

Primjena programa Visual-Weld za određivanje optimalnog unosa topline

Vidranski, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:235:461830>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Denis Vidranski

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Denis Vidranski

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. te asistentima dr.sc. Matiji Bušiću, dipl.ing., dr. sc. Maji Remenar, mag. ing. na savjetima, vođenju, pomoći i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada.

Denis Vidranski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 19-09-2018 Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-311

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DENIS VIDRANSKI** Mat. br.: **0035191759**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA PROGRAMA VISUAL-WELD ZA ODREĐIVANJE OPTIMALNOG UNOSA TOPLINE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF VISUAL-WELD SOFTWARE FOR DETERMINATION OF OPTIMAL HEAT INPUT**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu obraditi primjenu numeričkih simulacija koje se koriste pri oblikovanju zavarenih konstrukcija. Navesti nekoliko primjera programskih aplikacija koje su komercijalno dostupne za takvu namjenu te detaljnije opisati njihove mogućnosti. Proučiti utjecaj unosa topline na mikrostrukturu zavara i mehanička svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za odgovarajuću debljinu materijala za T- spoj limova od nelegiranih konstrukcijskih čelika odrediti unos topline pri zavarivanju MAG postupkom koji rezultira maksimalno dozvoljenom tvrdoćom 380 HV 10 pomoću programske aplikacije Visual-Weld 11.0. Rezultate usporediti sa postojećim podacima iz literature i donijeti zaključke o primjenjivosti programske aplikacije Visual Weld 11.0.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc Ivica Garašić

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. NUMERIČKE SIMULACIJE U ZAVARIVANJU	3
2.1. Primjena numeričkih simulacija u zavarivanju	3
2.2. Metoda konačnih elemenata.....	5
2.3. Visual-Weld 11.0 (Sysweld).....	6
2.3.1. Mogućnosti "Visual-Weld-a"	7
2.4. Ostali programi za numeričku simulaciju zavarivanja.....	8
2.4.1. Simufact.welding	8
2.4.2. PAM-ASSEMBLY	9
2.4.3. SORPAS	9
3. NELEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI	11
4. ZAVARIVANJE ČELIKA.....	15
4.1. Metalurgija zavarivanja.....	15
4.2. Reakcije plinova s rastaljenim metalima	17
4.3. Zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika	21
4.4. Promjene tvrdoće i hladne pukotine u zoni utjecaja topline	24
5. ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNIH I INERTNIH PLINOVA	26
5.1. Dodatni materijal za MAG zavarivanje	28
5.2. Prijenos metala električnim lukom pri MAG zavarivanju	29
6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	31
6.1. Simulacija zavarivanja T - spoja.....	31
6.1.1. Visual – Mesh	31
6.1.2. Visual Weld	37
6.1.3. Visual Viewer	45
7. ZAKLJUČAK.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.	Izgled modela nastalog MKE [3]	5
Slika 2.	Grafičko korisničko sučelje "Simufact.welding-a" [7]	8
Slika 3.	Prikaz reprezentativnih dijelova analiziranih PAM-ASSEMBLY-om [7].....	9
Slika 4.	Prikaz korisničkog sučelja SORPAS-a [8].....	10
Slika 5.	Tipična feritno - perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika [10]	12
Slika 6.	Shematski prikaz zavarenog spoja [11].....	15
Slika 7.	Utjecaj temperature na strukturu zavarenog spoja ugljičnog čelika s 0,2%C [11]	16
Slika 8.	Dijagram topljivosti vodika u željezu[11].....	19
Slika 9.	a) Dio dijagrama stanja Fe-N b) Dijagram topljivosti dušika u željezu [11]	21
Slika 10.	Shematski prikaz uređaja (a) i procesa MIG/MAG zavarivanja (b) [11].....	26
Slika 11.	Izgled modela koji se koristi za simulaciju	32
Slika 12.	Kreiranje kolektora osnovnog materijala gornje ploče	33
Slika 13.	Kolektori osnovnog i dodatnog materijala	34
Slika 14.	Odabir elemenata bitnih za kolektor unosa topline	34
Slika 15.	Kreiranje kolektora izmjene topline	35
Slika 16.	Definiranje kolektora izmjene topline	36
Slika 17.	Izgled kolektora za izmjenu topline (ljuskasti model)	36
Slika 18.	Točke stezanja	37
Slika 19.	Početne točke trajektorije (Rs) i referentne linije (Ws).....	38
Slika 20.	Trajektorija i referentna linija prvog zavara.....	39
Slika 21.	Prvi korak "Welding Advisor-a"	40
Slika 22.	Odabir vrste materijala popune	41
Slika 23.	Definiranje četvrtog koraka simulacije	42
Slika 24.	Definiranje uvjeta hlađenja	43
Slika 25.	Uvjeti stezanja radnog komada	44
Slika 26.	Definiranje devetog koraka simulacije.....	44
Slika 27.	Početak simulacije.....	45
Slika 28.	Datoteke rezultata.....	46
Slika 29.	Opcija odabira rezultata za tvrdoću.....	47
Slika 30.	Raspodjela tvrdoće radnog komada nakon zavarivanja	48
Slika 31.	Raspodjela tvrdoće radnog komada nakon zavarivanja 2	48

POPIS TABLICA

Tablica 1	Topljivost vodika u željezu [11].....	18
Tablica 2	Temperatura predgrijavanja pri zavarivanju nelegiranih čelika [11]	22

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CAD		Computer Aided Design
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG/MAG		Metal Inert Gas/Metal Active Gas
EPP		Zavarivanje pod zaštitom praška
TIG		Tungsten Inert Gas
ZUT		Zona utjecaja topline
MKE		Metoda konačnih elemenata
ESI		Engineering System International
ZT		Zona taljenja
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
C		Ugljik
Mn		Mangan
Mo		Molibden
V		Vanadij
Ni		Nikal
Cu		Bakar
Si		Silicij
H ₂ O		Voda
CO ₂		Ugljikov dioksid
O ₂		Kisik
FeO		Željezov oksid
Fe ₃ O ₄		Magnetit
Fe ₂ O ₃		Hematit

SAŽETAK

U ovom završnom radu zadatak je ispitati primjenu numeričkih simulacija koje se koriste kod oblikovanja zavarenih konstrukcija, konkretno ispitati primjenjivost programske aplikacije "Visual Weld".

U početnom, teoretskom dijelu ovog završnog rada ukratko je obrađena aplikacija "Visual Weld", njene mogućnosti, nakon toga su obrađene postojeće vrste nelegiranih konstrukcijskih čelika, odnosno njihova zavarljivost, te su na kraju ovog teoretskog dijela opisani MAG postupci zavarivanja.

Eksperimentalni dio ovog završnog rada proveden je na računalu, u ranije spomenutoj programskoj aplikaciji "Visual-Weld" u svrhu određivanja odgovarajućeg redoslijeda zavarivanja MAG postupkom, za T-spoj limova od nelegiranog konstrukcijskog čelika, koji će rezultirati prihvatljivom tvrdoćom ispod 380 HV10.

Ključne riječi: tehnologija zavarivanja, simulacija, MAG, Visual Weld 11.0, nelegirani konstrukcijski čelik, zavarljivost

1. UVOD

Zavarivanje u današnje vrijeme predstavlja jednu od najvažnijih tehnologija spajanja dvaju ili više, istih ili različitih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala, u cilju dobivanja homogenog zavarenog spoja. Zavarivanje pritiskom je spajanje metalnih dijelova pritiskom, sa ili bez lokalnog zagrijavanja, uglavnom bez korištenja dodatnog materijala. Zavarivanje taljenjem je spajanje metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spajanja, sa ili bez dodatnog materijala, najčešće bez djelovanja pritiska ili udaraca. Ovisno o materijalima koji se zavaruju, o traženoj brzini zavarivanja, odnosno produktivnosti, penetraciji i ostalim zahtjevima, danas su razvijeni različiti postupci zavarivanja (npr. REL, MIG/MAG, TIG, EPP, lasersko zavarivanje itd.).

Zavarivanje je vrlo složen proces koji često rezultira promjenama u samom materijalu i njegovoj mikrostrukturi, zbog toga što se prilikom zavarivanja u materijal unose velike količine topline. Unosom topline materijal je podvrgnut nagloj promjeni temperature, odnosno brzom zagrijavanju i naknadnom hlađenju. Upravo je to glavni razlog promjene mikrostrukture materijala u zavarenom spoju i u zoni utjecaja topline. Promjena mikrostrukture direktno utječe na promjenu svojstva materijala, dakle svojstva zavarenog spoja i materijala u zoni utjecaja topline razlikuju se od svojstava osnovnog materijala, a najčešće su svojstva materijala zavara lošija od osnovnog materijala. Često se poduzimaju razne aktivnosti poput predgrijavanja, kako bi se razlike u svojstvima i mikrostrukturi spriječile. Osim promjene mikrostrukture i svojstva materijala, zbog unosa topline može doći i do pojave zaostalih naprezanja i deformacija zavarenih konstrukcija.

Potrebno je napomenuti da kod zavarivanja postoji veliki broj utjecajnih čimbenika koji određuju kvalitetu zavara te kvalitetu i sigurnost konstrukcije, stoga je nužno da tehnolog zavarivanja posjeduje znanje i iskustvo kako bi mogao odrediti odgovarajuće parametre zavarivanja za određenu, specifičnu situaciju. No, prije samog zavarivanja neke konstrukcije provode se eksperimenti kako bi se odredili potrebni parametri zavarivanja koji će rezultirati zadovoljavajućom kvalitetom zavarenog spoja, upravo zbog toga da bi tehnolog zavarivanja potvrdio i provjerio svoje odluke zbog sigurnosti konstrukcije i smanjenja opasnosti.

Dakle, može se zaključiti da su prijeko potrebni eksperimenti kojima se utvrđuju odgovarajući parametri, u cilju zamjene tih nerijetko skupih i dugotrajnih eksperimenata počele su se upotrebljavati numeričke simulacije u svrhu procjene tvrdoće, svojstava

materijala, zaostalih naprezanja, deformacija i drugih mogućih problema i pokazatelja koji se javljaju kod zavarivanja. Različitim programima za simulaciju zavarivanja nastoji se simulirati proces zavarivanja, tj. greške i promjene koje nastaju u materijalu prilikom i nakon izvođenja samog procesa, te promjenom parametara doći do optimalnog rješenja. Iako je često potrebno napraviti mnogo iteracija, ispravaka i utrošiti puno vremena, takav pristup smanjuje troškove, ali sa shvaćanjem i prihvaćanjem rješenja treba biti oprezan. Računalni program ne uzima u obzir sve realne uvjete koji se mogu pojaviti prilikom postupka zavarivanja, pa zbog toga nakon provođenja simulacije, treba provesti eksperiment kako bi se dodatno ispitala dobivena rješenja.

Provođenje simulacije zavarivanja nije moguće bez korištenja metode konačnih elemenata (MKE), a problem korištenja simulacije i metode konačnih elemenata je dugo vrijeme koje je potrebno da se simulacija provede. Kod crtanja CAD modela dovoljno je definirati samo površine promatranog elementa, što za računalne programe koji simuliraju proces zavarivanja nije dovoljno, jer oni zadiru ispod površine elementa. Potrebno je kreirati model koji se sastoji od konačnog broja elemenata. Prilikom simulacije, raznim diferencijalnim jednadžbama i varijacijskim formulama opisuje se stanje pojedinog elementa i promjene koje se prilikom nekog postupka događaju. Ove formule vrlo su komplicirane i zahtjevne, pa tako predstavljaju veliko opterećenje za računalni sustav. Iz tog razloga je potrebno pažljivo odabrati veličinu, odnosno količinu konačnih elemenata, kako bi se dobilo zadovoljavajuće rješenje uz prihvatljivo vrijeme simulacije. Poželjno je, gdje god je to moguće, zamijeniti 3D modele s 2D modelima, u određenim situacijama koristiti kombinaciju 3D modela i ljuskastih modela, čime se smanjuje broj elemenata, jer je cilj pronaći kompromis između zadovoljavajuće veličine i količine konačnih elemenata i vremena potrebnog za simulaciju. Numerička simulacija zavarenih konstrukcija sastoji se od mehaničke i toplinsko-metalurške analize.

2. NUMERIČKE SIMULACIJE U ZAVARIVANJU

2.1. Primjena numeričkih simulacija u zavarivanju

Numeričke simulacije u zavarivanju koriste se tijekom pripreme tehnologije zavarivanja određenog dijela ili konstrukcije te kao pomoć pri optimiranju bitnih parametara zavarivanja. Kao što je ranije spomenuto, zavarivanje je bitna, ali i složena tehnologija gdje je izbor pravilnih parametara vrlo bitan za svojstva i kvalitetu zavarenog spoja. Korištenjem numeričkih simulacija u zavarivanju smanjuje se potrebn broj eksperimenata, varijanta, prototipova i vrijeme pripreme za određeni proces zavarivanja. Samim time se smanjuju investicijski troškovi kao i troškovi proizvodnje. Osim smanjivanja troškova, prilikom određivanja optimalnih parametara, programi za simuliranje procesa zavarivanja često predviđaju moguće probleme poput deformacija i zaostalih naprezanja u konstrukcijama koje se zavaruju.

U toku simulacije moguće je izmijeniti određene parametre i na taj način vidjeti što bi se dogodilo ukoliko se pogriješi u određivanju parametara, odnosno namjerno počinjenom pogreškom moguće je uvidjeti posljedice na svojstva zavara i ZUT-a. Pružanjem različitih mogućnosti tijekom numeričke simulacije stječe se uvid i u ponašanje zavarenog spoja tijekom i nakon zavarivanja. Kao što je ranije spomenuto, moguće je saznati ponašanje materijala prilikom provođenja procesa zavarivanja, što podrazumijeva različite deformacije, naprezanja, veličine kristalnih zrna, temperaturni raspon, udio pojedinih faza itd. Određivanjem ulaznih podataka direktno se utječe na samu simulaciju odabranog procesa i izlazne karakteristike. Nakon što se napravi simulacija, te se napravi određeni broj iteracija i izmjena, podaci se uspoređuju, evaloiraju i donosi se odluka o odabiru procesa, odnosno parametara [1].

Simulacija mjesta koja su interesantnija zahtjeva prikaz uz veću količinu manjih konačnih elemenata, a ona mjesta koja nisu od prevelike važnosti su prikazana manjom količinom većih elemenata, pri čemu se dobiva na uštedi vremena trajanja simulacije [1].

Izrada kvalitetnog programa za simulaciju tehnologije zavarivanja sastoji se od različitih bitnih potprograma. Osim korištenja metode konačnih elemenata, potrebno je koristiti potprograme i baze podataka za proračun parametara, za procjenu troškova

zavarivanja, normativa procesa zavarivanja, za izračune unosa topline, tvrdoće, naprezanja i dr.

Pored tekućih rješenja tehnologija zavarivanja, u baze podataka se pohranjuje i značajnija dosadašnja uspješna rješenja tehnologije zavarivanja. Na taj se način mogu iskoristiti dosadašnja znanja i iskustva iz proteklih uspješnih zavarivačkih procesa. Ta se iskustva mogu uspješno koristiti i u novim procesima zavarivanja, pa se i na taj način mogu izbjeći neki nepotrebni troškovi i skratiti vrijeme potrebno za izradu tehnologije zavarivanja (npr. opsežne simulacije i istraživanja zavarljivosti, optimiziranje parametara zavarivanja, kritična mjesta procesa zavarivanja itd.) Isto tako, mogu se koristiti i u procesu izobrazbe osoblja o zavarivanju.

Korištenje numeričkih simulacija pomaže u [2]:

- Minimiziranju troškova proizvodnje,
- Smanjenju proizvodnih rizika u najranijoj fazi razvojnog ciklusa proizvoda,
- Minimiziranju deformacija,
- Izbjegavanju hladnih pukotina,
- Kontrolu i smanjenju tvrdoće i veličine zrna u zoni taljenja i ZUT-u
- Predviđanju veličine i distribucije zaostalih naprezanja i dr.

Numeričke simulacije zavarivanja danas pronalaze svoj značaj u autoindustriji, zrakoplovnoj industriji, brodskoj industriji, energetici itd. Razvitak i korištenje programa za simuliranje zavarivanja ubrzano raste, a programi koji se danas najviše koriste su:

- SORPAS (2D i 3D)
- Simufact.welding
- PAM ASSEMBLY
- Sysweld (Visual Weld 11.0, Visual Environment)
- ABAQUS

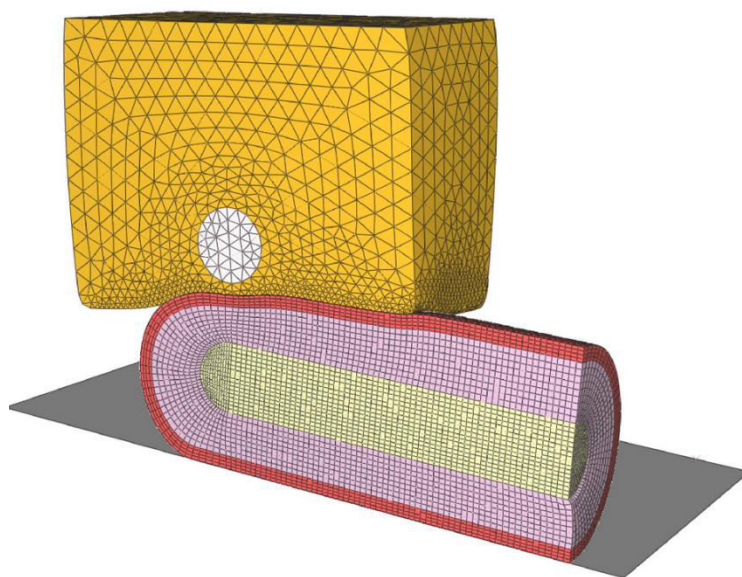
U ovom radu za simulaciju zavarivanja korištena je programska aplikacija "Visual-Weld 11.0" (koju je razvila MECAS ESI grupa) koja se nalazi u sklopu "Visual Environment-a". Unutar tog okruženja nalazi se mnoštvo drugih modula (potprograma), ali u sklopu ovog rada koriste se još i moduli "Visual-Mesh" (modul za kreiranje objekta) i "Visual-Viewer" (modul za prikaz rezultata simulacije). Numeričkom simulacijom u ovim programskim

aplikacijama ne simulira se ono što se događa u električnom luku već samo događanje u materijalu.

2.2. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je jedna od najpopularnijih numeričkih metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi.

