

Analiza metoda rendgenske i neutronske difrakcije za mjerenje zaostalih naprezanja

Nemec, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:516084>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Kristijan Nemeč

Zagreb 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Kristijan Nemeč

Zagreb 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i korištenjem navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću i asistentima Andrei Zaninović i Ivanu Juriću na pruženoj pomoći i vremenu tijekom izrade ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, bratu, sestri i Ivani na pruženoj potpori tijekom dosadašnjeg života i obrazovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Kristijan Nemec** Mat. br.: **0035216348**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza metoda rendgenske i neutronske difrakcije za mjerenje zaostalih naprezanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of X-ray and neutron diffraction test methods for residual stress measurement**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati mehanizme nastajanja zaostalih naprezanja kao posljedicu procesa zavarivanja. Detaljno proučiti metode ispitivanja zaostalih naprezanja te analizirati norme HRN EN ISO 21432 i HRN EN 15305 koje definiraju ispitivanje rendgenskom i neutronsom difrakcijom.

U eksperimentalnom dijelu rada za prikladnu geometriju zavara izraditi model zaostalih naprezanja uz pomoć programske aplikacije Visual Weld. Analizirati dobivene rezultate te ocijeniti mogućnost primjene metode rendgenske i neutronske difrakcije na realnom uzorku.


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

Zadatak zadan:
2021.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:


Izy. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. NAPREZANJE	2
3. DEFORMACIJE.....	4
4. ZAOSTALA NAPREZANJA NAKON ZAVARIVANJA	6
4.1. Klasifikacija zaostalih napreznja.....	7
4.2. Klasifikacija zaostalih napreznja kao posljedica zavarivanja	9
4.2.1. Longitudinalna napreznja.....	9
4.2.2. Transverzalna napreznja.....	12
5. DEFORMACIJE USLIJED ZAVARIVANJA	13
6. FAKTORI KOJI UTJEČU NA ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE	14
6.1. Toplinska i mehanička svojstva materijala [8, 10].....	14
6.2. Utjecaj postupka i parametara procesa zavarivanja	15
6.3. Utjecaj stezanja	16
6.4. Utjecaj pripreme spoja	17
6.5. Utjecaj redosljeda zavarivanja	18
7. MJERENJE ZAOSTALIH NAPREZNJA.....	19
7.1. Mehaničke metode.....	19
7.2. Nerazorne metode	25
7.2.1. Difrakcijske metode.....	25
7.2.1.1. Rendgenska difrakcijska metoda (X-ray).....	25
7.2.1.2. Neutronska difrakcijska metoda.....	32
7.2.2. Ostale metode.....	37
7.2.2.1. Barkhausen metoda.....	37
7.2.2.2. Ultrazvučna metoda	39
8. METODE SMANJIVANJA ZAOSTALIH NAPREZANJA I DEFORMACIJA	41
8.1. Prije zavarivanja i tijekom zavarivanja.....	41
8.1.1. Pravilno konstruiranje.....	41
8.1.2. Stezanje.....	41
8.1.3. Postavljanje i predsavijanje radnog komada.....	41
8.1.4. Priprema spoja	42
8.1.5. Redosljed i slijed zavarivanja	42

8.1.6.	Predgrijavanje	43
8.2.	Nakon zavarivanja	43
8.2.1.	Žarenje u svrhu smanjenja zaostalih naprežanja.....	43
8.2.2.	Smanjenje zaostalih naprežanja vibracijom.....	43
8.2.3.	Raskivanje zavara čekićem	43
8.2.4.	Mehaničko ravnanje.....	43
9.	EKSPERIMENTALNI DIO	44
9.1.	Odabir zavarenog spoja.....	44
9.2.	Izrada modela pomoću programske aplikacije Visual Weld.....	45
9.2.1.	Visual – Mesh	45
10.	ZAKLJUČAK.....	51
	LITERATURA	52
	PRILOZI	54

POPIS SLIKA

Slika 1. Djelovanje sila na tijelo [2].....	2
Slika 2. Model napreznja [2].....	3
Slika 3. Konvencionalni dijagram napreznja [3].....	4
Slika 4. Pojednostavljeni model štapa [5].....	6
Slika 5. Shematski prikaz zaostalih napreznja u zavaru [1].....	7
Slika 6. Zaostala napreznja prvog, drugog i trećeg reda [5].....	8
Slika 7. Distribucija temperature i napreznja tijekom zavarivanja [8].....	10
Slika 8. 3D prikaz raspodjele longitudinalnih zaostalih napreznja dviju sučeono zavarenih ploča [7]	11
Slika 9. a) mekani čelik b) visokolegirani čelik koji sadrži martenzit c) visokolegirani čelik koji sadrži austenit.....	11
Slika 10. 3D raspodjela transverzalnih zaostalih napreznja dviju sučeono zavarenih ploča [7].....	12
Slika 11. Česte deformacije uslijed zavarivanja [1].....	13
Slika 12. Utjecaj unosa topline na indeks deformacije [8].....	15
Slika 13. Utjecaj postupka zavarivanja na raspodjelu longitudinalnih zaostalih napreznja [8].....	15
Slika 14. Odnos deformacija i zaostalih napreznja uslijed stezanja [14].....	16
Slika 15. Primjeri pravilnog zavarivanja u više prolaza [10].....	17
Slika 16. Pravilan redosljed zavarivanja dna spremnika [10].....	18
Slika 17. Usporedba napreznja pri različitim tehnikama zavarivanja [8].....	18
Slika 18. Rozeta s tri mjerne trake [17].....	20
Slika 19. Alat pomoću kojeg se vrši metoda dubokih provrta [16].....	21
Slika 20. Metoda sekcioniranja [15].....	22
Slika 21. Ponašanje toplo oblikovanih traka [15].....	22
Slika 22. Ponašanje hladno oblikovanih traka [15].....	23
Slika 23. Metoda dijeljenja [15].....	23
Slika 24. Metoda uklanjanja slojeva materijala [15].....	24
Slika 25. Izgled difrakcijskog maksimuma [19].....	25
Slika 26. Bragg-ov zakon [19].....	26
Slika 27. Ravninski model napreznja [18].....	26
Slika 28. Ovisnost udaljenosti kristalnih rešetki o $\sin 2\psi$ [18].....	27
Slika 29. Mjerenje jednokutnom tehnikom [20].....	29
Slika 30. Bragg - ova geometrija [31].....	32
Slika 31. Shematski prikaz određivanja zaostalih napreznja pomoću monokromatske metode [31]..	34
Slika 32. a) Primjer testiranja neutronsom difrakcijom b) Izgled difrakcijskog maksimuma (peek) pri različitim iznosima zaostalih napreznja [23].....	35
Slika 33. Shematski prikaz mjerenja zaostalih napreznja pomoću Barkhausen - ove metode [25]....	37
Slika 34. Djelovanje vlačnog i tlačnog napreznja na intenzitet [27].....	38
Slika 35. Odnos jačine magnetskog polja i gustoće magnetskog toka s prikazom domene [27].....	38
Slika 36. Utjecaj napreznja na brzinu propagacije ultrazvučnih valova [15].....	39
Slika 37. Površinsko ultrazvučno mjerenje [15].....	39
Slika 38. Metoda pulsno odjeka [28].....	40
Slika 39. Postavljanje dijelova u suprotan položaj od predviđenih deformacija [9].....	42
Slika 40. Predsavijanje [9].....	42
Slika 41. Raskivanje zavara čekićem [9].....	43
Slika 42. Zavar.....	44
Slika 43. Opcija „Sweep“.....	45
Slika 44. Prikaz 2D mreže.....	46
Slika 45. Prikaz pravilnog pogrubljenja mreže.....	46

Slika 46. Završeni model	47
Slika 47. Kolektori osnovnog materijala i dodatnog materijala.....	48
Slika 48. Kolektor unosa topline.....	48
Slika 49. Kolektori stezanja	49
Slika 50. Kolektor izmjene topline	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri zavarivanja	44
--	----

SAŽETAK

Završni rad bavi se numeričkom analizom zavarenih spojeva s posebnim naglaskom na analizu zaostalih naprežanja i deformacija koje nastaju kao posljedice procesa zavarivanja. Završni rad sastoji se od dva dijela, teorijskog i praktičnog. U teorijskom dijelu definirani su i pojašnjeni pojmovi zaostalih naprežanja i deformacija. U radu se posebno naglašava kakav utjecaj navedeni pojmovi imaju na radni komad. Nadalje, opisane su metode određivanja zaostalih naprežanja, a poseban naglasak je stavljen na neutronska i rendgenska difrakcijska metoda. Obrađuju se i norme HRN EN ISO 21432:2020 i HRN EN 15305:2008, a na samom kraju teorijskog dijela rada opisuju se i metode kojima je moguće smanjiti zaostala naprežanja i deformacije.

Drugi dio završnog rada posvećen je eksperimentalnom dijelu u kojem se prema odabranom realnom komadu izrađuje model u programskom paketu Visual – Environment. Pravilnom izradom modela moguće je pokrenuti simulaciju pomoću koje se dobiva uvid u raspodjelu i iznos zaostalih naprežanja

Ključne riječi: zaostala naprežanja, deformacija, neutronska difrakcija, rendgenska difrakcija

SUMMARY

This undergraduate thesis deals with numerical analysis of welded joints with special emphasis on the analysis of residual stresses and strains. This undergraduate thesis consists of two parts, theoretical and practical. In the theoretical part, the concepts of residual stresses and strains are defined. The undergraduate thesis emphasizes the influence of these terms on the workpiece. Furthermore, methods for determining residual stresses are described, with special emphasis on the neutron and X – ray diffraction methods. The norms HRN EN ISO 21432:2020 and HRN EN 15305:2008 are also discussed, and at the end of the theoretical part, the methods by which it is possible to reduce residual stresses and strains are described.

The second part of the undergraduate thesis is dedicated to the experimental part in which a model in the Visual – Environment software package is created according to the selected real piece. With the correct construction of the model, it is possible to run a simulation that provides insight into the distribution and level of residual stresses

Keywords: residual stresses, deformation, neutron diffraction, X – ray diffraction

1. UVOD

Zavarivanje je jedan od najraširenijih postupaka spajanja. Iako je jedan od najraširenijih postupaka spajanja, isto tako je jedan i od najsloženijih. Složenost zavarivanja je posljedica velikog i nejednolikog unosa topline koja rezultira promjenama u mikrostrukтури materijala. Osim promjena u mikrostrukтури, dolazi do pojave deformacija i zaostalih naprezanja.

Zaostala naprezanja djeluju negativno na svojstva materijala jer unose naprezanje u materijala iako na njega ne djeluje niti jedna vanjska sila. Zaostala naprezanja mogu rezultirati većom sklonošću na krhki lom materijala kao i na prijevremeni zamor materijala. Isto tako zaostala naprezanja mogu rezultirati pukotinama, kao i smanjenjem otpornosti materijala na određene tipove korozije. Iako su zaostala naprezanja neizbježna, razvojem tehnologija i razumijevanjem procesa zavarivanja moguće ih je svesti na minimum.

Jedan od glavnih koraka u razumijevanju zaostalih naprezanja jest njihovo mjerenje, odnosno određivanje. Zaostala naprezanja je moguće odrediti razornim i nerazornim putem. Postoji velik broj metoda za određivanje zaostalih naprezanja, od kojih su najvažnije opisane u poglavlju sedam. U ovom radu detaljno će se razmotriti dvije difrakcijske metode za određivanje zaostalih naprezanja, neutronska i rendgenska difrakcijska metoda.

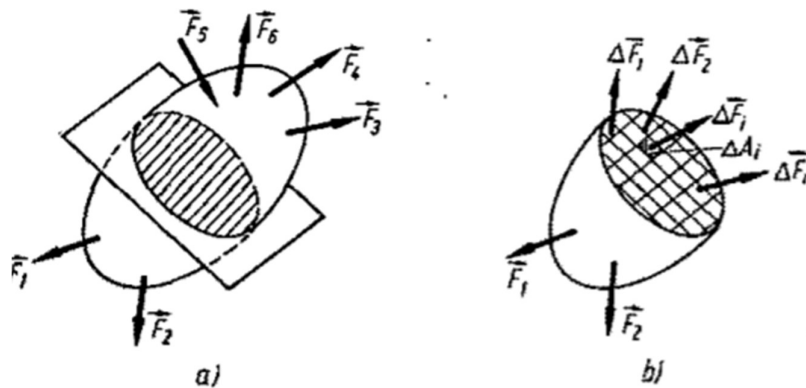
Jedan od načina određivanja zaostalih naprezanja je preko simulacije. Zbog toga ovaj rad, u eksperimentalnom dijelu, obuhvaća izradu modela na kojemu se provodi simulacija zavarivanja u programskom paketu Visual Environment. Prvi korak je odabir zavarenog uzorka za kojeg je potrebno napraviti simulaciju, nakon čega je napravljen model u jednom od modula programskog paketa. Kako bi rezultati simulacije bili zadovoljavajući, potrebno je napraviti model koji će biti što sličniji realnom komadu. Isto tako potrebno je što pravilnije određivanje svih parametara zavarivanja. Ukoliko je postupak modeliranja i određivanja parametara korektno napravljen, pokreće se simulacija koja po svojem završetku omogućava detaljan uvid u deformacije i zaostala naprezanja u svakoj sekundi procesa zavarivanja.

2. NAPREZANJE

Opterećenje nekog tijela izazvano je djelovanjem vanjskih sila i momenata. Opterećenje silama može biti izazvano normalnim silama ili tangencijalnim silama, dok kod momenata razlikujemo momente uvijanja i savijanja koji su pak izazvani silama. Ovisno o smjeru djelovanja vanjskih sila postoje opterećenja na: vlak, tlak, smik, savijanje i uvijanje. [1]

Djelovanje vanjskih sila na čvrsto tijelo ima izravne posljedice približavanja ili razdvajanja čestica unutar tijela čime se izaziva deformacija, odnosno, promjena oblika pri čemu dolazi do javljanja unutrašnjih sila između čestica koje se suprotstavljaju deformaciji. [2]

Na slici 1 nalazi se tijelo opterećeno vanjskim silama F_i koje je presječeno ravninom na dva dijela. Ukoliko se tijelo nalazi u mehaničkoj ravnoteži pod djelovanjem vanjskih sila, svaki dio tijela mora biti u ravnoteži pod djelovanjem vanjskih i unutrašnjih sila koje se javljaju na mjestu presjeka. Nakon presjeka, površina presjeka će se podijeliti na niz elementarnih površina ΔA_i kao što je prikazani na slici 1 pod b) [2]



Slika 1. Djelovanje sila na tijelo [2]

Na svakoj elementarnoj površini javlja se unutrašnja sila $\Delta \vec{F}_i$. Smjer i iznos unutrašnjih sila ovisi o svakoj elementarnoj površini zasebno, odnosno, o njenom položaju kao i o veličini elementarne površine. Ukoliko se u omjer stave unutrašnja sila ΔF_i i elementarna površina ΔA_i , nastali će se izraz definirati kao vektor srednjeg naprezanja. [2]

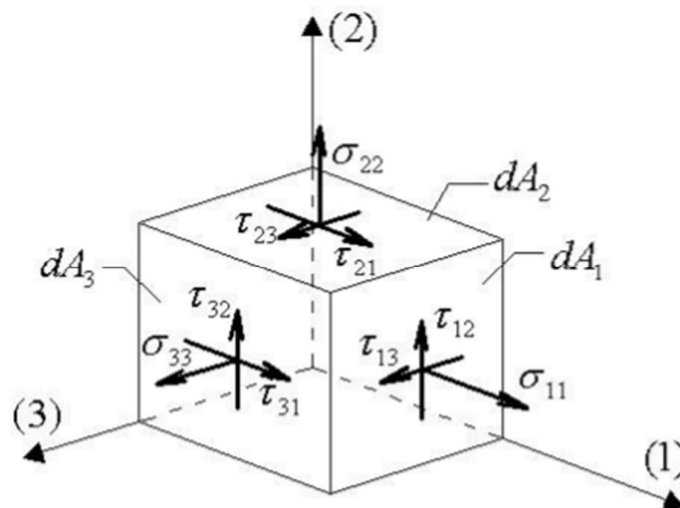
$$\vec{p}_{sr} = \frac{\Delta \vec{F}_i}{\Delta A_i} \quad (1)$$

Kako bi srednje naprezanje bilo što točnije pravom naprezanju, potrebno je smanjiti površinu ΔA_i , što će rezultirati i manjom silom $\Delta \vec{F}_i$. Zbog toga je potrebno raditi s infinitezimalnom površinom dA_i . Apsolutna je vrijednost vektora naprezanja puno naprezanje. Naprezanje \vec{p} moguće je rastaviti na tangencijalnu komponentu (τ), tj. na tangencijalno naprezanje koje leži u ravnini presjeka i na normalnu komponentu (σ), odnosno, na normalno naprezanje koje je okomito na površinu presjeka. Tijelo se normalnim naprezanjem pokušava oduprijeti razdvajanju i primicanju čestica, dok se tangencijalnim naprezanjem pokušava oduprijeti klizanju jednog sloja čestica po drugom. Iz izraza (1) može se lako definirati i mjerna jedinica za naprezanje Pa (Paskal) [2]:

$$Pa = \frac{N}{m^2} \quad (2)$$

U jednoj toćki presjeka moguće je imati beskonaćno mnogo tenzora naprezanja ovisno o orijentaciji presjeka, no kako bi mogli odrediti naprezanje u bilo kojem presjeku potrebno je poznavati vektor naprezanja \vec{p} za samo tri presjeka. Kako bi se olakšalo određivanje tenzora naprezanja, najćešće se uzimaju tri međusobno okomita presjeka postavljena okomito na koordinatnim osima. Vektor naprezanja \vec{p} potrebno je rastaviti na njegovu tangencijalnu i normalnu komponentu, što znaći da je potrebno poznavati samo 9 komponenta naprezanja za potpuno definiranje naprezanja u nekoj toćki. [2]

Kako bi se olakšalo oznaćavanje svih komponenta naprezanja i rad s istima, uvodi se koordinatni sustav.



Slika 2. Model naprezanja [2]

Radi jednostavnosti, svaku komponentu se oznaćava sa σ_{ij} te se upisuje u matricu [2]:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Predznaci komponenti naprezanja se određuju sljedećim pravilima [2]:

- Ukoliko komponenta naprezanja djeluje na pozitivnom presjeku, u pozitivnom smjeru ili ukoliko djeluje u negativnom smjeru na negativnom presjeku, ona će biti pozitivna
- Ukoliko komponenta naprezanja djeluje na pozitivnom presjeku u negativnom smjeru ili u pozitivnom smjeru na negativnom presjeku, ona će biti negativna

Presjek je pozitivan ukoliko je vanjska normalna usmjerena u pozitivnom smjeru koordinatne osi, a u suprotnom slućaju je negativan [2].

3. DEFORMACIJE

Jedan od glavnih alata za utvrđivanje mehaničkih svojstava materijala jest dijagram $\sigma - \varepsilon$. Dijagram nastaje tako da se sila koja djeluje na ispitni uzorak, F , podjeli s početnom površinom A_0 čime se dolazi do konvencionalnog naprezanja σ_0 . [3]

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

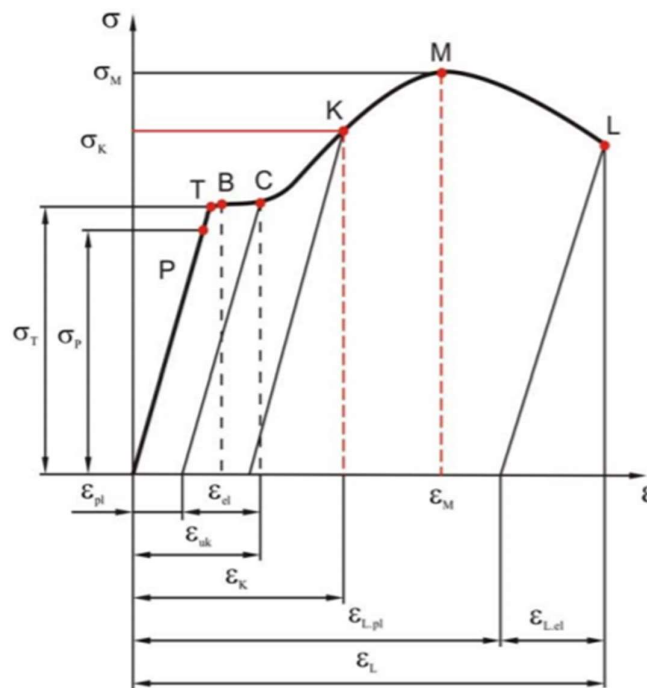
Kako bi se došlo do stvarnog naprezanja potrebno je podijeliti silu F s trenutnom površinom poprečnog presjeka ispitnog uzorka. [3]

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Iz razloga što je A uvijek manja od A_0 , stvarno naprezanje uvijek će biti veće od konvencionalnog. [3]

Do deformacije se dolazi dijeljenjem produljenja epruvete s njenom početnom duljinom. [3]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$



Slika 3. Konvencionalni dijagram naprezanja [3]

Na slici 3. prikazan je konvencionalni dijagram rastezanja koji se pokazao kao važan alat pri određivanju mehaničkih svojstava materijala. Dijagram započinje iz ishodišta linearno, odnosno Hooke – ovim pravcem za koji vrijedi Hooke – ov zakon [3, 4]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Jednadžba (7) opisuje odnos naprezanja i deformacije s modulom elastičnosti. Naime, što je modul elastičnosti E veći, biti će potrebno veće naprezanje σ , kako bi se dobilo jednako istežanje ε , što bi rezultiralo strmijim pravcem. Posebnost linearnog dijela dijagrama jest elastičnost, odnosno elastična deformacija. Ukoliko se naprezanje nalazi u području Hookeovog zakona, ono će izazvati samo elastičnu deformaciju. To znači da će deformacije koje su nastupile uslijed naprezanja u potpunosti nestati u trenutku rasterećenja. Malo iznad σ_p , nalazi se σ_E koje predstavlja najviše naprezanje do kojeg se materijal još uvijek ponaša elastično. Ukoliko je $\sigma \leq \sigma_p$, epruveta će se u potpunosti vratiti u prvobitno stanje. [3, 4]

Točka T na dijagramu predstavlja granicu tečenja. Ukoliko se dostigne vrijednost naprezanja σ_T epruveta će se početi produljivati bez daljnjeg povećanja naprezanja, nastupiti će plastično tečenje materijala. Granica tečenja jest okarakterizirana s dvije točke, B-C. One predstavljaju gornju i donju granicu tečenja te se taj dio prikazuje kao ploha tečenja. Ukoliko se epruveta rastereti, a već je dosegla područje tečenja, nastupit će trajna plastična deformacija ε_{pl} . [3, 4]

Nakon prelaska vrijednosti točke C, nastupa područje očvršnuća materijala sve do točke M. Ukoliko se u području C-M poveća opterećenje, povećat će se i naprezanje i deformacije. [3, 4]

Dolaskom u točku M javlja se naprezanje uslijed maksimalne sile σ_M , koje se još naziva i vlačna ili rastezna čvrstoća R_m . Postizanjem maksimalne sile dolazi do naglog smanjenja poprečnog presjeka epruvete, što rezultira naglim porastom naprezanja unatoč smanjenju sile. [3, 4]

U točki L dolazi do loma epruvete zbog čega se naprezanje u točki L zove konačno ili lomno naprezanje.

