

Numerička simulacija deformacija pri zavarivanju složenih konstrukcija

Jurković, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:235:404363>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Jurković

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Jurković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem tijekom studija i navedenom literaturom.

Posebno bih se zahvalio svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. te asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na razumijevanju, podršci i primjedbama pruženim za vrijeme izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i kolegama s faksa na svim lijepim trenucima tijekom studiranja.

I na kraju najveću zahvalu dajem svojoj obitelji radi ukazanog povjerenja, strpljenja, bodrenja i pomoći kad mi je najviše trebalo.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO JURKOVIĆ** Mat. br.: 0035192810

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička simulacija deformacija pri zavarivanju složenih konstrukcija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of welding distortions at complex structures**

Opis zadatka:

U radu je potrebno proučiti problematiku zavarivanja visokolegiranih Cr-Ni čelika s posebnim naglaskom na pojavu deformacija. Objasniti fizikalne mehanizme nastajanja deformacija pri zavarivanju te opisati metode prikladne za minimalizaciju istih. Također, potrebno je obraditi numeričku simulaciju procesa zavarivanja, a osobito mogućnost predviđanja deformacija u zavarenim konstrukcijama primjenom odgovarajućih programskih alata.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je provesti numeričku simulaciju prikladne konstrukcije. Na numeričkom modelu provesti odgovarajuće analize s ciljem dobivanja ukupne deformacije konstrukcije uzevši u obzir parametre zavarivanja te svojstva osnovnog materijala. Dobivene rezultate usporediti s izmjerenim vrijednostima na stvarnoj konstrukciji te dati zaključak o primjenjivosti numeričke analize za realne slučajeve.

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

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predvideni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJEST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	2
3. NEHRĐAJUĆI ČELIK.....	3
3.1. Feritni nehrđajući čelici	4
3.2. Austenitni nehrđajući čelici	6
3.3. Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici	7
3.4. Martenzitni nehrđajući čelici	9
3.5. Mekomartenzitni nehrđajući čelici	10
4. ZAVARLJIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	11
4.1. Specifičnosti zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika	12
4.2. Specifičnosti zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika	13
4.3. Specifičnosti zavarivanja austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika	14
4.4. Specifičnosti zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika.....	15
4.5. Opća pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika.....	16
5. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	17
5.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja.....	19
5.2. Tehnike rada.....	21
5.3. Način prijenosa metala.....	22
5.3.1. Prijenos metala kratkim spojem.....	23
5.3.2. Prijenos metala štrcajućim lukom	24
5.3.3. Prijenos metala mješovitim lukom.....	26
5.3.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom.....	27
5.4. Zaštitni plinovi	29

6.	DEFORMACIJE U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA	30
6.1.	Podjela zaostalih naprezanja i deformacija.....	31
6.2.	Načini smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija.....	33
7.	NUMERIČKE SIMULACIJE KOD ZAVARIVANJA.....	35
7.1.	Primjena numeričkih simulacija	35
7.2.	Aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja	37
7.2.1.	Sysweld (Visual Environment)	37
8.	EKSPERIMENTALNI RAD	39
8.1.	Oprema za zavarivanje	39
8.2.	Priprema spoja za zavarivanje.....	42
8.3.	Zavarivanje konstrukcije.....	46
8.4.	Deformacije u konstrukciji	49
8.5.	Izrada makroizbruska	51
8.6.	Simulacija u Visual-Environment-u	54
8.5.1.	Visual - Mesh.....	54
8.5.2.	Visual – Weld	58
8.5.3.	Visual - Viewer	64
9.	ZAKLJUČAK.....	68

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [5]	4
Slika 2. Mikrostruktura austenitinih nehrđajućih čelika [5]	6
Slika 3. Mikrostruktura austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [5]	7
Slika 4. Mikrostruktura martenzitnih čelika nehrđajućih čelika [8]	9
Slika 5. Schafferov dijagram [10]	12
Slika 6. Toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih Cr čelika [13]	15
Slika 7. Zavarivanje MIG/MAG [18]	17
Slika 8. Uređaj za zavarivanje MIG/MAG [19].....	18
Slika 9. Tehnike rada kod MIG/MAG zavarivanja [21]	21
Slika 10. Shema mehanizama za prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja [23].....	22
Slika 11. Shema prijenosa metala kratkim spojem [23]	23
Slika 12. Realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem [25].....	24
Slika 13. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [23].....	25
Slika 14. Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [25].....	25
Slika 15. Shema prijenosa metala mješovitim spojem [24].....	26
Slika 16. Realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [25].....	27
Slika 17. Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom [23]	28
Slika 18. Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [25].....	28
Slika 19. Raspodjela naprežanja kod poprečnih i uzdužnih zavara [30]	32
Slika 20. Vrste deformacija kod zavarivanja [30]	33
Slika 21. Primjer metode konačnih elemenata [35]	36
Slika 22. Različiti tipovi konačnih elemenata [34]	37
Slika 23. Sysweld – vodilica za hidrauličku bušilicu	38
Slika 24. Robotska stanica VRC–1G MIG+1G TIG/1dm	40
Slika 25. Robot Almaga AX-V6 [36]	40
Slika 26. VPS 4000 digit [37]	41
Slika 27. CAD model u programskom paketu „SolidWorks“	42
Slika 28. CNC rezanje plazmom.....	44
Slika 29. Lijevo - Grubo brušenje na stolnoj brusilici;	45
Slika 30. Lijevo – mjerenje cijevi; desno – mjerenje ploče	45
Slika 31. Žica od austenitnog čelika (AISI 309).....	46
Slika 32. Redoslijed i smjer zavarivanja.....	47

Slika 33. Program: Zavar (1)	48
Slika 34. Robotizirano zavarivanje radnog komada	48
Slika 35. Deformacije ploče iz pogleda (1)	49
Slika 36. Deformacije ploče iz pogleda (2)	50
Slika 37. Pozicije makroizbrusaka	51
Slika 38. Makroizbrusak (1)	52
Slika 39. Makroizbrusak (2)	53
Slika 40. Makroizbrusak (3)	53
Slika 41. Mreža ploče	55
Slika 42. 3D model u modulu <i>Visual - Mesh</i>	56
Slika 43. Trajektorija kod kutnih (pravocrtnih) zavara.....	58
Slika 44. Trajektorija kod kružnih zavara.....	59
Slika 45. Component Properties	60
Slika 46. Welding Process	61
Slika 47. Unos topline kod kružnog zavara	62
Slika 48. Clamping Condition.....	63
Slika 49. Kalibracija topline u ravnini makroizbruska (2).....	65
Slika 50. Deformacije ploče iz pogleda (1)	66
Slika 51. Deformacije ploče iz pogleda (2)	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Potrošnja plina u ovisnosti na promjer žice [18]	30
Tablica 2. Načini smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija [13,31,32,33]	33
Tablica 3. Tehnička specifikacija robota Almega AX-V6 [36].....	41
Tablica 4. Tehnička specifikacija VPS 4000 digit [37]	42
Tablica 5. Kemijski sastav AISI 304 [38].....	43
Tablica 6. Mehanička i fizička svojstva AISI 304 [38]	43
Tablica 7. Kemijski sastav AISI 309 [38].....	46
Tablica 8. Mehanička i fizička svojstva AISI 309 [38]	46
Tablica 9. Deformacije ploče u pogledu (1)	50
Tablica 10. Deformacije ploče u pogledu (2)	51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Cr		Krom
Ni		Nikal
W		Volfram
C		Ugljik
Ti		Titan
Mo		Molibden
N		Dušik
Ar		Argon
He		Helij
CO ₂		Ugljikov dioksid
HNO ₃		Oksidirajuća kiselina
H ₂ SO ₄		Sumporna kiselina
FCC		Plošno centrirana kubična rešetka
HB		Tvrdoća po Brinellu
A		Austenit
M		Martenzit
F		Ferit
ZUT		Zona utjecaja toplina
M _s		Početna linija martenzita
M _f		Završna linija martenzita
MIG		Zavarivanje inertnim zaštitnim plinom

$v_{\dot{z}}$	mm/min	Brzina zavarivanja
I	A	Jakost struje
U	V	Napon električne struje
$I_{sk\dot{z}}$	mm	Slobodni kraj žice
d	mm	Promjer žice
α	°	Nagib pištolja
L	H	Induktivitet
q	l/min	Protok plina
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje
MKE		Metoda konačnih elemenata
A_5	%	Istezljivost
Q	kJ/cm	Unos topline
R_p	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
CNC		Numerička kontrola računala
ρ	g/cm ³	Gustoća
E	kN/mm ²	Modul elastičnosti

SAŽETAK

U diplomskom radu je detaljno proučeno zavarivanje nehrđajućeg čelika s posebnim naglaskom na njegove deformacije u stvarnosti i na numeričkoj simulaciji.

Prvo slijedi jedan kratki uvod u povijest nehrđajućih čelika, a zatim se čitatelj upoznaje s njihovom podjelom po mikrostrukturi, gdje se naglasak stavlja na njihovu primjenu, svojstva i zavarljivost. Također, obrađen je i postupak zavarivanja MIG/MAG gdje se čitatelj susreće s potrebnim elementarnim stvarima. Zatim se obrađuju deformacije koje se javljaju tijekom zavarivanja, njihova podjela te neki od načina njihovog sprječavanja. U zadnjem dijelu rada obrađena je metoda konačnih elemenata koja je nužno potrebna za izvedbu numeričke simulacije u programskom paketu „*Visual Environment*.“

Eksperimentalni dio rada sastoji se od dva dijela: stvarno (realno) i simulirano zavarivanje. Stvarno zavarivanje provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje gdje se zavarivala složena konstrukcija od austenitnog čelika. Sav postupak od pripreme spoja, opreme, dodatnog materijala, postepeno je objašnjen. Simulirano zavarivanje provedeno je u programskom paketu *Visual Environment*. Svi koraci numeričke simulacije su detaljno objašnjeni. U zadnjem dijelu eksperimentalnog rada, obrazloženi su dobiveni rezultati.

Ključne riječi: Nehrđajući čelik, numeričke simulacije, deformacije, MIG zavarivanje

SUMMARY

In the masterwork, stainless steel welding was studied in detail, with special emphasis on its deformation in reality and numerical simulation.

First, there is an introduction to the history of stainless steel, and then the reader gets acquainted with their microstructural division, where the emphasis is placed on their application, properties, and weldability. Also, the MIG/MAG procedure of welding was processed, where the reader acquainted the necessary elementary things. Afterward, there is processing of deformation, which will occur during the welding, their divisions and some of their ways of preventing. The final part is processed the finite element method, which is indispensable for performing numerical simulation in the „*Visual Environment*“ program package.

The experimental part consists of two parts: real welding and simulation welding. Actual welding was processed at the Welding Laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, where a complex austenitic steel structure was welded. All the process of preparing the compound, the equipment, the additional material has been explained in detail. Simulated welding was processed in the Visual Environment program package. All steps of numerical simulation are explained in detail. In the last part of the experimental work, the results obtained are commented.

Keywords: Stainless steel, numerical simulations, deformations, MIG welding

1. UVOD

Zavarivanje kao tehnologija je vrlo složen proces pri kojem se često pojavljuju promjene u materijalu zbog toga što se prilikom tehnologije zavarivanja unosi toplina. Unosom topline materijal se zagrijava te kasnije hladi. Time dolazi do promjene mikrostrukture materijala u zavarenom spoju i zoni utjecaja topline. Promjena mikrostrukture direktno utječe na promjenu svojstava pa materijal u tom području ima drugačija svojstva, najčešće lošija, u odnosu na osnovni materijal. Različitim aplikacijama za simulaciju zavarivanja pokušava se simulirati proces zavarivanja, tj. promjene koje nastaju u materijalu prilikom i nakon izvođenja samog procesa te promjenom parametara doći do optimalnog rješenja. Takav pristup smanjuje troškove, ali s uzimanjem rješenja, kao konačnim, treba biti oprezan. Softver ne uzima u obzir sve realne uvjete koji se mogu pojaviti te zbog toga, nakon provođenja simulacije, treba provesti eksperiment da se ispitaju dobivena rješenja.

Provođenje simulacije zavarivanja nije moguće bez metode konačnih elemenata. Za CAD modele dovoljno je definirati samo površine promatranog elementa što za softvere koji simuliraju proces zavarivanja nije dovoljno. Mora se kreirati model koji se sastoji od konačnog broja elemenata. Prilikom simulacije, diferencijalnim jednačbama ili varijacijskom formulom opisuje se stanje u pojedinom elementu i eventualne promjene. Takve jednačbe su vrlo komplicirane te predstavljaju opterećenje za računalni sustav. Zbog toga treba pažljivo odabrati veličinu konačnih elemenata da navedeno rješenje zadovolji, a da vrijeme simulacije bude prihvatljivo. Tako da je cilj je pronaći kompromis između tih dviju stavki.

U ovom radu obrađeno je zavarivanje visokolegiranih (nehrđajućih) čelika koji su vrlo skloni deformacijama tijekom zavarivanja. Eksperimentalni rad je napravljen u Laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a CAD model u programskom paketu *Visual Environment*. Je li moguće predvidjeti deformacija kroz program, može se vidjeti u ovom diplomskom radu.

2. POVIJEST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Danas se ne može točno definirati tko je „izumio“ nehrđajući čelik. Mogu se samo definirati ljudi koji su zaslužni, da danas imamo korozijski postojan čelik kao tako svestran materijal. Revolucija počinje od Pierre Berthier-a (Francuska) 1821. god. i Stoddard-a i Farraday-a (Engleska) oko 1822. god. Ovi znanstvenici su istaknuli da su željezo - krom legure otpornije na djelovanje određenih kiselina, ali ispitivanja su samo provedena na legurama s malim udjelom kroma. [1]

1871. god. Woods i Clark (Engleska) prepoznali su komercijalnu vrijednost nehrđajućih krom legura. Podnijeli su zahtjev za patent na „*Weather-Resistant Alloys*“ te naveli da za konstrukcije sa zahtjevom za maksimalnom otpornošću na koroziju, udjel kroma u leguri treba biti 30 % i volframa (W) 1,5 %, a za konstrukcije bez zahtjeva za maksimalnom otpornošću na koroziju maseni udio kroma do 5 % [1].

1905 god. profesor Leon Guillet (Francuska) objavljuje prvu knjigu o nehrđajućem čeliku jednostavno nazvanu „*Stainless Steel*“. 1908. god. tvornica „*Krupp Iron Works*“ u Njemačkoj eksperimentira s dodatkom nikla (Ni). 1911. god. važnost minimalnog masenog udjela kroma u leguri je otkrio P. Monnartz (Njemačka). Otkrio je povezanost između kroma i otpornosti prema koroziji, navodeći da je značajan poticaj u otpornosti prema koroziji, kada legura ima najmanje 12 % Cr [1].

Ipak, Harry Brearly (Engleska) se vodi kao izumitelj „*rustless steel*“ (čelik bez hrđe) ili kako će se kasnije nazvati „*stainless steel*“ (nehrđajući čelik). Istražujući nove vrste čelika koji bi bolje mogli odoljeti eroziji (ne koroziji), počeo je ispitivati utjecaj kroma na čelik, koji je poznat po tome što podiže točku tališta, u odnosu na standardni ugljični čelik. Rezultat istraživanja je bila krom legura mnogo više korozijski postojana nego legure do sada. 13. kolovoza 1913. godine proizveo je, po njegovim tvrdnjama, prvi nehrđajući čelik sa 0,24 % C i 12,8 % Cr [3,4,6].

1911. – 1914. god. potaknuti uspjesima Europljana i znanstvenici u USA-a se uključuju u istraživanje. Becket i Dantsizen rade na feritnom nehrđajućem čeliku kemijskog sastava 14 - 16 % Cr i 0,07 - 0,15 % C [3,4,6].

Dr. W. H. Hatfield nastavlja rad H. Brearly-ja te 1924. god. nastaje nehrđajući čelik nazvan „18/8“, koji se i danas najviše koristi, s raznim dodacima. Ova legura osim dodatka kroma ima

i dodatak nikla (Ni) u svom kemijskom sastavu, odnosno 18 % Cr i 8 % Ni. Poslije je patentiran i „18/8“ nehrđajući čelik s dodatkom titana (Ti), poznat kao „321“ (po ASTM/AISI) [1,2].

3. NEHRĐAJUĆI ČELIK

Nehrđajući čelik ili korozijski postojani čelik je slitina željeza i najmanje 12 % kroma (moderni nehrđajući čelici sadrže i do 30 % kroma), za razliku od običnog čelika koji brzo oksidira na zraku (oksid je crvene boje) ako nije na neki način zaštićen od korozije. Osim legiranja s najmanje 10,5 % kroma, da bi čelik bio korozijski postojan (pasivan), mora biti ispunjen još jedan uvjet, a to je postojanje homogene monofazne feritne, austenitne ili martenzitne mikrostrukture, radi izbjegavanja opasnosti od nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase [3,4,6].

Pored kroma postojanost prema koroziji povećava se dodatkom nikla. Kombinacijom legiranja kromom i niklom razvijeni su čelici tipa „18/8“ (18 % Cr i 8% Ni), s austenitnom mikrostrukturom koji su otporni na djelovanje kiselina. Legiranje molibdenom omogućava lakše pasiviziranje te poboljšava korozijsku postojanost i otpornost na jamičastu koroziju Cr - Ni čelika. Legiranjem jakim karbidotvorcima (npr. titanij, niobij) omogućava se izbjegavanje pojave interkristalne korozije. Općenito vrijedi da skupina korozijski postojanih čelika mora sadržavati [3,4,6]:

- feritotvorci: krom, silicij, aluminijski, molibden, niobij, titanij, vanadij
- austenitotvorci: nikal, mangan, bakar, kobalt, dušik.

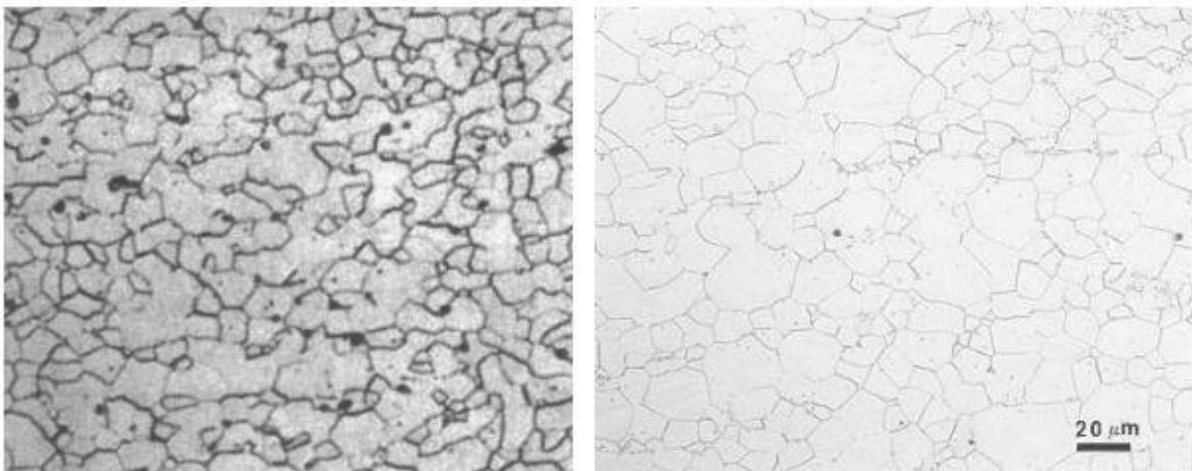
Korozijski postojani čelici dijele se prema nastaloj mikrostrukтури na:

- feritni nehrđajući čelici
- austenitni nehrđajući čelici
- austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici
- martenzitni nehrđajući čelici
- mekomartenzitni nehrđajući čelici.

3.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 12 – 18 % kroma i manje od 0,1 % ugljika te imaju feritnu mikrostrukturu bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja kristalnog zrna. Usitnjenje zrna moglo bi se postići u nekim slučajevima pomoću hladne deformacije (stupanj deformacije 30 – 50 %) te rekristalizacijskim žarenjem (npr. 615 °C/15 minuta; hlađenje na zraku ili vodi) [3,4,7].

Feromagnetični su i zadržavaju feritnu mikrostrukturu pri gotovo svim temperaturama što znači da ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu. Takav ferit se naziva δ - ferit (prostorno centrirana kubna rešetka). Na sljedećoj slici 1. je prikazana mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [3,4,7].



Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [5]

Feritni nehrđajući čelici su visoko korozijski otporni na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevih nitrata te smjese dušične, fosforne i solne kiseline. Nasuprot tome, nisu otporni na djelovanje rastaljenih metala (aluminij, antimon, olovo), amonijevog bifluorida, barijevog klorida, broma, octene kiseline i dr. [3,4,7].

Ostala svojstva feritnih nehrđajućih čelika su [3,4,7]:

- relativno mekani
- magnetični
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900 °C (ubrzano iznad 1150 °C)
- skloni pojavi krhkosti pri duljoj izloženosti temperaturi (520 °C)
- slaba deformabilnost

- dobra obradljivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih)
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama (HNO_3)
- loša postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda)
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na rupičastu koroziju
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika
- skloni lomu pri niskim temperaturama.

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka može se postići povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika, te legiranjem s molibdenom i niklom (eventualno titanom i niobijem). Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije (npr. indukcijska vakuumska peć, elektronski mlaz i sl.) [3,4,7].

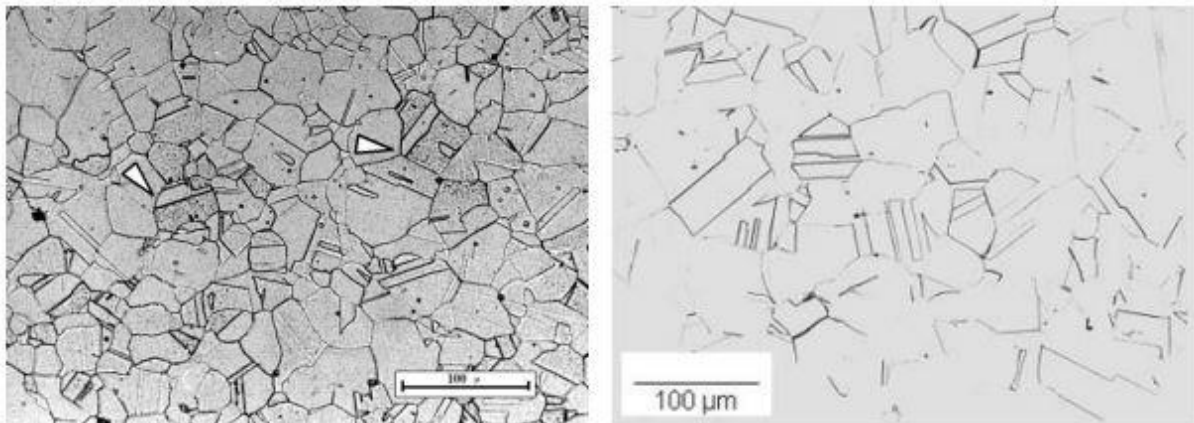
Neki primjeri feritnih nehrđajućih čelika [3,4,7]:

- X6 Cr 17, vlačne čvrstoće 450 - 600 MPa, granice razvlačenja 270 MPa, istezljivosti do 20 %, primjene kao korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna, te u petrokemijskoj industriji
- X6 CrMo 17 (1,1 % molibdena), vlačne čvrstoće 450 - 600 MPa, granice razvlačenja 270 MPa, istezljivosti do 20 %, primjene kao posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, ručke na vratima, okvire ogledala na automobilima
- X8 CrNb 17, vlačne čvrstoće 450 - 600 MPa, granice razvlačenja 270 MPa, istezljivosti do 20 %, primjene kao dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove)
- X12 CrMoS 17, vlačne čvrstoće 700 – 850 MPa, granice razvlačenja 450 MPa, istezljivosti do 12 %, primjenjuje se u obradi odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

3.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02 - 0,15 % ugljika, 15 – 20 % kroma, 7 – 20 % nikla, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titanija, niobija, tantala, dušika. Svi dodaci, osim dušika, dovode do pojave ferita u mikrostrukturi. Glavna prednost ove skupine čelika je otpornost na interkristalnu koroziju, a glavni nedostatak austenitnih čelika predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika [4,7].

Minimalan sadržaj delta ferita u austenitnim nehrđajućim čelicima je nužan radi osiguravanja otpornosti prema pojavi toplih pukotina. Pritom, gornja dopuštena granica delta ferita iznosi ~10 %, jer bi kod višeg udjela delta ferita znatno porasla sklonost nastanku sekundarnih faza (npr. σ -faza) pri povišenim temperaturama. Na slici 2. je prikazana mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [4,7].