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerička metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačno mnogo stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode gibanja. Područje kontinuuma dijeli se na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačnim elementima tj. od razmatranog kontinuuma stvara se mreža konačnih elemenata (Sl.1.). Konačni elementi su međusobno povezani u točkama na konturi koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu, primjerice deformacije, naprezanja, temperature, polje pomaka i druge veličine u problemu polja opisuju se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio realnom ponašanju kontinuiranog sustava. Pravilnom formulacijom konačnih elemenata, približavanje točnome rješenju raste s povećanjem broja konačnih elemenata, uzrokujući štetu većeg utroška vremena. Prilikom izvođenja algebarskih jednačbi polazi se od diferencijalnih jednačbi koje opisuju stanje u elementu ili se rabi varijacijska formulacija [3].



Slika 1. Izgled modela nastalog MKE [3]

Nakon izvođenja jednadžbi za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Uz pomoć izračunatih čvornih veličina moguće je primjenom poznatih teorijskih relacija odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanog kontinuiranog sustava. Složene konstrukcije zahtijevaju diskretizaciju s velikim brojem elemenata, stoga je potrebno riješiti sustav algebarskih jednadžbi s velikim brojem nepoznanica, što bi bez korištenja računala bilo teško moguće. Zbog toga za rješavanje problema primjenom metode konačnih elemenata prijeko potrebna je primjena računala, a što zahtijeva izradu odgovarajućih računalnih programa, koji su ranije navedeni u točki 2.1.

2.3. Visual-Weld 11.0

Sysweld je program za simulaciju zavarivanja i numeričku analizu MECAS ESI grupe. Sastavljen je od više vrsta potprograma koji se koriste za analizu u raznim granama strojarstva kao što su automobilska industrija, zrakoplovna industrija, ali i u općenito u samom procesu konstruiranja proizvoda koji je načinjen postupkom zavarivanja. Program Sysweld je vrlo kompleksan, pa se za komercijalnu upotrebu koristi sučelje Visual Environment (Visual-Weld).

Prihvatljivije je koristiti Visual Environment sučelje koje služi kao poveznica sa Sysweld-om koji i dalje obavlja sve potrebne izračune. Na taj je način omogućeno provesti simulacije ponašanja pojedinog proizvoda u raznim radnim okruženjima. Što se tiče zavarivanja, Visual Environment sadrži potprogram Visual-Weld (Slika 3.). U Visual-Weld-u je moguće provesti simulaciju zavarivanja modela koji je kreiran u Visual - Mesh-u s ciljem otkrivanja promjena u materijalu bez izvođenja mnogo eksperimenta i odnosno iteracija. Nakon provođenja simulacije, rezultati se očitavaju pomoću drugog modula koji se naziva Visual - Viewer. Na taj način moguće je dobiti raspored unosa topline, tvrdoća, udio faza za bilo koji dio materijala, deformacije te različita naprezanja nastala procesom zavarivanja [5].

U kasnijem eksperimentalnom dijelu rada korišten je potprogram Visual-Weld 11.0 u svrhu određivanja unosa topline pri zavarivanju MAG postupkom koji rezultira maksimalno dozvoljenom tvrdoćom 380 HV 10 , za nelegirani konstrukcijski čelik.

2.3.1. *Mogućnosti "Visual-Weld-a"*

Numerička simulacija zavarivanja Visual-Weld-om daje mogućnost [2]:

- Toplinsko-metaluršku analizu - temperaturna polja u konstrukciji koja se zavaruje vidljiva su u svakom trenutku. Vrlo važna je i mogućnost faznog prikaza dijagrama koji pokazuje vrstu mikrostrukture u konstrukciji u svakom trenutku zavarivanja
- Mehaničku analizu - moguće je provjeriti nastale deformacije te različite vrste naprezanja (ekvivalentna naprezanja pomoću Von Mises-ove formule, srednje vrijednosti naprezanja, itd.). Ako se konstrukcija sastoji od više zavara ili jedan zavara od više prolaza, moguće je provesti analizu nakon svakog pojedinog prolaza što omogućava detaljan uvid u proces.
- Provjera tvrdoće - moguća provjera tvrdoće za nelegirane konstrukcijske čelike

Također, program nudi široku bazu materijala, postupaka zavarivanja te različite mogućnosti grafičkih prikaza nakon simulacije. Osim što je u aplikaciji moguće provesti simulaciju zavarivanja, moguće je i provesti simulaciju toplinske obrade. Proces toplinske obrade vrlo je sličan procesu zavarivanja, promjene u materijalu su gotovo identične. Jedina razlika je što se kod toplinske obrade toplinski obrađuje cijeli radni komad, a ne samo dio komada kao kod zavarivanja [2].

2.4. Ostali programi za numeričku simulaciju zavarivanja

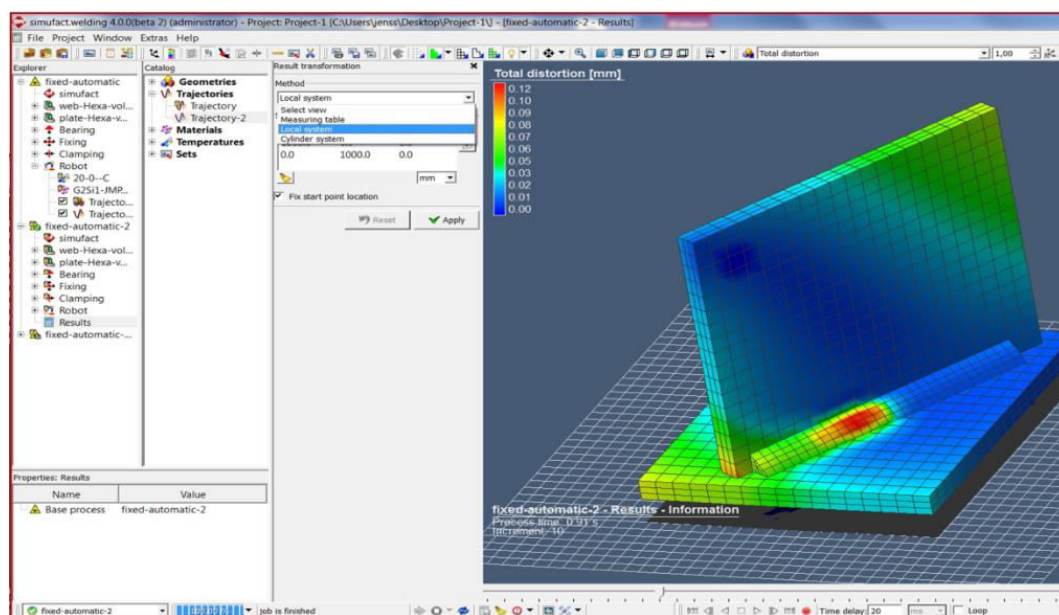
Osim ranije opisanog programa "Visual-Weld-a", kojim će se u eksperimentalnom dijelu izvršiti simulacija zadanog problema, postoji niz drugih programa za simulaciju tehnologije zavarivanja.

2.4.1. Simufact.welding

Simufact.welding je programska aplikacija razvijena od strane MSC-Software kompanije, koja se zasniva na metodi konačnih elemenata, a nudi mogućnosti poput izračuna napreznja nastalih tehnologijom zavarivanja, distorzije i promjenu svojstava materijala pomoću grafičkog sučelja [6].

Simufact.welding program za simulaciju zavarivanja pruža opsežnu kontrolu vjerodostojnosti i korištenje unaprijed definirane baze podataka. Simufact nastoji osloboditi korisnika od dugotrajnog unosa ulaznih parametara koji su potrebni na složenu analizu, te pridaje potpunu pozornost samom procesu zavarivanja. Dakle, ova programska aplikacija omogućava prikaz [6]:

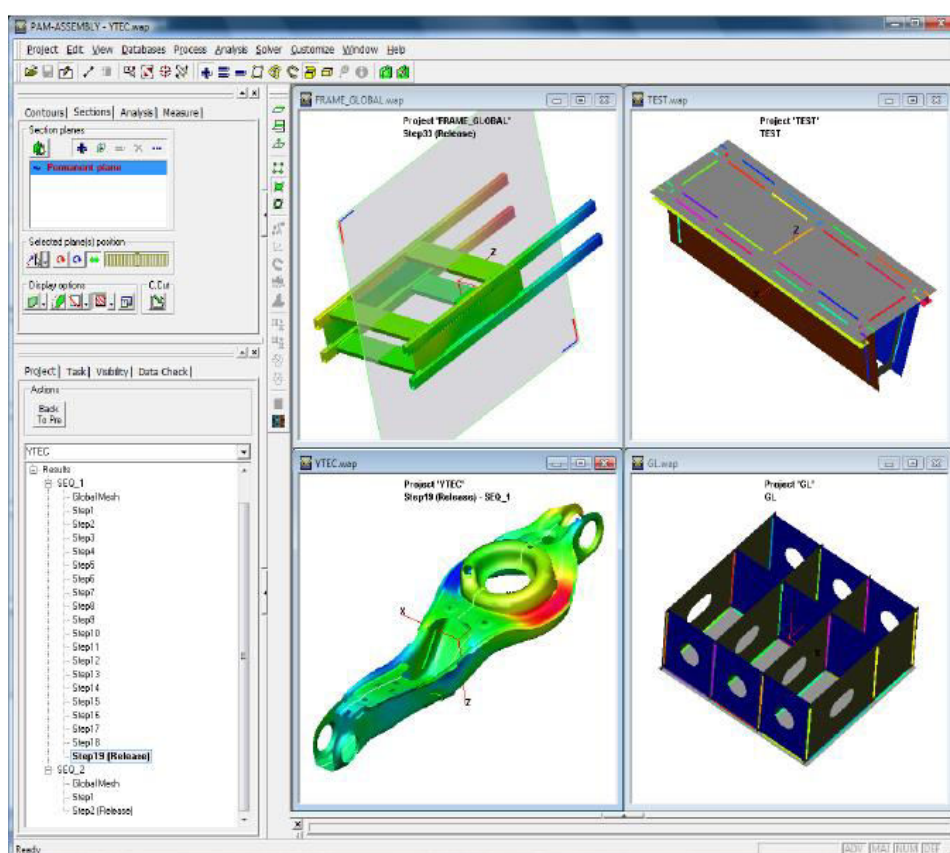
- temperatura
- zaostalih napreznja
- krivulja promjena na određenim točkama mjerenja s obzirom na početne podatke
- deformacija u presjecima za dio komponente ili cijelu komponentu u odnosu na početne podatke



Slika 2. Grafičko korisničko sučelje "Simufact.welding-a" [7]

2.4.2. PAM-ASSEMBLY

PAM-ASSEMBLY je programska aplikacija koja je također razvijena od strane ESI group, a primjenjuje se pretežno za velike konstrukcije. Ovaj simulacijski program je idealan za poboljšanje procesa zavarivanja i svojstava zavarenih konstrukcija. Ključna prednost PAM-ASSEMBLY-a je da pruža tehnologizima zavarivanja mogućnost brzog prepoznavanja smjera i veličine deformacije koja nastaje procesima zavarivanja, čime pruža pomoć kako bi se dobivene deformacije držale u određenim propisanim granicama, a ujedno i omogućava razvoj prikladnog plana zavarivanja. Ova programska aplikacija primjenjuje 'Local-Global' metoda za simulaciju efekata zavarivanja (najučinkovitija metoda za velike konstrukcije).



Slika 3. Prikaz reprezentativnih dijelova analiziranih PAM-ASSEMBLY-om [7]

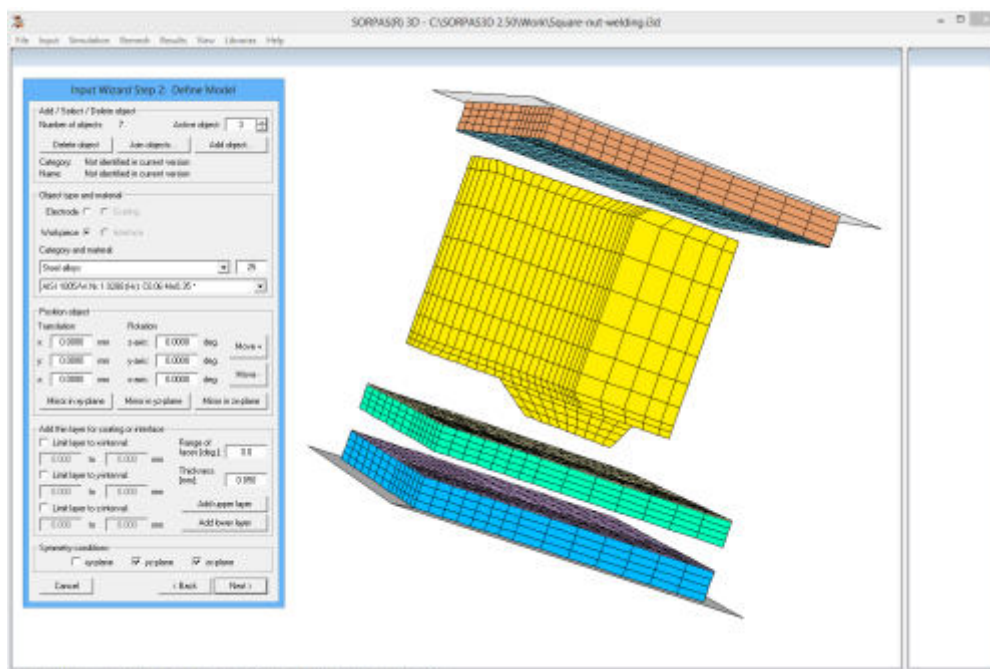
2.4.3. SORPAS

SORPAS je programska aplikacija koja služi za simulaciju i optimizaciju zavarivanja. SORPAS je integrirao znanja o zavarivanju sa numeričkim analitičkim tehnikama, čime je postao moćan alat za tehnologe zavarivanja. Ovaj program ima ugrađenu bazu podataka najčešće korištenih metalnih materijala uključujući sve vrste čelika, aluminijske legure, legure titana, legure bakra, nikla i metala visokih tališta kao što su volfram, molibden itd. Pruža

korisnicima mogućnost da sami dodaju i vlastite materijale. Ovom programskom aplikacijom moguće je simulirati dijelove zavara dimenzija u rasponu od veličine u milimetrima, pa do veličine nekoliko mikrona [8].

SORPAS aplikacija služi za simulaciju i optimizaciju pretežno elektrootpornog zavarivanja. U aplikaciji je moguće, za pojedini proces, izračunati raspodjelu struje i topline s obzirom na tip struje za zavarivanje i materijala, izračunati prijenos topline, promjenu svojstva materijala ovisno o temperaturi, vidjeti nastale deformacije, optimizirati struju zavarivanja itd. Postoji više verzija ove programske aplikacije, 2D i 3D verzija. SORPAS 3D je razvijen na bazi 2D programa, sa jednostavnim za korištenje grafičkim korisničkim sučeljem (GUI) i jasnim funkcijama za industrijsku primjenu elektrootpornog zavarivanja. U 3D verziji rezultati su pregledniji te je grafičko sučelje lakše za upotrebu. SORPAS 3D daje mogućnost simulacije složene i izazovne primjene elektrootpornog zavarivanja te je u sklopu tog programa posebno dizajniran i ugrađen novi program za ulazne podatke (eng. New Input Wizard), za bržu izgradnju i lakše upravljanje modelom, lakše postavljanje parametara zavarivanja, lakše programiranje kretanja elektroda i obradaka [9].

Prednosti ove programske aplikacije su smanjenje vremena plasiranja proizvoda na tržište, smanjuje troškove, ubrzavanje početka procesa proizvodnje, poboljšava kvalitetu zavara, povećavanje stabilnosti proizvodnje itd. [8].



Slika 4. Prikaz korisničkog sučelja SORPAS-a [8]

3. NELEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Kao što i sam naziv govori, ovi se čelici primjenjuju za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju - prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcije itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, poklopci, kućišta, ventili... [10]

Na temelju mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva [10]:

- a) Mehanička svojstva: visoka granica razvlačenja povezana s dovoljnom plastičnom deformabilnošću - istežljivošću. Poželjno je da površina ispod dijagrama "sila - produljenje" bude što veća radi sigurnosti od pojave krhkog loma.

Dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama - ovisno o visini temperature i opterećenja.

Dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama.

Otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja - dovoljna dinamička izdržljivost.

- b) Otpornost na trošenje: što manji gubitak mase
- c) Otpornost na koroziju: npr. korozijska postojanost u atmosferi ili u agresivnim tekućinama, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova
- d) Tehnološka svojstva: rezljivost (obradljivost odvajanjem čestica), zavarljivost, hladna oblikovljivost

Pojedine skupine konstrukcijskih čelika upravo posjeduju neka od gore navedenih istaknutih svojstava ili njihovu kombinaciju. Dublje poznavanje svojstava karakterističnih skupina čelika preduvjet je za njihovu pravilnu primjenu [10].

Od svih čelika najzastupljeniji su u proizvodnji (65...80% mase) pa i u primjeni za niz nosivih, pretežno zavarenih konstrukcija velike mase, kao što su npr. mostovi, dizalice, nosači, brodske konstrukcije, dijelovi vozila, oprema u industriji nafte i plina, a i neki i za tipične strojne elemente. Od tih se čelika u primjeni traži dovoljna nosivost i sigurnost što se želi ostvariti dovoljnom granicom razvlačenja, vlačnom čvrstoćom, tlačnom čvrstoćom,

smičnom čvrstoćom, žilavošću (udarni rad loma) - naročito pri nižim okolišnim temperaturama [10].