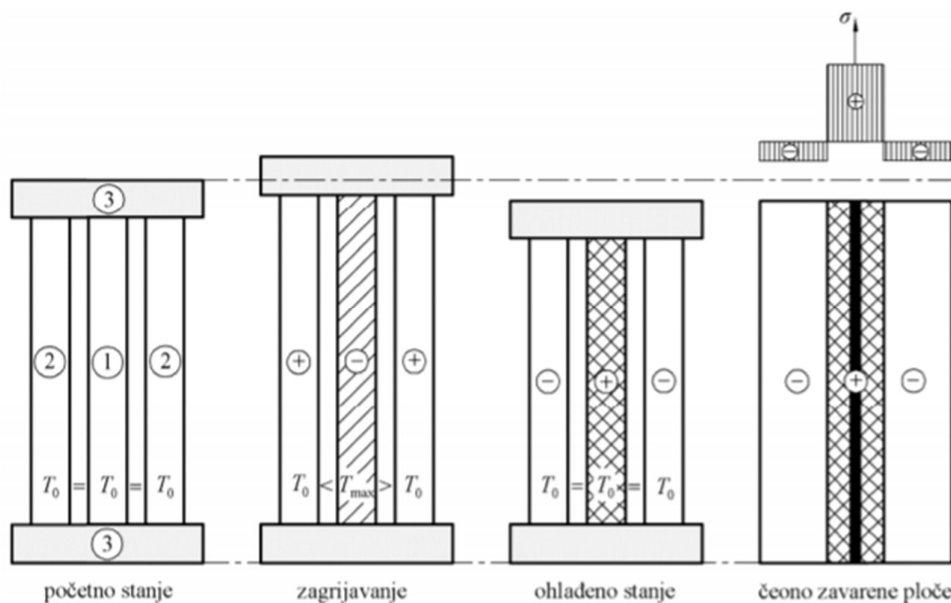
Potrebno je naglasiti kako se dijagrami $\sigma - \varepsilon$ razlikuju ovisno o materijalu, ali i o temperaturi. Temperatura utječe na epruvetu tako da povišenjem temperature dolazi i do povišenja duktilnosti materijala, ali i do smanjenja granice tečenja. S druge strane, pri nižim temperaturama dolazi do suprotnog efekta. Naime, materijalu će se povećati granica tečenja, ali će on bit krući. [3, 4]

4. ZAOSTALA NAPREZANJA NAKON ZAVARIVANJA

Zaostala naprezanja i deformacije pojavile su se samom pojavom zavarivanja kao tehnike spajanja. Postoje zapisi o štetnim naprezanjima u metalima nakon zavarivanja još iz 1892. godine. Iako je zavarivanje znatno napredovalo od tada, zaostala naprezanja su ostala problem koji još nije riješen. [5]

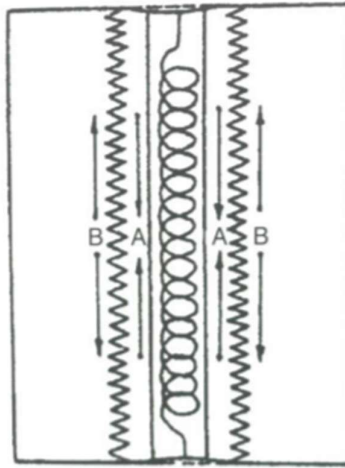
Zaostala su naprezanja ona koja se nalaze u radnom komadu, ukoliko u tom trenutku ne djeluje niti jedna vanjska sila ili moment na taj komad. [6]

Zaostala naprezanja moguće je jednostavno prikazati modelom koji se sastoji od tri identična štapa, a oni su na krajevima nepomično spojeni s krutim pločama. Gornja kruta ploča može se pomicati u smjeru osi štapova. Iako su zaostala naprezanja iznimno složeni troosni problem, u velikom broju slučajeva zadovoljavajući rezultati dobivaju se promatranjem problema u dvoosnom ili jednoosnom stanju naprezanja zbog čega se može koristiti jednostavni model tri štapa. U ovom slučaju, središnji se štap promatra kao zavar što znači da se u njega unosi toplina, dok se granični štapovi ponašaju kao ostatak konstrukcije u koji se ne unosi toplina. U početnom stanju svim štapovima temperatura je jednaka i iznosi T_0 . Središnji će se štap tijekom zagrijavanja htjeti produljiti, no kako je on spojen preko krute ploče s druga dva štapa, oni će se isto tako produljiti. Produljivanjem dva granična štapa oni će biti opterećeni na vlak, a središnji štap na tlak. Ukoliko je maksimalna temperatura T_{max} dovoljno visoka, nastala tlačna naprezanja će biti veća od granice tečenja materijala, što znači kako će na materijalu ostati trajne plastične deformacije nakon hlađenja na početnu temperaturu T_0 . Ako je maksimalna temperatura T_{max} nedovoljno visoka, odnosno, ukoliko će nastala naprezanja u središnjem štapu biti ispod granice tečenja materijala, nakon njegovog hlađenja neće doći do deformacija. Tijekom hlađenja naprezanja će biti suprotna od onih tijekom zagrijavanja što znači kako će se u središnjem štapu pojaviti vlačno naprezanje, a u graničnim tlačno naprezanje. [1, 5]



Slika 4. Pojednostavljeni model štapa [5]

Analogiju modela tri štapa moguće je primijetiti kod sućeono zavarenih ploća, gdje se zavar ponaša kao središnji štap, a području udaljenom od zavara se može pripisati uloga granićnih štapova. [1]



Slika 5. Shematski prikaz zaostalih naprežanja u zavaru [1]

Na slici 5 može se primijetiti sličnost s modelom tri štapa gdje se metal zavar pokušava skupiti te zbog toga djeluje na spoj kao napeta opruga, a okolni materijal ima ulogu granićnih štapova, odnosno, on se opire stezanju poput stlačene opruge. Slika 5 pojednostavljeni je prikaz naprežanja.

Iako je model tri štapa dobar kako bi se dobio dobar uvid u što i kako nastaju zaostala naprežanja, ona su zapravo puno složenija i ovise o brojim faktorima poput [1]:

- Oblika konstrukcije
- Dimenzija
- Dodatnog materijala
- Toplinskih rubnih uvjeta
- Mehanićkih rubnih uvjeta
- Broju prolaza tijekom zavarivanja
- Redoslijedu zavarivanja
- Kolićini unesene topline tijekom zavarivanja

Ovisnost deformacije o zaostalim naprežanjima se može podijeliti u tri skupine:

- Ovisnost o rasporedu skupljanja zavara
- Ovisnost o debljini materijala
- Ovisnost o krutosti konstrukcije

4.1. Klasifikacija zaostalih naprežanja

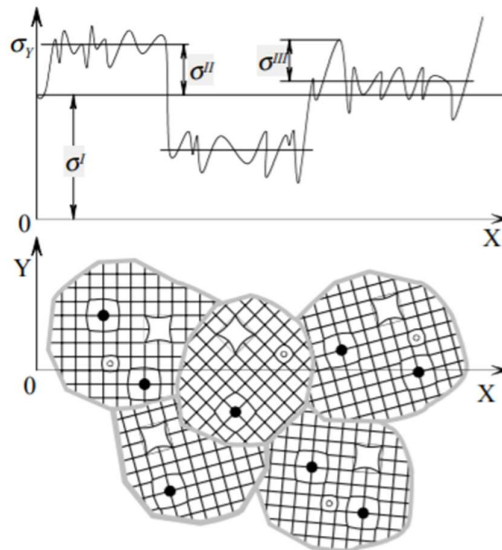
Kao što je već rećeno zaostala naprežanja nastaju radi neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja konstrukcije. Zaostala naprežanja dijele se na: makro i mikro naprežanja prvog, drugog i trećeg reda.

Zaostala naprežanja prvog reda (σ^I) protežu se preko makroskopskih područja, odnosno, preko velikog broja kristalnih zrna. Sile i momenti koji djeluju na predmet nalaze se u međusobnoj

ravnoteži. Upravo zato što se naprezanja prvog reda protežu preko makroskopskih područja, ona se još nazivaju i makro zaostala naprezanja. [5, 6]

Zaostala naprezanja drugog reda (σ^{II}) protežu se preko manjeg područja od zaostalih naprezanja prvog reda, odnosno, preko nekoliko susjednih zrna. Iznos zaostalih naprezanja drugog reda je konstantan. Ukoliko dođe do narušavanja ravnoteže može doći do promjena dimenzije. Za razliku od zaostalih naprezanja prvog reda, zaostala naprezanja drugog reda pripadaju mikro zaostalim naprezanjima. [5, 6]

Zaostala naprezanja trećeg reda (σ^{III}) protežu se na izuzetno malenom prostoru reda veličine atomskih razmaka. Kod zaostalih naprezanja trećeg reda pripadajući momenti i sile su u ravnoteži samo u malom dijelu zrna. Na zaostala naprezanja trećeg reda može se gledati kao na odstupana od prosjeka zaostalih naprezanja drugog reda izazvana različitim nepravilnostima na atomskoj razini. Isto kao i naprezanja drugog reda, naprezanja se trećeg reda mogu zvati i mikro zaostala naprezanja. [5, 6]



Slika 6. Zaostala naprezanja prvog, drugog i trećeg reda [5]

Zaostala naprezanja koja se javljaju u nekoj konstrukciji, odnosno komadu, rezultat su superponiranja zaostalih naprezanja sva tri reda. Iz čega slijedi jednačba [6]:

$$\sigma = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (8)$$

Prilikom utvrđivanja utjecaja zaostalih naprezanja na deformacije koje nastaju, istraživanje bi trebalo biti usmjereno na makro zaostala naprezanja. Vanjske sile koje izazivaju zaostala naprezanja jesu makro naprezanja, a kojima pripada i zavarivanje. [5]

Kao što je već rečeno, unutrašnja naprezanja su uvijek u ravnoteži. Upravo zbog toga, neovisno o raspodjeli naprezanja u materijalu, naprezanja u svakom poprečnom presjeku moraju biti uravnotežena sumom sila i sumom momenata sila i moraju iznositi 0. Drugim riječima, u bilo kojoj ravnini okomitoj na os x, treba vrijediti [5]

$$\int_A \sigma_x \cdot dA = 0 \quad (9)$$

$$\int_A \sigma_x \cdot y \cdot dA = 0 \quad (10)$$

$$\int_A \sigma_x \cdot z \cdot dA = 0 \quad (11)$$

Gdje σ_x predstavlja normalno naprežanje u točki s koordinatama (y, z) u poprečnom presjeku površine A.

4.2. Klasifikacija zaostalih naprežanja kao posljedica zavarivanja

Naprežanja koja se javljaju prilikom procesa zavarivanja nazivamo unutrašnjim naprežanjima, a njih možemo podijeliti s obzirom na sljedeće karakteristike [5]:

1. Trajnost
2. Smjer
3. Podrijetlo

Naprežanja koja nastaju prilikom zavarivanja, prema trajnosti mogu se podijeliti na [5]:

- Privremena
- Zaostala

Privremena naprežanja koja se javljaju tijekom zavarivanja postoje samo u određenim trenucima zbog neravnomjernog postupka zagrijavanja i hlađenja, dok se zaostala naprežanja mogu naći u konstrukciji i nakon što je proces zavarivanja završen, a konstrukcija ohlađena na sobnu temperaturu. [5]

Gledano na smjer djelovanja naprežanja, ona se mogu podijeliti na [5, 7]:

- Longitudinalna (naprežanja kojima je smjer paralelan smjeru zavarivanja)
- Transverzalna (naprežanja kojima je smjer okomit smjeru zavarivanja)

Naprežanja nastala kao posljedica zavarivanja, prema podrijetlu, dijele se na [5, 7]:

- Toplinska naprežanja (nastala zbog neravnomjerne raspodjele temperature)
- Naprežanja nastala plastičnom deformacijom metala
- Naprežanja nastala faznom promjenom

Iako naprežanja zbog fazne promjene mogu nastati, pogotovo tijekom zavarivanja legiranih čelika, ona su znatno manja naspram ostalih naprežanja se radi pojednostavljenja ista i mogu zanemariti. [5, 7]

4.2.1. Longitudinalna naprežanja

Longitudinalna naprežanja djeluju u smjeru osi zavara. Maksimalni iznos longitudinalnih zaostalih naprežanja može biti jednak granici tečenja materijala (R_e). Na slici 7 prikazan je proces zavarivanja električnim lukom koji se pomiče konstantnom brzinom s jednog kraja ploče do drugog. U prikazanom trenutku na slici, električni luk se nalazi u točki O, daleko od strane na kojoj je zavarivanje započelo. Kako bi se dobio uvid u promjenu temperature i zaostala naprežanja, uzeta su 4 presjeka A, B, C i D. Na ovoj će slici biti prikazani samo

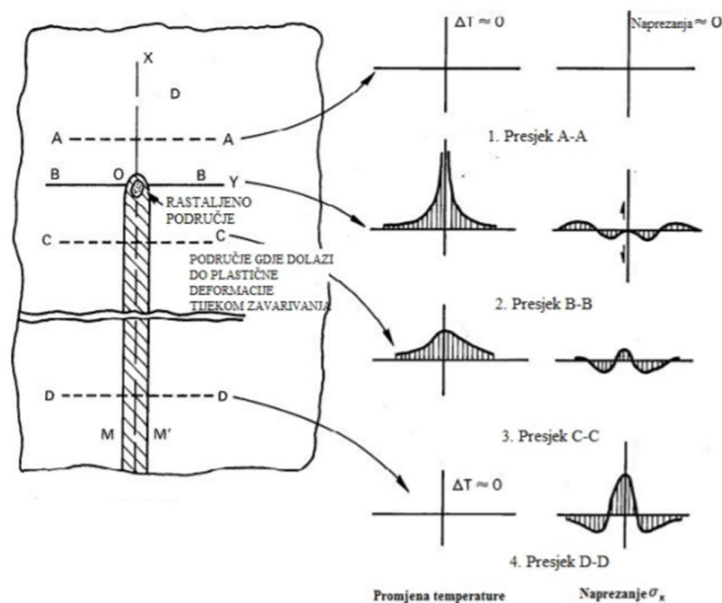
longitudinalna naprezanja, a transverzalna će biti zanemarena jer će se obrađivati u sljedećem poglavlju radi lakšeg razumijevanja slike. [7]

Presjek D-D, koji se nalazi daleko od luka ohladio se na sobnu temperaturu. Stabilizacijom temperature, došlo je i do stabilizacije zaostalih naprezanja u materijalu. Iz dijagrama, desno od slike materijala, možemo vidjeti kako se u metalu zavora i zoni utjecaja topline (ZUT – u) javlja poprilično visoka vlačna naprezanja, dok se u osnovnom materijalu javljaju visoka tlačna naprezanja. [7]

Sljedeći presjek, C-C, nalazi se na maloj udaljenosti iza električnog luka zbog čega se temperatura još nije stabilizirala i vratila na sobnu. Iako se temperatura nije u potpunosti vratila na sobnu, svakako je došlo do određenog hlađenja koje za posljedicu ima pojavu zaostalih naprezanja. Oni su smjerom djelovanja jednaki u presjeku D-D, no iznosom su manji. Nakon što se temperatura stabilizira kao i u presjeku D-D, doći će do izjednačavanja i zaostalih naprezanja. [7]

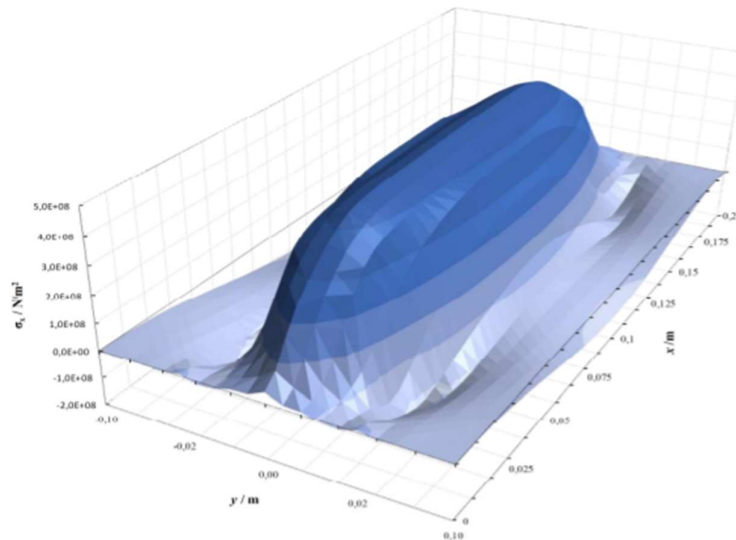
Električni luk se nalazi u presjeku B-B zbog čega je temperatura na svojoj maksimalnoj vrijednosti. Iz tog razloga, zaostala naprezanja gotovo da i ne postoje u tom trenutku u presjeku B-B. Razlog tomu je taj što rastaljeni metal ne može prenositi opterećenje koje bi se javljalo. U zoni utjecaja topline javlja se tlačno naprezanje jer se osnovni materijal odupire termičkoj ekspanziji zagrijanog metala. Velik udio tlačnih naprezanja koji se javljaju u području zone utjecaja topline ograničeni su granicom tečenja metala. Kako bi sustav bio u mehaničkoj ravnoteži, dolazi do pojave vlačnih naprezanja koja se nalaze dalje od zone zavarivanja. [7]

Presjek A-A još nije bio u kontaktu s električnim lukom zbog čega se temperatura u presjeku A-A nije mijenjala. Shodno tome nema ni zaostalih naprezanja. [7]



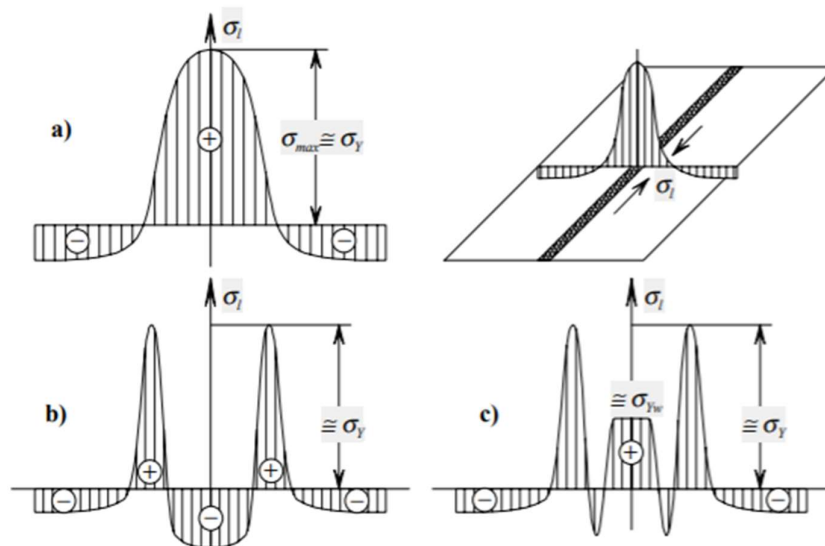
Slika 7. Distribucija temperature i naprezanja tijekom zavarivanja [8]

Kako bi se dobio uvid u kompleksnost zaostalih napreznja, na slici 8 prikazan je 3D model raspodjele zaostalih napreznja dviju sučeono zavarenih ploča.