Slika 2. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [5]

Glavna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su [4,7]:

- nemaju mogućnosti usitnjavanja zrna
- nemagnetični su
- javljaju se veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika
- odlične plastičnosti
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600 °C
- visoki udarni rad loma, oksidacijska i korozijska otpornost
- povoljan odnos čvrstoća/masa
- dobra svojstva pri niskim temperaturama (teorijski primjenjivi od -273 °C)
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature

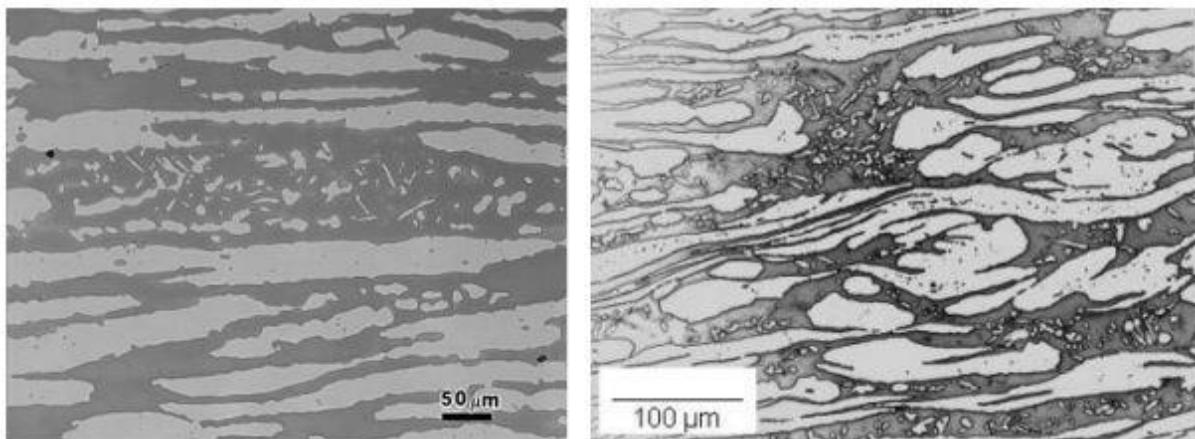
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost.

Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika [4,7]:

- X5 CrNiMo 18 10, vlačne čvrstoće 700 N/mm², granice razvlačenja 205 MPa, istezljivosti do 45 %, tvrdoća 180 HB, primjene kao standardni tip čelik za industriju celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva, pivovare
- X12 CrNi 18 8, vlačne čvrstoće 700 MPa, granice razvlačenja 215 MPa, istezljivosti do 50 %, tvrdoća 180 HB, primjene kao standardni tip čelika za predmete u kućanstvu, aparate i uređaje u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama, ortopediji. Primjenjiv je do 300 °C.

3.3. Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno - feritnu mikrostrukturu s 40 – 60 % ferita. Čelik s 22 – 24 % kroma i 6 – 8 % nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan do ≈ 1000 °C sastojat će se od ferita i austenita. Ako su prisutni ostali legirajući elementi tada vrijedi da dodatak molibdena, silicija, titanija i niobija djeluje slično kao porast sadržaja kroma, a mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000 °C poraste udio ferita, a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22 % kroma i 8 % nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. Na slici 3. prikazana je mikrostruktura austenitno - feritnog nehrđajućeg čelika [3,6,7].



Slika 3. Mikrostruktura austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [5]

Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita, što je posebice važno tijekom zavarivanja (u zoni taljenja zavarenog spoja). Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti. Primjena

dupleks čelika pri povišenim temperaturama je moguća, ali zbog ograničenja primjene na maksimalno 250 - 350 °C primjena je znatno sužena [3,6,7].

Glavna svojstva austenitno – feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika su [3,6,7]:

- povećana otpornost prema napetosnoj koroziji (poseban nedostatak austenitnih čelika) i utjecaju klorida
- postojanost prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike
- čvrstoća je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika
- teže se stvaraju karbidi Cr₂₃C₆ (krom se otapa u feritu, a ugljik u austenitu)
- intermetalna sigma - faza može nastati u austenitu i feritu
- primjene na povišenim temperaturama je moguća do maksimalno 250 – 350 °C zbog pojave „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi (po istom principu kao i kod feritnih čelika)
- magnetični
- temperatura primjene je između –50 i +350 °C.

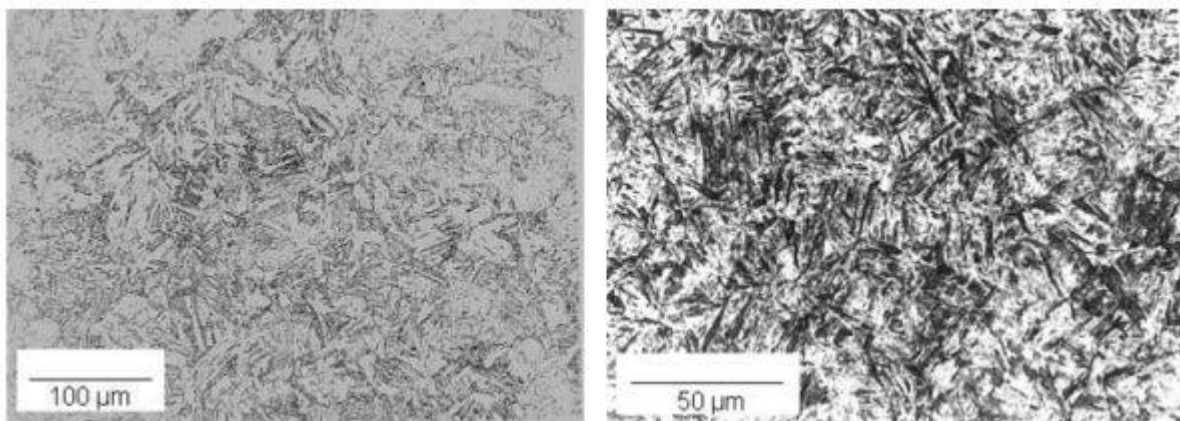
Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u industriji nafte i plina (crpke, desulfurizatori, destilatori, desalinizatori, ventili, cjevovodi, pumpe), petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori, izmjenjivači topline), kemijsko - procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, rad s otopinama HF u HNO₃, uređaji za H₂SO₄, sapnice), brodogradnji (osovine brodskog vijka, kormila, crpke, grijači, ležajevi), industriji papira (ventili, cijevi regeneracijskih peći, osovine mješača, pročišćavanje vode), prijevozu (cisterne) [3,6,7].

3.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici imaju povišeni udio ugljika (0,2 - 1,0 %), iznad 13 % kroma (do 18 %) te mogu sadržavati i do 1,3 % molibdena i 2,5 % nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ove skupine čelika postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Martenzitni nehrđajući čelici mogu se podijeliti u dvije podskupine:

- konstrukcijski (sadrže do $\approx 0,25$ % C, poboljšavaju se) i
- alatni čelici ($> 0,3$ % C, nakon kaljenja se nisko popuštaju).

Kod konstrukcijskih čelika posebna pažnja se usmjerava prema korozijskoj postojanosti, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu (martenzit + karbidi) čija je korozijska postojanost niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture. Na sljedećoj slici 4. je prikazana mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [6,7].



Slika 4. Mikrostruktura martenzitnih čelika nehrđajućih čelika [8]

Glavna svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika su [6,9]:

- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnim okolišima
- imaju lošu otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje
- mogu se kaliti, jer imaju transformaciju $\gamma \leftrightarrow \alpha$
- imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama
- obično se koriste u poboljšanom stanju.

Primjeri martenzitnih nehrđajućih čelika [6,9]:

- Č. 4172 (X20 Cr 13), posebno postojan na vodu i vodenu paru, na organske kiseline (octenu, mliječnu, voćnu), primjene kao kirurški instrumenti (klijesta, pincete), pribor za jelo (vilice, žlice), strojni dijelovi (osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, noževi)
- X90 CrMoV 18, istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju; primjene kao noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve, žileti [4,6].

3.5. Mekomartenzitni nehrđajući čelici

Ako se sadržaj ugljika smanji ispod 0,1 %, tada nastaju mekomartenzitni nehrđajući čelici, koji spadaju u visokočvrste čelike (granica razvlačenja do 1000 N/mm²). Sniženje mehaničkih svojstava (čvrstoća, granica razvlačenja) u tom slučaju nadomješta se legiranjem s kromom (13 – 18 %), niklom (1 – 6 %) i molibdenom (< 3 %). [4,6]

Mekomartenzitni čelici s 0,03 - 0,05% ugljika postižu zadovoljavajuća mehanička, fizikalna i kemijska svojstva austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri 450 - 700 °C. Preostale tri skupine čelika (PH-martenzitni, maraging i PH-austenitni) pored visokog udjela kroma, nikla i molibdena mogu sadržavati i bakar, niobij, aluminij, titanij, cirkonij koji međusobno ili s drugim elementima stvaraju intermetalne spojeve. Intermetalni spojevi nastaju u prethodno stvorenom martenzitu, pa se očvrstnuće takvih čelika pripisuje precipitacijskom djelovanju. Stoga se takvi čelici označavaju kao PH-čelici (engl. Precipitation Hardened) i pripadaju skupini ultračvrstih čelika. Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica (kod Peltonovih i Kaplanovih turbina), za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi (rotori, osovine, lopatice, klizne plohe) itd. [4,6].

4. ZAVARLJIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

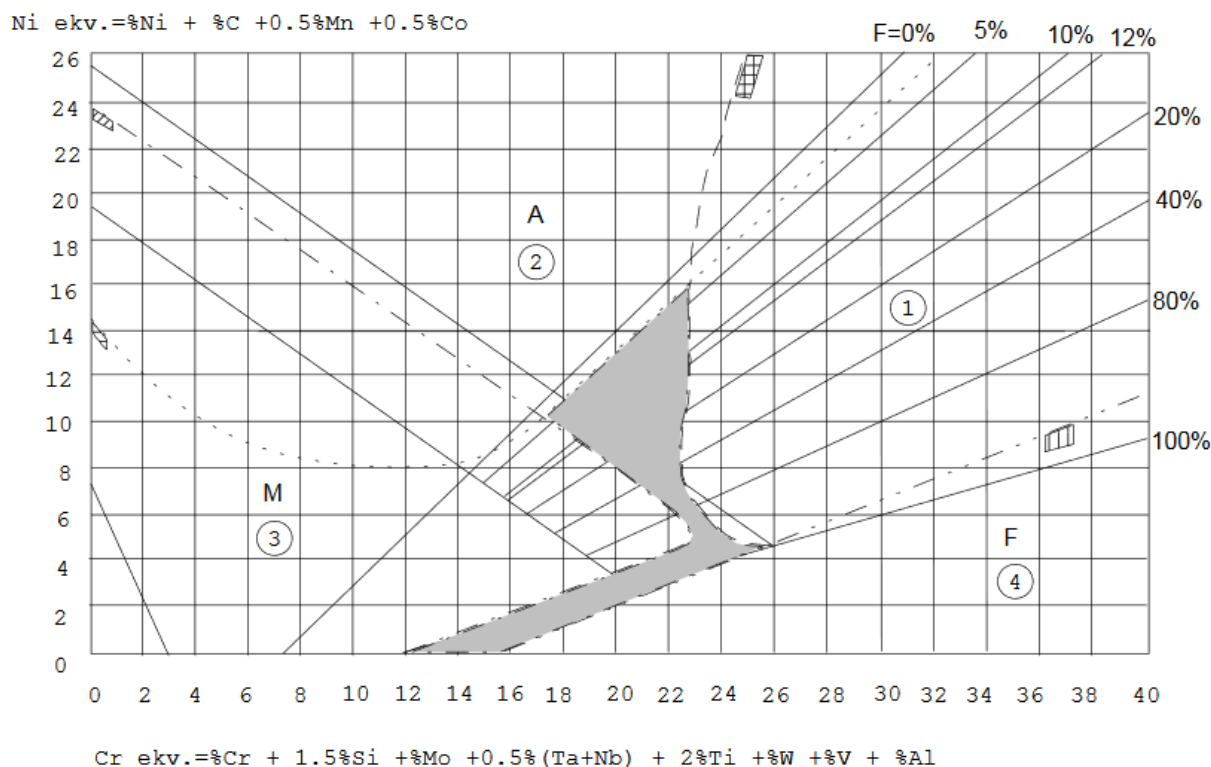
Konstruktivna i tehnološka čvrstoća i pouzdanost proizvoda iz raznovrsnih čelika može se osigurati samo ako u području zavarenog spoja nema krhkih međuslojeva. S obzirom na to, neophodno je kod izbora dodatnog materijala i određivanja stupnja pretaljivanja osnovnog materijala ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih zona spoja.

Svaki čelik pri očvršćivanju kristalizira u prostornoj strukturi, određenoj elementima koje sadrži, te se kod nehrđajućih čelika formiraju austenit, ferit i martenzit. Povezanost struktura i legirajućih elemenata definirana je Schaeffler-ovim dijagramom. [9]






Schaeffler-ov dijagram, prikazan na slici 5., koristi se za određivanje strukture visokolegiranih čelika koji se brzo hlade nakon zavarivanja. Dijagram prikazuje strukturu depozita, odnosno zone taljenja kod zavarivanja ili navarivanja raznorodnih čelika, kao što su npr. nelegirani ili niskolegirani čelici s visokolegiranim feritnim ili austenitnim čelikom. Depozit se hladi vrlo brzo, pa se ne koristi za osnovni materijal ili kod zavarivanja s vrlo sporim hlađenjem. Dijagram na apscisi ima ekvivalente kroma (Cr), a na ordinati ekvivalente nikla (Ni). Struktura depozita se određuje na temelju kemijskog sastava, koji se izražava u ekvivalentima nikla i kroma, te se sastav strukture depozita određuje u područjima [10,11]:

- austenita (A)
- martenzita (M)
- ferita (F)
- kombinacije (A+F; A+M; A+M+F; F+M).

Dijagram je razvio Schaeffler 1949. godine, a kasnije su ga dopunili DeLong i M.C.T. Bystram. DeLong je modificirao ekvivalent Ni, time što je u formulu unio utjecaj dušika (N) i mjereći sadržaj delta ferita, feritnim brojem F_N [10,11].



Slika 5. Schafferov dijagram [10]

-  područje povećane krhkosti poslije toplinske obrade na 500 - 900 °C
-  područje povećane sklonosti toplim pukotina
-  područje povećane sklonosti hladnim pukotinama u martenzitu
-  ukрупnjavanje zrna iznad 1100 °C. Mala radnja loma na sobnoj temperaturi
-  područje dobre zavarljivosti.

4.1. Specifičnosti zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika

Specifičnosti zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika:

- ograničena zavarljivost zbog pogrubljenje strukture ZUT-a i metala zavara
- krhkost.

Da bih se spriječilo povećanje zrna, zavarivanje se treba izvoditi na takav način da osnovni materijal, koji se nalazi neposredno uz zavar, u što kraće vrijeme provede na temperaturi iznad 1150 °C. To se postiže izborom postupka zavarivanja koji će imati manji unos topline, a time i brzo hlađenje [10,11,12].

Kao dodatni materijal za zavarivanje feritnih čelika koriste se [13]:

- istorodni ili
- austenitni dodatni materijal.

Predgrijavanje na oko 200 °C se može koristiti pri zavarivanju feritnih čelika s visokim sadržajem Cr i relativno visokim sadržajem C (0,25 %), a zbog sklonosti hladnim pukotinama. U ostalim slučajevima predgrijavanje se ne primjenjuje. Odžarivanje na temperaturi 850 – 950 °C i nakon toga brzo hlađenje, povećava se istezljivost prelazne zone i poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju [11,12,13].

4.2. Specifičnosti zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika

Specifičnosti zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika [13]:

- dobro zavarljivi (uz iznimku čelika koji sadrže sumpor ili selen - čelici za strojnu obradu)
- tople pukotine
- ne predgrijavati.

Zavarivanje je potrebno u što hladnijem stanju (malim unošenjem topline), što se postiže sljedećim mjerama [13]:

1. ne predgrijavati
2. temperatura između prolaza moraju biti što niže, npr. maks. 100 °C
3. unos topline treba biti što niži (npr. kod REL zavarivanja duljina izvlačenja elektrode mora biti velika, širina zavara $b \leq 2,5 \times$ promjer elektrode).

Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida na granicama zrna u temperaturnom rasponu od 425 - 850 °C (najviše na oko 650 °C) što dovodi do smanjenja udarnog rada loma i istezljivosti, a ako je prisutan agresivni medij i do pojava interkristalne korozije [11,12,13].

Stoga se nakon zavarivanja ovi čelici „gase“ toplinskom obradom na 1050 - 1100 °C kako bi se karbidi rastvorili, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850 - 450 °C se zadržava struktura austenita bez izlučenog Cr na granicama zrna vezanog u Cr - karbid. Za poboljšanje hlađenja ponekad se preporučuje hlađenje vodom [11,12,13].

Visoki koeficijent toplinske istezljivosti te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću deformacijama kao posljedicama zavarivanja.

Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara, što se s jedne strane javljaju kao posljedica nečistoća u materijalu, a i uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim napreznjima [11,12,13].

4.3. Specifičnosti zavarivanja austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika

Specifičnosti zavarivanja austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [13]:

- otporni na tople pukotine
- izvrsna žilavost i duktilnost.

Za zadržavanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje čelika dupleks, a koji su „prelegirani“ s nekoliko postotaka nikla u odnosu na dodatni materijal. Pouzdano je utvrđen pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture, ako se u zaštitni plin dodaje dušik [11,12,13].

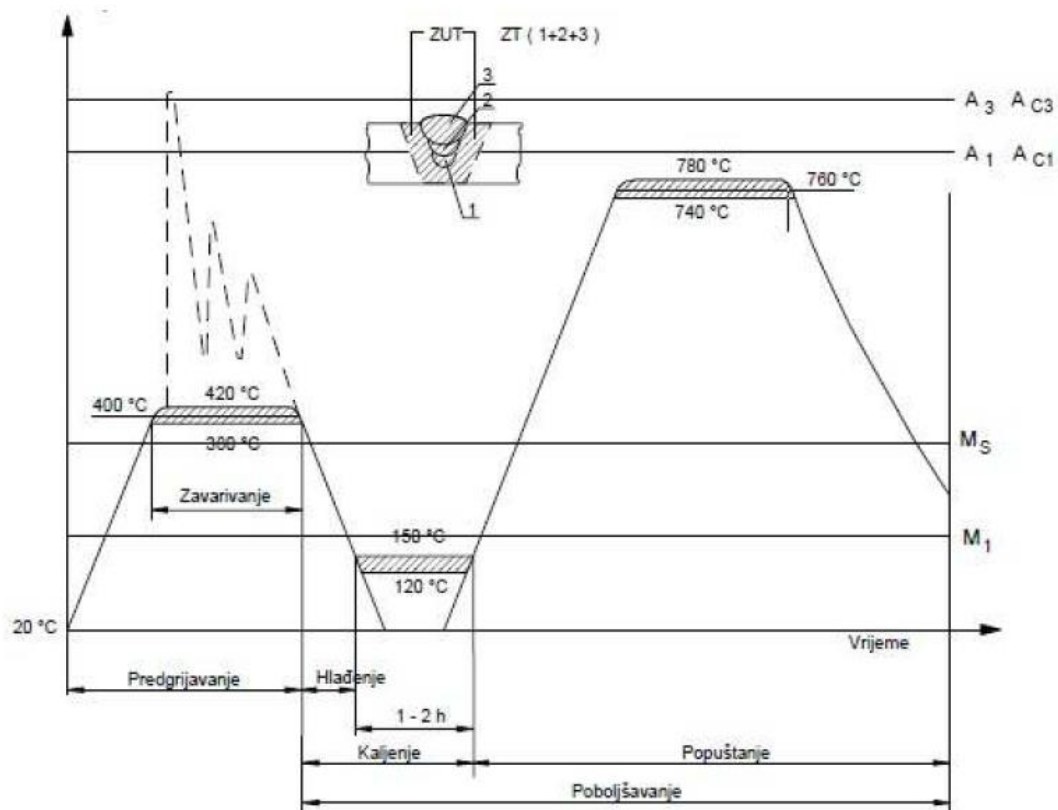
Feritizacija koja je posljedica zavarivanja, u svakom slučaju djeluje štetno, jer povećani udjel feritne strukture (i do 80 i više posto) neminovno dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom pojasu i do smanjenja korozijske postojanosti. Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja od čelika dupleks. Zavarivanje je nužno izvoditi kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline, pa je stoga izuzetno važno imati ispravne parametre zavarivanja [11,12,13].

4.4. Specifičnosti zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika

Specifičnosti zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [13]:

- zavarivanje ovih legura zahtjeva toplinske postupke prije (predgrijavanje) i poslije postupka zavarivanja (popuštanje)
- pojava hladnih pukotina.

Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih Cr čelika vide se na sljedećoj slici 6. [13]:



Slika 6. Toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih Cr čelika [13]

1. prije zavarivanja treba obvezno predgrijavati iznad M_s (martenzit start linije), tj. u području austenita npr. $M_s + 50 \text{ °C}$ (smanjivanje vjerojatnosti za pojavu hladnih pukotina)
2. zbog izuzetne sklonosti zakaljivanju (čak i pri mirnom hlađenju na zraku) kod ovih čelika je obvezno održavanje temperature između prolaza iznad M_s (martenzit start linije)

3. nakon zavarivanja, hlađenjem na mirnom zraku dolazi do zakaljivanja ovih čelika, pa se nakon zavarivanja vrši lagano hlađenje na temperaturu ispod M_f (martenzitna završna linija), npr. $M_f - 20 \text{ }^\circ\text{C}$, te zadržavanje na toj temperaturi 1 - 2h da bi se sav zaostali austenit transformirao u martenzit
4. popuštanjem tvrdoće na temperaturi ispod A_{c1} postiže se poboljšano stanje koje je stanje isporuke osnovnog materijala prije zavarivanja.

Za zavarivanje se koriste dodatni materijali [13]:

- isti ili slični osnovnom materijalu (da bi se dobila martenzitnu strukturu nakon zavarivanja) ili
- austenitni ili *Inconel* dodatni materijali sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja (kao rezultat spajanja s osnovnim materijalom) odabranog da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istezljivost zavara.

Primjenom austenitnog dodatnog materijala smanjuje se količina difuzijskog vodika, što rezultira pojavom hladnih pukotina.

4.5. Opća pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika

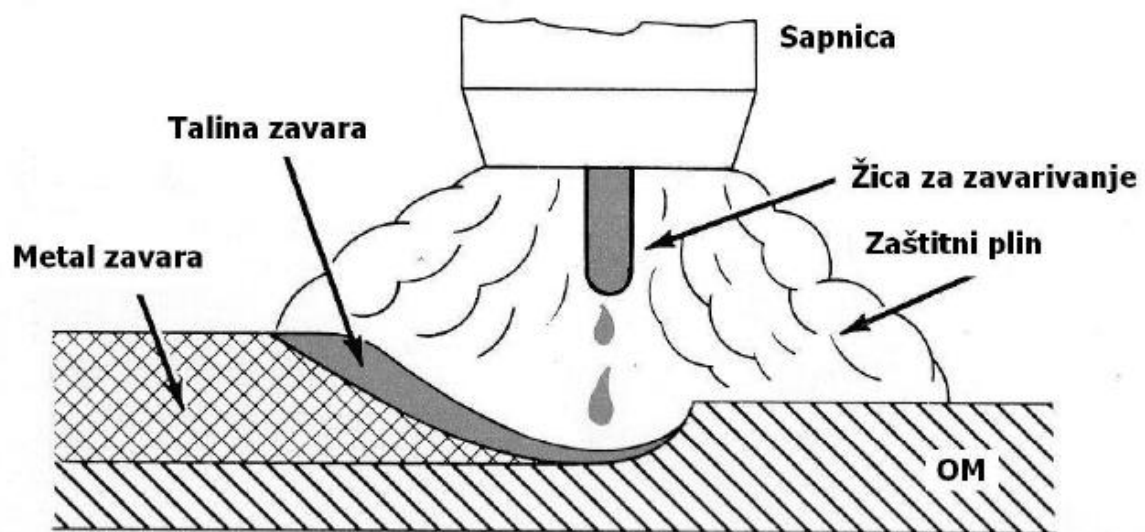
Opća pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika su sljedeća [13,14,15]:

- mjesto zavarivanog spoja mora biti čisto i glatko obrađeno (bez masnoća, vlage, premaza i drugih nečistoća)
- alati i brusne ploče ne smiju sadržavati karbide već se koriste aluminijski oksidi
- sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor
- pjeskarenje s čistim pijeskom
- feritni i martenzitni čelici se obavezno predgrijavaju
- odabir dodatnog materijala je vrlo važan.

5. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

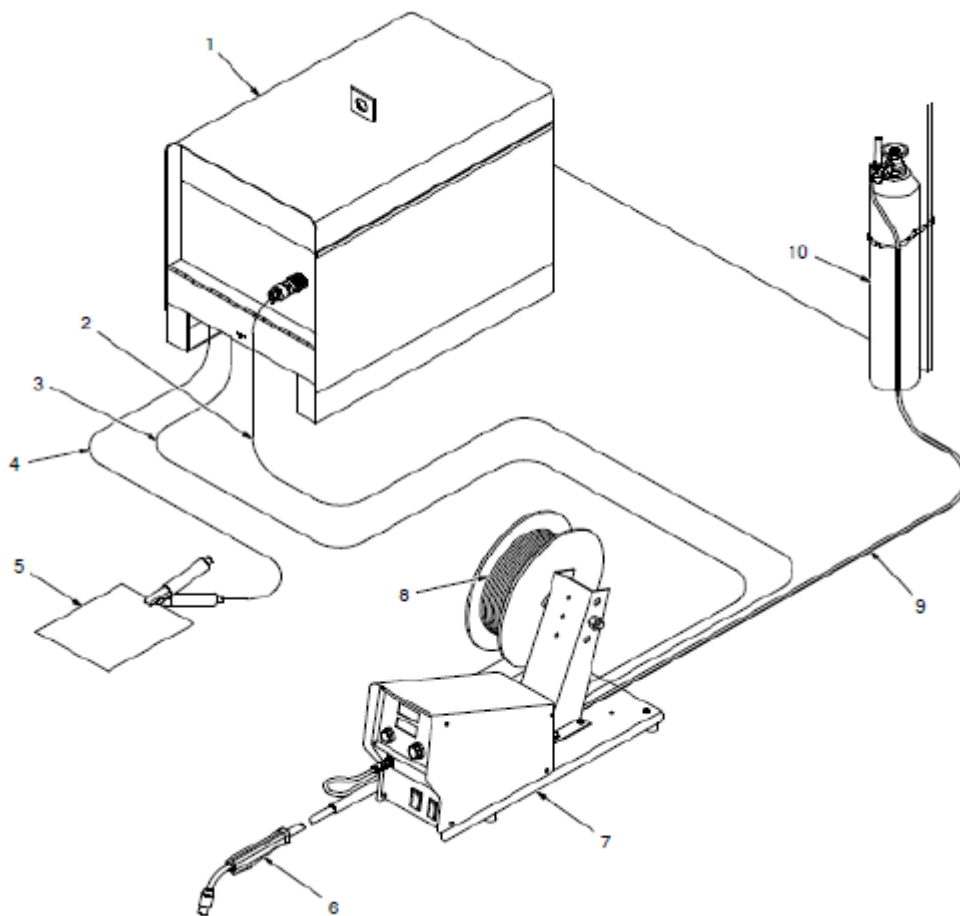
MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) ili GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem osnovnog metala s dodatnim metalom pri čemu se za zaštitu rastaljenog metala koriste inertni ili aktivni plinovi. Kod ovoga postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu koja je spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Taj proces odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju zaštitni plinovi, inertni (Ar ili He) ili aktivni (CO₂ ili mješavine) [16,17].

Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevi paketa i pištolja do mjesta zavarivanja gdje se uspostavlja električni luk. Sama žica ujedno je i elektroda i dodatni materijal. Samim njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski. Slika 7. prikazuje shematski prikaz postupka zavarivanja MIG/MAG [16,17].



Slika 7. Zavarivanje MIG/MAG [18]

Ako se samo zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u samom pištolju. Naziv za takav sustav je *push-pull*. Njegova primjena uobičajena je i na manjim udaljenostima ako se radi s mekanim dodatnim materijalom ili žicama manjih promjera od 1 mm. Plinovi se dovode na mjesto zavarivanja kroz sapnicu na pištolju. Slika 8. prikazuje shemu cijeloga uređaja za ovaj postupak zavarivanja [17].



Slika 8. Uređaj za zavarivanje MIG/MAG [19]

Opis:

1. izvor struje
2. kabel za napajanje kontrolnog uređaja
3. kabel uređaja za ulaganje
4. kabel za uzemljenje
5. radni komad
6. pištolj za zavarivanje
7. uređaj za konstantnu brzinu dobave žice
8. kolut za žicom (dodatnim materijalom)
9. crijeva za plin
10. boca sa zaštitnim plinom

Parametri kod MIG/MAG zavarivanja [20]:

- brzina zavarivanja v_z (mm/min)
- jakost struje I (A) – razmjerna s brzinom dobave žice v_z (m/min)
- napon električnog luka U (V) – razmjernan s visinom električnog luka
- slobodni kraj žice l_{SKZ} (mm)
- nagib pištolja α (°)
- induktivitet L (H)
- protok plina q (l/min) i vrsta plina.

5.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja

Kao i svaki postupak zavarivanja tako i postupak zavarivanja MIG/MAG ima svoje prednosti, ali i nedostatke.

Prednosti [16,20]:

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina, ali i vrsta
- zavarivanje u svim položajima
- visoka iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača

- manji utjecaj operatera (zavarivača) na proces zavarivanja
- manji unos topline u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima
- stvaranje manje količine zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno rasprskavanje
- nizak unos vodika u metal zavara (uglavnom manje od 5 ml/100 g metala zavara)
- manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- jednostavna automatizacija procesa
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici dužine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- mogućnost primjene i za lemljenje.

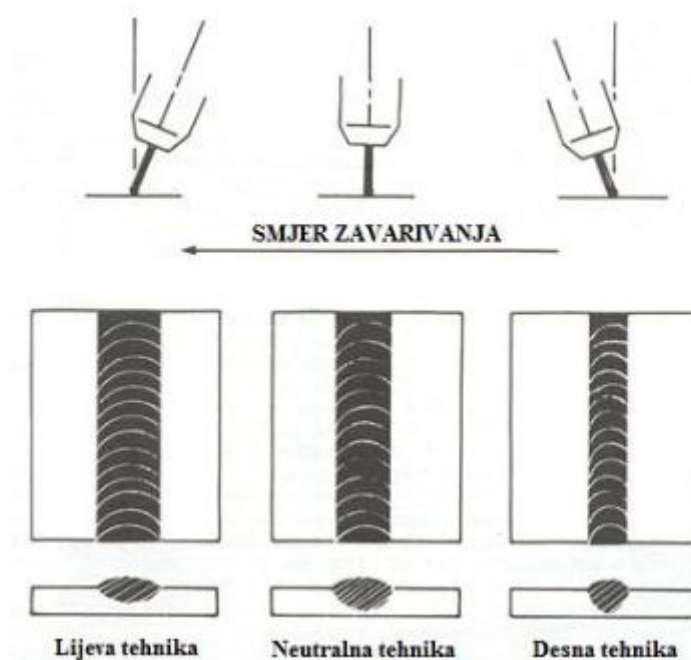
Nedostaci [16,20]:

- manji unos topline kod prijenosa metala kratkim spojevima - zavarivanje samo tanjih materijala
- veći unos topline kod prijenosa metala štrcajućim lukom - zavarivanje samo debljih materijala
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog CO₂)
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminija i aluminijskih legura
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- rasprskavanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, gubitak istog i potreba za dodatnim

- čišćenje
- opasnost od grešaka u početku zavarivanja
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje.

5.2. Tehnike rada

Ovisno o tehnici rada dobiva se drugačiji izgled zavarenog spoja, odnosno prije svega penetracija i širina zavarenog spoja. Kod MIG/MAG zavarivanja postoje tri tehnike rada, a to su: lijeva tehnika (engl. *Forehand*), desna tehnika (engl. *Backhand*) te neutralna tehnika (engl. *Perpendicular*). Na slici 9. prikazane su tehnike rada kod MIG/MAG zavarivanja te njihovi učinci na penetraciju i širinu zavara.



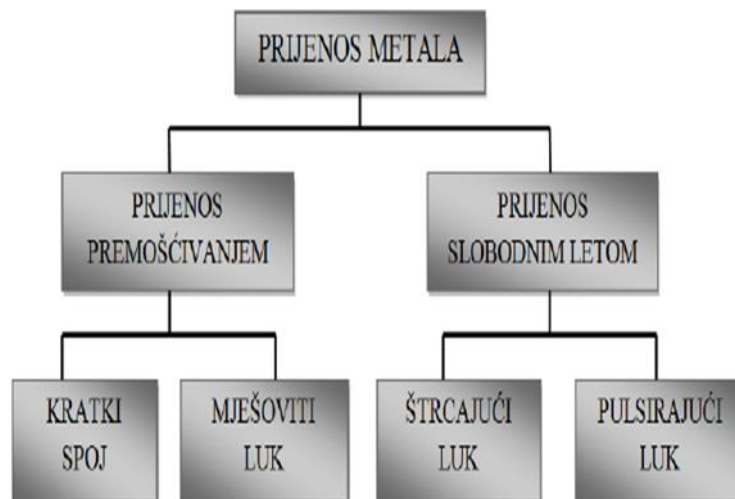
Slika 9. Tehnike rada kod MIG/MAG zavarivanja [21]

5.3. Način prijenosa metala

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja prijenos metala s elektrode (žice) u talinu na radnom komadu obavlja se diskretnim komadićima metala ili metalnim kapljicama. Prijenos metala može se realizirati tako da se rastaljene kapljice s vrha žice (elektroda ili dodatnog materijala) prenesu slobodnim letom kroz električni luk na osnovni materijal ili na način da metalne kapljice s vrha žice dođu u fizički kontakt s osnovnim materijalom, prilikom čega nastaje kratki spoj. Prijenos se može ostvariti i tako da se dio metala prenese na jedan način, a dio metala na drugi način. Same metode prijenosa metala ovise o više čimbenika [22,23]:

- jakosti struje
- naponu električnog luka
- vrsti dodatnog materijala
- promjeru žice (elektrode ili dodatnog materijala)
- vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine.

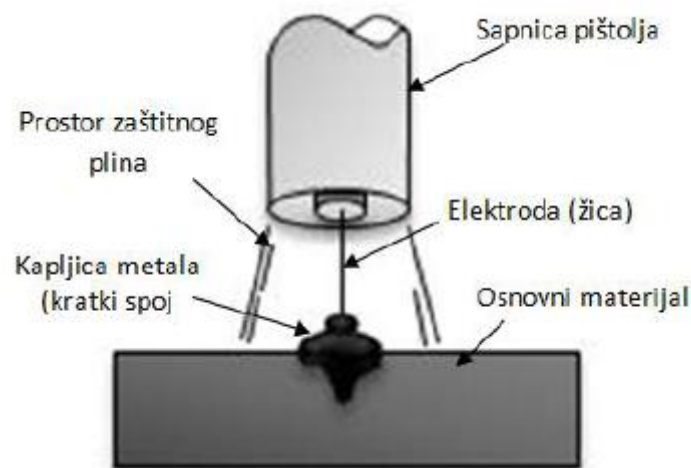
Prema karakteristikama luka razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa. Slika 10. prikazuje mehanizme prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 10. Shema mehanizama za prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja [23]

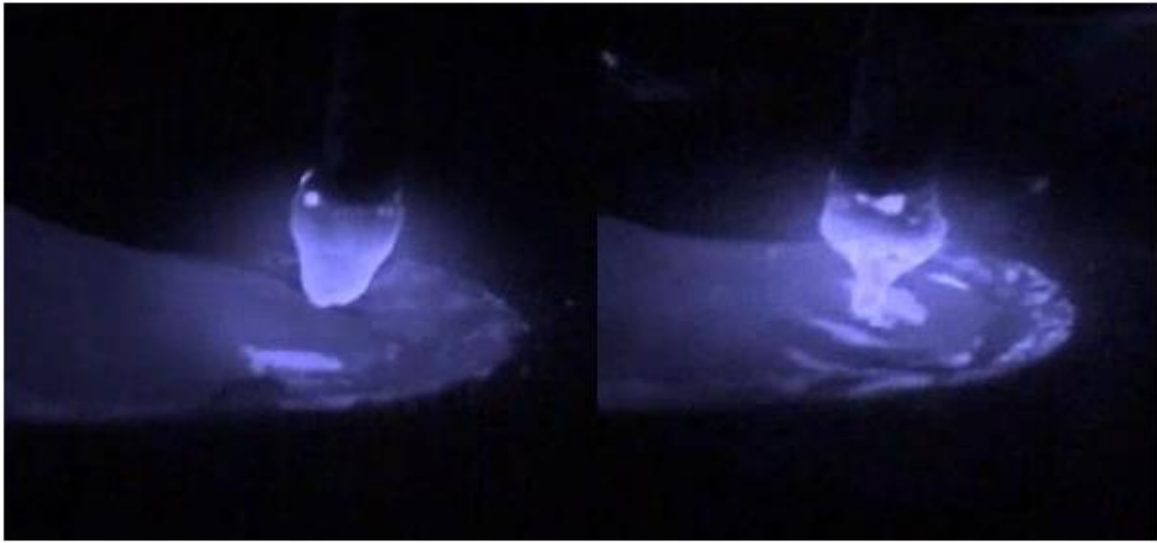
5.3.1. Prijenos metala kratkim spojem

Prijenos metala kratkim spojem postiže se uporabom najmanjih jačina struja i najmanjih promjera žica (elektroda ili dodatnog materijala). Ovaj prijenos metala je postupak kod kojeg se kontinuirano dovođena, puna ili praškom punjena žica, stvara metal zavara uslijed uspostave kontinuiranih kratkih spojeva. Slika 11. shematski prikazuje prijenos metala kratkim spojem. Proces se događa između dvadeset i dvjesto puta u sekundi [23,24].



Slika 11. Shema prijenosa metala kratkim spojem [23]

Glavne značajke ovoga postupka su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog materijala vrši pri kontaktu elektrode i osnovnog materijala, odnosno taline. Jedna kapljica metala se dijeli na dvije faze, odnosno na fazu električnog luka i fazu kratkog spoja. Do samog odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi gdje se vrh elektrode nalazi u kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje. Samim tim dolazi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na kraju elektrode, zbog djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline s vrška žice. Ta pojava se još naziva kao „*pinch effect*“. Slika 12 prikazuje realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem [20,23].

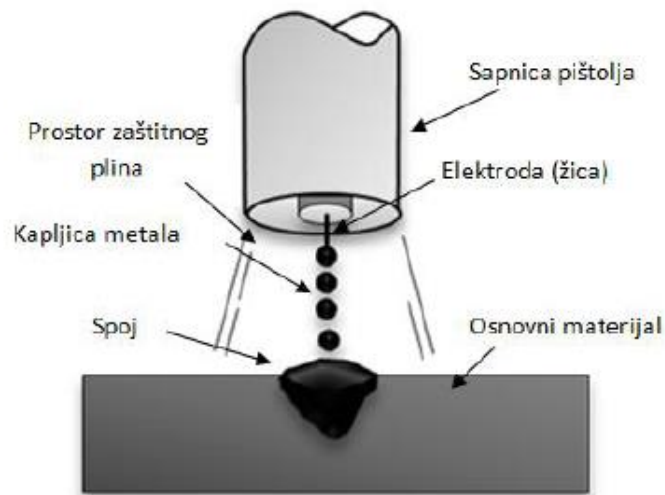


Slika 12. Realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem [25]

Kod ovog prijenosa metala dobivaju se zavari malog presjeka, koji se brzo hlade što je pogodno za spajanje tankih limova. Pogodan je za spajanje korijena zavara kod debljih komada, za spojeve kod kojih se zahtijeva što manje deformacije jer se unosi mala količina topline. Napon kod kojeg se koristi ovaj postupak je 13 - 21 V, dok je jakost struje između 50 - 170 A [20,23].

5.3.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

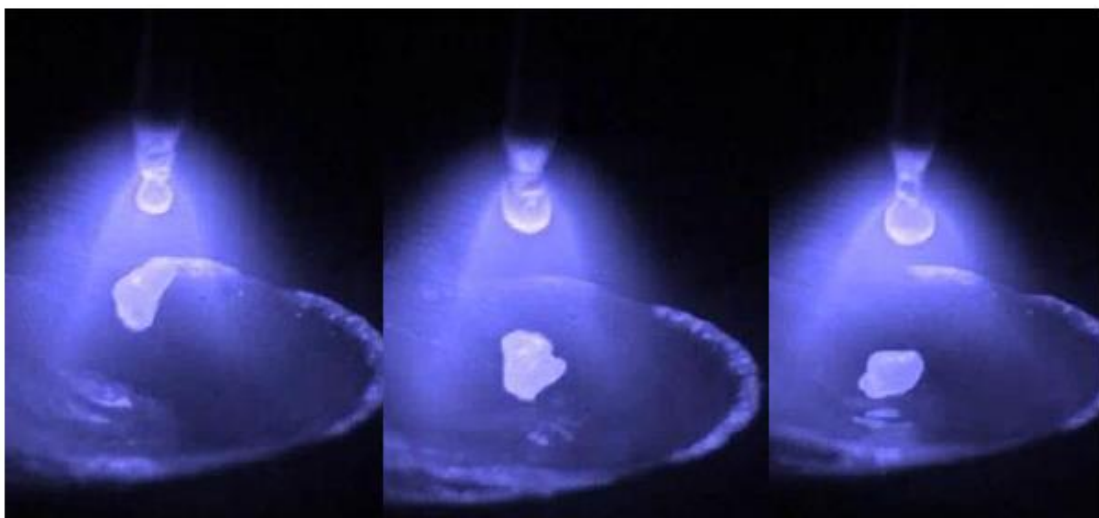
Prijenos metala ovim postupkom ostvaruje se uz jaku struju i velike napone električnog luka. Karakteristika ovoga načina prijenosa je da prijenos metala (rastaljene kapljice) s vrha elektrode ide slobodnim letom kroz atmosferu luka. Stvaraju se male kapi taline koje se gibaju aksijalno s obzirom na elektrodu, a sama elektroda nema ni u kojem trenutku fizički, direktni kontakt s osnovnim materijalom. Sile koje se javljaju u električnom luku otkidaju kapi te ih usmjeravaju prema radnom komadu. Slika 13. prikazuje shemu prijenosa metala ovim postupkom [23].



Slika 13. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [23]

Ovakav prijenos metala omogućuje veliku količinu energije koju je potrebno unijeti u sami proces. Samim tim će se povećati struja, koja će u konačnici dati veće zagrijavanje i povećanje „*pinch efekta*“ te će se smanjiti sile koje nepovoljno djeluju na odvajanje rastopljene kapljice. Sami promjer kapljice je manji od promjera žice (elektrode) kojom se zavaruje [23].

Jedan od glavnih uvjeta kod ovog postupka je da se moraju primjenjivati plinske mješavine kod kojih je maksimalna koncentracija aktivnih plinova 18 %. Često su u upotrebi i mješavine s malim postotkom kisika jer kisik utječe na dubinu penetracije. Kod kisika je penetracija uža i dublja, dok se kod upotrebe CO₂ dobivaju blaže i zaobljene penetracije. Slika 14 prikazuje realni prikaz metala štrcajućim lukom [23].

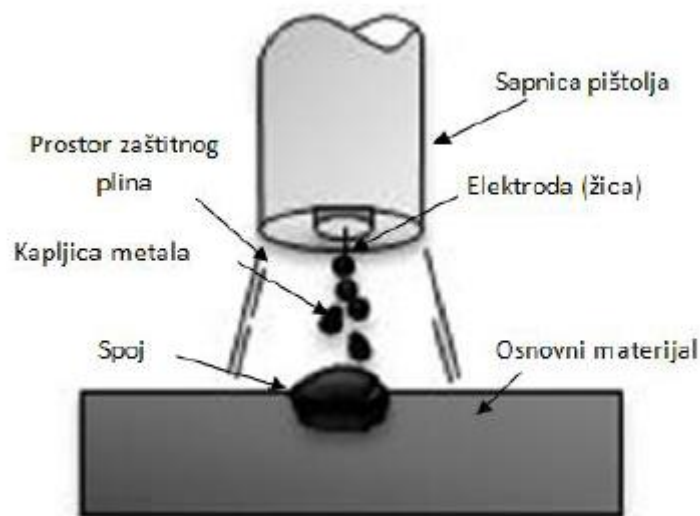


Slika 14. Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [25]

Postupak prijenosa metala štrcajućim lukom primjenjiv je na gotovo sve vrste materijala. Neki od njih: nehrđajući čelici, magnezij i legure na bazi magnezija, bakar, legure na bazi nikla, aluminij i legure na bazi aluminija. Moguće je primijeniti i žice (elektrode) koje su punjene praškom. Postupak prijenosa metala štrcajućim lukom koristi se kod zavarivanja debljih pozicija u horizontalnim položajima. Velika energija koja se unosi u proces zavarivanja daje veliku količinu rastaljenog materijala što je vrlo teško primijeniti u prisilnim položajima zavarivanja [23].

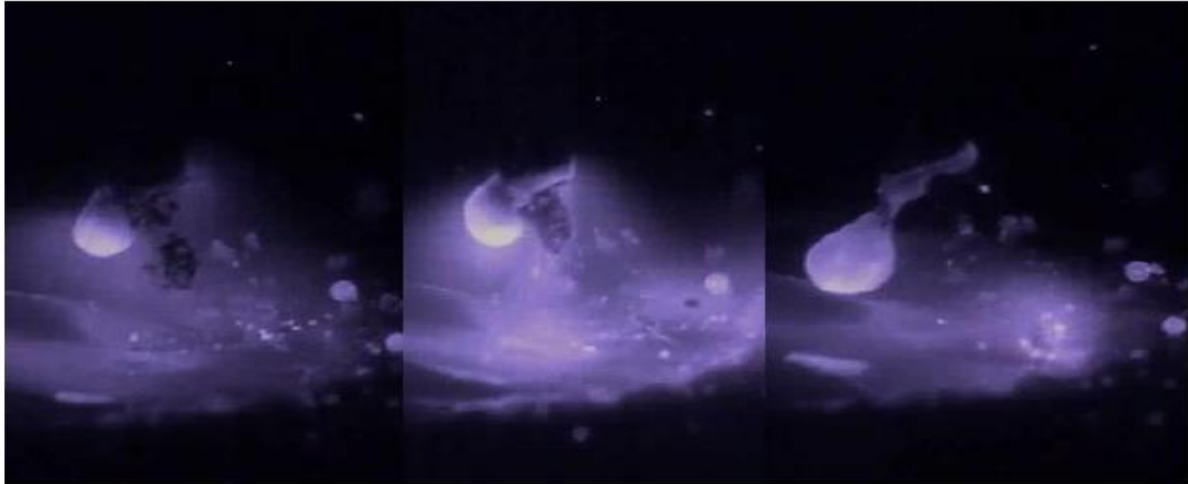
5.3.3. Prijenos metala mješovitim lukom

Kod ovoga prijenosa metala, prijenos se odvija tako što se stvaraju krupne kapljice metala na vrhu elektrode (žice) koja se pod djelovanjem sila, koje su najčešće gravitacijske, u električnom luku odvajaju i padaju u talinu. Javlja se prijenos kratkim spojem i štrcajućim lukom, a sama izmjena i redosljed mehanizma prijenosa je slučajna pojava. Slika 15. prikazuje shematski prijenos metala mješovitim spojem [23].



Slika 15. Shema prijenosa metala mješovitim spojem [24]

Glavni nedostatak ovoga prijenosa je njegova neregularnost samih pojedinih prijenosa (štrcajući luk i kratki spoj), koje se odlikuju većim razlikama u samim promjerima odvojenih kapljica koje na kraju definiraju geometriju zavarenog spoja. Prijenos kapljica nije aksijalan, a rasprskavanje je povećano. Slika 16. prikazuje realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [23].

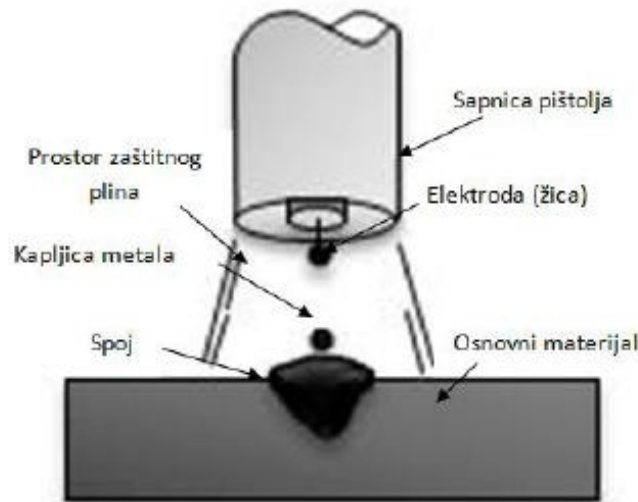


Slika 16. Realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [25]

Ovaj postupak prijenosa metala bio je zastupljen 60-tih i 70-tih godina prošloga stoljeća u izradi čeličnih konstrukcija, ali danas je u svim ozbiljnim industrijskim pogonima zamijenjen nekim od naprednih postupaka prijenosa metala [23,26].

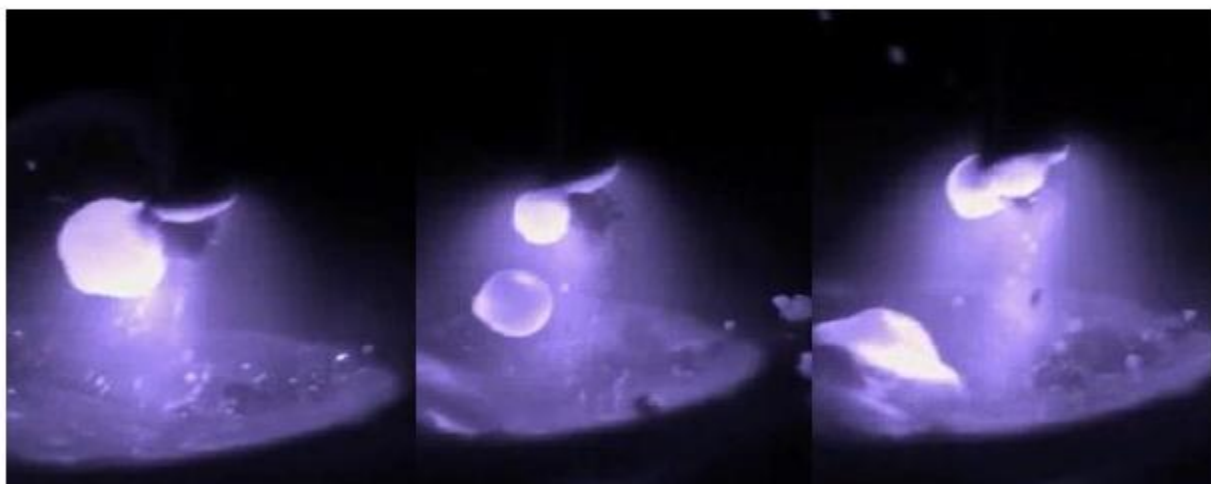
5.3.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom

Prijenos metala pulsirajućim lukom (impulsnim strujama) je oblik prijenosa metala štrcajućim lukom manjim vrijednostima struje. To je omogućeno tako što struja varira između neke minimalne vrijednosti (bazne ili osnovne struje) i maksimalne vrijednosti struje (vršne). Pri tome osnovna struja zavarivanja je minimalna vrijednost koja je potrebna za održavanje električnog luka, dok vršna, maksimalna struja ili struja impulsa je vrijednost koja omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja. Vršna struja omogućuje da se dodatni materijal (žica) rastali te da se osigura odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu. Slika 17. prikazuje shemu prijenosa metala pulsirajućim lukom. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa oni mogu biti sinusoidnog, trokutastog ili četvrtastog oblika [23,26].



