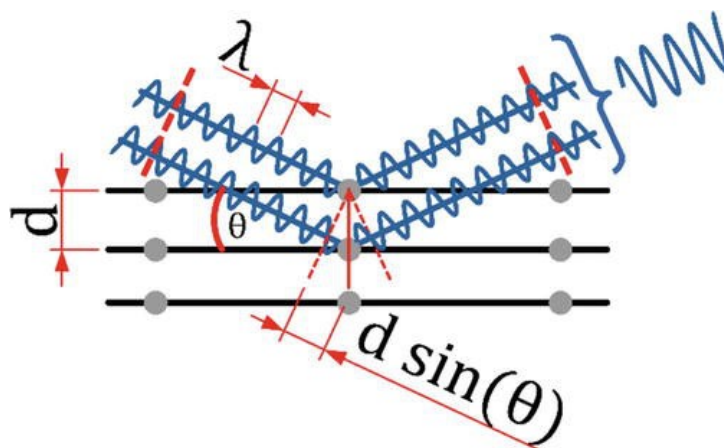
Metoda rendgenske difrakcije (engl. „*X-ray diffraction*“) jedna je od najpouzdanijih metoda nerazornih alata za mjerenje zaostalih naprezanja u polikristalnim materijalima. Ova metoda je precizna i ekonomična i primjenjuje se u laboratorijskim istraživanjima, ali i kod ispitivanja na terenu. Princip mjerenja zaostalih naprezanja metodom rendgenske difrakcije temelji se na Braggovom zakonu. Braggov zakon (2) opisuje ovisnost udaljenosti kristalnih ravnina, upadnog kuta rendgenskih zraka i njihove valne duljine. Izraz za Braggov zakon [31], [32]:

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

Gdje je:

- $n, /$ – red zračenja (cijeli broj)
- λ, nm – valna duljina
- d, nm – udaljenost kristalnih rešetki
- $\theta, ^\circ$ – difrakcijski kut.

Kada na površinu nekog polikristalnog materijala pada snop rendgenskih zraka, dolazi do difrakcije pod određenim kutom ovisnim o položaju ravnine kristalne rešetke materijala. Zraka koja padne na drugu kristalnu ravninu, koja je ispod površine materijala, prelazi duži put. Ukoliko je taj put duži za višekratnik valne duljine, dolazi do konstruktivne interferencije zbog čega se intenzitet izlazne zrake povećava (slika 22.). Slika koja nastaje tijekom konstruktivne i destruktivne interferencije naziva se ogibnom slikom. [31]



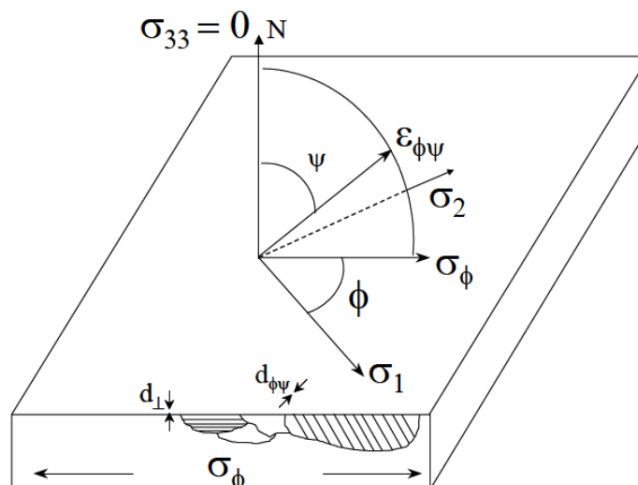
Slika 22. Braggov zakon [33]

Poznavajući ogibnu sliku neopterećenog materijala, moguća je usporedba s ogibnom ogibnom slikom opterećenog materijala. Kod opterećenog materijala kristalne ravnine su na različitoj udaljenosti nego kod neopterećenog. Iz te usporedbe proizlazi izraz (3) za relativno produljenje [32]:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (3)$$

Pri čemu je:

- ε , / – relativno produljenje,
- d_n , nm – udaljenost opterećenih ravnina,
- d_0 , nm – udaljenost neopterećenih ravnina.



Slika 23. Shema uzorka u ravninskom stanju napreznja s prikazom različitih orijentacija kristalnih ravnina [32]

Kristalne rešetke u realnosti imaju različite orijentacije u prostoru kako je prikazano na slici 23. Zbog toga je za određivanje relativnog produljenja potrebno izvesti ispitivanje pod više različitih kutova koji se podudaraju s orijentacijom ravnina u kristalnim zrnima. Za to su bitni kutevi ψ i ϕ prikazani na slici, a izraz za relativno produljenje (4) pod tim kutovima glasi [32]:

$$\varepsilon_{\psi\phi} = \frac{d_{\psi\phi} - d_0}{d_0} \quad (4)$$

Gdje je:

- $\varepsilon_{\psi\phi}$, / – relativno produljenje u smjeru kutova ψ i ϕ ,
- $d_{\psi\phi}$, nm – udaljenost ravnina pod kutovima ψ i ϕ ,
- d_0 , nm – udaljenost neopterećenih ravnina.

Pomoću dobivenog relativnog produljenja i modula elastičnosti izračunava se napreznje preko Hookeovog zakona (5) koji glasi [32]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Pri čemu su:

- σ , MPa – napreznje,
- E , MPa – modul elastičnosti,
- ε , / – relativno produljenje.

Izvođenjem Hookeovog zakona i izraza za relativno produljenje, dobiva se izraz za izračun naprezanja (σ_ϕ) u bilo kojoj orijentaciji u uzorku, prema slici 23. označenim σ_ϕ [32]:

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1 + \nu) \cdot \sin^2 \psi} \cdot \left(\frac{d_\psi - d_n}{d_n} \right) \quad (6)$$

Gdje su:

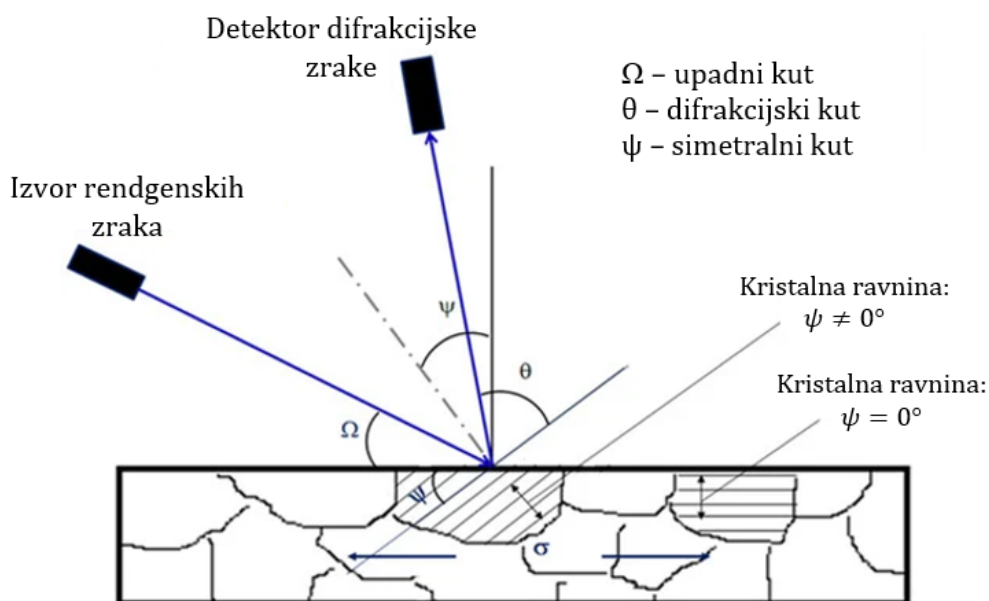
- σ_ϕ , MPa – naprezanje u ravnini uzorka pod kutom
- E , MPa – modul elastičnosti,
- ν , / – Poissonov faktor,
- ψ , ° – kut kristalnih ravnina s obzirom na normalu površine uzorka (simetralni kut),
- d_n , nm – udaljenost opterećenih ravnina,
- d_ψ , nm – udaljenost opterećenih ravnina pod kutom ψ

6.2. Metode mjerenja rendgenskom difrakcijom

Najčešće korištena metoda mjerenja zaostalih naprezanja u polikristalima je $\sin^2 \psi$ metoda. Detektori rendgenskih zraka kod $\sin^2 \psi$ metode su multidimenzionalni ili jednodimenzionalni. Razvijanjem tehnologije razvili su se i dvodimenzionalni detektori, kao što su poluvodički detektori, 2D - PSPC (2D proporcionalni brojači osjetljivi na položaj, engl. „*Position Sensitive Proportional Counters*“) i detekcijske ploče – IPs (engl. „*Imaging Plates*“). Detekcijske ploče koriste se kod $\cos \alpha$ metode mjerenja zaostalih naprezanja. Na njima se bilježi cijeli Debye – Scherrerov prsten koji prikazuje zaostala naprezanja u dvodimenzionalnom sustavu. [33], [34]

6.2.1. Metoda $\sin^2 \psi$

U $\sin^2 \psi$ metodi promjena razmaka između ravnina kristalne rešetke otkriva se promjenom upadnog kuta ψ_0 rendgenskih zraka. Shematski prikaz $\sin^2 \psi$ metode prikazan je na slici 24. Prilikom mjerenja ovom metodom potrebno je mijenjati kutove upada zraka pomicanjem, odnosno rotiranjem detektora oko mjesta zračenja pošto je sustav nulti i jednodimenzionalni. Preporučeno je mjeriti iz sedam različitih kutova (smjerova). Zbog toga ovaj sustav mora imati visoku stabilnost i stroge tolerancije prilikom postavljanja i tijekom procesa mjerenja kako bi se postigla maksimalna točnost mjerenja. [35]

Slika 24. Shematski prikaz $\sin^2 \psi$ metode [36]

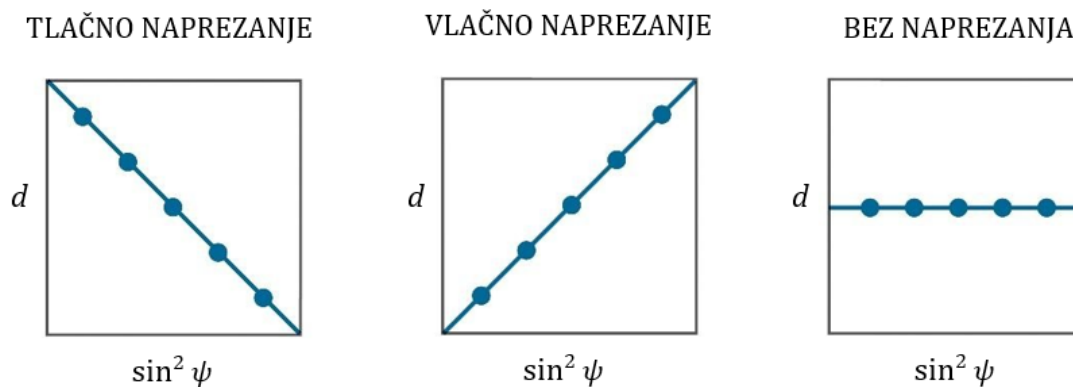
Kutovi koji se mjere kod $\sin^2 \psi$ metode [36]:

- upadni kut Ω , ° – kut između upadne zrake i površine uzorka,
- difrakcijski kut θ , ° – kut između kristalne ravnine i difraktirane zrake,
- simetralni kut ψ , ° – kut između normale na kristalnu ravninu i normale na površinu uzorka.

Relacija između upadnog, difrakcijskog i simetralnog kuta dobivena je izrazom (7):

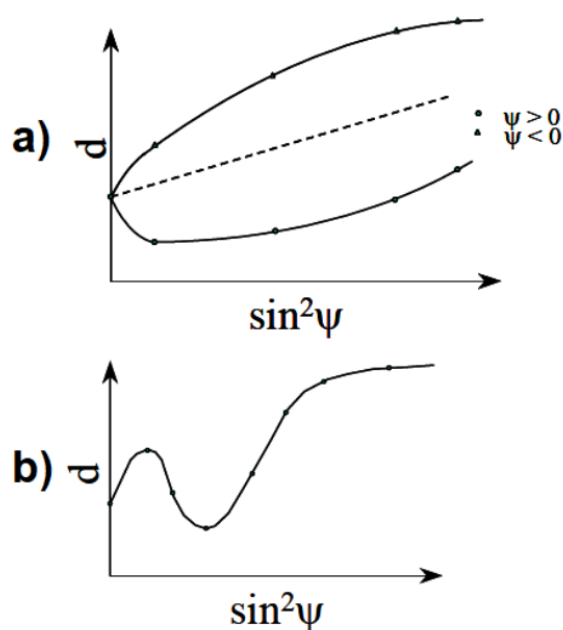
$$\psi = \theta - \Omega \quad (7)$$

Princip ove metode temelji se na tome da različite kristalne ravnine difraktiraju rendgenske zrake različitom jačinom pod određenim kutom. S obzirom na upadni kut rendgenskih zraka, svaka kristalna rešetka ima različiti spektar vrhova difraktiranih zraka. Kako bi mjerenje bilo točno mora se provesti u najmanje dva različita nagiba, odnosno simetralna kuta. Rezultat mjerenja je udaljenost između kristalnih ravnina. Udaljenost d koje daju najveći intenzitet difraktiranih zraka za određeni simetralni kut ψ prikazuju se na $\sin^2 \psi$ - d dijagramu, gdje se utvrđuje intenzitet i vrsta naprezanja. Primjeri $\sin^2 \psi$, d dijagrama prikazani su na slici 25. [32], [36]



Slika 25. Primjer $\sin^2 \psi$, d dijagrama za pojedina naprezanja [31]

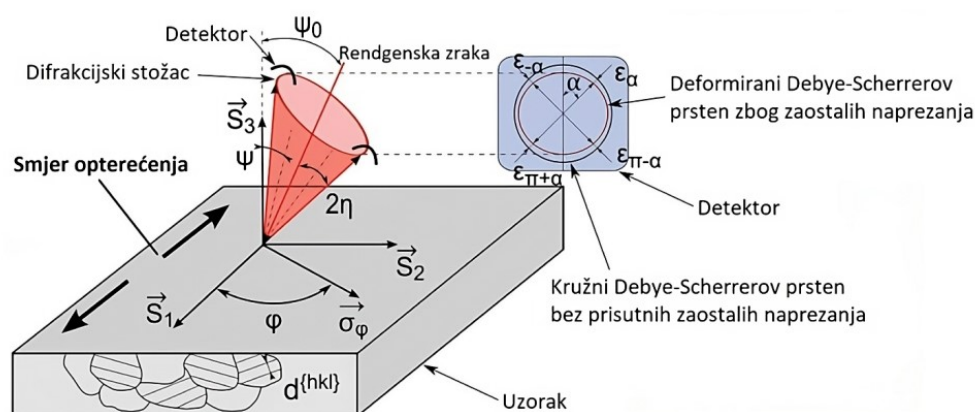
Ovisno o stanju materijala mijenjaju se dijagrami, odnosno funkcija ne mora biti linearni pravac, nego krivulja. Naprimjer ako materijal ima nejednolike deformacije, dolazi do razdvajanja krivulje (slika 26. pod a)), a ukoliko je mikrostruktura materijala usmjerena dolazi do oscilacija krivulje (slika 26. pod b)), što znači da su naprezanja u materijalu nehomogena. [32]