Slika 8. 3D prikaz raspodjele longitudinalnih zaostalih napreznja dviju sučeono zavarenih ploča [7]

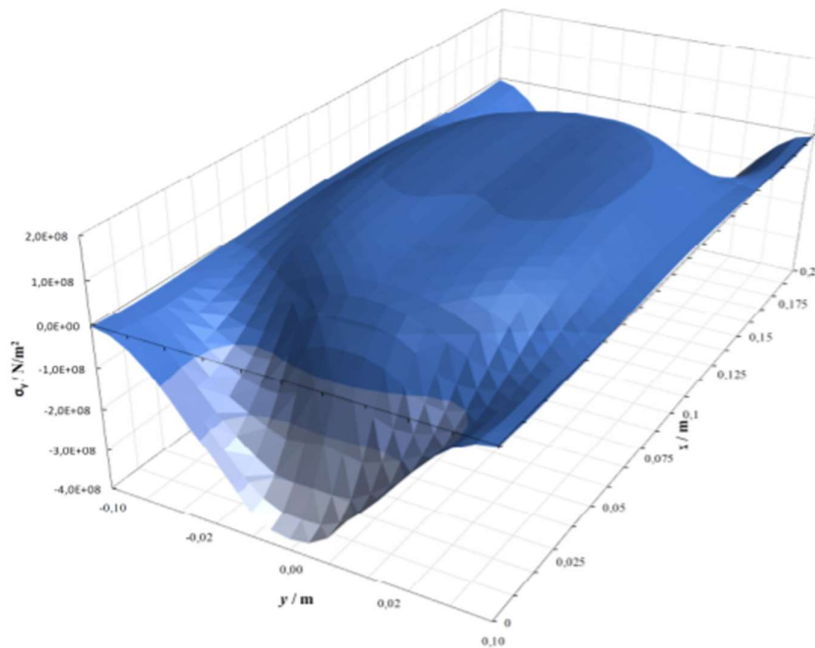
Iz slike zaključujemo kako su vlačna napreznja u zoni zavara i u području metala neposredno uz zavar izrazito visoka. Udaljavanjem od zavara može se primijetiti kako vlačna napreznja opadaju i prelaze u tlačna napreznja kako bi sustav bio u mehaničkoj ravnoteži. Kao što je već napisano, vlačna napreznja su izrazito visoka, poprimaju vrijednost blizu granici tečenja materijala. Raspodjela napreznja prikazana na slici 8 predstavlja stanje napreznja koja su karakteristična za mekane čelike, odnosno čelike koji imaju malen udio ugljika u svom sastavu. Raspodjela zaostalih napreznja ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, primjer toga može se vidjeti na slici 9.



Slika 9. a) mekani čelik b) visokolegirani čelik koji sadrži martenzit c) visokolegirani čelik koji sadrži austenit

4.2.2. Transverzalna naprezanja

Nakon što se limovi ohlade, zbog transverzalnog i longitudinalnog skraćivanja materijala, dolazi do pojave transverzalnih zaostalih naprezanja. Ukoliko se želi smanjiti iznos transverzalnog naprezanja, ploče bi trebale biti slobodne (bez ikakvih ograničavanja). Najviše vrijednosti transverzalnih zaostalih naprezanja mogu se uočiti na samom početku i završetku zavara. Iako su transverzalna zaostala naprezanja često iznosom manja od longitudinalnih (zbog relativno malene količine materijala koji je zagrijan u odnosu na veličinu osnovnog materijala), njih se ne može u potpunosti ignorirati upravo zbog najviših vrijednosti koje se javljaju na početku i kraju zavara. Na slici 10 prikazan je 3D model transverzalnih naprezanja. [8]



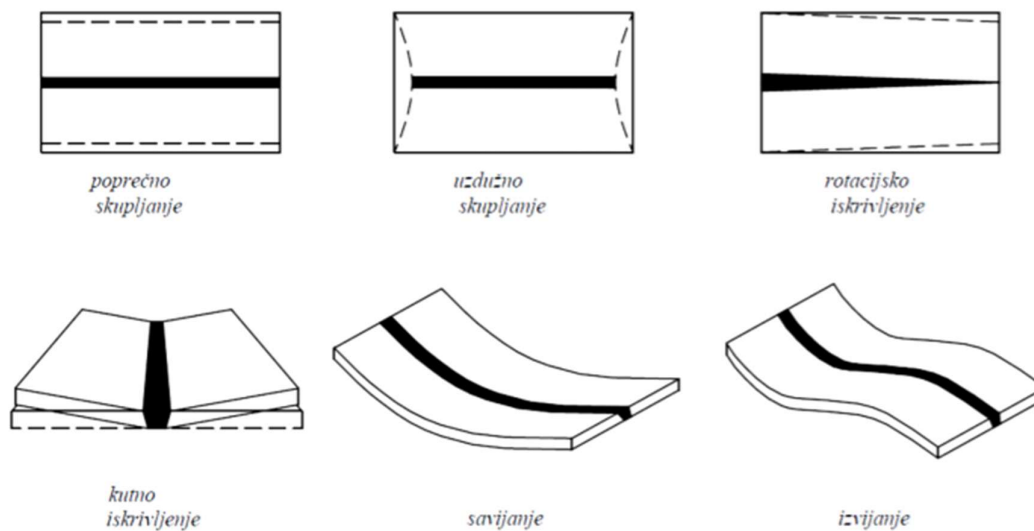
Slika 10. 3D raspodjela transverzalnih zaostalih naprezanja dviju sučeono zavarenih ploča [7]

Potrebno je spomenuti kako longitudinalna i transverzalna zaostala naprezanja nisu jednina. Osim njih postoje i naprezanja koja djeluju u smjeru debljine materijala. Tu vrstu zaostalih naprezanja često je moguće zanemariti, no ukoliko je materijala deblji od 25 mm, potrebno ih je uzeti u obzir jer mogu biti velikog iznosa. Nastaju kao posljedica skupljanja spoja u smjeru debljine materijala. Smjer je djelovanja vlačan u području spoja, a tlačan u osnovnom materijalu. Ukoliko je iznos i ove vrste zaostalih naprezanja značajna opasnost od krhkog loma [5, 8]

5. DEFORMACIJE USLIJED ZAVARIVANJA

Deformacije, poput naprezanja, mogu biti privremene i trajne (zaostale). Najčešće vrste deformacija izazvane procesom zavarivanja su:

- Longitudinalno skupljanje – skupljanje okomito na središnju liniju zavara
- Transverzalno skupljanje – skupljanje u smjeru linije zavara
- Rotacijsko deformiranje – deformiranje uzrokovano nejednolikom raspodjelom temperature po debljini zavara
- Kutno deformiranje – kutno deformiranje ploča koje se pojavljuje zbog toplinskog širenja ili stezanja
- Savijanje – deformiranje u ravnini zavara
- Izvijanje – deformiranje izazvano tlačnim naprezanjem (kod tankih ploča)



Slika 11. Česte deformacije uslijed zavarivanja [1]

Deformacije kod zavarivanja mogu se definirati kao odstupanja konstrukcije od prvobitno definiranog oblika. One su posljedica neravnomjernog unošenja topline u konstrukciju te hlađenja iste natrag na sobnu temperaturu. Ukupni iznos deformacije materijala zavarene konstrukcije moguće je izraziti preko sljedeće formule [9]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\Delta V} + \varepsilon_{Trp} \quad (12)$$

Gdje su:

ε_{el} – elastična deformacije

ε_{pl} – plastična deformacija

ε_{th} – toplinska deformacija

$\varepsilon_{\Delta V}$ – volumenska deformacija nastala kao posljedica faznih promjena unutar materijala

ε_{Trp} – plastična deformacija nastala kao posljedica faznih promjena unutar materijala

6. FAKTORI KOJI UTJEČU NA ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE

Zaostala naprezanja i deformacije izazvane zaostalim naprezanjima iznimno su kompleksni problemi koji se, unatoč velikom razvitku zavarivanja, još uvijek u potpunosti ne mogu odstraniti. Iako nije u potpunosti došlo do razumijevanja ove dvije pojave, velikim se brojem ispitivanja uspjelo ustanoviti kako mehanička i toplinska svojstva materijala, unos i raspodjela topline zavarivanja te mehanički utjecaji poput stezanja i debljine materijala primarno utječu na zaostala naprezanja i deformacije.

6.1. Toplinska i mehanička svojstva materijala [8, 10]

Mehanička i toplinska svojstva materijala koja utječu na pojavu zaostalih naprezanja i deformacija su [10, 11]:

- Modul elastičnosti
- Granica tečenja materijala
- Koeficijent toplinske rastezljivosti
- Gustoća materijala
- Specifični toplinski kapacitet
- Koeficijent toplinske vodljivosti
- Temperatura tališta

Koeficijent toplinske rastezljivosti ima veliki utjecaj pri formiranju zaostalih naprezanja. Što je manji koeficijent toplinske rastezljivosti i temperatura tališta materijala, to će biti manja i zaostala naprezanja. Toplinska vodljivost suprotnog je utjecaja od koeficijenta toplinske rastezljivosti. Naime, ukoliko je toplinska vodljivost veća, toplina će brže putovati kroz materijal što će rezultirati smanjenim naprezanjima. Toplinska vodljivost diktira brzinu prijenosa topline kroz materijal. Specifični toplinski kapacitet i gustoća materijala ponašaju se poput toplinske vodljivosti. To znači da što su viši, manja je sklonost nastanku zaostalih naprezanja. [10, 11]

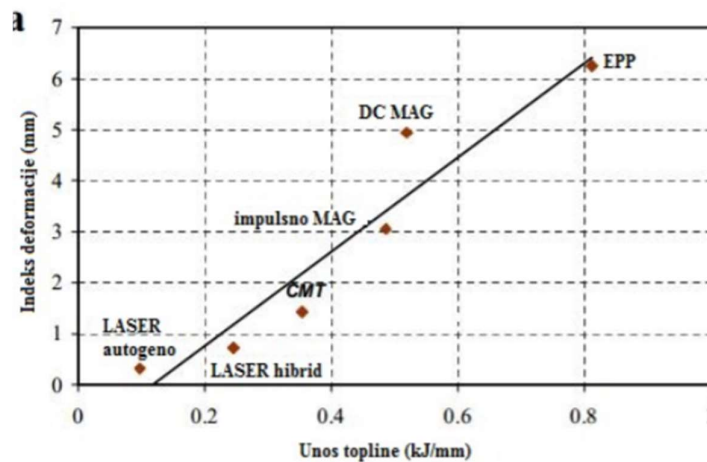
Gledajući na mehanička svojstva, modul elastičnosti i granica tečenja materijala postavljaju se kao dva važnija svojstva. Ukoliko je modul elastičnosti niži, materijal će biti skloniji deformacijama, a manje zaostalim naprezanjima. Jedan takav primjer jest aluminij. Ukoliko je modul elastičnosti viši dogodit će se suprotna situacija, viša naprezanja, a manje deformacije. Ista stvar se može primijetiti i kod granice tečenja. Ukoliko je granica tečenja visoka, zaostala naprezanja će biti viša, a deformacije manje. [10]

6.2. Utjecaj postupka i parametara procesa zavarivanja

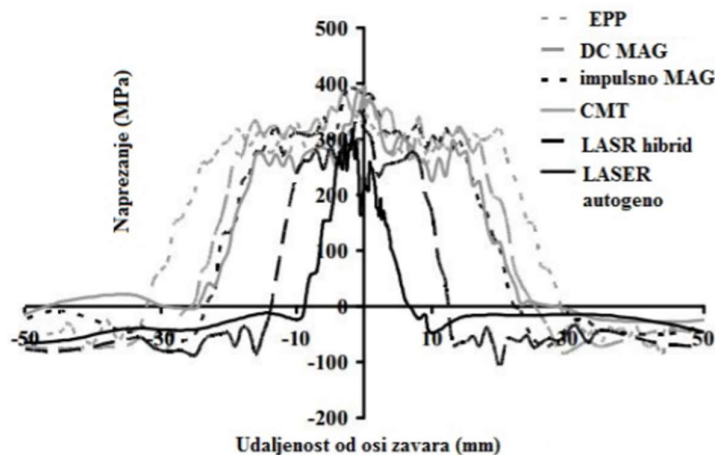
U utjecaju postupka zavarivanja provedeno je istraživanje u kojem se istraživalo utjecaj raznih procesa zavarivanja pri zavarivanju ASTM A131 DH36 čelika dimenzija 500 x 125 x 4mm. Korištene metode zavarivanja su:

- MAG
- Impulsno MAG
- EPP
- CMT
- Lasersko
- Hibridno lasersko

Nakon što su ploče zavarene postupcima zavarivanja, provedena je analiza kojom se došlo do zaključka kako indeks deformacije gotovo pa linearno ovisi o količini unesene topline, što se može zaključiti iz sljedećeg grafa. Indeks deformacije predstavlja srednju vrijednost mjerenih deformacija izvijanja na različitim mjestima zavarenog spoja. Na temelju grafa može se uočiti kako se kod procesa s najvišim unosom topline (EPP) javljaju i najveće deformacije. Dok je kod laserskog potpuno obrnuta situacija. [12]



Slika 12. Utjecaj unosa topline na indeks deformacije [8]



Slika 13. Utjecaj postupka zavarivanja na raspodjelu longitudinalnih zaostalih napreznja [8]

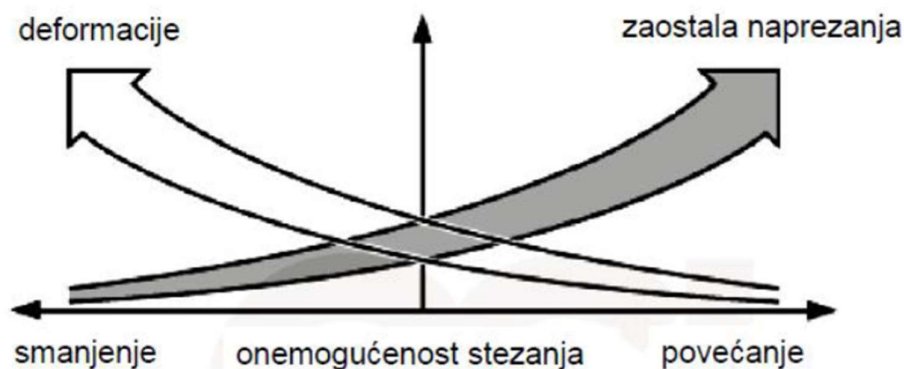
Iako različiti postupci različito utječu na vršnu vrijednost deformacija, to nije slučaj kod longitudinalnih zaostalih napreznja. Na slici 13 može se primijetiti da, iako je vršna vrijednost longitudinalnih zaostalih napreznja za svaki postupak gotovo pa jednaka, njihov raspored nije. [11]

Uz unos topline, brzina zavarivanja također utječe na zaostala napreznja. Porastom brzine zavarivanja dolazi do pada deformacija, ali do porasta zaostalih napreznja. [8]

Predgrijavanje je zagrijavanje materijala na propisanu temperaturu višu od okolišne prije početka zavarivanja te održavanje iste temperature tijekom zavarivanja. Predgrijavanje se radi kako bi se smanjila razlika temperatura unutar materijala, što za rezultat ima smanjenje brzine hlađenja čime se povoljno utječe na zaostala napreznja i deformacije. Smanjenjem brzine hlađenja smanjuje se i količina tvrdih faza. Iako se često provodi samo lokalno zagrijavanje mjesta zava i zone utjecaja topline, radi financijske i vremenske uštede, ukoliko ono nije pravilno odrađeno može čak nastupiti povećanje zaostalih napreznja [9, 11]

6.3. Utjecaj stezanja

Ukoliko su skupljanja materijala raspoređena simetrično, ako je materijal velike debljine ili ukoliko je konstrukcija kruta, nastale će deformacije biti male, a zaostala napreznja biti će velika. U suprotnom slučaju, ukoliko je nesimetrično skupljanje materijala ili je materijal male debljine ili konstrukcija nije kruta, deformacije će biti velike, a zaostala će napreznja biti mala. Iz napisanog zaključujemo kako je odnos deformacija i zaostalih napreznja obrnuto proporcionalan.



Slika 14. Odnos deformacija i zaostalih napreznja uslijed stezanja [14]

U izvoru [13] provedeno je istraživanje utjecaja stezanja na zaostala napreznja i deformacije iz kojeg se došlo do nekoliko važnih zaključaka.

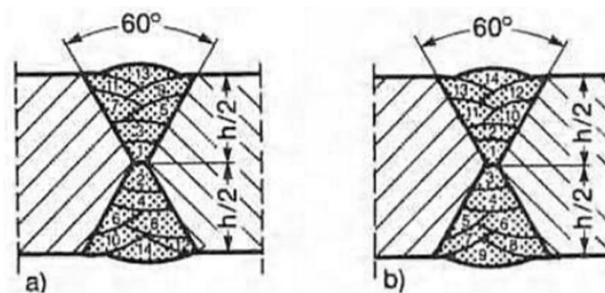
- Stezanjem tijekom zavarivanja i otpuštanjem stezanja nakon potpunog hlađenja na sobnu temperaturu dolazi do smanjenja kutne distorzije i to značajno
- Stezanjem tijekom zavarivanja i otpuštanjem stezanja nakon potpunog hlađenja na sobnu temperaturu dolazi do povećanih transverzalnih zaostalih napreznja
- Stezanjem tijekom zavarivanja i otpuštanjem stezanja nakon potpunog hlađenja na sobnu temperaturu dolazi do povećanih longitudinalnih zaostalih napreznja na dnu površine radnog komada

- Stezanjem tijekom zavarivanja i otpuštanjem stezanja dok je radni komad još vruć neće se znatno utjecati na zaostala naprezanja, dok će deformacija postojati kao posljedica stezanja materijala uslijed hlađenja.

6.4. Utjecaj pripreme spoja

Korektnom pripremom spoja može se značajno utjecati na moguće nastale deformacije i zaostala naprezanja. Kako je poznato da unos topline ima značajnu ulogu u nastajanju zaostalih naprezanja i deformacija, potrebno je odabrati spoj koji će za posljedicu imati najmanji mogući unos topline. Ukoliko je potrebno zavariti sučeljeni spoj male debljine, kao najbolji izbor se postavlja I priprema spoja. Ako nije moguće koristiti I pripremu, potrebno je prednost dati U pripremi spoja ispred V pripreme spoja jer ona ima povoljniji utjecaj na zaostala naprezanja i deformacije. Ukoliko je potrebno zavariti deblje materijale, moguće je upotrijebiti dvostruki U – spoj. Korištenjem obostranog zavarivanja postići će se manje kutne deformacije. Kako bi se maksimalno smanjila kutna deformacija potrebno bi bilo zavarivati obje strane odjednom u jednom prolazu ili naizmjenično zavarivati u više prolaza. [8, 10]

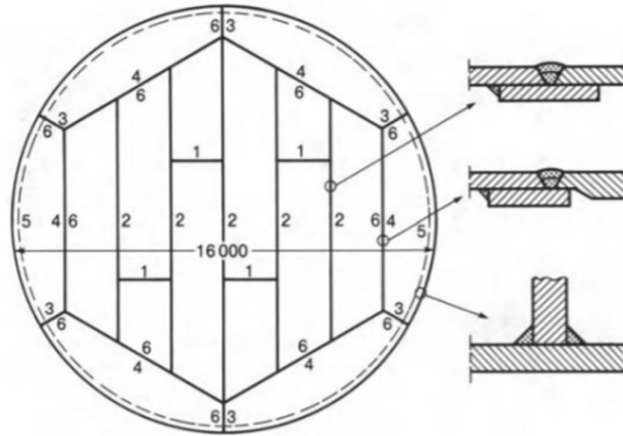
Zavarivanjem u više prolaza dolazi do smanjenja zaostalih naprezanja i smanjenja opasnosti od krhkog loma. Ipak, zavarivanje u više prolaza za posljedicu ima i negativne efekte poput povišenja transverzalnih zaostalih naprezanja i skupljanja te kutnih deformacija. Kako se svakim novim prolazom unosi nova toplina dolazi do popuštanja longitudinalnih zaostalih naprezanja. [10]



Slika 15. Primjeri pravilnog zavarivanja u više prolaza [10]

6.5. Utjecaj redoslijeda zavarivanja

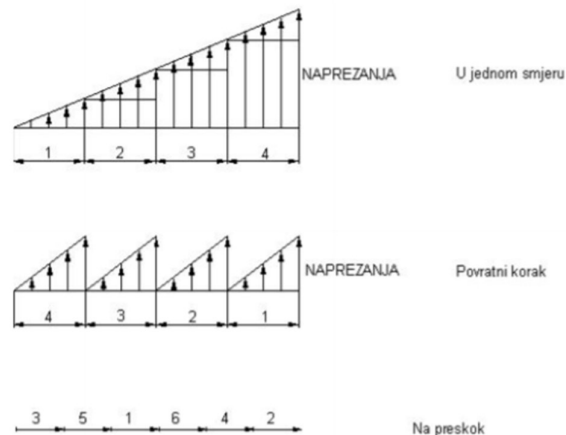
Iako je redoslijed zavarivanja jedan od najbitnijih faktora koji utječu deformacije i zaostala naprezanja, ne postoji propisan redoslijed zavarivanja već on ovisi o konstrukciji. Zbog toga je odabran jedan primjer na kojemu je opisan pravilan raspored i redoslijed zavarivanja prikazan na slici 16. Longitudinalne zavare potrebno je postaviti kontinuirano i paralelno, dok je transverzalne zavare potrebno „raštrkati“ kako bi se izbjeglo moguće gomilanje vlačnih zaostalih naprezanja. Kod zavarivanja prikazanog na slici 16. potrebno je najprije zavariti transverzalne kratke zavare, a nakon njih longitudinalne kako bi se omogućilo transversalno skupljanje spoja. [10]



Slika 16. Pravilan redoslijed zavarivanja dna spremnika [10]

Uz redoslijed zavarivanja, važno je spomenuti slijed zavarivanja. Najveća greška koja se javlja prilikom zavarivanja jest povlačenje kontinuiranog prolaza od jednog do drugog kraja zavara. Iako je to najjednostavniji način zavarivanja, to je ujedno i najnepovoljniji način jer izaziva najveće deformacije i naprezanja. Kako bi se to izbjeglo postoje različite tehnike koje minimiziraju naprezanja i deformacije, od kojih su neke prikazane na slici 17:

- Povratni korak
- Na preskok
- U blokovima
- Kaskadno



Slika 17. Usporedba naprezanja pri različitim tehnikama zavarivanja [8]

7. MJERENJE ZAOSTALIH NAPREZNJA

Kako je zaostala naprezanja nemoguće izbjeći, potrebno je poznavanje njihovog iznosa i orijentacije. Samim razvojem tehnologije i procesa zavarivanja nastupio je i razvoj metoda mjerenja zaostalih naprezanja. Metode mjerenja zaostalih naprezanja mogu se podijeliti u dvije glavne skupine:

- Mehaničke
 - Razorne
 - Polurazorne
- Nerazorne

7.1. Mehaničke metode

Mehaničke metode nazivaju se još i metodama popuštanja naprezanja. Ove metode baziraju se na mjerenju deformacija koje su nastupile kao posljedica odvajanja dijela materijala iz cjeline iz kojih je moguće odrediti iznos zaostalih naprezanja. Ukoliko se mehaničke metode koriste za određivanje zaostalih naprezanja, mjerenje je moguće provesti samo jedan put jer dolazi do razaranja ispitnog uzorka. Najčešće korištene mehaničke metode su [15]:

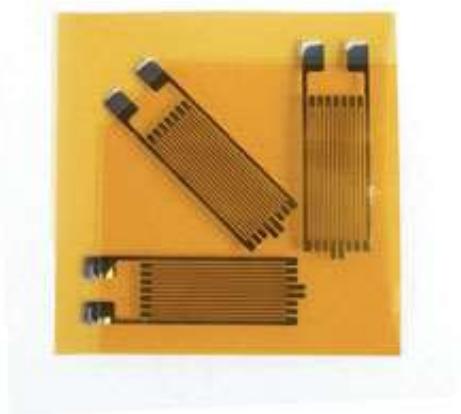
- Metoda izrade provrta
- Metoda dubokih provrta
- Metoda podjele
- Metoda sekcioniranja
- Metoda izrezivanja
- Metoda dijeljenja
- Metoda uklanjanja slojeva

7.1.1. Metoda izrade provrta

Prednosti ove metode jesu relativna jednostavnost i brzina zbog čega je to jedan od najraširenijih polurazornih metoda određivanja zaostalih naprezanja. Uz to što je jednostavna i brza, točna je i pouzdana, ali i standardizirana. Metoda bušenja provrta primjenjiva je na sve vrste materijala ukoliko je materijal izotropan i ukoliko su poznati parametri elastičnosti. Pomoću ove metode moguće je odrediti makro zaostala naprezanja. Spomenuta metoda daje uvid u visinu, smjer i orijentaciju raspodjele zaostalih naprezanja po debljini. Iako pripada razornim metodama, šteta koja nastupa mjerenjem lokalizirana je na mali dio materijala koja je najčešće popravljiva ili ju je moguće zanemariti. Metoda se provodi tako da se na mjestu u materijalu na kojem se želi izmjeriti zaostala naprezanja izbuši mali promjer (1,8-2,0 mm). Zbog bušenja provrta, dolazi do prekida toka sila te se zaostala naprezanja popuštaju. Oslobođanje površinski sila mjeri se rozetom koja se najčešće sastoji od tri dijela koja su pozicionirana na 0° , 45° i 90° . Primjer mjerne rozete se nalazi na slici 18.