Slika 17. Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom [23]

Sam način omogućuje prosječno manju struju nego što je to kod prijenosa metala štrcajućim lukom što se pozitivno odražava na toplinski unos u proces. Koristi se kod zavarivanja tanjih materijala, a primjenjuju se žice većeg promjera. Taj se proces razvio kako bi se eliminirali nedostaci koji se javljaju kod prijenosa metala mješovitim lukom. Postupak je moguće primijeniti u svim položajima, a i jednim promjerom žice (elektrode) moguće je zavariti širi raspon debljina materijala, jer se mogu namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih dijelova (limova). Slika 18. prikazuje realni prijenos metala pulsirajućim lukom. Postupak se prvotno koristio u brodogradnji (zavarivanje niskolegiranih čelika povišene čvrstoće) gdje je pokazao veću učinkovitost od praškom punjenih žica te niži udio otopljenog vodika u zavarenom spoju. Danas se koristi uz upotrebu plinskih mješavina s manjim udjelima aktivnih plinova (maksimalna koncentracija CO₂ je 18%) [23,26].



Slika 18. Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [25]

5.4. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se koriste u ovome postupku zavarivanja bitni su jer štite mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme prolaska kroz električni luk od djelovanja okolne atmosfere. Poznavanje utjecaja pojedinog zaštitnog plina je neophodna kako bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Plinovi utječu na održavanje električno - fizikalnih svojstava električnog luka, a time i na sam prijenos metala s elektrode na radni komad, metalurške procese u talini i tehnološke parametre. Izbor ispravnog zaštitnog plina za danu primjenu je bitan. Kriterij za izbor plina uključuje, ali nije ograničen na sljedeće parametre [24,26]:

- legirane žičane elektrode
- mehanička svojstva taložnog metala zavara
- uvjete materijala - prisutnost okoline, korozija itd.
- debljina materijala i izgled zavara
- način samog zavarivanja- prijenos metala
- položaj zavarivanja
- željeni profil penetracije - probijanja
- cijena samog plina.

Plinovi mogu biti inertni ili aktivni. Kada se primjenjuju inertni plinovi nema reakcije rastaljenog metala s plinom i oni se koriste više kod zavarivanja osjetljivih materijala, dok kod primjene aktivnih plinova u ovoj atmosferi dolazi do reakcije između plina i rastaljenog metala. Kod povećanja topline u električnom luku, zaštitni plinovi reagiraju na različite načine. Neki plinovi šire jezgru luka, dok drugi skupljaju, što pak opet ovisi o toplinskoj vodljivosti plina. Postoje tri osnovna svojstva kod razumijevanja svojstva zaštitnog plina [26]:

- ionizacija
- toplinska vodljivost
- kemijska reakcija plina i osnovnog materijala.

Inertni plinovi nemaju nikakav kemijski utjecaj na zavar dok kod primjene aktivnih plinova zahtjeva se posebna pažnja zbog pojave oksidacije. Sama ova pojava koja se javlja inače je karakteristična kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, a posebno je izražena kad je CO₂ kao zaštitni plin. [16].

Količina zaštitnog plina ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja te mjestu i uvjetima zavarivanja. Potrošnja plina znatno se povećava na otvorenom prostoru. Prosječne količine potrebnog plina u ovisnosti o promjeru žice prikazani su u tablici 1. Kao orijentacija, za praksu mogu poslužiti slijedeći podaci o potrošnji plina [18]:

- za male jačine struja zavarivanja (kratki luk), potrošnja do 12 l/min
- za srednje jačine struja zavarivanja, potrošnja do 15 l/min
- za velike jačine struja (štrcajući luk), potrošnja do 20 l/min.

Tablica 1. Potrošnja plina u ovisnosti na promjer žice [18]

Promjer žice (mm)	Potrošnja plina (l/min)
0.8	Od 6 do 8
1.0	Od 8 do 10
1.2	Od 10 do 12
1.6	Od 14 do 16

6. DEFORMACIJE U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA

Procesom zavarivanja u materijal se unose neželjena naprezanja, a ponekad se javljaju i deformacije. To se događa zbog unosa energije u materijal, taljenjem i solidifikacijom metala. U okruženju zavarenog spoja tijekom hlađenja zavara javljaju se vlačna zaostala naprezanja, posebice u longitudinalnom pravcu. Ta naprezanja utječu na dinamičku čvrstoću i žilavost, posebice ako postoje određena zarezna djelovanja ili nedostaci u području zavara. Također zaostala naprezanja i deformacije nisu jednaka kod svih materijala. Ključnu ulogu igra toplinska vodljivost materijala i faktor koeficijenta toplinskog rastezanja. Primjer može biti toplinska vodljivost legiranih čelika koja je manja te uslijed toga dolazi do veće koncentracije topline unutar samog zavara koja dovode do nepoželjnog naprezanja, odnosno većih deformacija samih konstrukcija. Primjenom različitih mehanizama moguće je smanjiti naprezanja, no i ne u potpunosti ukloniti. Tako da pravilnim izborom dodatnog materijala, parametrima, redoslijedom zavarivanja itd., možemo znatno utjecati na samu kvalitetu zavarene konstrukcije [27,28].

6.1. Podjela zaostalih naprezanja i deformacija

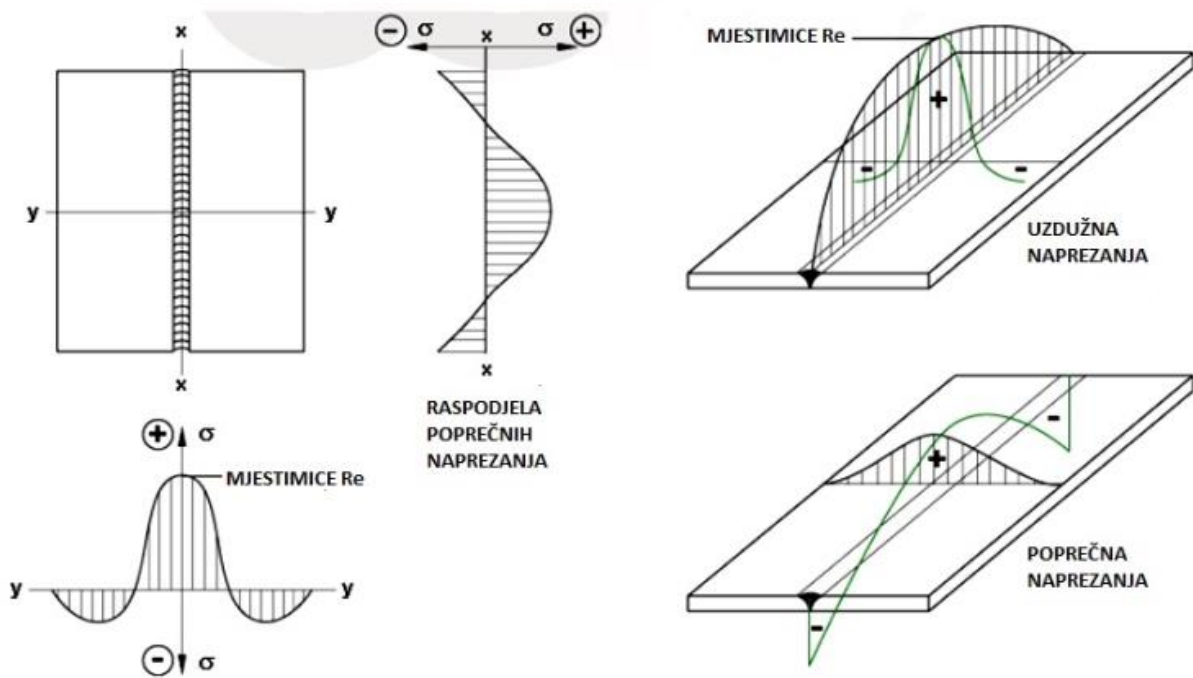
Naprezanje je unutarnja sila raspodijeljena po jedinici površine nekoga čvrstog tijela koja se javlja kao reakcija na djelovanje vanjskih sila ili promjenom temperature tijela. Kao posljedica unutarnjih sila na konstrukcijama se javljaju deformacije [29].

Odnos zaostalih napetosti i deformacija u materijalu ovisi o rasporedu skupljanja zavara (simetrični ili nesimetrično), debljini materijala, krutosti konstrukcije. Naime, ako su skupljanja raspoređena simetrično ili je materijal velike debljine ili je konstrukcija vrlo kruta, zaostala naprezanja će biti veća, a deformacije manje. U suprotnom slučaju (manje debljine, nesimetrično skupljanje metala) zaostala naprezanja će biti manja, ali će deformacije biti veće. Zaostala naprezanja se zapravo sastoje od dvije vrste naprezanja, a to su [30]:

Toplinska naprezanja - kod kojih u području zavarenog spoja dolazi do neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja na sobnu temperaturu te tako u tom području nastaju različita onemogućenja na rastezanje i stezanje, čije su posljedice na naposljetku toplinska naprezanja. Ona se mogu popustiti razrezivanjem.

Strukturna naprezanja - kod kojih se proces hlađenja odvija vremenski i mjestimice vrlo različito, a time su ujedno povezane i različite promjene strukture koje uzrokuju povećanje volumena, a kao posljedica nastaju strukturna naprezanja. Ona se u pravilu ne mogu popustiti razrezivanjem.

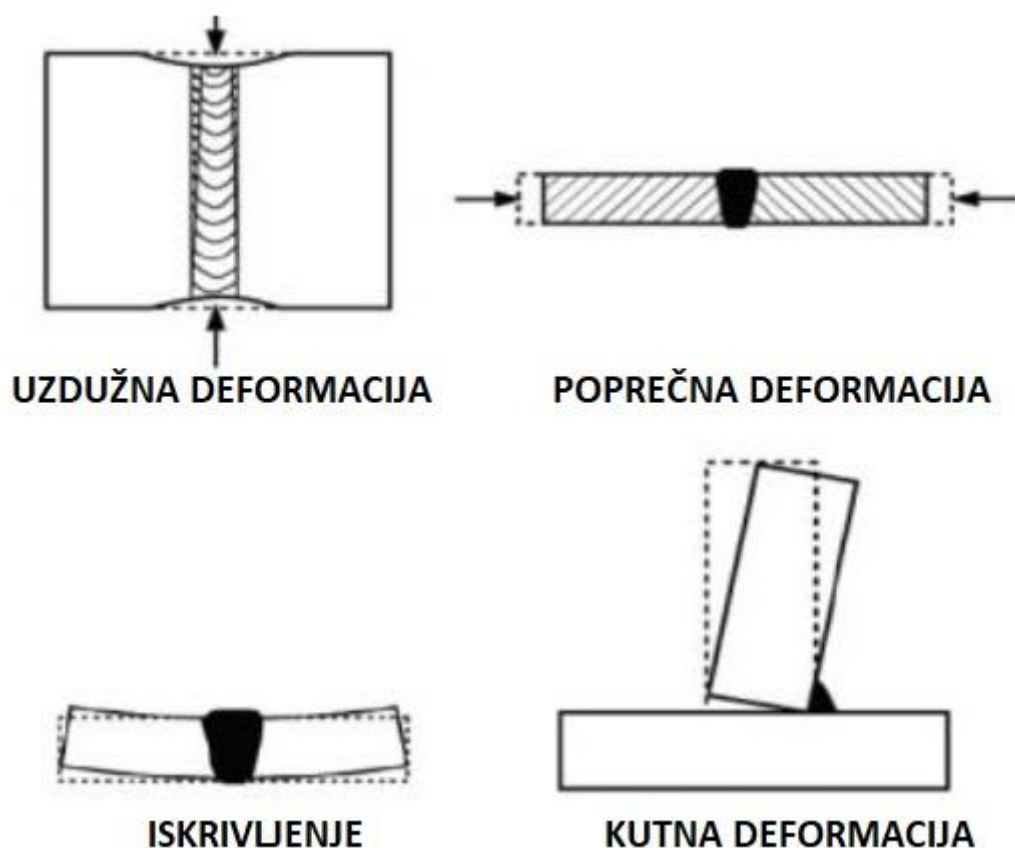
Na sljedećoj slici 19. je jasno definirana karakteristična raspodjela naprezanja kod poprečnih i uzdužnih zavara.



Slika 19. Raspodjela naprezanja kod poprečnih i uzdužnih zavora [30]

Deformacije predstavljaju opći pojam za odstupanja konstrukcijskog elementa od definiranog oblika nakon unošenja topline i hlađenja na sobnu temperaturu. Deformacije kod zavarivanja mogu se podijeliti u 4 vrste koje se mogu vidjeti na slici 20. [30]:

- uzdužna deformacija - skraćenje elementa u uzdužnom smjeru
- poprečna deformacija - skraćenje elementa poprečno na uzdužnu os
- iskrivljenje - uzdužna i poprečna deformacija
- kutna deformacija.



Slika 20. Vrste deformacija kod zavarivanja [30]

6.2. Načini smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija

Nije moguće u potpunosti otkloniti zaostala naprezanja, odnosno deformacije, no postoje različiti mehanizmi usmjereni na njihovo smanjenje koji se primjenjuju kako u fazi konstrukcije tako i tijekom zavarivanja. Načini koji se primjenjuju u svrhu smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija su prikazani na sljedećoj tablici 2. [13,31,32,33].

Tablica 2. Načini smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija [13,31,32,33]

Načini smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija	
Smanjena količina depozita	Korištenjem ravnog ili blago konveksnog zavora te pravilnom pripremom spoja.
Primjena intermitentnog zavarivanja	Prekidnim načinom zavarivanja možemo smanjiti količinu zavora za 75 %, a pritom se ne gubi odgovarajuća čvrstoća.

Korištenje manjeg broja prolaza	Preporučuje se manji broj prolaza s debljom elektrodom/žicom, nego veći broj prolaza s tanjom elektrodom/žicom.
Postavljanje i balansiranje zavara u blizini neutralne osi	Smanjenje deformacija tako da se silama stezanja smanji krak na kojem djeluju tako što se zavar izvodi u blizini neutralne osi.
Primjena povratnog (rakovog) koraka	Ako je smjer zavarivanja s lijeva na desno, svaki pojedini segment izvodima s desna na lijevo. Uspješna primjena do smanjenja širenja ploča.
Predviđanje sila stezanja i predpodešavanje konstrukcije	Mogućnost da deformacije koje se postižu tijekom zavarivanja, dovedu konstrukciju u željeni položaj.
Planiranje redoslijeda zavarivanja	Točan redoslijed zavarivanja omogućuju silama stezanja da se međusobno neutraliziraju.
Korištenje steznih naprava	Smanjuju pomake konstrukcija koje uzrokuju deformacije prilikom zavarivanja.
Skraćenje vremena zavarivanja	Smanjenjem vremena zavarivanja smanjujemo dovođenje stalnog zagrijavanja koji itekako utječe na deformacije.
Predgrijavanje	Radi smanjenja brzine hlađenja zavarenog spoja, čime se smanjuje opasnost nastajanja tvrdih martenzitnih mikrostruktura u zoni utjecaja topline (ZUT).
Čekićanje	Čekićanje zavara vrši se radi smanjenja poprečnih i uzdužnih deformacija i zaostalih naprezanja.
Ravnanje deformiranih zavarenih konstrukcija	Poslije zavarivanja, savijene elemente mogu se ravnati mehaničkim i toplinskim ravnanjem.
Popuštanje zaostalih naprezanja	Kako bi se smanjila sklonost krhkom lomu, poboljšala dinamička nosivost, poboljšala otpornost koroziji i stabilizacija dimenzija.

7. NUMERIČKE SIMULACIJE KOD ZAVARIVANJA

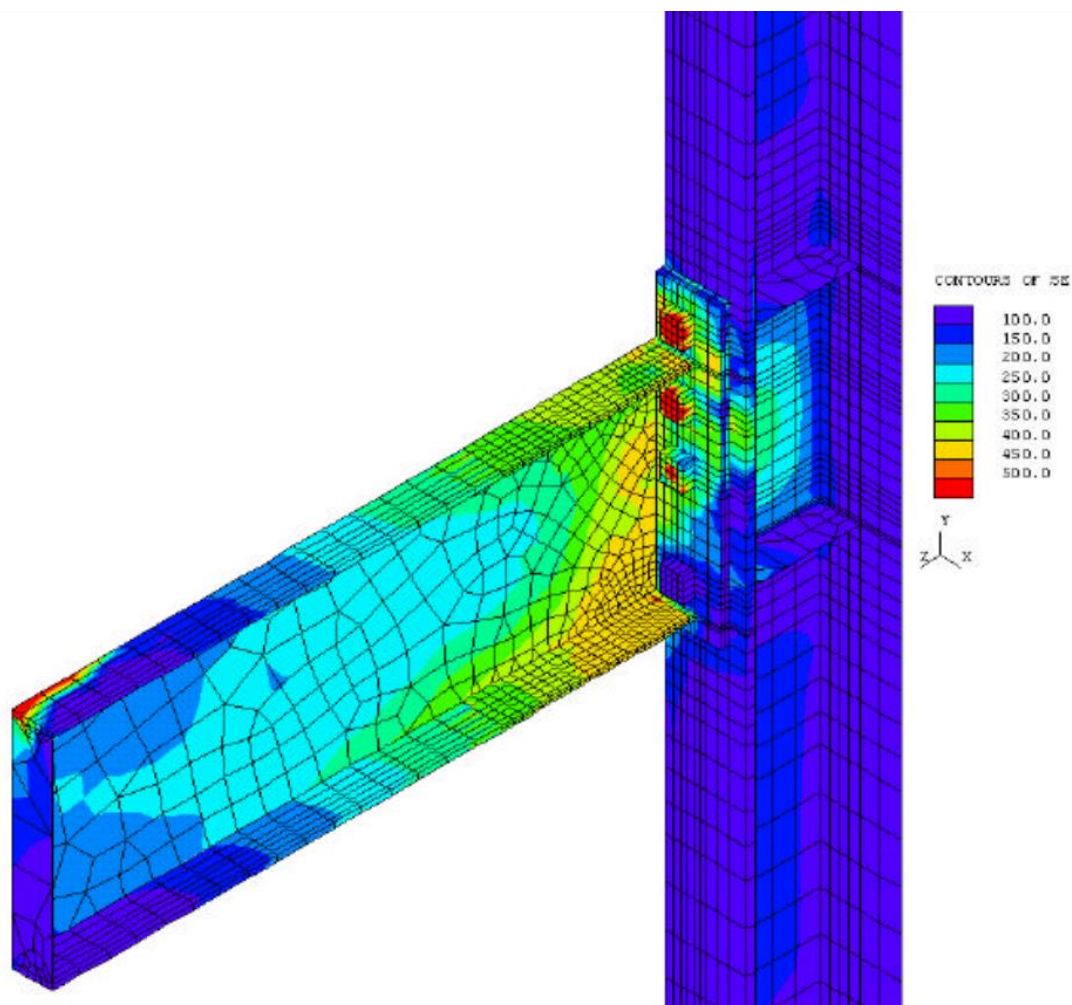
7.1. Primjena numeričkih simulacija

Kao što je već rečeno, zavarivanje je dosta složena tehnologija gdje je izbor odgovarajućih parametara od presudne važnosti za kvalitetu zavarenog spoja (što manje deformacija, zaostalih naprezanja i dr.). Kako bi se izbjegli mogući visoki troškovi eksperimenata počele su se sve više primjenjivati numeričke simulacije u svrhu određivanja optimalnih parametara, odnosno predviđanja mogućih problema (deformacija, zaostalih naprezanja i dr.) u zavarenim konstrukcijama. Numeričke simulacije se zasnivaju na metodi konačnih elemenata (MKE), a najveći problem predstavlja dugo vrijeme potrebno za računanje stoga kada je to moguće potrebno je zamijeniti 3D modele s 2D modelima, a u nekim situacijama je pogodno i korištenje 3D modela u kombinaciji s ljuskastim modelima. Kod simulacije mjesta koja su interesantnija potrebno je predstaviti manjim konačnim elementima, a ona koja nisu od prevelikog interesa većim kako ne bi vrijeme simulacije bilo predugačko.

Korištenje numeričkih simulacija pomaže u:

- minimiziranju troškova proizvodnje
- smanjenju proizvodnih rizika u najranijoj fazi razvojnog ciklusa proizvoda
- minimiziranju deformacija
- izbjegavanju hladnih pukotina
- kontroli i smanjenju tvrdoće i veličine zrna u zoni taljenja i ZUT-u
- predviđanju veličine i distribucije zaostalih naprezanja i dr.

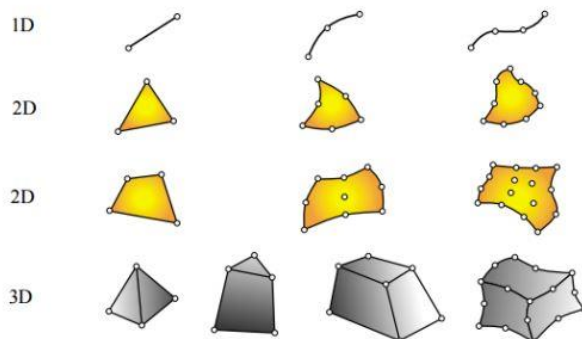
Za numeričku simulaciju u ovom radu korištena je programska aplikacija „*Visual-Weld*“ razvijena od strane ESI grupe, a koja se nalazi u sklopu „*Visual-Environment-a*“. U sklopu tog okruženja nalazi se još niz drugih modula, ali u sklopu ovog rada koriste se još samo moduli „*Visual-Mesh*“ (za kreiranje objekta) i „*Visual-Viewer*“ (za prikaz rezultata simulacije). ESI grupa razvila je i „*Sysweld-Environment*“ koji je za napredne korisnike „*Visual-Environment*“. Numeričkom simulacijom u ovim programskim aplikacijama ne simulira se ono što se događa u električnom luku već samo u materijalu. Numeričke simulacije zavarenih konstrukcija obično se sastoje od toplinsko - metalurške i mehaničke analize. Toplinsko - metalurška analiza je obavezna i obično se prvo radi simulacija bez mehaničke analize (zato što mehanička analiza iziskuje više vremena), a ako je sve dobro tada se pokreće i mehanička analiza [34].



Slika 21. Primjer metode konačnih elemenata [35]

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno mnogo stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Drugim riječima, područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni element, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi međusobno su povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina u problemu polja, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja elemenata. Prilikom izvođenja algebarskih jednadžbi polazi se od diferencijalnih jednadžbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija.

Ovisno o obliku i nepoznatim parametrima u čvorovima, izvedeni su različiti tipovi konačnih elemenata (1D, 2D i 3D) što je prikazano na slici 22. Veći broj nepoznanica zahtijeva složeniju interpolacijsku funkciju u području elemenata [34].



Slika 22. Različiti tipovi konačnih elemenata [34]

7.2. Aplikacije za numeričku simulaciju zavarivanja

Pomoću aplikacija za simulaciju zavarivanja moguće je saznati ponašanje materijala prilikom provođenja procesa zavarivanja. To podrazumijeva: temperaturni raspon, udio pojedinih faza, različite deformacije, naprezanja, veličinu kristalnog zrna itd. Ovisno o mogućnostima pojedine aplikacije moguće je provesti više ili manje različitih analiza.

Neke od aplikacija prisutnih na tržištu za simulaciju zavarivanja:

- SORPAS (2D i 3D)
- Simufact.welding
- Sysweld (Visual Environment)
- PAM ASSEMBLY

Pošto se u ovom radu koristio programski paket „Sysweld“ (*Visual Environment*), u sljedećem podnaslovu će se detaljnije objasniti samo njegove karakteristike.

