

# Mikrostruktura balistički ojačanog zavarenog spoja čelika ARMOX 500 T

---

Čabraja, Kristijan

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:235:141196>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Kristijan Čabraja**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Kristijan Čabraja

Zagreb, 2016.

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

Iskreno zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem dr. sc. Maja Jurica na svim savjetima, kritikama i primjedbama koje su oblikovale ovaj rad. Također zahvaljujem cijeloj Katedri za zavarene konstrukcije.

Zahvaljujem doc.dr.sc. Suzani Jakovljević za pomoć pri analizi uzoraka na SEM mikroskopu.

Zahvaljujem g. Ivanu Vovku za pomoć pri pripremi uzoraka i za pomoć pri analizi uzoraka na svjetlosnom mikroskopu.

Zahvaljujem gospođi Dubravki Ulaga za pomoć pri pripremi uzoraka.

Također, zahvaljujem svim kolegama koji su mi pomogli tijekom studija.

I na kraju se zahvaljujem djelatnicima Časničke škole i svojoj obitelji na ukazanom povjerenju i strpljivosti tijekom studiranja.

Kristijan Čabraja



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**KRISTIJAN ČABRAJA**

Mat. br.: **0035188681**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**MIKROSTRUKTURA BALISTIČKI OJAČANOG ZAVAREN OG  
SPOJA ČELIKA ARMOX 500 T**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**MICROSTRUCTURE OF BALISTIC REINFORCED WELDED  
JOINT ON ARMOX 500 T STEEL**

Opis zadatka:

Proučiti značajke oklopnih čelika visoke tvrdoće i opisati moguće tehnologije zavarivanja uz obrazloženje odabira dodatnih materijala. Specificirati balističke značajke oklopnih čelika visoke tvrdoće i usporediti s balističkim ponašanjem u zoni zavarenog spoja tj. metalu zavara i zoni utjecaja topline. Opisati primjenjive mehanizme poboljšanja balističkih svojstava zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je na zavarenim spojevima čelika ArmoX 500T provesti analizu balističkih svojstava pojedinih zona zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal. Pripremiti uzorke metala zavara za provedbu mikrostrukturnih ispitivanja. Identificirati mikrostrukturne konstituente u području metala zavara i opisati utjecaj na balistička svojstva spoja.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

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.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

**SADRŽAJ**

<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>V</b>
<b>SAŽETAK RADA .....</b>	<b>VII</b>
1. UVOD .....	1
2. OKLOPNI ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE .....	2
2.2 Svojstva OČTV.....	6
2.2.1. Kemijski sastav .....	6
2.2.2. Mikrostruktura .....	7
2.2.3 Mehanizmi očvrstnuća .....	8
2.2.3.1 Očvrstnuće kristalima mješancima.....	9
2.2.3.2. Očvrstnuće martenzitnom transformacijom .....	9
2.2.3.3. Očvrstnuće hladnom deformacijom .....	10
2.2.3.4. Očvrstnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna) .....	11
2.2.4. Svojstva.....	11
3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA OKLOPNIH ČELIKA VISOKE TVRDOĆE .....	16
3.1. Unos topline.....	17
3.1.1. Predgrijavanje .....	17
3.1.1.1. Određivanje temperature predgrijavanja .....	18
3.1.2. Procjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika ( $C_{ekv}$ ).....	19
3.1.3. Greške u zavarenim spojevima .....	19
3.1.3.1. Hladne pukotine .....	21
3.2. Zavarivanje OČVT .....	23
3.3. Postupci zavarivanja .....	25
3.3.1 MIG/MAG i FCAW postupak .....	25
3.3.1.1. Parametri zavarivanja .....	27
3.3.1.2. Dodatni materijal.....	30
3.3.1.3. Način prijenosa metala .....	32
4. BALISTIKA NA OKLOPNIM ČELICIMA VISOKE TVRDOĆE .....	35
4.1. Balistika .....	35
4.1.1. Učinak projektila na cilju.....	35

4.2. Mehanika proboja .....	36
4.2.1. Penetratori kemijskom energijom .....	36
4.2.2. Penetratori kinetičkom energijom .....	36
4.2.3. Mehanizmi proboja oklopa .....	37
4.2.4. Proboj kinetičkim penetratorom .....	38
4.2.4.1. Podjela procesa proboja .....	40
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	41
5.1. Proces zavarivanja .....	41
5.2. Uzorci .....	43
5.3. Balistička ispitivanja .....	44
5.3.1. Uzorak U1 .....	44
5.3.2. Uzorak U2 .....	45
5.3.4. Uzorak U4 .....	46
5.4. Priprema uzorka .....	46
5.5. Mikroanaliza uzorka .....	47
5.5.1. Uzorak T1-1 .....	47
5.5.2. Uzorak T2-1 .....	48
5.5.3. Uzorak H3-3 .....	51
5.5.4. Uzorak T4-2 .....	55
5.6. Preporuka daljnjeg razvoja tehnologije zavarivanja .....	58
6. ZAKLJUČAK .....	59
7. LITERATURA .....	60

## POPIS SLIKA

Slika 1. Tijek proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće .....	2
Slika 2. Isporuka sirovina, pretvorba ugljena i metalurški proce .....	3
Slika 3. Kisikov konverter .....	4
Slika 4. LD proces, Ljevački lonac i kontinuirano lijevanje .....	4
Slika 5. Toplo valjanje .....	5
Slika 6. Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom .....	5
Slika 7. Mikrostruktura ARMOX 500T čelika .....	8
Slika 8. Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije .....	10
Slika 9. Istosmjerno glodalo – pravilno (lijevo) i pogrešno (desno) korištenje .....	15
Slika 10. Vrste grešaka u zavarenom spoju .....	20
Slika 11. Utjecajni čimbenici za nastanak hladnih pukotina .....	22
Slika 12. Rastvorljivost vodika u čistom željezu .....	23
Slika 13. MIG/MAG postupak .....	26
Slika 14. Tehnike zavarivanja - desna a) i lijeva b) tehnika rada .....	30
Slika 15. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice .....	34
Slika 16. Djelovanje kumulativnog mlaza .....	36
Slika 17. Mehanizmi proboja oklopa .....	38
Slika 18. Proboj kinetičkom energijom .....	39
Slika 19. Rikošet .....	39
Slika 20. Faze proboja .....	40
Slika 21. Redoslijed zavarivanja uzoraka U1, U3 i U4 .....	43
Slika 22. Redoslijed zavarivanja uzorka U2 .....	43
Slika 23. Makrouzorak T1-1 .....	47
Slika 24. Makrouzorak T2-1 .....	48
Slika 25. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka T2-1 .....	49
Slika 26. Mikrostruktura linije staljivanja zavarenog spoja uzorka T2-1 snimljena svjetlosnim mirkoskopom .....	50
Slika 27. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka T2-1 .....	50
Slika 28. Makrouzorak H3-3 .....	51
Slika 29. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka H3-3 .....	52
Slika 30. Mikrostruktura u području linije staljivanja uzorka H3-3 .....	53
Slika 31. Mikrostruktura tvrdog navarenog sloja uzorka H3-3 .....	54



Slika 32. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka H3-3 .....	54
Slika 33. Makrouzorak T4-2 .....	55
Slika 34. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka T4-2.....	56
Slika 35. Mikrostruktura u području zone staljivanja uzorka T4-2.....	56
Slika 36. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka T4-2.....	57

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente ....	6
Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 500T.....	7
Tablica 3. Mehanička svojstva ARMOX® 500T.....	12
Tablica 4. Postupci rezanja čelika ARMOX® 500T.....	12
Tablica 5. Klasifikacija pogrešaka u zavarenom spoju .....	20
Tablica 6. Standardni promjeri punih i praškom punjenih žica .....	29
Tablica 7. Plan procesa zavarivanja .....	41
Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si.....	42
Tablica 9. Pogodci U1 .....	44
Tablica 10. Pogodci U2.....	45
Tablica 11. Pogodci U3.....	45
Tablica 12. Pogodci U4.....	46

**POPIS KRATICA**

OČVT	Oklopni čelici visoke tvrdoće
LD pretvarač	Linz-Donawitz pretvarač
BCT	Body Centered Tetragonal
FCC	Face Centered Cubic
GMAW	Gas Metal Arc Welding
FCAW (136)	Flux Cored Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
MIG (131)	Metal Inert Gas
MAG (135)	Metal Active Gas
114	Elektrolučno zavarivanje samozaštitom praškom punjenom žicom
IIW	International Institute of Welding
ZUT	Zona utjecaja topline
FN	Feritni broj

## **SAŽETAK RADA**

U ovom radu proučene su značajke oklopnih čelika visoke tvrdoće.

U teoretskom dijelu rada detaljno je opisan način proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće. Analizirana su svojstva i opisani mehanizmi očvrnuća za navedeni čelik. Opisane su moguće tehnologije zavarivanja koje se primjenjuju za ovu vrstu čelika kao i njegova zavarljivost. Također, obrađen je uski dio balistike koji se odnosi na eksperiment.

U eksperimentalnom dijelu rada opisano je ostvarivanje zavarenog spoja oklopnih čelika visoke tvrdoće i prikazani su rezultati ispitivanja balističkih svojstava. Primarni cilj eksperimentalnog rada je provesti mikrostrukturno ispitivanje te identificirati mikrostrukture metala zavara i njihov utjecaj na balistička svojstva zavara.

Ključne riječi:

Čelik ARMOX 500T, zavarivanje, balistička svojstva

## **1. UVOD**

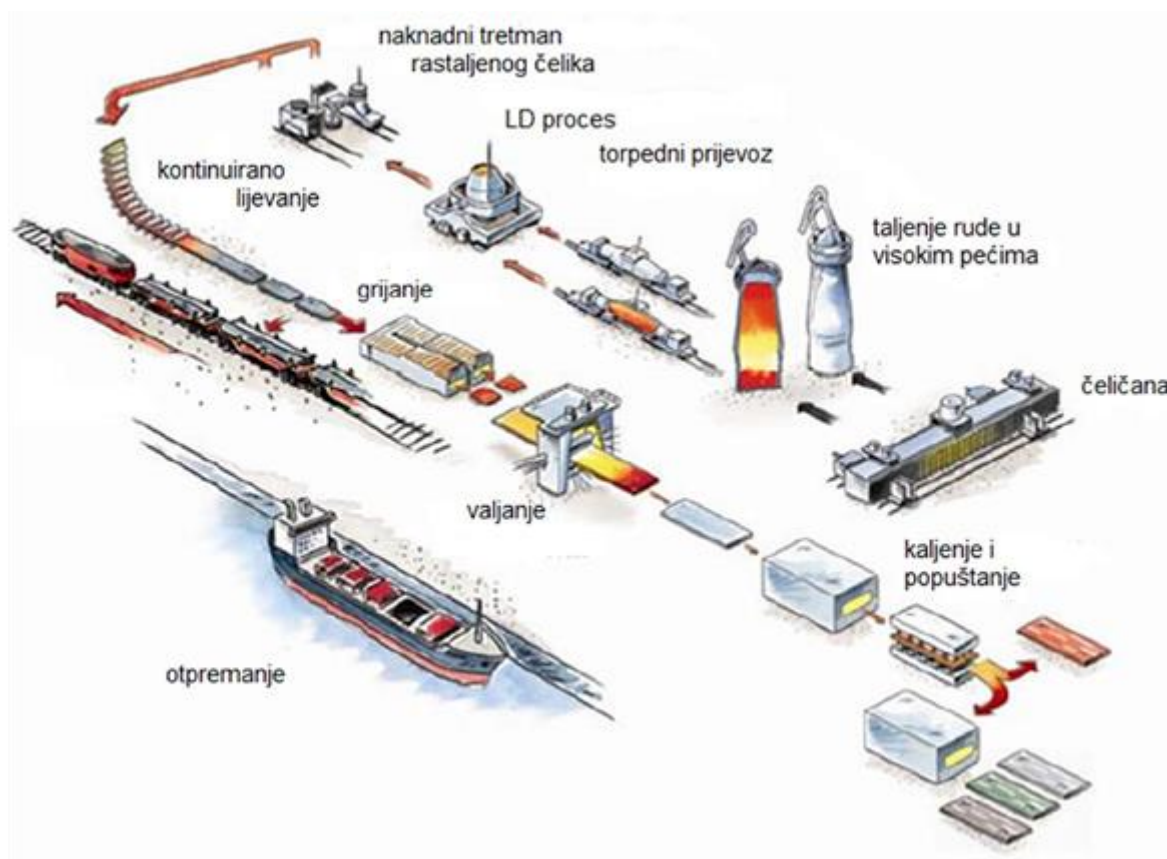
Prvi oklopni automobil se pojavio petnaest godina prije tenka, a upotrijebila ga je britanska vojska u Burskom ratu 1901. godine. Prvi tenk je bio "Little Willie" konstruiran u Velikoj Britaniji tijekom 1915. godine. Prvi na bojištu tenkove su upotrijebili Britanci u rujnu 1916. godine, a nedugo zatim u travnju 1918. godine uslijedila je i prva bitka između njemačkih i britanskih tenkova. U početku razvija oklopnih vozila razina oklopne zaštite bila je jedva dostatna da minimalno zaštitu posadu. Međutim, vojske su bile sve mobilnije i fleksibilnije, ali pobjeda je uvijek ovisila o tri bitna faktora: mobilnost, vatrena moć i zaštita. Mobilnost i zaštita oduvijek su postavljali određene uvijete za oklop. Za što veću mobilnost potreban je bio što lakši oklop, dok je za veću zaštitu potreban bio što deblji oklop, veće mase, čime se smanjivala mobilnost. Taj problem bio je glavni izazov istraživačima i znanstvenicima na tom području u to vrijeme što je potaknulo na inovativnost i dosjetljivost u samom konstruiranju i razvijanju oklopnih materijala za zaštitu. Stoga su metali postali posebno zanimljivi za primjenu u proizvodnji oklopa. Čelik je daleko najčešće korišten materijal u oklopnim vozilima do danas uglavnom zato što je čelik „svestran“. Žilavost, tvrdoća, dobra svojstava zamora, jednostavnost izrade i njegova relativno niska cijena čine čelik najprihvatljivijim izborom za oklop trupa vozila.