Slika 26. Dijagram $\sin^2 \psi$, d : a) nejednolike deformacije, b) usmjerena mikrostruktura [32]

6.2.2. Metoda $\cos \alpha$

Metoda $\cos \alpha$ ima mnogo prednosti naspram drugih metoda. Difraktirane zrake odbijaju se od površine polikristalnog materijala pod određenim kutom u svim smjerovima u obliku stošca kako je prikazano na slici 27. Rendgenske zrake tada dolaze do dvodimenzionalnog detektora koji zapisuje podatke u Debye – Scherrerovom prstenu. Nije potrebno mjeriti iz više kutova kao kod $\sin^2 \psi$ metode koja koristi jednodimenzionalni detektor. Time se smanjuje samo vrijeme mjerenja, koje kod $\cos \alpha$ metode za feritne uzorke iznosi otprilike 60 sekundi. U analizatoru se uspoređuje deformirani prsten s nedeformiranim prstenom koji se nalazi u bazi podataka. Naprezanja se na Debye – Scherrerovom prstenu očitavaju promjenom oblika samog prstena koji ukazuje na prisutne deformacije u materijalu. Za određivanje deformacije potrebni su rezultati mjerenja u dvije nasuprotne točke na prstenu na zamišljenoj ravnoj liniji koja je pod određenim azimutnim kutom α . Oblik dobivenog prstena daje informacije o prisutnim naprezanjima, orijentaciji i veličini kristalnog zrna. Kod materijala s grubozrnatom strukturom, primjena ove metode je kompleksnija jer se zbog veličine i neuniformnosti zrna ne formira cjeloviti Debye – Scherrerov prsten. Prilikom ispitivanja na takvim materijalima, mjerenje se mora odvijati na više načina, kao naprimjer pomicanjem uzorka tako da površina ostaje u istoj ravnini, promjenom nagiba uzorka ili promjenom nagiba upadne zrake između svakog novog mjerenja. [37], [34]



Slika 27. Shematski prikaz $\cos \alpha$ metode [37]

Optički sustav za mjerenje kod $\cos \alpha$ metode ne treba imati goniometar kao kod $\sin^2 \psi$ metode. Zbog toga su sustavi za mjerenje manjih dimenzija i lakši, što omogućava mjerenje i u laboratoriju i na terenu. Metoda je precizna i prikladna za mjerenje malih površina, moguće je određivanje troosnog naprezanja, ali zbog male dubine prodiranja većinom se analiziraju dvoosna naprezanja. [37], [34]

6.2.3. Prednosti $\cos \alpha$ metode

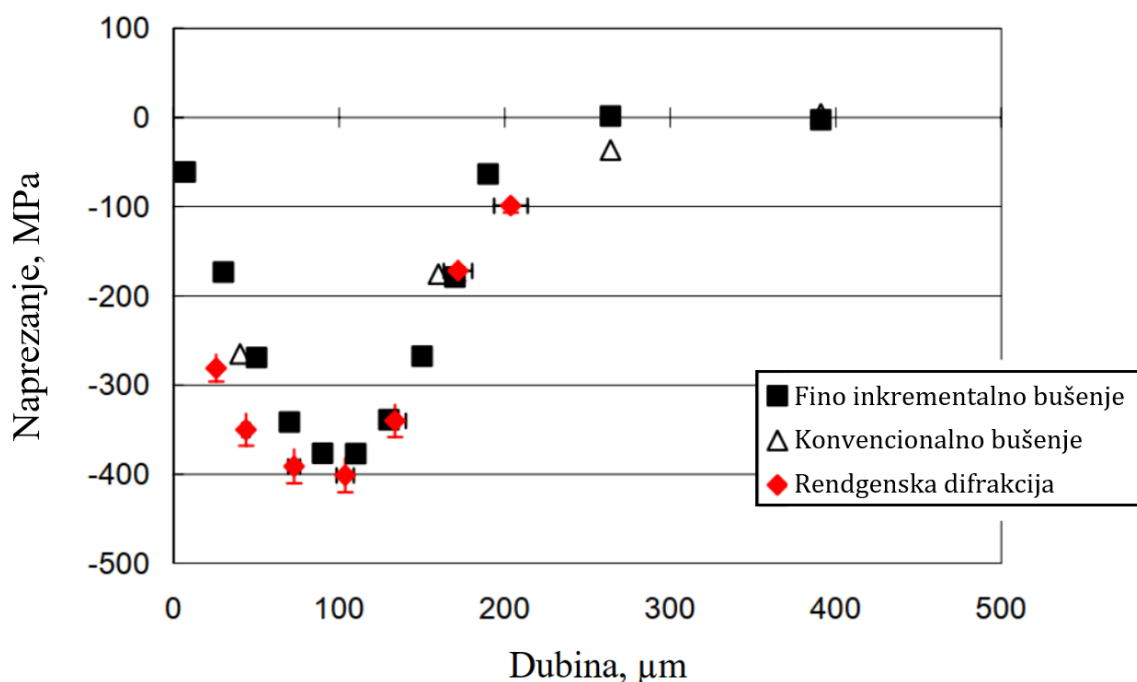
U usporedbi sa $\sin^2 \psi$ metodom, prednosti $\cos \alpha$ metode su sljedeće [34]:

- za određivanje naprezanja nije potrebna egzaktna vrijednost difrakcijskog kuta izmjerenog na nedeformiranom uzorku,
- jednokratnim izlaganjem uzroka rendgenskim zrakama, normala ravnine i posmična naprezanja vidljivi su iz $\cos \alpha$ i $\sin \alpha$ dijagrama, čija linearnost ukazuje na pouzdanost izmjerenih vrijednosti naprezanja,
- optički sustav je jednostavniji i ne zahtijeva dodatne mehanizme za skeniranje jer se mjerenje provodi jednokratnim izlaganjem uzorka rendgenskim zrakama – analizatori naprezanja su manji, lakši i praktičniji za korištenje i mjerenje na terenu,
- iznimno kratko trajanje mjerenja (oko 60 sekundi za feritni čelik),
- pogodna je za mjerenje na lokalno malom području i na uskim dijelovima konstrukcije,
- Debye-Scherrerov prsten pruža informacije o veličini i teksturi kristalnog zrna,
- jednokratnom ekspozicijom moguće je istovremeno snimanje više difrakcija pojedinih faza, čime je moguće odrediti količinu zaostalog austenita u čelicima.

6.2.4. Pouzdanost mjerenja $\cos \alpha$ metodom

Pouzdanost mjerenja zaostalih naprezanja može se provjeriti usporedbom izmjerenih vrijednosti zaostalih naprezanja kod više metoda. Točnost mjerenja metodom $\cos \alpha$ ekvivalentna je s točnošću dobivenom $\sin^2 \psi$ metodom, što je dokazano prilikom mjerenja različitih materijala, kao što su čelik, nehrđajući čelici, legure nikla i aluminijski i ostalo. Pouzdanost je moguće provjeriti i uz ispitivanje savijanjem. Nakon ispitivanja savijanjem u četiri točke, rezultati mjerenja uspoređuju se sa rezultatima rendgenske difrakcije. [34]

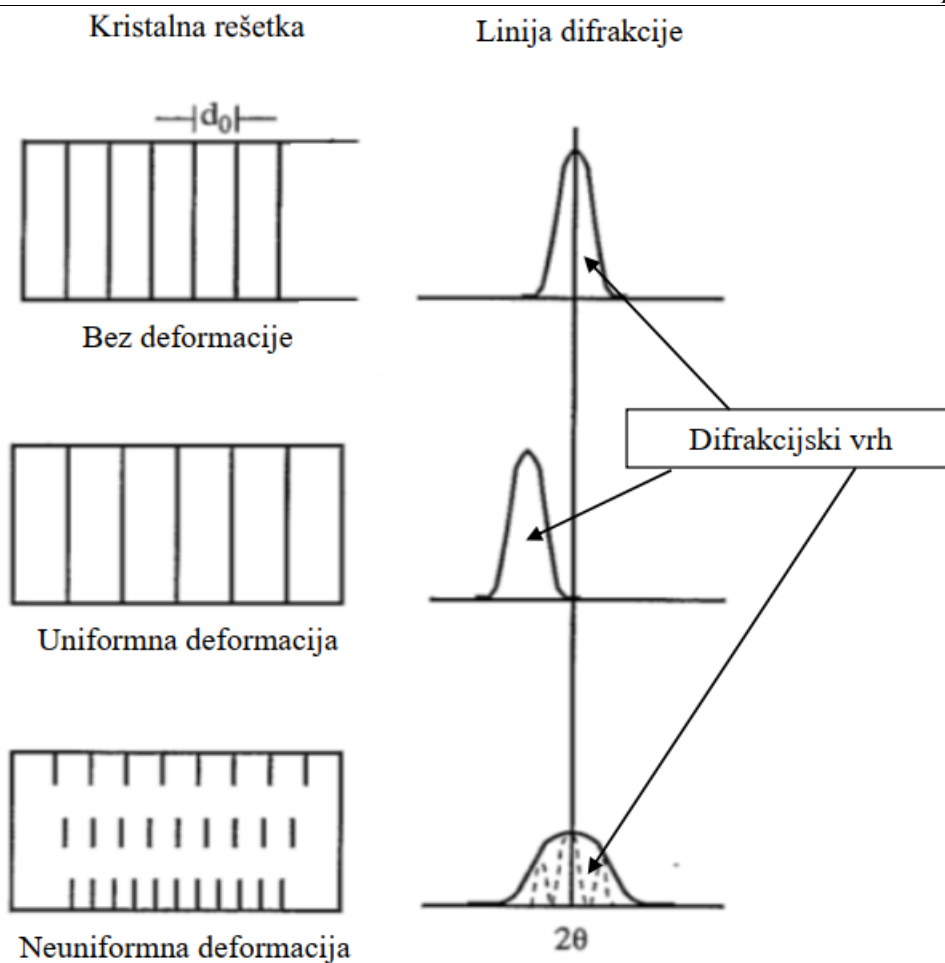
U usporedbi sa polurazornim metodama, rendgenska difrakcija daje vrlo dobre rezultate. Na slici 28. prikazan je dijagram usporedbe vrijednosti naprezanja izmjerenih rendgenskom difrakcijom (nerazorna metoda) i bušenjem provrta, na strojno obrađenom uzorku aluminijski. [32]



Slika 28. Dijagram usporedbe pouzdanosti izmjerenih vrijednosti rendgenske difrakcije s metodama bušenja provrta [32]

6.2.5. Problematika prilikom mjerenja rendgenskom difrakcijom

Prilikom mjerenja rendgenskom difrakcijom, moguća je pojava greški za određene slučajeve. Kako difrakcijski kut 2θ mora biti precizno određen, kod uređaja za mjerenje potrebno je paziti na nekoliko faktora. Poravnanje uređaja, pozicioniranje središta rotacije i moguće prisutne pozadinske smetnje uvelike utječu na rezultate mjerenja. Ključna stavka kod mjerenja je mikrostruktura materijala. Zrna koja su neuniformno deformirana uzrokuju pomak i širenje difrakcijskog vrha, što otežava mjerenje zbog velikih oscilacija rezultata. Utjecaj uniformnih i neuniformnih deformacija na mjerenje rendgenskom difrakcijom prikazan je na slici 29. Kod uniformno deformiranih kristalnih zrna difrakcijski vrh se pomiče, a kod neuniformno deformiranih, difrakcijski vrh se širi, što znači da rezultati jako osciliraju. Uzorak koji je bez deformacije daje normalan difrakcijski vrh bez širenja i pomaka. [38]



Slika 29. Utjecaj uniformnih i neuniformnih deformacija na položaj i širinu difrakcijskog vrha [38]

6.2.6. Utjecajni faktori kod mjerenja rendgenskom difrakcijom

Faktori koji utječu na mjerenje rendgenskom difrakcijom su sljedeći [32]:

- početna priprema uzorka
- sastav i homogenost uzorka
- veličina zrna
- veličina i oblik uzorka
- hrapavost površine
- temperatura.