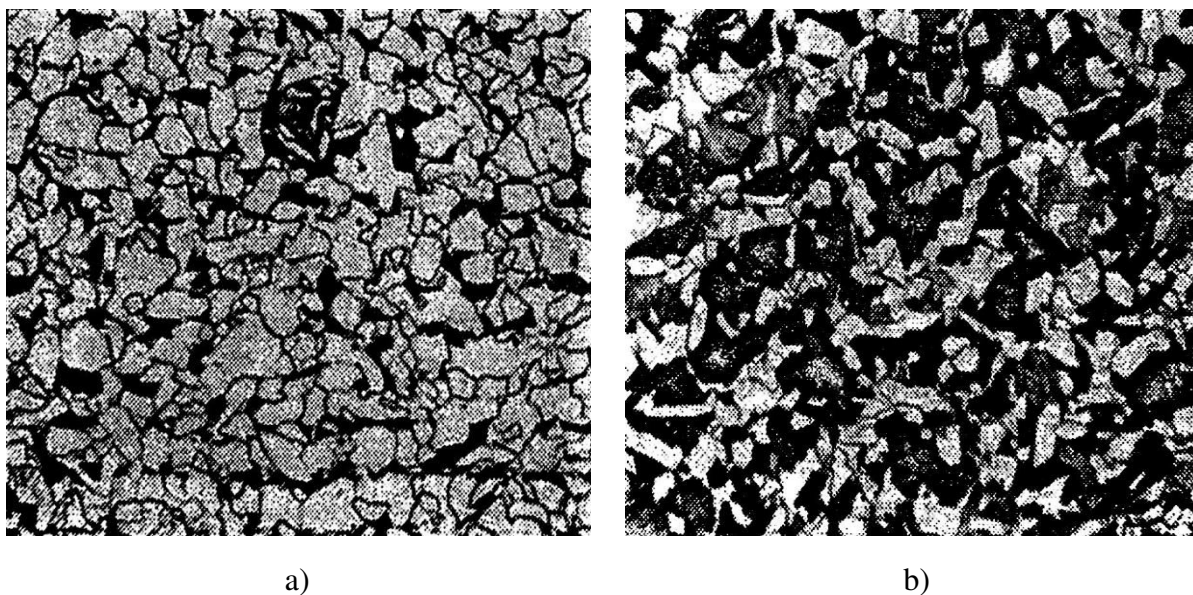
Od tehnoloških svojstava naročito je važna zavarljivost. Preduvjet dobre zavarljivosti je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e . Jedna od najčešće korištenih formula za C_e glasi:

$$C_e = \%C + (\%Mn)/4 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/10 \quad (1)$$

Znači da će zavarljivost biti tim bolja što je niži $\%C$ i što je niži stupanj legiranosti, jer legiranost povisuje prokaljivost, tj. opasnost od spontanog zakaljivanja. Prihvatljiva vrijednost je najčešće $C_e < 0,4$. Čelici s višim ugljičnim ekvivalentom zahtijevaju predgrijavanje, čime se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja.

Nelegirani čelici imaju feritno - perlitnu mikrostrukturu (Slika 6.). Zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja ili zavarivanja normaliziran. Sitnozrnatost se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminijski koji stvara aluminijski nitrid i sprječava rast zrna pri kasnijim ugrijavanjima [10].

Tipičnu mikrostrukturu nelegiranog konstrukcijskog čelika prikazuje slika 5.



Slika 5. Tipična feritno - perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika [10]

a) čelik s 0,1 %C

b) čelik s 0,25 %C

Kemijski sastav ovih čelika često nije propisan, ali su im zato zajamčena mehanička svojstva. Zbog nezajamčenog kemijskog sastava i višeg masenog udjela nečistoća nego kod ostalih čelika, kao i nehomogenosti u mikrostrukturi, nisu predviđeni za toplinsku obradu.

Isporučuju se u toplovaljanom stanju ili u normaliziranom stanju, a iznimno i u hladnodeformiranom stanju.

Za primjenu nelegiranih konstrukcijskih čelika odlučujuće su vrijednosti mehaničkih svojstava i zavarljivost. Vrijednosti mehaničkih svojstava ove skupine čelika kreću se u sljedećim rasponima [10]:

$$R_e = 190...370 \text{ MPa}$$

$$R_m = 330...700 \text{ MPa}$$

$$A_5 = 10 \dots 28 \%$$

Vrijednosti R_e ovise o dimenzijama (debljina), a tim su više što je viši %C i viši udio perlita u mikrostrukturi. Viša se čvrstoća postiže dodatkom Mn i Si te ostalih elemenata. Što je veći omjer Mn/C, to je veća žilavost (udarni rad loma) i to posebno pri nižim temperaturama (manja sklonost krhkom lomu). Viši maseni udio Mn povišuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Temperature uporabe su od -40 do +50 °C. Pri sniženim temperaturama povećana je opasnost od pojave krhkog loma. Otpornost na krhki lom biti će to viša što je niži maseni udio nečistoća i kod smirenih, odnosno posebno smirenih čelika [10].

Norme za nelegirane konstrukcijske čelike propisuju sljedeće karakteristike [10]:

- a) Orijentacijski kemijski sastav
- b) Mehanička svojstva:
 - R_e (minimalne vrijednosti),
 - R_m (raspon vrijednosti),
 - A_5 (minimalne vrijednosti),
 - KV
- c) Tehnološka svojstva: kut savijanja

Podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije [10]:

O S185 (Č0000) - čelik trgovačke kvalitete bez zajamčenih svojstava. Primjenjuje se za određene svrhe za niskoopterećene dijelove ili kao čelik za armirano-betonske konstrukcije.

A S235JRG1 (Č0270), S235JRG1(Č0370), S275JRG2 (Č0460) - Statički niže opterećene konstrukcije, spojene zakovicama i vijcima. Čelici su slabije zavarljivi.

B S235JRG2 (Č0261), S235JRG2 (Č0361), S275JRG2 (Č0461), S355JRG2 (Č0561) - Zajamčen udarni rad loma pri +20 °C. Primjenjuje se za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma.

C S235J0G3(Č0362), S275J0G3 (Č0462), S355J0G3 (Č0562) - posebno smireni čelici. Zajamčeni udarni rad loma pri 0 °C. Statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije.

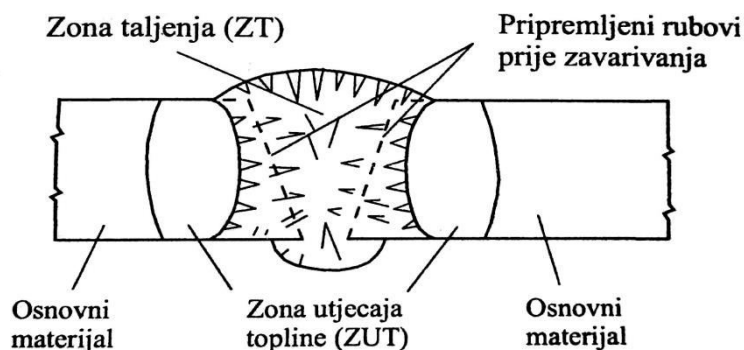
D S235J2G3 (Č0363), S275J2G3 (Č0463) i S355J2G3 (Č0563) - posebno smireni i normalizirani. Zajamčena je vrijednost udarnog rada loma od 27 J pri -20°C pa su čelici otporni na krhki lom. Statički i dinamički opterećene odgovorne zavarene konstrukcije i pri nižim temperaturama.

Zavarljivost čelika iz podskupina A, B, C, D osigurava niski maseni udio ugljika (<0,2%C) što je povoljno i zbog udarnog rada loma. Posebno su zanimljivi čelici najviše čvrstoće: S355JRG3 (Č0561), S355J0G3 (Č0562) i S355J2G3 (Č0563) iz podskupina B, C, D zajamčenog udarnog rada loma. Iako se kod njih ta visoka čvrstoća postiže dodatkom Mn (do 1,5 %) i Si (do 0,55%) oni se ne smatraju legiranim. Ovi čelici imaju viši omjer R_e/R_m , što povisuje njihovu zareznu osjetljivost - ako dođe do koncentracije naprezanja, manja je mogućnost da se ona razgradi putem plastične deformacije. Inače, lomna žilavost - KIC (otpornost naglom širenju napukline) kod ove je skupine čelika vrlo dobra. Čelici iz podskupina A, B, C, D pronalaze primjene u konstrukcijama u građevinarstvu (dizalice, mostovi, platforme, stupovi dalekovoda), spremnicima tekućina i plinova, dijelovi vozila (npr. šasija), kosturi i oplata brodova te oprema na brodovima [10].

4. ZAVARIVANJE ČELIKA

4.1. Metalurgija zavarivanja

Pod pojmom metalurgije zavarivanja, podrazumijevaju se pojave vezane sa procesnom (legiranje, lijevanje) i fizikalnom metalurgijom (kristalografija, metalografija, mehanička ispitivanja). Poznavanje metalurgije zavarivanja pruža odgovore na mnoga pitanja, npr. zašto brzo hlađenje štetno djeluje na niskolegirane a povoljno na austenitne CrNi nehrđajuće čelike, kako nastaju i kako spriječiti razne greške pri zavarivanju (npr. pukotine) i sl. Zavareni spoj (slika 6.) sastoji se od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT) koja se često naziva i prijelazna zona [11].



Slika 6. Shematski prikaz zavarenog spoja [11]

Zavarivanje bitno utječe na promjene kemijskog sastava ZT-a, kao i strukture ZT-a i ZUT-a. Pri zavarivanju dolazi do pogoršanja mehaničkih i korozivskih svojstava zavarenog spoja. Zona taljenja prolazi faze slične fazama prisutnim pri proizvodnji metala. U zoni taljenja pojavljuje se izgaranje elemenata, dolegiranje, nepoželjni spojevi, rafinacija i dezoksidacija taline, miješanje osnovnog i dodatnog materijala, smjer orijentiranosti kristala ovisno o smjeru dovođenja topline, zaostale napetosti i trajne deformacije, moguće greške (pukotine, poroznosti, troska) itd.

Zona utjecaja topline teorijski obuhvaća i područje osnovnog materijala koje se tijekom zavarivanja nije talilo, ali u kojem je zbog unosa topline zavarivanjem došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozivskih i drugih svojstava. Širina ZUT-a ovisi o unosu topline, a najčešće je 2-8 mm [11].

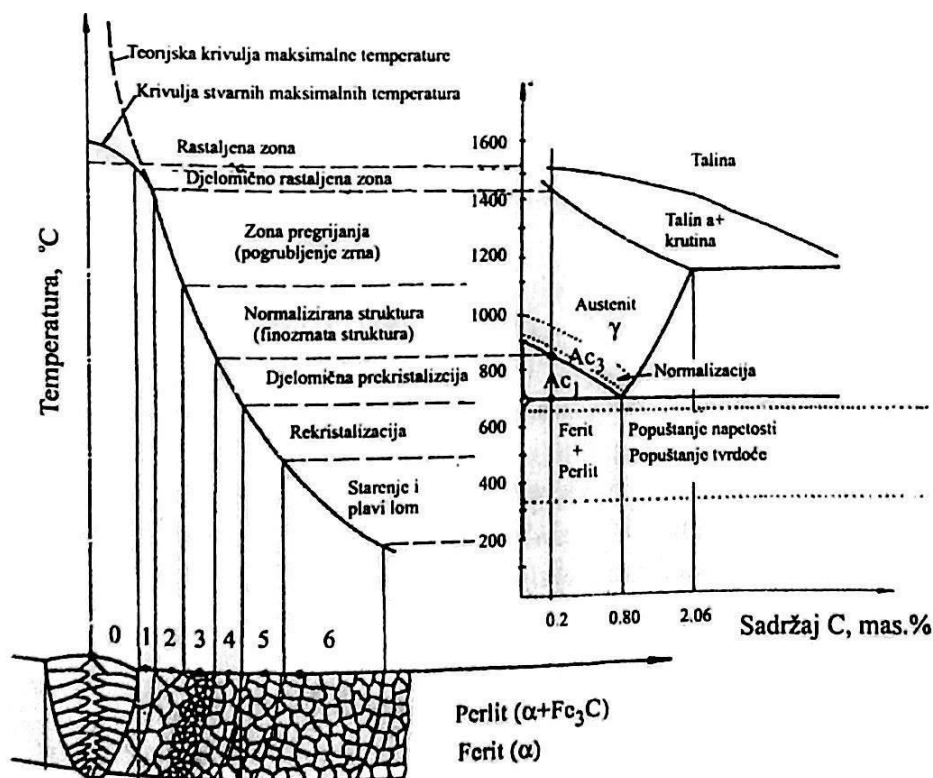
Na slici 7. prikazani su fazni dijagrami Fe-C i krivulje maksimalnih temperatura pojedinih točaka zavarenog spoja iz nelegiranog čelika (0,2 %C), ovisno o položaju pojedinih

točaka unutar zavarenog spoja. Zona taljenja (područje od točke 0 do 1) obuhvaća točke koje su bile u potpunosti rastaljene, a nalazi se iznad likvidus linije. Tijekom hlađenja dolazi do kristalizacije (kristali obično rastu okomito na rubove spoja) i nastanka strukture različite od strukture osnovnog materijala [11].

Djelomično rastaljena zona (područje točke 1) predstavlja dvofazno područje (taline i krutine) bogato legirajućim elementima, nečistoćama i plinovima. Zbog brzog hlađenja nakon zavarivanja nema dovoljno vremena za difuzijske procese (izjednačavanje koncentracije nečistoća s okolinom), pa zaostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća.

Zona pregrijanja (područje točke 2) je u temperaturnom području 1100 - 1450 °C, gdje pri brzom hlađenju nastaje nepoželjna tvrda i krhka Widmannstätska struktura koja se može ukloniti ponovnom normalizacijom pri sporom hlađenju [11].

Zona normalizacije nalazi se 30 - 50 °C iznad A_{C3} točke (područje točke 3), a karakterizira je finoznata mikrostruktura sa svojstvima obično boljim od svojstava osnovnog materijala. Ako je čelik prokaljiv, tada u ovoj zoni može, ovisno o brzini hlađenja, nastati čak 100% martenzitna mikrostruktura, što se može izbjeći predgrijavanjem ili većim unosom topline zavarivanja. Kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj barem djelomično normalizira prethodni sloj [11].



Slika 7. Utjecaj temperature na strukturu zavarenog spoja ugljičnog čelika s 0,2%C [11]

Zone djelomične prekrystalizacije (područje točke 4) nalazi se u temperaturnom području između A_{C1} i A_{C3} točke. Tijekom hlađenja dolazi do nastajanja klica ferita (na granicama ili unutar austenitnih zrna) koje rastu, a kad temperatura padne ispod A_{r1} točke, zaostali austenit se pretvara u perlit. Ovisno o sastavu čelika i brzini hlađenja, zaostali se austenit u dvofaznom području može pretvoriti u nepoželjni, tvrdi i krhki martenzit. Na temperaturama ispod A_{C1} moguća je rekystalizacija, starenje i "plavi prijelom", u kojima nema strukturnih promjena (ostaje feritno-perlitna mikrostruktura) [11].

4.2. Reakcije plinova s rastaljenim metalima

Metali pri sobnoj temperaturi sadrže male količine otopljenih plinova (npr. ovisno o vrsti i postupcima proizvodnje čelici sadrže 2 - 5 ppm vodika i dušika ispod 80 ppm). Rastaljeni metal može zbog međusobnih reakcija plin-metal tijekom zavarivanja otopiti veće količine kisika, dušika i vodika. Plinovi se iz taline izdvajaju u obliku mjehurića koji mogu ostati zarobljeni u metalu, što dovodi do poroznosti - plinski uključci (tijekom brzog skrućivanja mjehurić nema vremena za isplivavanje na površinu).

Prisutnost plinova u zavarenom spoju utječe na svojstva i kvalitetu spoja (poroznost, sklonost pukotinama, "riblje oči", niska žilavost itd.). Izvori plinova mogu biti nečistoće osnovnog i dodatnog materijala (ugljikovodici, oksidi, hidroksidi, organski i anorganski spojevi koji se pri visokim temperaturama raspadaju i oslobađaju plinove), te atmosfera koja okružuje talinu (O_2 , H_2 , N_2 , CO_2 , H_2O) [11].

Prvi i najvažniji plin u zavarenom spoju je kisik, oslobođen tijekom metalurških reakcija. Treba naglasiti da je važan ne samo kisik oslobođen tijekom metalurških reakcija, nego i kisik od pretaljiivanja osnovnog materijala koji je u zonu taljenja došao u obliku niskotaljivih oksida. Izvori kisika su: atmosfera u električnom luku (O_2 , CO_2 , H_2O), ogorina (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), korozijski produkti (OH skupina), te rezidualni kisik iz osnovnog i dodatnog materijala. Viši oksidi željeza (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) brzo se razlažu pri povišenim temperaturama ($T > 1000^\circ C$), dok je FeO stabilan kod temperatura nižih od $579^\circ C$. Topljivost kisika u talini opada sa sniženjem temperature. Maksimalna topljivost kisika u δ - Fe je oko 0,08%. Kisik disocira u električnom luku i apsorbira se u tekućem željezu ($O_2 = 2O$). Stoga je nužno spriječiti reakciju kisika s ugljikom iz zavarivanih komada (tj. reakciju s Fe_3C) jer može doći do razugljičenja (plinski mjehuri, poroznost): $C + O = CO$ [11].

Redosljed dezoksidanata je sljedeći : Al > Ti > Si - Mn. Veći sadržaj dezoksidanata u dodatnom materijalu treba kada osnovni materijal sadrži više kisika, te ako su jakost struje i/ili unos topline veći, zatim kada je veća zona taljenja, veća količina ogorine, jači oksidativni zaštitni plin (100% CO₂ je jači oksidant od Ar + 2% O₂ ili čistog argona). Previše dezoksidanata u čeliku negativno utječe na njihovu plastičnost (žilavost, istežanje), posebice kod niskih temperatura. Kisik apsorbiran u zoni taljenja dovodi do nastanka nemetalnih uključaka i poroznosti, što bitno utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva. Kisik negativno utječe na svojstva zavarenog spoja, neovisno o tome je li prisutan u otopljenom obliku ili u obliku oksida. Ako je kisik prisutan u otopljenom obliku vlačna čvrstoća i tvrdoća zavarenog spoja znatno se smanjuju, dok žilavost naglo pada. Prisustvo kisika u obliku oksida dovodi do narušavanja homogenosti zavarenog spoja, a time i do pogoršanja svih mehaničkih svojstava.

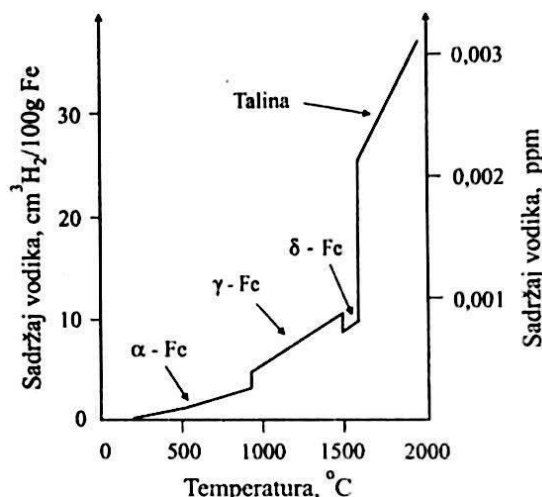
Drugi plin koji se može apsorbirati u zavarenom spoju je vodik. U zoni taljenja vodik može biti prisutan kao difuzijski ili kao rezidualni vodik. Atom vodika je najmanji (promjer 0,029 nm) i najjednostavniji od svih elemenata periodnog sustava, pa se unutar metala lako apsorbira kao intersticijski element ili u disociranom obliku kao H⁺. Vodik u zavareni spoj može doći na različite načine: najčešće u obliku vlage zbog vlažne atmosfere, nečistoća ili zaostalih organskih tvari koje nisu uklonjene sa zavarivanih površina kao i zbog nedovoljno osušenog zaštitnog plina (posebno CO) [11].

Topljivost vodika veoma je različita pri različitim temperaturama kao što se može vidjeti u tablici 1.