Nedostatci metode jesu potencijalne pogreške koje se mogu dogoditi tijekom izrade provrta, priprema površine, ograničena osjetljivost na deformacije i rezolucija. Kako bi se dobili zadovoljavajući rezultati te kako bi se osigurala preciznost, metoda se mora provesti strojno.

Kako bi se ostvarila najveća preciznost, mjerena zaostala naprezanja ne bi trebala prelaziti granicu od 60-70% granice tečenja. [15]



Slika 18. Rozeta s tri mjerne trake [17]

7.1.2. Metoda dubokih provrta

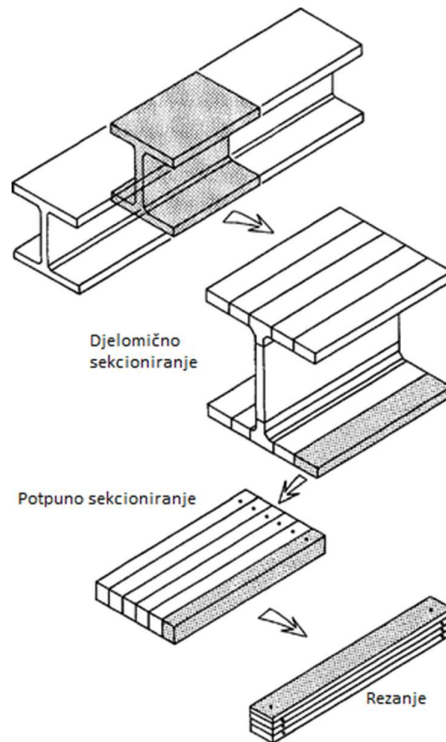
Metoda dubokih provrta jest varijanta prethodne metode. Metoda se provodi na sljedeći način: prvo se buši provrt kroz čitavu debljinu materijala, pri čemu je promjer provrta precizno izmjeren kroz cijelu debljinu materijala. Sljedeći je korak bušenje novog provrta oko prvog provrta, alatom prikazanim na slici 19, čime dolazi do relaksacije zaostalih naprezanja u prvom provrtu zbog potpunog odvajanja od materijala. Promjer prvog provrta ponovno se mjeri kako bi se odredila zaostala naprezanja iz deformacije koja je nastupila. Metoda dubokih provrta također spada u polurazorne metode određivanja zaostalih naprezanja iz razloga što provrt koji ostaje nije velikog promjera, a isto tako može se izvršiti na mjestu kojeg je svakako potrebno obraditi. Jedna od glavnih prednosti nad prvom metodom jest ta što se mogu mjeriti zaostala naprezanja masivnih ispitnih uzoraka, koji mogu težiti i po nekoliko tona, po cijeloj njihovoj debljini. Metoda dubokih provrta postala je standardna metoda za mjerenje zaostalih naprezanja kod izotropskih materijala te se posebno koristi kod debelih materijala. [15]



Slika 19. Alat pomoću kojeg se vrši metoda dubokih provrta [16]

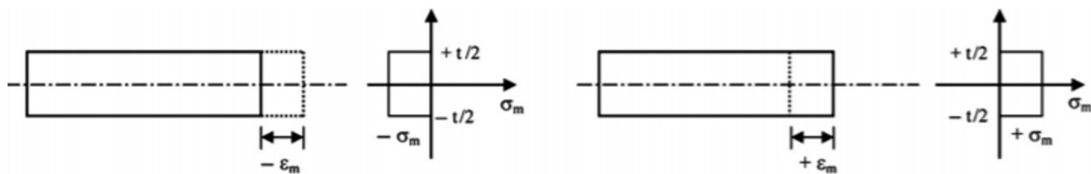
7.1.3. Metoda sekcioniranja

Metoda sekcioniranja razorna je metoda koja se bazira na mjerenju deformacije nastalih kao posljedica uklanjanja materijala od ispitnog uzorka. Glavna su područja primjene ove u testiranju konstrukcijskog čelika, aluminija i nehrđajućeg čelika. Metoda sekcioniranja provodi se na način da se napravi rez na ispitnoj ploči kako bi došlo do popuštanja zaostalih napreznja. Proces rezanja ne bi trebalo provoditi metodama koje unose toplinu i ne dovode do plastične deformacije kako ne bi došlo do promjene zaostalih napreznja. [15]

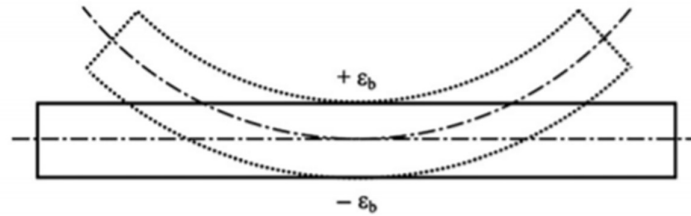


Slika 20. Metoda sekcioniranja [15]

Otpušena napreznja pri rezanju najčešće se mjere pomoću električnih ili mehaničkih mjernih uređaja. Trake materijala koje se dobivaju rezanjem mogu biti deformirani aksijalno, no može doći i do savijanja ovisno o načinu procesa izrade. Do savijanja traka dolazi ukoliko se pri procesu izrade materijal oblikovao hladno, dok promjene u aksijalnom smjeru budu rezultat tople obrade. [15]



Slika 21. Ponašanje toplo oblikovanih traka [15]



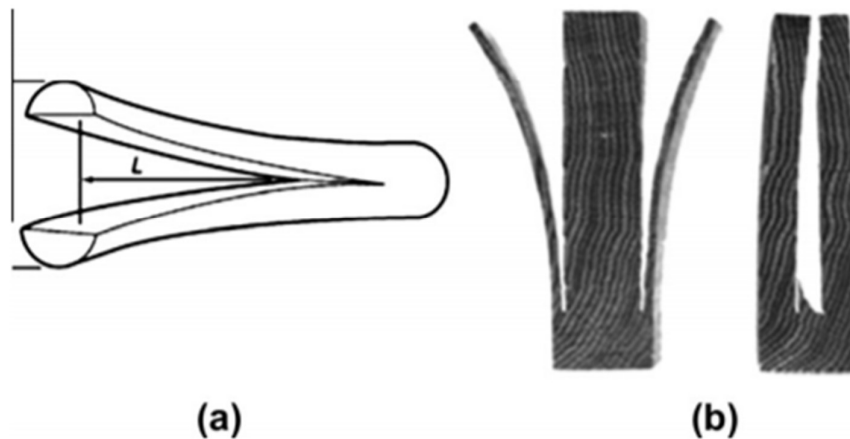
Slika 22. Ponašanje hladno oblikovanih traka [15]

7.1.4. Metoda izrezivanja

Jednostavna metoda za mjerenje zaostalih naprežanja. Provodi se tako da na površinu ispitnog materijala postavimo jednu ili više mjernih traka nakon čega se izreže dio materijala na kojem se nalazi mjerač deformacija. Kao posljedica reza dolazi do popuštanja zaostalih naprežanja zbog čega dolazi do deformacija koje se mjere mjeračem deformacija. Izrezivanje se najčešće koristi za tanke ploče radi jednostavnosti reza, no moguće je i testiranje na debljim materijalima. Iako je moguće u potpunosti odstraniti dio materijala, to se uglavnom kod debljih materijala ne radi zbog teškog odvajanja donje strane izreska od ostatka materijala. Češće se koristi djelomično zarezivanje dubokih rezova na svakoj strani mjernih traka. [15]

7.1.5. Metoda dijeljenja

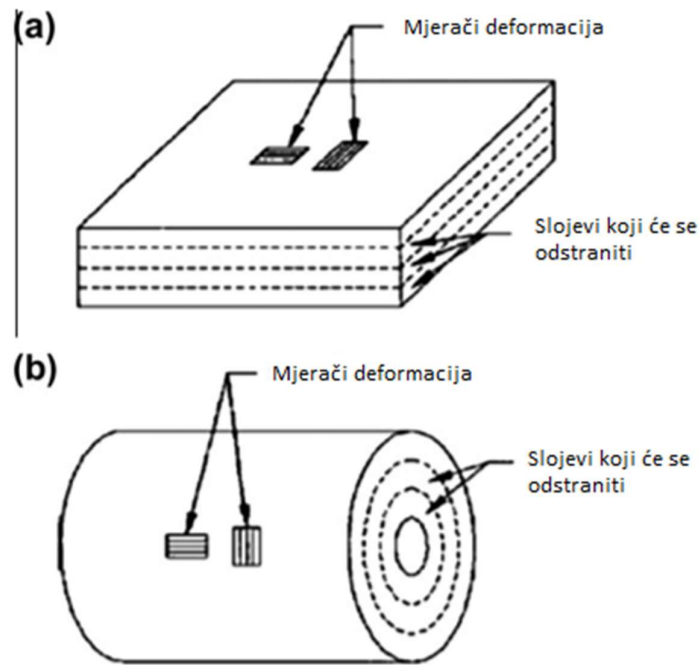
Jedna od jednostavnijih metoda jest metoda dijeljenja. Ona se provodi na način da se u materijalu napravi duboki rez iz kojeg se može dobiti uvid u približno stanje zaostalih naprežanja. Ova se metoda najčešće koristi kao brz i jednostavan test kvalitete materijala pri njegovoj proizvodnji. Najčešće se metoda koristi za određivanje zaostalih naprežanja u tankostjenim cijevima. [15]



Slika 23. Metoda dijeljenja [15]

7.1.6. Metoda uklanjanja slojeva materijala

Bazira se na promatranju i analiziranju deformacije koja se javlja kao posljedica uklanjanja slojeva materijala. Metoda je idealna za ravne ploče i cilindrične uzorke gdje su zaostala naprezanja promjenjiva po debljini materijala, ali su ujednačena paralelno s površinom. U ovoj metodi se koriste kao i u prijašnjima mjerači deformacije. Iako se najčešće koristi za mjerenje zaostalih naprezanja kod metalnih materijala, ova metoda se može koristiti i za ostale materijale. [15]



Slika 24. Metoda uklanjanja slojeva materijala [15]

7.2. Nerazorne metode

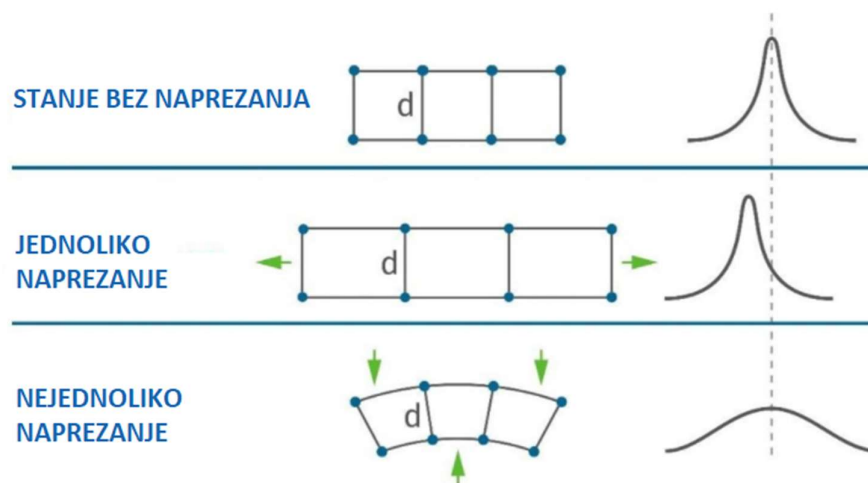
Nerazornim metodama određuje se vrijednost nekog parametra povezanog uz zaostala naprezanja. Glavna prednost nerazornih metoda jest održavanje ispitnog uzorka nepromijenjenog čime se ne narušavaju njegova svojstva i izgled. Isto tako, moguće je izvršiti ispitivanje više od jednog puta.

7.2.1. Difrakcijske metode

Difrakcijske metode baziraju se na principu određivanja zaostalih naprezanja iz promjene udaljenosti ravnina kristalnih rešetki. Do naprezanja se dolazi pomoću Bragg – ovog zakona za čiju primjenu je potrebno poznavati vrijednosti ne napregnutog stanja

7.2.1.1. Rendgenska difrakcijska metoda (X-ray)

Rendgenska difrakcijska metoda za mjerenje zaostalih naprezanja je primjenjiva na sitnozrnate materijale s uređenom kristalnom strukturom koji proizvode zadovoljavajući difrakcijski maksimum (peek). Isto tako materijal mora u potpunosti propustiti rendgensku zraku za bilo kakvu orijentaciju uzorka, te je potrebno poznavanje elastičnih konstanti. Pomoću ove metode moguće je mjeriti makro i mikro zaostala naprezanja. [18]
Rendgenska difrakcijska metoda detaljno je opisana u normi HRN EN 15305:2008.



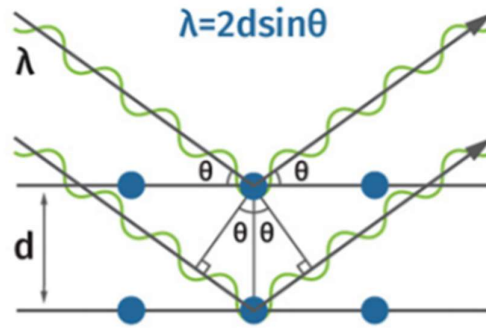
Slika 25. Izgled difrakcijskog maksimuma [19]

Mjerenje rendgenskom metodom dozvoljava mjerenje samo elastičnih deformacija. Ukoliko je elastična granica prekoračena doći će do dislociranja i poremećaja kristalne rešetke. Iako zaostala naprezanja nastaju kao rezultat nejednolikih plastičnih deformacija, sva zaostala makronaprezanja nakon deformacije smatraju se elastična. [18]

Do difrakcije dolazi pri kutu 2θ , koji je definiran Bragg – ovim zakonom koji glasi:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (13)$$

gdje n predstavlja cijeli broj koji označava redoslijed difrakcije, λ je dužina vala rendgenske zrake, d je razmak ravnina kristalnih rešetki, a θ predstavlja difrakcijski kut. Bilo kakva promjena u udaljenosti kristalnih rešetki, d , rezultirati će promjenom u difrakcijskom kutu 2θ . Bragg – ov zakon je prikazan na slici 26. [18]

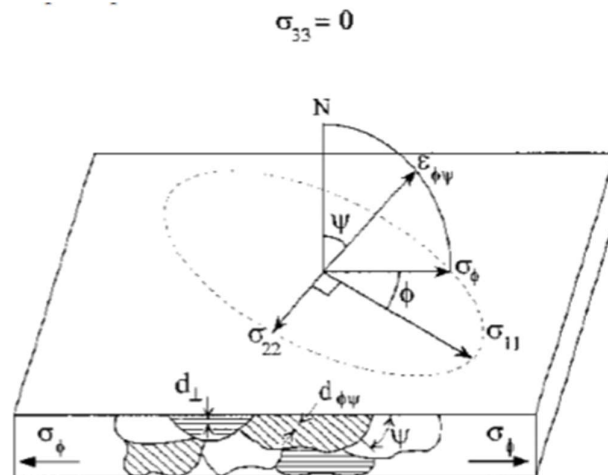


Slika 26. Bragg-ov zakon [19]

Zaostala naprežanja određena ovom metodom su srednja vrijednost naprežanja u volumenu materijala koji je ozraćen zrakama, a on se sastoji od dubine penetracije zraka i površine koja može iznositi manje od jednog kvadratnog milimetra, pa sve do nekoliko kvadratnih centimetara. Dubina penetracije ovisi o linearnom koeficijentu upijanja zraka materijala. Materijali koji se često podvrgavaju ovoj metodi poput nikla, aluminijskih legura te čelika imaju dubinu prodiranja manju od 0,005 mm. Mala dubina prodiranja i mala ozraćena površina dozvoljavaju nekoliko redova veličine točnije određivanje dubinske i prostorne raspodjele zaostalih naprežanja. [18]

Ravninski model naprežanja

Kako je dubinsko prodiranje rendgenskih zraka plitko, iznosi manje od $< 0,01$ mm, pretpostavlja se ravninski model naprežanja. Raspodjela naprežanja opisana je pomoću glavnih naprežanja σ_{11} i σ_{22} koji djeluju na površini, dok se naprežanje okomito na površinu zanemaruje $\sigma_{33} = 0$. No, iako je zanemareno naprežanje u okomitom smjeru, ne smije se zanemariti deformacija $\varepsilon_{33} \neq 0$. Deformacija okomita na površinu postoji radi Poisson – ovog koeficijenta koji govori kako se materijal širi u smjeru okomitom na opterećenje, a iz razloga što postoje σ_{11} i σ_{22} postojat će i ε_{33} . [18]



Slika 27. Ravninski model naprežanja [18]

Deformacija na površini uzorka pod kutom ϕ od naprezanja σ_{11} se dobiva preko [18]:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left(\frac{1+\nu}{E}\right) \sigma_{\phi} \sin^2(\psi) - \left(\frac{\nu}{E}\right) (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (14)$$

Jednadžba 14 povezuje površinsko naprezanje σ_{ϕ} , u bilo kojem smjeru koji je definiran kutom ϕ , s deformacijom $\varepsilon_{\phi\psi}$ u smjeru (ϕ, ψ) i s glavnim naprezanjima σ_{11}, σ_{22} . Ako se udaljenost između ravnina kristalnih rešetki, $d_{\phi\psi}$ mjeri u smjeru koji je definiran s ϕ i ψ , naprezanje se može izraziti preko [18]:

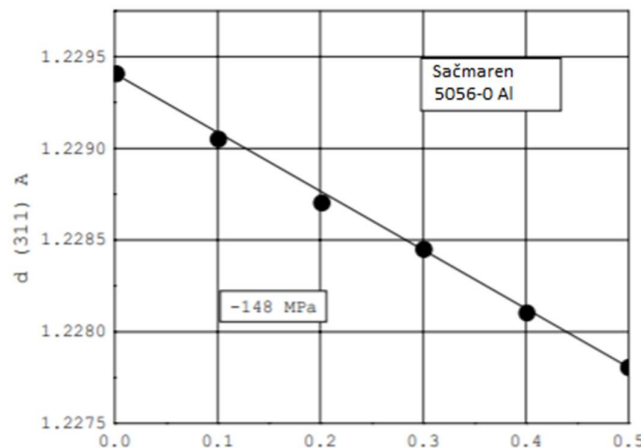
$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (15)$$

Gdje d_0 predstavlja razmak kristalnih rešetki bez naprezanja. Ukoliko se jednadžba 15 uvrsti u jednadžbu 14 i sredi, dobije se [18]:

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{hkl} \sigma_{\phi} d_0 \sin^2(\psi)\right] - \left[\left(\frac{\nu}{E}\right)_{hkl} d_0 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + d_0\right] \quad (16)$$

Gdje $\left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{hkl}$ i $\left(\frac{\nu}{E}\right)_{hkl}$ predstavljaju elastične konstante koje se nalaze u smjeru normale na ravninu kristalne rešetke u kojoj se naprezanje mjeri. Zbog elastične anizotropije elastične konstante variraju i do 40%. [18]

Jednadžba 16 predstavlja osnovnu vezu između razmaka kristalnih rešetki i dvoosnih naprezanja na površini uzorka. Razmak kristalnih rešetki linearno ovisi o $\sin^2(\psi)$ što se može vidjeti na slici 28. Slika 28 prikazuje ovisnost $d(311)$ o ψ , u rasponu od 0° do 45° , za 5056-0 aluminij koji je obrađen sačmarenjem. [18]



Slika 28. Ovisnost udaljenosti kristalnih rešetki o $\sin^2(\psi)$ [18]

Za vrijednost $\sin^2(\psi) = 0$, vrijednost d će biti jednaka razmaku kristalnih rešetki u ne opterećenom stanju, d_0 , od koje je oduzima Poisson – ov koeficijent kontrakcije izazvan glavnim naprezanjima [18]:

$$d_{\phi 0} = d_0 \left[1 - \left(\frac{\nu}{E}\right)_{hkl} (\sigma_{11} + \sigma_{22})\right] \quad (17)$$

Nagib pravca je [18]:

$$\frac{\delta d_{\phi\psi}}{\delta \sin^2(\psi)} = \sigma_{\phi} d_0 \left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{hkl} \quad (18)$$

Iz jednadžbe se može dobiti naprezanje σ_{ϕ} [18]:

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu}\right)_{hkl} \left(\frac{\delta d_{\phi\psi}}{\delta \sin^2(\psi)}\right) \frac{1}{d_0} \quad (19)$$

Karakteristike materijala

Kao što je već rečeno na početku podnaslova, potrebno je poznavanje podataka o kristalografskoj strukturi materijala i elastične konstante.