## 2. OKLOPNI ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE

Istraživanja diljem svijeta na području oklopnih materijala usmjerena su na razvoj tehnologija oklopa smanjene mase koji su otporni na probojnost kinetičkim protuoklopnim projektilima. Dok mnoge primjene uključuju korištenje metala niže gustoće od čelika, kao što su aluminij i titan, određena grupa čelika je i dalje primjenjiva zbog svojih dobrih balističkih svojstava i nezamjenjivih karakteristika kod konstruiranja. Mogućnost obrade komponenti oklopa u komercijalnim i vojnim područjima primjene s dostupnom opremom i osposobljenim kadrom glavna je prednost pri odabiru ovih čelika. Kako bi se što preciznije zadovoljili ovi zahtjevi počinju se osmišljati i proizvoditi oklopni ultra čvrsti čelici, u koje spadaju i oklopni čelici velike tvrdoće (OČVT) (eng. AHHS – Armor High Hardness Steel). [1,3]

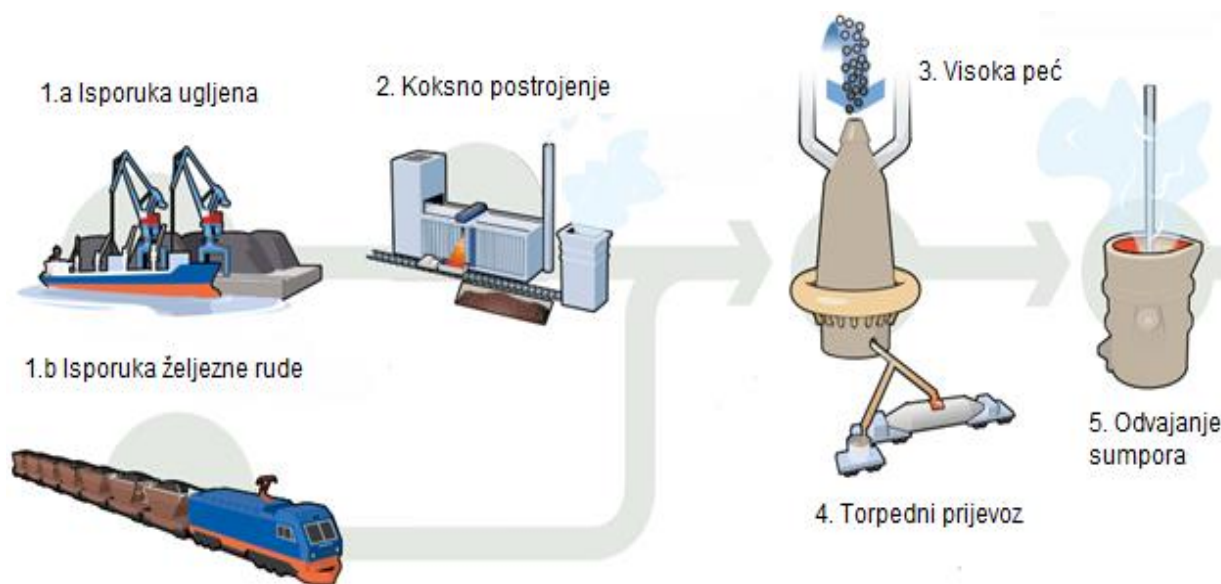
### 2.1. Proizvodnja OČTV

Proizvodnja OČTV-a je vrlo složeni proces čiji je tijek procesa proizvodnje prikazan na slici 1.



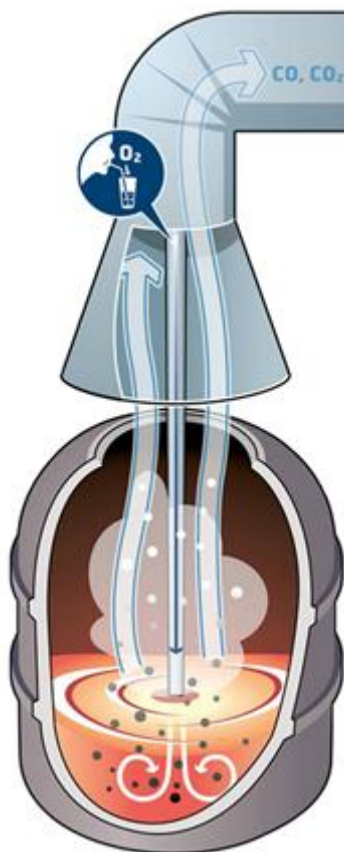
Slika 1. Tijek proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće [2]

Slika 2 prikazuje detaljniji metalurški proces dobivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće uz objašnjenje.



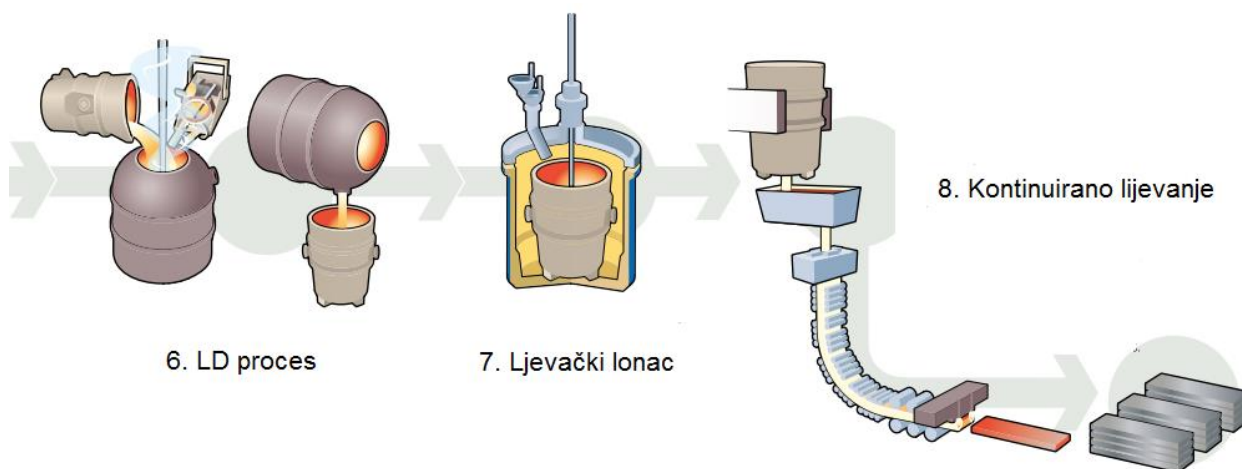
Slika 2. Isporuka sirovina, pretvorba ugljena i metalurški proces [2]

Za proizvodnju oklopnih čelika visoke tvrdoće potrebna je željezna ruda i ugljen koji se isporučuju do tvornice morskim i željezničkim prijevozom, što je danas najjeftiniji ali i ne najbrži mogući prijevoz. Ugljen se u koksnom postrojenju pretvara u koks i plin koji dalje idu prema visokoj peći. Koks se ubacuje u visoku peć, a plin se pretvara u energiju. Kuglice željezne rude, koks i vapnenac konstantno se ubacuju u visoku peć. Proces koji se događa u visokoj peći je taljenje i redukcija kisika iz željezne rude,  $Fe_3O_4$ . Kako bi se željezo oslobodilo od kisika, potrebno je dodati tvar koja će se vezati s kisikom na velikoj temperaturi, stoga se dodaje koksa, ugljen u prahu kao i neki aditivi za pospješivanje procesa. Ovaj se proces zove koksiranje. Temperatura u najtoplijoj zoni je  $2200^{\circ}C$ . Kada se sirovo željezo reducira i rastali te postigne određena razina u visokoj peći, vrući metal se spušta na dno visoke peći gdje se sakuplja i izlazi izvan peći. Vrući metal se transportira u motornim vlakovima poznatim pod nazivom torpedo. Točka 5 (Slika 2.) prikazuje odvajanje sumpora i ostalih nečistoća iz vrućeg metala. Nakon odvajanja nečistoća rastaljeni metal se vodi u LD pretvarač. U LD pretvarač se ubacuje vrući metal i sredstva za hlađenje. U LD pretvaraču se nalazi kisikov konverter (Slika 3.). [2]



Slika 3. Kisikov konverter [2]

U kisikovom konverteru upuhuje se kisik pod tlakom u talinu čime se temperatura podiže na  $1600^{\circ}\text{C}$  te kisik reagira s ugljikom, silicijem i drugim elementima. Dodaje se i vapnenac koji se veže sa silicijem i drugim elementima kako bi stvorio šljaku. U kisikovom konverteru rafinira se postotak ugljika, snizuje se s 4,5 % na 1,7 do 1,5 % kako bi se dobio čelik koji se može kontinuirano ljevati i valjati [2].

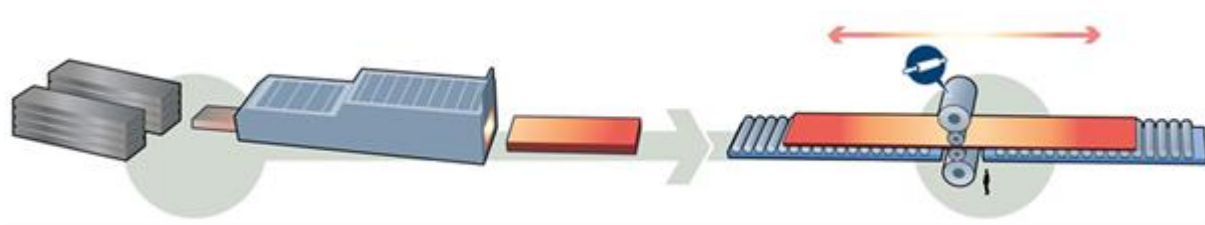


Slika 4. LD proces, Ljevački lonac i kontinuirano lijevanje [2]



Nakon toga rastaljeni čelik se prebacuje u ljevački lonac (Slika 4.). U njemu se talina podvrgava raznim procesima u kojima se u uvjetima strogo kontrolirane temperature dodaju legirni elementi i aditivi doziranjem s velikom točnošću od čak jedne čestice u milijun čestica. Sve se odvija u vakuumskoj atmosferi kako bi se postigla zadovoljavajuća čistoća čelika, ponajviše zbog vodika koji je neželjeni element u tom čeliku. Pri 1600°C rastaljeni se metal lijeva u međuspremnik iz kojeg se istače u otvoreni kalup hlađen vodom. U njemu se prvo skrućuje vanjski sloj ploče pri temperaturi lijevanja od 1540°C nakon čega se kontinuirano hladi vodom što dovodi do kaljenja. Čelik je i dalje užaren, no potpuno skrutnut pri 1000°C, potom se plinski reže u struji kisika i ostavlja hladiti. [2]

Kako bi se postigla zahtijevana mehanička svojstva, dobivene ploče je potrebno toplo deformirati valjanjem pri temperaturi od 1250°C uz prethodno čišćenje površine. Valjanje se izvodi pomoću valjačkih stanova kapaciteta 100000 kN (Slika 5.) [2,3]



Slika 5. Toplo valjanje [2]

Završna toplinska obrada je gašenje limova brzinama od 1000°C/s uz pomoć vode pod velikim tlakom i popuštanje na 200 – 700°C za postizanje velike tvrdoće. Rezanje na potrebne veličine, pjeskarenje i zaštita premazima je standardan postupak koji se provodi prije isporuke (Slika 6.) [2,3]



Slika 6. Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom [2]

## 2.2 Svojstva OČTV

### 2.2.1. Kemijski sastav

Promatrani čelici spadaju u skupinu legiranih čelika. Kako bi čelik imao neka posebna svojstva koja su rezultat dodavanja legiranih elemenata a ujedno i kako bi se mogao zvati legiranim čelikom, potrebno je u sastavu tog čelika imati neki od sljedećih elemenata: Si, Mn, Cr, Ni, W, Mo, V, Co, Ti, Cu, Al, B, Nb i/ili Ta. Da bi se neki od navedenih elemenata smatrao legirajućim, njegov maseni udio treba biti veći od udjela navedenog u tablici 1. U suprotnom, element nema dovoljnog utjecaja na svojstva čelika te ga se naziva primjesom. [4]

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente [1]

gornja granica masenog udjela primjese, %		gornja granica masenog udjela primjese, %	
Al	0,1	Nb	0,06
Cu	0,4	Pb	0,4
B	0,0008	Si	0,5
Co	0,1	Ti	0,05
Cr	0,3	V	0,1
Mn	1,8	W	0,1
Mo	0,08	Ni	0,3
Ostali elementi osim C, P, S, N i O		0,5	

Ugljik se, kada se govori o čelicima, ne smatra legiranim elementom. Primjese kao što su Si i Mn su uvijek prisutne budući da moraju zaostati u čeliku od metalurškog procesa dezoksidacije i desulfatizacije. Prisutni elementi P i S (tjeđe i As, Sn i Sb) su nečistoće. Po dogovoru, ako je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata u čeliku manji od 5%, čelik se smatra niskolegiranim. [4]

U tablici 2 prikazan je kemijski sastav za čelik velike tvrdoće ARMOX® 500T. ARMOX je komercijalni naziv za oklopne čelike visoke tvrdoće koje proizvodi tvornica SSAB.