Tablica 1. Topljivost vodika u željezu [11]

Temperatura, °C	Topljivost vodika, cm ³ H ₂ /100 g Fe
20	10 ⁻³
1536 (kruto)	6
1536 (tekuće)	27,5
1800 (temperatura taline)	33,0
2500	42,5

Iz dijela ravnotežnog dijagrama Fe - H prikazanog na slici 8. vidi se naglo smanjenje topljivosti vodika tijekom očvršćivanja zavarenog spoja.



Slika 8. Dijagram topljivosti vodika u željezu[11]

Vodik dovodi do brojnih oblika oštećenja metalnih materijala. S gledišta zavarivanja, vodik može dovesti do poroznosti, djelomičnog razugljičenja zavara uz nastajanje metana, hladnih pukotina, "ribljih očiju" itd. Prekomjerna zasićenost tekućeg metala vodikom ili brzo očvršćivanje dovode do nastajanja manjih ili većih plinskih mjehura. Na defektima unutar materijala (praznine, nečistoće itd.) dolazi do rekombinacije atomarnog vodika u plinoviti H₂, pri čemu se razvija veliki unutarnji tlak (čak do 105 bara). Budući da ti mjehuri ne mogu brzo izaći iz taline (zbog velike brzine skrućivanja), ostaju zarobljeni, a zbog velikog tlaka dolazi do pojave mikropukotina koje kasnije srašćuju u makropukotine. Prisustvo metana u mjehurićima ukazuje na mogućnost reakcije tzv. vodikovog napada, koji inače izaziva poroznost i može dovesti do pojave pukotina [11].

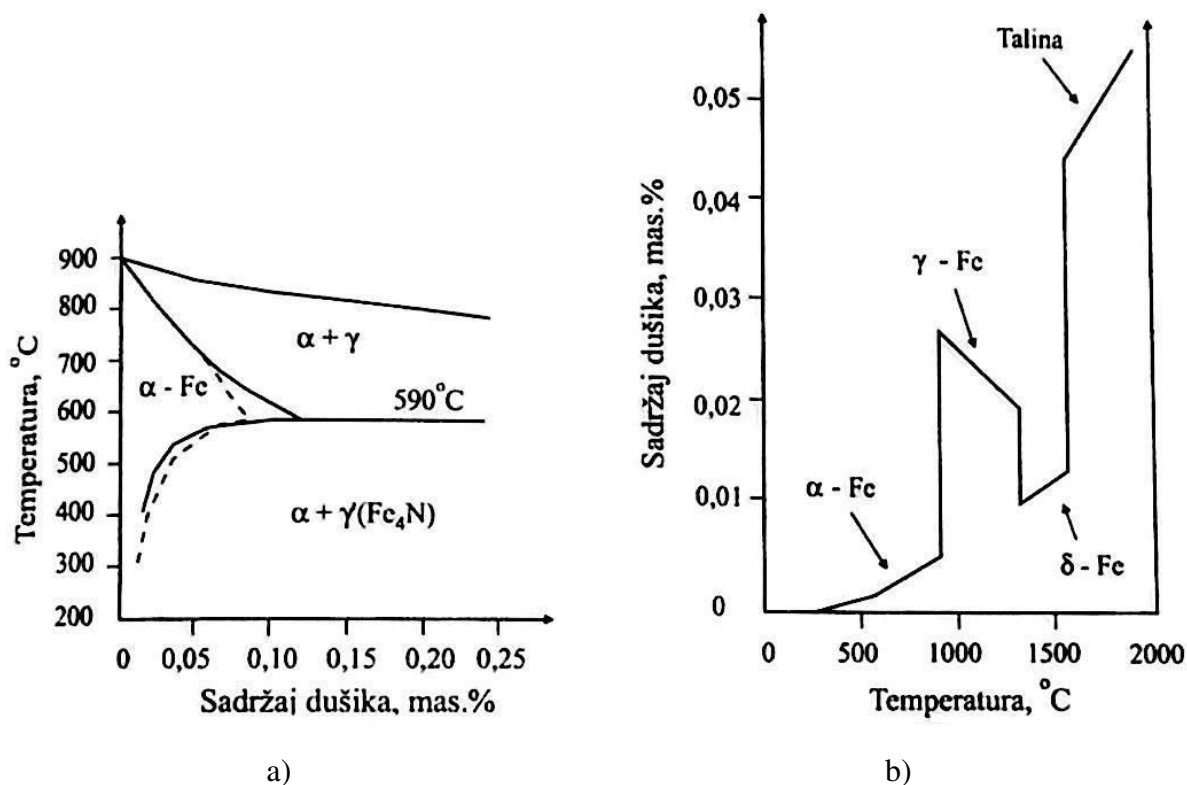
Hladne pukotine zavarenog spoja nastaju kod niskih temperatura (približno manjih od 200°C). Vodik je jedan od ključnih čimbenika koji utječe na pojavu hladnih pukotina u zavarenom spoju. "Riblje oči" uglavnom se pojavljuju na prijelomima zavarenih spojeva u obliku malih kružnih mrlja oko nemetalnih uključaka. Njihova pojava praćena je mikropukotinama. Ova greška zavarenog spoja nastaje kad je zavarivanje provedeno elektrolučno, posebno ako se zavarivalo vlažnim elektrodama.

Čimbenici povoljni za uklanjanje ili smanjenje sadržaja vodika u zavarenom spoju su: zavarivanje potpuno suhim elektrodama, neprekidno zavarivanje (bez međuhlađenja zavara), zavarivanje jačim strujama i većim promjerima žice, predgrijavanje zavarivanih komada i toplinska obrada (npr. žarenje za popuštanje napetosti) [11].

Dušik u plinovitom stanju ima vrlo nisku topljivost u zavarenom spoju i njegovo prisustvo je uglavnom u obliku nitrida (Fe₂N, Fe₄N, Fe₂₋₃N itd.). Topljivost dušika u željezu

pri sobnoj temperaturi je veoma niska ($N_2 < 0,001\%$), a brzo raste s porastom temperature i pri 590°C dostiže $0,1\%$. Iz dijagrama na slici 9. vidi se da je ispod 590°C prisutan Fe_4N s površinski centriranom kubičnom rešetkom, a odlikuje ga igličasta mikrostruktura (nekoliko μm) koja se pri toplinskoj obradi mijenja. Iz dijagrama topljivosti prikazanog na slici 10. vidi se da topljivost dušika naglo raste pri faznoj transformaciji iz α u γ , i naglo opada tijekom očvršćivanja zavara. Za razliku od ponašanja vodika, topljivost dušika u temperaturnom području od 900 do 1400°C opada. Tekuće željezo može kod temperature 1600°C otopiti do $0,04\%$ dušika. Dušik ima veliki afinitet i za određene elemente prisutne u zavaru (posebno Ti, Al i B) kada stvara nitride ovih elemenata. Pod normalnim uvjetima sadržaj dušika u zavaru ne prelazi $0,004\%$. Topljivost dušika u $\alpha\text{-Fe}$ kod sobnih temperatura je do $0,001\%$.

Dušik bitno utječe na mehanička svojstva, posebno na smanjenje parametara plastičnosti (istezanje, kontrakcija, žilavost) i na starenje čelika (veća sklonost krhkosti čelika). Treba naglasiti da osim vodika, poroznost mogu izazvati i drugi plinovi, posebno O_2 , N_2 i CO_2 . Kod zavarivanja u zaštitnim plinovima (MIG/MAG) poroznost može biti uzrokovana i nedovoljnom zaštitom inertnog plina zbog premale količine zaštitnog plina, propuha ili vjetra (sapnice se nalaze predaleko), vrtloženja, injektorskog djelovanja struje zaštitnog plina (uvlačenje drugih plinova) i nedovoljne sekundarne zaštite korijena zavara [11].



Slika 9. a) Dio dijagrama stanja Fe-N

b) Dijagram topljivosti dušika u željezu [11]

4.3. Zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika

Najvažniji element kod nelegiranih konstrukcijskih čelika je ugljik čiji sadržaj je od 0,1 do 0,6 % . Veća vlačna čvrstoća i granica razvlačenja nelegiranih čelika postižu se porastom sadržaja ugljika. Sadržaj ostalih elemenata za ovu skupinu čelika je $Si < 0,5\%$, $Mn < 0,8\%$, $Al < 0,1\%$, $Ti < 0,1\%$, $S < 0,035\%$, $P < 0,035\%$, $Cu < 0,25\%$. Ugljik je najutjecajniji element na zavarljivost čelika. Ugljički čelici sa sadržajem $C \leq 0,20\%$, tj $Ce \leq 0,45$ i debljinom materijala ispod 25 mm ne zahtijevaju predgrijavanje. Bitan čimbenik koji utječe na zavarljivost čelika je i način njegove proizvodnje. Neumireni čelici nemaju jednoličnu mikrostrukturu po presjeku i znatan dio kisika je vezan za Fe-oksidi. Ti oksidi imaju nisku točku taljenja i počinju se otapati u unutarnjem dijelu zavarenog spoja. Oslobođeni kisik može izazvati poroznost (CO mjehuri) koja se toplim valjanjem zavari i kasnije se ne uočava. Neumireni čelici kao i čelici pri čijoj proizvodnji nije korišteno magnetno miješanje dovode do tzv. središnjih segregacija ugljika ili nekih drugih elemenata i stoga se ne bi trebali koristiti za zahtjevnije konstrukcije. Te zone kasnije dovode do brojnih problema (dvoplatnost, zakaljena mikrostruktura, krhkost itd.) [11].

Poluumireni ili umireni čelici su skuplji ali ne ostavljaju slične posljedice. Oni su zavarljivi, a posebno je veća udarna žilavost, odnosno lomna žilavost. Potrebno je naglasiti da i visok sadržaj silicija (oko 0,5% Si) povećava osjetljivost konstrukcijskih čelika na tople pukotine.

Za čelike sa sadržajem ugljika višem od 0,25% zavarljivost je uvjetna, pa je nužno provoditi određene tehnološke postupke za dobivanje željenih svojstava i smanjenje vjerojatnosti pojave pukotina. Neke od mjera koje su potrebne za kvalitetno zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika su: predgrijavanje, zavarivanje s većim unosom topline, optimalno oblikovanje konstrukcije te popuštanje zaostalih napetosti.

Temperatura predgrijavanja čelika ovisi o sadržaju ugljika (tablica 2.) i ostalih elemenata, debljini stijenke, napetosti i sadržaju difuzijskog vodika. Predgrijavanje čelika podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoliša prije početka zavarivanja, te održavanje te temperature tijekom zavarivanja. Najčešće se za nelegirane čelike predgrijavanje provodi radi izbjegavanja nastanka hladnih pukotina. Predgrijavanjem se postiže smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja topline i zone taljenja (smanjuju se sadržaji nastanka tvrdih faza), izlazak difuzijskog vodika te se smanjuju zaostale napetosti.

Tablica 2. Temperatura predgrijavanja pri zavarivanju nelegiranih čelika [11]

Sadržaj ugljika, mas. %	Temperatura predgrijavanja (T_0), °C
0,2 - 0,3	100 - 150
0,3 - 0,45	150 - 275
0,45 - 0,80	275 - 425

Je li uopće potrebno i na koju temperaturu valja predgrijati materijal, određuje se ili na temelju preporuke iz literature ili iz iskustva, pokusa ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama (mjeri se veličina i broj pukotina), klasifikacijom (atestom) postupka, proračuna temperature predgrijavanja (jednadžbe Ito-Bessyo, Seferian i dr.) Brzina zagrijavanja na temperaturu predgrijavanja netreba biti velika, jer bi moglo doći do većih toplinskih napetosti. Zagrijavanje i održavanje temperature predgrijavanja najpovoljnije je elektrootpornim ili indukcijskim uređajima.

Što se vodika tiče, i visina, i raspodjela zaostalih, zavarivačkih napetosti i temperatura su pokretači difuzijskog procesa. Koeficijent difuzije vodika u čeliku postaje relativno visok pri temperaturama iznad 100°C, dok ispod 100°C pada, iz čega je jasna uloga predgrijavanja.

Jedna od starijih metoda za određivanje temperature predgrijavanja nelegiranih i niskolegiranih čelika je metoda francuskog istraživača D. Seferiana [12]:

$$T_p = 350 \left| (C) - 0,25 \right|^{0,5} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

$$(C) = (C)k (1 + 0,005t) \quad t \dots \text{debljina materijala u mm} \quad (3)$$

$$360(C)k = 360C + 40(Mn+Cr) + 20Ni + 28Mo \quad (4)$$

S druge strane, japanska istraživanja potvrdila su vrijednost P_c formule u predviđanju pojave pukotina, te je temperatura predgrijavanja [12]:

$$T_0 = 1440 P_c - 392 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$P_c = P_{cm} + H/60 + t/600 \quad (6)$$

U ovim formulama koriste se formule za izračun ekvivalenta ugljika, a osim ranije navedene formule C_{ekv} se može računati i na druge načine [12]:

$$P_c = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Ni+H)/60 + Mo/15 + V/10 + 5B + t/600 \quad (7)$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + V/10 + Mo/15 + 5B \quad (8)$$

t - debljina stijenke

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40 \quad (9)$$

Zavarivanje uz veće unošenje topline - Poznato je da je efektivni unos topline (E_{eff}) po jedinici duljine zavora [11]:

$$E_{eff} = (U I \eta) / v \quad (10)$$

gdje su: U - napon zavarivanja (V), I - struja zavarivanja (A), η - stupanj korisnog djelovanja izvora energije, v - brzina zavarivanja (m/s). Veći unos topline postiže se manjom brzinom zavarivanja, jačom strujom, većim promjerom elektrode ili poprečnim osciliranjem. Time se ujedno postiže i smanjenje tvrdoće zone utjecaja topline i zone taljenja, te je manja vjerojatnost pojave hladnih pukotina [11].

Optimalno oblikovanje konstrukcije - ovom mjerom mogu se smanjiti napetosti i debljina korištenog materijala kao posljedica izbora čelika za što nižim sadržajem sumpora i fosfora. Takvi su čelici otporniji na pojavu toplih pukotina, pukotina zbog naponske korozije itd.

Popuštanje zaostalih napetosti - ovu mjeru treba primijeniti posebno za deblje zavarene proizvode (gdje su prisutne zaostale troosne napetosti i sklonost krhkom lomu). Žarenje se obično provodi na 550 - 650 °C u vremenu od dvije minute po jednom milimetru debljine materijala. Popuštanje zaostalih napetosti moguće je provoditi i mehaničkim obrada

(vibracijama, prednaprežanjem, eksplozijom). Za povećanje žilavosti, posebno na temperaturama ispod 0°C, mogu se koristiti i elektrode s 0,5% Mo.

4.4. Promjena tvrdoće i hladne pukotine u zoni utjecaja topline

Dakle, hlađenjem zone zavara, na ponašanje zavarenog spoja dominantna je mikrostruktura, odnosno čelik je zavarljiv ukoliko se postavljenom tehnologijom zavarivanja postiže mikrostruktura neosjetljiva na pojavu pukotina te zavareni spoj zadovoljava svojstva postavljena za odgovarajuće radne uvjete [12].

Jedan od glavnih problema i istraživanja iz područja zavarljivosti čelika povezani su sa povišenjem tvrdoće u ZUT-u, te zatim sa pojavom hladnih pukotina u zoni zavara. Ispitivan je utjecaj kemijskog sastava, postavljeni su testovi zavarljivosti, definirani su tzv. ugljični ekvivalenti gdje se sadržaju ugljika pribrajaju ekvivalentni utjecaji legiranih elemenata, po utjecajnosti izraženi odgovarajućim koeficijentom koji se jednom odnosi na utjecajnost vezano uz tvrdoću, a drugi puta vezano uz utjecajnost pojave hladnih pukotina. Ukratko ugljični ekvivalent je zamišljen kao numerička vrijednost sastava čelika, koja bi dala indikaciju sadržaja ugljika, ekvivalentne razine zakaljivosti za dati čelik; kako je rečeno, formula je kasnije proširena, da reprezentira doprinos sastava čelika pojavi hladnih, vodikom uzrokovanih pukotina. Naime, pokazalo se da su nužne nadopune, jer su se ipak pokazale razlike pri razmatranju povišenja tvrdoće različitim tehnologijama hlađenja metala : kod testa zakaljivosti - Jominy probom te uslijed različitih vremena $t_{8/5}$ zavarivanjem [12].

1940. godine Dearden i O'Neill našli su sljedeću relaciju između maksimalne tvrdoće u zoni utjecaja topline i kemijskog sastava:

$$CE = C + P/2 + Mn/6 + Cu/13 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/4 + V/5 \quad (11)$$

$$HV(max) = 1200 CE - 200 \quad (12)$$

Općenito, zavarljivim čelikom se smatralo ukoliko je $CE < 0,35$.

1949. godine Williams i suradnici nalaze da mangan i silicij utječu četiri puta manje na otvrdnjavanje od ugljika, te daju izraz za ekvivalent ugljika [12]:

$$CE = C + (Mn + Si)/4 \quad (13)$$

Formula Deardena i O'Neill prilađena je od strane IIW-a izrazu za CE(IIW) iz 1967. godine [12]:

$$CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (14)$$

CE(IIW) je razvijen da se opiše zakaljivost (možda je bolji izraz otvrdljivost - sklonost povišenju tvrdoće, jer se radi o zavarivanju a ne o Jominy testu) C,C-Mn čelika sa %C 0,18-0,20; općenito zahtjeva se granična tvrdoća od 350HV u ZUT-u, što vodi do izvještaja Deardena i O'Neilla koji nisu zabilježili pojavu pukotina u zoni utjecaja topline kod tvrdoće ispod 350HV. Formula se i danas široko koristi u praksi i literaturi. Najčešći iskustveni navodi vezani uz CE(IIW) su [12]:

$CE < 0,35$... nije potrebno predgrijavanje

$0,35 < CE < 0,55$... predgrijavanje

$CE > 0,55$...predgrijavanje, naknadna toplinska obrada

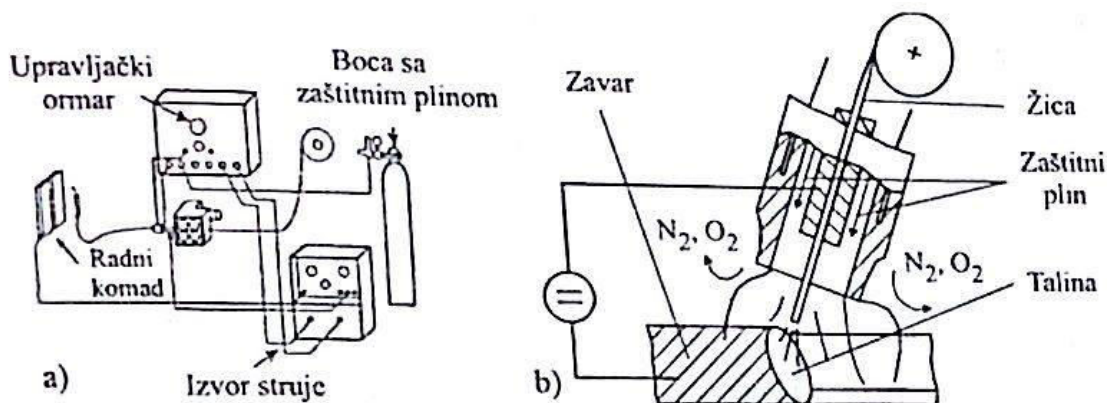
Razvojem novih tipova čelika - čelika povišene tvrdoće, pokazala se potreba da se formulom izrazi spomenuti utjecaj topline: utjecaj difuzibilnoga vodika, te oblika spoja gdje dominira debljina osnovnog materijala odnosno razine krutosti (uklještenja) spoja, kako bi se bolje opisala pojavnost vodikom uzrokovanih hladnih pukotina, te potrebna temperatura predgrijavanja. Može se konstatirati da se dugo vremena zavarljivost čelika određivala na bazi iskustva, odnosno zavarivačke prakse, a tek su se kasnije istraživanja počela temeljiti na fizikalnoj metalurgiji [12].