Oblik, dimenzije i masa

Uz njih, potreban je pravilan odabir oblika, dimenzije i mase ispitnog uzorka. Pri mjerenju zaostalih naprezanja rendgenskom metodom potrebno je odabrati adekvatnu, ravnu, površinu ispitnog uzorka. Oblik i masa nisu direktno povezani s rezultatom, ali utječu na mogućnost manipulacije uzorkom, što je bitna stavka jer se mjerenje provodi za različite nagibe uzorka pa ukoliko je otežana manipulacija, postoji mogućnost za nastajanje pogreške. Potrebno je voditi računa o maksimalnoj masi koju goniometar može poduprijeti. [29]

Homogenost

Ukoliko je to moguće, potrebno je izabrati što homogeniji mjerni volumen. Ukoliko postoji bilo kakva promjena u strukturi materijala, ono će direktno utjecati na rezultat mjerenja. [29]

Veličina zrna i difrakcijska domena

Veličina zrna isto tako utječe na vrijednosti zaostalih naprezanja. U većini materijala koji su podlegnuti rendgenskoj metodi, veličina zrna nalazi se u rasponu od 10-100 μm . Kako se zrna sastoje od mnogo difrakcijskih domena, ta veličina zrna je najprihvatljivija za točno očitavanje rezultata. Ukoliko je zrno veće od 100 μm postoji mogućnost za velike varijacije u difrakcijskom peak-u i intenzivnosti. Potrebno je napomenuti kako mikro zaostala naprezanja mogu utjecati na rezultat. Njih je, u nekim slučajevima, moguće smanjiti osciliranjem uzorka. [29]

Propusnost na X-zrake

Rendgensku metodu potrebno je koristiti na materijalima koji imaju optimalnu propusnost na X-zrake. Ukoliko je propusnost na X-zrake prevelika, mogući je nastanak pogrešaka zbog prevelike udaljenosti mjernog volumena od površine, dok će naprezanje σ_{33} biti izraženije. Isto tako ukoliko je propusnost premalena, očitavanje neće biti moguće. [29]

Priprema uzorka

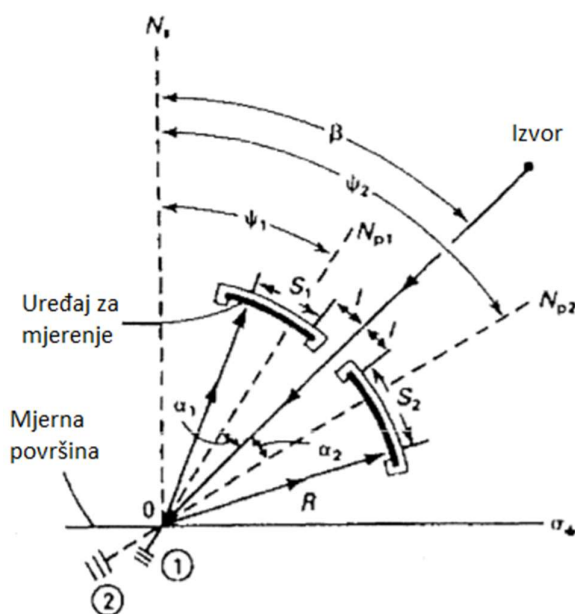
Bilo kakva priprema površine uzorka treba se izbjegavati. Ukoliko je površina oksidirana ili obojena, moguće ju je očistiti elektropoliranjem ili korištenjem kemikalija kako ne bi došlo do promjene zaostalih naprezanja u površini. Ukoliko se koriste kemikalije za čišćenje potrebno je pravilno korištenje kao ne bi nastupilo oslabljivanje granica zrna. [29]

Odabir zračenja

Pravilan odabir valne duljine za upadnu X-zraku ključan je kako bi rezultat bio prihvatljiv. Ukoliko upadna zraka izaziva fluorescentnost uzorka, valna duljina nije prihvatljiva iz razloga što fluorescentnost onemogućava prodiranje zrake u dubinu uzorka čime se dobiva kriva slika naprezanja jer se proizvodi loš „peek“. Taj je problem moguće riješiti korištenjem monokromatora koji propušta samo jednu valnu duljinu svjetlosti ili korištenjem elektroničkog detektora energije.

Jednokutna metoda

Ova metoda se smatra manje osjetljiva od ostalih metoda rendgenske difrakcije jer je mogući raspon ψ ograničen difrakcijskim kutom 2θ [20]



Slika 29. Mjerenje jednokutnom tehnikom [20]

Na slici 29 prikazana je geometrija jednokutne metode. Snop paralelnih rendgenskih zraka pušten je pod kutom upada β od normale površine. Rendgenske se zrake lome stvarajući područje lomljenih zraka sa sjecištem u točki 0. Prelomljene zrake se mjere pomoću uređaja osjetljivog na položaj (PSD – optički senzor položaja), koji može izmjeriti položaj svjetlosti. Kako je već napisano, ukoliko postoji zaostalo naprezanje u uzorku ono će utjecati na promjenu udaljenosti ravnina kristalnih rešetki, što će za posljedicu imati različiti kut loma sa svake strane rendgenske zrake što je na slici 29 prikazano i označeno brojem 1 i 2. Ukoliko su S_1 i S_2 udaljeni od mjerene površine za radijus R i ukoliko su oni kružni isječci, vrijedi sljedeći izraz [20]:

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{S_1 - S_2}{2R}\right) \left(\frac{E}{1 + \nu}\right) hkl \left(\frac{\text{ctg}(\theta)}{\sin^2(\psi_1) - \sin^2(\psi_2)}\right) \quad (20)$$

Kutovi ψ_1 i ψ_2 su povezani s Bragg – ovim difrakcijskim kutovima θ_1 , θ_2 i kutem upada β preko [20]:

$$\psi_1 = \beta + \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

i

$$\psi_2 = \beta + \theta_2 - \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

Kako bi se povećala preciznost u određivanju razmaka rešetki kristalnih ravnina potrebno je povećati difrakcijski kut 2θ što rezultira smanjenjem mogućeg raspona ψ . Time se smanjuje osjetljivost. Jednokutna metoda se koristi samo kada je potrebno brzo mjerenje, no uglavnom se ne koristi. [20]

Metoda dva kuta

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} d_0 \sin^2(\psi) \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right) d_0 (\sigma_1 + \sigma_2) + d_0 \right] \quad (23)$$

Jednadžba 23 i slika 28 pokazuju da, ako razmak kristalnih rešetki linearno ovisi o $\sin^2(\psi)$, naprezanje je moguće odrediti mjerenjem razmaka kristalnih rešetki za bilo koja dva ψ kuta, iz čega je nastalo ime metode. Razmak rešetki kristalnih ravnina se najčešće određuje pomoću dvije krajnje vrijednosti kuta ψ , koje iznose 0° i 45° , a naprezanje se računa pomoću sljedeće jednadžbe [20]:

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{hkl} \left(\frac{\delta d_{\phi\psi}}{\delta \sin^2(\psi)} \right) \frac{1}{d_0} \quad (24)$$

$\sin^2(\psi)$ metoda

Ova metoda gotovo je identična metodi dva kuta. Jedina je razlika što se razmak rešetki kristalnih ravnina određuje za nekoliko ψ . Pravac se dobiva metodom najmanjih kvadrata, a naprezanje se izračunava jednakim izrazom kao u metodi dva kuta. Ukoliko se uzimaju krajnje vrijednosti, ova metoda neće davati značajno točnije rezultate od metode dva kuta. Ova se metoda smatra standardnom u Japanu i Njemačkoj. [20]

Određivanje potpunog tenzora naprezanja

Izraz za udaljenost ravnina kristalnih rešetki može se formulirati kao funkcija ϕ i ψ , pretpostavljajući postojanje naprezanja normalno na površinu. Ovako stanje naprezanja u površinskim slojevima jedno je od mogućih objašnjenja za nelinearnu ovisnost razmaka rešetki o $\sin^2(\psi)$. Nelinearnosti poput eliptičnih zaobljenja $d\text{-}\sin^2(\psi)$ proizvode različite vrijednosti razmaka rešetki kristalnih ravnina za pozitivan i za negativan ψ , što se naziva „ ψ cijepanje“. Takve nelinearnosti moguće je pripisati normalnim naprezanjima ili visokim smičnim naprezanjima uz površinu. ψ cijepanje može rezultirati greškama pri izračunu naprezanja. [18, 20]

Iako je određivanje potpunog tenzora moguće te se pomoću njega mogu odrediti naprezanja na površini, ono se ne radi. Kako bi bilo moguće određivanje potpunog tenzora potrebna je velika količina podataka koja prelazi granice običnog testiranja. Za razliku od ostalih metoda testiranja koja zanemaruju normalna naprezanja, u ovoj metodi potrebno je poznavanje ne napregnutog razmaka kristalnih rešetki s preciznošću od 0,00001 mm kako bi bilo moguće izračunati normalna naprezanja. Ukoliko se metoda koristi na površinama koje su nastale

mehaničkom obradom ili kaljenjem, razmak rešetki u uzorku varirati će ovisno o unesenim plastičnim deformacijama i unesenoj toplini što već samo po sebi stvara veliki problem, zanemarujući potrebno poznavanje ne napregnutog stanja razmaka rešetki. Zbog prevelike količine potrebnih podataka za potpuno mjerenje, ova metoda se koristi samo u istraživačke svrhe. [18, 20]

Pogreške pri mjerenju

Pogreške pri mjerenju se mogu svrstati u tri glavne grupe [18, 20]:

- Pogreške u instrumentima i pozicioniranju
- Pogreške zbog uzorka
- Rendgenska elastična konstanta

Pogreške u instrumentima i pozicioniranju

Zbog toga što rendgenska difrakcijska metoda zahtjeva vrlo visoku preciznost pri mjerenju, moguća je pojava velikog broja grešaka. Na primjer, ukoliko se pogriješi samo 0,025 milimetara u pozicioniranju opreme za mjerenje nastupiti će pogreška u iznosu od približno 14 MPa, za visoki kut difrakcije, a ukoliko se kut difrakcije smanjuje, pogreška će rasti. [18]

Najčešća pogreška vezana za instrumente i pozicioniranje jest pomak uzorka iz centra goniometra, što može rezultirati „ ψ cijepanjem“ koje je nemoguće razlikovati od prisutnosti smičnog naprezanja. Uzorak je potrebno uvijek postaviti u centar goniometra. [18], [29]

Kada je to moguće, potrebno je testirati na površini uzorka koja ima najmanji mogući radijus zakrivljenosti. Isto tako, potrebno je točno definirati površinu na kojoj će mjerenje biti izvršeno. Kako bi se jasno definirala mjerena površina, moguće je korištenje maske, odnosno premazivanje ostatka površine nekim premazom, često je to vosak. [29]

Greške pozicioniranja i instrumenata moguće je otkloniti korištenjem uzorka bez zaostalih naprezanja, koji je najčešće fini prah čistog metala, pomoću kojeg se kalibrira uređaj. [18]

Pogreške uzrokovane uzorkom

Pogreške uzrokovane uzorkom mogu nastati ukoliko uzorak ima prevelika zrna, grubu površinu ili rupice, zaobljenja ili ukoliko geometrija uzorka izaziva smetnje u rendgenskim zrakama. U uzorcima koji imaju gruba/velika zrna poput lijevanih materijala, često se ne može izvršiti pouzdano mjerenje zbog čega se u pravilu izbjegava. [20]

Rendgenska elastična konstanta

Veliki problemi mogu nastati pri određivanju rendgenske elastične konstante $\frac{E}{1+\nu}$. Netočne vrijednosti elastične konstante mogu izazvati vrlo velike pogreške pri određivanju naprezanja. Izmjerena zaostala naprezanja su proporcionalna rendgenskoj elastičnoj konstanti, koja se može razlikovati za do čak 40%. Konstantu je najbolje odrediti istraživački, odnosno, potrebno je opteretiti uzorak materijala na poznatu razinu stresa, te izmjeriti promjenu u razmaku rešetki kao funkciju primijenjenog opterećenja i nagiba ψ . Nakon toga konstantu je moguće odrediti

iz nagiba, metodom najmanjih kvadrata za traženu vrijednost. Ukoliko konstanta nije poznata, preporučeni način izračuna jest preko modela koji obuhvaća elastičnu anizotropiju jedne kristalne rešetke i njene odnose sa susjednim rešetkama. [20], [29]

7.2.1.2. Neutronska difrakcijska metoda

Neutronska difrakcijska metoda za mjerenje zaostalih naprezanja postavlja se kao jedina metoda koja omogućava određivanje zaostalih naprezanja u sve tri dimenzije bez oštećivanja uzorka. Neutronska metoda rješava problem razaranja koji postoji kod mehaničkih metoda te isto tako rješava problem dubinskog mjerenja naprezanja koji postoji kod rendgenske difrakcijske metode. Velik broj materijala koji se koriste u strojarškoj industriji imaju povoljno svojstvo propusnosti materijala na neutrone što omogućava određivanje zaostalih naprezanja u sve tri dimenzije. Neki od materijala su čelik čija propusnost iznosi 30 – 40 mm, a aluminijska propusnost iznosi 150 – 200 mm. [21]

Iako je korištenje neutrona za mjerenje zaostalih naprezanja poznato gotovo 90 godina, veliki su se iskoraci dogodili kroz posljednjih 30 godina, primjerice, promjena cijene i prilagodbe metode inženjerskim zahtjevima. [21]

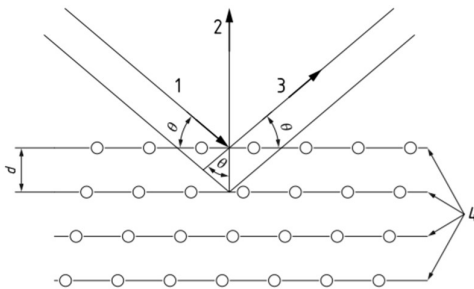
Glavna je, i najvažnija prednost neutronske difrakcijske metode, izrazita dubina prodiranja neutrona u većinu inženjerski bitnih materijala. Većina inženjerski važnih materijala loše upija neutrone, na primjer 8% neutrona u snopu zrake će proći kroz približno 25 mm čelika, a još veći postotak kroz aluminij. Zbog toga je moguće mjeriti zaostala naprezanja u čeliku na dubinama od 30 – 40 mm, a kod aluminija do 200 mm. Ispitni uzorak koji je podvrgnut mjerenju ne postaje radioaktivan, te ga je moguće koristiti za daljnja testiranja ili za daljnju upotrebu u industriji. Pomoću ove metode je moguće dobiti potpuni uvid u zaostala naprezanja izazvana različitim metodama mehaničke obrade. [21]

Princip rada

Princip mjerenja neutronsom difrakcijskom metodom identičan je rendgenskoj difrakcijskoj metodi. Obje metode dolaze do iznosa zaostalih naprezanja pomoću mjerenja udaljenosti ravnina kristalnih rešetki.

Poput rendgenske metode, neutronska metoda se koristi Bragg – ovim zakonom:

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin(\theta_{hkl}) \quad (25)$$



Slika 30. Bragg - ova geometrija [31]

Na slici 30. može se vidjeti shematski prikaz Bragg – ovog zakona, gdje 1 – predstavlja vektora upadne zrake, 2 – vektor rasipanja, 3 – vektor difraktirane zrake, 4 – razmak između ravnina, θ – jedna polovina difraktiranog kuta. [31]

Gdje d_{hkl} predstavlja izmjeren razmak ravnina kristalnih rešetki opisan Millerovim indeksom (hkl), $2\theta_{hkl}$ je kut difrakcije, a λ predstavlja dužinu vala. [30]

Ukoliko preciznost kuta difrakcije, $2\theta_{hkl}$, iznosi $\pm 0,003^\circ$, deformacija kristalne rešetke se može odrediti s točnošću od $\approx 10^{-4}$, pod uvjetom da se vrijednost $2\theta_{hk}$ kreće oko 90° . Kako istegnuće koje odgovara granici razvlačenja u čeliku srednje čvrstoće iznosi 0,2% ili 20×10^{-4} , točnost neutronske difrakcije od 10^{-4} je i više nego zadovoljavajuća. [21]

Kako dolazi do rasipanja energije neutrona u zraki i kako postoje nesavršenosti u samom mjernom uređaju, neutronska difrakcija ne može mjeriti naprezanje u točki. Zbog toga se dobiva uvid u prosječno zaostalo naprezanje na određenom volumenu u uzorku, kao i kod rendgenske metode. Taj volumen se naziva mjerni volumen. Mjerni volumen definiran je sjecištem upadnih i raspršenih ($2\theta_{hkl} \approx \pm 90^\circ$) zraka neutrona koje prolaze kroz zareze na kadmijskoj membrani. Mjerni volumen je fiksiran i centriran na mjernom stolu. Zarezi osiguravaju da samo difraktirani neutroni s mjernog volumena mogu biti detektirani. Pozicioniranjem mjernog uzorka na mjerni stol, koji se može pomicati po sve tri osi, svaki dio uzorka može postati mjerni volumen. Zbog toga je moguće dobiti potpunu sliku zaostalih naprezanja u cijelom uzorku. Najčešća veličina mjernog volumena iznosi $5 - 10 \text{ mm}^3$, iako je moguće provesti testiranje i na uzorcima veličine $0,2 \text{ mm}^3$. Potpuna točnost u pozicioniranju je obavezna, pogotovo ukoliko se mjeri naprezanje uz površinu ili u području u kojem je naprezanje veliko. [21]

Ukoliko je poznata vrijednost razmaka kristalnih rešetki u neopterećenom stanju istog materijala, d_{hk}^0 , moguće je doći do deformacije preko sljedećeg izraza [21]:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0} \quad (26)$$

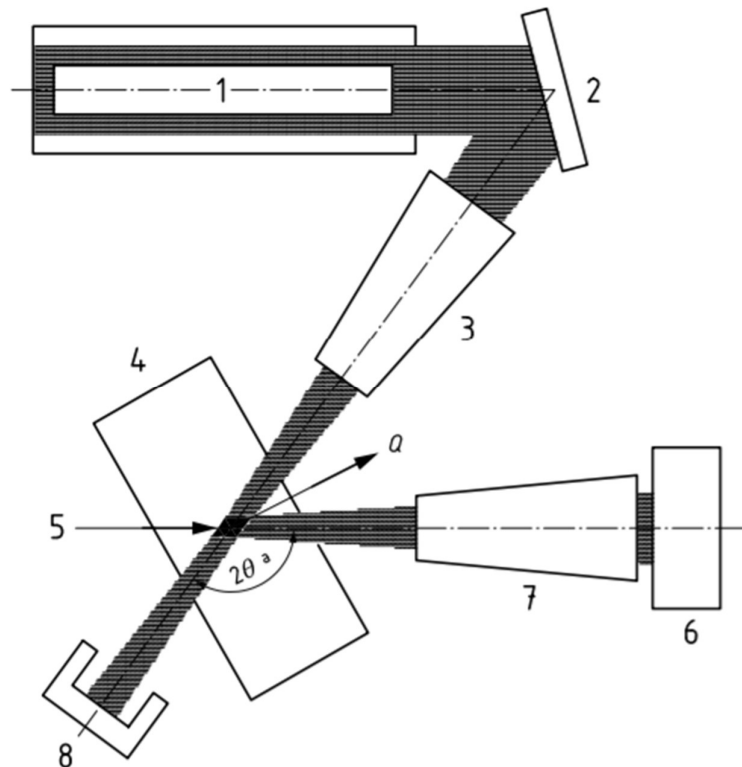
Iako je određivanje d_{hkl}^0 komplicirano, postoje metode koje to olakšavaju. Moguće je izrezati maleni komad iz uzorka što će rezultirati popuštanjem svih zaostalih makronaprezanja čime on može služiti kao referentni komad. Ukoliko nije moguće rezanje uzorka, moguće je odabrati referentni razmak kristalnih rešetki koji balansira zaostala naprezanja.