6.2.6.1. Početna priprema uzorka

Prije samog mjerenja zaostalih naprezanja, površinu mjerenog uzorka potrebno je očistiti odgovarajućim sredstvima za čišćenje i odmašćivanje. Prodor rendgenskih zraka kod većine materijala je od 5 do 50 μm , zbog čega se mehaničke metode čišćenja poput brušenja i strojne obrade trebaju izbjegavati jer unose dodatna površinska zaostala naprezanja. Najpovoljniji slučaj mjerenja zaostalih naprezanja je mjerenje u tvorničkom (proizvedenom) stanju. Kod materijala koji se prevlače i boje, mjerenje je potrebno provesti prije samog postupka bojanja jer sloj prevlake ili boje negativno utječe na intenzitet mjerenja. Prevlake, slojevi boje, hrđe i ostalih nepoželjnih površinski slojevi mogu se ukloniti kemijskim putem. Za to je primjenjivo elektropoliranje koje ne oštećuje površinu uzorka nego kemijski odstranjuje sve nepoželjne površinske slojeve. [32]

Rezanje uzoraka također se mora izbjegavati zbog mogućnosti unosa dodatnih naprezanja. Ukoliko je potrebno rezanje, zamjenska solucija je korištenje EDM (engl. „*Electro Discharge Machining*“) – elektroerozija. Ova metoda strojne obrade unosi minimalna zaostala naprezanja, ali postoji opasnost prilikom zagrijavanja uzorka zbog mogućnosti popuštanja zaostalih naprezanja. Promjenu zaostalih naprezanja poželjno je pratiti tijekom i nakon rezanja. [32]

6.2.6.2. Sastav i homogenost uzorka

Udaljenost između kristalnih rešetki, koji je jedan od parametara kod mjerenja zaostalih naprezanja, može se promijeniti ukoliko dođe do promjene sastava materijala u uzorku. Kako bi se to izbjeglo volumni sastav materijala mora biti konstantan kod uzorka koji se zrači. Glavni zahtjevi za mjereni uzorak su [32]:

- materijal uzorka mora biti kristalni ili polikristalni,
- difrakcijski kut 2θ u rasponu od 125 do 170 °

Prilikom mjerenja višefaznih materijala, izmjereno zaostalo naprezanje proizlazi samo iz jedne određene faze, a ukupno zaostalo naprezanje u uzorku povezano je s naprezanjima u svakoj pojedinoj fazi i njihovim volumnim udjelima. [32]

6.2.6.3. Veličina zrna

Veličina zrna znatno utječe na rezultate mjerenja zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom. Grubozrnata struktura materijala daje malu količinu zrna u uzorku, što znači da Braggov zakon vrijedi samo za nekolicinu zrna. Time se smanjuje intenzitet i točnost lokacije difrakcijskog vrha. Naprimjer kod mjerenja $\sin^2 \psi$ metodom, gdje se upotrebljavaju

nultidimenzionalni i jednodimenzionalni detektori, minimalni broj potrebnih zrna unutar ozračenog područja iznosi od 1000 do 5000 zrna. Broj zrna varira ovisno o orijentaciji zrna i uvjetima mjerenja. [32]

6.2.6.4. *Veličina i oblik uzorka*

Za mjerenje zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom, oblik i veličina uzorka nisu kritični. Potrebno je samo odabrati prikladno ravno područje za mjerenje, jedan do dva milimetra odaljeno od ruba uzorka kako bi se izbjegao učinka popuštanja zaostalih naprezanja. Također, ne smije biti nikakva prepreka između interakcije upadnih i difraktiranih zraka. [32]

6.2.6.5. *Hrapavost površine*

Poželjno je da površina uzorka ima minimalnu hrapavost, ali zbog nemogućnosti dodatne obrade površine mjerenja se mogu provoditi i na hrapavijim površinama. Kod analize rezultata potrebno je biti pažljiv jer izmjerena zaostala naprezanja mogu biti pod snažnijim utjecajem „vrhova“ hrapave površine. [32]

6.2.6.6. *Temperatura*

Temperatura uzorka prilikom mjerenja zaostalih naprezanja, trebala bi biti konstantna kako se ne bi javljale promjene u kristalnoj rešetci zbog toplinskog širenja materijala. Minimalna razlika temperature tijekom mjerenja neće imati veliki utjecaj na točnost mjerenja. Ukoliko se mjerenja moraju provoditi na povišenim temperaturama, temperatura uzorka se također mora držati konstantnom. Takva mjerenja se provode na relativno malim uzorcima, a radi pretvaranja izmjerenih deformacija u naprezanja potrebno je znanje o temperaturnoj varijaciji elastičnih konstanti. [32]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje, odnosno mjerenje zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom, $\cos \alpha$ metodom. Mjerenja su provedena na četiri uzorka T-zavarenih spojeva. Korištene su dvije debljine limova i dvije različite plinske mješavine za zaštitnu atmosferu. Na temelju makroizbrusaka provedena je analiza o utjecaju izgleda zavara na sama zaostala napreznja.

7.1. Oprema za zavarivanje

Korišten je izvor struje Daihen Varstroj, WB – P500L koji spada u noviju generaciju MIG/MAG uređaja za zavarivanje. Sadrži mikroprocesor Welbee koji nudi mnoge mogućnosti i prednosti kod ručnog i automatiziranog zavarivanja. Pogodan je za zavarivanje svih vrsta čelika i obojenih metala. Također, ima mogućnost impulsnog zavarivanja. Na slici 30. prikazan je uređaj Daihen Varstroj, WB – P500L, a u tablici 4. prikazane su tehničke karakteristike izvora struje.

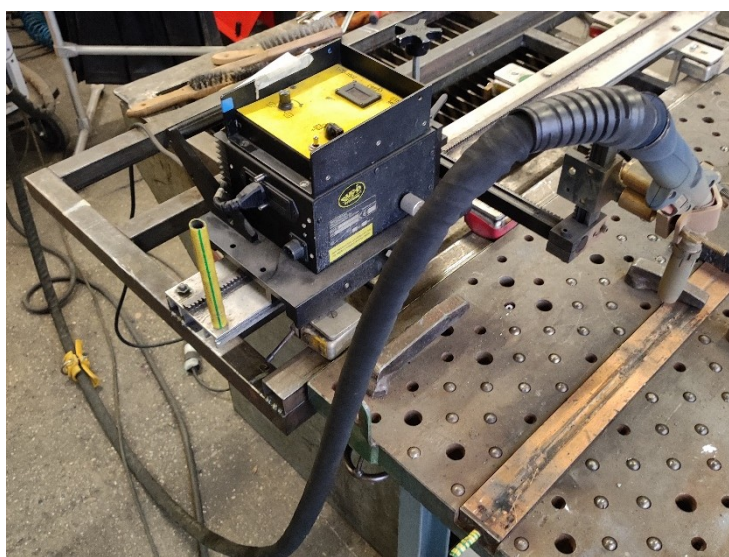


Slika 30. Daihen Varstroj, WB – P500L [39]

Tablica 4. Tehničke karakteristike izvora struja Daihen Varstroj WB - P500L [39]

Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Priključni napon	400 V (+/- 15 %)
Nazivna izlazna struja	500 A
Nazivni izlazni napon	39 V
Raspon struje zavarivanja	30-500 A
Raspon napona zavarivanja	12-45 V
Maksimalni izlazni napon	80 V
Radna temperatura	-10 do 40 °C
Dimenzije	395×710×762 mm
Masa	83 kg
Statička karakteristika	Konstantna naponska karakteristika

Uzorci su zavareni automatiziranim postupkom zavarivanja korištenjem traktora za zavarivanje „BUG – O MDS 1002“ prikazanog na slici 31. Primjenjuje se za rezanje ili zavarivanje materijala po pravocrtnoj liniji jer omogućuje točno pozicioniranje i upravljanje brzinom zavarivanja. Također ima mogućnost postavljanja pištolja za zavarivanje na točnu udaljenost od radnog komada kao i pod određenim kutom. Time omogućuje točno i precizno postavljanje parametara za zavarivanje uzoraka. Raspon brzina zavarivanja je od 5,1 do 304,8 cm/min, a nosivost hvataljke iznosi 27 kg. [40]

**Slika 31. Traktor za automatizirano zavarivanje „BUG – O MDS 1002“**

7.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal je konstrukcijski čelik oznake S355J2+N. Spada u nelegirane čelike te ima nizak udio ugljika, prema tome ima i dobru zavarljivost. Udarni rad loma iznosi 27 J i provedeno je naknadno normalizacijsko žarenje. Koristi se brojnim granama industrije zbog niske cijene i dobre zavarljivosti i oblikovljivosti. Isporučuje se u toplo valjanom i normaliziranom stanju. Debljina osnovnog materijala u uzorcima iznosi 5 i 20 mm. U tablici 5. prikazana su mehanička svojstva, a u tablici 6. kemijski sastav čelika. [41]

Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S355J2+N [41]

Temperatura ispitivanja [°C]	20
Granica razvlačenja [N/mm]	355
Vlačna čvrstoća [N/mm]	470
Istezljivost A_5 [%]	20

Tablica 6. Kemijski sastav čelika S355J2+N [41]

Kemijski element	Maseni udio elemenata [%]
C	0,17
Si	0,02
Mn	1,41
P	0,013
S	0,007
Al	0,031
Nb	0,005
V	0,005
Ni	0,090
Cr	0,060
Cu	0,040
Mo	0,010
Ti	0,005
N	0,008

7.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal u eksperimentalnom dijelu rada korištena je metalnim prahom punjena žica promjera 1,2 mm. Prema normi HRN EN ISO 17632-A oznake T46 2 M M 4 H5, a trgovačkog naziva KX – 706M. Karakteristike ove žice prikazane su na slici 32.

KX - 706M

NORME

HRN EN ISO 17632-A	AWS / ASME SFA-5.18
T46 2 M M 4 H5	E70C-6M

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Metalom punjena žica za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 490 N/mm². Značajka ove žice jest dobra penetracija, visoka otpornost nastanku poroziteta, dobro razljevanje taline metala zavara te nizak udio vodika u metalu zavara. Žica se primjenjuje za zavarivanje u jednom i više prolaza.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

ReL N/mm ²	Rm N/mm ²	A ₅ %	KV (-20°C) J
480	540	29	70

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA

	C	Si	Mn	P	S
%	0,04	0,60	1,50	≤ 0,014	≤ 0,010

ZAŠTITNI PLIN

M21 (Ar + 18%CO₂) protok 15 - 25 l/min

PARAMETRI ZAVARIVANJA

Promjer žice mm	Jakost struje A	Napon el. luka V	Polaritet
1,2	160 - 340	24 - 32	DCEP (DC+)

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj	Težina kg
1,2	Žica do žice (S-S)	5; 15

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (3S3YS); DNV (III YMS); GL (3YS); LR (3YS)



Slika 32. Karakteristike metalnim prahom punjene žice KX - 706M [42]

7.4. Zaštitna atmosfera

Za zaštitnu atmosferu korištene su trokomponentne Ar-CO₂-O₂ plinske mješavine. Korištene su dvije mješavine s različitim udjelima pojedinih plinova. Prilikom zavarivanja uzorka 1F1 i 1F5 korištena je plinska mješavina C6 X1, dok je za uzorak 2F1 i 2F5 korištena plinska mješavina C12 X2. Protok plina je 20 l/min. U tablici 7. prikazane su specifikacije tih plinskih mješavina, a na slici 10. vidljive su plinske boce samih mješavina.

Tablica 7. Specifikacije korištenih plinskih mješavina [18]

Naziv proizvoda	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio [%]			Primjena (čelici)
		Ar	CO ₂	O ₂	
Ferroline C6 X1	M24	93	6	1	Nelegirani i niskolegirani
Ferroline C12 X2	M24	86	12	2	Nelegirani i niskolegirani



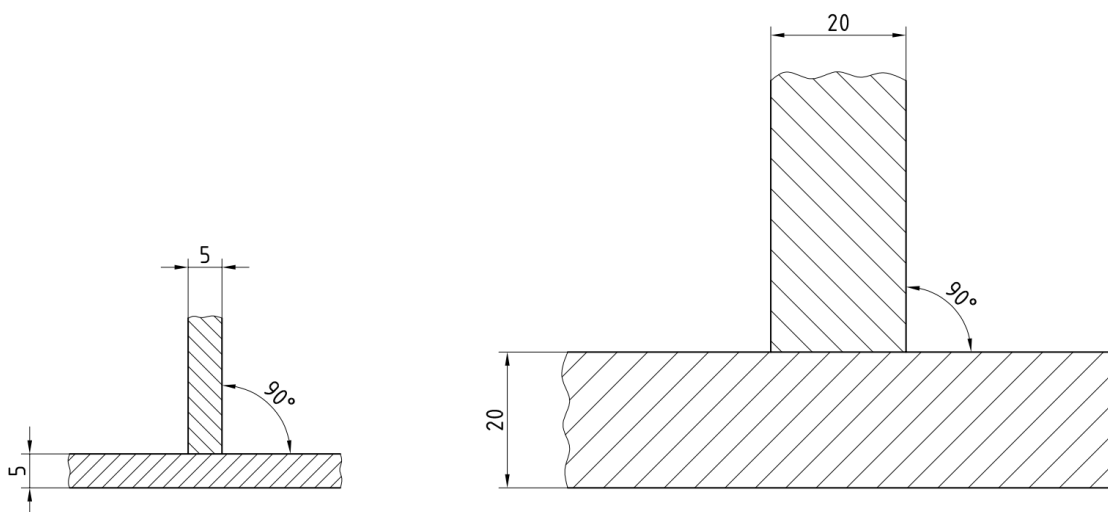
Slika 33. Boce korištenih plinskih mješavina C6 X1 i C12 X2

7.5. Proces zavarivanja

U nastavku je opisana priprema kutnog spoja i parametri zavarivanja MCAW postupkom.

7.5.1. Priprema kutnog spoja

Za eksperiment koristili su se uzorci debljine 5 (1F5, 2F5) i 20 mm (1F1, 2F1). Za uzorke koriste se dva obostrano kutno zavarena spoja, a materijal uzoraka je konstrukcijski čelik S355J2+N. Limovi su postavljeni pod kutom od 90° , bez razmaka između limova. Prije samog postupka zavarivanja, limovi su očišćeni alkoholom. Slika 34. prikazuje pripreme kutnih spojeva.



Slika 34. Pripreme kutnih spojeva

7.5.2. Parametri zavarivanja

Kutni spoj zavaren je obostrano MCAW postupkom, zavari su zavareni u jednom prolazu, u PA položaju zavarivanja. Korištena je istosmjerna struja s taljivom elektrodom spojenom na pozitivan pol izvora struje. Nakon zavarivanja zavar je iščetkan i očišćen etanolom. Korišteni parametri i unos topline prikazani su u tablici 8., a zavareni uzorci prikazani su na slikama 35. 36. i 37.

Tablica 8. Parametri zavarivanja pojedinih uzoraka

Oznaka uzorka	Debljina lima, mm	Zaštitni plin	Prolaz broj	Struja, A	Napon, V	Brzina dodavanja žice, m/min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
1F5	5	C6 X1	1...2	350	34	14,5	65	8,79
2F5	5	C12 X2	1...2	330	34	14,5	65	8,29
1F1	20	C6 X1	1...2	330	35	14,5	45	12,32
2F1	20	C12 X2	1...2	330	35	14,5	45	12,32

Unos topline izračunat je prema sljedećem izrazu:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_z \cdot 100} \cdot \eta \text{ [kJ/cm]} \quad (2)$$

Pri čemu je:

- U, V – napon zavarivanja
- I, A – jakost struje zavarivanja
- $v_z, \text{cm/min}$ – brzina zavarivanja
- η – stupanj iskoristivosti (za MAG postupak prahom punjenom žicom iznosi 0,8)

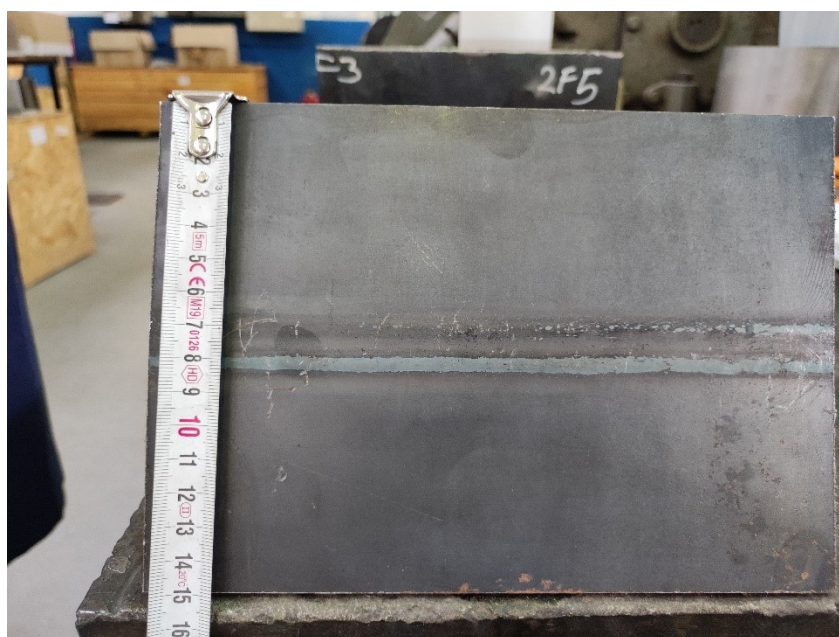
Slijede slike zavarenog uzorka 1F5.