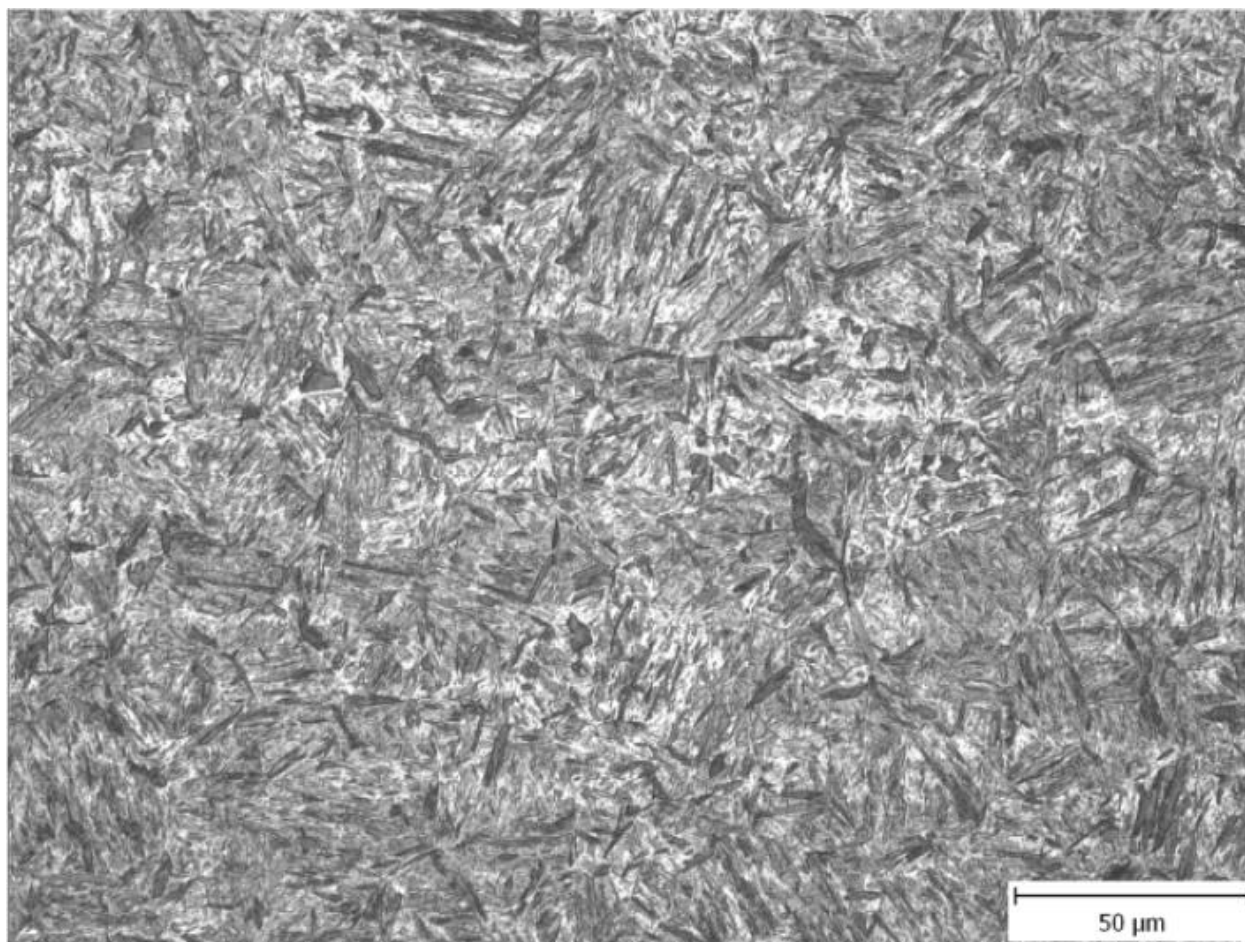
Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 500T [2]

ARMOX® 500T	
C max	0,32
Si max	0,4
Mn max	1,2
P max	0,015
S max	0,010
Cr max	1,01
Ni max	1,81
Mo max	0,7
B max	0,005
Fe	ostatak

### 2.2.2. Mikrostruktura

ARMOX čelik je oklopni čelik koji posjeduje izvrsna mehanička svojstva kao što su velika tvrdoća, čvrstoća i relativno visoka žilavost. Mikrostruktura ARMOX oklopih čelika visoke tvrdoće je rezultat kemijskog sastava i specifičnog proizvodnog procesa koji se sastoji od valjanja i temperiranja. Na slici 7 prikazan je primjer mikrostrukture.

Ovi materijali su osjetljivi na koncentrirana naprezanja kao što su oštri prijelazi, nemetalni i metalni uključci. Prema tome važna je čistoća čelika, pa treba pri njegovoj proizvodnji primjenjivati čiste sirovine, posebne metode taljenja, oštre metode za izbjegavanje uključaka i plinova i štetnih primjesa, a sve to povisuje troškove. Kako bi se postigle što niže prijelazne temperature treba težiti prema sitnozrnatoj i homogenoj strukturi kao i izbjegavanju lokalnih heterogenosti (makrosegregacija, kristalnih segregacija, uključaka i izlučina).



Slika 7. Mikrostruktura ARMOX 500T čelika [6]

### 2.2.3 Mehanizmi očvršnuća

Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom gibanju dislokacija nastajanjem prepreka. Dislokacija je narušena periodičnost strukture duž neke kristalne linije. Spada u jednodimenzijske ili linijske nesavršenosti kristalne rešetke. Ta nesavršenost jako utječe na mehanička svojstva metalnih materijala. Posljedica otežanog kretanja dislokacije obično je povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora rasti. Kod očvršnuća potrebno je postići optimalni kompromis između granice razvlačenja i duktilnosti materijala te je zato dislokacije potrebno učiniti teško pokretnima, ali ne i posve nepokretnima. [5]

Maksimalne vrijednosti čvrstoće metala postižu se ili za izrazito mali broj dislokacija ili za vrlo veliki broj dislokacija ( $> 10^{10}$  cm/cm<sup>3</sup>) dok niske vrijednosti čvrstoće odgovaraju broju dislokacija od približno  $10^3$  do  $10^5$  cm/cm<sup>3</sup>. [7]

Osnovni mehanizmi (načini) očvršnuća [5]:

- Očvršnuće kristalima mješancima
- Očvršnuće martenzitnom transformacijom
- Očvršnuće hladnom deformacijom
- Očvršnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)
- Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom) i disperzijom faza

#### 2.2.3.1 Očvršnuće kristalima mješancima

Očvršnuće metalnog materijala kristalima mješanca nastaje dodavanjem nekog drugog elementa (metalnog ili nemetalnog) koji ulazi u čvrstu otopinu kristalne rešetke osnovnog materijala. Dodani elementi uzrokuju napetosti i iskrivljenje (distorziju) kristalne rešetke što ima za posljedicu povećanje mehaničke otpornosti jer napetosti i distorzija rešetke otežavaju gibanje dislokacija. Ovisno o vrsti i veličini dodanog elementa razlikujemo dvije vrste kristala mješanaca: uključinske (intersticijske) - ulaze u međuatome praznine ili zamjenbene (suptitucijske) kristale mješance - oni zamjenjuju atome osnovnog metala. Na porast čvrstoće najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika u čeliku, ali time opadaju svojstva duktilnosti. Od svih načina očvršnuća ovaj daje najmanje efekte. [5,8]

#### 2.2.3.2. Očvršnuće martenzitnom transformacijom

Očvršnuće martenzitnom transformacijom ili kaljenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja, držanja pri temperaturi austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i legiranih elemenata u austenitu) i gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture). Kaljenjem nastaje nova strukturna faza koju nazivamo martenzit.

Martenzit ima tetragonalnu rešetku (BCT - body centered tetragonal) nastalu preklapanjem austenitne (FCC – face centered cubic) rešetke i zadržavanjem atoma ugljika u prisilnoj čvrstoj otopini (ovaj je mješanac također intersticijskog tipa). Do preklapanja dolazi pri nekoj temperaturi pretvorbe manjoj od martenzit start, a atom ugljika je „zarobljen“ jer nije bilo vremena da difundira iz sustava austenitnih rešetki. Atom ugljika prisilno rastvoren u M-rešetci uzrokuje njenu distorziju u jednom smjeru čime uzrokuje - porast tvrdoće i čvrstoće, ali i pad istežljivosti i žilavosti, te je zbog toga nužno provesti popuštanje. [8]

### 2.2.3.3. Očvršnuće hladnom deformacijom

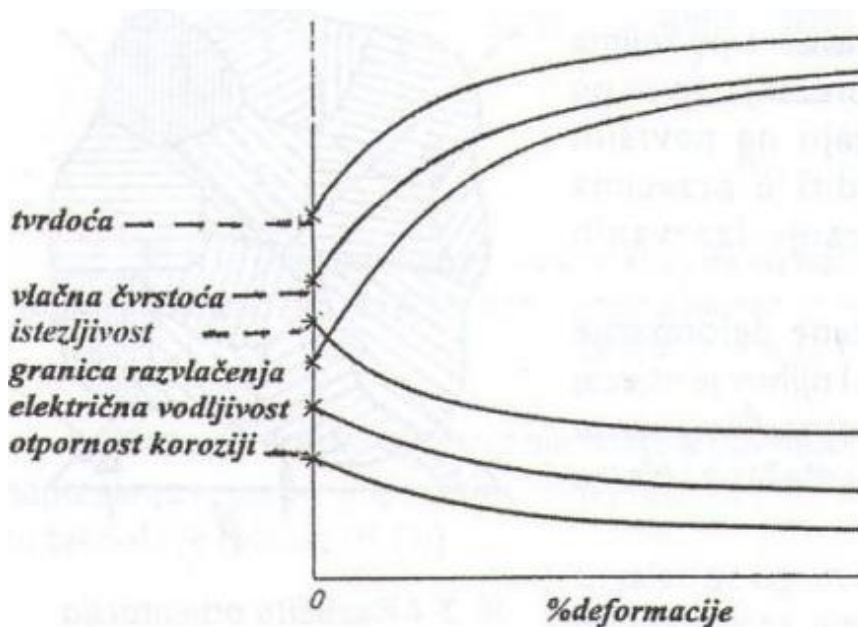
Deformacija se naziva hladnom ako se postupak deformiranja obavlja na temperaturi koja je niža od  $0,3 T_f$  gdje je  $T_f$  temperatura taljenja deformirajućeg materijala. Uslijed deformiranja dolazi do mehaničkih, fizikalnih i kemijskih promjena svojstava materijala.

Postoji nekoliko teorija koje objašnjavaju pojavu očvršćenja materijala hladnom deformacijom: teorija amorfnog sloja, teorija fragmentacija i teorija dislokacija. [8]

Najvažnija promjena koja se događa kao posljedica trajne plastične deformacije je pojava očvršćenja materijala (Slika 8.)

Suvremena istraživanja su pokazala da teorija dislokacija objašnjava pojavu očvršnuća na optimalan način. Dislokacije se unose u materijal pomoću hladnog plastičnog deformiranja. Što je viši stupanj deformacije veća je gustoća dislokacija i više su vrijednosti granice razvlačenja, ali se time znatno smanjuje žilavost materijala. Ovaj je mehanizam očvršnuća vrlo učinkovit obzirom na sam iznos očvršnuća, ali ako se pri unošenju novih dislokacija njihova gustoća približi graničnoj, nastupa koncentracija naprezanja koja dovodi do pukotina i pojave loma. Na ovaj način posebno su očvrstivi metali i legure s kubično plošno centriranom strukturom tzv. FCC rešetkom. [5]

Na slici 8 prikazana je ovisnost svojstva materijala u ovisnosti o stupnju deformacije.



Slika 8. Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije [8]

#### 2.2.3.4. Očvršnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)

Granice zrna predstavljaju barijeru klizanju dislokacija te tako dodatno sprječavaju njihovu pokretljivost i povećavaju granicu razvlačenja. Djelovanje granica zrna povoljnije je u odnosu na ostale vrste zapreka zbog toga što je broj dislokacija koje se gomilaju u velikokutnim granicama zrna ograničen i prije nego što se dostigne kritična gustoća koja bi mogla uzrokovati nastanak inicijalne mikropukotine, dolazi do procesa klizanja dislokacija preko granice u drugo zrno ako je ono povoljno orijentirano. Stoga su učinkovitija sitnija zrna, jer je time veća vjerojatnost povoljne orijentacije susjednih zrna. Dakle, usitnjenjem zrna dolazi do povećanja žilavosti. Usitnjenje zrna se obično kombinira s ostalim načinima očvršnuća [4,5].

#### 2.2.3.5 Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom) i disperzijom faza

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaza faza iz homogene mikrostrukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topljivosti stranih atoma u rešetki željeza. Djelovanje tih faza ovisi o njihovoj raspodjeli i vrsti – koherentne ili nekoherentne, srednji promjer i njihov međusobni razmak. Koherentne faze mogu presijecati klizne ravnine za što se troši energija pri djelovanju vanjskog opterećenja. Druga je mogućnost da dislokacije zaobilaze faze za što opet treba energija, koja bi se inače utrošila u deformaciju.[5]

#### 2.2.4. Svojstva

OČVT posjeduju kombinaciju dobrih balističkih svojstava i izvrsne žilavosti, tablica 3. Uz ova svojstva imaju dobru obradivost odvajanjem čestica i zadovoljavajuću zavarljivost.

U ovom poglavlju ukratko su obrađena područja osnovnih svojstava i obrade OČVT-a, dok će balistička svojstva i svojstva zavarljivosti biti obrađeni u posebnim poglavljima.

Važnija fizikalna svojstva su gustoća, koeficijent toplinskog širenja i koeficijent toplinske provodnosti. Njihove vrijednosti kreću se oko  $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ ,  $\alpha_{(20-100)^\circ\text{C}} = 11,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  i  $k = 52 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ . [2]

Oklopni čelici velike tvrdoće spadaju u visokočvrste čelike koji posjeduju granicu razvlačenja  $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$ . Najvažnija mehanička svojstva dana su u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva ARMOX® 500T [2]

ARMOX® 500T	
Tvrdoća, HBW	480-540
Udarni rad loma, Charpy-V, -40°C, min J	25,0
Granica elastičnosti, $R_{p0,2}$ , min MPa	1250,0
Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	1450-1750
Istezljivost $A_5$ , min %	8,0
Istezljivost $A_{50}$ , min %	10,0

Jedna od obrada OČVT-a je rezljivost. Proizvedene čelične oklopne ploče imaju točno propisan kemijski sastav što pojednostavljuje proces rezanja. Međutim, da bi se dobila najbolja kvaliteta reza potrebno je proces voditi pod kontroliranim uvjetima koji će biti navedeni u nastavku.