Tvrdoća zone zavara nije bila jedini kriterij. Kako predgrijavanje osnovnog materijala doprinosi smanjenju brzine hlađenja zavara, sniženju sadržaja vodika, sniženju krutosti i napetosti u fazi zavarivanja održanjem međuprolazne temperature koja nije niža od temperature predgrijavanja, te se je osim prilagodbe izraza za ugljični ekvivalent istraživala paralelno i formula za kritičnu temperaturu predgrijavanja. Važnost sačuvanja integriteta zavarenog spoja odnosno zavarene konstrukcije i ispravnim predgrijavanjem može se sagledati i kroz sljedeće podatke - najveći vidovi otkaza konstrukcija su: statički lom (32%), zamor (26%), korozija (17%), plastični lom (14%), lom puzanjem (11%) [12].

5. ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNIH I INERTNIH PLINOVA

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova spada u postupke zavarivanja taljenjem. Postupak MIG (engl. Metal Inert Gas) zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova (argon ili helij), dok se postupak MAG (engl. Metal Active Gas) zavarivanja odvija u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO_2 (MAGC postupak) ili mješavini s pretežnim udjelom CO_2 (MAGM postupak). Postupak MAG zavarivanja često se naziva i CO_2 postupak. Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz okolne atmosfere (zraka). Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice (u pravilu spojene na + pol izvora istosmjernje struje) i osnovnog materijala. Ionizacija električnog luka u čistim plinovima je slaba, pa se za stabilno održavanje luka ne može koristiti izmjenična struja. Kod ovog postupka metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale se toplinom električnog luka. Žica je istodobno i dodatni materijal, tj. njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb.

Postupak MIG/MAG može biti automatski (potpuno mehaniziran), poluautomatski (dodavanje žice u električni luk je automatizirano, a držanje i vođenje pištolja je ručno) i robotiziran. Robotizirani MIG/MAG postupak zavarivanja je programiran, gdje se unaprijed programiraju parametri, a zavarivač prati rad robota. U industriji se najviše koristi poluautomatski MIG/MAG postupak zavarivanja jer je prilagodljiv svim uvjetima rada i ima veliku produktivnost. Uređaj za MIG/MAG postupak zavarivanja je isti za oba postupka (slika 10.) s jedinom razlikom u vrsti korištenog zaštitnog plina [11].



Slika 10. Shematski prikaz uređaja (a) i procesa MIG/MAG zavarivanja (b) [11]

Električna struja dolazi iz izvora struje koji je priključen na električnu mrežu. Struja zavarivanja dovodi se iz izvora vodičima, od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi preko razvoda upravljačkog ormara na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom za zavarivanje koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora (nazubljenim kotačićima ili impulsnim dodavačem). Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem upravljačkog ormara kroz sapnicu pištolja. Zaštitni plinski omotač koji dolazi sapnicom pištolja upuhuje se u atmosferu luka. Kontaktna vodilica pištolja (služi za vođenje elektrode i za prenošenje struje zavarivanja na elektrodnu žicu) i sapnica za plin (služi za dovod zaštitnog plina) su potrošni dijelovi pištolja, te se lako mogu mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti, npr. od bakra).

Prije početka zavarivanja uključi se izvor struje, namjesti količina protoka plina i parametri zavarivanja. Zavarivač pri poluautomatskom zavarivanju prinese pištolj radnom komadu i pritiskom prekidača koja se nalazi na pištolju uključuje odvijanje zavarivanja. Uključivanjem tijekom zavarivanja otvara se magnetni ventil za protok zaštitnog plina, uključen je izvor struje, aktivira se elektromotor za dovod žice. Prvo proteče zaštitni plin, a potom izlazi žica. Čim žica dotakne radni komad, zatvori se strujni krug i uspostavi električni luk. Zavarivač pomiče pištolj određenom brzinom u smjeru zavarivanja i zavaruje uz određenu tehniku rada. Pod utjecajem električnog luka žica i osnovni materijal se tale, spajaju u jednu talinu i skrućuju u zavareni spoj (slika 10. (b)). Danas se, radi postizanja što bolje regulacije parametara zavarivanja (struja zavarivanja, napon električnog luka, brzina žice, induktivitet), mnogo radi na području razvoja izvora struje zavarivanja. Razvijeni su tiristorski, a u novije vrijeme i tranzistorski izvori struje. Tranzistorski izvori struje su u prednosti zbog jednostavnije regulacije parametara zavarivanja, tako da su već razvijeni sustavi kod kojih su na osnovi jednog, automatski određeni ostali parametri zavarivanja (tzv. sustavi sinergetskog upravljanja). Izvori struje za MIG/MAG zavarivanje imaju ravnu ili blago padajuću statičku karakteristiku [11].

Parametri kod MAG zavarivanja:

- jakost struje I (A) - razmjerna s brzinom dobave žice $v_{\dot{z}}$ [m/min]
- napon električnog luka U (V) - razmjernan s visinom električnog luka
- brzina zavarivanja v_z [cm/min]

- slobodni kraj žice
- protok plina Q [lit/min] i vrsta plina
- induktivitet L [H]
- promjer žice $d\check{z}$ [mm]
- nagib pištolja α [°]

Prednosti MAG zavarivanja:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- široki raspon debljina osnovnog materijala
- visoka učinkovitost i proizvodnost
- pogodan za automatizaciju
- mogućnost primjene praškom punjene žice

Nedostaci MAG zavarivanja:

- kod rada na terenu moguće greške (vjetar otpuhuje zaštitni plin)
- problemi kod dovođenja žice
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima

5.1. Dodatni materijal za MAG zavarivanje

Za MAG postupak zavarivanja koriste se pune (promjera 0,6 ; 0,8 ; 1,0 ; 1,2 i 1,6 mm koje se namotavaju u kolute) i praškom punjene žice. Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja MAG postupkom, žica mora zadovoljiti određene uvjete u pogledu kemijskog sastava, kvalitete površine, odmatanja s koluta tijekom zavarivanja i dr. Kemijski sastav žice treba biti sličan osnovnom materijalu koji se zavaruje. Zbog boljeg električnog kontakta i veće otpornosti na koroziju pune žice su pobakrene ili niklirane. Kvaliteta namotaja žice na kolut mora biti takva da se žica pri zavarivanju pravilno i jednako odmeta s koluta.

Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili niklirane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, točnih dimenzija i uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje [11].

5.2. Prijenos metala električnim lukom pri MAG zavarivanju

Pri zavarivanju MAG postupkom oblik prijenosa metala električnim lukom ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu žice, te karakteristikama izvora struje zavarivanja. Ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka kod MAG zavarivanja prijenos metala može se odvijati na četiri načina:

- Kratki luk ($I = 50...170 \text{ A}$, $U = 13...21 \text{ V}$)
- Prijelazni (mješoviti) luk ($I = 170...235 \text{ A}$, $U = 22...25 \text{ V}$)
- Štrcajući luk ($I = 200...600 \text{ A}$, $U = 25...40 \text{ V}$)
- Impulsni luk

Prijenos metala kratkim lukom upotrebljava se pri zavarivanju žicama promjera 0,8 ; 1,0 i 1,2 mm, a zavarivanje se izvodi kratkim spojevima. Metalna se kap na vrhu elektrode povećava. Zbog male duljine luka metalna kap u određenom trenutku dodirne rastaljeni metal. Tada nastaje kratki spoj, električni se luk kratkotrajno prekida, a napon pada na nulu. Struja zavarivanja koja u istom trenutku naglo poraste pomaže otkidanju kapi s vrha elektrode. Nakon otkidanja kapi ponovno se uspostavlja električni luk i ciklus se ponavlja. U jednoj sekundi odvija se 150-250 ciklusa. Zbog male količine rastaljenog metala ovakav način zavarivanja pogodan je za zavarivanje tankih limova, korijenskog zavora, kao i za zavarivanje u prisilnim položajima.

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira visoki napon i jake struje zavarivanja. Poznato je da kod vrlo velikih struja i povišenih napona dolazi do snažnog "pinch-efekta" koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje idu u kupku. Zbog brzog prijelaza kapi vrijeme zagrijavanja kapi na vrhu elektrode je kratko, što skraćuje vrijeme trajanja metalurških reakcija. Posljedica toga je mali odgor legirajućih i pratećih elemenata. Štrcajući luk karakterizira prijenos sitnih metalnih kapljica u mlazu slobodnim letom bez kratkih spojeva, uz stalno održavanje električnog luka. Budući da je gustoća struje veća od 300 A/mm^2 , postiže se visok učinak taljenja i ekonomičnost. Štrcajući se luk primjenjuje kod zavarivanja žicama najvećeg promjera, popunjavanja žlijebova na debelim limovima i navarivanja detalja.

Visoka gustoća struje utječe na prijenos metala bez kratkih spojeva. Zbog velikog unosa topline penetracija u metal je duboka, te je zavarivanje štrcajućim lukom pogodno za zavarivanje debelih komada ali samo u vodoravnom položaju (jer bi inače talina iscurila).

Prijenos metala prijelaznim ili mješovitim lukom postiže se pri naponima 22-25 V i pri struji zavarivanja 170 - 235 A. Metal se prenosi djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk (kao pri zavarivanju štrcajućim lukom). Pri tome je omogućeno otkidanje manjih kapi koje ipak prilično prskaju naokolo. Prskanje kapljica manje je u mješavinama plina Ar + CO₂ nego u čistom CO₂.

Prijenos metala u kratkom, mješovitom i štrcajućem luku spada u tzv. prirodni prijenos metala. Danas se sve više koristi prijenos metala upravljani djelovanjem impulsnih električnih struja (pulzirajući ili impulsni električni luk). Impulsni luk se postiže samo u zaštiti argona ili u mješavinama bogatim argonom. Ovaj oblik prijenosa kapljica metala u luku pruža mogućnost dobrog zavarivanja aluminija, bakra i CrNi čelika.

Za impulsne uređaje za zavarivanje karakteristični su strujni impulsi određene frekvencije i trajanja. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, a kap se otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom. Na taj se način lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni, te izvodi zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvencija impulsa, a time i broj kapi, može se namještati (optimalna frekvencija je 50 Hz). Pri prijenosu kapi ne dolazi do kratkih spojeva. Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature metalne kapi, pa se može upravljati smjerom prijenosa metala. Glavne prednosti impulsnog prijenosa metala su: jednoličan zavar, smanjeno prskanje, stabilan luk, mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijale, primjenjivost u svim položajima zavarivanja.

6. EKSPERIMENTALNI RAD

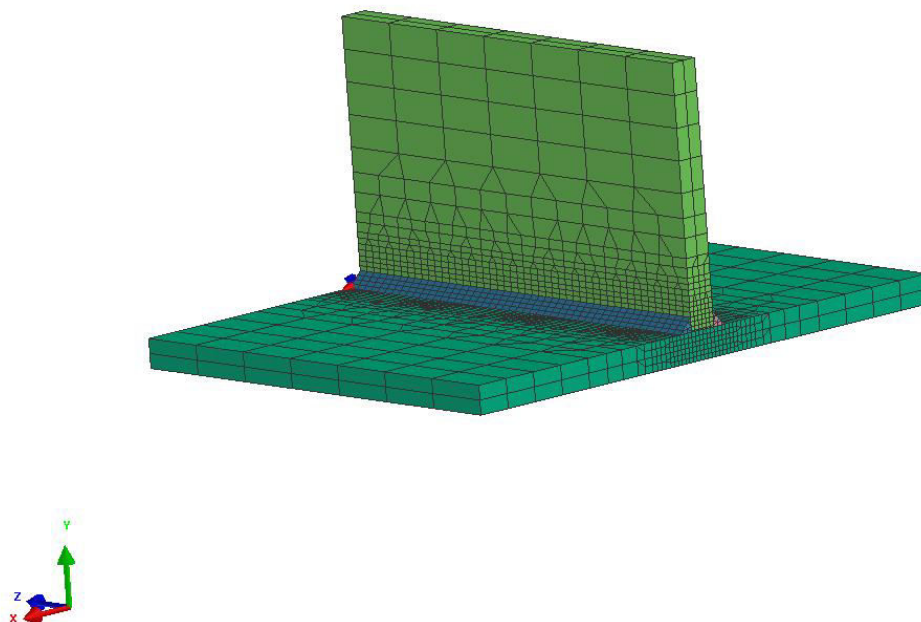
U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada provedena je numerička simulacija zavarivanja kutnih zavora T - spoja debljina limova 6 mm, od nelegiranog konstrukcijskog čelika. Cilj je dobiti zavareni spoj i konstrukciju od navedenog materijala, koji će rezultirati maksimalnom tvrdoćom 380 HV10.

6.1. Simulacija zavarivanja T - spoja

Simulacija se izvodi u računalnom programu "Visual Environment" verzija 11.0.2 koji se sastoji od niza različitih specijaliziranih modula. Najvažniji moduli koji se koriste za provođenje potpune simulacije zavarivanja su: Visual – Mesh, Visual – Weld i Visual – Viewer. Definiranim postepenim radom u ovom modulu, postiže se mogućnost provođenja simulacije zavarivanja na određenom modelu te detaljan pregled rezultata.

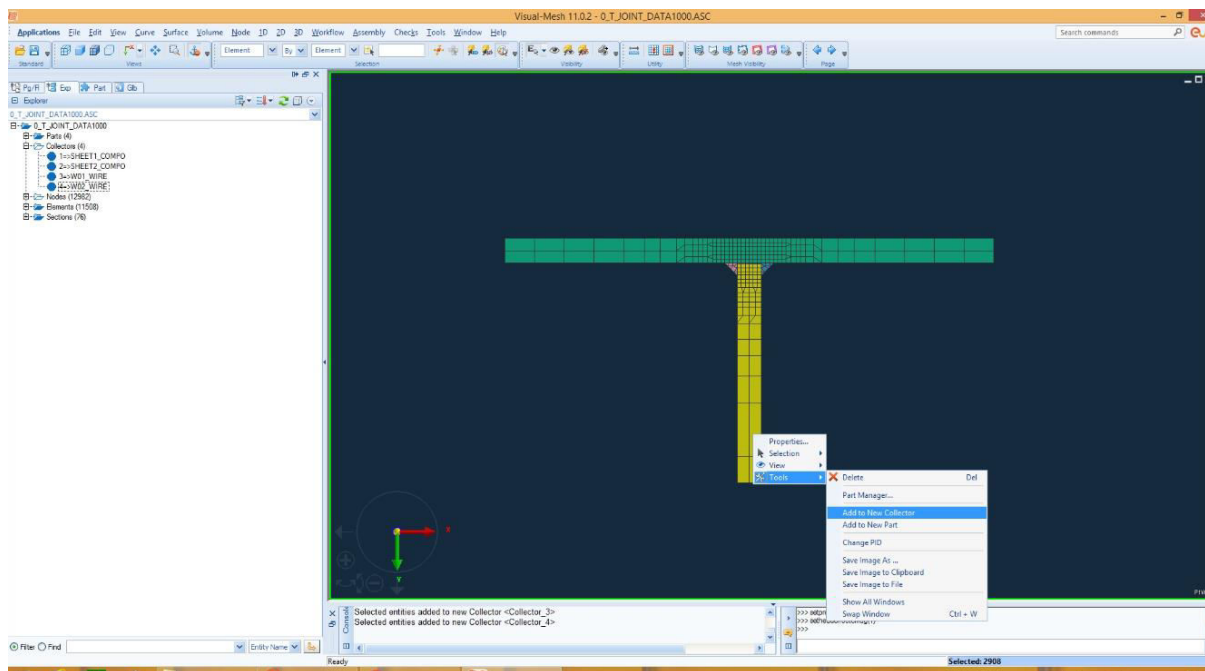
6.1.1. Visual – Mesh

U Visual – Mesh-u se kreira model te definiraju potrebni kolektori. Uz pomoć tih kolektora, računalni program raspoznaje razliku osnovnog i dodatnog materijala, definira se površina za izmjenu topline te kolektori bitni za unos topline. Prilikom kreiranja modela vrlo je bitno obratiti pažnju na veličinu konačnih elemenata. Ukoliko su konačni elementi manjih dimenzija, a time i gušće raspoređeni, rezultati koji se dobivaju su točniji, ali je samim time i vrijeme izvršenja simulacije duže. Zbog toga je potrebno odrediti kompromis veličine konačnih elemenata koji rezultira kombinacijom odgovarajuće točnosti, ali i trajanja simulacije. Najčešće se to postiže na način, da se području veće važnosti (području zavarenog spoja) kreiraju konačni elementi manjih dimenzija, dok se u ostalim područjima postavljaju konačni elementi većih dimenzija. Model kreiran sličnim razmišljanjem vidljiv je na slici 11.



Slika 11. Izgled modela koji se koristi za simulaciju

Kolektori se definišu na slijedeći način: odabirom svih potrebnih trodimenzionalnih konačnih elemenata te pomoću desnog klika unutar opcije "Tools" se odabire opcija "Add to New Collector". Proces stvaranja kolektora gornje ploče vidi se na slici 12.