Slika 35. Uzorak 1F5 - izgled zavara



Slika 36. Uzorak 1F5 - profil zavara



Slika 37. Uzorak 1F5 - površina mjerenja zaostalih napreznja

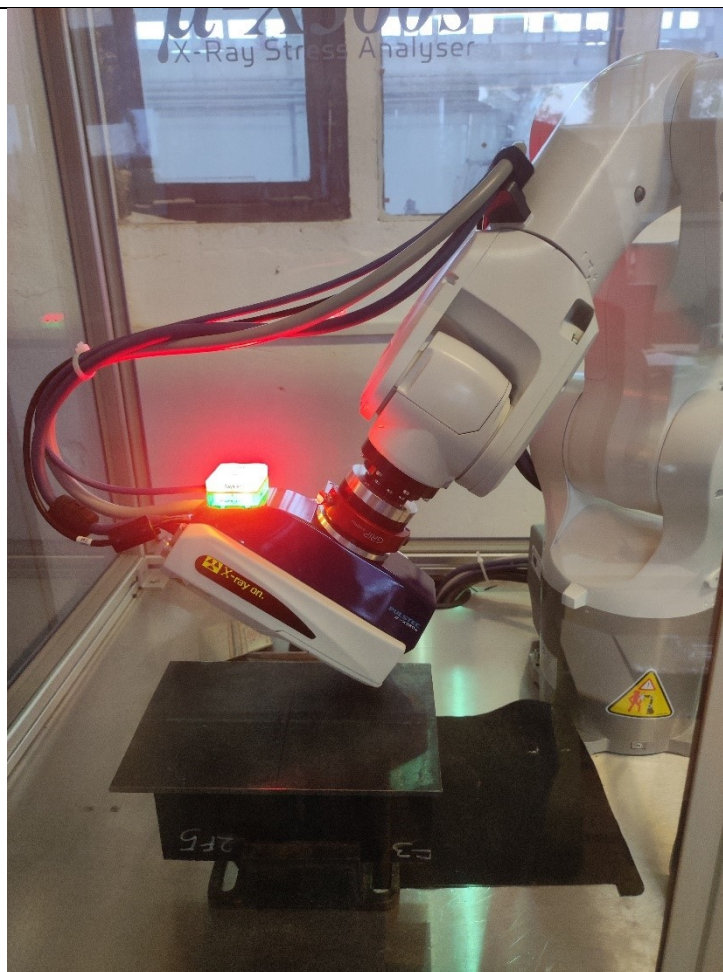
7.6. Mjerenje zaostalih napreznja

Prije samog mjerenja, mjerna površina očišćena je etanolom i zatim su označene točke mjerenja. Označene točke prikazane su na slici 38.



Slika 38. Uzorak 1F1 - označene točke mjerenja

Metoda mjerenja zaostalih napreznja bila je rendgenska difrakcija, odnosno $\cos \alpha$ metoda. Uređaj korišten za provođenje mjerenja je Pulstec μ -X360s pričvršćen na prihvatnicu industrijskog robota sa šest stupnjeva slobode gibanja KUKA Agilus KR 4. Korištenje robota kod ove metode omogućava precizno pozicioniranje mjernog uređaja. Mjerni uređaj mora biti na točno pozicioniranoj udaljenosti od površine pod određenim kutom nagiba koji za ferit iznosi 35° . Na slici 39. prikazan je uređaj za mjerenje zaostalih napreznja prilikom samog procesa mjerenja.



Slika 39. Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja Pulstec μ -X360s

Po uzorku je izmjereno trinaest točaka na sredini po poprečnoj liniji i sedam po uzdužnoj simetralnoj liniji zavarenog spoja. Zbog lakšeg mjerenja, mjerenje se provodi sa donje strane zavarenog spoja. Izmjereni rezultati prikazani su u sljedećim tablicama (9, 10, 11, 12). U tablicama su prikazane točke mjerenja, udaljenost pojedinih točaka od sredine zavarenog spoja ($d_{x,y}$), normalna naprezanja $\sigma_{x,y}$, tangencijalna naprezanja τ_{xy} i devijacije pojedinih naprezanja $D_{\sigma,\tau}$.

7.6.1. *Uzorak 1F5*

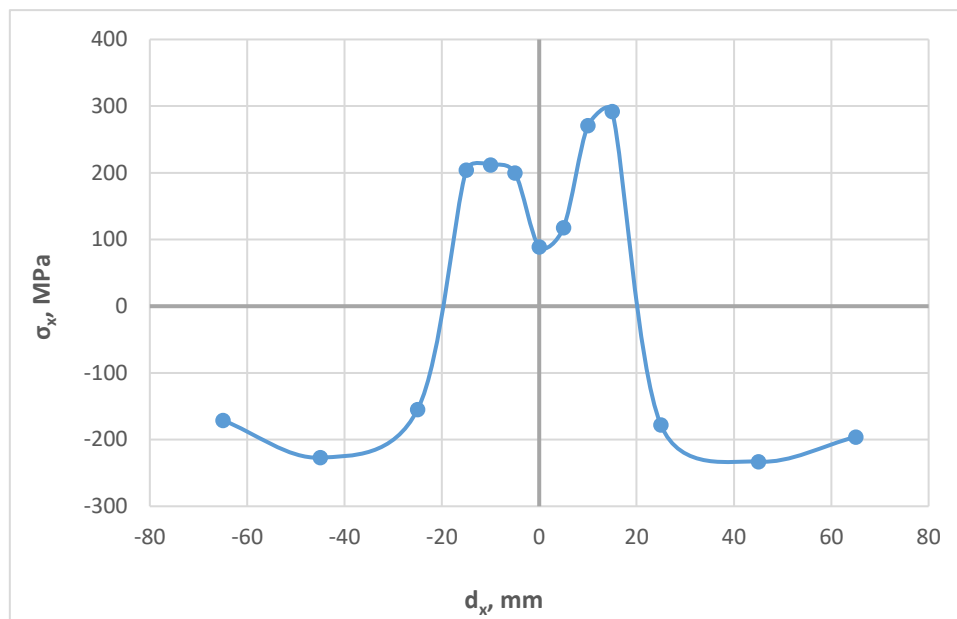
Tablica 9. Izmjerena naprezanja na poprečnoj liniji uzorka 1F5

Broj točke	d_x , mm	σ_x , MPa	D_σ	τ_{xy} , MPa	D_τ
1	-65	-171	14	4	11
2	-45	-227	17	-1	9
3	-25	-155	9	-7	14
4	-15	204	15	32	18
5	-10	212	15	7	10
6	-5	200	27	-18	13
7	0	89	18	-29	16
8	5	118	13	-10	8
9	10	271	16	-24	13
10	15	292	14	-43	12
11	25	-178	13	-10	15
12	45	-233	13	-4	11
13	65	-196	12	-4	15

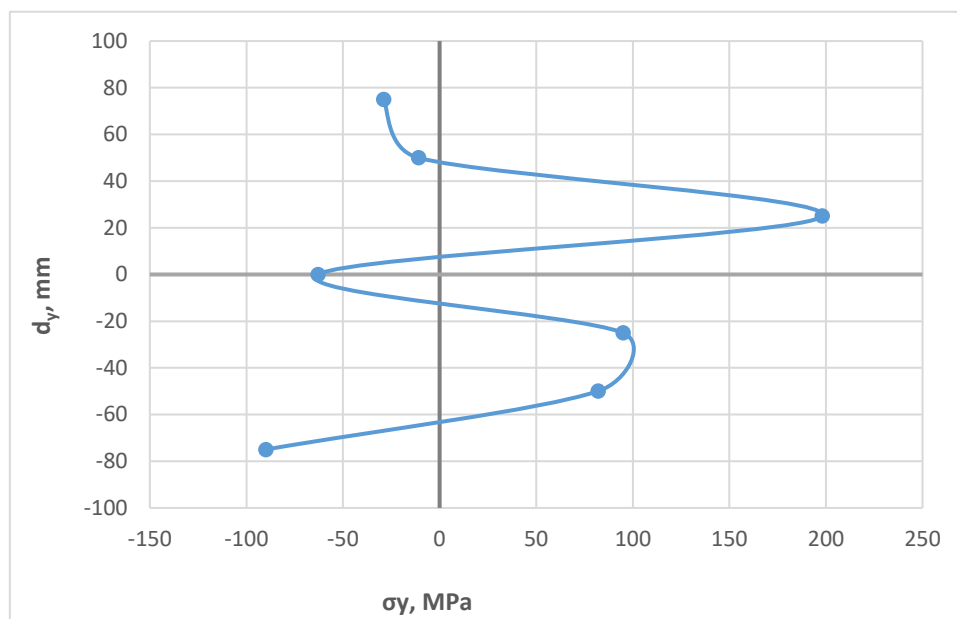
Tablica 10. Izmjerena naprezanja na uzdužnoj liniji uzorka 1F5

Broj točke	d_y , mm	σ_y , MPa	D_σ	τ_{xy} , MPa	D_τ
T1	-75	-90	11	20	15
T2	-50	82	11	0	14
T3	-25	95	13	-11	14
T4	0	-63	17	-4	6
T5	25	198	16	-5	10
T6	50	-11	17	20	10
T7	75	-29	10	-5	12

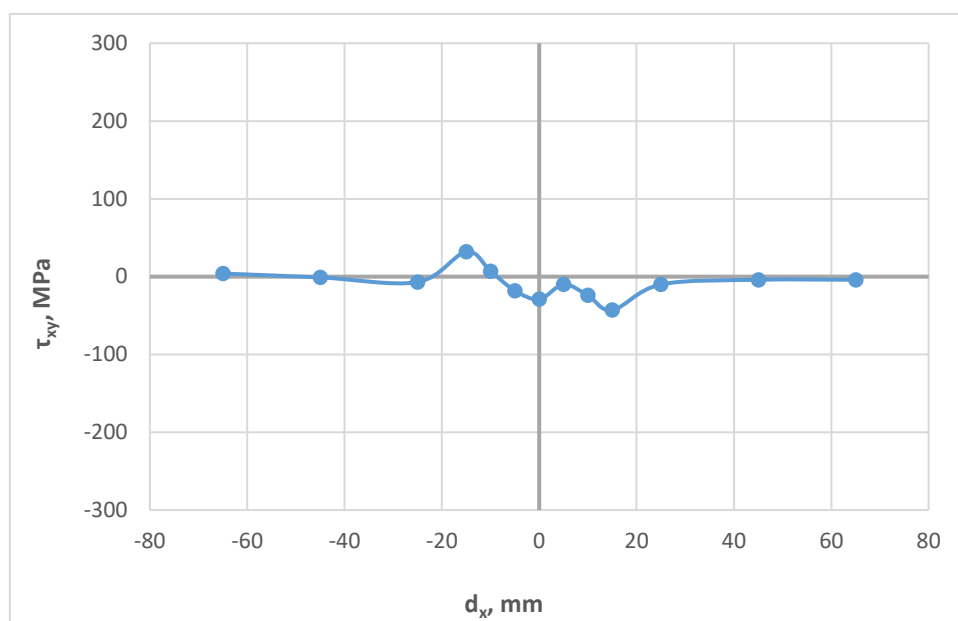
Prema izmjerenim podacima u tablici, najveće naprezanje na poprečnoj liniji nalazi se u točki 10. Ona se nalazi u području zone utjecaja topline, po karakteru je vlačno i iznosi 292 MPa. Najveće tlačno naprezanje je u točki 12, a iznosi -233 MPa. Devijacije se kreću u prihvatljivim iznosima tako da je mjerenje bilo uspješno. Najveća je bila u točki 6, iznosa 27 MPa. Kod naprezanja na uzdužnoj liniji, najveće je bilo u točki T5, vlačno naprezanje iznosa 198 MPa. Tangencijalna naprezanja kreću se od -43 do 32 MPa, što su znatno manji iznosi od normalnih naprezanja te iz tog razloga analiza se bazira na normalnim zaostalim naprezanjima. Devijacije također nisu bile velike. Na grafikonima (slike 40-42.) u nastavku prikazana je raspodjela zaostalih naprezanja na pojedinim uzorcima. Raspodjela je očekivana, naprezanja su normalno raspodijeljena, „zvonolikog“ oblika. Nula, odnosno središte grafikona predstavlja sredinu zavarenog uzorka.



Slika 40. Dijagram raspodjele naprezanja na poprečnoj liniji - uzorak 1F5

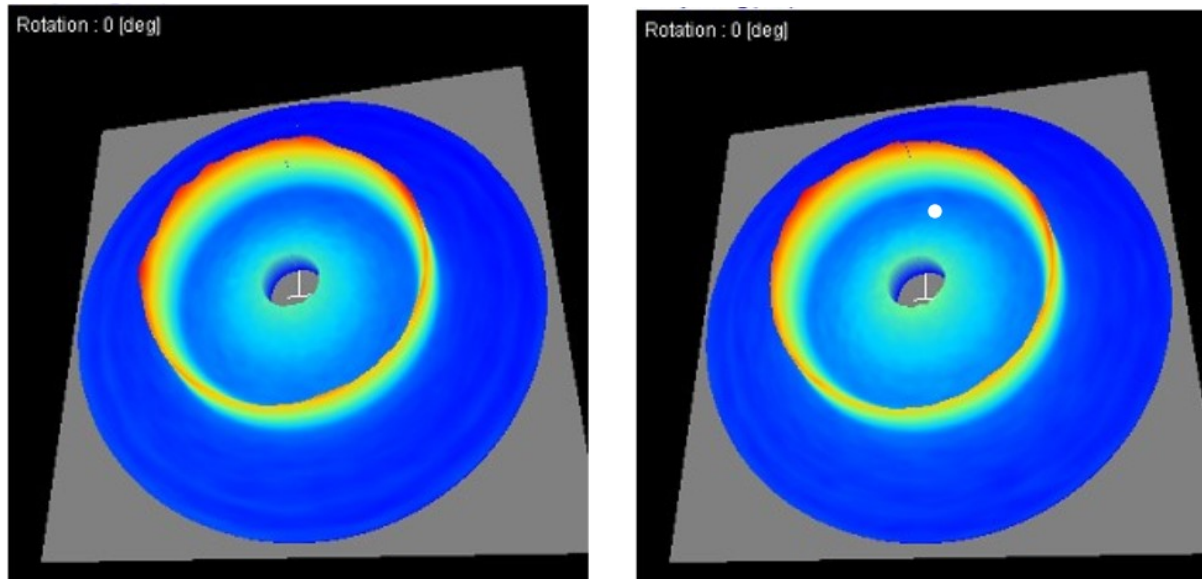


Slika 41. Dijagram raspodjele naprezanja na uzdužnoj liniji - uzorak 1F5



Slika 42. Dijagram raspodjele tangencijalnih napreznja - uzorak 1F5

Na slici 43. prikazani su Debye-Scherrerovi prsteni za točke 10 i T5. Prsteni imaju normalnu raspodjelu napreznja i uzak difrakcijski vrh, što pokazuje na to da je mjerenje pouzdano.