Postoje dvije glavne vrste mjerenja neutronsom difrakcijom, monokromatsko 2θ skeniranje deformacija i Time of flight. [22]

Monokromatsko 2θ skeniranje deformacija

U ovoj vrsti mjerenja neutronske difrakcije, monokromatska neutronska je zraka dobivena pomoću monokromatora koji propušta monokromatsku zraku neutrona određene valne duljine. iz sveukupne valne duljine koja dolazi iz jezgre. Difrakcijski kut od 90° se postavlja kako bi se dobio mjerni volumen kojemu je poprečni presjek kvadrat. Kroz brojna testiranja utvrđeno je

kako se pri valnim duljinama od 1.25 do 2.5 Å dobivaju najbolji rezultati. Rezultati testiranja se skupljaju u detektorima. [21]



Slika 31. Shematski prikaz određivanja zaostalih naprezanja pomoću monokromatske metode [31]

Na slici 31 moguće je vidjeti shematski prikaz monokromatskog određivanja zaostalih naprezanja, gdje 1 – predstavlja izvor neutronske zrake, 2 – monokromator, 3 – optika pomoću koje je definirana upadna zraka, 4 – uzorak, 5 – mjerni volumen, 6 – detektor, 7 – optika pomoću koje je definiran difraktirani snop zraka, 8 – mjesto zaustavljanja snopa, Q – vektor rasipanja, $2\theta^a$ – kut raspianja. [31]

Određivanje naprezanja

Naprezanje je tenzor. Kako bi se dobio uvid u elemente deformacije, potrebno je poznavati deformaciju u minimalno šest smjerova. Elemente deformacijskog tenzora moguće je dobiti iz sljedećeg izraza [21]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \sum_{i,j} \varepsilon_{ij} l_i l_j \quad (27)$$

Gdje l_i predstavlja kosinuse između vektora smjera neutrona i koordinatnih osi; koristeći Kartezijev koordinatni sustav u koji je umetnut uzorak. [21]

Kao što je već rečeno, moguće je mjeriti samo elastične deformacije kristalnih rešetki ε_{ij} iz kojih se dolazi do naprezanja σ_{ij} . Za izotropne materijale u krutom stanju, do naprezanja se može doći preko Hooke – ovog zakona [21]:

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [\varepsilon_{xx}(1 + \nu_{hkl}) + \nu_{hkl}(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] \quad (28)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})} [\varepsilon_{xy}] \quad (29)$$

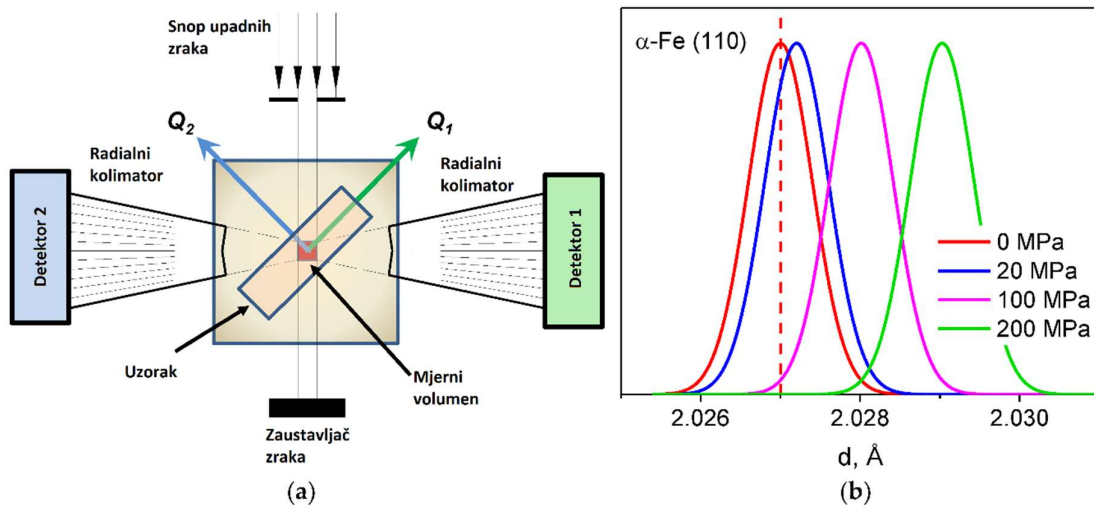
Ostale odnose između naprezanja i deformacije je moguće dobiti jednostavnom promjenom indeksa. E_{hkl} predstavlja Young – ov model, dok ν_{hkl} predstavlja Poisson – ov koeficijent. Ove dvije konstante povezuju srednju vrijednost deformacije kristalnih ravnina (hkl) s naprezanjem. Ove konstante je moguće izmjeriti direktno iz materijala ili ih je moguće dobiti matematičkim putem ukoliko je poznata vrijednost barem jedne konstante. [21]

Time of flight metoda

U neutronske difrakcijske metode koriste se termalni neutroni. Termalni neutroni jesu bilo koji slobodni neutroni koji nisu vezani za atom i čija prosječna kinetička energija odgovara prosječnoj energiji čestica okolnih materijala. Budući da je brzina termičkih neutrona relativno mala, to otvara mogućnost analiziranja energije neutrona na impulsnom izvoru preko vremena leta neutrona. Ukoliko se koristi ova metoda neutronske difrakcije, deformacija se određuje pomoću relativne promjene u vremenu leta neutrona. $\frac{\Delta t}{t}$. Ovisno o valnoj duljini neutrona, maksimum se određuje preko sljedećeg odnosa [24], [30]:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{\lambda m L}{h} = \frac{2mLd_{hkl}\sin(\theta)}{h} \quad (30)$$

Gdje L predstavlja sveukupan put koji neutron pređe od izvora do detektora, v je brzina neutrona, λ je valna duljina neutrona, m je masa neutrona, h je Planck – ova konstanta, d_{hkl} je razmak ravnina kristalnih rešetki, a θ je Bragg – ov kut. [24]



Slika 32. a) Primjer testiranja neutronske difrakcijom b) Izgled difrakcijskog maksimuma (peak) pri različitim iznosima zaostalih naprezanja [23]

U metodi vremena leta neutrona, deformacije kristalnih rešetki se određuje preko [24]:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{(d_{hkl} - d_{hkl}^0)}{d_{hkl}^0} = \frac{\Delta t}{t} \quad (31)$$

Gdje t predstavlja vrijeme leta neutrona

Do naprežanja se dolazi na jednak način kao i kod monokromatske metode, a to je:

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [\varepsilon_{xx}(1 + \nu_{hkl}) + \nu_{hkl}(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] \quad (32)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})} [\varepsilon_{xy}] \quad (33)$$

Ostale odnose između naprežanja i deformacije moguće je dobiti jednostavnom promjenom indeksa

Analizom oblika (najčešće je to širina) difrakcijskog maksimuma može se dobiti uvid u deformacije kristalnih rešetki individualnih kristalnih zrna (mikronaprežanja). Ukoliko se koristi TOF difraktometar s funkcionalnom ovisnošću širine difrakcijskog maksimuma o razmaku ravnina, vrijedi [24]:

$$W^2 = C_1 + C_2 d^2 + C_3 d^2 + C_4 d^2 \quad (34)$$

Gdje W predstavlja širinu difrakcijskog maksimuma, C_1 i C_2 su konstante koje definiraju rezoluciju difraktometra, a dobiju mjerenjem referentnog uzorka, $C_3 = \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2$ je parametar disperzije jedinične ćelije (mikronaprežanje), a C_4 je konstanta vezana uz veličinu kristalita. [24]

Svrha, geometrija i materijal

Kako bi provedeno mjerenje bilo korektno provedeno, potrebno je dobro definiranje i poznavanje svrhe mjerenja, dimenzije, oblika i materijala. Potrebno je poznavanje potpune povijesti materijala, odnosno način njegove izrade i korištenja, kako bi se znalo kojim je termičkim i mehaničkim opterećenjima podvrgnut. Isto tako potrebno je poznavanje faza, odnosno mikrostrukture materijala. Ukoliko se uzorak sastoji od različitih faza ili od više materijala potrebno je prilagoditi mjerenje kako ne bi došlo do pogrešaka. Pri određivanju zaostalih naprežanja neutronsom difrakcijom, poželjno bi bilo da je uzorak homogen iz razloga što bilo kakva promjena u mikrostrukтури može utjecati negativno na rezultata mjerenja. [31]

Određivanje referentne vrijednosti razmaka ravnina

Kako je određivanje zaostalih naprežanja neutronsom metodom moguće ukoliko je poznata vrijednost d_0 , potrebno je poznavanje različitih načina njegovog određivanja. Poznavanje d_0 je bitno jer se sve dobivene vrijednosti računaju u odnosu na d_0 . [31]

Neki od načina dobivanja vrijednosti d_0 su [31]:

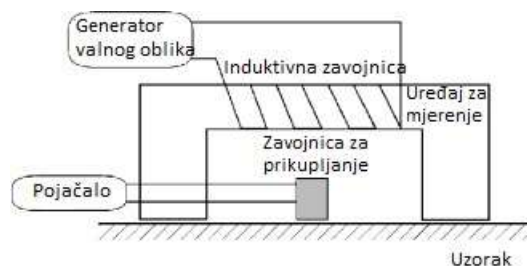
- Mjerenja na dijelu materijala za koji se zna da ima zanemarivu vrijednost naprežanja
- Mjerenja na prahu koji predstavlja materijal koji će se mjeriti
- Mjerenje na malom izresku, koji je izvađen iz velikog volumena materijala (ovaj način je izrazito važan kod zavarenih materijala, iz razloga što se tako omogućava uvid u prostornu raspodjelu razmaka d_0)
- Mjerenje nakon nametanja ravnoteže silama i momentima

7.2.2. Ostale metode

Ove metode su bazirane na mjerenju elektromagnetskih, optičkih i ostalih fizikalnih pojava u zoni zaostalih napreznja. [15]

7.2.2.1. Barkhausen metoda

Metoda magnetskog Barkhausen - ovog šuma (MBN) postavlja se kao jedna od potencijalno korisnijih nerazornih metoda za određivanje površinskih zaostalih napreznja. MBN metoda primjenjiva je na feromagnetične materijale koji se sastoje od magnetskih područja reda veličine nekoliko mikrometara zvana magnetske domene. Svaka domena spontano je magnetizirana duž osi lake magnetizacije, no nisu svi materijali magneti. Razlog tomu je što su vektori smjera magnetizacije u svakoj domeni orijentirani na takav način da sveukupna magnetizacija materijala bude nula, osim naravno prirodnih magneta. Domene su odvojene jedna od druge zidovima koji se nazivaju *Bloch* – ovim zidovima. Postoje dvije vrste *Bloch* – ovih zidova u feromagnetičnom materijalu. 180° *Bloch* – ov zidovi i 90° *Bloch* – ovi zidovi, od kojih veću pokretljivost i važnost za MBN metodu imaju 180° *Bloch* – ovi zidovi. Ukoliko se na feromagnetični materijal primjeni magnetsko polje izazvano istosmjernom strujom, doći će do promjene magnetizma materijala zbog kretanja zidova. Domene koje su orijentirane paralelno ili gotovo paralelno s vektorom vanjskog magnetskog polja će se proširiti, dok će se ostale domene urušiti. Kada se svi vektori magnetizacije unutar domena orijentiraju u smjeru vanjskog magnetskog polja radi pokretljivosti zidova, nastupiti će zasićenje. Granice zrna, deformacije kristalnih rešetki, nečistoće i legirni materijali prepreke su koje onemogućavaju pokretljivost zidova domena. Ukoliko se primjeni dovoljno velika vrijednost magnetizacijske sile, veća od sile uklještenja domena, doći će do skokovitog povećanja magnetizacije materijala što dovodi do pojave histereze. To se povećanje može odrediti postavljanjem induktivne zavojnice uz materijal. Zbog skokovite promjene magnetizacije dolazi do električnog impulsa na zavojnici. Zbrajanjem svih električnih impulsa izazvanih kretanjem svih domena dobiva se signal u obliku šuma koja se naziva Barkhausen – ov šum. [15]

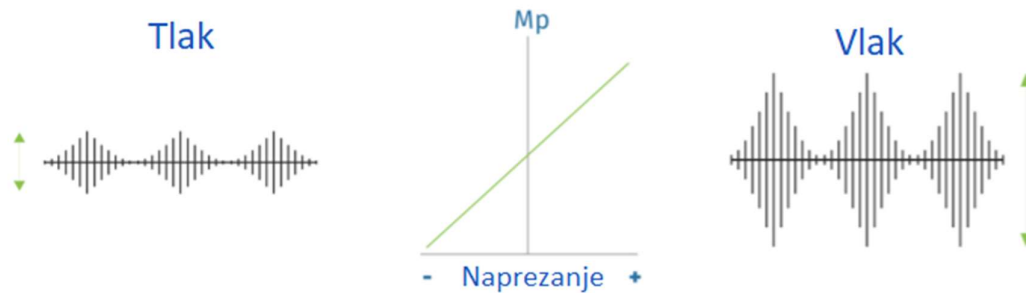


Slika 33. Shematski prikaz mjerenja zaostalih napreznja pomoću Barkhausen - ove metode [25]

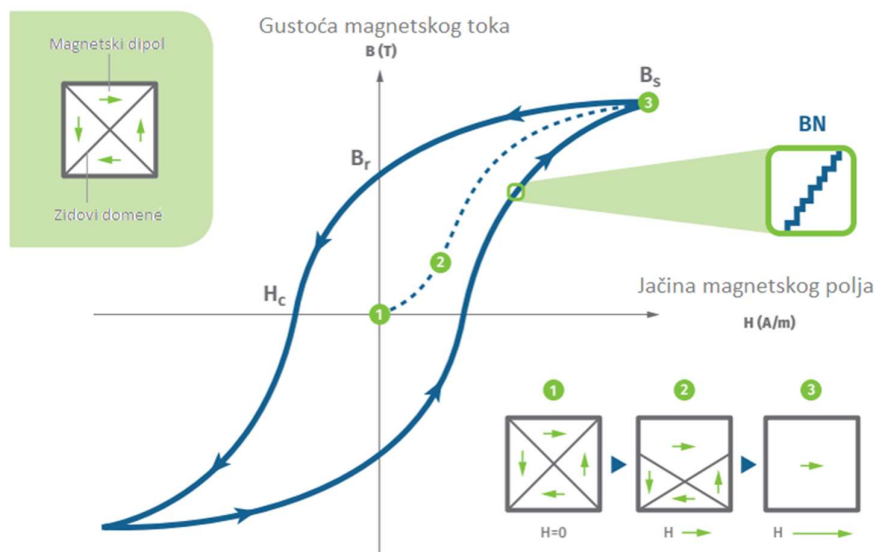
Primjenom MBN metode na mjerenje zavarenih materijala došlo se do sljedećih spoznaja. Mjerenjem napreznja dalje od zavara dobiveni su očekivani rezultati napreznja, tlačna napreznja paralelna smjeru zavara. Na rubu zavara, iznos i smjer MBN – a se naglo promijenio, što može značiti koncentraciju napreznja. Do nagle promjene dolazi radi ovisnosti elastičnih svojstava materijala s magnetskim domenama i s magnetskim svojstvima, a ovisnost se naziva magnetoelastičnost. [15]

Magnetoelastičnost možemo definirati kao svojstvo magnetskih materijala da mijenjaju svoja magnetska svojstva, ukoliko na njih djeluje neka mehanička sila. [26]

Kao posljedica magnetoelastičnosti, u područjima u kojima prevladavaju tlačna naprezanja doći će do smanjenja intenziteta Barhausen – ovog šuma, dok će u područjima vlačnih naprezanja doći do povećanja intenziteta. Poznavanjem ove ovisnosti intenziteta Barhausen - ovog šuma s naprezanjem, moguće je odrediti zaostala naprezanja pomoću intenziteta BN. Uz to što je Barhausen - ov šum osjetljiv na napregnuto stanje, isto tako je osjetljiv i na mikrostrukturno stanje materijala iz čega se može izvući zaključak kako je potrebno posebno podešavanje za svaki materijal kako bi MBN metoda bila uspješna.[15]



Slika 34. Djelovanje vlačnog i tlačnog naprezanja na intenzitet [27]



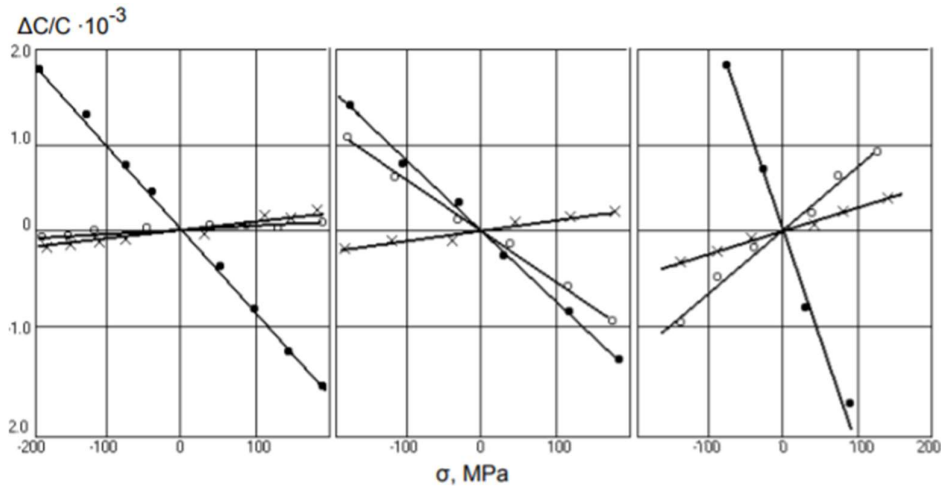
Slika 35. Odnos jačine magnetskog polja i gustoće magnetskog toka s prikazom domene [27]

Ograničenje MBN metode javlja se pojavom naprezanja vrijednostima većim od maksimalne ili manjim od minimalne mjerljive. Ukoliko je naprezanje veće od maksimalno moguće mjerljivog, ono će biti prikazano kao maksimalno, odnosno, neće moći utjecati na energiju MBN. Iako je ovo ograničenje značajno, metoda ipak ima velik broj prednosti poput velike brzine mjerenja, prikladnosti za gotovo sve geometrije te ne zahtjeva direktan dodir. [15]

Dubina mjerenja ovisi o permeabilnosti i električnoj provodljivosti, ukoliko su te dvije vrijednosti manje, dubina mjerenja će biti veća. Najčešća dubina mjerenja iznosi 0,2 mm što je gotovo 100 puta veće od rendgenske difrakcijske metode. [27]

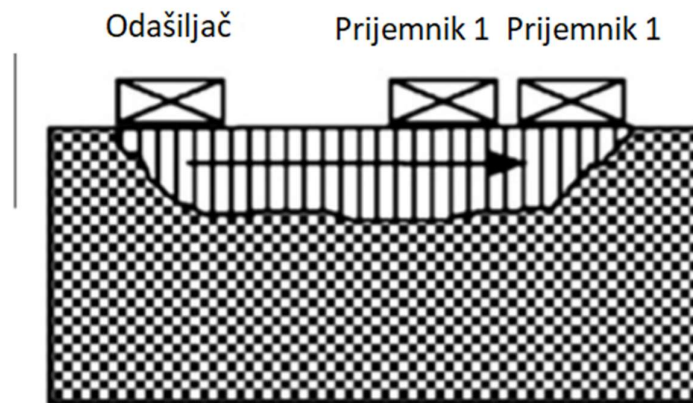
7.2.2.2. Ultrazvučna metoda

Ultrazvučna metoda može se koristiti za određivanje zaostalih naprezanja u velikom broju materijala, isto tako je moguće određivanje i u materijalima velikih debljina. Ultrazvučno određivanje zaostalih naprezanja bazira se na akusto – elastičnom efektu koji opisuje utjecaj elastično deformiranog materijala na propagaciju i brzinu vala kroz materijal. Glavna je prednost ultrazvučne metode mogućnost određivanja zaostalih naprezanja i trenutnih opterećenja u realnim konstrukcijama. Odnos između promjene brzine propagacije longitudinalnih i transverzalnih ultrazvučnih valova s ortogonalnom polarizacijom pod utjecajem tlačnih i vlačnih naprezanja u čeliku i aluminiju se može vidjeti na slici 36. Iz slike se može zaključiti kako se izgled krivulje mijenja promjenom materijala. [15]



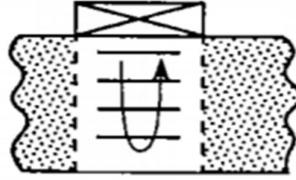
Slika 36. Utjecaj naprezanja na brzinu propagacije ultrazvučnih valova [15]

Postoje različiti mjerni uređaji koji se koriste za ultrazvučnu metodu, no princip mjerenja je isti u svima. Valovi se kroz materijal šalju pomoću odašiljača koji propagiraju kroz materijal do prijemnika prikazano na slici 37, čime se mjere zaostala naprezanja u površinskom, odnosno potpovršinskom sloju. Dubina do koje je moguće dobiti uvid u zaostala naprezanja ovisi o valnoj duljini ultrazvučnog vala, koja prelazi i nekoliko milimetara za razliku od rendgenske difrakcijske metode.