U tablici 4 prikazani su postupci rezanja koji se koriste za određene debljine ploča.

Tablica 4. Postupci rezanja čelika ARMOX® 500T [2]

	Do 25 mm	15 do 60 mm	Preko 60 mm
ARMOX® 500T	Abrazivni vodeni mlaz	Abrazivni vodeni mlaz	Abrazivni vodeni mlaz
	Plazma	Laser (do 25 mm)	Abrazivni vodeni mlaz
	Laser	Plinsko rezanje plus predgrijavanje na	Rezna ploča
	Rezna ploča	170±30 ° C Rezna ploča	



Radi kontroliranih uvjeta rezanja, oklopne čelike visoke tvrdoće podvrgavamo sljedećim procesima rezanja [2]:

**Abrazivnim vodenim mlazom** - ovaj proces se može primijeniti na kompletan spektar ARMOX ploča visoke tvrdoće, a preporuča se kao najbolji način, jer kod ovog postupka nema nastanka ZUT-a, a time se eliminira rizik od pucanja.

**Laser za rezanje** - OČVT do oko 25 mm debljine mogu se rezati pomoću ovog postupka. Nastaje vrlo uski rez, širine obično manje od 1 mm, te uski ZUT, čija je širina obično manja od 3 mm.

**Plazma rezanje** - OČVT do oko 20 mm debljine mogu se rezati pomoću ovog postupka. Nastaje rez širine od 3-4 mm i ZUT širine oko 5 mm. Plazma rezanje može biti izvedena pod vodom, što smanjuje količinu distorzije.

**Plinsko rezanje** - ovaj proces može se primijeniti na OČVT ploče do 80 mm debljine. Nastaje rez širine od 2-5 mm i ZUT koji je obično širine 4-10 mm. Nekonrolirano plinsko rezanje može uzrokovati hladne pukotine na debljinama iznad 20-30 mm. Najučinkovitija metoda kako bi se izbjeglo pucanje tijekom i nakon rezanja je da se ploče predgrijavaju. U nekim slučajevima, ploče velikih debljina koje nisu sklone predgrijevanju mogu se rezati pri malim brzinama, što uklanja potrebu za predgrijevanje.

**Rezanje reznom pločom** - ovaj proces se obično primjenjuje na rezanje cijevi i šipki, ali također se može primjenjivati za pravocrtno rezanje OČVT ploča. Širina reza je debljina rezne ploče, s malo ili bez pojave ZUT-a.

OČVT se podvrgavaju obradi deformiranjem te takvi čelici se do određene mjere mogu savijati. Potencijalni problem je velika tvrdoća koja postavlja relativno visoke zahtjeve za kalup u koji se savija. Rezultati za savijanje ovise o nizu čimbenika koji su grupirani u tri dijela: ploče, alat i postupak. [2]

Ploče:

- s porastom čvrstoće rastu i savojne sile, također treba povećati radijus alata s većom tvrdoćom ploča;
- oštećenja i hrđa na površini ploča mogu uvelike smanjiti savitljivost;
- nakon procesa rezanja rubovi ploče moraju biti pobrušeni i zaobljeni;
- savitljivost ovisi o debljini ploče tako da se tanje ploče mogu saviti na manjim radijusima;
- ako je duljina ploče prilikom savijanja manja od 10 puta debljine ploče, ploča se može saviti na manjem radijusu od propisanog.

Alat: - odabir pravog radijusa jedan je od najvažnijih faktora prilikom savijanja ARMOX ploča, preporučeno je uzeti isti ili malo veći od propisanog:  
- s većom širinom otvora kalupa u kojem se savijaju ploče bit će manje savojne sile.

Postupak: - radi manjeg trenja na rubovima kalupa nalaze se okrugle šipke preko kojih se savijaju ploče i te okrugle šipke moraju biti neoštećene i čiste;  
- kut savijanja ima manje utjecaja na potrebnu silu za savijanje od širine otvora kalupa i razreda čelika;  
- sila potrebna za savijanje određuje se pomoću formule ispod, točnost sile je  $\pm 20\%$  pod uvjetom da su vrijednosti uvrštavane u mm;

$$P = \frac{1,6 \times b \times t^2 \times R_m}{10000 \times w} \text{ [N]} \quad (2.1)$$

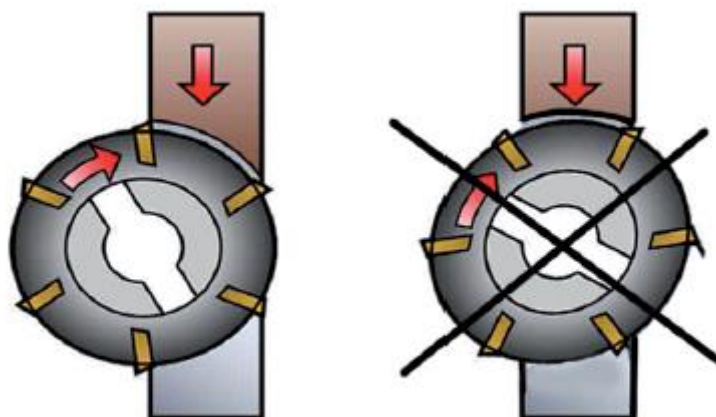
Gdje je:  $P$  [N] - sila savijanja  
 $b$  [mm] - duljina ploče  
 $t$  [mm] - debljina ploče  
 $R_m$  [N/mm<sup>2</sup>] - vlačna čvrstoća  
 $w$  [mm] - širina otvora kalupa

Važno svojstvo ovih čelika je obradljivost odvajanjem čestica u poboljšanom stanju. Preporučeni rezni materijali su brzorezni čelici ili cementirane karbidne prevlake.

Postupci koji se primjenjuju na OČVT-u su pretežito bušenje i glodanje. Za bušenje se koriste svrdla s konusnim držačem. Da bi se smanjila vibracija i produžio vijek trajanja svrdla potrebno je [2]:

- smanjiti udaljenost između vrha svrdla i izratka;
- ne koristiti dulje svrdlo nego je potrebno;
- mali posmak;
- obilno hlađenje kako bi se izbjegao ZUT;
- dobro fiksiran radni komad i dovoljna krutost cijelog radnog stola.

Koriste se još i glodala u procesima obrade odvajanjem čestica. Da bi se osigurala racionalna proizvodnja, preporučuju se glodala s cementirano karbidnim noževima. Koristi se protusmjerno glodalo koje mora biti 20-50 % većeg promjera od debljine koja se reže. Glodalo u zahvatu s obradkom mora biti zamaknuto u stranu kako bi se smanjile sile prilikom rezanja (Slika 9). [2]



Slika 9. Istosmjerno glodalo – pravilno (lijevo) i pogrešno (desno) korištenje [2]

### **3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA OKLOPNIH ČELIKA VISOKE TVRDOĆE**

Zavarivanje je najčešća tehnologija koja se upotrebljava za spajanje ove vrste čelika ali glavni problem OČVT-a je upravo njegova zavarljivost. U nastavku je objašnjena zavarljivost OČVT-a. Kod korištenja tehnologije zavarivanja za OČVT treba obratiti pozornost na cijeli niz utjecajnih faktora, od samog materijala i njegove proizvodnje, legirnih elemenata do mehanizama očvrnuća koji se javljaju u materijalu.

Kao dodatni problem javlja se vodikova krhkost, zbog načina očvrnuća i fizikalnih svojstva OČVT-a. Vodikovu krhkost je moguće eliminirati predgrijavanjem ili odabirom adekvatnog dodatnog materijala koji je skuplje rješenje, te zato moramo odabrati optimalne tehnologije zavarivanja.

Mikrostruktura OČVT-a rezultira vrlo dobra svojstva (tablica 3.) zbog kompleksnog proizvodnog procesa kojim se dobiju točno određeni mali maseni udjeli legirnih elemenata.

Problem nastaje u zavarenom spoju jer tamo nije moguće postići navedena dobra svojstva mikrostrukture. Zbog toga se traže razne varijante kako bi se postigla potrebna svojstva. Jedna od tih varijanti je da se u proces zavarivanja dodaje dodatni materijal koji je više legiran zbog toga što su u metalu zavara prisutna samo dva mehanizma očvrnuća: očvrnuće precipitacijom i očvrnuće skrućivanjem u krutoj otopini. Mikrostruktura koja se postiže u metalu zavara je bainitna i/ili martenzitna, a nju osigurava kemijski sastav.

Postupci prikladni za zavarivanje OČVT su: GMAW (Gas Metal Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding), TIG (Tungsten Inert Gas), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), SAW (Submerged Arc Welding), itd. Zbog karakteristika procesa kao što su velik unos topline, nemogućnost dovoljno dobre zaštite metala zavara, mala prilagodljivost i mala produktivnost; najadekvatniji za zavarivanje OČVT-a su elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom GMAW i elektrolučno zavarivanje praškom punjenom taljivom žicom FCAW te njihove varijante. [3]

### 3.1. Unos topline

Većina postupaka zavarivanja se zasniva na zagrijavanju materijala do plastičnog stanja ili do stanja taljenja. Tijekom zavarivanja u ZUT-u se mijenja mikrostruktura uslijed unosa topline. Zagrijavanjem i hlađenjem izaziva se taljenje, kristalizacija, strukturne promjene, zaostala naprezanja i deformacije u materijalu. Da bi mogli predvidjeti navedene promjene treba poznavati temperaturu na kojoj se materijal može zavarivati i promjene koje se događaju tijekom tog procesa. [10]

Određivanje unosa topline u metal zavara moguće je analitički pomoću formule iz norme HRN EN 1011-2. Jedinica koja se koristi je izražena kao unesena toplina po duljini zavarenog spoja. [3]

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta, \left[ \frac{\text{J}}{\text{mm}} \right] \quad (3.1)$$

Gdje su:  $Q \left[ \frac{\text{J}}{\text{mm}} \right]$  - unesena toplina

$U$  [V] - napon struje

$I$  [A] - jakost struje

$v_z \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$  - brzina zavarivanja

$\eta$  - koeficijent iskoristivosti topline električnog luka, za GMAW postupak  
 $\eta=0,8$

#### 3.1.1. Predgrijavanje

Predgrijavanje je toplinska obrada kojom se osnovni materijal zagrijava na neku željenu temperaturu iznad temperature okoline, a provodi se neposredno prije zavarivanja. Predgrijavati se može cijeli komad ili se predgrijava samo dio oko zone zavarivanja. Kao što je bitno predgrijavanje tako je bitno zagrijavanje tijekom zavarivanja, između prolaza, kako temperatura ne bi pala ispod tražene temperature predgrijavanja. O temperaturi predgrijavanja i o međuprolaznoj temperaturi ovisit će mehanička svojstva zavarenog spoja kao i sklonost pukotinama. Uz zavarivanje, predgrijavanje je jedno od važnijih unošenja topline u zavareni spoj.

Predgrijavanje se provodi iz sljedećih razloga [11]:

- Smanjenje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukturi;
- Lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja;
- Smanjenje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju;
- Postizanje određenih, željenih mehaničkih svojstava zavara koja ovise direktno o mikrostrukturi u zavaru i ZUT-u (udarni rad loma i duktilnost);
- Pojedine vrste čelika predgrijavaju se na temperaturu iznad kritične temperature pri kojoj se pojavljuje krhki lom.

Cilj predgrijavanja kod OČVT-a je prvenstveno izbjegavanje hladnih pukotina. Izbjegavanje hladnih pukotina postiže se na način da se omogući izlazak difundiranog vodika iz metala dok se on nalazi na povišenoj temperaturi.

Predgrijavanjem se postižu efekti suprotni onima koji uzrokuju hladne pukotine: krhke zakaljene faze, zaostala naprezanja i već navedeni difundirani vodik. [3,10]

#### 3.1.1.1. *Određivanje temperature predgrijavanja*

Kod čelika temperatura predgrijavanja određuje se na temelju debljine osnovnog materijala, kemijskog sastava osnovnog materijala i vrste dodatnog materijala. [11]

Postoji mnogo metoda za određivanje temperature predgrijavanja kao što su metoda Sefferian, BWRA, Itto i Bessyo. U metodama određivanja temperature predgrijavanja utjecaj kemijskog sastava izražava se pomoću ekvivalenta ugljika. Treba napomenuti da se metode ne mogu koristiti bez ograničenja jer daju pouzdane rezultate samo za određene vrste čelika.

OČVT spadaju u grupu niskolegiranih čelika koji se proračunavaju prema preporuci IIW-a (International Institute of Welding), prema sljedećem izrazu[3]:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (3.2)$$

Ako je ekvivalent ugljika manji ili jednak 0,4 nije potrebno predgrijavanje, a ako je veći treba predgrijavati čelik jer je sklon pukotinama.