7.2.1. Sysweld (*Visual Environment*)

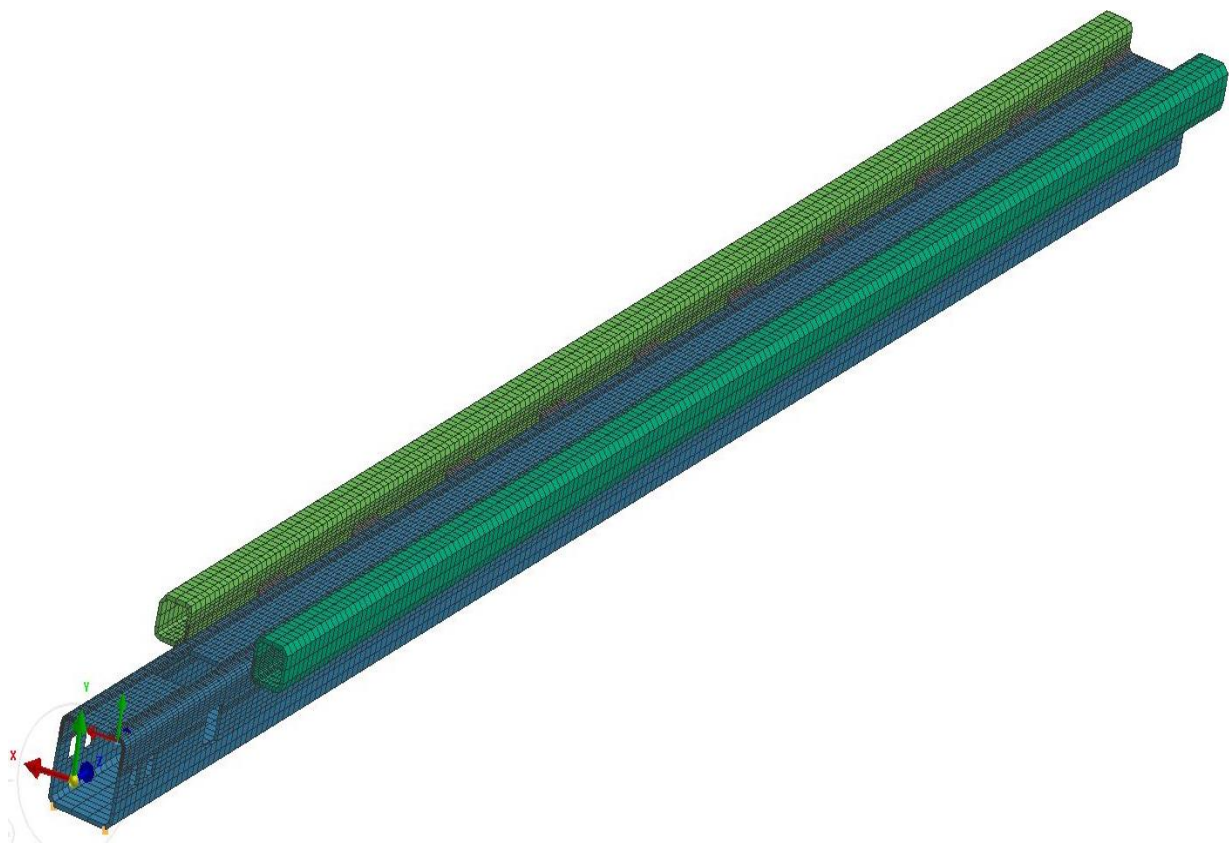
Sysweld predstavlja virtualni okoliš u kojem se odvijaju svi izračuni. Stvoren je od strane ESI grupe. On je vrlo kompleksan te za komercijalnu upotrebu je razvijeno sučelje *Visual Environment*. Ono je prihvatljivije za upotrebu te služi kao poveznica sa *Sysweld-om* gdje se izvršavaju svi izračuni. Tako je moguće provesti simulacije ponašanja pojedinog proizvoda u

različitim radnim okruženjima. Što se tiče zavarivanja, *Visual – Environment* sadrži posebnu aplikaciju *Visual Weld*. U njoj je moguće provesti simulaciju zavarivanja modela kreiranog u *Visual – Mesh-u* s ciljem otkrivanja promjena u materijalu bez izvođenja eksperimenta. Nakon provođenja simulacije rezultati se očitavaju pomoću drugog modula, *Visual – Viewer*. U tom modulu moguće je vidjeti:

Toplinsko - metalurušku analizu - mogu se vidjeti temperaturna polja u konstrukciji, koja se zavaruje, u svakom trenutku. Također, vrlo važna je mogućnost prikaza faznog dijagrama koji pokazuje kakva je mikrostruktura u konstrukciji u ovisnosti o proteklom vremenu (također je moguće dobiti graf koji pokazuje samo raspodjelu pojedine faze u konstrukciji).

Mehaničku analizu – može se vršiti provjera naprezanja u zavarenim konstrukcijama (izračunavaju se ekvivalentna naprezanja pomoću Von Misesove formule, a pošto su naprezanja prema toj formuli uvijek pozitivna, zbog korijena u formuli, potrebno je pomoću srednje vrijednosti „*Mean*“ provjeriti naprezanja te utvrditi radi li se o tlaku ili vlaku). Također, deformacije se mogu prikazivati nakon cijelog zavarivačkog procesa i/ili nakon pojedinog prolaza.

Provjera tvrdoće – može se provjeravati tvrdoća samo kod nelegiranih i niskolegiranih čelika.



Slika 23. Sysweld – vodilica za hidrauličku bušilicu

8. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad će se podijeliti na dva dijela. U prvom dijelu će se složena konstrukcija zavarivati u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Koristit će se MIG postupak zavarivanja. Osnovni materijal je austenitni nehrđajući čelik (AISI 304), a dodatni materijal austenitni nehrđajući čelik (AISI 309).

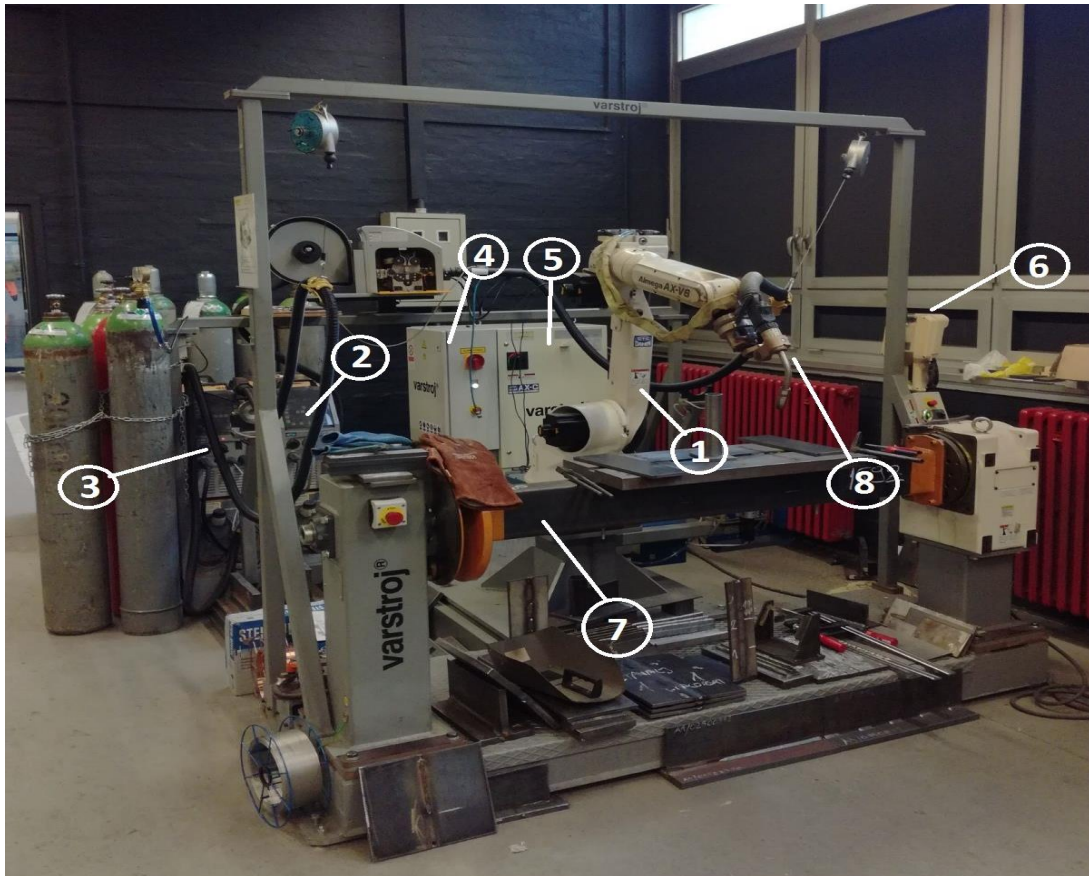
Drugi dio rada provest će se u programskom paketu „*Visual Environment*“. Cilj ovog eksperimenta je usporediti deformacije koje se javljaju u stvarnosti te na numeričkoj simulaciji. Pri tome ćemo na istoj konstrukciji koristiti iste ulazne parametre zavarivanja.

8.1. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje složene konstrukcije izvodit će se u robotskoj stanici VRC–1G MIG+1G TIG/1dm robotiziranim MIG postupkom zavarivanja. Robotska stanica opremljena je sljedećim komponentama:

1. robot Almega AX - V6
2. izvor za zavarivanje VPS 4000 (MIG/MAG)
3. izvor za zavarivanje VARTIG 3500 AC/DC (TIG)
4. upravljačka jedinica AX-C
5. električna jedinica
6. privjesak za učenje
7. okretni pozicioner P250V ROBO
8. MIG/MAG i TIG glave za zavarivanje.

Na sljedećoj slici 24. vidi se robotska stanica VRC–1G MIG+1G TIG/1dm s označenim prethodno nabrojanim dijelovima.



Slika 24. Robotska stanica VRC-1G MIG+1G TIG/1dm

Robot Almega AX-V6, koji se vidi na slici 25., je robot koji osigurava visoku radnu brzinu i preciznost. Također je prilagodljiv i fleksibilan u različitim situacijama.



Slika 25. Robot Almega AX-V6 [36]

U sljedećoj tablici 3. je prikazana tehnička specifikacija robota Almega AX-V6.

Tablica 3. Tehnička specifikacija robota Almega AX-V6 [36]

Vrsta motora	AC servo motor
Snaga motora [W]	2600
Stupnjevi slobode gibanja	6
Masa [kg]	160
Maksimalna nosivost [kg]	10
Maksimalni doseg [mm]	1402
Ponovljivost [mm]	± 0,08

Za MIG zavarivanje koristit će se inverterski izvor s vodenim hlađenjem VPS 4000 digit vidljiv na slici 26., koji ima ugrađeno digitalno robotsko sučelje čime je omogućena nesmetana komunikacija između robota i izvora, podešavanje i nadzor parametara zavarivanja. VPS 4000 digit ima 3 režima rada: klasično MIG/MAG zavarivanje, MIG/MAG impulsno zavarivanje, kao i zavarivanje obloženom elektrodom. Ovaj izvor se koristi kod zavarivanja konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika, aluminija i raznih legura.



Slika 26. VPS 4000 digit [37]

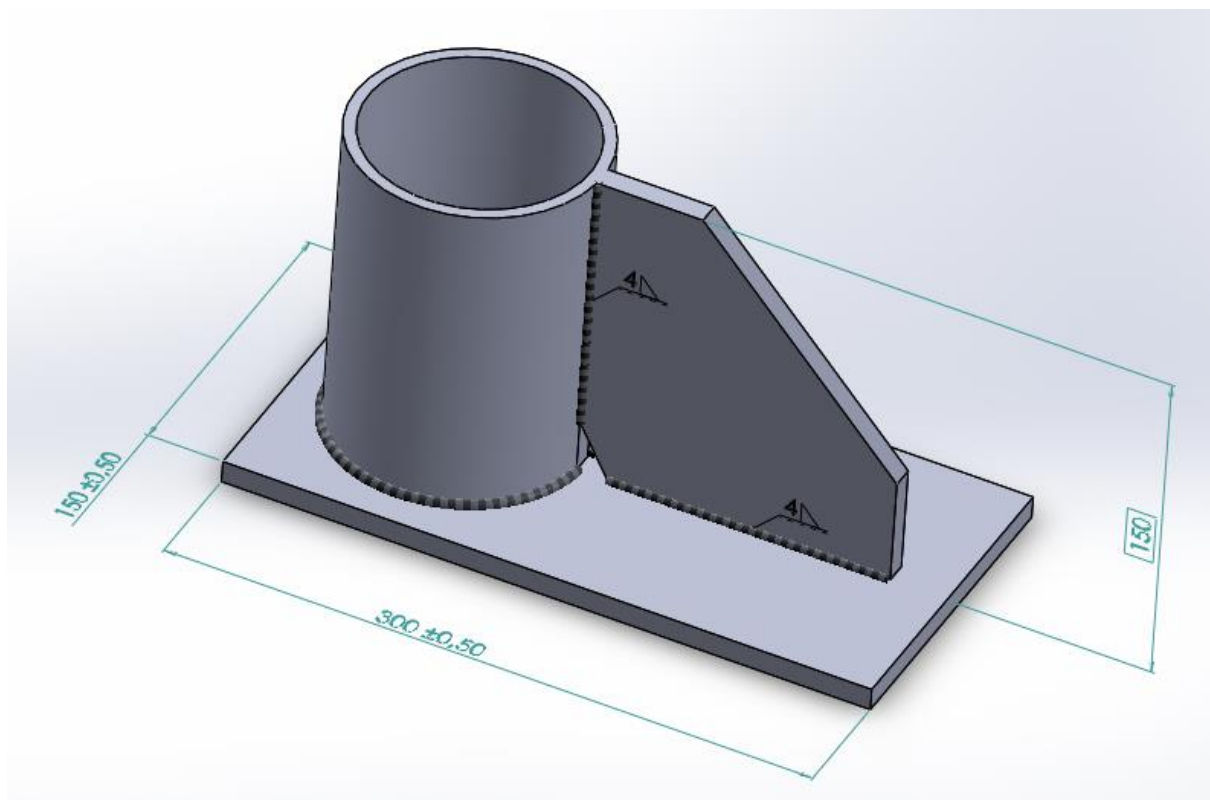
U sljedećoj tablici 4. je prikazana tehnička specifikacija VPS 4000 digit izvora za zavarivanje.

Tablica 4. Tehnička specifikacija VPS 4000 digit [37]

Priključni napon	400 V, 3 ~ 50/60 Hz
Struja zavarivanja	30 – 400 A
Napon zavarivanja	15,5 – 34,0 V
Intermitencija 50%	400 A
Intermitencija 100%	283 A
Promjer žice	0,8 – 1,2 mm
Dimenzije, D x Š x V	653 x 300 x 595
Masa	46 kg

8.2. Priprema spoja za zavarivanje

Eksperiment počinje s konstrukcijskom idejom i rješenjem koja je konstruirana u programskom paketu „SolidWorks“. CAD model se vidi na sljedećoj slici 27. s njegovim glavnim dimenzijama.



Slika 27. CAD model u programskom paketu „SolidWorks“

Nakon što se definirala konstrukcija, sljedeći korak je realizacija iste. Konstrukcija se sastoji od dvije ploče debljine 10,5 mm te cijevi 5,7 mm. Ploče i cijevi su od austenitnog čelika (AISI 304). Specifikacija čelika AISI 304, odnosno njegov kemijski sastav te mehanička i fizička svojstva vide se u sljedećim tablicama 5. i 6.

Tablica 5. Kemijski sastav AISI 304 [38]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
≤0,07%	1,00%	2,00%	0,045%	0,015%	17,5-19,5%	8,0-10,5%	≤0,11%

Tablica 6. Mehanička i fizička svojstva AISI 304 [38]

Tvrdoća $HB\ 30 \leq HB$	0,2% Granica razvlačenja $R_p \geq MPa$	Vlačna čvrstoća R_m MPa	Istezljivost $A_5 \geq \%$	Modul elastičnosti $E\ kN/mm^2$	Gustoća $\rho\ g/cm^3$	Specifični toplinski kapacitet $Q\ J/kgK$
215	190	500-700	45/35	200	7,9	500

Jedna stara uzrečica kaže: „Priprema je pola posla,“ tako da pravilna priprema spoja može itekako pozitivno utjecati na cijelu zavarenu konstrukciju. Kreće se s mjerenjem i zacrtavanjem oblika ploče gdje se koristi pomagala kao što su: džepni metar, pomično mjerilo, kreda i dr. Uspješno definirane ploče sa svim potrebnim dimenzijama obradit će se obradom odvajanja čestica. Tako će se ploče izrezati na plazma rezaču.

Rezanje plazmom - proces koji se koristi za rezanje čelika visokih tvrdoća koristeći plazma plamenik. Mlaz plazme se dobiva tlačenjem inertnog plina (ponekad i komprimirani zrak) kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između negativno nabijene volframove elektrode i radnog komada (ili sapnice pištolja) koji je pozitivno nabijena. Kvaliteta reza je prihvatljiva za većinu materijala, no svakako je potreba daljnja fina obrada. Plazma je izuzetno vruća i može dostići do 25 000 °C. Ručno rezanje plazme može rezati do 50 mm debele limove, a CNC rezači plazme i do 150 mm.

Kako izgleda proces CNC rezanja plazmom, može se vidjeti na sljedećoj slici 28.



Slika 28. CNC rezanje plazmom

Već je spomenuto da je takva kvaliteta reza prihvatljiva, no pošto je u ovom slučaju potrebna vrlo fina obrada, ploča će se morati još naknadno obraditi.

Postupak koji slijedi prilikom fine obrade je:

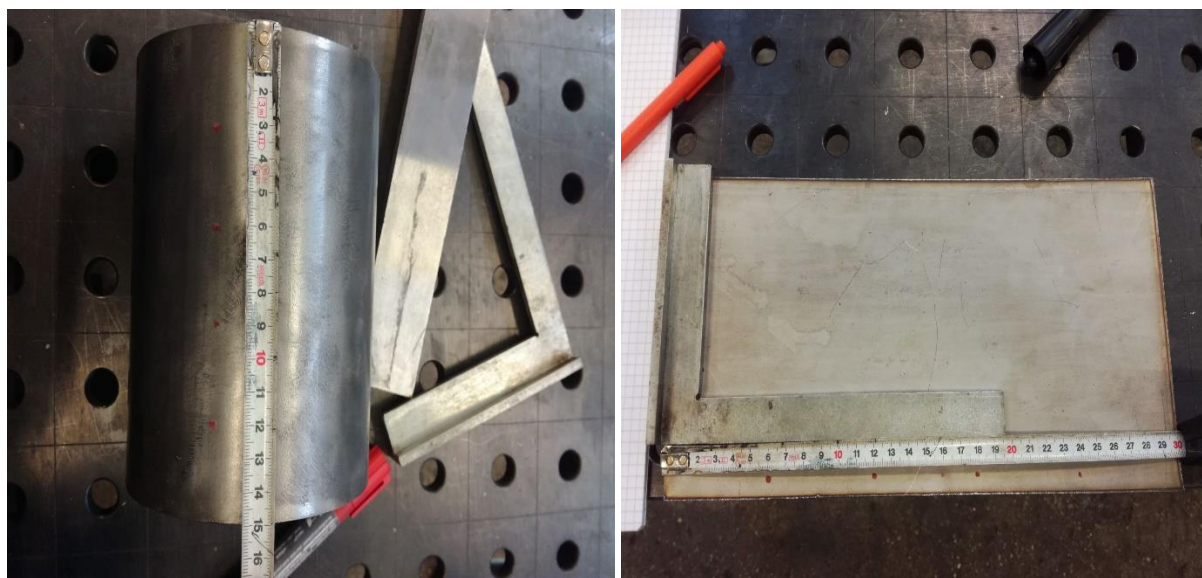
- grubo brušenje na stolnoj brusilici; slika 29. lijevo
- skidanje srhova pomoću turpije
- završna fina obrada kutnom brusilicom; slika 29. desno.



**Slika 29. Lijevo - Grubo brušenje na stolnoj brusilici;
Desno - Završna fina obrada kutnom brusilicom**

Iste operacije mjerenja, rezanja te brušenja su korištene kod pripreme cijevi.

Na kraju prije samog zavarivanja slijedi završno mjerenje. Postoje različita pomagala za mjerenje, no u ovom radu su korištena najosnovnija, a to su džepni metar i pomično mjerilo. Mjerenje zadanih komponenti vide se na sljedećoj slici 30.



Slika 30. Lijevo – mjerenje cijevi; desno – mjerenje ploče

Sljedeća operacija je zavarivanje konstrukcije te će biti opisana u nadolazećem poglavlju.

8.3. Zavarivanje konstrukcije

Dodatni materijal koji će se koristiti je također austenitni čelik (AISI 309), koji ima malo kvalitetniji kemijski sastav od austenitnog čelika (AISI 304). Taj materijal ima nešto bolja svojstva te će time i kvaliteta zavara biti bolja. Na sljedećoj slici 31. se vidi kolut žice od austenitnog čelika (AISI 309).



Slika 31. Žica od austenitnog čelika (AISI 309)

Specifikacija čelika AISI 309, odnosno njegov kemijski sastav te mehanička i fizička svojstva vide se u sljedećim tablicama 7. i 8.

Tablica 7. Kemijski sastav AISI 309 [38]

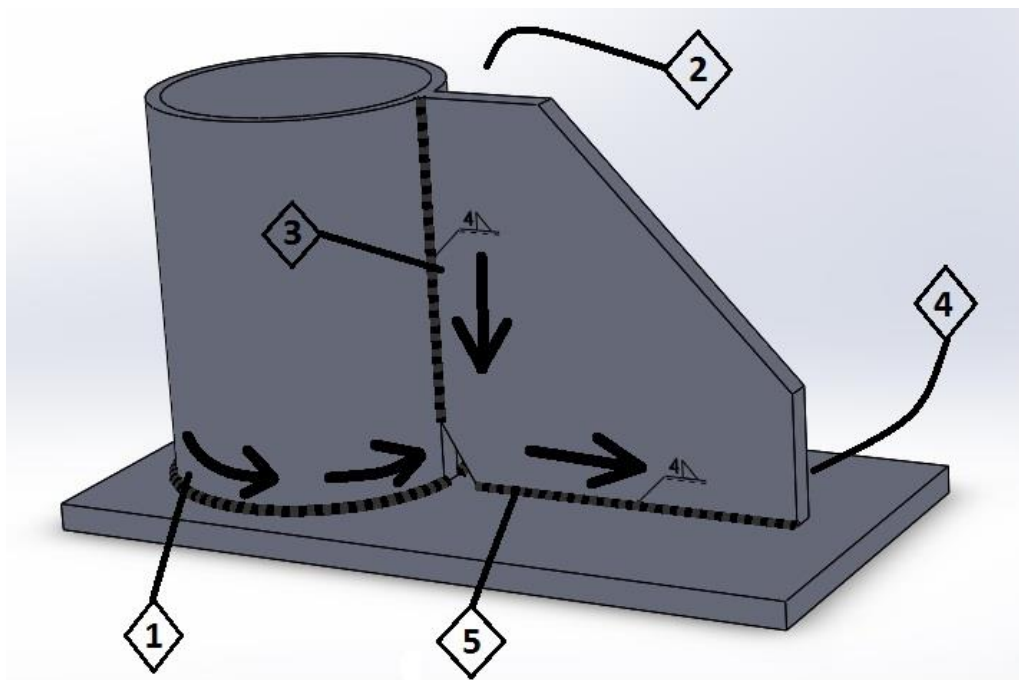
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
≤0,20%	1,5-2,5%	2,00%	0,045%	0,015%	19,0-21,0%	11,0-13,0%	≤0,11%

Tablica 8. Mehanička i fizička svojstva AISI 309 [38]

Tvrdoća $HB\ 30 \leq HB$	0,2% Granica razvlačenja $R_p \geq Mpa$	Vlačna čvrstoća $R_m\ MPa$	Istezljivost $A_5 \geq \%$	Modul elastičnosti $E\ kN/mm^2$	Gustoća $\rho\ g/cm^3$	Specifični toplinski kapacitet $Q\ J/kgK$
223	230	500-750	30	196	7,9	500

Nakon što se izmjerio radni komad, zone gdje će doći do zavarivanja moraju se dobro očistiti te po potrebi odmastiti. Prvo se kreće s pripajanjem, kako bi konstrukcija bila stabilna. Pripajanje se vrši ručno REL postupkom zavarivanja. Također, vrlo je važno očistiti spoj od moguće troske ili ugorina da ne bi došlo do pogrešaka tijekom postupka zavarivanja.

Sljedeće što se definira je redosljed zavarivanja. Kakav će biti redosljed zavarivanja u praksi odlučuje tehnolog. Pravilnim redosljedom zavarivanja mogu se izbjeći deformacije. Redosljed i smjer zavarivanja konstrukcije vidi se na sljedećoj slici 32.



Slika 32. Redosljed i smjer zavarivanja

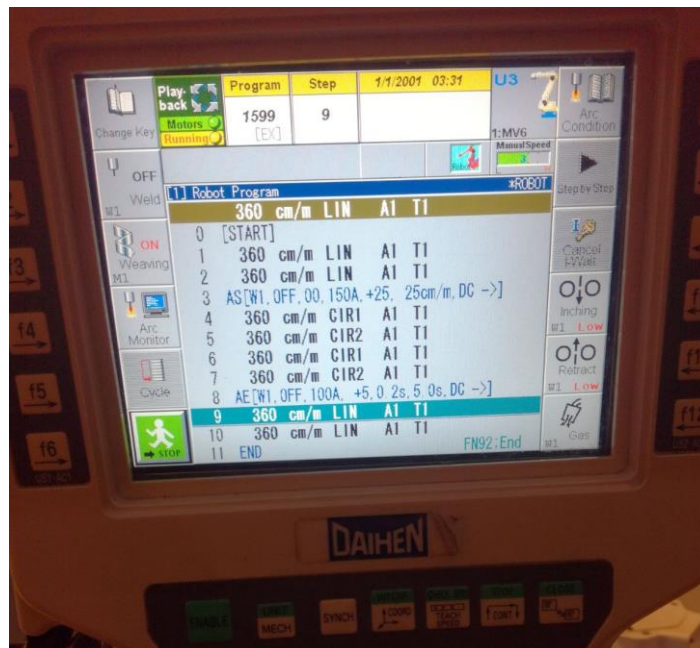
Već se prije spomenulo da će se zavarivanje provesti na robotskoj stanici VRC-1G MIG+1G TIG/1dm, tako da se radni komad steže na pozicioneru. Za svaki zavar treba isprogramirati poseban program. Zavarivanje će se provoditi kontinuirano, a parametri koji se koriste su sljedeći:

- zavar (1): $I = 150 \text{ A}$; $V = 18 \text{ V}$; $v = 30 \text{ cm/s}$
- zavar (2,3,4,5): $I = 110 \text{ A}$; $V = 19 \text{ V}$; $v = 30 \text{ cm/s}$

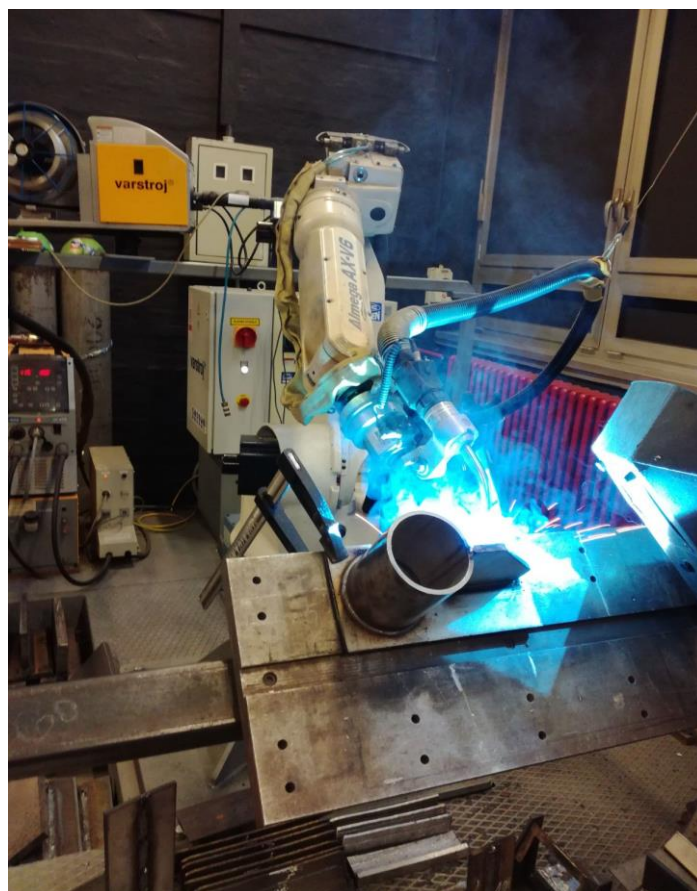
Zaštitni plin koji se koristi je *Ferroline C8*, koji sadrži 92 % argona te 8 % ugljikovog dioksida. Protok plina je 15 l/min.