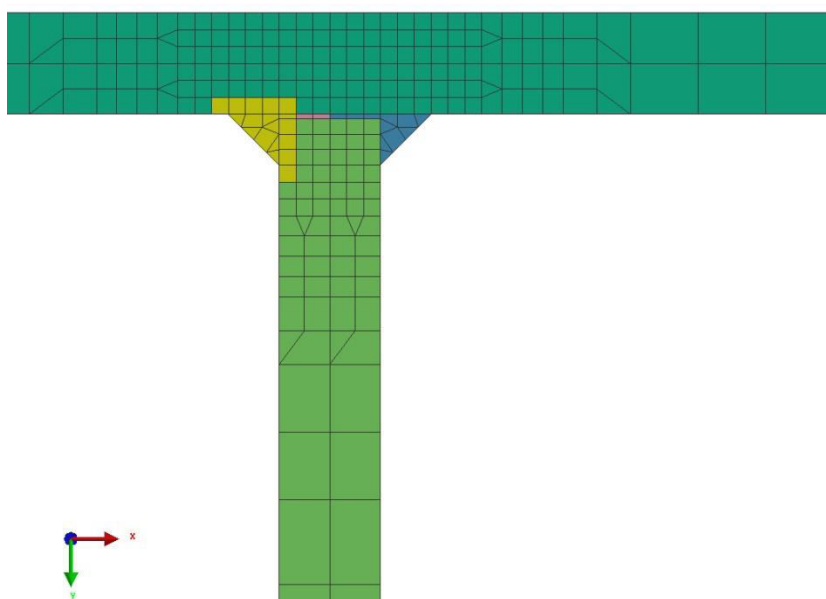
Slika 12. Kreiranje kolektora osnovnog materijala gornje ploče

Kolektor za osnovni materijal se izrađuje najlakše na način da se unutar padajućeg izbornika "Views" stavi pogled "Top", tj. XY ravnina i zaokruže svi željeni elementi. Istim se principom vrši stvaranje ostalih kolektora: kolektor osnovnog materijala donje ploče i kolektori dodatnog materijala sa obje strane. Nakon što su kolektori definirani, vrlo je važno pridružiti im odgovarajuća imena. Imenima se pridodaju odgovarajući nastavci na temelju kojih računalni program prepoznaje vrstu kolektora. Osnovnom materijalu dodaje se nastavak `_COMPO` (a prije `_COMPO` stavljaju se redom indeksi 1, 2, itd.), dok se dodatnom materijalu pridružuje nastavak `_WIRE` (prije nastavka stavljaju se redom indeksi od 1 nadalje). Na taj način se dakle kolektori osnovnog materijala preimenuju u "SHEET1_COMPO", "SHEET2_COMPO" itd., a kolektorima dodatnog materijala daju se imena "W01_WIRE" i "W02_WIRE" (prikazano na slici 13.).



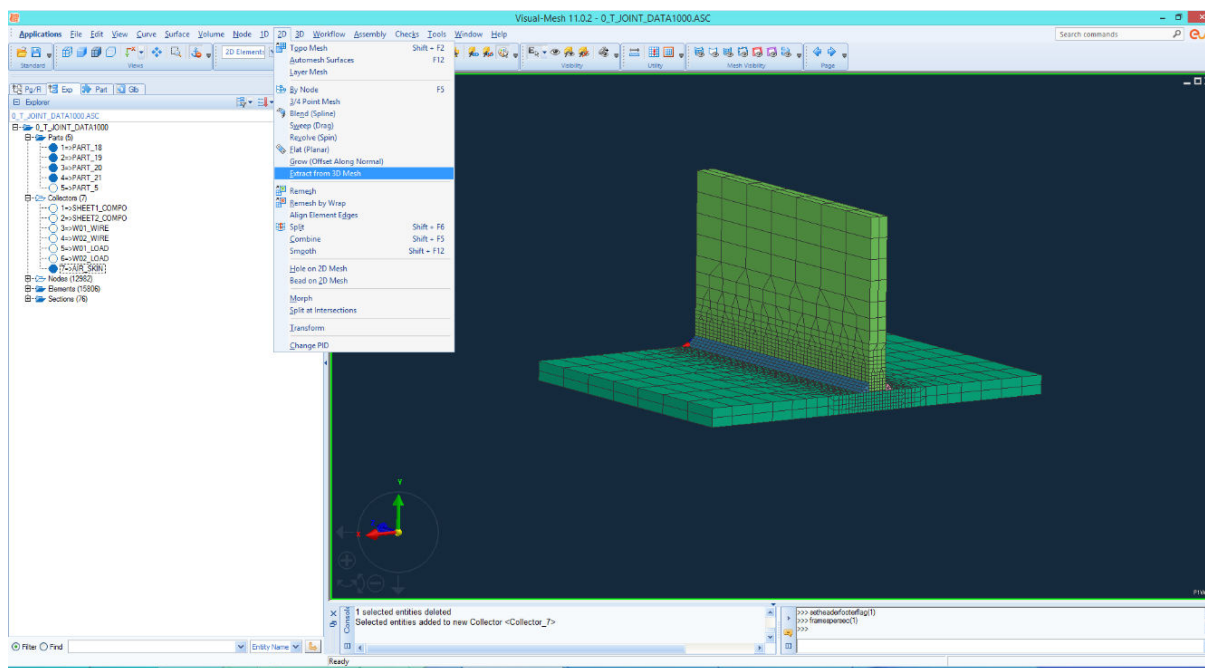
Slika 13. Kolektori osnovnog i dodatnog materijala

Sljedeći korak je definiranje kolektora za izvor topline. Veličina ovih kolektora ovisi o geometrijskim značajkama samog metala zavora. Kolektori se moraju preimenovati slično kao i kod definiranja kolektora osnovnog i dodatnog materijala, samo što im se pridodaje ekstenzija `_LOAD` te moraju biti veći od samog izvora topline. Definiranje kolektora bitnog za unos topline prikazan je na slici 14. Istim se postupkom definira i kolektor za drugi zavar sa razlikom odabira druge skupine konačnih elemenata. Vrlo je bitno u definiranju imena kolektora da se ime kolektora i mjesto kolektora podudaraju (npr. ako je ime kolektora dodatnog materijala "W01_WIRE", onda na tom mjestu mora biti kolektor za unos topline "W01_LOAD").



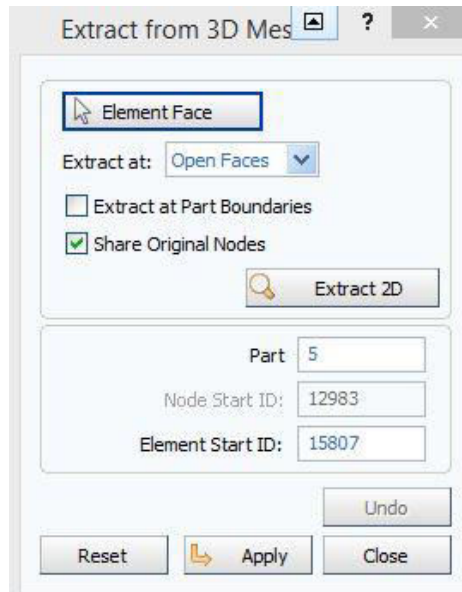
Slika 14. Odabir elemenata bitnih za kolektor unosa topline

Nakon toga se definira kolektor kojim se određuje izmjena topline. Izmjena topline odvija se između radnog komada i okoline za koju će se kasnije definirati temperatura od 20 °C. Zbog toga se ovaj kolektor definira na nešto drugačiji način. Potrebno je kreirati novi dio koji ima oblik ljuske. Odabirom stupca "2D" na alatnoj traci, te unutar ovog stupca "Extract from 3D Mesh". Postupak je prikazan na slici 15. i 16.

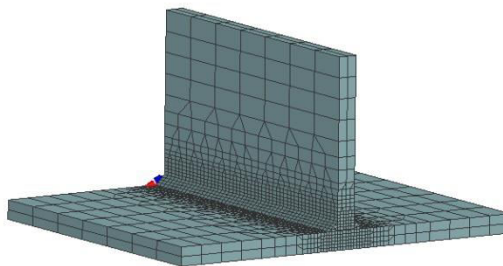


Slika 15. Kreiranje kolektora izmjene topline

Nakon otvaranja navedene opcije, otvara se prozor unutar kojeg se stvara model ljuske. Potrebno je ukloniti kvačicu sa opcije "Extract at Part Boundaries", te odabrati opciju "Element Face", nakon toga odabrati sve dijelove i potvrditi odabir (Slika 16.). Tako je kreiran novi dio, odnosno novi kolektor kojim se definira izmjena topline. Kolektor se imenuje "AIR_SKIN", a može se i imenovati "AIR_HEAT_EXCHANGE". Izgled kolektora je prikazan na slici 17.



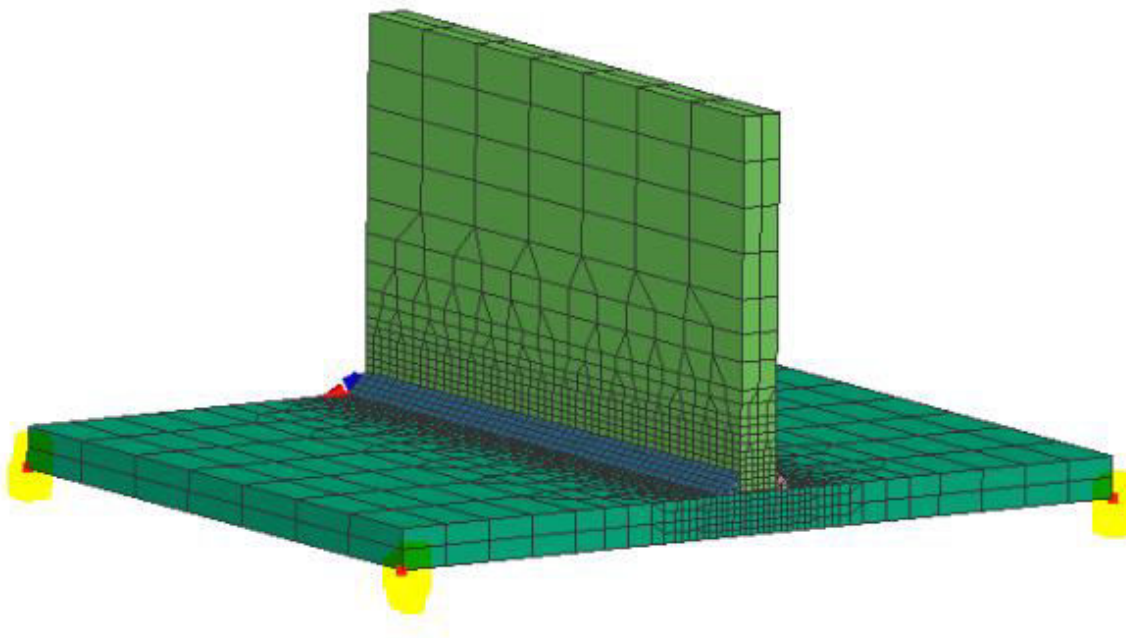
Slika 16. Definiranje kolektora izmjene topline



Slika 17. Izgled kolektora za izmjenu topline (luskasti model)

Na kraju je potrebno definirati kolektore za stezanje. Za udovoljavanje potreba računalnog programa potrebno je ostvariti barem male sile stezanja, odnosno konstrukcija koju je potrebno zavariti ne može biti slobodno pozicionirana u prostoru. Odabirom opcije "NODE" odabire se vršna točka jednog od vrha donje ploče. Ta se točka pridodaje kao novi kolektor sa ranije opisanim postupkom. Nakon što se kolektor kreira, također je potrebno odrediti adekvatno ime i adekvatni ekstenzija. Prva točka mora se preimenovati u

"XYZ_CLAMP". Sljedećoj definiranoj točki daje se ime "XY_CLAMP", a trećoj točki samo "Y_CLAMP". Ove tri točke su dovoljne, jer se njima ostvaruje nemogućnost gibanja u određenim osima i oko njih. Dobiveni kolektori na temelju točaka prikazani su slikom 18.

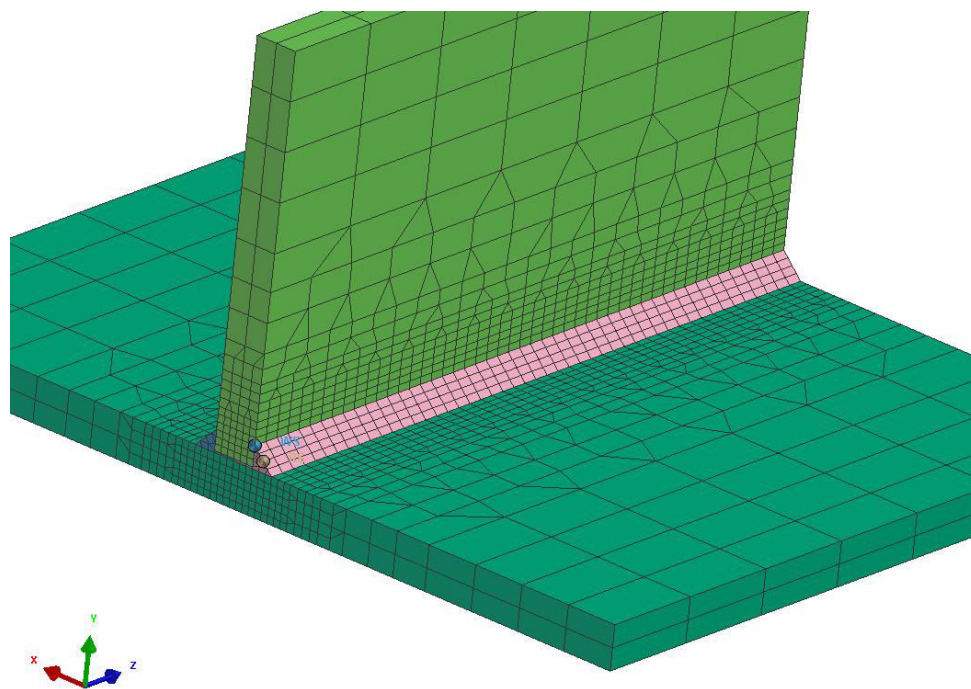


Slika 18. Točke stezanja

Nakon što je završen rad u ovom modulu, potrebno je pokrenuti sljedeći modul, "Visual Weld", kako bi se na temelju definiranih kolektora sa naknadnim definiranjem parametara zavarivanja kreirala simulacija zavarivanja.

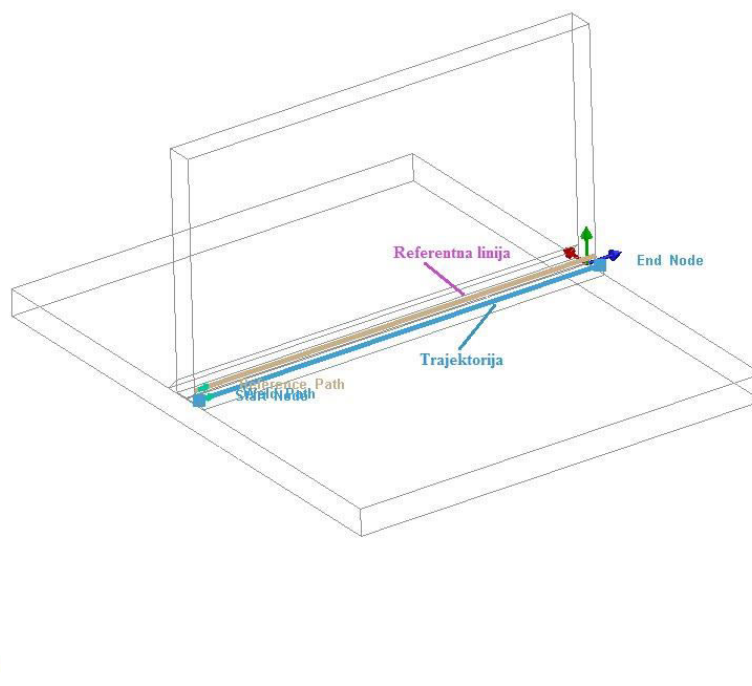
6.1.2. Visual Weld

Prelaskom u modul Visual Weld potrebno je definirati sve parametre koji su bitni i koji utječu na proces zavarivanja, te po završetku unošenja parametara provesti simulaciju zavarivanja. U prvom koraku potrebno je definirati pravac kretanja izvora topline. Kako bi se definirao pravac kretanja izvora topline, potrebno je definirati trajektoriju i referentnu liniju. Trajektorija se postavlja na samu površinu zavara, na jednakoj udaljenosti od oba vrha zavara (slika 19.). Položaj referentne linije nije točno određen, osim što ju je potrebno pozicionirati na površinu zavara. Ovi se pravci definiraju na sljedeći način: unutar opcije "Welding" potrebno je odabrati željenu opciju "Trajectory". Unutar te opcije potrebno je odrediti pozicije početnih točaka linija uz pomoć opcije "Start Node".



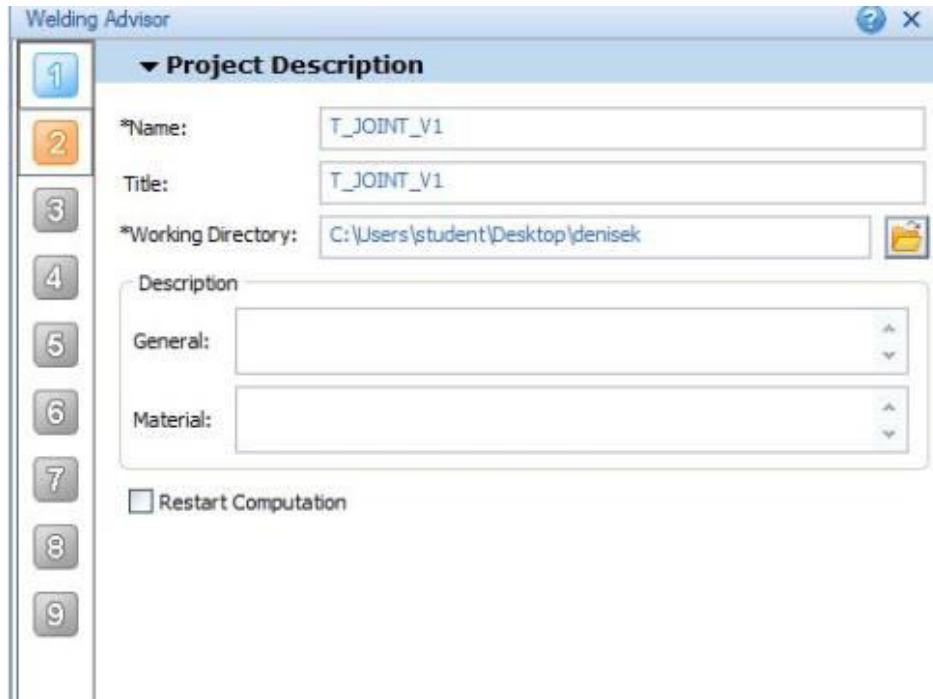
Slika 19. Početne točke trajektorije (Rs) i referentne linije (Ws)

Na isti se način pozicioniraju i krajnje točke linija uz pomoć opcije "End Node". Isti postupak potrebno je ponoviti i za drugi zavar. Kreirana trajektorija i referentna linija mogu se vidjeti na slici 20.