Kada je određen ekvivalent ugljika, prema eksperimentalno dobivenim izrazima određuje se kritična brzina hlađenja iznad koje nema opasnosti nastanka hladnih pukotina, a shodno njoj i temperatura predgrijavanja. Temperatura predgrijavanja se može očitati iz odgovarajućih tablica i dijagrama. [3]

Preporuka proizvođača ARMOX ploča je da se ne pregrijavaju iznad 200°C. Debljine od 10-15 mm se predgrijavaju na temperaturu oko 150°C, od 15-20 mm na temperaturu oko 175°C, a veće debljine do max. temperature predgrijavanja ARMOX ploča, odnosno do 200°C. [2]

### **3.1.2. Procjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika ( $C_{ekv}$ )**

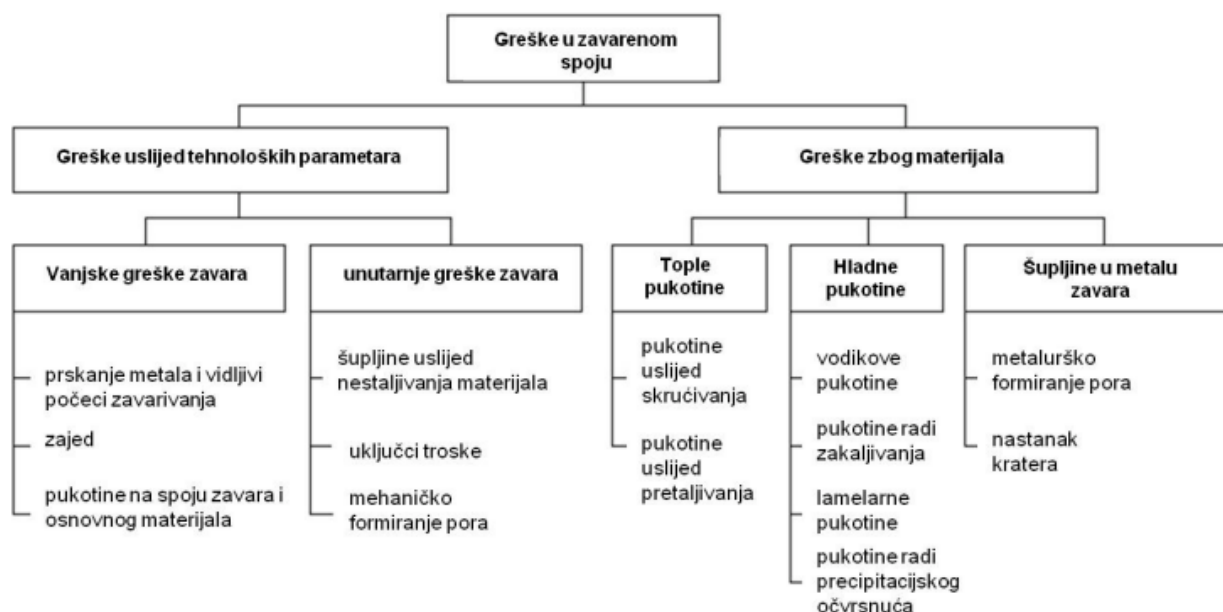
Pomoću ekvivalenta ugljika,  $C_{ekv}$ , procjenjuje se zavarljivost nekog čelika tj. osnovnog materijala, što je najčešći slučaj u praksi. Mogućnost pojave martenzita i drugih tvrdih mikrostrukturnih faza i konstituenata direktno je povezana s ekvivalentom ugljika i brzinom hlađenja čelika s temperature iznad temperature transformacije. Što je viši ekvivalent ugljika i veća brzina hlađenja veća je mogućnost pojave tvrdih i krhkih mikrostrukturnih faza pri hlađenju. To je osobito važno kod čelika s povišenom tvrdoćom, ali i kod ostalih čelika koji pokazuju sklonost prema zakaljivanju i pojavi hladnih pukotina. [11]

Željena mikrostruktura zavarenog spoja koja će imati optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava postiže se djelovanjem ugljika i drugih kemijskih elemenata iz čelika, uz određeni unos topline, brzinu hlađenja i druge faktore. Ugljik kao najznačajniji element ima veliki utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika i to na taj način da u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, kao što ima odlučujući utjecaj na zavarljivost čelika. Sa stajališta zavarivanja poželjno je imati što niži udio ugljika u čeliku ( $C \leq 0,20\%$ ) pa tako i niži ekvivalent ugljika. [11]

Ekvivalent ugljika čelika ARMOX 500T za debljine od 3-115 mm kreće se od 0,67-0,75, za veće debljine treba se obratiti proizvođaču. [2]

### **3.1.3. Greške u zavarenim spojevima**

Problemu pojave grešaka u zavarenim spojevima potrebno je posvetiti mnogo pažnje zbog posljedica koje one mogu prouzročiti. Najčešća podjela grešaka u zavarenim spojevima je prema mjestu pojavljivanja i prema načinu njihovog nastanka. Na slici 11 prikazana je podjela grešaka prema načinu njihovog nastanka.



Slika 10. Vrste grešaka u zavarenom spoju [11]

Pogreške u zavarenim spojevima, prema preporukama „Međunarodnog instituta za zavarivanje“ (IIW = International Institute of Welding), klasificirane su u šest osnovnih grupa, sukladno prema normama HRN EN ISO 6520-1:2008 (Tablica 5). [12]

Tablica 5. Klasifikacija pogrešaka u zavarenom spoju [12]

Osnovna grupa	Oznaka grupe	Vrsta pogreške
1	100	Pukotine
2	200	Poroznosti
3	300	Uključine
4	400	Nedovoljno protaljivanje
5	500	Nepravilnosti oblika
6	600	Ostale pogreške

Pukotine se još mogu podijeliti na: hladne, tople, uslijed naknadne toplinske obrade i uslijed lamelnog odvajanja. U nastavku su opisane hladne pukotine jer postoji povećana opasnost od njihovog nastanka kada se govori o oklopnim čelicima visoke tvrdoće.



### 3.1.3.1. Hladne pukotine

Hladne pukotine nastaju na temperaturama nižim od 300 °C i vrlo su opasne jer se mogu pojaviti i nekoliko sati, ili dana nakon zavarivanja, te uzrokovati zakašnjeli lom. Vodikove se pukotine mogu pojaviti u metalu zavara ili u ZUT-u, a to ovisi o tvrdoći ZUT-a i metala zavara, te o udjelima ugljika i ostalih legirnih elemenata metala zavara i osnovnog materijala, te stupnju naprezanja. [13]

Mogu biti paralelne ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja, pa se tako, s obzirom na smjer rasprostiranja govori o longitudinalnim (L) i transverzalnim (T) pukotinama [15].

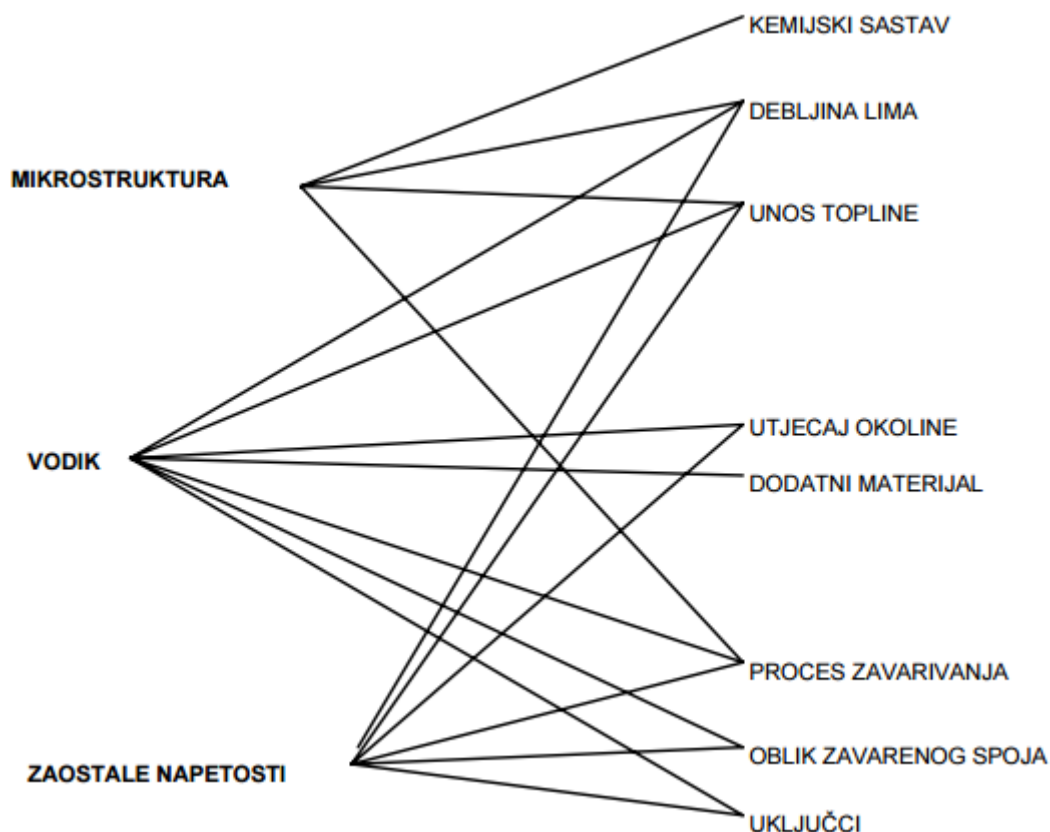
Pukotine mogu biti vidljive i nevidljive za golo oko, odnosno mikro i makro pukotine.

Tri su osnovna uzroka nastajanja hladnih pukotina [15]:

- Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina – sklonost materijala prema zakaljivanju (ocjenjuje se preko različitih eksperimentalno dobivenih formula za ekvivalent ugljika i mjerenjem tvrdoće HV10);
- Postojanje zaostalih naprezanja (procjenjuje se s obzirom na debljinu materijala, oblik i položaj zavarivanja i količinu unesene energije);
- Količina difuzijskog vodika (ako je u zavarenom spoju tijekom zavarivanja postojao vodik koji nakon zavarivanja nije izašao van; može se mjeriti, npr. glicerinskom metodom).

Za nastajanje hladnih pukotina nužna su sva tri navedena uzročnika, a vjerojatnost nastajanja je tim veća što je veći njihov utjecaj. [15]

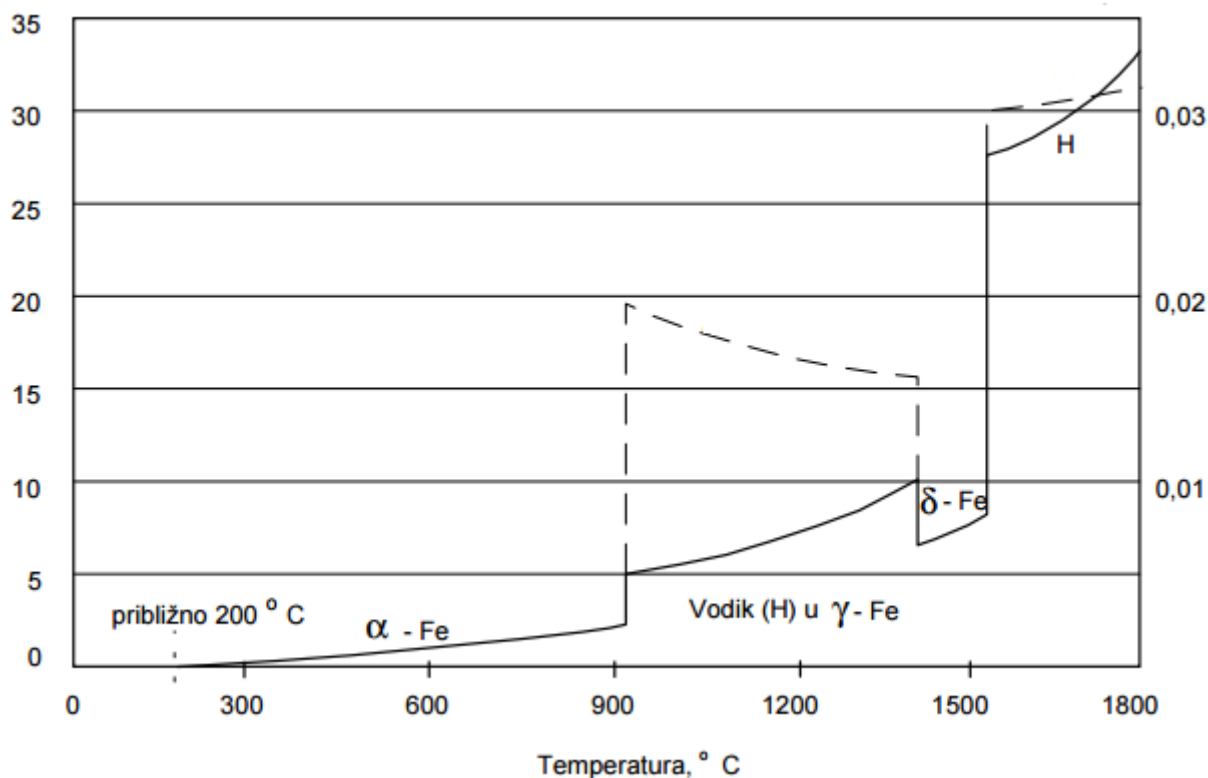
Slika 12 pokazuje sve preduvjete za nastanak hladnih pukotina.



Slika 11. Utjecajni čimbenici za nastanak hladnih pukotina [15]

Mehanizam nastanka hladnih pukotina je vrlo složen proces. Vodik se u talini zavora pri visokim temperaturama nalazi u atomarnom stanju. Zbog svojih vrlo malih dimenzija vrlo lako prolazi kroz kristalnu rešetku željeza. Pri hlađenju zbog manje rastvorljivosti u željezu na nižim temperaturama (Slika 13) vodik teži prijeći u molekularno stanje i smjestiti se na mjestima gdje ima mjesta za njegovu molekulu. Lokacije na kojima se vodik može nakupljati su greške, uslijed gomilanja vodika tlak na okolni materijal raste. Zbog utjecaja visokih tlakova, greške se povezuju u veću ili manju pukotinu, posebice kada još dodatno djeluje veliko naprezanje nastalo zbog skupljanja metala zavora. [3]

Rastvorljivost vodika, ml/100 grama metala zavara



Slika 12. Rastvorljivost vodika u čistom željezu [15]

Najvažniji uzročnik hladnih pukotina je vodik.