Točne parametre zavarivanje je jako teško odrediti. Loši parametri, kao posljedice, mogu izazvati velike deformacije te tehnolozi koji to određuju moraju biti vrlo vješti i stručni u tom

području. Na sljedećim slikama 33. i 34. vidi se program koji je unesen u privjesak za učenje te sami proces robotiziranog zavarivanja.



Slika 33. Program: Zavar (1)



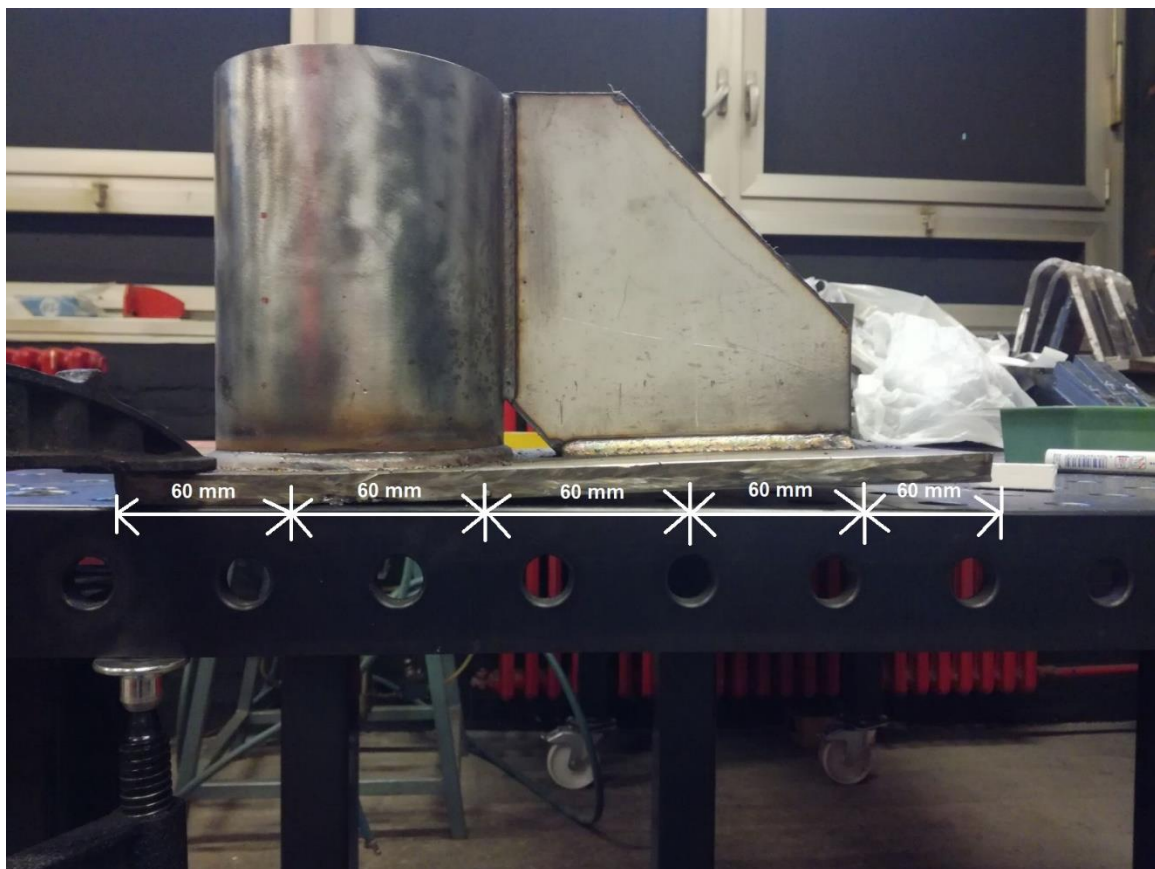
Slika 34. Robotizirano zavarivanje radnog komada

Zavarenu konstrukciju treba ostaviti da se ohladi, a hlađenje se provodi na svježem zraku. Tijekom hlađenja na konstrukciji su se oslobodila zaostala naprezanja te su nastupile deformacije. Deformacije su odraz pogrešaka parametara, redoslijeda zavarivanja itd. No glavni problem zavarivanja nehrđajućih čelika je njihovo sporo odvođenje topline. Tako u nehrđajućim čelicima toplina ostaje duplo dulje nego u običnim konstrukcijskim čelicima.

8.4. Deformacije u konstrukciji

Najveće deformacije su se očekivano javile u donjoj ploči. Došlo je do iskrivljenja ploče odnosno do poprečne i uzdužne deformacije. Deformacije će se mjeriti iz dva pogleda. U oba slučaja konstrukcija će se stegnuti u jednoj točki te će se pomoću pomičnog mjerila izmjeriti deformacija.

Prvo će se mjeriti deformacije ploče s pogleda (1), koji odgovara nacrtu konstrukcije. Dužina ploče iznosi 300 mm te će se tijekom cijele njene dužine mjeriti iznos deformacija. Ispitivanje se provodi unutar šest točaka koja je svaka od druge odmaknuta za 60 mm. Rezultati mjerenja se vide na slici 35. i u tablici 9.



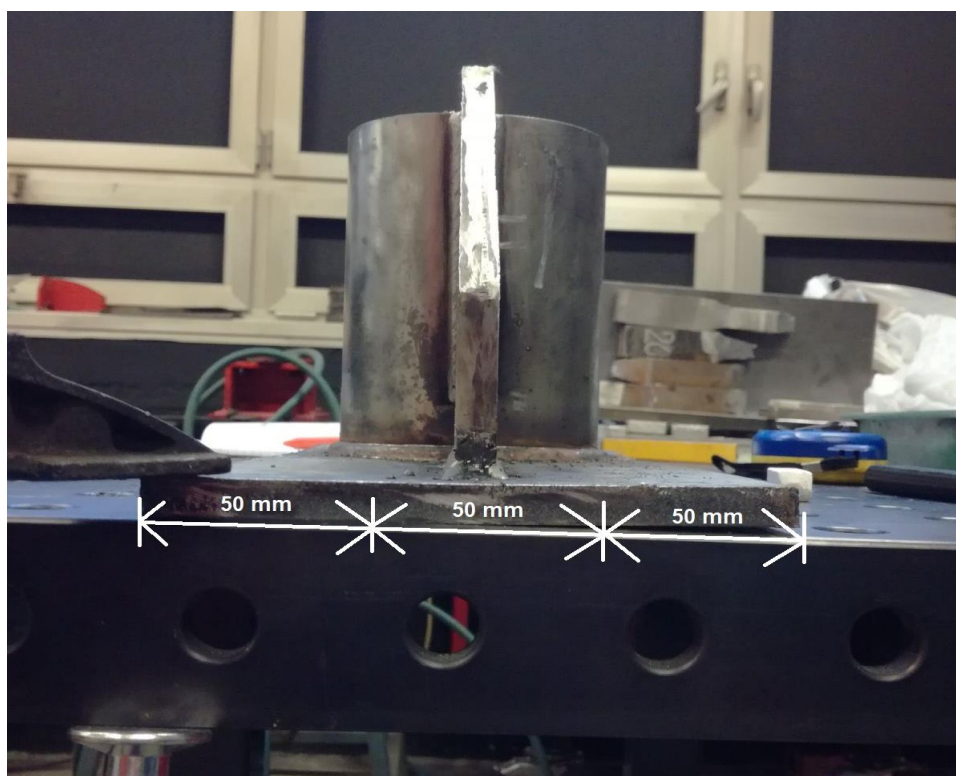
Slika 35. Deformacije ploče iz pogleda (1)

Tablica 9. Deformacije ploče u pogledu (1)

Točka mjerenja	Udaljenost [mm]	Visina ploče [mm]	Deformacija u točki [mm]
1.	0	10.5	0
2.	60	10.9	0.4
3.	120	13.1	2.6
4.	180	15.9	5.4
5.	240	18.8	8.3
6.	300	20.2	9.7

Mjerenjem se utvrdilo da je razlika visina krajnjih točaka 9.7 mm, što je izuzetno velika deformacija za tako mali komad. Tako velika deformacije je sasvim očekivana kod nehrđajućeg čelika. Njen pravi uzrok se ne može točno utvrditi, no jasno je da parametri, redosljed i smjer zavarivanja, oblik konstrukcije nisu zadovoljili.

Slijede deformacije s pogleda (2), koji odgovara bokocrtu konstrukcije. Dužina ploče iznosi 150 mm te će se tijekom cijele njene dužine mjeriti iznos deformacija. Ispitivanje se provodi unutar tri točke, kod koje je svaka od druge odmaknuta za 50 mm. Rezultati mjerenja se vide na slici 36. i u tablici 10.

**Slika 36. Deformacije ploče iz pogleda (2)**

Tablica 10. Deformacije ploče u pogledu (2)

Točka mjerenja	Udaljenost [mm]	Visina ploče [mm]	Deformacija u točki [mm]
1.	0	10,5	0
2.	50	10,8	0.3
3.	100	11.8	1.3
4.	150	13.2	2.7

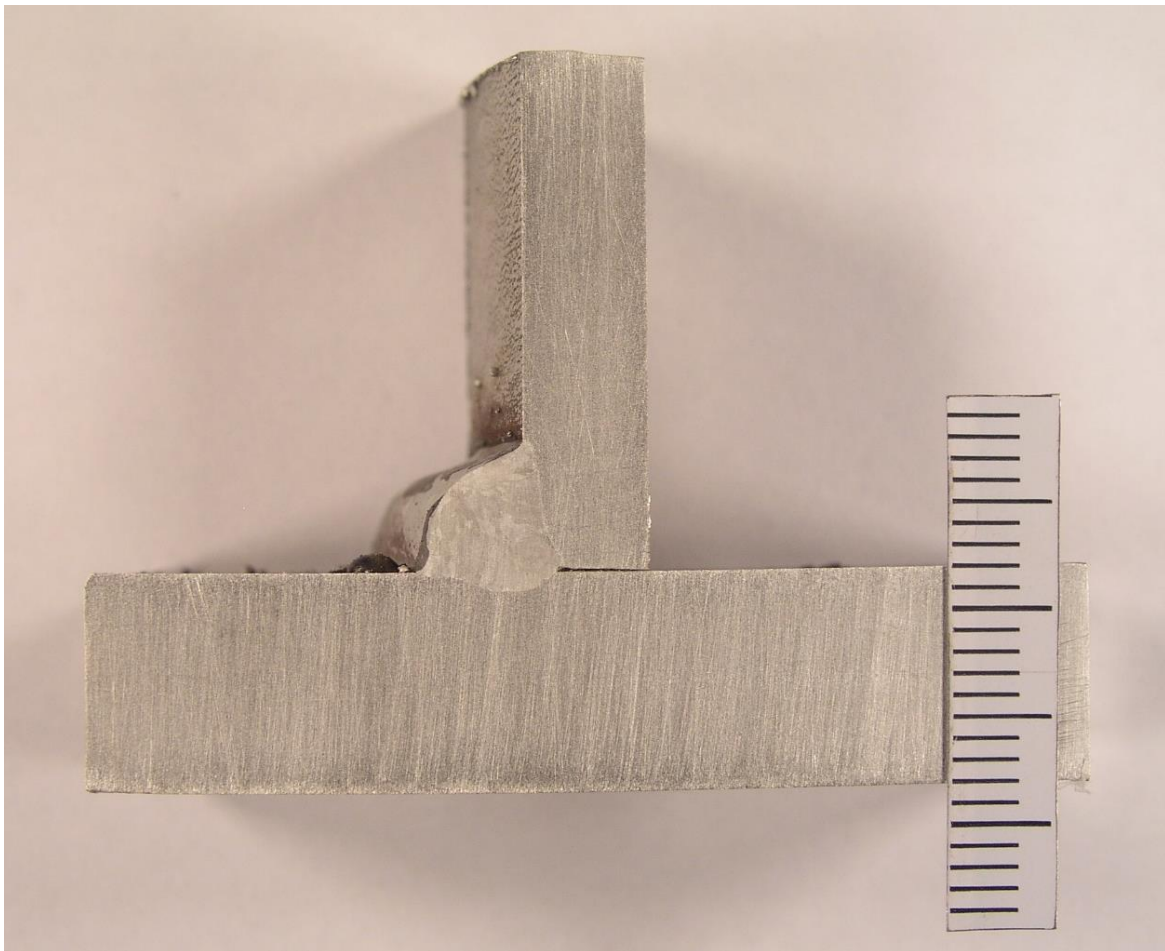
Mjerenjem se utvrdilo da je razlika visina krajnjih točaka 2,7 mm. Ovo mjerenje je pokazalo da se ploča savila i po dužini i širini te se tako problem dodatno zakomplicirao.

8.5. Izrada makroizbruska

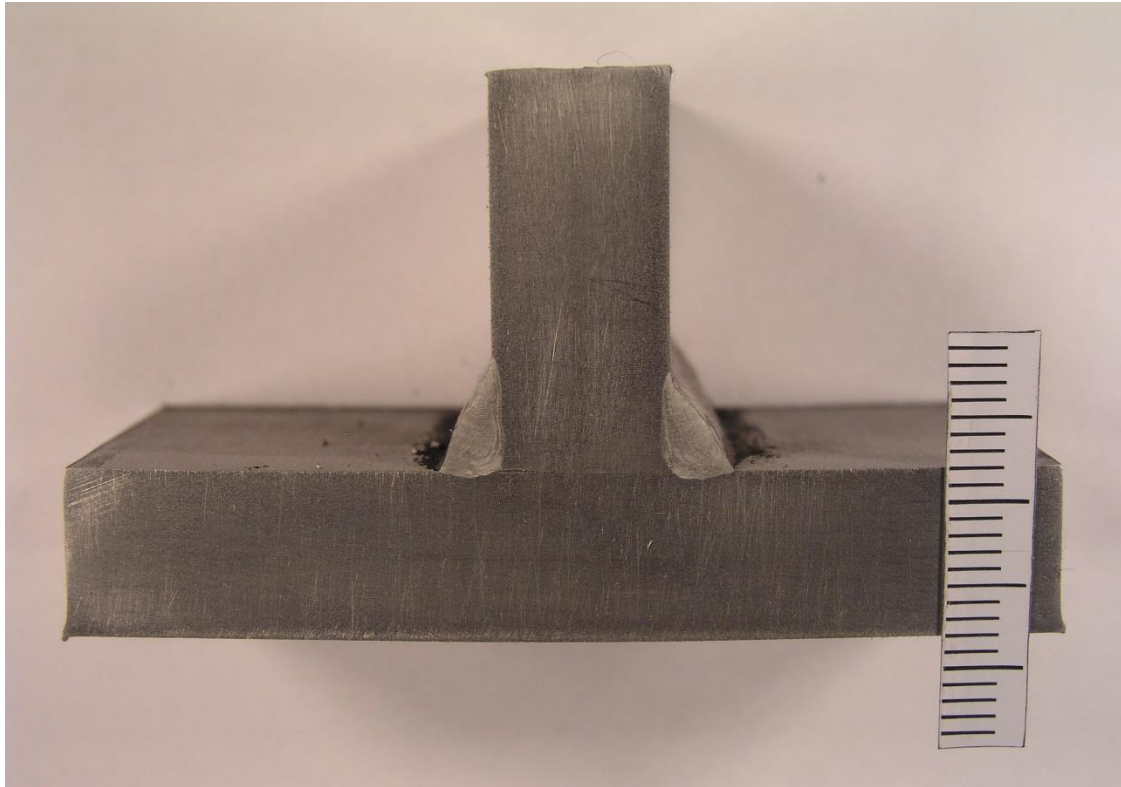
Nakon izmjerenih deformacija, sljedeći postupak je izrada makroizbruska. Na konstrukciji će se izraditi tri makroizbruska, što je vrlo logična odluka pošto smo imali kružni te kutni vertikalni i horizontalni zavar. Mjesta na kojem se vade makroizbrusci vide se na sljedećoj slici 37. Makroizbrusci su označeni zelenim linijama.

**Slika 37. Pozicije makroizbrusaka**

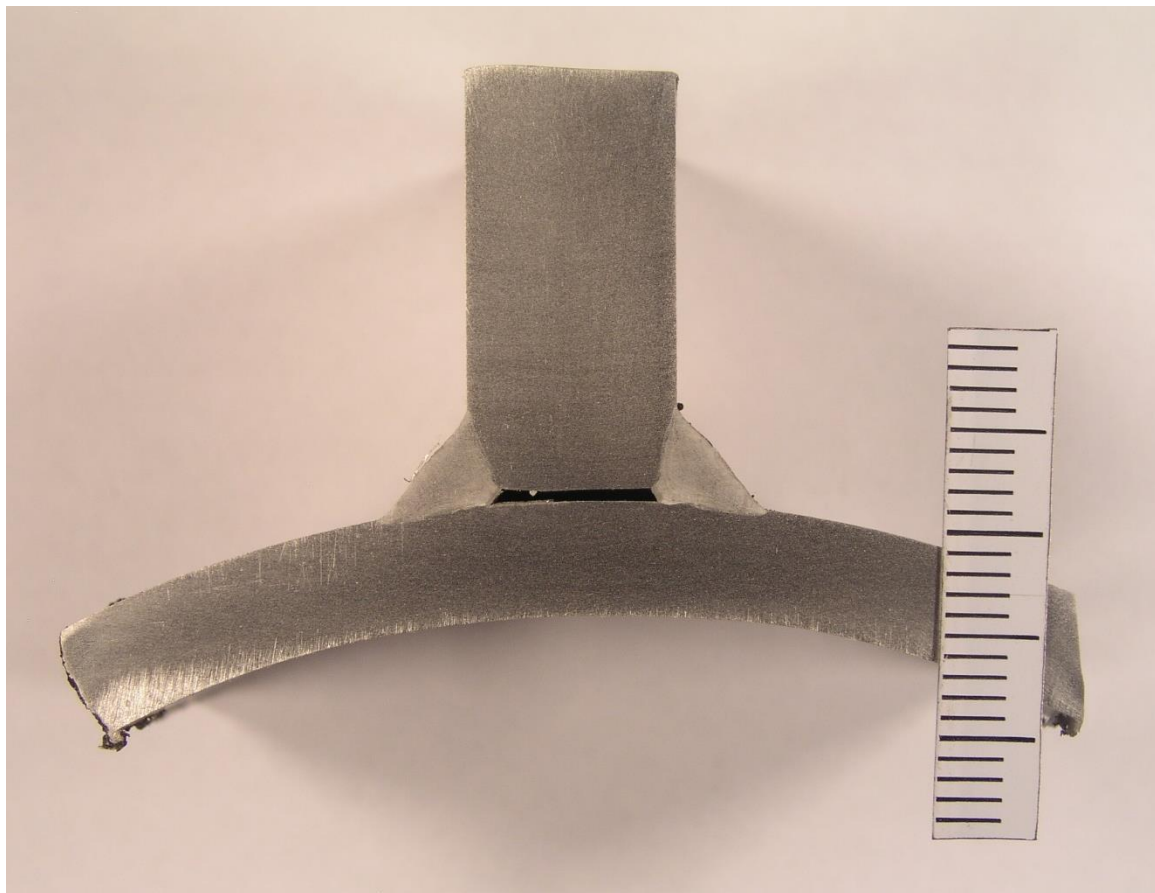
Makroizbrusci su najprije odrezani na CNC plazmi, a nakon toga je uslijedilo rezanje tračnom pilom. Nakon rezanja uslijedila je fina obrada brušenjem na stolnoj brusilici do granulata zrna 100 te ručno brušenje brusnim papirom do granulata zrna 500. Za nehrđajući čelik je vrlo bitna da obrada bude što finija kako bi se zona utjecaja topline (ZUT) mogla što bolje uočiti. Potom se u Laboratoriju za površinsku zaštitu, također na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, elektrokemijski nagrizali uzorci u otopini (10% oksalna kiselina) u trajanju od dvije minute (napon 10 V, struja 5 A). U konačnici su dobiveni makroizbrusci koji se vide na sljedećim slikama 38., 39. i 40.



Slika 38. Makroizbrusak (1)



Slika 39. Makroizbrusak (2)



Slika 40. Makroizbrusak (3)

Na sva tri uzorka zbog dobrog kontrasta vidi se jasno granica ZUT-a. Promatrano iz slika donosi se zaključak da je penetracija bila izuzetno mala te da su parametri zavarivanja sigurno trebali biti poprilično veći da se dodatni materijal bolje rastali u osnovni. I unatoč slabe struje zavarivanja nastupile su izrazite deformacije što dodatno zakomplicira problematiku samog zavarivanja nehrđajućih čelika.

8.6. Simulacija u Visual-Environment-u

Nakon uspješno završenog prvog dijela eksperimenta, sljedeći dio eksperimenta će se bazirati na numeričkim simulacija u programskom paketu *Visual Environment*. Programski paket se sastoji od više programskih modula, no za potrebe zavarivanja čime se bavi ovaj diplomski rad baviti ćemo se modulima:

1. Visual Mesh – kreira se mreža modela
2. Visual Weld – definiraju se parametri nužni za provedbu procesa zavarivanja
3. Visual Viewer – očitavaju se i analiziraju rezultati.

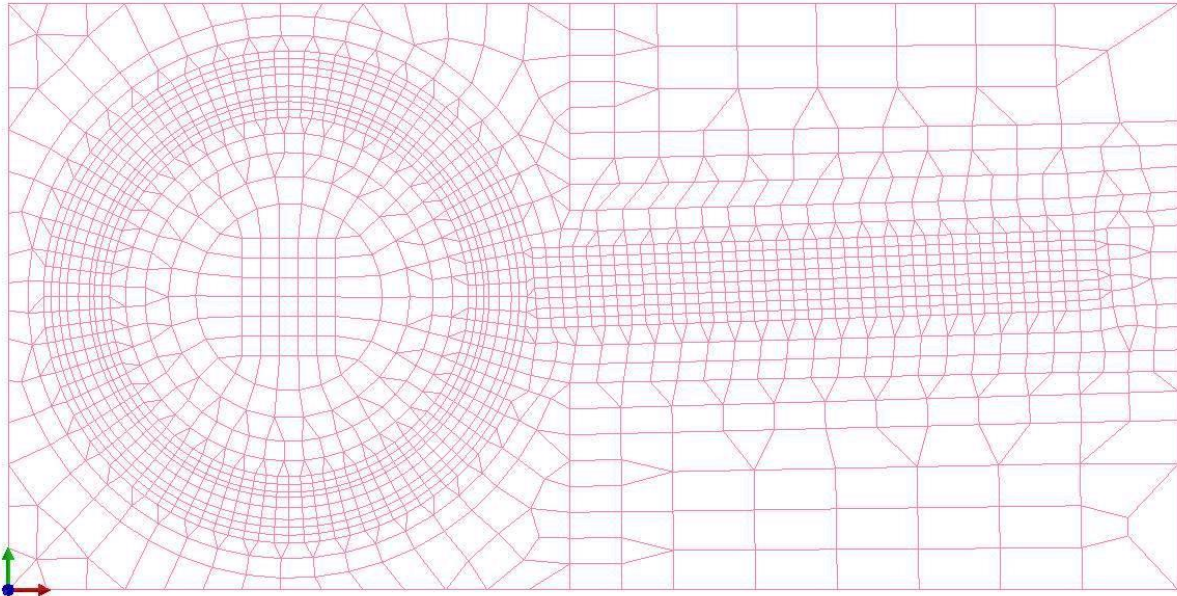
8.5.1. Visual - Mesh

U Visual – Mesh modulu kreira se model s njegovom mrežom te se definiraju svi dijelovi i kolektori potrebni za prepoznavanje istih u sljedećem modulu.

Izrada 2D modela:

- Kod opcije *Node* ulazi se u naredbu *By XYZ, Locate*. Tu se određuju početne točke kako bi se lakše snašlo u prostoru. Točke se mogu pomicati bilo gdje po x, y, z osi.
- Pod opcijama *Curve* koriste se naredbe *Sketch* i *Circle/arc*. S tim naredbama nacrtava se skica modela, po točkama koje su bile prethodno unijete. Tom opcijom se dobije zadani oblik s pravovaljanim dimenzijama.
- Sljedeća opcija je *2D* gdje se koriste opcije kao što su *Blend (Spline)*, *Sweep (Drag)* te *Revolve (Spin)*. Te naredbe služe za crtanje mreže unutar definirane skice.

Sve su te opcije potrebne kako bi se dobila kompleksna struktura modela koji je zadan u ovom zadatku. Na slici 41. vidi se mreža donje ploče.