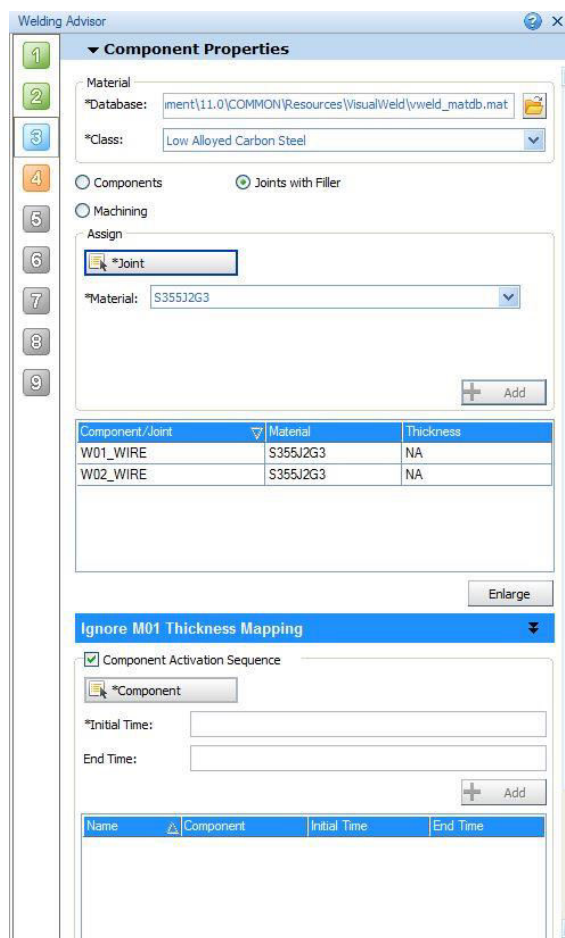
Slika 20. Trajektorija i referentna linija prvog zavara

Nakon što se definira linija kojom putuje izvor topline, potrebno je odabrati opciju "Welding Advisor". U ovoj se opciji definiraju preostali parametri zavarivanja. U prvom koraku potrebno je opisati projekt, ime projekta dane konstrukcije te odrediti mjesto spremanja podataka dobivenih nakon simulacije. Podaci koje je potrebno unijeti vidljivi su na slici 21.



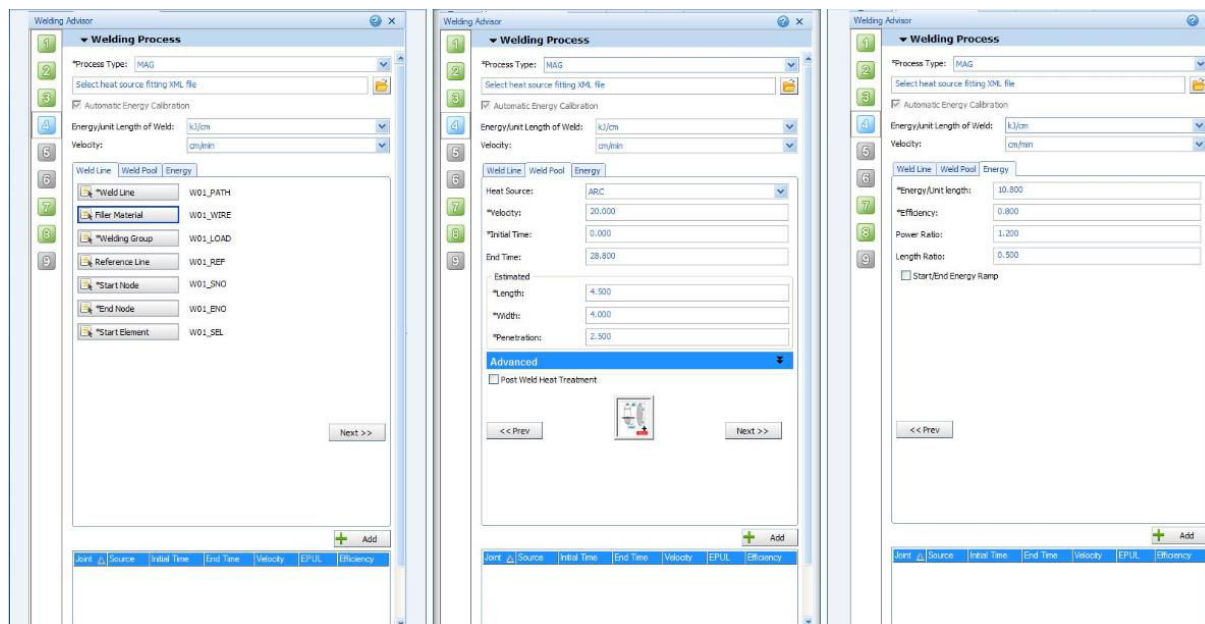
Slika 21. Prvi korak "Welding Advisor-a"

U drugom je koraku potrebno definirati globalne parametre, odnosno dali je model puni ili šuplji. U trećem koraku potrebno je definirati vrstu materijala osnovnog i dodatnog dijela konstrukcije. Kao vrsta materijala odabran je nelegirani konstrukcijski čelik S355J2G3. U "Welding Advisor-u" potrebno je za svaku komponentu definirati vrstu materijala ("SHEET1_COMPO" , "SHEET2_COMPO"), a isto tako i za dodatni materijal ("W01_WIRE", "W02_WIRE") odabrati potrebni materijal. Odabir vrste materijala za dodatni materijal vidi se na slici 22.



Slika 22. Odabir vrste materijala popune

U četvrtom koraku potrebno je odrediti sve parametre zavarivanja za pojedini zavar. Najprije se odabire tip procesa, odnosno izgled izvora topline. Izgled izvora topline je sličan za većinu tehnologija zavarivanja, osim za zavarivanje laserom i snopom elektrona. Upravo zato i nije toliko bitno odabere li se REL ili MAG postupak, jer je izgled izvora topline jednak za sve vrste zavarivanja u ovom programu. Nakon toga potrebno je odabrati liniju zavora. Ako su svi dosad kreirani kolektori pravilno definirani i imenovani program sam prepoznaje preostale potrebne informacije (npr. dodatni materijal, početna i konačna točka zavarivanja itd.). Nakon toga kreće se u sljedeći korak koji se naziva "Weld Pool". Ovdje je potrebno definirati penetraciju zavarivanja te vrijeme početka zavarivanja. Moguće je ovdje i promijeniti kut unosa topline opcijom "Angle of Torch". U posljednjem stupcu "Energy", opisuje se električni luk, tj. iznos unosa topline, iskoristivost pojedinog postupka, te ostali podaci koji su još bitni za unos topline pri zavarivanju. Dati postupak prikazan je na slici 23.



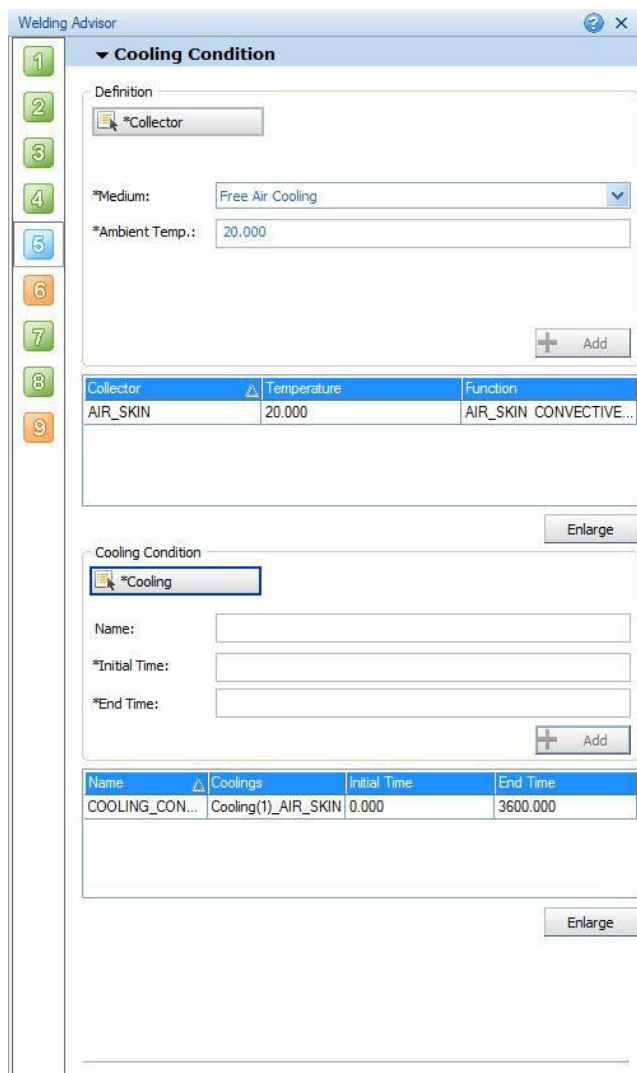
Slika 23. Definiranje četvrtog koraka simulacije

Podaci o brzini zavarivanja i unosu topline uzeti su iz literature. U program se unosi brzina zavarivanja 20 cm/min. Ovaj podatak odgovara prosječnoj brzini zavarivanja iskusnog zavarivača. Unos topline izračunat je preko izraza:

$$Q = \frac{UI}{v} \frac{60}{1000} \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad (15)$$

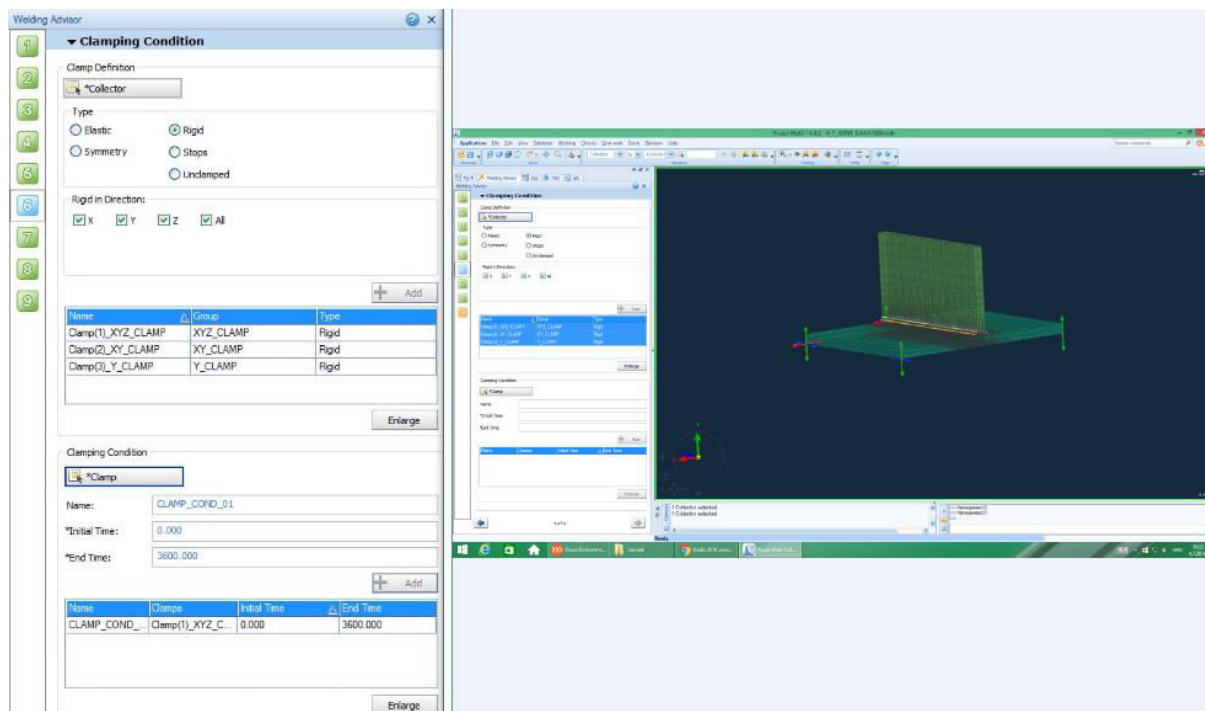
Unosom podataka iz literature ($I = 160 \text{ A}$, $U = 22,5 \text{ V}$) u formulu, dobiva se vrijednost unosa topline u iznosu od 10,8 kJ/cm. Također se u program unosi maksimalna iskoristivost MAG postupka u iznosu od 0,8 (80%). Za početno vrijeme prvog zavara unosi se 0 s, dok se za početno vrijeme drugog zavarivanja unosi 40 s (oko 12 s nakon završetka prvog zavara). Ovim načinom zavarivanja se djelomično onemogućava međuprolazno hlađenje zavarivane konstrukcije.

U petom se koraku definiraju uvjeti hlađenja. Na početku se odabire ranije definiran kolektor imena "AIR_SKIN", te mu se dodaju uvjeti hlađenja (slobodno hlađenje na zraku), i definira se okolišna temperatura od 20°C. Nakon toga se definiraju preostali uvjeti hlađenja i odabire se uvjet hlađenja "COOLING_COND_01" te definira vrijeme početka i završetka hlađenja. Postupak definiranja ovog koraka prikazan je na slici 24.



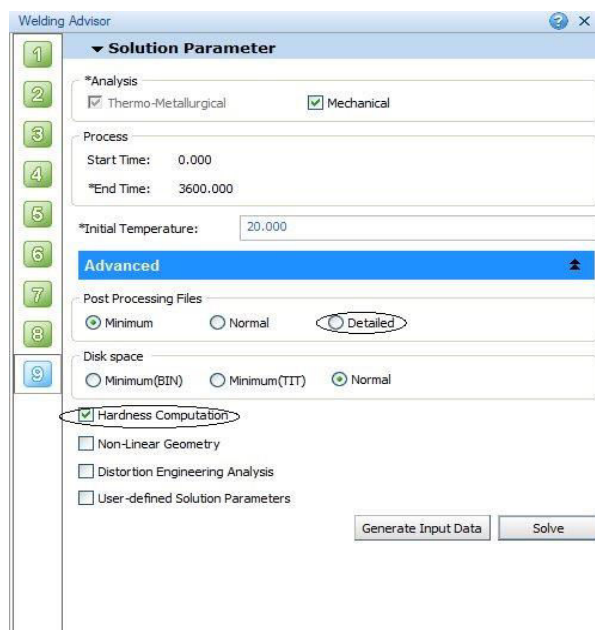
Slika 24. Definiranje uvjeta hlađenja

U šestom koraku definiraju se podaci potrebni za stezanje radnog komada. Potrebno je odabrati sve kolektore, jedan po jedan ("XYZ_CLAMP", "XY_CLAMP", "Y_CLAMP"), a kao tip stezanja odabire se kruto stezanje (opcija "Type" - "Rigid"). Prvom kolektorou je time onemogućeno gibanje u svim smjerovima (X, Y, Z), a ostalim se kolektorima oduzima sloboda gibanja analogna njihovim imenima. Zatim se definira uvjet stezanja na način da se selektiranjem opcije "CLAMP" odabere "CLAMP_COND_1" i odredi početno i konačno vrijeme stezanja. Ta su vremena najčešće ista kao i vremena kod uvjeta hlađenja. Uvjeti stezanja prikazani su na slici 25.



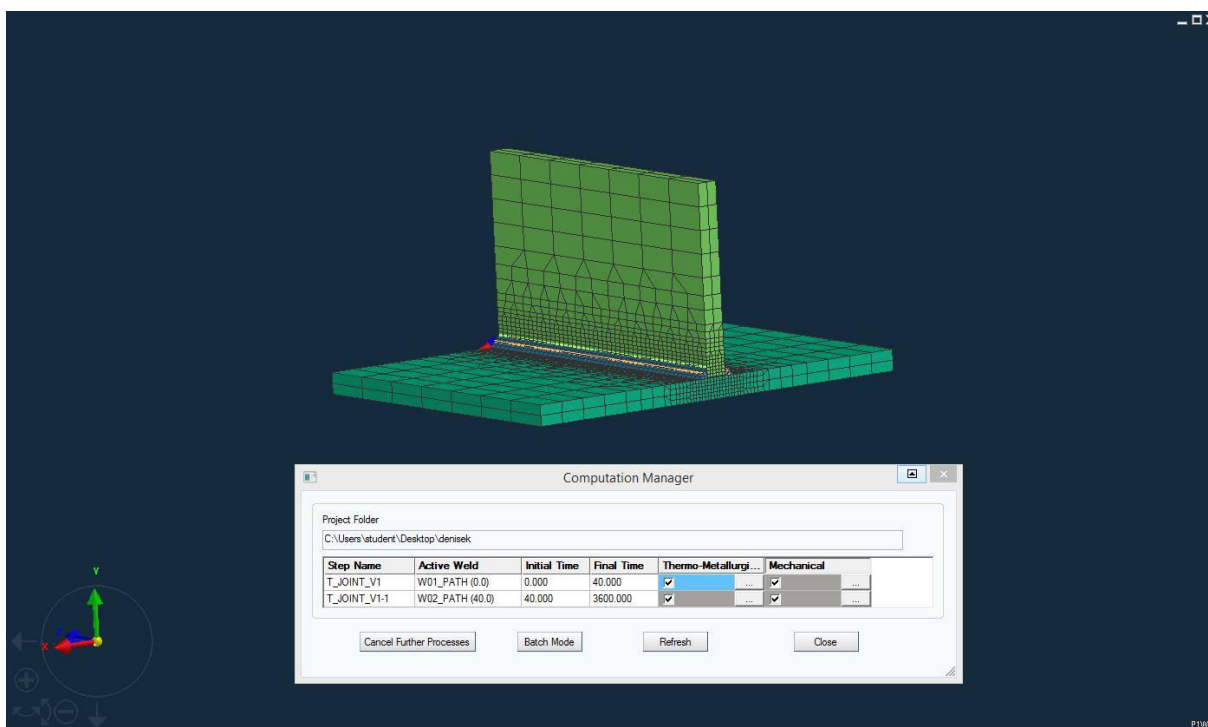
Slika 25. Uvjeti stezanja radnog komada

U sedmi i osmi korak nije potrebno unositi nikakve promjene, već se sedmi i osmi korak preskaču. U sedmom i osmom koraku je moguće spoj i radni komad opteretiti silama i definirati kontakt spoja s drugim konstrukcijama. U posljednjem, devetom koraku, potrebno je označiti vrste analiza koje će se provesti. Uz obaveznu termo - metaluršku, provodi se i mehanička analiza. Također je bitno za ovaj rad uključiti opciju "Hardness Computation" i izvršiti detaljnu analizu uključanjem opcije "Detailed"(Slika 26.).