Slika 43. Prikaz Debye-Scherrerovog prstena za točke 10 i T5

7.6.2. *Uzorak 2F5*

Slijede podaci izmjerenih zaostalih naprezanja za uzorak 2F5. Podaci su vidljivi u tablicama, a raspodjela naprezanja dana je u dijagramima.

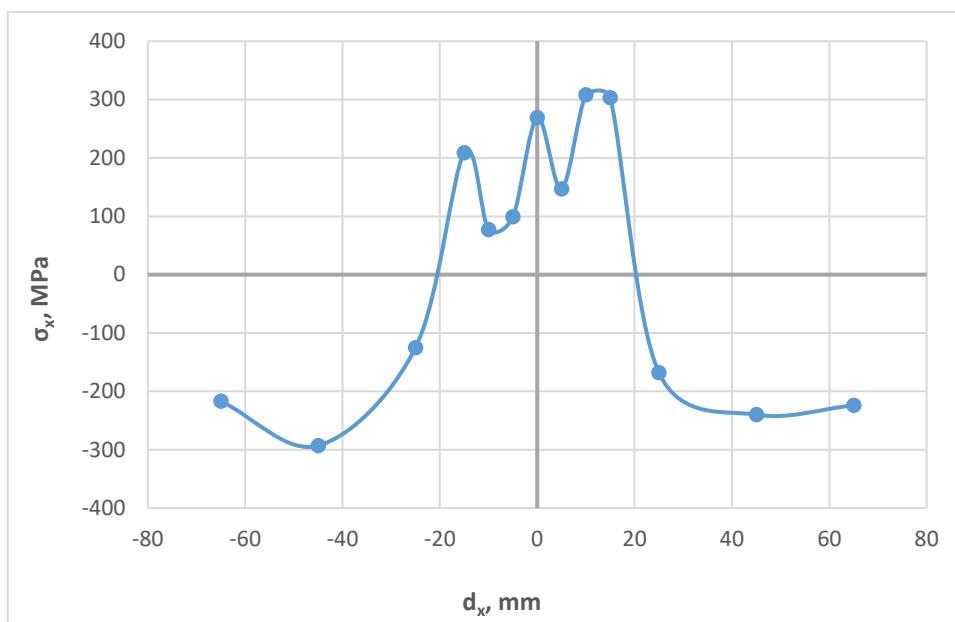
Tablica 11. Izmjerena naprezanja na poprečnoj liniji uzorka 2F5

Broj točke	d_x , mm	σ_x , MPa	D_σ	τ_{xy} , MPa	D_τ
1	-65	-217	13	-9	9
2	-45	-293	7	-11	11
3	-25	-125	10	0	10
4	-15	209	11	12	8
5	-10	77	11	31	9
6	-5	99	18	1	17
7	0	269	13	13	12
8	5	147	14	12	10
9	10	308	13	-2	9
10	15	303	6	-22	8
11	25	-168	9	10	7
12	45	-240	11	13	11
13	65	-224	14	-5	5

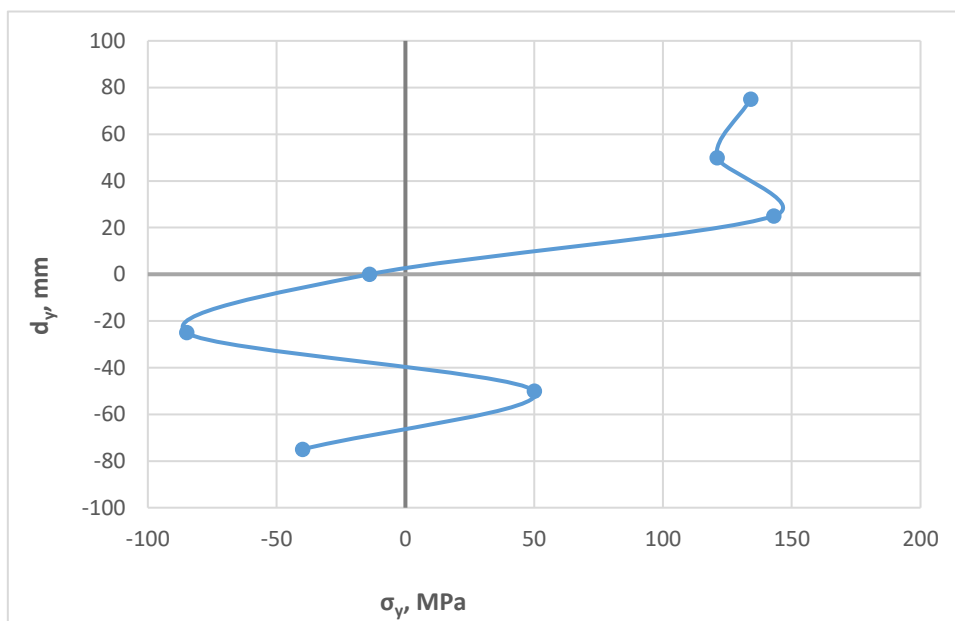
Tablica 12. Izmjerena naprezanja na uzdužnoj liniji uzorka 2F5

Broj točke	d_y , mm	σ_y , MPa	D_σ	τ_{xy} , MPa	D_τ
T1	-75	-40	11	-5	11
T2	-50	50	15	-25	9
T3	-25	-85	10	-20	13
T4	0	-14	12	-25	13
T5	25	143	19	-2	15
T6	50	121	11	-23	7
T7	75	134	9	-5	7

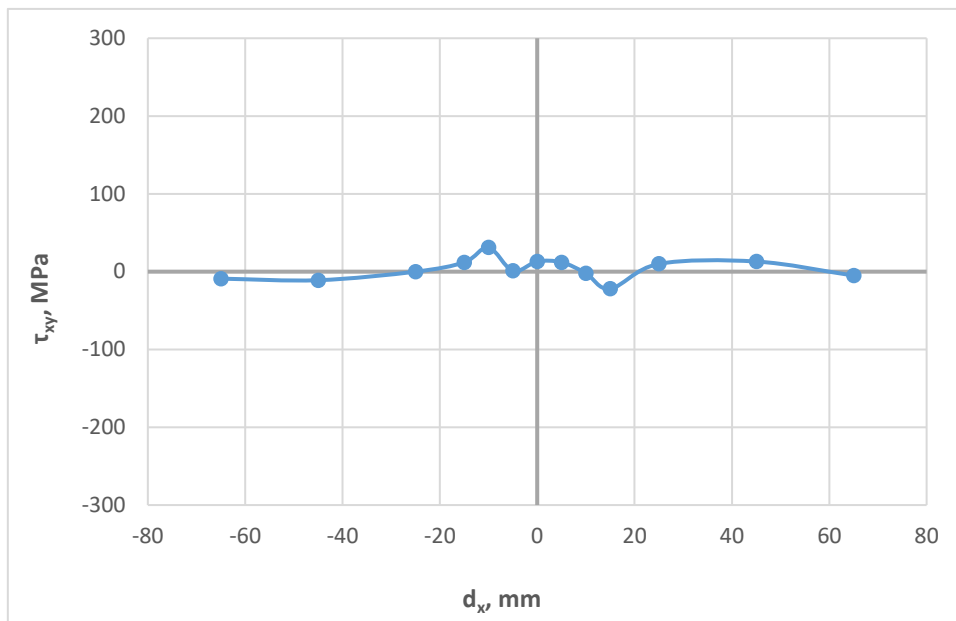
Kod uzorka 2F5 gdje je korišten plin C12 X2, maksimalna vlačna naprezanja dobivena su u točki 9, iznosa 308 MPa, a maksimalna tlačna u točki 2 iznosa -293 MPa. Iz ovih podataka vidljiv je utjecaj zaštitne atmosfere na zaostala naprezanja. U plinskoj mješavini C12 X2 povećan je udio kisika i ugljikovog dioksida, čime je povećana dubina penetracije, a time i sama zaostala naprezanja u zavarenom spoju. Kod transverzalnih naprezanja najveće tlačno naprezanje iznosi -85 MPa, dok najveće vlačno naprezanje iznosi 143 MPa. Tangencijalna naprezanja iznose od -25 do 31 MPa. Devijacije također kao i u prošlom uzorku nisu velike što znači da rezultati minimalno odstupaju. Na sljedeće prikazanim slikama vidljiv su dijagrami izmjerenih zaostalih naprezanja. Situacija je slična kao i kod prethodnog uzorka.



Slika 44. Dijagram raspodjele naprezanja na poprečnoj liniji - uzorak 2F5

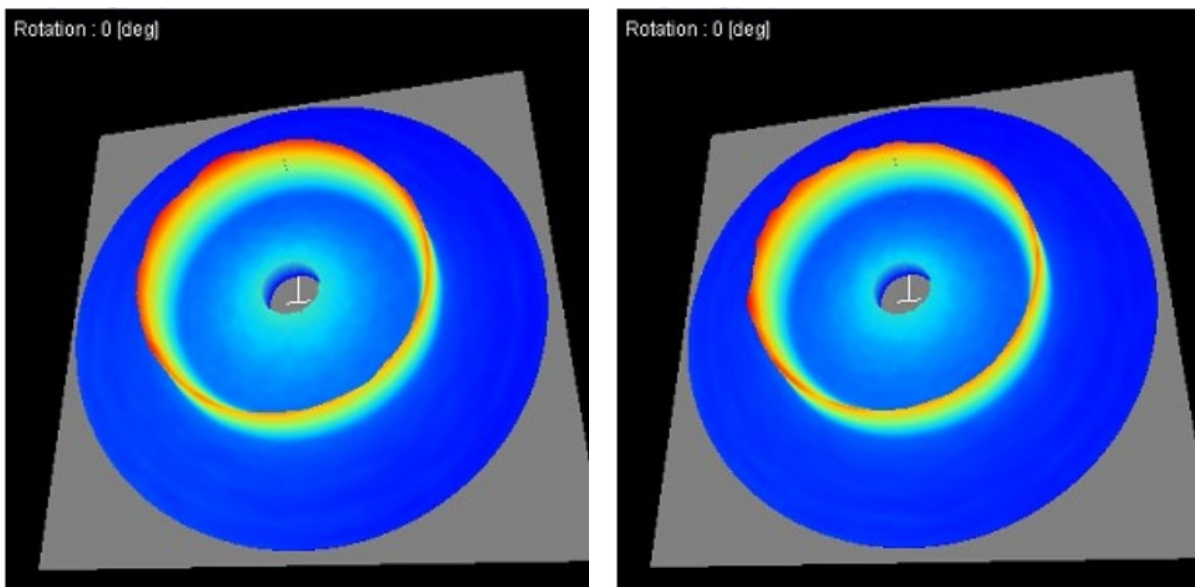


Slika 45. Dijagram raspodjele naprezanja na uzdužnoj liniji - uzorak 2F5



Slika 46. Dijagram raspodjele tangencijalnih napreznja - uzorak 2F5

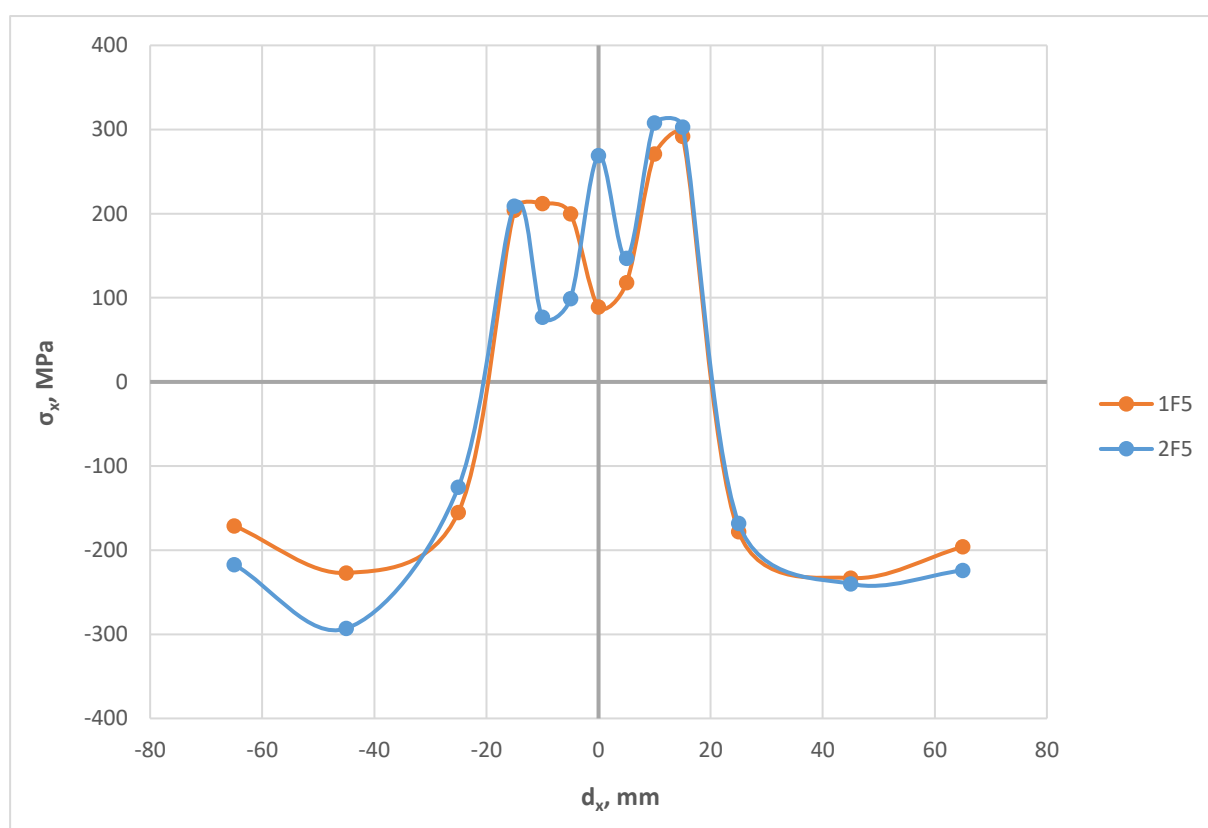
Slika 47. prikazuje Debye-Scherrove prstene za točke gdje je prisutno najveće vlačno napreznja. Distribucija napreznja je također normalna i difrakcijski vrh je uzak.