Generalno, vodik pri konvencionalnim postupcima zavarivanja dolazi iz vezane vlage u oblozi elektrode kod REL zavarivanja ili prašku kod EPP i FCAW zavarivanja. Kod postupaka s plinskom zaštitom, tj. TIG i MIG/MAG česta je pojava unosa vodika iz zaštitnog plina. Uz vlagu, vodik koji se nalazi u oblozi elektrode pojavljuje se iz krutih spojeva vode i konstituenata obloge, npr. ugljikovodici u celulozi, hidratizirani oksidi iz produkata hrđe ili kristalna voda vezana u glini ili azbestu. Uz to, vodik se apsorbira iz prljavštine na radnom komadu ili dodatnom materijalu u obliku masti, ulja i sl. [14]

### 3.2. Zavarivanje OČVT

Glavna problematika ispravne uporabe oklopnih čelika visoke tvrdoće je njegova zavarljivost i zavarivanje. Osim balističkih svojstava, potrebno je imati na umu dvije stvari: mikrostrukturu osnovnog materijala koja se nalazi u ZUT-u i dovoljna mehanička svojstva metala zavara.

Uobičajena metoda proizvođača čelika za ispitivanje svojstava jest podvrgavanje materijala raznim stvarnim i/ili simuliranim toplinskim ciklusima. Razlog ovome je određivanje maksimalnog i minimalnog unosa topline unutar kojeg se događa prihvatljiva degradacija materijala.

Hlađenje se promatra unutar vremenskog perioda  $t_{8/5}$  (vrijeme potrebno za prijelaz temperaturnog područja između 800°C i 500°C jer se u tom vremenskom i temperaturnom periodu određuje mogućnost nastanka mikrostrukturnih promjena).

S druge strane proizvođač dodatnog materijala razvija kemijski sastav dodatnog materijala i dobiva svojstva za čisti metal zavara kakva su propisana normama za dodatne materijale. Stoga, svojstva zavara dobivenih ovakvim ispitivanjima nisu u potpunosti usporedivi sa stvarnim svojstvima zavarima.

U realnoj proizvodnji, osnovni i dodatni materijal dolaze u interakciju određenim postupkom zavarivanja nakon čega se, zbog različitosti materijala i nepredvidivosti, ispituju mehanička svojstva zavarenog spoja koja su tada glavni pokazatelj kvalitete.

Tokom takve uhodane procedure potrebno je paziti kod zavarivanja OČVT-a na nekoliko stvari:

1. Obratiti pozornost na postojanje određenog miješanja osnovnog metala i metala zavara, ovisno o procesu i parametrima zavarivanja. Ovo znači da metal zavara može imati značajno drukčiji kemijski sastav od čistog dodatnog materijala koji je tim kemijskim sastavom zadovoljio uvjete. Stoga je jasno da su svojstva stvarnog zavarenog spoja drukčija od deklariranih od strane proizvođača dodatnog materijala. Danas se sve više teži klasificiranju čelika i prema kemijskom sastavu, a ne samo prema njegovim svojstvima. Ovo značajno olakšava izbor dodatnih materijala i ostvarivanje očekivanih svojstava zavarenog spoja.
2. Ovisno o debljini materijala potrebno je primjenjivati različite tehnike. Za tanje limove preporučuje se zavarivanje u jednom prolazu, za deblje limove u dva prolaza, dok se debeli limovi zavaruju u više prolaza. Iako se zavaruje istim dodatnim materijalom, mehanička svojstva nakon primijenjenih različitih tehnika značajno se razlikuju: Kod zavarivanja u jednom prolazu, mikrostruktura je usporediva s onom lijevanog čelika bez toplinske obrade. Kada se zavaruje u više prolaza, naredni prolazi odžaruju prethodne te zavareni spoj ima mikrostrukturu nalik poboljšanom čeliku.

Očito je da tehnologija zavarivanja ima važan utjecaj na svojstva zavarenog spoja. U slučaju višeprolaznog zavarivanja slične se pojave pojavljuju i u ZUT-u prethodnih prolaza. Kada se želi postići sitnozrnatost u metalu zavara, koristi se zavarivanje u mnogo tankih prolaza.[3]

Najvažniji pristup zavarivačkom procesu je optimalno podešavanje parametara (jakost struje, napon struje, brzina dodavanje žice i brzina zavarivanja). Unos topline je potrebno prilagoditi debljini osnovnog materijala kako bi se postigla optimalna svojstva procesa. Previše topline može doprinijeti velikom padu čvrstoće i smanjenoj trajnosti spoja. Ovo se može izbjeći ako se postavi ograničenje za debljinu omekšanja na 0,25 % debljine osnovnog materijala. Osim reguliranja kemijskog sastava dodatnog materijala, kontrola unosa topline u zavar je jedna od važnijih stvari kod zavarivanja OČVT-a. Ukoliko je unos topline prenizak, sve je veća opasnost od neprotaljivanja, a ako je previsok, ZUT postaje prevelik i uzrokuje negativne utjecaje na zavareni spoj.

Unos topline, koji proizlazi iz parametara zavarivanja, rezultira određenim vremenom hlađenja  $t_{8/5}$ . [3]

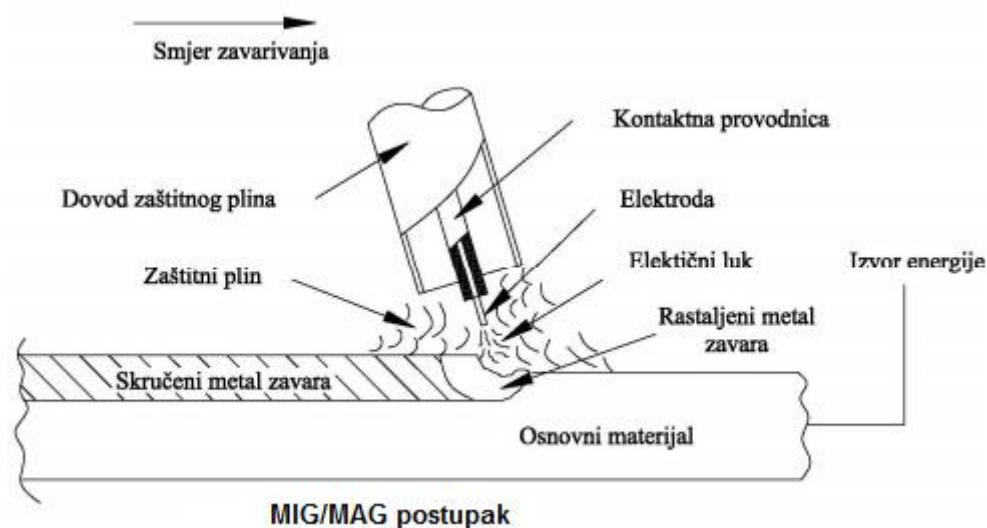
### 3.3. Postupci zavarivanja

Zavarivanje oklopnih čelika visoke tvrdoće moguće je provesti sa svim postupcima zavarivanja. Naime, gledajući na produktivnost, isplativost, i relativno mali unos topline kao i kriterij da unos vodika kroz zaštitni plin i/ili dodatni materijal mora biti manji od 5 ml na 100 g metala, iz tog slijedi da dva postupka odgovaraju ovim kriterijima, a to su GMAW postupak i FCAW postupak.

Prema normi ISO 4063 : 2009 oznaka GMAW postupka zavarivanja je 131 (MIG), ukoliko je korišten inertan, ili 135 (MAG) za aktivan plin zaštitne atmosfere. Prema istoj normi oznaka za FCAW je 136, ukoliko je korišten inertan, ili 137 za aktivni plin zaštitne atmosfere.

#### 3.3.1 MIG/MAG i FCAW postupak

Karakteristika MIG/MAG i FCAW postupaka zavarivanja je: elektrolučni postupak zavarivanja kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina. Kod ovih postupaka zavarivanja električni luk se održava između kontinuirane taljive elektrode u obliku žice i radnog komada pri čemu pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj direktno u električni luk (Slika 14.). [11]



Slika 13. MIG/MAG postupak [11]

Osnovni dijelovi MIG/MAG i FCAW uređaja: pištolj za zavarivanje, izvor struje, kolot žice (dodatni materijal), sustav za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, polikabel i kabel mase.

Parametri MIG/MAG i FCAW postupka zavarivanja [11]:

- jakost struje  $I$ , A
- napon električnog luka  $U$ , V
- brzina zavarivanja  $v_z$ , mm/min
- slobodni kraj žice  $l_{skz}$ , mm
- protok plina ili mješavine  $Q_{pl}$ , l/min
- vrsta zaštitnog plina i/ili praška
- induktivitet  $L$ , H
- promjer žice  $d_z$ , mm
- položaj zavarivačkog pištolja

Prednosti MIG/MAG i FCAW postupka zavarivanja u odnosu na ostale postupke [11]:

- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala,
- veliki raspon mogućih parametara i načina prijenosa metala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- široki raspon debljina osnovnog materijala,
- zavarivanje u radionici i na terenu,

- visoka učinkovitost i produktivnost,
- visoka kvaliteta metala zavara,
- pogodni za automatizaciju.

Nedostaci MIG/MAG i FCAW postupaka zavarivanja u odnosu na ostale postupke [11]:

- mogućnost grešaka kod rada na terenu,
- problemi kod dovoda žice – mehanički problem,
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost, ugorine, uključci troske),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima i troska kod FCAW postupka (gubici i potrebna naknadna obrada),
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje). [11,16]

#### 3.3.1.1. Parametri zavarivanja

Jakost struje zavarivanja  $I$ , A [15,16]:

- struja zavarivanja ovisi o brzini dodavanja žice i promjeru žice. Ovisi još o kemijskom sastavu i slobodnom kraju žice. Ako se ostali parametri drže konstantnim, promjenom jakosti struje postiže se: povećanje struje povećava količinu nataljenog metala i povećava penetraciju, pretjerana struja stvara ispupčeni prijelaz zavara lošeg izgleda, dok nedovoljna struja daje prijenos u velikim kapima, pretjerano štrcanje i dovodi do pretjeranog otapanja dušika i poroznosti metala zavara kod samozaštitnih elektroda. Kako se struja zavarivanja povećava/smanjuje promjenom brzine žice, izlazni napon izvora struje se mijenja kako bi se zadržao optimalan odnos napona luka i struje. Uz određenu brzinu žice, struja zavarivanja varira, ovisno o slobodnom kraju žice (kako se on povećava, struja pada i obrnuto). Približna vrijednost jakosti struje je od 80-400A.

Napon električnog luka  $U$ , V [3,15,16]:

- napon luka je usko povezan s visinom električnog luka; napon na uređaju zavarivačkog izvora struje je zbroj padova napona kroz zavarivački krug. To uključuje pad napona kroz zavarivački kabel, slobodni kraj žice, električni luk, radni komad i kabel radnog komada. Napon luka kod FCAW postupka zavarivanja, žice može utjecati na izgled, čvrstoću i svojstva zavara. Preveliki napon električnog luka (predugi električni luk) može uzrokovati pretjerano štrcanje, širok i nepravilan oblik prolaza zavara i pojavu

ugorina. Premali napon električnog luka (prekratki električni luk) daje uski izbočeni prijelaz uz štrcanje i malu penetraciju, može još uzrokovati ulijetanje nerastaljene žice u talinu te otežano uspostavljanje električnog luka. Kutni zavari opterećeni na dinamička opterećenja moraju imati blage prijelaze jer se u suprotnom javljaju nepovoljna zarezna djelovanja između metala zavara i osnovnog metala. To se postiže ispravnim odabirom napona zavarivanja. Kod samozaštitnih žica preveliki napon luka utječe na pretjeranu topivost vodika u zavaru. Kod elektroda za niskougljični čelik može doći do poroznosti.

Brzina zavarivanja  $v_z$ , mm/min [15,16]:

- brzina zavarivanja ovisi o primijenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja te utječe na penetraciju i oblik poprečnog presjeka zavara. Penetracija pri malim brzinama je veća i obrnuto. Niske brzine zavarivanja uz visoku struju mogu pregrijati metal zavara i dati grub izgled uz mogućnost mehaničkog zarobljavanja troske ili procurivanja kroz osnovni metal. Visoke brzine zavarivanja teže nepropisno zavarenom i naljepljenom prolazu.

Slobodni kraj žice  $l_{skz}$ , mm [3,16]:

- Slobodni kraj žice je onaj dio žice koji se nalazi između kontaktne cjevčice i električnog luka. Slobodni kraj žice se grije toplinom uslijed otpora koji je proporcionalan njegovoj duljini. Temperatura elektrode utječe na energiju električnog luka, količinu nataljenog metala i penetraciju, također utječe na čvrstoću zavara i stabilnost luka. Predugi slobodni kraj žice daje nestabilan luk uz štrcanje, a prekratki kraj daje široki luk. Kod predugog slobodnog kraja žice dolazi do prevelikog štrcanja koje ostaje na sapnici i ometa protok plina, a smanjena plinska zaštita može uzrokovati poroznost i oksidaciju metala zavara. Približna vrijednost slobodnog kraja žice za MIG/MAG je oko 20 mm, a za FCAW od 20 mm pa čak do 95 mm.

Protok plina  $Q_{pl}$ , l/min [15,16]:

- nepravilan protok daje slabu zaštitu taline, poroznost i oksidaciju, dok previše plina može izazvati turbulencije i miješanje sa zrakom, a učinak na kvalitetu zavara je isti kao kod nepropisnog protoka. Bilo koji ekstrem povećava nečistoće u metalu zavara. Pravilan protok ovisi o vrsti i promjeru sapnice pištolja, udaljenosti sapnice od radnog komada i strujanju zraka u području zavarivanja. Približna vrijednost za manje jakosti struje oko 12 l/min, za srednje jakosti struje oko 15 l/min, a za velike jakosti struje zavarivanja 20 l/min.