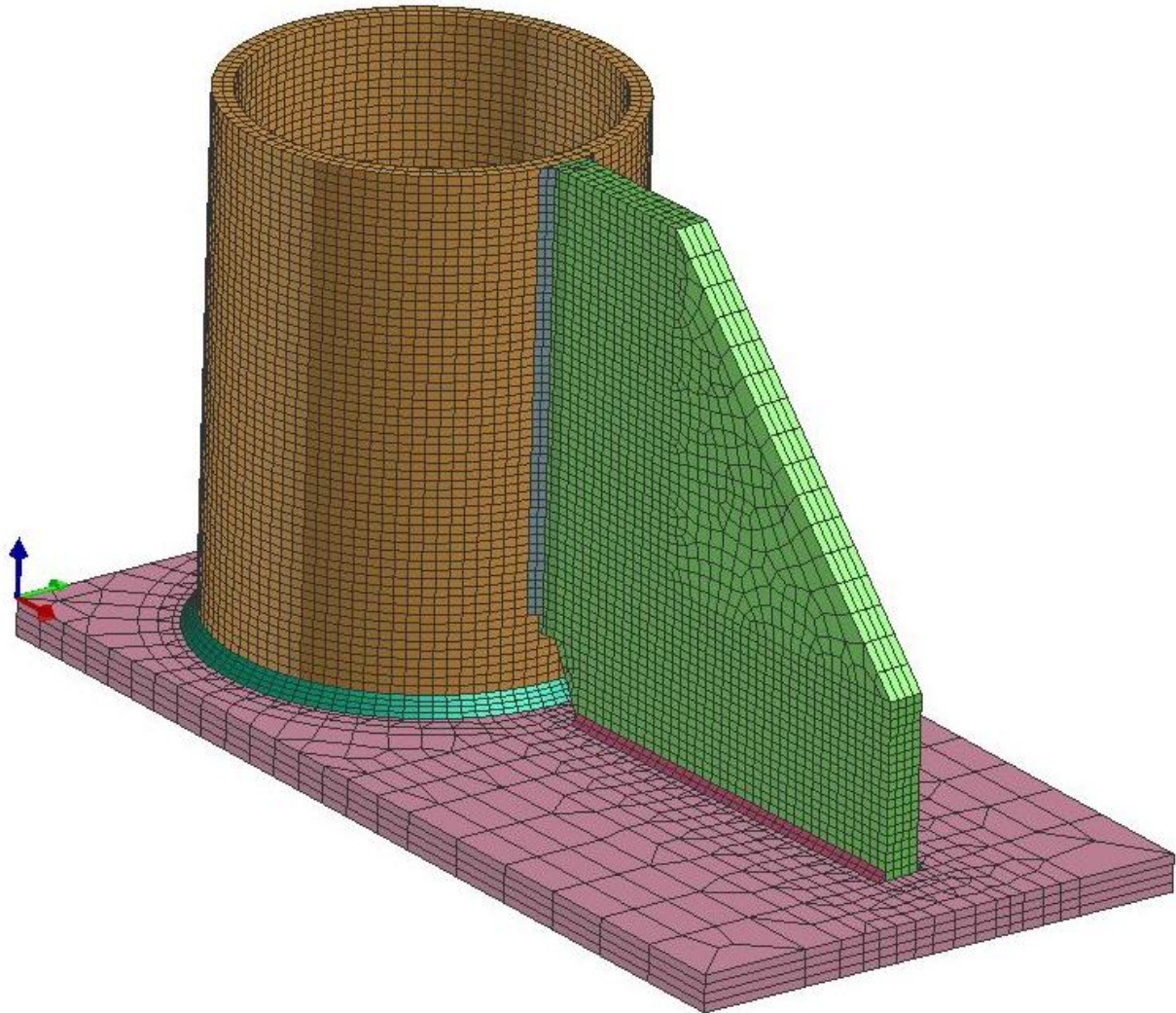
Slika 41. Mreža ploče

Mreža je puno gušća na području gdje će se definirati ZUT, odnosno elementi su u tom području sitniji. Sitniji elementi u ZUT omogućavaju bolje i točnije rezultate. Također, zona koja je daleko od zavarivanja zamjenjuju se većim elementima kako bi smanjili vrijeme numeričke simulacije. Na slici se razaznaje da mreža nije simetrična s desne strane te da je pomaknuta prema gore. To se napravilo isključivo zbog greške prilikom pripajanja cijevi i ploče u laboratoriju te se takav jednolični model mora nacrtati u *Visual – Mesh-u* kako bi rezultati odgovarali stvarnosti.

Izrada 3D modela:

- Pod opcijom 3D koriste se naredbe *Sweep (Drag)*, *Revolve (Spin)* te *Transform*. S tom naredbom se dobivaju konačni 3D elementi. 3D model se ne može napraviti ako prije toga nije napravljena 2D mreža. S tom opcijom su se dobile sve komponente.
- Zadnje što se kreira su zavari. Zavari se ubacuju također preko 2D mreže, koristeći se prethodnim naredbama.

Kako izgleda gotov 3D model sa svim potrebnim komponentama i definiranim zavarima, vidi se na sljedećoj slici 42.



Slika 42. 3D model u modulu *Visual - Mesh*

Na ovoj slici se vidi kako stvoriti jedan 3D kompaktni model zahtijeva mnogo truda i maštovitosti. Na slici se jasno vide svi elementi te je uočljivo kako je zona zavarivanja vrlo gusta. Sljedeće i završno potrebno je provjeriti jesu li svi elementi i čvorovi povezani. Provjera se vrši odlaskom na opciju *Checks* te na naredbu *Coincident Nodes* kako bi se provjerilo jesu li svi čvorovi povezani, i naredbom *Coincident Elements* kako bi se provjerilo jesu li svi elementi međusobno povezani. Ako je uočljiva bilo kakva pogreška, potrebno ju je ukloniti kako bi softver mogao pokazati željene i ispravne rezultate.

Definiranje kolektora:

Nakon izrade modela, potrebno je definirati potrebne kolektore kao što su:

- osnovni materijal (*SHEET_COMPO*)
- dodatni materijal (*W_WIRE*)
- zonu utjecaja topline (*W_LOAD*)
- točke stezanja (*XYZ_CLAMP*)
- izmjena topline (*AIR_SKIN*)

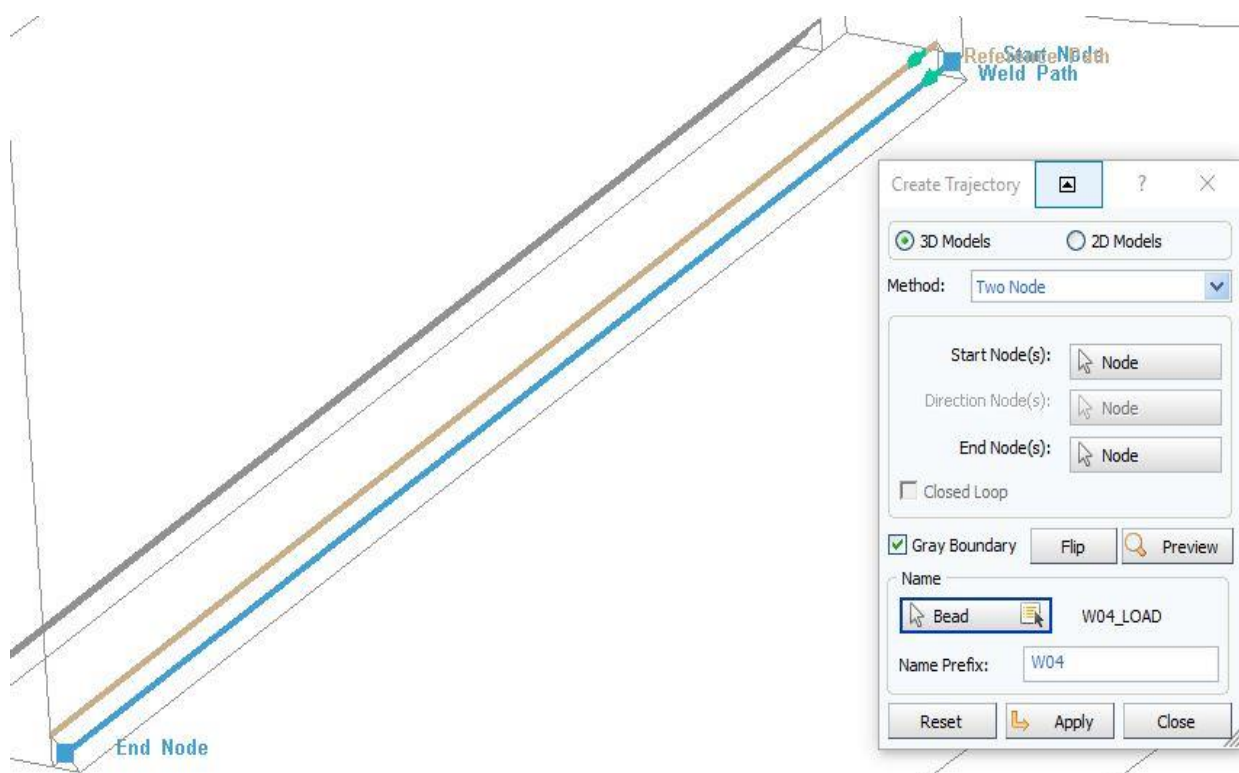
Kolektori se mogu dobiti na sljedeći način: odabiru se svi željeni trodimenzionalni konačni elementi te se unutar opcije „Tools“ odabire podopcija „Add to New Collector“.

Ova konstrukcija je definirana je s tri osnovna materijala te se njima tako pridodaje ekstenzija „_COMPO.“ Na taj način, imena kolektora osnovnog materijala redom glase: „SHEET1_COMPO“, „SHEET2_COMPO“ i „SHEET3_COMPO.“ Također na isti način samo pomoću ekstenzije „_WIRE“ kreiraju se kolektori dodatnih materijala koji glase: „W01_WIRE“, „W02_WIRE“, „W03_WIRE“, „W04_WIRE“ i „W05_WIRE.“ Sljedeća što slijedi je imenovanje kolektora za izvor topline. Kolektoru se dodaje ekstenzija „LOAD“. Taj kolektor obuhvaća zavar te površinu oko zavora na koju će toplina izravno utjecati. Tako kolektori za izvor topline glase: „W01_LOAD“, „W02_LOAD“, „W03_LOAD“, „W04_LOAD“ i „W05_LOAD“. Na sljedećoj slici 44. vidimo postupak izrade kolektora za izvor topline.

Sljedeći korak je izrada kolektora kojim će se definirati izmjena topline s okolinom. Pod opcijom 2D odabire se naredba *Extract from 3D*. U novootvorenom prozoru označi se cijeli model te pritiskom *Extract 2D* i *Apply* stvorimo novi *Part* koji je ljuskastog oblika. Dobiveni *Part* preimenuje se u novi kolektor koji glasi: „AIR_SKIN“ ili „AIR_SKIN_EXCHANGE“. Zadnji kolektor koji se definira je kolektor stezanja. Za izradu kolektora stezanja ne odabiru se trodimenzionalni konačni elementi već samo točke. Odabirom opcije „NODE“ izabiru se tri točke na vrhovima vanjske ploče. Kolektoru se dodaje ekstenzija „CLAMP“ te redom kolektori glase: „XYZ_CLAMP“, „XY_CLAMP“ i „Y_CLAMP“. Navedenim točkama stezanja onemogućilo se gibanje konstrukcije prilikom zavarivanja u osima koje smo prethodno definirali. Sljedeće što se provodi su kalibracija unosa topline i parametri zavarivanja koje će se obraditi u sljedećem modulu „Visual – Weld“.

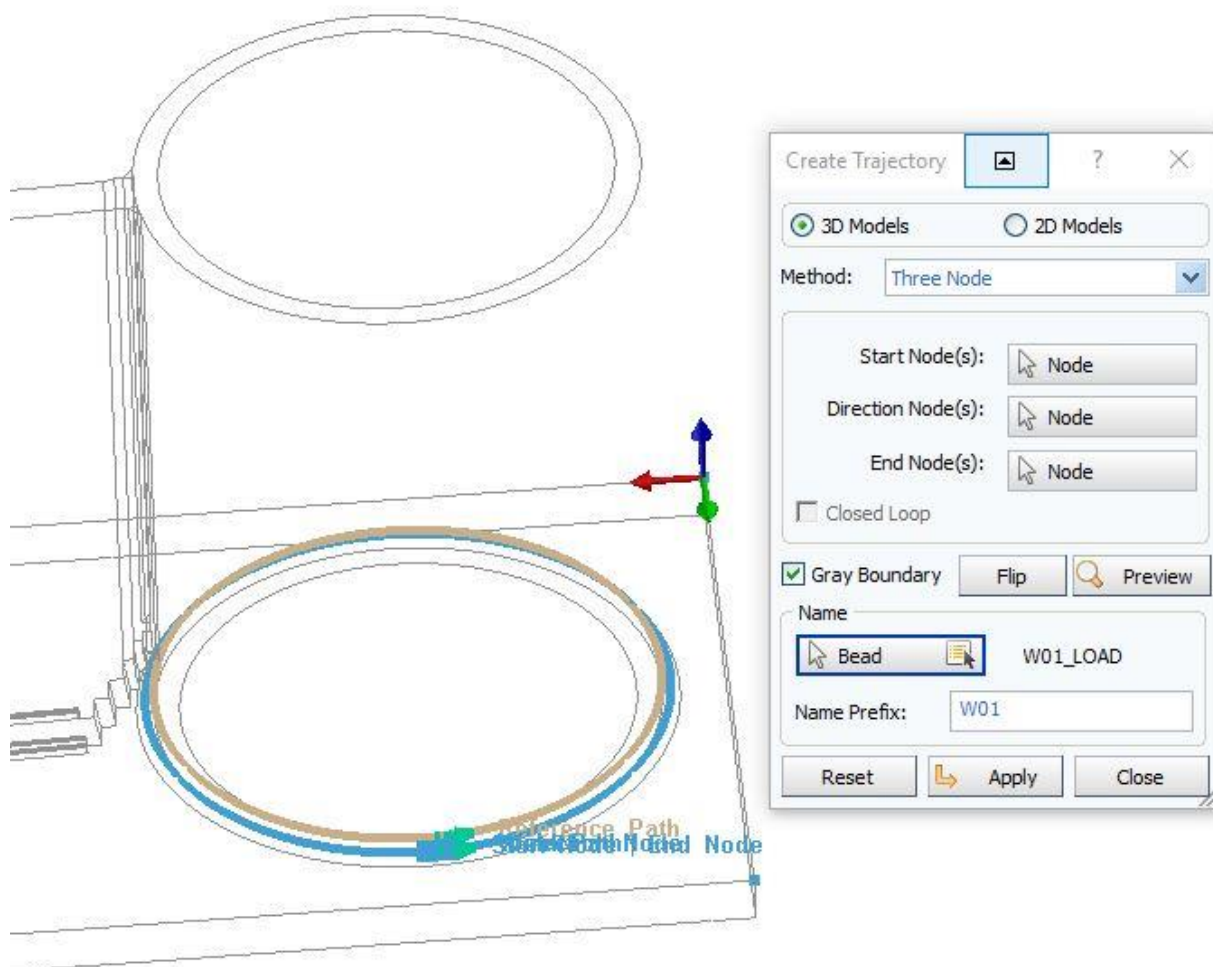
8.5.2. Visual – Weld

Nakon što se uspješno definirao 3D model sa svim njegovim komponentama i kolektorima, kreće se u sljedeći modul, a to je *Visual - Weld*. U tom modulu se provodi kalibracija unosa topline, definiraju se parametri zavarivanja te se provodi sama simulacija. No prije kalibracije unosa topline, potrebno je definirati krivulju zavarivanja odnosno gibanja unosa topline. Da bi se definirala krivulja gibanja unosa topline, potrebno je definirati dvije linije: trajektoriju i referentnu liniju. Odlaskom na opciju *Welding* te na naredbu *Trajectory*, otvara se prozor u kojem selektiranjem opcije „*Start Node*“ pozicioniramo početne točke trajektorije i referentne linije, a opcijom „*End Node*“ pozicioniramo krajnje točke. Na slici 43. vidi se linija trajektorija od kutnog zavara.



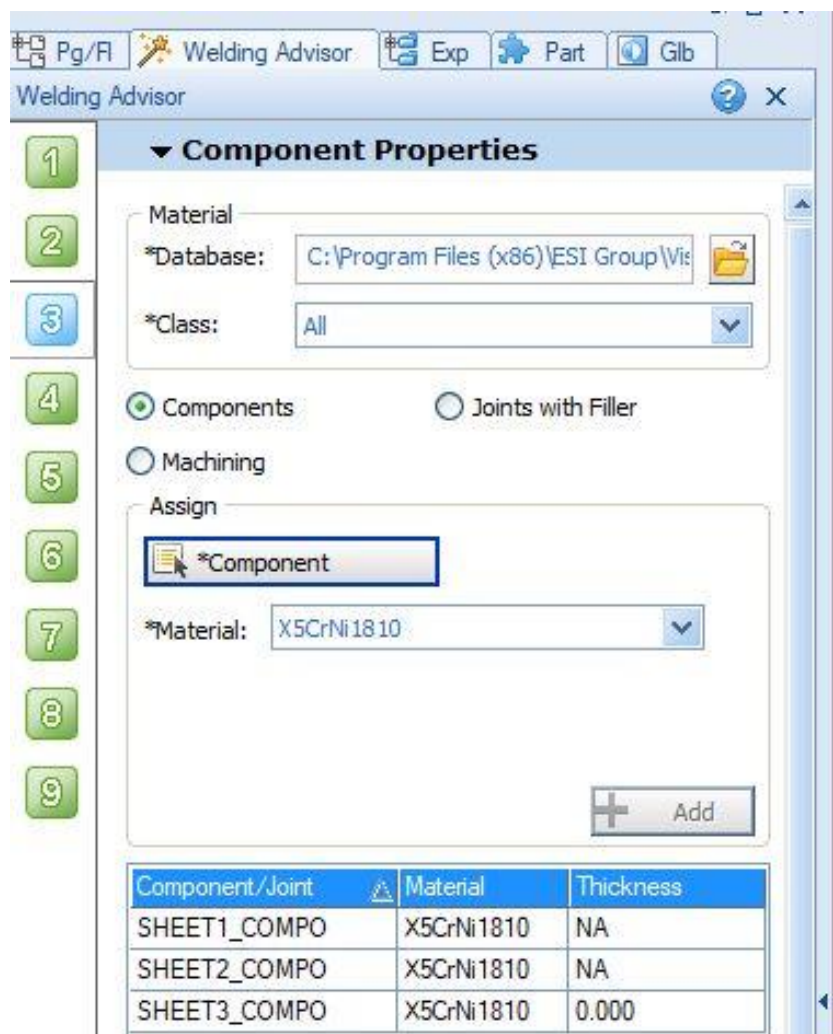
Slika 43. Trajektorija kod kutnih (pravocrtnih) zavara

Ovo vrijedi za sve zavare čija je putanja pravac. No ako se žele definirati kružni zavari, na istom tom prozoru moramo definirati još i „*Direction Node*“ kako bi program mogao prepoznati putanju zavara. Na sljedećoj slici 44. vidi se linija trajektorija kružnog zavara.



Slika 44. Trajektorija kod kružnih zavora

Nakon što smo definirali sve trajektorije i referentne linije pod stupac *Welding* odabire se naredba *Welding advisor*. Tu se otvara prozor s devet koraka gdje se određuju svi parametri zavarivanja, kalibracija unosa topline te zadnji korak simulacija. U prvom koraku pohranjuje se model u određenom formatu kako bi ga sama simulacija u zadnjem koraku prepoznala. Sljedeći korak je odabir tijela. Pošto konstrukcija nije šuplja iznutra odabire se opcija *Solid*. Treći korak je *Component Properties*. U tom koraku se odabiru komponente i dodatni materijali kojeg smo u prethodnom modulu definirali kao kolektori „*SHEET*“ i „*WIRE*“. Također se odabire vrsta materijala od kojeg su sastavljene, što je u ovom slučaju austenitni nehrđajući čelik. Postupak odabira vidi se na slici 45.

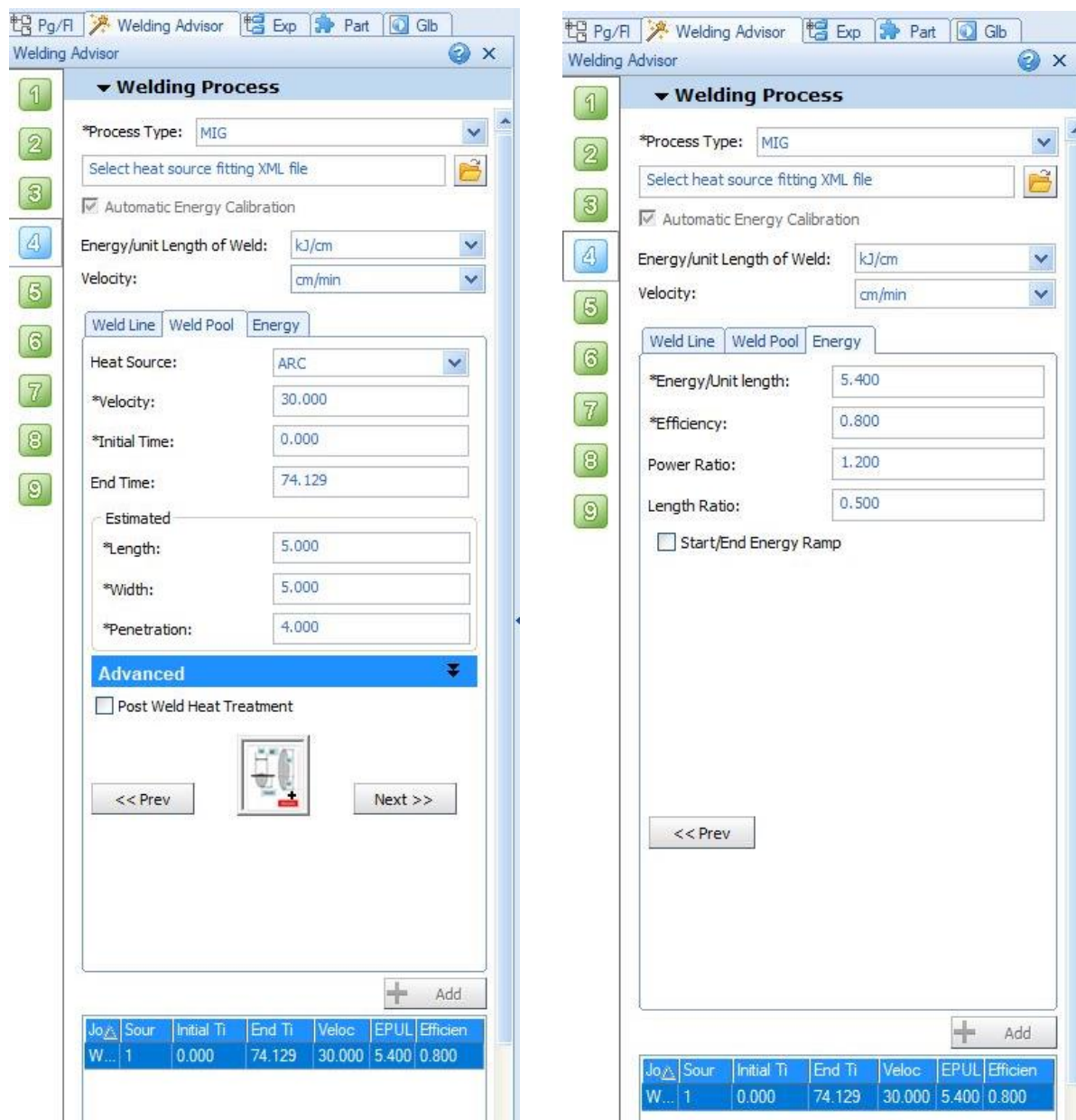


Slika 45. Component Properties

Sljedeći, odnosno 4. korak je *Welding Process*. U njemu se najprije bira postupak zavarivanja (u ovom slučaju MIG), te pod opcijom *Weld Line* bira se zavar koji će se definirati. Zatim pod opcijom *Weld Pool* unosimo brzinu zavarivanja te grubu procjenu dimenzije zvara. Zadnje što se definira u 4. koraku se nalazi pod opcijom *Energy* gdje se unosi toplina. Na temelju brzine zavarivanja, jakosti struje, naponom i faktorom iskoristivosti koja je za korišteni postupak (MIG/MAG: $\eta=0,8$) izračunava se unos topline po sljedećoj formuli:

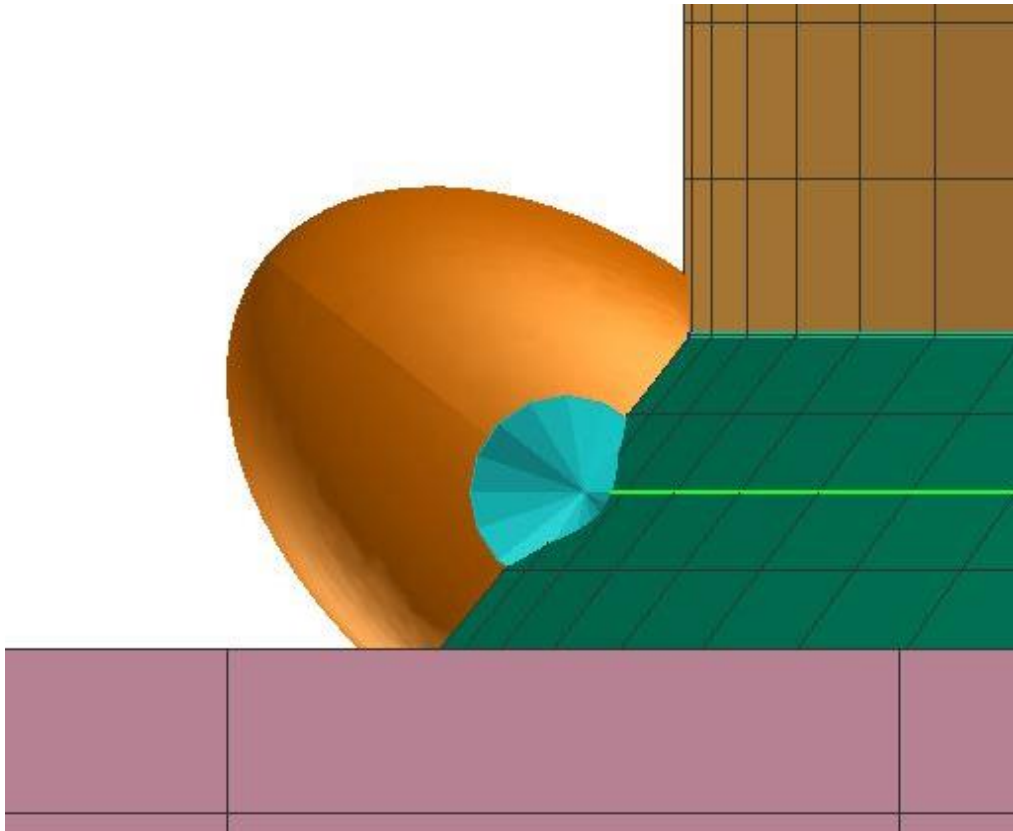
$$Q = \frac{U * I}{v} * \frac{60}{1000} * \eta \quad , \frac{\text{kJ}}{\text{cm}} \quad (1)$$

Na sljedećoj slici 46. su prikazani parametri za kružni zavar koji su ekvivalentni parametrima koji su se koristili u stvarnosti.