Slika 26. Definiranje devetog koraka simulacije

Sljedeći je zadatak kreirati datoteku s unesenim ulaznim podacima. To se postiže odabirom opcije "Generate Input Data". Ova opcija stvara datoteku s nastavkom .vdb koja se nadalje odabire opcijom "Solve", nakon čega se pokreće simulacija opcijom "Compute". Na slici 27. vidi se sam proces izvršavanja simulacije, kod koje plava boja označava da se trenutno izvršava simulacija određenog procesa, a zelenom bojom su označeni oni procesi koji su simulirani i kod kojih je završila analiza. Nakon završetka simulacije potrebno je prijeći u sljedeći modul koji se naziva "Visual Viewer", koji nam daje uvid u dobivene rezultate i prikazuje provedene simulacije i analize.

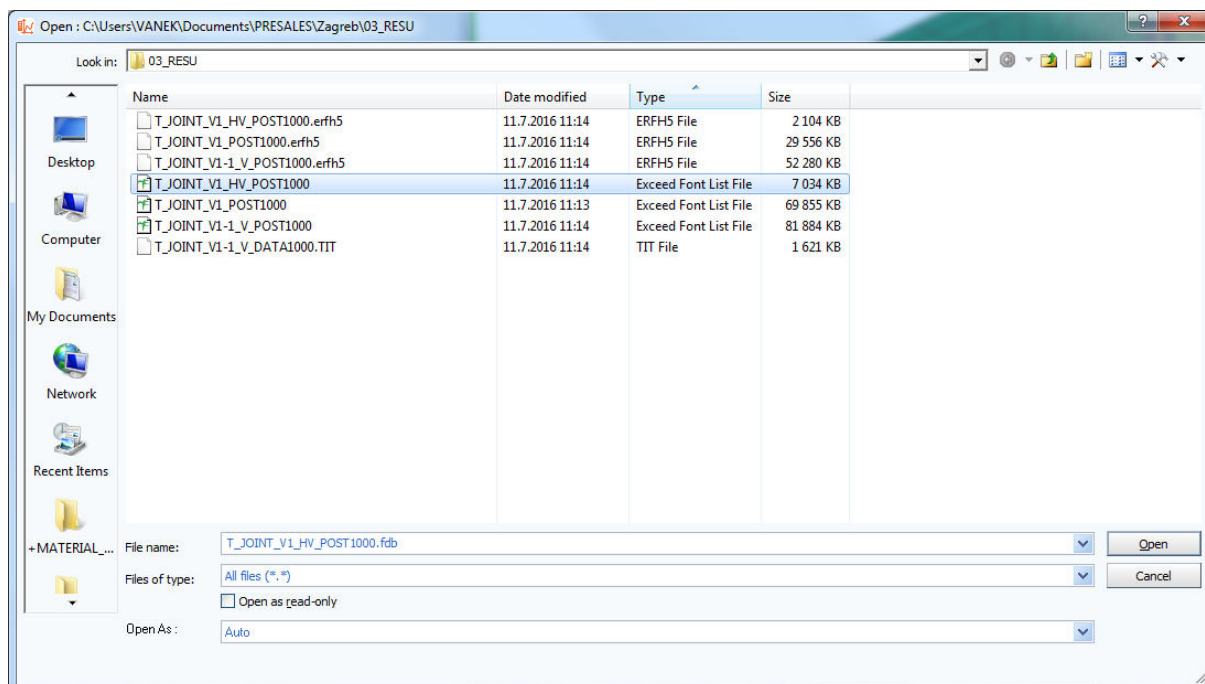


Slika 27. Početak simulacije

6.1.3. Visual Viewer

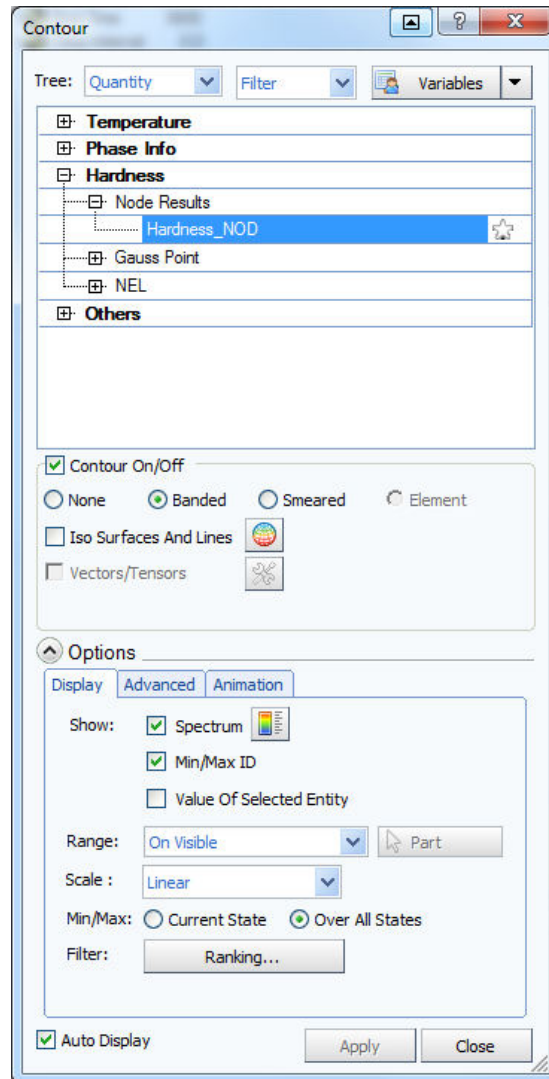
Po završetku simulacije (vidljivo na slici 27. kada svi prozori pozelene), prelazi se u modul "Visual Viewer", unutar kojeg se prikazuju željeni rezultati ranije provedene simulacije. Datoteke sa rezultatima nalaze se u direktoriju 03_RESU. U ovom direktoriju s rezultatima (03_RESU) razlikuju se dva osnovna tipa datoteka, a to su datoteke koje imaju nastavak .fdb (za Sysweld-Environment), te datoteke sa nastavkom .erfh5 koje se koriste u ovom radu (vezane za Visual-Environment). Također se razlikuju datoteke koje u svom imenu sadrže kao ekstenziju POST1000 ili POST2000, a upravo te ekstenzije govore radi li se

o rezultatima toplinsko-metalurške (POST1000) ili mehaničke analize (POST2000) (Slika 28.).



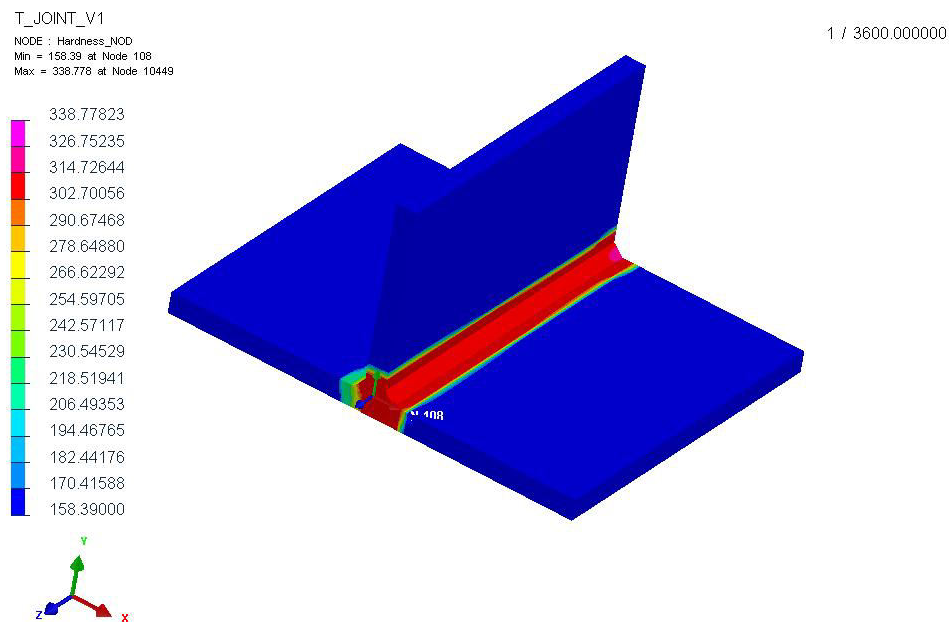
Slika 28. Datoteke rezultata

Kako se je za ovaj rad potrebno ispitati tvrdoću, u modulu "Visual Viewer-a" potrebno je otvoriti datoteku T_JOINT_V1_HV_POST1000, što prikazuje slika 28. Nakon što se željena datoteka otvori u "Visual Viewer-u", potrebno je pritisnuti na alatnoj traci izbornika opciju *Contour*, zatim odabrati *Node_results* i opciju *Hardness*, odnosno na drugi način, ukoliko odaberemo pod opcijom *Tree - Quantity*, odabrati opciju *Hardness*, a zatim *Hardness_Node* (prikazano na slici 29.).

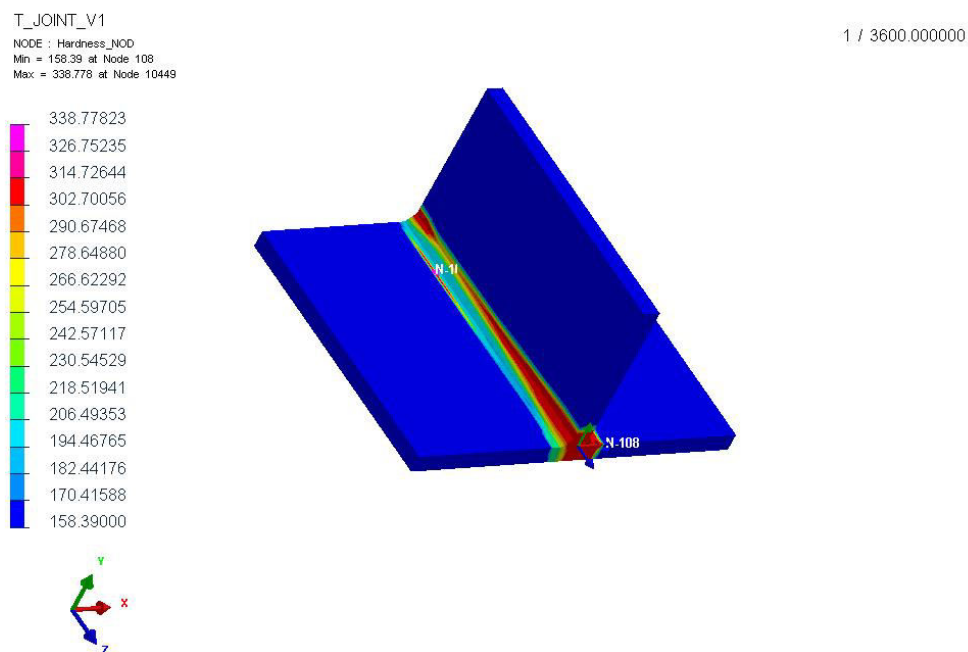


Slika 29. Opcija odabira rezultata za tvrdoću

Nakon što se odabere ispravna opcija za iščitavanje rezultata tvrdoće, vidi se raspodjela tvrdoće u radnom komadu. Za definirani unos topline, odnosno napon od 22,5 V ; struju 160 A, i brzinu zavarivanja 20 cm/min dozvoljena je maksimalna tvrdoća u iznosu od 380 HV10. Slike 30. i 31. pokazuju raspodjele tvrdoće radnog komada.



Slika 30. Raspodjela tvrdoće radnog komada nakon zavarivanja



Slika 31. Raspodjela tvrdoće radnog komada nakon zavarivanja 2

Na slikama 30. i 31. vidi se da je maksimalna tvrdoća u radnom komadu nakon zavarivanja 338,78 HV10, što zadovoljava traženi maksimum u iznosu od 380 HV10. Usporedbom dobivenih rezultata u laboratoriju sa dobivenim rezultatima simulacije, mogu se donijeti brojni zaključci. Koristeći iste parametre zavarivanja u realnim uvjetima, rezultati mjerenja tvrdoće pokazuju da maksimalna izmjerena tvrdoća ne prelazi 254 HV10, dok je simulacija dala rješenje od čak 338 HV10. Tvrdoća nakon zavarivanja ovisi o mnogim drugim uvjetima i parametrima, osim navedenih parametara zavarivanja. Za zadani nelegirani konstrukcijski čelik, udio nečistoća i udio ugljika može varirati unutar određenih granica dopuštenog intervala. Pa tako ukoliko se ti udjeli nalaze na suprotnim stranama granica, to može rezultirati velikim promjenama u tvrdoći, čvrstoći, naprezanjima itd. Isto tako, osim udjela ugljika i nečistoća, utjecaj na tvrdoću može imati temperatura i uvjeti predgrijavanja, te toplinska obrada samog materijala prije zavarivanja i nakon zavarivanja. Dakle, vrlo je bitno dali je materijal prije i nakon tehnologije zavarivanja popušten, normaliziran, odžaren i dr. Zaostala naprezanja često se smanjuju odžarivanjem nakon zavarivanja. Toplinska obrada normalizacijom provodi se radi dovođenja grubozrnate, otvrdnute ili nejednolike strukture u „normalnu“ strukturu čelika. Kod zavarivanja čelika sklonih otvrdnjavanju struktura u ZUT-u može otvrdnuti toliko da postane sklona pukotinama. Odžarivanjem se takva tvrdoća nešto smanji, ali ne značajno. Normalizacijom se prekomjerno otvrdnjavanje može potpuno otkloniti i dovesti u područje „normalnih“ tvrdoća osnovnog materijala. Normalizacijom se takva struktura dovodi u „normalno“ prvobitno stanje. Dakle, toplinska obrada prije i poslije zavarivanja je „nužno zlo“. Treba je izbjegavati gdje god je to moguće, ali ako se mora izvesti onda se mora izvesti po pravilima struke sa obučenim i kvalificiranim operaterima te ispravnom opremom.

7. ZAKLJUČAK

Kao što je ranije u uvodu rečeno, tehnologija zavarivanja je vrlo kompleksan proces. Prilikom provođenja zavarivanja radnog komada, u materijal se unosi toplina koja uzrokuje razne promjene, primjerice mikrostrukturne promjene, promjene čvrstoće, tvrdoće, a samim time i ostala svojstva materijala se mijenjaju. Dakle, promjena uvjeta zavarivanja i parametara zavarivanja rezultira promjenama mikrostrukture što dalje rezultira promjenama svojstava koja su najčešće lošija u predjelu zavarenog spoja. Upravo zbog toga, parametri zavarivanja moraju biti detaljno ispitani prije no što se donesu konačne odluke tehnologije zavarivanja. Ova ispitivanja su često skupa, dugotrajna i iziskuju veliko znanje tehnologa. U svrhu povećanja brzine i smanjenja troškova ispitivanja prije zavarivanja radnih komada, razvijene su različite aplikacije za simulaciju procesa zavarivanja.

Ovim se aplikacijama mogu ispitati razne situacije i razna svojstva (npr. čvrstoća, tvrdoća, deformacije, mikrostruktura itd.). Stoga, numeričke simulacije sve više nalaze primjenu u tehnologijama zavarivanja, te se od tehnologa zavarivanja koji rade sa simulacijama zahtijeva, osim dobrog poznavanja tehnologije zavarivanja, i vještine u području metode konačnih elemenata (MKE), jer je ona potrebna u fazi izrade modela. Jedan od većih problema vezanih uz numeričke simulacije je vrijeme potrebno za izvođenje same simulacije, odnosno ukoliko se žele dobiti što precizniji rezultati, model mora biti od što više manjih konačnih elemenata, a s time raste i vrijeme potrebno za simulaciju. Još je jedan nedostatak programa "Visual Weld-a" taj da tehnolog nije u mogućnosti odrediti zaštitni plin koji se koristi tijekom zavarivanja, a upravo korištenjem raznih vrsta plinova utječe se na kvalitetu i svojstva zavarene konstrukcije.

Rezultati dobiveni simulacijom u ovom radu, prikazuju da određenim unosom topline (10,8 kJ/cm), dolazi do značajnih promjena tvrdoće u ZUT-u i ZT. Tvrdoća osnovnog materijala dosta je manja od tvrdoće dodatnog materijala nakon zavarivanja, ali se ona još uvijek nalazi u granicama normale. Simulacija je pokazala da tvrdoća zavarenog spoja nakon zavarivanja, nije veća od zadane maksimalne dopuštene tvrdoće od 380 HV10. No nakon provedene simulacije, potrebno je za svaki slučaj provesti eksperiment, u svrhu utvrđivanja točnosti simulacije, i ukoliko se rezultati realnog ispitivanja ne slažu sa rezultatima simulacije, potrebno je provesti podešavanje i kalibraciju simulacije. U ovom radu, primjenom simulacije zavarivanja, dobiven je očekivani rezultat porasta tvrdoće u zavarenom

spoju i ZUT-u. Podaci dobiveni iz laboratorija za zavarivanje, prikazuju da stvarna tvrdoća ne prelazi 260 HV10, dok simulacija daje mnogo više vrijednosti tvrdoće. Upravo zbog toga potrebno je detaljnije ispitati koji su uvjeti doveli do neslaganja rezultata, i što nije uzeto u obzir u samom procesu simulacije.

Dakle, primjenom numeričkih simulacija u zavarivanju ostvaruju se mnoge prednosti (primjerice manje vrijeme potrebno za izvođenje eksperimenata, manji troškovi i dr.) tehnologijama zavarivanja, no često je ipak potrebno provesti i stvarni eksperiment kako bi se osigurala usporedivost dobivenih rezultata u realnim uvjetima i onih dobivenih simulacijom.

LITERATURA

- [1] Slováček M. : Numerické simulace svařování, výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí (Numerical simulation of welding process, residual stress and distortion prediction), Ph.Dthesis, September 2005, Univerzity of Defence Brno
- [2] The welding simulation solution, prezentacija, ESI group, 2006
- [3] <http://charm.stanford.edu/Main/Resources> ; dostupno 28.06.2016
- [4] Sorić J.: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [5] <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/welding-assembly> , dostupno 28.06.2016.
- [6] <http://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>; dostupno 28.06.2016.
- [7] <http://www.metalworkingworldmagazine.com/new-simufact-welding-4-presented-at-euroblech-2014> , dostupno 29.06.2016.
- [8] <http://www.swantec.com/products/sorpas-2d>, dostupno 28.06.2016.
- [9] <http://www.swantec.com/products/sorpas-3d/>, dostupno 28.06.2016.
- [10] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002
- [11] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu metalurški fakultet, Sisak, 2003
- [12] Vručinić G., Zavarljivost i ugljični ekvivalenti, Zagreb ,2009 - Zbornik radova, Welding in Maritime engineering, The Welding Institute, SLV München, 2009