Slika 37. Površinsko ultrazvučno mjerenje [15]

Ukoliko se Źeli dobiti uvid u dubinska zaostala naprezanja u materijalu, potrebno je koristiti metodu pulsnoĝ odjeka u kojoj se pomoću jednog pretvornika odašilju i zaprimaju ultrazvućni valovi. Korištenjem ove varijacije ultrazvućne metode dobiva se prosjećni iznos zaostalih naprezanja kroz debljinu materijala. [28]



Slika 38. Metoda pulsnoĝ odjeka [28]

Određivanjem zaostalih naprezanja ultrazvućnom metodom moguće je dobiti uvid u zaostala naprezanja i do nekoliko milimetara u dubinu materijala. Ostale prednosti ove metode su: prenosivost, jednostavnost korištenja, niska cijena i nepostojanost zraćenja. Ultrazvućna metoda se često koristi za rutinske preglede velikih komponenata poput parnih turbina. [15]

Kako bi mjerenje bilo moguće potrebno je imati prikladnu računalnu opremu (UCC) koja se sastoji od računala s posebnim softverskim paketima poput opširne baze podataka, sustava za analizu utjecaja zaostalih naprezanja na zamor zavarenih spojeva, te sustava za mjerenje. UCC omogućava određivanje jednoosnih i dvoosnih zaostalih naprezanja kod velikog broja materijala. Kako bi mjerenje bilo zadovoljavajuće, potrebno je koristiti opremu visoke rezolucije i pouzdanosti. [28]

Zaostala naprezanja rezultiraju relativno malom promjenom brzine ultrazvućnog vala što se postavlja kao glavni nedostatak metode jer je tako malu promjenu teško izmjeriti. [15]

8. METODE SMANJIVANJA ZAOSTALIH NAPREZANJA I DEFORMACIJA

Zaostala naprezanja i deformacije koje se javljaju kao posljedice postupka zavarivanja nije moguće u potpunosti eliminirati, no postoje različite metode za njihovo smanjenje. Metode smanjivanja zaostalih naprezanja i deformacija dijele se u tri glavne kategorije prema vremenu primjene [10]:

- Prije zavarivanja
- Tijekom zavarivanja
- Nakon zavarivanja

8.1. Prije zavarivanja i tijekom zavarivanja

Kako bi deformacije i zaostala naprezanja bila svedena na minimum potrebo je poduzeti mjere prije samog zavarivanja, od kojih su najvažnije:

- Pravilo konstruiranje
- Stezanje
- Postavljanje i predsavijanje radnog komada u suprotan položaj od očekivane deformacije
- Pravilna priprema spoja

8.1.1. Pravilno konstruiranje

Glavne konstrukcijske mjere kojima je moguće smanjiti zaostala naprezanja i deformacije su [10]:

- Korištenje najmanjih mogućih zavara
- Korištenje najmanje moguće debljine osnovnog materijala
- Korištenje isprekidanog zavara koji je puno povoljniji od kontinuiranog zavara
- Podjela konstrukcija u više dijelova
- Pravilan raspored zavara (izbjegavanje bliskih zavara i preklapanja zavara)
- Zavare raspodijeliti što je to simetričnije moguće

8.1.2. Stezanje

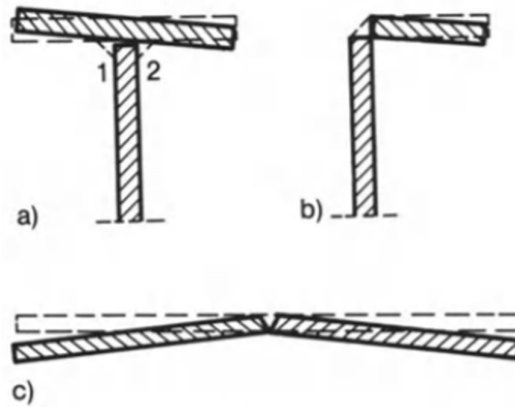
Stezanje je najjednostavniji način eliminiranja deformacija u konstrukciji. Glavni nedostatak stezanja je povišenje zaostalih naprezanja, što je opširnije objašnjeno u točki 6.3.

8.1.3. Postavljanje i predsavijanje radnog komada

Kako bi se poništila deformacija izazvana procesom zavarivanja, radni se komad predsavije, odnosno postavi izvan ispravnog položaja suprotnog od deformacije. Kako bi predsavijanje bilo uspješno, potrebno je dobro odrediti deformaciju koja će nastati. Poništavanje deformacija se može dobiti [9]:

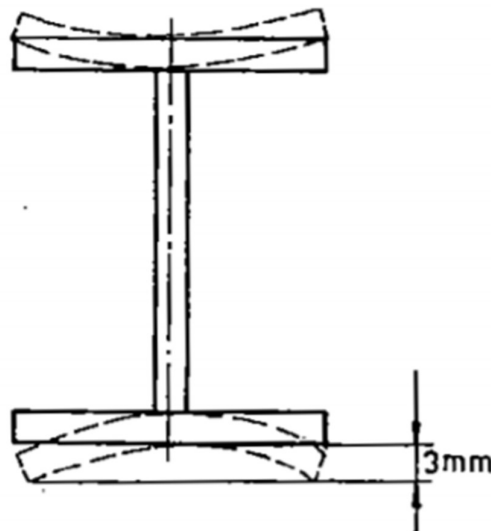
- Postavljanjem dijelova radnog komada u položaj suprotan od deformacije
- Predsavijanjem

Najjednostavnije i najjeftinije sprječavanje deformacija je moguće namjernim postavljanjem dijelova radnog komada izvan pravilnog položaja za iznos predviđene deformacije, prikazano na slici 39.



Slika 39. Postavljanje dijelova u suprotan položaj od predviđenih deformacija [9]

Kako bi se izbjegle deformacije nakon zavarivanja, osim postavljanja dijelova izvan pravilnog položaja, moguće je izvesti i predsavijanje u smjeru suprotnom od smjera predviđenih deformacija. Predsavijanje je prikazano na slici 40.



Slika 40. Predsavijanje [9]

8.1.4. Priprema spoja

Kako su unos topline i promjena faza materijala najveći faktori koji utječe na deformacije i zaostala naprezanja, potrebno je odabrati pripremu spoja koja će rezultirati najmanjim unosom topline i najmanjom količinom rastaljenog materijala. Opširnije objašnjenje nalazi se u točki 6.4

8.1.5. Redoslijed i slijed zavarivanja

Odabirom pravilnog slijeda i redoslijeda zavarivanja moguće je znatno smanjiti iznos zaostalih naprezanja, što je pobliže objašnjeno u točki 6.5.

8.1.6. Predgrijavanje

Predgrijavanje se provodi sa svrhom smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija u materijalu. Opširnije objašnjenje može se pronaći u točki 6.2.

8.2. Nakon zavarivanja

Na zaostala naprezanja i deformacije moguće je utjecati i nakon zavarivanja sljedećim metodama [10]:

8.2.1. Žarenje u svrhu smanjenja zaostalih naprezanja

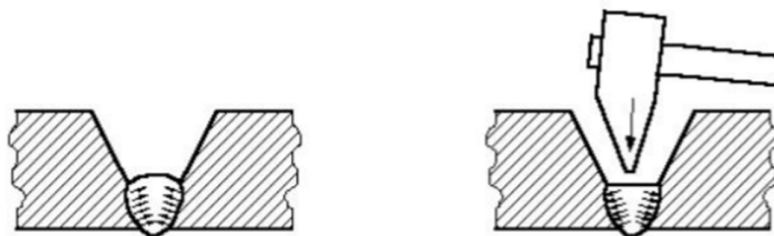
Žarenje u svrhu smanjenja zaostalih naprezanja provodi se na temperaturama između 450 i 700°C, ovisno o materijalu. Brzina zagrijavanja mora biti izrazito mala, ovisno o debljini može iznositi i do 1°C po minuti, kako ne bi došlo do neravnomyernog zagrijavanja i unošenja novih naprezanja koja mogu rezultirati pukotinama. Kada se materijal zagrije na traženu temperaturu, zadržava se na toj temperaturi od 1 do 3 sata, opet ovisno o debljini i vrsti materijala. Hlađenje mora biti u pola manje brzo od zagrijavanja. Žarenjem nije moguće u potpunosti otkloniti zaostala naprezanja, no moguće ih je u najboljem slučaju smanjiti do čak 15% početne vrijednosti. Nedostaci žarenja jesu izrazito visoka cijena, dugotrajnost i ograničenje veličine konstrukcije veličinom peći. Žarenjem može doći do povećanja deformacija. [10]

8.2.2. Smanjenje zaostalih naprezanja vibracijom

Ova vrsta smanjenja zaostalih naprezanja se koristi nakon što se materijal ohladio na sobnu temperaturu. Bazira se na principu stvaranja dodatnog dinamičkog opterećenja pomoću vibriranja, koje zajedno sa zaostalim napreznjima stvaraju plastičnu deformaciju kojom se popuštaju zaostala naprezanja. Metoda ne zahtjeva toliko veliki utrošak energije poput žarenja, te ne dolazi do promjene mikrostrukture materijala. [10]

8.2.3. Raskivanje zavara čekićem

Raskivanje zavara čekićem se vrši nakon svakog prelaza zavara u svrhu smanjenja deformacija zavara i zaostalih naprezanja. Raskivanje se može raditi pomoću električnog ili pneumatskog čekića, te ručno. Moguće je raskivanje u toplom ili hladnom stanju, no materijale koji su manje duktilni je potrebno raskivati u toplom stanju kako bi se izbjegao rizik nastanka pukotina. [10]



Slika 41. Raskivanje zavara čekićem [9]

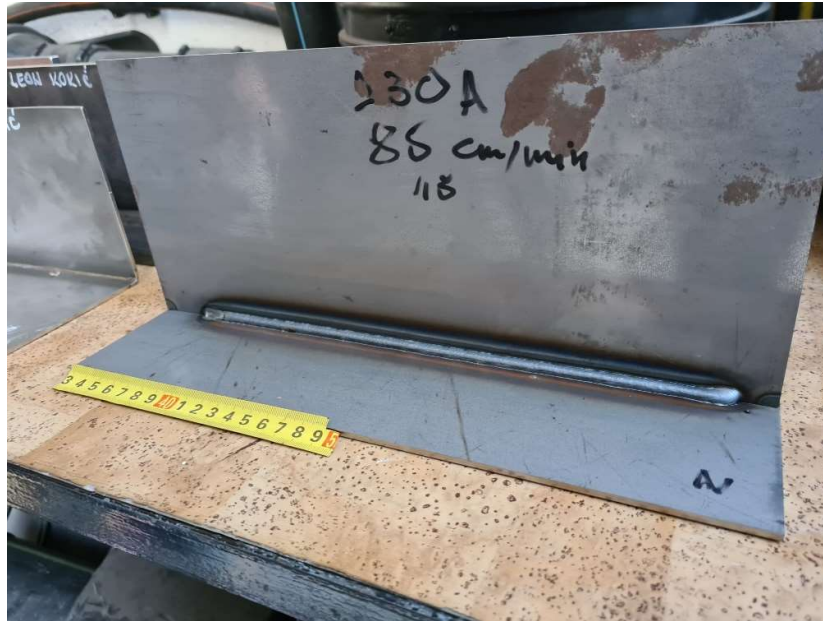
8.2.4. Mehaničko ravnjanje

Mehaničko se ravnjanje koristi radi otklanjanja deformacija nastalih kao posljedica zavarivanja. Moguće je ravnati na hladno ili na toplo. Mehaničkim ravnjanjem plastično se deformira dio materijala koji se deformirao nakon zavarivanja. Ova metoda korekcije deformacije koristi se kod čelika niske čvrstoće i austenitnih čelika. [10]

9. EKSPERIMENTALNI DIO

9.1. Odabir zavarenog spoja

U eksperimentalnom dijelu završnog rada napravljen je model preko kojeg se očitavaju zaostala naprezanja uz pomoć programske aplikacije Visual – Weld i Visual – Wiever, za zavar prikazan na slici 42.



Slika 42. Zavar

Eksperimentalni dio proveden je u Laboratoriju za zavarivanje i u knjižnici zavoda za zavarivanje. Zavarivanje je provedeno na čeličnim limovima debljine 3 mm, oznake DD12 (oznaka 1.0398), čija su kemijska i mehanička svojstva propisana normom EN 10111. Parametri odabranog zavara prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Parametri zavarivanja

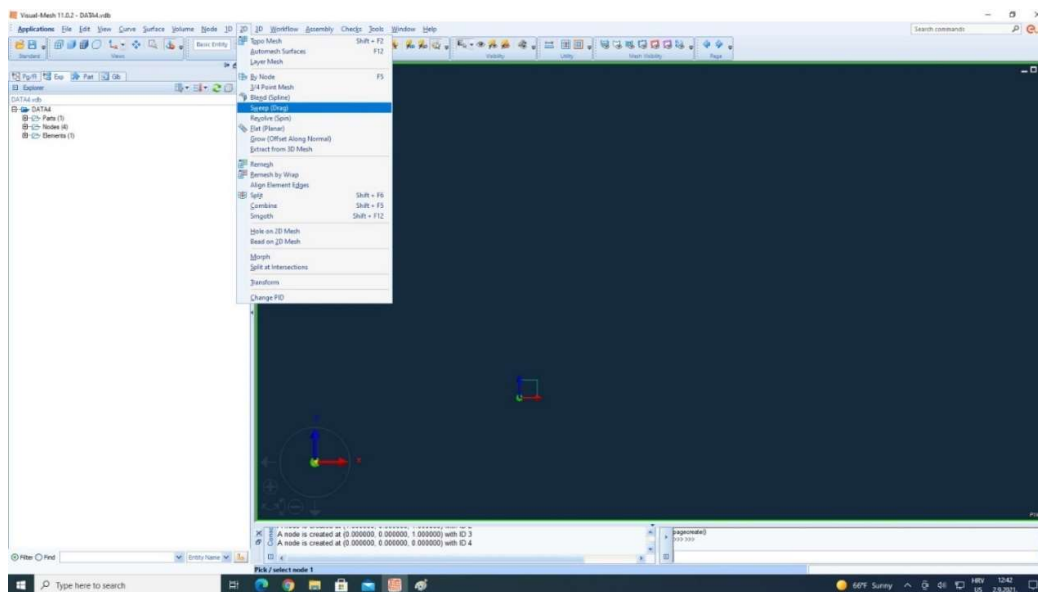
Zavar	
Jakost struje	230 A
Napon	22 V
Visina zavara	3,5
Brzina zavarivanja	85 cm/min
Protok plina	15 l/min
Položaj zavarivanja	PB
Tehnika rada	Neutralna

9.2. Izrada modela pomoću programske aplikacije Visual Weld

U drugom dijelu eksperimentalnog rada napravljen je model u programskom paketu Visual – Environment 11.0.2. Programski paket sadrži velik broj modula, od kojih su za izradu simulacije zavarivanja bitna samo tri. Za ovaj završni rad korištena je samo jedan modul, Visual – Mesh, dok se ostala dva, Visual – Wled i Visual – Viewer, koriste za izradu same simulacije i očitavanje rezultata

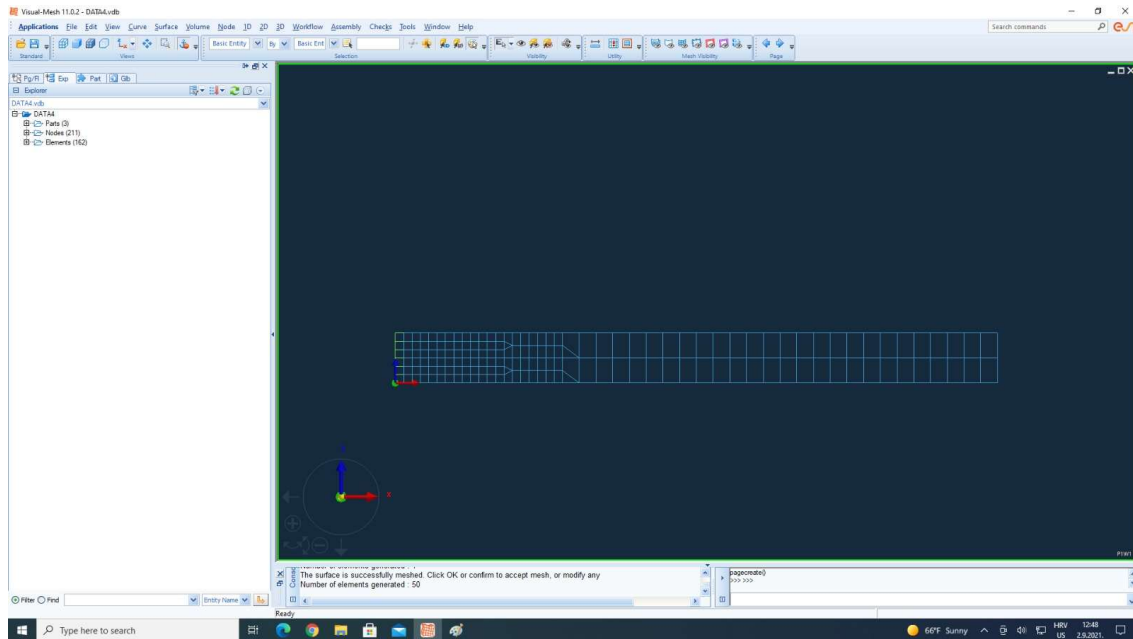
9.2.1. Visual – Mesh

Prvi je korak u izradi simulacije kreiranje modela u Visual – Mesh-u te on služi za definiranje kolektora. Model koji se u njemu izrađuje mora što više odgovarati stvarnom modelu kako bi simulacija zavarivanja bila što sličnija stvarnom zavarivanju. Kako se Visual – Mesh bazira na metodi konačnih elemenata, potrebno je sastaviti model od velikog broja konačnih elemenata. Najtočniji rezultati dobili bi se ukoliko bi se model napravio od ogromnog broja malih konačnih elemenata, no to bi vremenski i financijski bilo neizvedivo. Zbog toga pronađen je kompromis, u području zavarenog spoja (sam metal zavara i zona utjecaja topline) konstruiraju se konačni elementi malih dimenzija kako bi se dobila što točnija simulacija. Kako je u tom području najveći unos topline, nastupit će najveće promjene. Udaljavanjem od zone utjecaja topline promjene u materijalu biti će sve manje, što znači da će dimenzija konačnih elemenata rasti kako bi se uštedilo na vremenu bez velikog utjecaja na same rezultate simulacije. Imajući na umu pravilno konstruiranje konačnih elemenata, kreira se model na kojem će se provoditi simulacija. Prvi korak jest izrada 2D mreže. Za izradu navedene mreže korištene su dvije opcije: „Node“ i „Sweep“. Opcija „Node“ omogućava kreiranje točaka kojima se definira dimenzija prvog konačnog elementa u 2D-u. Nakon izrade prvog konačnog elementa u 2D-u korištena je opcija „Sweep“ pomoću koje je moguće odabrati duljinu pomaka te broj čvorova na svim stranicama 2D mreže. Pomoću opcije „Sweep“ moguće je manipulirati dimenzijom konačnih elemenata i njihovim pogrubljanjem. Postupak je potrebno ponavljati dok se ne dođe do maksimalne veličine konačnih elemenata. Opcija „Sweep“ prikazana je na slici 43.



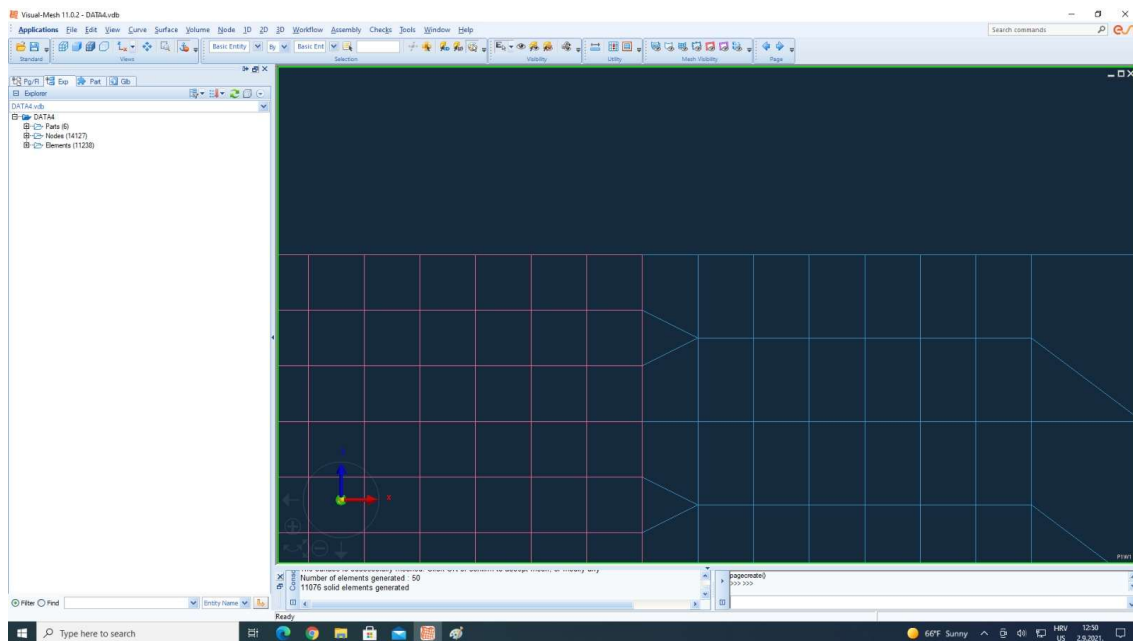
Slika 43. Opcija „Sweep“

Pravilnim korištenjem nabrojanih opcija, dobiva se 2D mreža vidljiva na slici 44. Dimenzije modela su izmjerene dimenzije stvarnog uzorka, kako bi simulacija što bolje odgovarala stvarnom procesu zavarivanja.



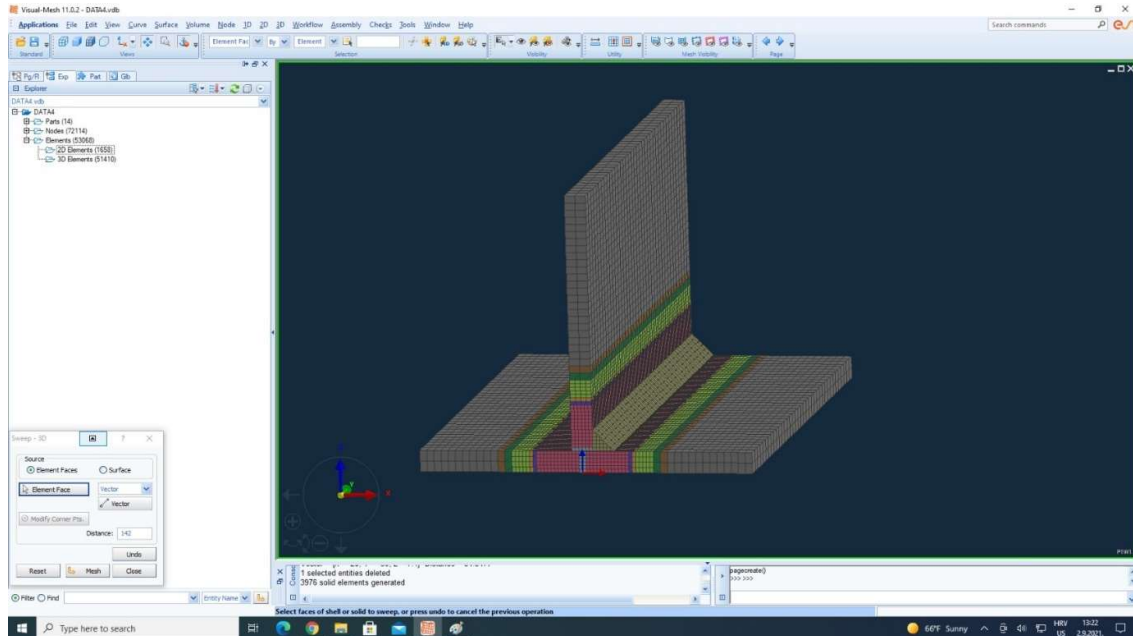
Slika 44. Prikaz 2D mreže

Posebnu pozornost potrebno je obratiti na pravilno povećanje dimenzije konačnih elemenata. Model je potrebno izraditi na način da su svi čvorovi manjih konačnih elemenata povezani sa svim čvorovima većih konačnih elemenata. Ne smiju postojati slobodni („leteći“) čvorovi.