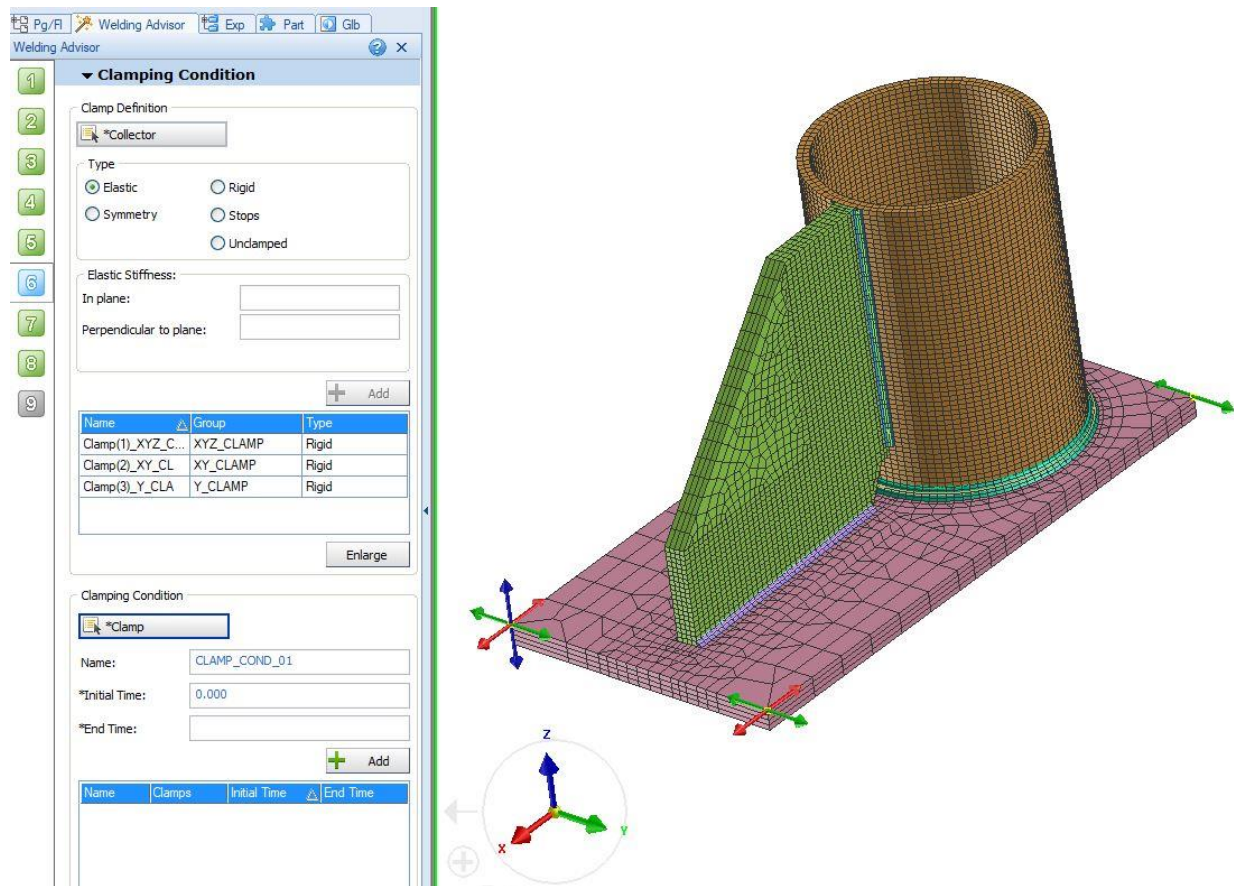
Slika 46. Welding Process

Kako izgleda površina unosa topline može se vidjeti na sljedećoj slici 47. Vrlo je važno da unos topline pokrije cijelu površinu zavara kako bi kalibracija topline bila što preciznija modelu iz stvarnosti.



Slika 47. Unos topline kod kružnog zavora

U petom koraku ubacuje se kolektor „*AIR SKIN*“, koji se prethodno definirao u *Visual – Mesh* modulu. Šesti korak traži da se komad stegne kako se ne bi pomicao tijekom zavarivanja. Izabire se naredba *Rigid* gdje se označavaju osi te se ubacuju odgovarajući kolektori, odnosno kolektori s ekstenzijom „*_CLAMP*“ koji su se također kreirali u prethodnom modulu. Time su se ograničila gibanja radnog komada po osima x, y, z. Mjeste gdje se stegnuo kolektor vide se na sljedećoj slici 48.



Slika 48. Clamping Condition

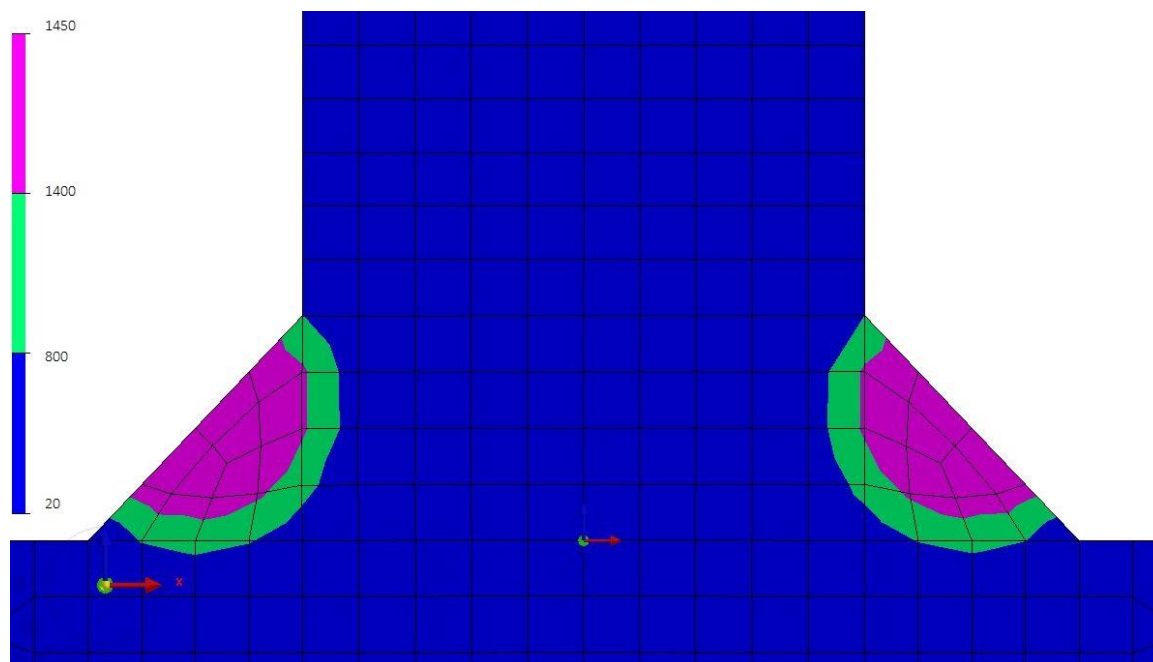
Sedmi i osmi korak se preskaču jer neke dodatne parametre, opterećenja na konstrukciji i dodatna pomagala nisu bila korištena u ovom eksperimentalnom radu.

U zadnjem, odnosno u 9. koraku se definira temperatura okoliša, tj. radnog komada prije zavarivanja, pošto nije bilo predgrijavanja pretpostaviti će se da je temperatura radnog komada iznosila oko 20 °C. Sljedeće što se u tom koraku radi je *Generate Input Data* te zatim *Solve* gdje se odabire model koji se spremio u prvom koraku. Ako su se svi prethodni koraci uspješno izveli pokreće se simulacija sa zadanom kalibracijom topline te parametrima zavarivanja. Rezultati simulacije se vide u sljedećem modulu „*Visual – Viewer*“.

8.5.3. *Visual - Viewer*

Nakon završetka simulacije pokreće se modul „*Visual-Viewer*“, gdje će se analizirati rezultati koji su se definirali u prošla dva modula. Modul *Visual Weld* generirao je dva osnovna tipa datoteka, a to su datoteke s nastavkom *.fdb* (za „*Sysweld-Environment*“), te datoteke s nastavkom *.erfh5* koje će se koristiti za ovaj rad, odnosno vezane su za „*Visual-Environment*“. Također unutar *.erfh5* razlikuju se datoteke koje u svom imenu sadrže dio „*POST1000*“ ili „*POST2000*“, a upravo ti dijelovi imena sugeriraju da li se radi o rezultatima toplinsko-metalurške (*POST1000*) ili mehaničke analize (*POST2000*).

Kako bi se otvorili rezultati toplinsko metalurške analize otvara se datoteka s ekstenzijom *_V_POST1000.erfh5* gdje je moguće vidjeti raspored temperatura svih točaka radnog komada u svakom trenutku procesa. Budući da se simulacija provodi s ciljem kalibracije izvora topline, potrebno je prikazati raspored temperature u zoni zavarivanja neposredno nakon početka zavarivanja svakog prolaza. Rezultati se prikazuju pomoću opcije *Results* gdje se odlazi u naredbu *Contour*. Zatim će se otvoriti prozor unutar naredbe gdje će se izabrati stupac *Temperature_NOD* te se kod opcija pod stupcem *Advance* izabire mjerenje samo maksimalnih vrijednosti. Radi lakšeg uočavanja zone pretaljivanja i zone utjecaja topline, potrebno je prilagoditi raspon vidljivih temperatura. Pod opcijom *Sections* te naredbom *Section Cut* mogu se pomicati ravnine te se tako može doći točno u ravninu gdje se vadio makroizbrusak te se usporediti rezultati. Npr. selektiranjem ravnine *YZ* može se doći točno u ravninu gdje se vadio makroizbrusak (2). Na sljedećoj slici 49. je prikazana kalibracija topline u ravnini makroizbruska (2).



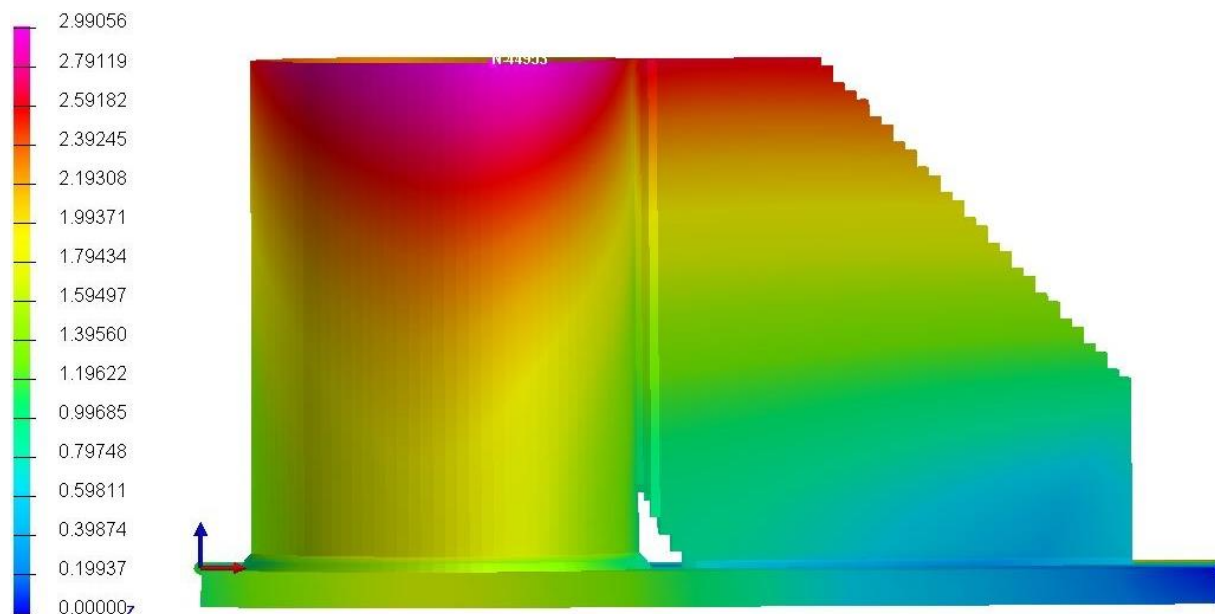
Slika 49. Kalibracija topline u ravni makroizbruska (2)

Pošto je granica tališta austenitnog nehrđajućeg čelika između 1400 °C i 1450 °C ta temperatura će predstavljati rastaljenu zonu (ljubičasta boja), a temperatura između 800 °C i 1400 °C zonu utjecaja topline (zeleno boja). Usporedbom makroizbruska (2) s slike 39. i rezultata dobivenih u *Visual – Viewer-u*, može se zaključiti da su prolazi adekvatno kalibrirani, tj. da zona pretaljiivanja i zona utjecaja topline u simulaciji odgovara makroizbrusku (2).

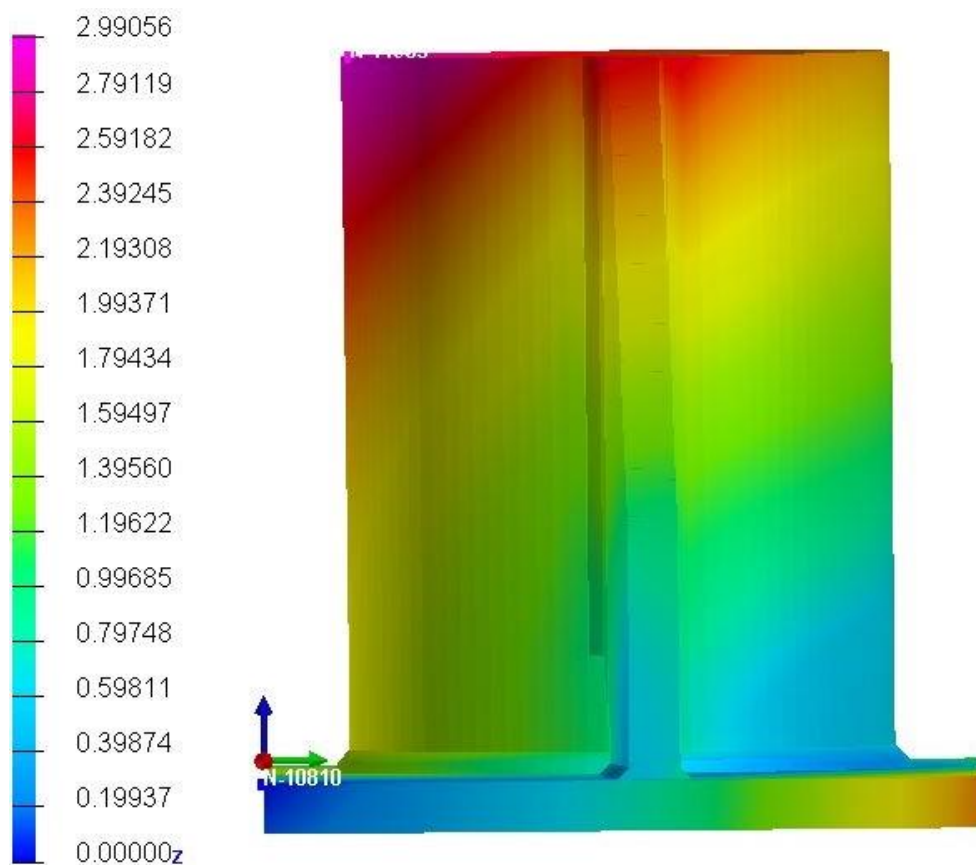
Kako bi se provjerile deformacije konstrukcije otvara se datoteka s ekstenzijom *_V_POST2000.erf5*, koja sadrži rezultate o mehaničkoj analizi konstrukcije. Rezultate koje je moguće očitati su različite vrste zaostalih napreznja i deformacija, te raspon čvrstoća kroz radni komad. U svakom trenutku procesa mogu se očitati vrijednosti navedenih rezultata. Tako se vrlo lako mogu utvrditi kritična područja gdje su deformacije najveće.

Primarni cilj ovog zadatka je da se na numeričkom modelu provedu odgovarajuće analize s ciljem dobivanja ukupne deformacije konstrukcije te dobivene rezultate usporediti s izmjerenim vrijednostima na stvarnoj konstrukciji.

Slika 50. i slika 51. prikazuju dobivene deformacije nakon simulacije zavarivanja i ohlađivanja konstrukcije.



Slika 50. Deformacije ploče iz pogleda (1)



Slika 51. Deformacije ploče iz pogleda (2)

Na slikama se vidi kako su se ploče deformirale u očekivanom smjeru te se pomoću skale mogu jasno definirati deformacije u svakoj točki. Maksimalni iznos deformacije je na gornjem kraju cijevi i iznosi 2,99 mm. Što se tiče deformacije u donjoj ploči gdje se vršilo mjerenje, zaključuje se kako deformacije u pogledu (2) odgovaraju stvarnim vrijednostima ($\approx 2,6$ mm), dok deformacije u pogledu (1) svojim rezultatima znatno odstupaju od realnog modela.

Mogući razlozi tolikog odstupanja su:

1. Neadekvatan model - model se pojednostavio kod vrlo složenih geometrija (presijecanje kružnih i pravokutnih elemenata) na složenim rubovima kako bi svi elementi bili spojeni.
2. Gustoća mreže - većim brojem konačnih elemenata u ZUT dobiva se veća točnost rezultata. U tim zonama mreža je mogla biti duplo sitnija (veći broj elemenata).
3. Kalibrirani izvor topline - prolazi koji su dobiveni u simulaciji su vrlo slični stvarnima, no razlike se ipak mogu uočiti. Problem se javlja pošto simulacija ne uzima u obzir ponašanje električnog luka (zaštitni plin, promjenjivu duljinu električnog luka itd.)
4. Odvođenje topline - simulirano odvođenje topline ne odgovara stvarnom odvođenju topline jer se kod numeričke simulacije model nalazi u „zraku“ dok je kod stvarnog zavarivanja model stegnut na čelični radni stol.
5. Stanje materijala - nemogućnost utvrđivanja stanja materijala prilikom isporuke, odnosno jeli bilo kakvih unutarnjih naprezanja u materijalu. Također deformacije koje su se vjerojatno pojavile tijekom plazma rezanja nisu uzete u obzir.
6. Temperatura - pretpostavilo se da je temperatura okoline oko 20 °C, no temperatura okoline je bila za desetak stupnjeva veća. Taj parametar je također rezultirao pogrešku.
7. Mikrostruktura - pod opcijama nije bio pristup adekvatnom materijalu te su uvršteni podaci materijala koji ima njemu najbližnja svojstva (X5CrNi1810). Također osnovni materijal i dodatni materijal u stvarnosti nisu bili od istog materijala.

Nesukladnost rezultata moguće je kompenzirati provođenjem većeg broja simulacija koristeći drugačije ulazne podatke, no veliki faktor koji nas ograničava prilikom simulacija je vrijeme. Za kompletan završetak simulacije potrebno je oko 48 sati rada računala. Rješenje se pronalazi eventualno u „Cluster“ računalu pošto osobno računalo nije praktično u slučaju tako velike konstrukcije, odnosno preciznije modela koji se sastoji od 50 000 konačnih elemenata.

9. ZAKLJUČAK

Već se prije u teorijama govorilo kako je zavarivanje nehrđajućeg čelika vrlo problematično. Deformacije koje se javljaju kod zavarivanja većih konstrukcija su neizbježne, no kako njih u korijenu spriječiti će biti problematika koja još dugo neće biti istražena. Najveći problem se javlja zbog njegovih fizičkih svojstva, a to je vrlo sporo provođenje topline te dugo zadržavanje iste. Zbog tih čimbenika javljaju se naprezanja koja uzrokuju deformacije. Danas postoje brojni načini koji se primjenjuju u svrhu smanjenja zaostalih naprezanja i deformacija. Većinom se tu govori o konstrukcijsko - tehnološkim rješenjima, odnosno da se unaprijed predvidi tijek deformiranja, tj. da se konstrukciju dovede u unaprijed željeni položaj. Upravo zbog tih razlika razvio se i programski paket, na kojem se u jednu ruku i bazirao ovaj diplomski rad, *Visual Environment*.

Visual Environment je jedan vrlo zahvalni programski paket koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Tako taj program numeričkim metodama izvodi cijelu simulaciju zavarivanja uz ulazne parametre. Cilj je da se unaprijed otkriju pogreške koje se mogu javiti pogotovo kod materijala koji su osjetljivi u zavarivanju i kompleksnim konstrukcija. No ipak u ovom radu nisu dobiveni točni rezultati zbog: neadekvatnog modela, nedovoljno guste mreže, kalibracija izvora topline, odvođenja topline, stanja materijala, temperature, mikrostrukture materijala i brojnih drugih čimbenika koji mogu utjecati na preciznost rezultata.

Iz rada se naslućuje kako je napraviti uspješnu simulaciju izrazito kompleksan i dugotrajan postupak. Zbog toga se zaključuje kako numerička simulacija nije ekonomski primijenjena za jednostavne komade, nego samo kod složenih konstrukcija gdje svaka mala pogreška može značiti katastrofalne posljedice.

LITERATURA

- [1] "Povijesni razvitak materijala", www.riteh.uniri.hr, 2011.
- [2] <http://www.portlandworks.co.uk/portland-works-and-the-invention-of-stainless-steel/>
- [3] Stoja Rešković, „Ispitivanje materijala”, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.
- [4] "Specijalni čelici", skripta - Sveučilište u Zagrebu.
- [5] <http://www.acroni.si/en/?subpageid=3>
- [6] "Tehnička enciklopedija", glavni urednik Hrvoje Požar, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [7] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2011.
- [8] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod 1998.
- [9] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, Seminar: Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula 2007.
- [10] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>
- [11] Mateša B., Samardžić I., Dunder M.: Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, Slavonski Brod, 2011.
- [12] Juraga I., Šimunović V.: Utjecaj obrade površine zavarenih spojeva od nehrđajućih čelikana povećanje korozijske postojanosti, Zbornik radova međunarodnog savjetovanja: Ekonomski i kvalitativni aspekti visokoučinskih postupaka zavarivanja, Slavonski Brod, 2001.
- [13] Lukačević Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod 1998.
- [14] Kožuh S.: Skripta – Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [15] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, Seminar: Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula 2007.
- [16] Miller Duane K.: Welding Inovation vol. XIV - Use Undermatching Weld Metal Where Advantageous; 1997.
- [17] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.
- [18] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [19] Miller, Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), USA, 04.2012.
- [20] G. Brumec: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010.
- [21] Garašić I.: MIG/MAG zavarivanje, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje

- [22] *Jurica M.: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.*
- [23] *M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294*
- [24] *S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.*
- [25] <https://www.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/index3.html#wires>
- [26] *Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.*
- [27] *Colegrove, P.; Williams, S.; Nagy, T.; Pirling, T.; The welding process impact on residual stress and distortion; Science and Technology of Welding and Joining*
- [28] *Živčić M., Remenar I.: Zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, Zagreb, 1972.*
- [29] *"Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža*
- [30] *Bauer B.: Postupci spajanja (Zaostala naprezanja i deformacije) – predavanje, FSB Zagreb*
- [31] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/welding-how-to/pages/weld-distortion-detail.aspx>,
- [32] *Grbin M., Vukšić J.: Toplinska obrada materijala prije i nakon zavarivanja, Seminar: Novine u tehnologiji zavarivanja i srodnim tehnikama, Pula, 2010.*
- [33] *Juraga I., Tivčić M., Gracin M.: Reparaturno zavarivanje, Zagreb, 1994*
- [34] *J. Sorić, „Metoda konačnih elemenata“, Golden Marketing –Tehnička knjiga; Zagreb, 2004*
- [35] http://www.lusas.com/pdf/CS502_FEA_of_Structural_Steelwork_Beam_to_Column_Bolt_ed_Connections.PDF
- [36] <http://www.ekom.sk/en/products/sheet-metal-processing/technology/welding/>
- [37] <http://www.varstroj-s.rs/vps-4000-digit.php>
- [38] <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/56/>

PRILOZI

- I. CD-R disc