Vrsta zaštitnog plina i praška [11,16]:

- Svrha zaštitnog plina i praška je zaštita taline zavara pri skrućivanju u postupku zavarivanja. Odabiru zaštitnog plina se često ne posvećuje dovoljno pažnje; pravilan odabir može povećati brzinu zavarivanja, količinu depozita i udio legirnih elemenata. Kao zaštitni plin koriste se čisti plinovi (Ar ili He ili CO<sub>2</sub>) i mješavine (dva i više plina) koji mogu biti inertni (Ar, He) ili aktivni (CO<sub>2</sub>). Svaki plin ima prednosti i nedostatke koji se očituju pri zavarivanju, a njihovom kombinacijom (miješanjem) nastoji se dobiti „idealni“ zaštitni plin za svaki postupak, odnosno metal koji se zavaruje. Najčešći plinovi koji se pojavljuju su Ar, He, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>. Najčešće korištena mješavina je Ar/CO<sub>2</sub>. Kod FCAW koriste se praškom punjene žice. Prašci imaju više zadataka kao što su: osigurati mehanička, metalurška i korozivna svojstva metala zavara, dobiti kvalitetan i čvrst metal zavara, odstraniti nečistoće, stvoriti pokrivnu trosku koja će štiti metal zavara pri hlađenju, stabilizirati električni luk. Postoje tri vrste praška: kisela, bazična i rutilna.

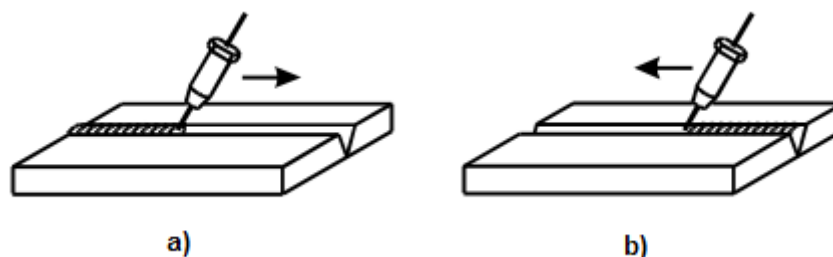
Promjer žice  $d_z$ , mm:

Tablica 6. Standardni promjeri punih i praškom punjenih žica [17]

Vanjski promjer (mm)	Puna žica	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4				
	Praškom punjena žica		0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	4,0	5,0

Položaj zavarivačkog pištolja:

- nagib pištolja u odnosu na zavareni spoj je važan parametar. Postoje dvije tehnike rada, a to su lijeva tehnika kod koje je protaljivanje manje, zavar je plići, što je povoljno za zavarivanje tanjih limova i desna tehnika kod koje je veće protaljivanje, veća iskoristivost toplinske energije i koristi se kod zavarivanja debljih materijala.



Slika 14. Tehnike zavarivanja - desna a) i lijeva b) tehnika rada [15]

### 3.3.1.2. Dodatni materijal

Dodatni materijali se u procesu zavarivanja rastaljuju, te zajedno s talinom osnovnog materijala čine zavareni spoj. Svojim kemijskim sastavom utječu na zavarivačke i metalurške procese, te osiguravaju odgovarajuću kvalitetu zavarenog spoja (ili navara).

Glavni cilj pri odabiru materijala za zavarivanje je postignuti stabilan proces, optimalan integritet zavara i visoku produktivnost pri niskoj cijeni. Postoje tri vrste žice za MIG/MAG i FCAW postupke zavarivanja: puna, punjena metalnim prahom i punjena praškom. Za odabir optimalne vrste žice za danu primjenu treba razmotriti mnogo aspekata kao npr. isplativost dodatnog materijala odnosno količina depozita materijala.

**Puna žica** - prva žica koja se koristila za MIG/MAG postupak zavarivanja. Najveća prednost u odnosu na žice koje su punjene prahom je odsutnost troske čime se eliminira potreba za čišćenjem zavara. Praškom punjena žica također je higroskopna, tj. ima veliku mogućnost da pokupi vodik iz atmosfere pogotovo ako dodatni materijal nije pravilno skladišten. Istraživanjima prikazuju da osim dodatnog materijala od austenitne žice mogu se koristiti i žice s visokim udjelom nikla te žice s niskim postotkom vodika i ferita. Kada se koriste žice s niskim postotkom vodika i ferita, zavari su rezultirali dobrom vlačnom čvrstoćom i u ZUT-u je došlo do manjeg pada tvrdoće u usporedbi s austenitnom žicom i žicom s visokim udjelom nikla. Međutim, žica s visokim udjelom nikla pokazala je bolju otpornost na udarna opterećenja, ali i veći pad tvrdoće u ZUT-u. U eksperimentalnom dijelu uzorci su zavarivani austenitnom nehrđajućom žicom. Topivost vodika u austenitu je puno veća i difuznost je manja nego kod ferita. Austenitna nehrđajuća žica je visoko legirana s kromom i niklom te je moguće postići izvrsna svojstva. Nikal i krom imaju značajan utjecaj na mikrostrukturu metala zavara. Rezultat dodavanja nikla je poboljšanje žilavosti metala zavara i dobivanje potpune austenitne mikrostrukture. Krom često pokreće stvaranje delta-ferita koji smanjuje žilavost i rastezljivost metala zavara. [20]

**Žice punjene praškom** – imaju bolje karakteristike zavarivanja, veću penetraciju, veći depozit, smanjeno štrcanje za razliku od punih žica. Tehnologija zavarivanja s praškom punjenom žicom ima sposobnost zavarivanja u bilo kojem položaju, bez potrebe korištenja kratkog ili impulsnog luka. Time se skraćuje vrijeme pripreme za zavarivanje teško dostupnih mjesta. Nedostatak praškom punjenih žica je taj da u slučaju zavarivanja u više prolaza, troska se mora ukloniti s površine prije nanošenja sljedećeg sloja, čime se produktivnost smanjuje, a cijena raste.

Glavne uloge sastojaka praškaste jezgre su:

- osigurati mehanička, metalurška i korozijski postojana svojstva metala zavara;
- dobiti kvalitetan i čvrst metal zavara, štiteći talinu od kisika i duška u zraku;
- odstraniti nečistoće iz taline uz pomoć reakcija izazvanih praškom jezgre;
- stabilizirati električni luk, da bi se smanjilo štrcanje i olakšalo taljenje, te dobio zavar propisanih dimenzija i homogenosti.

Kemijski sastav metala od kojeg se izrađuje košuljica punjene žice uglavnom je isti kao i materijal za čije zavarivanje je žica namijenjena. Prašak u žici (jezgra) je mineralnog, rutilnog ili bazičnog tipa.

*Žice punjene rutilnim mineralnim praškom* - komponente jezgre žice punjene su rutilnim mineralnim praškom koji tvori trosku i sastavljen je od rutila, aluminosilikata, kalcijevog oksida, fluorida i potrebnih dezoksidanata (najčešće se koriste FeMn, Al, TiO<sub>2</sub>). Jezgra rutilnih punjenih žica sadrži više od 50 % rutila (TiO<sub>2</sub>), koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka. Kod rutilnih punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj TiO<sub>2</sub> doseže i do 65 %. Mehanička svojstva zavarenih spojeva izvedenih žicom punjenom rutilnim mineralnim praškom vrlo su dobra. Osnovne karakteristike su: vrlo lako namještanje parametara zavarivanja, brzo skrućivanje troske koja se lako skida, prijenos metala štrcajućim lukom uz vrlo malo prskanje, zavar ima lijepu i glatku površinu, stabilan električni luk. Zaštitni plin koji se koristi pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom je najčešće ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>).

*Žice punjene bazičnim mineralnim praškom* - komponente jezgre žice punjene su bazičnim mineralnim praškom i to najčešće TiO<sub>2</sub>, CaO, CaF<sub>2</sub>. Pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom postiže se bolja kvaliteta zavarenog spoja nego pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom. Najveći doprinos kvaliteti daje bazična troska koja nastaje u procesu zavarivanja i iz rastaljenog metala odstranjuje nečistoće i komponente

koje tvore dostatnu količinu plinova koji štite talinu zavara od utjecaja atmosfere, te na taj način onemogućuju nastanak poroznosti. Metal se u električnom luku pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom prenosi krupnim kapljicama, što uzrokuje rasprskavanje metala koje je veće nego kod zavarivanja žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom.[15]

**Žica punjena metalnim prahom** - ima istu strukturu kao i praškom punjena žica, a karakteristike zavara su slične kao kod pune žice. Pri izradi žica punjenih metalnim praškom moguće je djelovati na njihov kemijski sastav, koji je uglavnom isti kao kod osnovnog materijala za čije se zavarivanje i primjenjuju. Glavne prednosti žice punjene metalnim prahom su izostanak pojave troske, viši radni ciklusi, veća brzina zavarivanja, manje stvaranja plinova i vrlo dobra isplativost. Sastav jezgre sastoji se uglavnom od legiranih elemenata plus vrlo male količine sastojaka za stabiliziranje luka kao npr. smjese natrija i kalija sa željeznim prahom kao balansom. Kemijski sastav jezgre može se prilagoditi posebnim zahtjevima za različite primjene. Osim jezgre, stabilizatori luka se također mogu aplicirati na površinu žice poboljšavajući stabilnost luka, i postižući vrlo male količine prskanja u odnosu na pune žice. [15,20]

### 3.3.1.3. Način prijenosa metala

Važna značajka ovih postupka zavarivanja je mogućnost odabira načina prijenosa metala izborom odgovarajućih parametara zavarivanja. Prijenos metala može se ostvariti na četiri načina: kratkim spojevima, mješovitim prijenosom i štrcajućim lukom, te impulsni način prijenosa metala. Način prijenosa metala je, među ostalim funkcija struje i napona zavarivanja.

**Prijenos kratkim spojevima** - nastaje pri niskoj razini parametara i definira ga izmjena faza kratkog spoja i električnog luka što rezultira niskim unosom topline. Rezultira manjom produktivnošću, talinom malog volumena koja se brzo hladi i zbog čega je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavara kod debljih komada. Ciklus kratkih spojeva počinje s uspostavljanjem električnog luka između vrha žice i izratka. Žica se tali i na vrhu se stvara mala kapljica. Taj dio ciklusa se naziva „vrijeme luka“. Za vremena kratkog spoja, kapljica na vrhu žice dodiruje talinu zavara. U tom trenutku električni luk se gasi i napon pada praktički na nulu, dok struja raste na maksimalnu vrijednost. Zbog toga se stvara suženje na talini koja čini most između žice i taline zavara. Na kraju se komadić taline odvaja s vrha žice

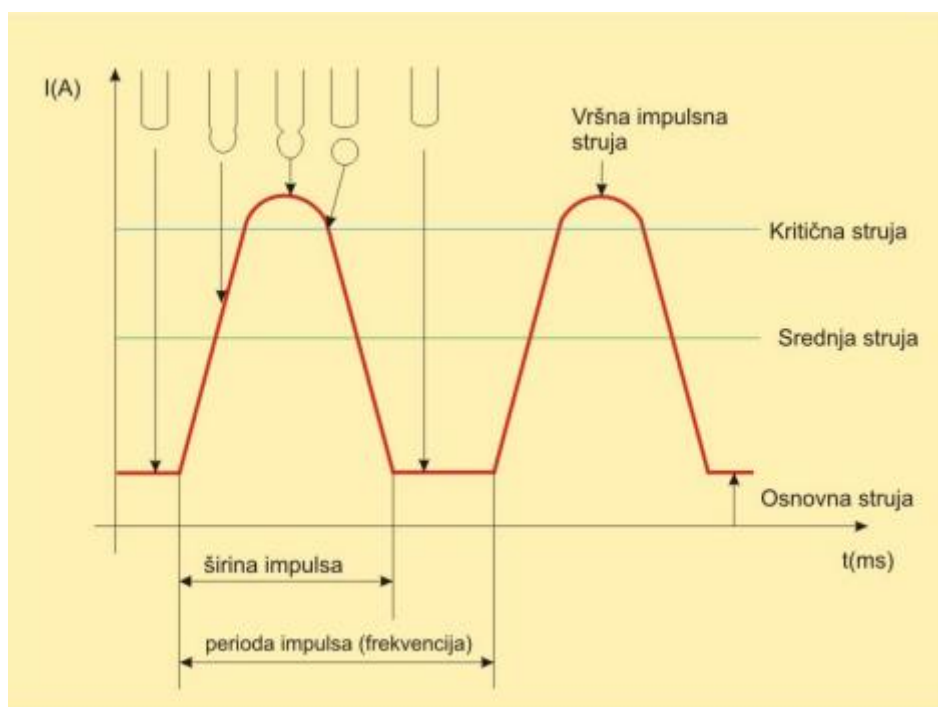
i prenosi se u talinu zavora gravitacijskom silom i tzv. „pinch“ efektom. Nakon toga se ponovno uspostavlja električni luk i proces se ponavlja. Najčešće se izvodi u zaštitnoj atmosferi ugljičnog dioksida i njegovih mješavina s argonom. Područje kratkog luka postiže se malim jakostima struje zavarivanja (50 - 170 A) i malim naponima luka (13 - 21 V) za žicu promjera 1,2 mm. [11,17]

**Prijenos štrcajućim lukom** - kod ovog načina prijenosa materijala, kapljice metala su manje ili jednake od promjera žice. Karakterizira ga veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala zbog čega se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Prijenos se realizira u obliku velikog broja sitnih kapljica koje u slobodnom letu prelaze u talinu. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Ovaj način prijenosa metala podržavaju plinske mješavine s većinskim udjelom argona. Područje štrcajućeg luka postiže se velikim jakostima struje zavarivanja (200-600 A) i naponima luka (25-40 V) za žicu promjera 1,2 mm. [11,17]

**Prijenos mješovitim lukom** - prijenos materijala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka koji se teško kontrolira zbog pojave kapljica velikog promjera (višestruko od promjera žice) te se zbog toga javlja intenzivno prskanje i slabije kvašenje taline. Posljedica je loša geometrija zavora s pojavom nalijepljenih zona. Ovaj prijenos metala prvenstveno je karakterističan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida. Područje mješovitog luka postiže se jakostima struje zavarivanja od 170 A do 235 A i naponima luka od 22 V do 25 V za žicu promjera 1,2 mm. [15,17]

**Prijenos impulsnim lukom** – karakteristično je da struja zavarivanja varira između dvije granične vrijednosti. Niža ili osnovna struja održava električni luk i proces formiranja kapljica, a viša struja, ili struja impulsa odvaja kapljice od elektrode. Proces se ponavlja periodično. Frekvencija impulsa, a s njome i broj kapljica, može se podešavati. Zavarivanje impulsnim lukom osigurava prijenos kapljica metala bez kratkih spojeva, kao i kod štrcajućeg luka ali uz manje vrijednosti srednje jakosti struje i manjim unosom topline. Prednosti ovog načina prijenosa metala su mogućnost zavarivanja u svim položajima i zavarivanje šireg raspona debljina materijala žicama istog promjera. Ovaj način prijenosa metala podržavaju mješavine obogaćene argonom. Obično se koriste naponi 18 V do 25 V i nešto niže srednje struje od onih koje bi koristili za zavarivanje štrcajućim lukom za istu žicu. [15,17]

Ovaj način prijenosa materijala je zanimljiv za zavarivanje OČVT-a zbog kontrole unosa topline.