Slika 47. Debye-Scherrerovi prsteni za točke 9 i T5

7.6.3. Usporedba zaostalih napreznja uzoraka 1F5 i 2F5

Na slici 48. prikazan je graf usporedbe zaostalih napreznja uzoraka 1F5 i 2F5. Vidljivo je kako su kod uzorka 2F5, gdje je tijekom zavarivanja korištena plinska mješavina s većim udjelom ugljikovog dioksida, zaostala napreznja veća. Razlika je vidljiva i u vlačnom i tlačnom dijelu napreznja. Maksimalno vlačno napreznje kod uzorka 1F5 je 292 MPa, a kod uzorka 2F5 jest 308 MPa. Tlačno napreznje kod uzorka 1F5 postiže maksimalnu vrijednost od -233 MPa, a kod uzorka 2F5 -293 MPa. Može se zaključiti da se većim udjelom aktivnog plina u mješavini povećavaju zaostala napreznja u zavarenom spoju. No, svakako treba uzeti u obzir i stanje zaostalih napreznja u osnovnom materijalu.



Slika 48. Dijagram usporedbe zaostalih napreznja uzoraka 1F5 i 2 F5

7.6.4. Uzorci 2F1 i 1F1

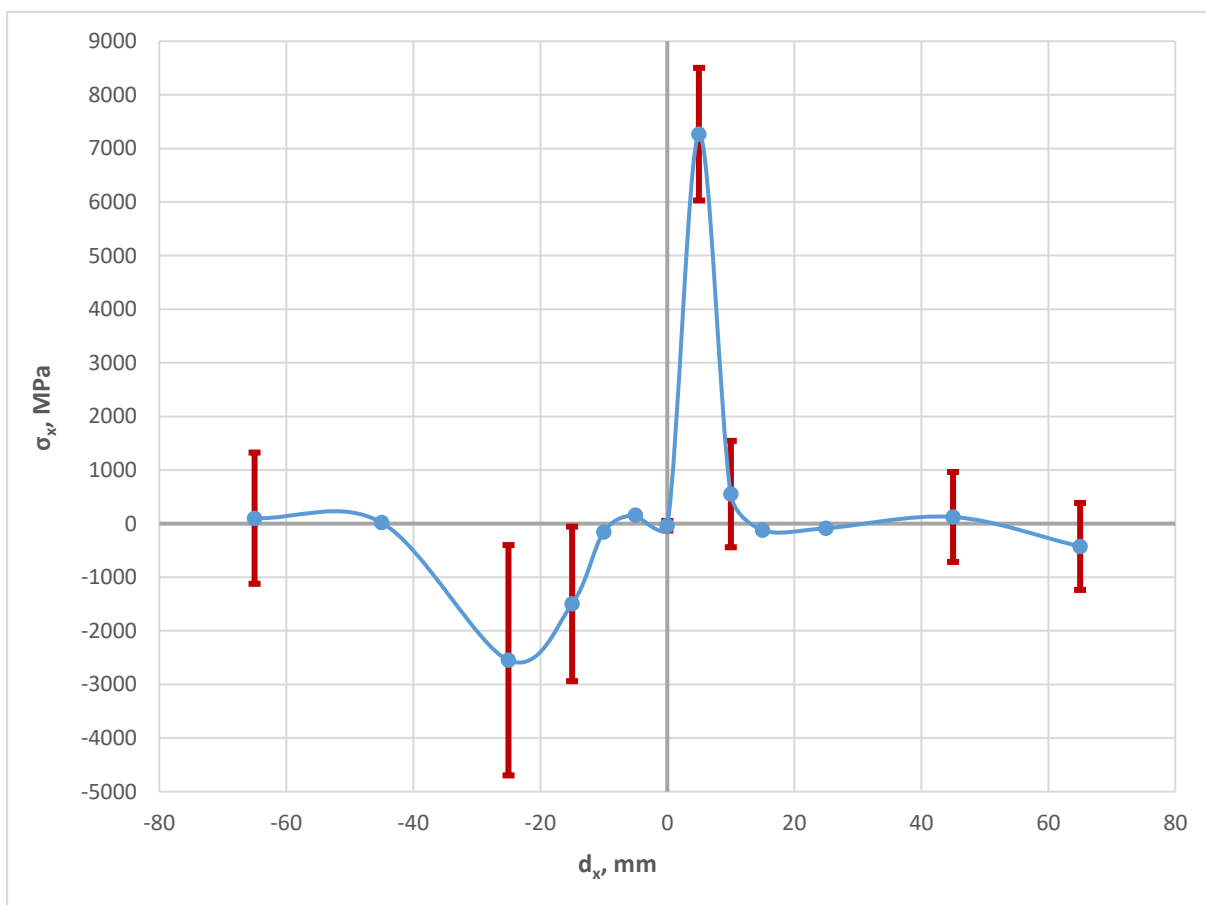
Mjerenje zaostalih naprezanja na uzorcima 2F1 i 1F1 nije bilo uspješno. Iznosi zaostalih naprezanja jako su odstupali s jako velikim devijacijama u mjerenju i bili su vrlo velikog iznosa. Mjerenje je provedeno u više točaka, ali većinom je rezultat isti. Takva situacija se može objasniti preko stanja površine. Velika je mogućnost da su zrna na površini materijala neuniformno deformirana, što povećava devijaciju. Odnosno difrakcijski vrh zraka je preširok i rezultati nisu pouzdani. Uz to veliku ulogu imaju i hrapavost površine, debeli oksidni sloj, te nečistoće i oštećenja na površini. Primjera radi bit će prikazana tablica i dijagram raspodjele izmjerenih longitudinalnih naprezanja na uzroku 2F1.

Tablica 13. Izmjerena longitudinalna naprezanja uzorka 2F1

Broj točke	d_x , mm	σ_x , MPa	D_σ	τ_{xy} , MPa	D_τ
1	-65	102	2449	4022	1893
2	-45	19	6	-1358	3859
3	-25	-2548	4297	199	1012
4	-15	-1497	2884	-599	2021
5	-10	-155	48	-68	52
6	-5	159	41	31	37
7	0	-39	177	415	86
8	5	7266	2474	988	1674
9	10	552	1985	1415	1110
10	15	-121	55	96	35
11	25	-87	50	83	43
12	45	125	1679	-1230	1460
13	65	-425	1623	174	2170

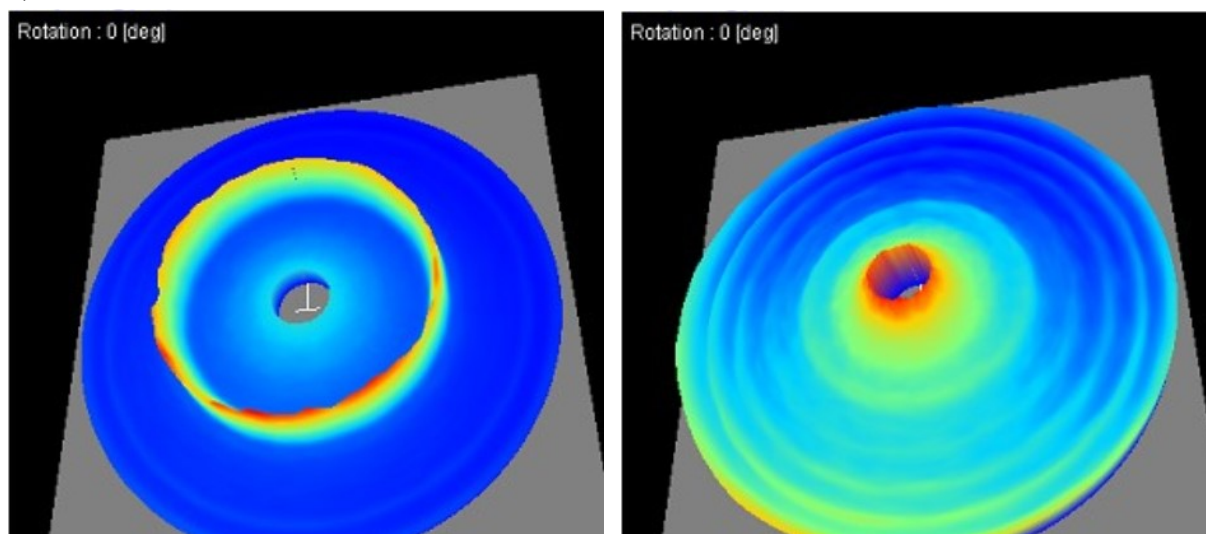
Kao što je vidljivo u tablici, devijacije su ogromne, kao i naprezanja u većini točaka. Kod nekoliko točaka mjerenje je prihvatljivo, npr. u točkama 5, 6, 10 i 11. U tim točkama devijacije nisu prevelike, ali se iz tih četiri točaka ne može provesti analiza zaostalih naprezanja. Na slici 49. prikazan je dijagram raspodjele naprezanja, koji na prvi pogled ima dobru distribuciju, ali su iznosi naprezanja i devijacije preveliki. Za točke s minimalnom devijacijom napravljena je usporedba izmjerenih zaostalih naprezanja uzoraka 2F1 i 2F5.

Pošto brušenje površine nije opcija, u budućim ispitivanjima površinu je potrebno obraditi elektropoliranjem kako bi se dobili normalniji rezultati kojima bi se mogla ustvrditi zaostala naprezanja u navedenim uzorcima.



Slika 49. Dijagram raspodjele naprezanja sa devijacijama - uzorak 2F1

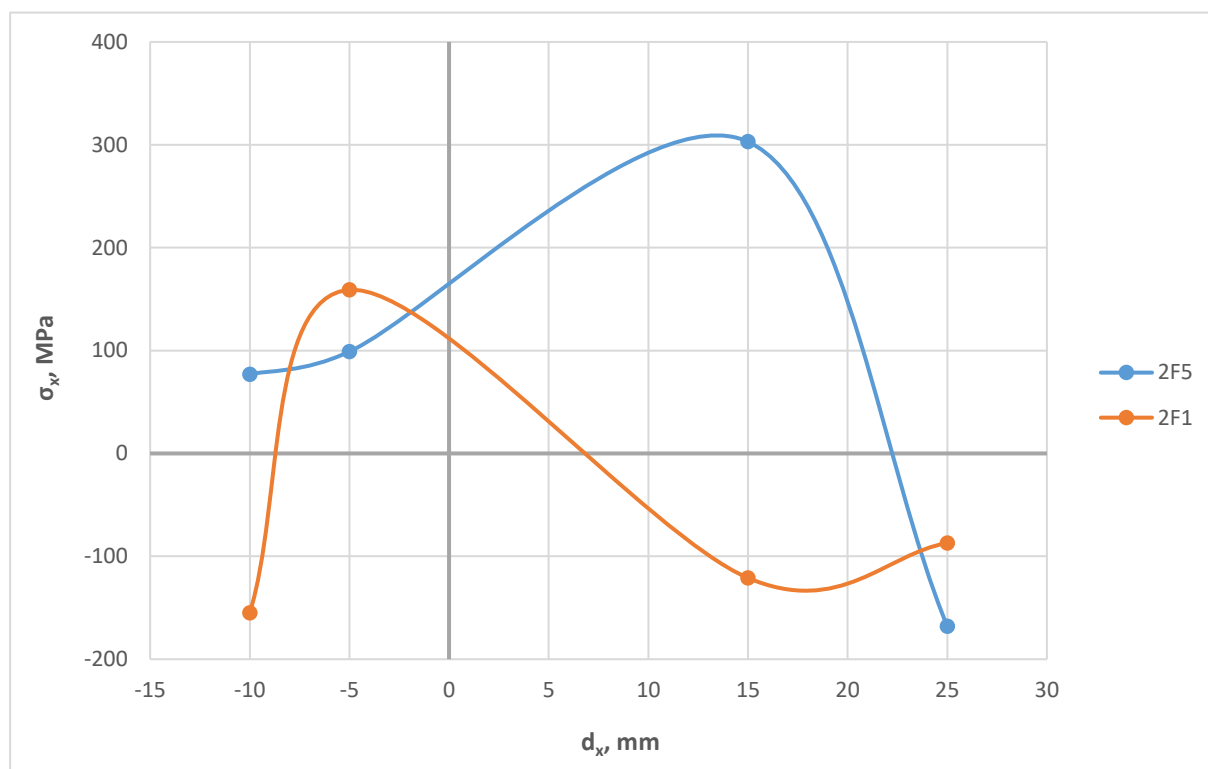
Pouzdanost mjerenja u pojedinim točkama prikazuju i Debye-Scherrerovi prsteni (slika 50.) koji kod dobrih rezultata mjerenja imaju uzak difrakcijski vrh (točka 6), a kod loših širok (točka 8).



Slika 50. Debye-Scherrerovi prsteni: lijevo - točka 6, desno - točka 8

7.6.4.1. Usporedba točaka mjerenja uzorka 2F1 i 2F5

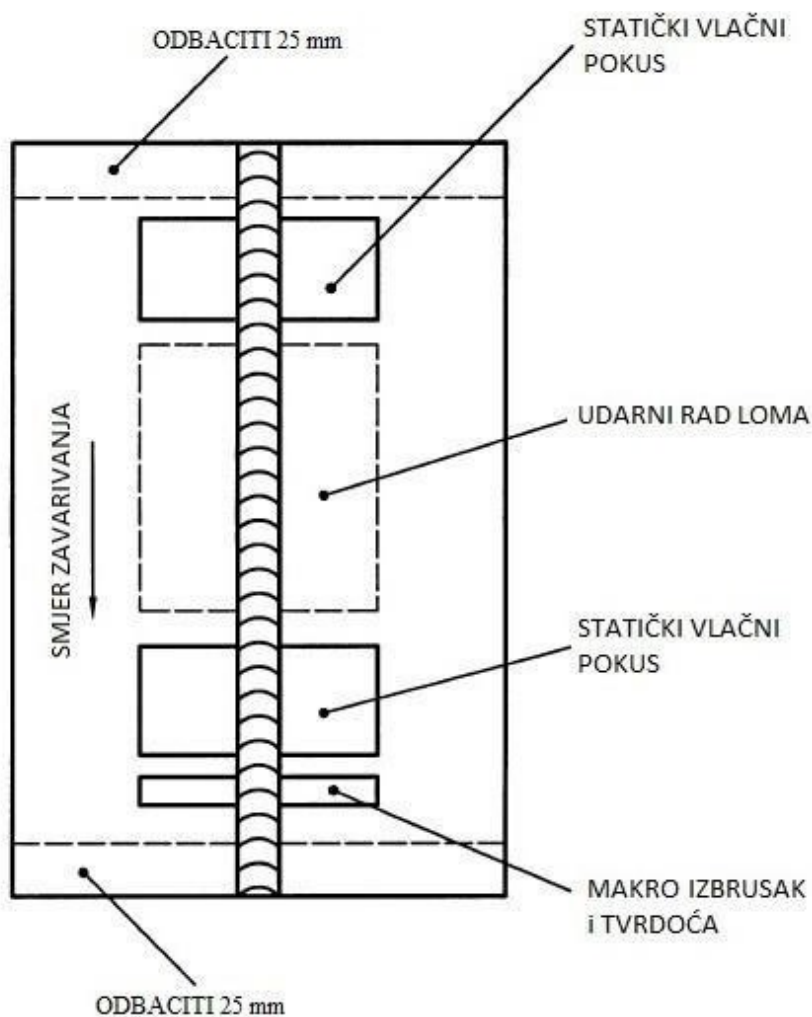
Iz dijagrama na slici 51. vidljivi su iznosi zaostalih napreznja za točke 5, 6, 10 i 11 na uzorcima 2F1 i 2F5. Odabrane su samo četiri točke jer su one jedine s minimalnim devijacijama u uzorku 2F1. Iz dijagrama se može zaključiti da su zaostala napreznja veća kod tanjih materijala jer su skloniji deformacijama usred zagrijavanja.