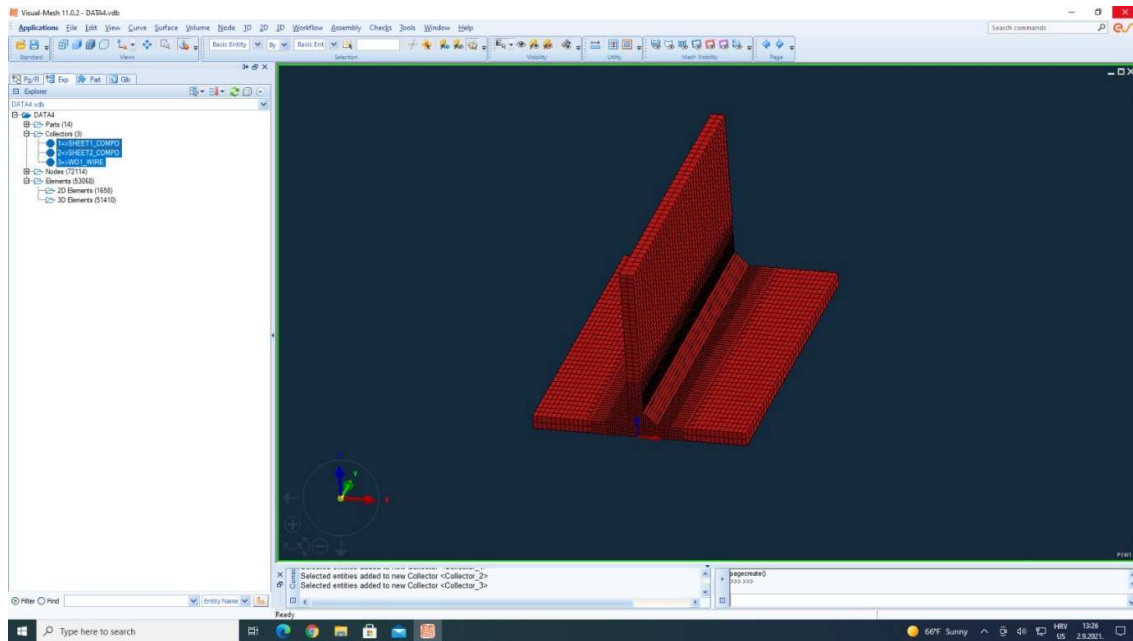
Slika 45. Prikaz pravilnog pogrubljenja mreže

Završetkom izrade 2D mreže, ona se ekstrudira u treću os kako bi se dobio potpuni trodimenzionalni konačni elementi. Korištena opcija se naziva „3D Sweep“. Kako bi se dodatno smanjilo vrijeme izrade, ekstrudiranje potrebno je napraviti na isti način kao i 2D mrežu, odnosno potrebno ju je pogrubljivati na isti način. Trodimenzionalne konačne elemente je moguće vidjeti na slici 46.



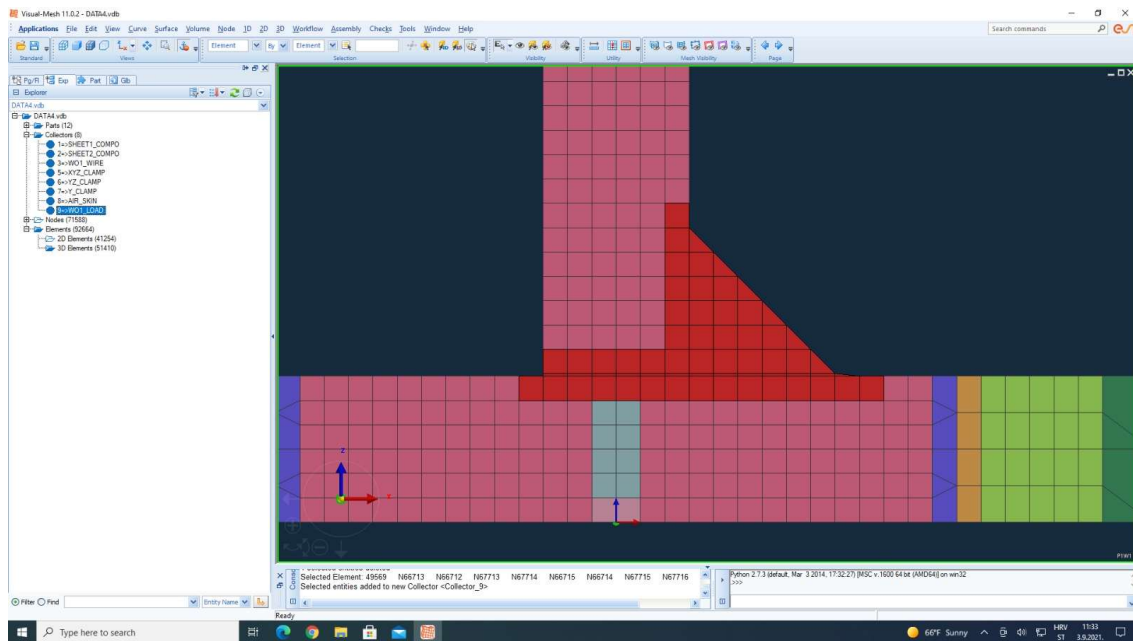
Slika 46. Završeni model

Završetkom izrade modela, potrebno je definirati kolektore. Uloga kolektora je velika, pomoću njih program raspoznaje osnovni i dodatni materijal te se pomoću njih definiraju točke stezanja. Izrada kolektora je jednostavna, potrebno je odabrati sve trodimenzionalne konačne elemente te unutar opcije „Tools“ odabrati podopciju „Add to New Collector“. Nakon izrade prvog kolektora, isto je potrebno učiniti za drugu ploču kao i za dodatni materijal. Završetkom izrade kolektora potrebno je preimenovanje kreiranih kolektora kako bi program mogao raspoznati vrstu kolektora. Kolektorima osnovnog materijala dodaje se ekstenzija „_COMPO“, dok se dodatnom materijalu dodaje ekstenzija „_WIRE“. Kada je završeno preimenovanje svih kolektora, program je u mogućnosti prepoznati model u potpunosti te razaznati koji konačni elementi predstavljaju osnovni, a koji dodatni materijal.



Slika 47. Kolektori osnovnog materijala i dodatnog materijala

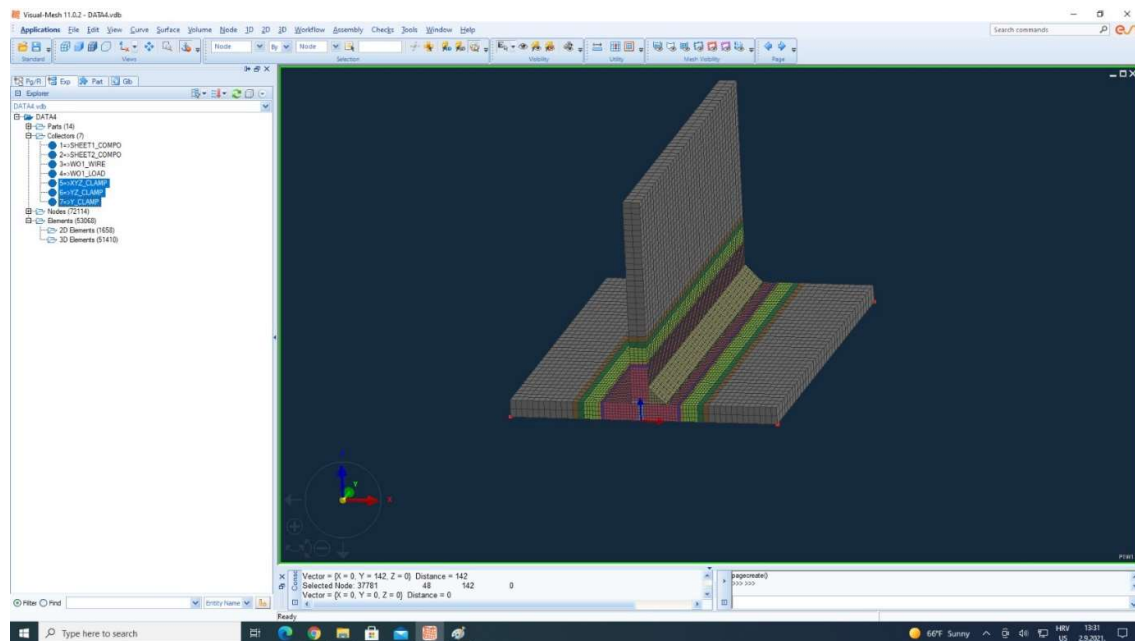
Sljedeći korak je definiranje kolektora unosa topline. Veličina kolektora unosa topline veća je od kolektora dodatnog materijala. Postupak izrade kolektora unosa topline identičan je izradi prijašnjih kolektora. Izradu kolektora unosa topline moguće je vidjeti na slici 48.



Slika 48. Kolektor unosa topline

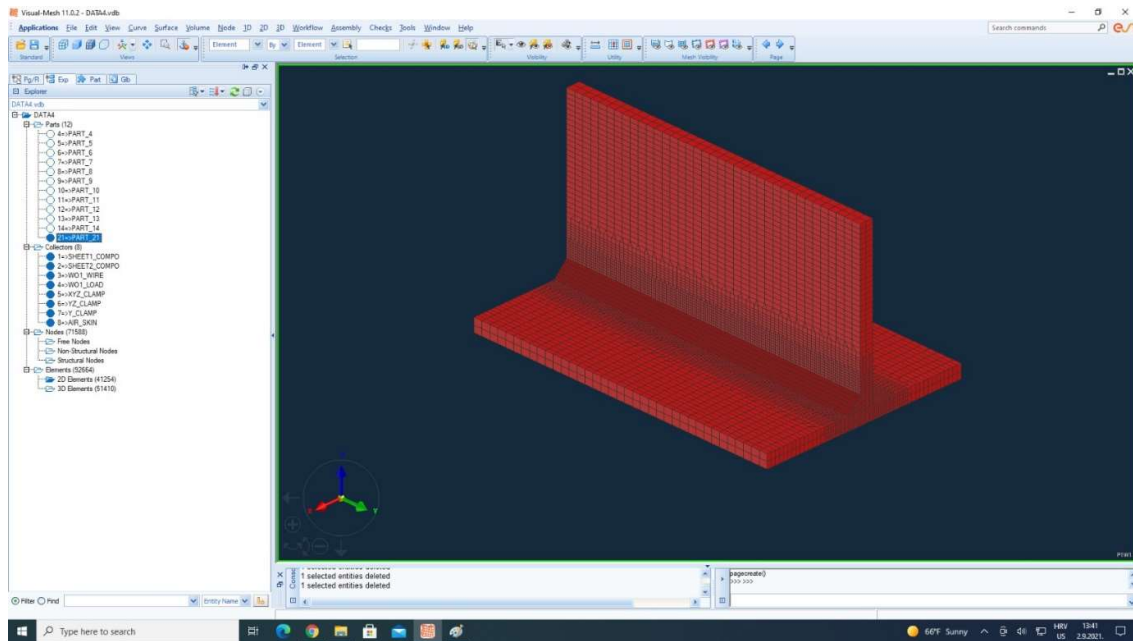
Kako u ovom slučaju je zavarivanje odrađeno u jednom prijelazu, postupak nije potrebno ponavljati, već je potrebno preimenovati novi kolektor i dodati mu ekstenziju „_LOAD“.

Nakon preimenovanja kolektora unosa topline, potrebno je definirati kolektore stezanja. Iako prilikom zavarivanja nije primjenjivana sila stezanja radnog komada, kako bi programski paket točno proveo simulaciju, potrebno je dodati minimalnu silu stezanja. Za razliku od prijašnjih kolektora, kolektor stezana je točka, a ne cijeli konačni element. Odabirom opcije „*NODE*“ označava se krajnja točka ruba jedne od ploča te se pretvara u kolektor kao i prijašnji kolektori. Nakon izrade novog kolektora potrebno ga je preimenovati i dodati mu ekstenziju „*CLAMP*“, pa puno ime kolektora glasi „*XYZ_CLAMP*“. Postupak je potrebno ponoviti još dva puta za dvije različite točke te je njih potrebno preimenovati u „*YZ_CLAMP*“ i „*Y_CLAMP*“. Pomoću te tri točke dodat će se nemogućnost gibanja u osima prema njihovim imenima u kasnijim koracima simulacije. To se radi kako bi se onemogućilo slobodno pozicioniranje radnog komada u prostoru.



Slika 49. Kolektori stezanja

Zadnji kolektor kojeg je potrebno definirati jest kolektor izmjene topline. Kako se izmjena topline između modela i okoline odvija preko vanjske površine radnog komada potrebno je koristiti ljuskasti model izmjene topline, a ne konačne elemente. Izrada ljuskastog modela odvija se na način da se odabere opcija „*Extract from 3D Mesh*“ u stupcu „*2D*“. Nakon odabira opcije otvara se novi prozor u kojem se otklanja opcija „*Extract at Part Boundaries*“, odabire „*Element face*“ te se označavaju svi dijelovi modela. Potvrđivanjem opcije kreira se novi ljuskasti model koji je potrebno dodati kao novi kolektor. Nakon izrade kolektora potrebno ga je preimenovati u „*AIR_SKIN*“.



Slika 50. Kolektor izmjene topline

Izradom svih potrebnih kolektora prelazi se u drugi modul programskog paketa imena Visusal – Weld. U novom modulu se određuju parametri unosa topline i zavarivanja te se izrađuje i odvija simulacija. Pravilnim uvođenjem parametara unosa topline i zavarivanja, pokreće se simulacija, nakon čega se dobiveni rezultati pregledavaju u trećem modulu programskog paketa imena Visusal – Wiewer.

10. ZAKLJUČAK

Zavarivanje se pokazalo kao jedan od najraširenijih postupaka spajanja zbog njegovog velikog i relativnog brzog razvoja. Neizbježna posljedica zavarivanja jesu zaostala naprezanja. Zaostala naprezanja nemoguće je izbjeći zbog velikog i nejednolikog unosa topline, ali ih je moguće kontrolirati i umanjiti. Jedan od glavnih koraka u razumijevanju zaostalih naprezanja jest njihovo mjerenje, odnosno određivanje. Postoji velik broj postupaka kojima se mogu odrediti zaostala naprezanja, no u ovom završnom radu su posebno obrađena dva: neutronska i rendgenska difrakcijska metoda. Neutronska i rendgenska difrakcijska metoda su metode koje omogućavaju uvid u zaostala naprezanja bez razaranja materijala. Iako obje metode koriste isti mehanizam difrakcije, one se dosta razlikuju. Rendgenskom se metodom dobiva uvid u ravninski model zaostalih naprezanja, naprezanje okomito na površinu se zanemaruje. Iako bi se mogao dobiti uvid i u naprezanje okomito na površinu, ono se najčešće ne radi jer je izrazito kompliciran, a samim time vremenski i financijski zahtjevan pothvat. Za razliku od rendgenske metode, neutronska metoda jedina je nerazorna metoda koja daje uvid u potpuni tenzor naprezanja, odnosno dobiva se slika potpunog troosnog naprezanja. Razlog tome je što materijali koji se smatraju inženjerski bitnima, poput čelika, aluminića i bakra, imaju izrazito dobra svojstva propusnosti na neutrone. Potrebno je naglasiti kako oprema za neutronska difrakcijska metodu iznosi i do koliko puta više od već skupe opreme za rendgenska difrakcijska metodu. Iako se pomoću ovih metoda može dobiti uvid u zaostala naprezanja bez oštećivanja materijala, one imaju i velik broj nedostataka. Kao glavni nedostaci postavljaju se: ograničenja u obliku materijala, kompliciranost postupka te cijena opreme i edukacija

Pod ograničenja u obliku materijala podrazumijeva se vrsta i mikrostruktura materijala. Kako bi mjerenje bilo korektno odrađeno, materijal bi trebao imati uređenu kristalnu strukturu. Isto tako materijal bi trebao biti homogen bez promjena faza kao i propusnost na rendgenske odnosno neutronske zrake

Kompliciranost postupka odnosi se na pripremu koju je potrebno odraditi prije mjerenja i na probleme koji se mogu javiti zbog nesavršenosti materijala i čovjeka. Potrebno je pravilno definiranje i poznavanje svrhe mjerenja, dimenzije, oblika i materijala. Postupak zahtjeva i poznavanje povijesti izrade i korištenja materijala. Isto tako potrebna je potpuna preciznost pri mjerenju i određivanju elastičnih konstanti.

Uz sve navedene probleme, obje difrakcijske metode financijski su neisplative za implementiranje u većinu tvrtki. Sama cijena opreme koju je potrebno kupiti prelazi cijene ostalih metoda određivanja zaostalih naprezanja i do nekoliko puta, uz što je još potrebno pribrojati i cijenu edukacije radnika koji će njome upravljati.

Iako obje difrakcijske metode imaju svoje prednosti, njihov velik broj nedostataka onemogućava njihovu integraciju u pogon za rješavanje realnih problema.

LITERATURA

- [1] Matija D, Analiza zaostalih naprezanja pri zavarivanju nelegiranih čelika primjeno programa Visual Weld, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [2] Alfirević I, Nauka o čvrstoći I., Zagreb: Tehnička knjiga Zagreb, 1989.
- [3] Pustačić D; Cukor I, Teorija plastičnosti i visukoelastičnosti, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [4] Šušak I, Numerička procjena utjecaja predgrijavanja i rubnih uvjeta na zaostala naprezanja i deformacije pri zavarivanju, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [5] Pilipenko A, Computere simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [6] Čorić D; Alar Ž, Odabrana poglavlja iz mehanički svojstava materijala (interna skripta), Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014./2015.
- [7] Franin B, Numeričko modeliranje zaostalih naprezanja pri zavarivanju, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [8] Zgurić M, Analiza deformacija pri zavarivanju austenitnih Cr-Ni čelika primjenom programa Visual Weld, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [9] Žbirin P, Zaostala naprezanja i deformacije u zavarenim konstrukcijama, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [10] Radaj D, Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [11] Yakout M; Elbestawi M.A.; Veldhuis S.C.; Smith-Nangle, Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys, Canada, Hamilton, McMaster University, Department of Mechanical Engineering, 2019
- [12] Colegrove P; Ikeagu C; Thistlethwaite A; Williams S; Nagy T; Suder W; Steuwer A; Pirling T: The welding process impact on residual stress and distortion, Science of Technology of Welding & Joining, Vol 14 (8), p.717-725, 2009
- [13] Choobi Seyyedean M.; Haghpanahi M.; Sedighi M.: Investigation of Effect of Clamping on Residual Stresses and Distortion in Butt-Welded Plates, Sharif University of Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 387-394, 2010
- [14] Platužić M: Utjecaj brzine zavarivanja na deformacije pri zavarivanju raznorodnih materijala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [15] Rossini N.S.; Dassisti M.; Benyounis K.Y.; Olabi A.G.: Methods of measuring residual stresses in components, Politecnico di Bari, Mechanical and Management Engineering Department; Dublin City University, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2011

- [16] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/t-max_trepanning/pages/default.aspx posljednji put pristupljeno 24.5.2021.
- [17] https://sea.omega.com/tw/pptst/ROSETTES_CORNER_STRAIN_SG.html posljednji put pristupljeno 24.5.2021.
- [18] Prevéy P.S.: Current applications of x-ray diffraction residual stress measurement, Lambda Technologies, 1996
- [19] Deveci M.: Measurement Methods of Residual Stresses, Stresstech, a Nova Instrument Company
- [20] Prevéy P.S.: X-ray diffraction residual stress techniques, Lambda Technologies, 1986
- [21] Ripley M: Residual stress measurement using neutrons, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, 2006
- [22] Veqter, Neutron Diffraction Technique, link: <https://www.veqter.co.uk/files/rsm-techniques/veqter-neutron-diffraction-technique.pdf> posljednji put pristupljeno 24.05.2021
- [23] Bokuchava G, Neutron RTOF Stress Diffractometer FSD at the IBR-2 Pulsed Reactor, Dubna, Joint institute for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics, 2018
- [24] Petrov P; Bokuchava G; Kaisheva D; Papushin I.V.; A neutron diffraction study of residual stress due to electron beam welding; The 3rd IIV South-East European Welding Congress, „Welding and Joining Technologies for a Sustainable Development and Environment“, Timisoara – Romania, 2015
- [25] Umakoshi Y; Yasuda H.Y.: Nondestruction Lifetime Prediction by Magnetic Measurements, Encyclopedia of Materials: Science and Techonogy, 2004
- [26] Tomić D: Utjecaj magnetskog polja na modul elastičnosti nekih krutina, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017
- [27] Devici M: The Properties of Barkhausen Noise, Stresstech,
- [28] Kudryavtsev Y; Kleiman J: Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in Welded Elements and Structures, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016
- [29] HRN EN 15305:2008 – Nerazorno ispitivanje – Ispitna metoda analize zaostalog naprezanja rendgenskom difrakcijom
- [30] HRN EN ISO 21432:2020 – Nerazorno ispitivanje – Standardna metoda ispitivanja za određivanje zaostalih naprezanja difrakcijom neutrona

PRILOZI

CD – R disc