Slika 51. Dijagram usporedbe točaka 5, 6, 10 i 11 za uzorke 2F5 i 2F1

7.7. Makroanaliza

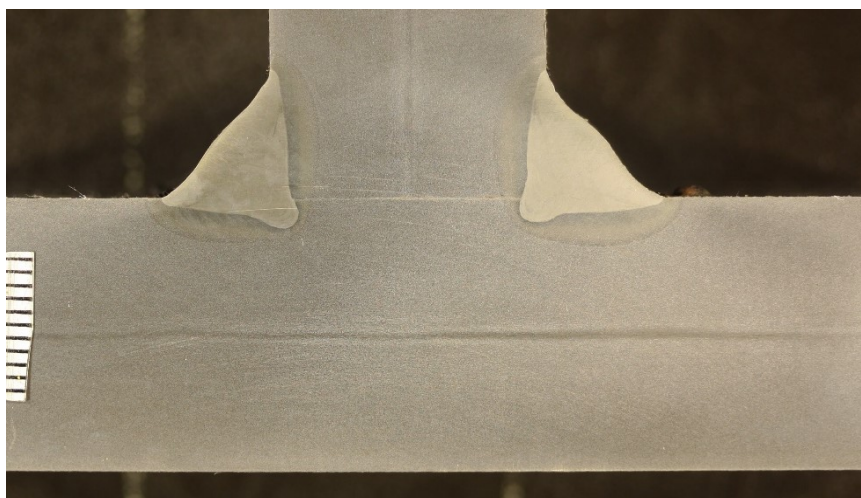
Na uzorcima 2F1, 1F1 i 2F5 provedena je makroanaliza kako bi se utvrdila ovisnost unosa topline, stupnja miješanja i zaostalih napreznja. Kod zavarivanja uzorka 1F1 korištena zaštitna plinska mješavina je C6 X1, a kod 2F1 je C12 X2. Uzorci su rezani na strojnoj pili, a mjesto vađenja uzoraka prikazano je na slici 50. Prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017 režu se uzorci za različita ispitivanja mehaničkih svojstava zavora, što je prikazano na slici 52.



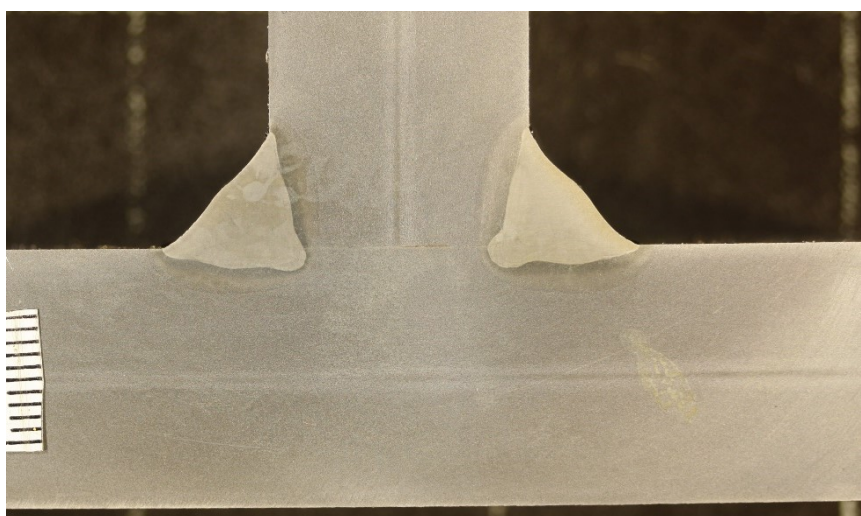
Slika 52. Prikaz mjesta rezanja uzoraka za mehanička ispitivanja [43]

Nakon rezanja makroizbrusci se bruse strojno pa ručno. Brusi se postupno od grublje granulacije (P100) pa do finije (P400). Nakon brušenja slijedi poliranje, pa se dobiveni uzorci nagrizzaju u 3 %-tnoj otopini nitala, otopini klorovodične kiseline u etilnom alkoholu. Vrijeme nagrizzanja je 20 sekundi, a nakon nagrizzanja uzorci su isprani vodom kako bi se zaustavila kemijska reakcija te su očišćeni alkoholom i osušeni. Tada slijedi vizualna kontrola makrostrukture. Programskim paketom *ImageJ* analizirane su fotografije makroizbrusaka,

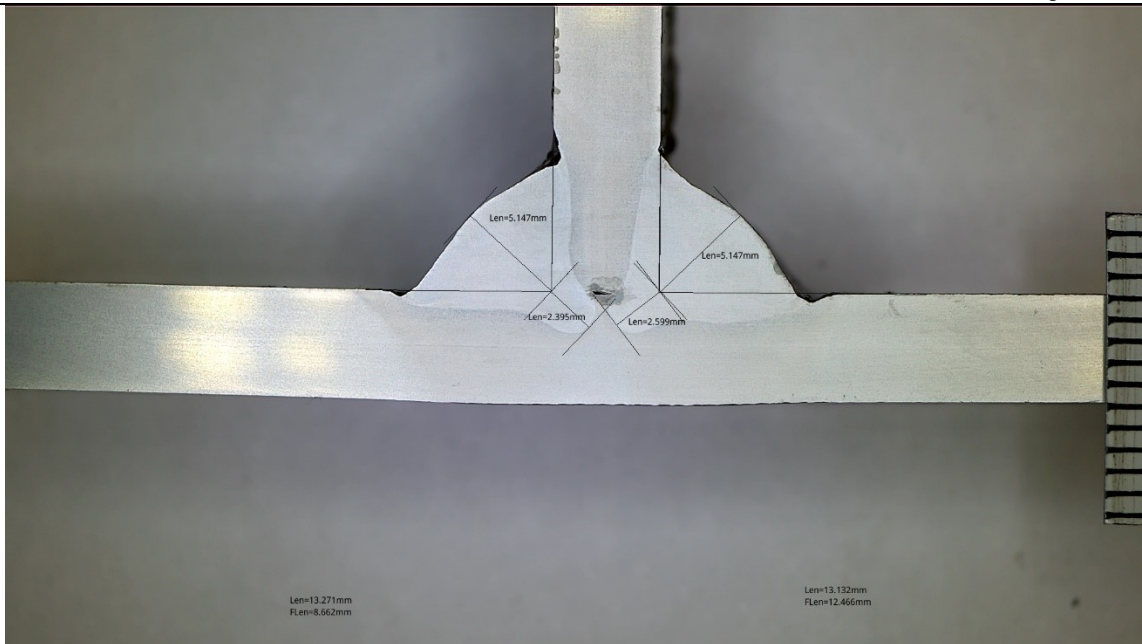
odnosno površina metala zavara, visina i dimenzije profila metala zavara. Makroizbrusci prikazani su na slikama 53., 54. i 55.



Slika 53. Makroizbrusak 1F1

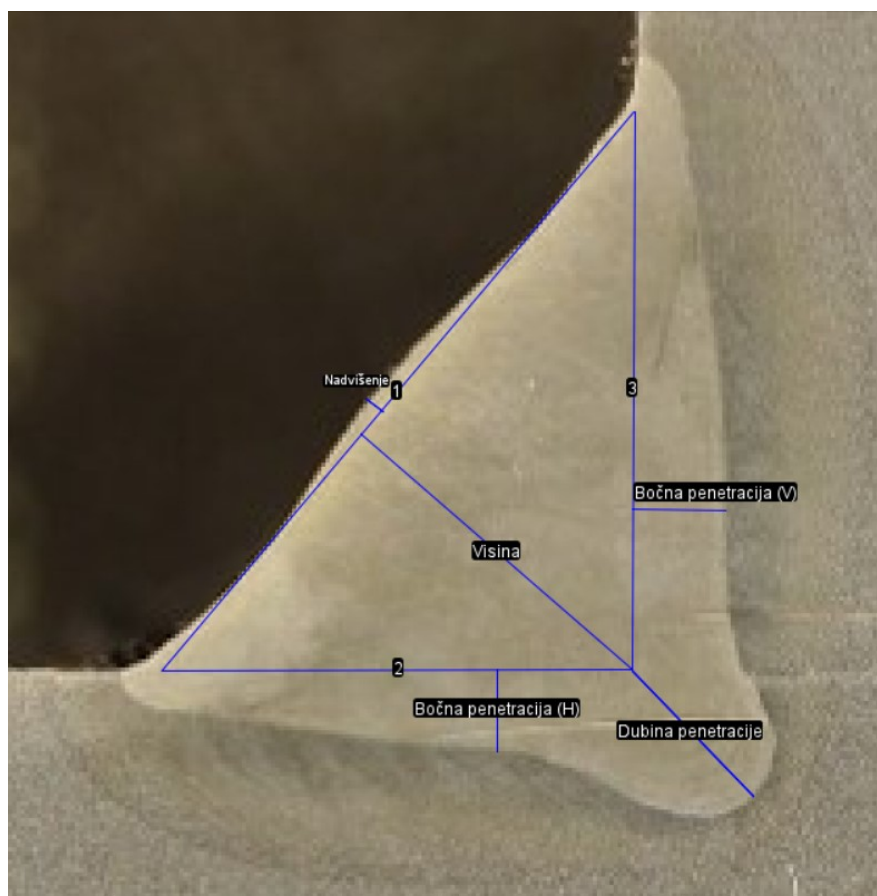


Slika 54. Makroizbrusak 2F1



Slika 55. Makroizbrusak 2F5

Na slikama makroizbrusaka vidljiv je metal zavara, zona utjecaja topline (ZUT) i osnovni materijal. Slijedi analiza površine i dimenzija metala zavara, a naposljetku i stupnja miješanja.



Slika 56. Primjer mjerenja u programu ImageJ

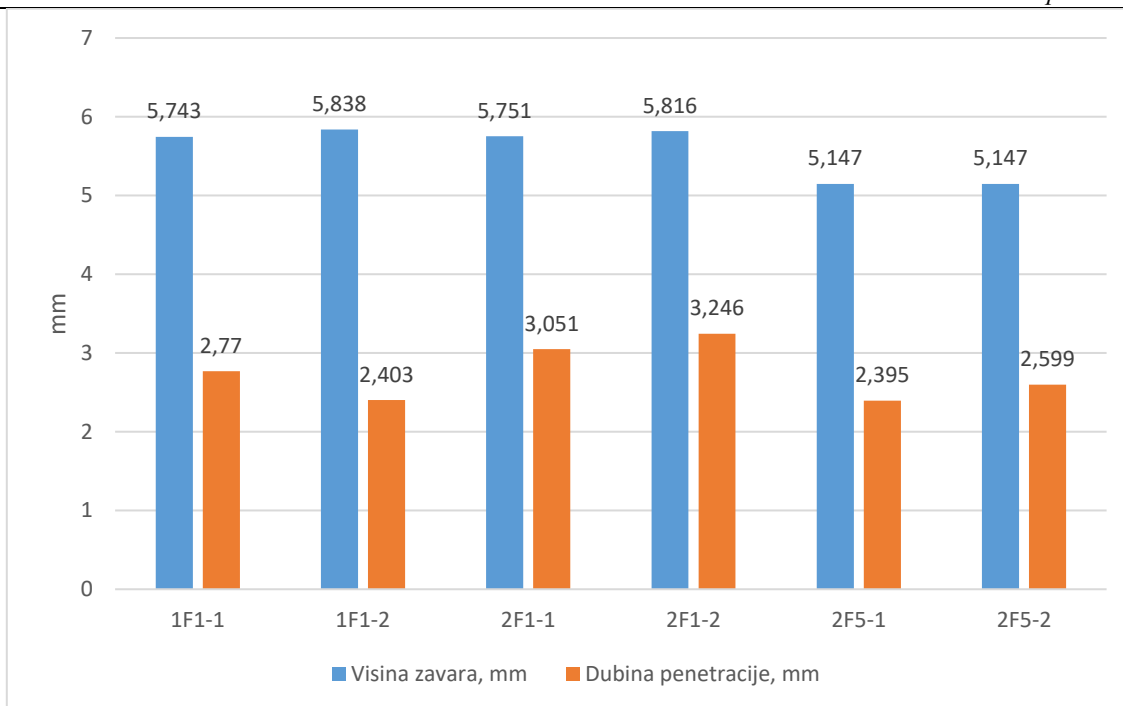
U tablici 14. prikazane su izmjerene dimenzije metala zavara (slika 56.), površina i stupanj miješanja pojedinog prolaza. Stupanj miješanja ovisi o dubini penetracije, a izračunat je preko postotka površine penetracije u ukupnoj površini zavara.

$$\text{Stupanj miješanja} = \frac{\text{Površina penetracije}}{\text{Površina zavara}} [\%]$$

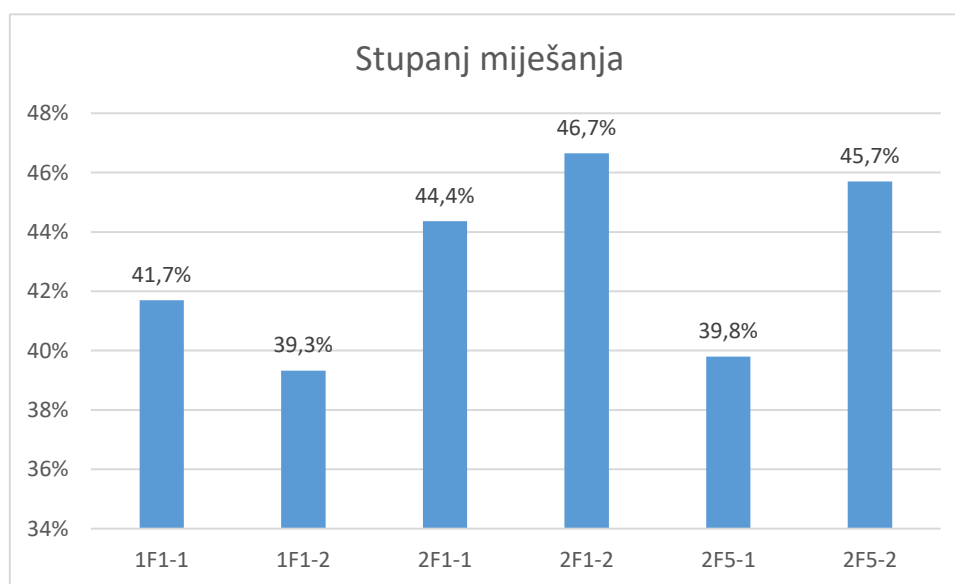
Tablica 14. Prikaz mjerenih dimenzija zavara, površine i stupnja miješanja

Uzorak	1F1		2F1		2F5	
	1(L)	2(D)	1	2	1	2
Prolaz						
Visina zavara, mm	5,743	5,838	5,751	5,816	5,147	5,147
Nadvišenje, mm	0,334	0,422	0,279	0,344	-	-
Dubina penetracije, mm	2,77	2,403	3,051	3,246	2,395	2,599
Bočna penetracija (V), mm	1,492	1,546	1,992	2,039	-	-
Bočna penetracija (H), mm	1,313	1,192	1,645	1,553	-	-
Površina zavara, mm²	60,363	62,832	64,543	65,684	38,714	43,529
Površina penetracije, mm²	25,169	24,708	28,637	30,642	15,409	19,892
Stupanj miješanja, %	41,7%	39,3%	44,4%	46,7%	39,8%	45,7%

Iz tablice su vidljivi podaci o visini zavara, penetraciji, površini i stupnju miješanja. Visine zavara su dovoljno ujednačene u svim prolazima. Kod uzorka 1F1 i 2F1 visine su u drugom prolazu za otprilike 0,1 mm veće od prvog prolaza. Tijekom zavarivanja tih uzoraka dolazilo je do nadvišenja zavara, ali u zanemarivim veličinama. Dubina penetracije kod prvog uzorka je 1,492 mm i 1,546 mm, a kod drugog 1,992 mm i 2,039 mm. Vidljivo je da je penetracija veća u drugom uzorku gdje je korištena plinska mješavina s većim udjelom ugljikovog dioksida koji daje veću dubinu penetracije. Na uzorku 2F5 visine su ujednačene s obje strane i iznose 5,147 mm. Dubina penetracije i površina zavara je veća s desne strane, što se kod tanjih materijala može objasniti time da je prilikom drugog prolaza radni komad bio zagrijan od prvog prolaza zavarivanje, čime je ostvarena veći unos topline i bolja penetracija. Histogramom na slikama 57 i 58. prikazana je usporedba visine zavara, dubine penetracije i stupnja miješanja za uzorke 1F1 i 2F1.



Slika 57. Dijagram visina zavara i dubina penetracija zavara



Slika 58. Dijagram usporedbe stupnja miješanja zavara

Stupanj miješanja zavara kreće se oko 40 %, odnosno od 39,3 do 46,7 %. Iz usporedbe stupnja miješanja uzoraka 1F1 i 2F1 može se zaključiti da zaštitna atmosfera ima velik utjecaj na proces zavarivanja. Kod uzorka 2F1 gdje je korištena plinska mješavina C12 X2 sa većim udjelom ugljikovog dioksida, stupanj miješanja je veći, odnosno veća je površina penetracije zavara. Uzorak 2F1 u desnom prolazu ima stupanj miješanja od 46,7 %, a uzorak 1F1 ima stupanj

miješanja 41,7 % u lijevom prolazu. Razlika od 5 % kod nekih slučajeva može imati velik utjecaj. Stupanj miješanja uzorka 2F5 iznosi 39,8 i 45,7 %.

Kako zbog problema u mjerenju nije moguće analizirati zaostala naprezanja u uzorcima 1F1 i 2F1, povlači se paralela iz tanjih uzoraka 1F5 i 2F5. Zaostala naprezanja proporcionalna su stupnju miješanja zavara, jer je stupanj miješanja ovisan o dubini penetracije, a dubina penetracije je povezana sa unosom topline. Unos topline je jedan od glavnih faktora koji utječu na intenzitet zaostalih naprezanja. Ista plinska mješavina (C12 X2) korištena je prilikom zavarivanja uzorka 2F1 i 2F5. Plinska mješavina C12 X12 ima veći udio aktivnih plinova zbog čega dolazi do veće dubine penetracije. Veći stupanj miješanja ima za posljedicu veća zaostala naprezanja u materijalu.

8. ZAKLJUČAK

Zavarivanje metalnim prahom punjenim žicama, odnosno MCAW zavarivanje, sve je zastupljenija tehnologija zavarivanja u današnjoj industriji. Zbog velike produktivnosti, odnosno velike količine depozita, ovaj postupak zavarivanja ima prednost naspram konvencionalnom MIG/MAG zavarivanju. Kako daje velike količine depozita, brzine zavarivanja su također veće, a zbog dezoksidanata u metalnom prahu, gotovo da ne stvara trosku. Zato je MCAW postupak pogodan za automatizaciju i robotizaciju procesa zavarivanja. Korištenjem trokomponentnih mješavina plinova na bazi Ar, CO₂ i O₂, a također zbog samih karakteristika metalnim prahom punjenih žica, zavar ima bolju estetiku i kvalitetu. Penetracija je veća, a nadvišenje zavara je manje, što povoljno utječe na geometriju zavara, a i na naknadnu obradu zavarenog spoja. Zbog svih tih karakteristika MCAW postupak zavarivanje je produktivniji od konvencionalnih postupaka za zavarivanje (MAG, FCAW i dr.), a jedini nedostatak su mu veći troškovi žice i plina. No, zbog velike produktivnosti, MCAW postupak kompenzira početne troškove te na kraju ispada isplativiji.

Kao i kod ostalih postupaka zavarivanja, i kod MCAW postupka zavarivanja dolazi do prisustva zaostalih napreznja u zavarenom spoju. Do zaostalih napreznja dolazi zbog neravnomjernog unosa topline i neizbježna su pojava prilikom procesa zavarivanja. Negativno utječu na nosivost, radni vijek i dimenzijsku stabilnost zavarene konstrukcije. Na sam intenzitet zaostalih napreznja kod zavarenih spojeva utječu svojstva materijala, unos topline, priprema spoja i broj prolaza zavara. Kako bi se utjecaj zaostalih napreznja smanjio, potrebno je pažljivo planirati proces zavarivanja te odabrati odgovarajuće parametre zavarivanja. Utjecaj parametara zavarivanja na zaostala napreznja potvrđen je mjerenjem zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom. Zavarivanje MCAW postupkom daje velik depozit i dobru penetraciju za koju je potrebna određena jakost struje i brzina zavarivanja. Prema provedenim ispitivanjima utvrđeno je da unos topline ima velik utjecaj na zaostala napreznja. Većim unosom topline postignuta su veća zaostala napreznja u zavarenom spoju, a tako i veći stupanj miješanja. Ulogu u tome imaju i jakost struje i brzina zavarivanja, ali i zaštitna atmosfera korištena prilikom zavarivanja. Za smanjenje intenziteta zaostalih napreznja potrebno je koristiti mješavine s većim udjelom argona koji je inertni plin. Većim udjelom aktivnih plinova u zaštitnoj atmosferi doprinosi se povećanju unosa topline. Zaostala napreznja moguće je reducirati i ostalim metodama. Planiranjem u fazi projektiranja moguće je odabirom optimalnog broja prolaza, pravilnom pripremom spoja i rasporedom zavara spriječiti nastanak riskantnih iznosa zaostalih napreznja. U fazi zavarivanja, ovisno o vrsti i debljini osnovnog materijala, utjecaj unosa topline može se

smanjiti predgrijavanjem radnog komada. Time se smanjuje gradijent temperature u zavaru, odnosno metal zavara i osnovni materijal postignu ujednačenije hlađenje, što rezultira smanjenim zaostalim naprezanjima. Nakon zavarivanja, zavarene konstrukcije mogu se podlijeći toplinskoj obradi, odnosno žarenju za redukciju zaostalih naprezanja, ili reducirati naprezanja modernijim metodama kao na primjer metodom vibracije. Generalno, moguće je utjecati na zaostala naprezanja i maksimalno smanjiti njihov utjecaj na stabilnost zavarenih konstrukcija. Potrebno je imati odgovarajuće alate i reagirati na vrijeme.

Iz rezultata eksperimentalnog dijela može se zaključiti sljedeće:

- Kod zavarivanja čelika uz korištenje plinskih mješavina s većim dijelom inertnog argona, zaostala naprezanja su manja (uzorak 1F5, maksimalno naprezanje je 292 MPa). Ukoliko se koriste mješavine s većim udjelom aktivnih plinova, zaostala naprezanja se povećavaju (uzorak 2F5, maksimalno naprezanje je 308 MPa). To je povećanje od otprilike 5,5 %. No svakako treba uzeti u obzir i stanje zaostalih naprezanja u osnovnom materijalu tako da se ne mogu donijeti generalizirani zaključci.
- Kod debljih uzoraka 1F1 i 2F1, stupanj miješanja se razlikuje za 5 %, a korištene su iste plinske mješavine i ostali parametri zavarivanja. Time se zaključuje da su zaostala naprezanja proporcionalna stupnju miješanja zavara. Za smanjenje zaostalih naprezanja potrebno je koristiti zaštitne plinske mješavine s manjim udjelom aktivnih plinova i primijeniti navedene metode reduciranja zaostalih naprezanja.

Za daljnja istraživanja preporučeno je ponovno mjerenje zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom uz prethodnu kemijsku obradu površine elektropoliranjem. Time su osigurani bolji rezultati mjerenja jer se uklanjaju nečistoće s površine materijala. Uz to moguće je ispitivanje tvrdoće te ostala standardna ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenog spoja.

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] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarivanje i montaža“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [3] <https://www.aedmetals.com/news/mig-welding-transfer-methods>, pristupljeno: 13.9.2024.
- [4] Garašić I., Kožuh Z., Kralj S.: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [5] HRN EN ISO 4063
- [6] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Metalne punjene žice, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2009)3, s. 112-118
- [7] <https://www.wiretechworld.com/productive-technologies-of-flux-cored-wires-by-welding/>, pristupljeno: 7.10.2024.
- [8] <https://wespec.net/production-of-flux-cored-arc-welding/>, pristupljeno: 7.10.2024.
- [9] Welding Engineers: Metal Cored Wires vs Solid Wire
https://weldingengineers.co.nz/wp%1Econtent/uploads/2023/06/Metal_Cored_Wires_vs_Solid_Wire.pdf, pristupljeno 9.10.2024.
- [10] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Priručnik Zavarivački i srodni postupci, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] HRN EN ISO 14175:2014
- [12] Praxiar: Shielding Gases Selection Manual
- [13] <https://ahssinsights.org/joining/arc-welding/gas-metal-arc-welding/>, pristupljeno: 16.9.2024.
- [14] P. Kah and J. Martikainen, “Influence of shielding gases in the welding of metals,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 64, no. 9, pp. 1411–1421, 2013.
- [15] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [16] Garašić, I.: Utjecaj dušikova oksida u zaštitnim plinovima na stvaranje ozona i šesterovalentnog kroma; Zavarivanje vol 56, 5/6, str. 181 – 183, Zagreb, 2013.

- [17] Grbin, M., Kovačević, B., Živčić, M.: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996
- [18] Dzelnitzki, D.: Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja; Zavarivanje vol 56, str. 36 – 41, Zagreb, 2012
- [19] Lincoln Electric: Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAW_Wires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, pristupljeno: 7.11.2024
- [20] Perić, M. (2015). Numeričko modeliranje zaostalih napreznja i pukotina u zavarenim konstrukcijama (Disertacija). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu
- [21] Bauer, B.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zaostala napreznja i deformacije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [22] Parmar R. S.: Welding Engineering and Technology, Khanna publishers, Delhi, 2005.
- [23] Bauer, B.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zaostala napreznja i deformacije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [24] 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.
- [25] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [26] O'Brien A.: Welding Handbook Welding Processes Part 1, American Welding Society, Miami, 2004
- [27] Landek D.: Podloge za predavanja i vježbe „Proizvodni postupci – toplinska obrada“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [28] Vibratory Stress Relief, <https://www.superiordieset.com/press/vibratory-stress-relief/>, pristupljeno: 8.11.2024.
- [29] Duspara M., Mijušković G., Kopač J., Pavić M., Stoić A.: Popuštanje zaostalih napreznja metodom vibracija, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2011.
- [30] Veqter: Residual Stress Measurement, <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement>, pristupljeno: 8.11.2024.
- [31] Stresstech, Stresstech Bulletin 12: Measurement Methods of Residual Stresses, <https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testing-methods/>, pristupljeno: 11.11.2024.

- [32] Fitzpatrick M. E., Fry A. T., Holdway P.: Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction - Issue 2, National Physical Laboratory, London, 2005.
- [33] Müller E., Behler J.: Determination of Residual Stress by X-Ray Diffraction with the Cos-Alpha Method and Its Application, Residual Stress Measurements, 2023.
- [34] Tanaka K. The $\cos \alpha$ method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector. Mechanical Engineering Reviews. 2019; Vol.6, No.1
- [35] Residual Stress Analyzer μ -X360s Ex General description Operating manual, Pulstec Industrial Co., Ltd.
- [36] 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.
- [37] 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, International Conference on Residual Stresses, Sydney, 2016.
- [38] Gao H. Residual Stress Development due to High-Frequency Post Weld Impact Treatments for High-Strength Steels [doctoral thesis]. Mechanical, Maritime and Materials Engineering; 2014
- [39] https://www.daihen-varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-5001-eng.html, pristupljeno: 19.11.2024.
- [40] Bug-O Systems MDS-1002 traktor za zavarivanje, https://bugo.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/09/MDS_Bro_03_19.pdf, pristupljeno: 19.11.2024.
- [41] Certifikat materijala čelika S355J2 + N prema EN 10204:2004
- [42] <https://www.ezg.hr/proizvodi/kiswel/KX706.html>, pristupljeno: 19.11.2024.
- [43] HRN EN ISO 15614-1:2017