Slika 15. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [15]

## 4. BALISTIKA NA OKLOPNIM ČELICIMA VISOKE TVRDOĆE

U ovom poglavlju opisani su pojam balistike i načela mehanike proboja. Obuhvaćene su dvije osnovne grupe penetratora, mehanizmi proboja te mehanika proboja kinetičkim penetratorima.

### 4.1. Balistika

Balistika je znanost koja proučava pogonsko punjenje i zakonitosti kretanja projektila kroz cijev vatrenog oružja i kroz zrak te njegovo djelovanje na cilj. [18]

Dijeli se na tri osnovne grane [18]:

- unutarnja balistika (proučava izgaranje baruta u cijevi, nastali tlak, konstrukciju cijevi koje trebaju izdržati tlak, brzinu zrna i sl.);
- vanjska balistika (proučava gibanje projektila nakon izlaska iz cijevi, koristeći se Newtonovim zakonima mehanike);
- balistika na cilju ili terminalna balistika (proučava učinak djelovanja projektila na cilj odnosno metu).

U ovom radu proučavana je balistika na cilju (terminalna balistika) zbog proučavanja mehanike proboja oklopnih čelika visoke tvrdoće.

Ovisno o načinu proučavanja pojava i procesa, terminalna balistika se dijeli na [18]:

- teorijsku (koja matematički modelira procese i pojave);
- pokusnu (koja proučava metode i bilježi pojave pri opaljenju i kretanju projektila).

#### 4.1.1. Učinak projektila na cilju

Za postizanje željenog učinka na cilju različite vrste topničkog oružja u svojem borbenom kompletu imaju više vrsta raketnih ili topničkih projektila (zrna ili granata). Zrno probija cilj u točki udara. Načini djelovanja topničkih projektila na cilj: udarno, trenutno, fugasno, kumulativno i specijalno. [18]

U eksperimentalnom dijelu ocjenjeni su uzorci koji su podvrgnuti udarnom (probojnom) djelovanju.

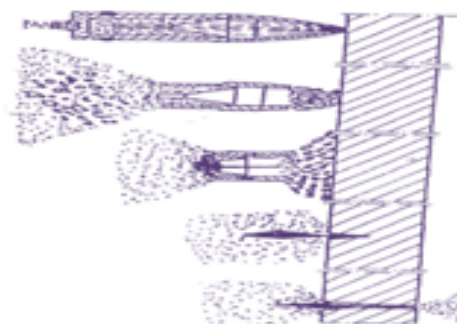
Udarno djelovanje projektila ovisi o udarnom kutu (jače što je kut bliži 90°), brzini projektila u trenutku udara, kalibru i težini projektila i o kvaliteti oklopa (cilja). [18]

## 4.2. Mehanika proboja

Proboj se ostvaruje pomoću penetratora. Penetratori su naprave koje služe za probijanje određene prepreke, to jest oklopa. Klasificiraju se prema energiji koju koriste za probijanje, pa prema tome postoje: penetratori kemijskom energijom i penetratori kinetičkom energijom.

### 4.2.1. Penetratori kemijskom energijom

Energija za proboj dobiva se detonacijom eksploziva (kemijska energija pohranjena u materijalu eksploziva glavni je izvor energije kojom se vrši proboj) kada se sustav približi ili je u direktnom kontaktu s metom. Takav način djelovanja zovemo kumulativni. Takvi projektili svoje djelovanje temelje na iskorištavanju kumulativnog efekta tj. produkti eksplozije kreću se okomito na površinu punjenja, oslobađaju se plinovi (tlak oko 300kbar) i najveća koncentracija energije zbog kumulativnog lijevka stvara se u jednoj točki - fokusu. Ta energija djeluje u obliku plinskog mlaza koji svojom snagom probija oklop i uzrokuje požar u oklopnom vozilu. Kumulativni učinak ovisi o kalibru projektila, težini i svojstvima eksplozivnog punjenja, dimenzijama i obliku kumulativnog lijevka. Kumulativni lijevak može biti stožastog, eliptičnog ili sferičnog oblika. [18]



Slika 16. Djelovanje kumulativnog mlaza [18]

### 4.2.2. Penetratori kinetičkom energijom

Kinetička energija koju ovi penetratori koriste za proboj dobiva se sagorijevanjem eksplozivnog punjenja u ograničenom prostoru (topovskoj cijevi). Na taj se način stvaraju plinovi koji posljedično stvaraju vrlo velike tlakove čijim se širenjem predaje energija projektilu. [3]



Ova se energija izračunava pomoću izraza:

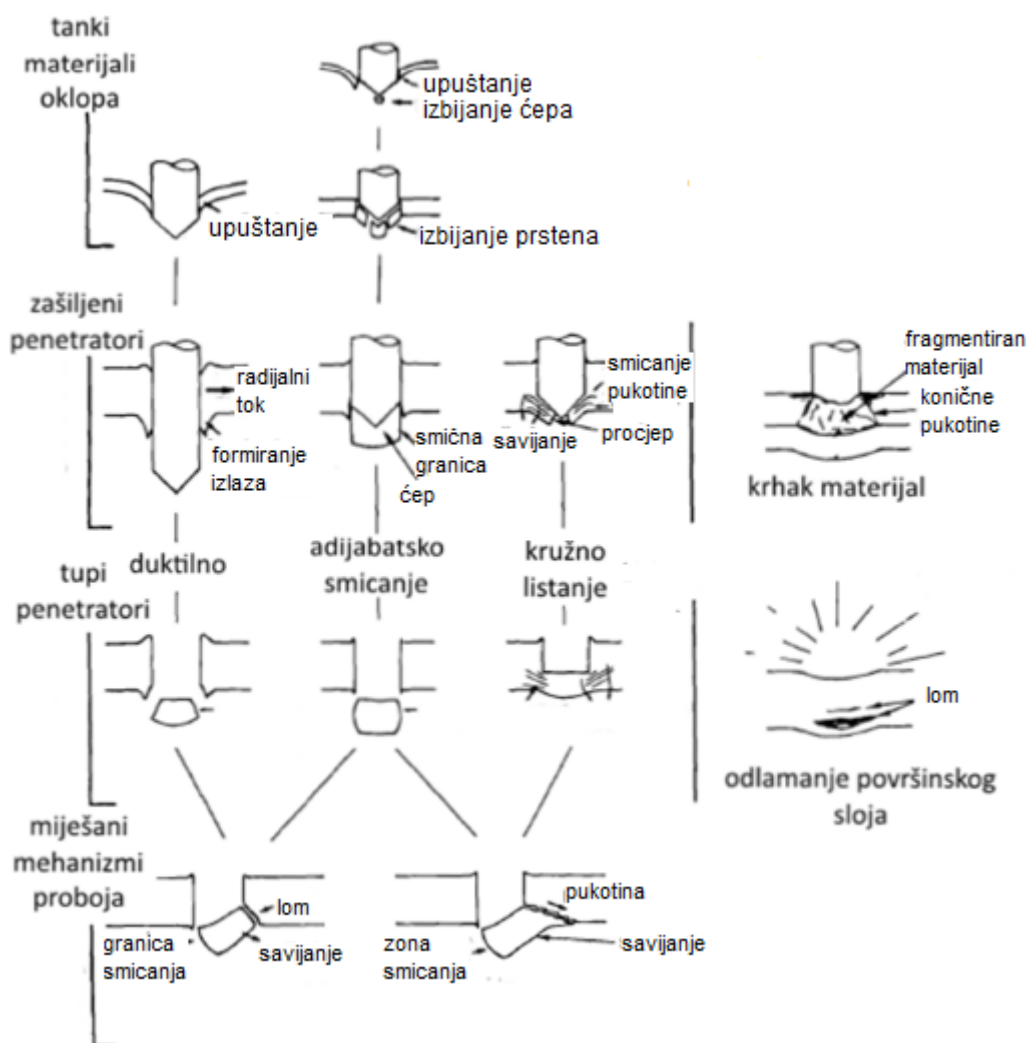
$$E_k = \frac{p \times v_k^2}{2g} \text{ [J]} \quad (4.1)$$

Gdje je :  $E_k$  [J]- kinetička energija projektila u trenutku udara u cilj  
 $p$  [kg] - težina projektila  
 $v_k$  [m/s]- brzina projektila u trenutku udara u cilj  
 $g$  [m/s<sup>2</sup>] - ubrzanje sile teže

#### **4.2.3. Mehanizmi proboja oklopa**

Mehanizmi koji se javljaju pri proboju oklopa ovise o mnogim faktorima. Jedan od najvažnijih je brzina projektila. Kako je poznato, kinetička energija je proporcionalna s kvadratom brzine. Kako se brzina kojom projektil udara o oklop povećava, područje na koju se nanosi šteta se smanjuje, a oštećenje prelazi iz strukturnog u lokalno.

Kod udara velikom brzinom, vanjske sile mogu lokalno doseći svoj maksimum i raspršiti se prije nego cijelo tijelo osjeti prouzrokovana naprezanja. To je razlog zašto se stvara perforacija, a ne plastična deformacija većeg dijela konstrukcije. Klasifikacija proboja oklopa na slici 17. prikazuje mehanizme koji se događaju uslijed proboja. [3]



Slika 17. Mehanizmi proboja oklopa [3]

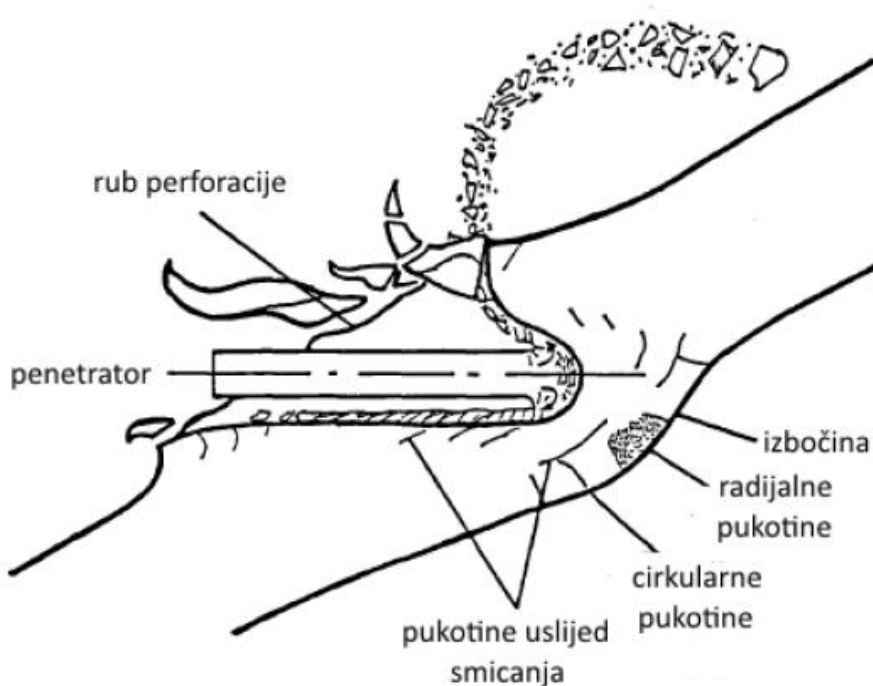
#### 4.2.4. Proboj kinetičkim penetratorom

Kako je prije rečeno, kinetički projektil koristi kinetičku energiju vlastitog gibanja za proboj u neku zapreku tj. oklop, a možda i kroz nju. Rezultat ovog djelovanja je [18]:

- prodor - cijeli projektil prolazi kroz otvor;
- proboj - kroz otvor prolaze samo dijelovi, ulazni otvor manji je od najvećeg promjera projektila
- zador - projektil ostaje u oklopu
- rikošet - klizanje i odbijanje projektila od cilja

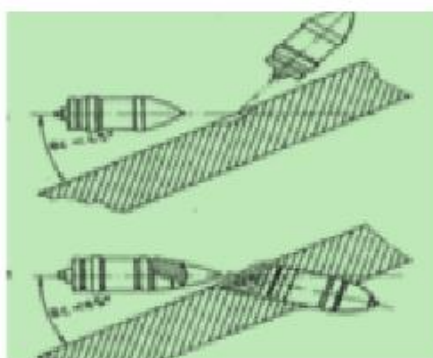
Ovi procesi događaju se u intervalima manjima od jedne milisekunde pri vrlo velikim brzinama što uzrokuje velika oštećenja projektila i mete.

Oblik kinetičkog penetratora je zapravo štap s mogućim koničnim skošenjem na vrhu.



Slika 18. Proboj kinetičkom energijom [19]

**Rikošet** - efekt koji se zbiva pri probodu kinetičkim penetratorima. Taj efekt je odbijanje projektila od oklopa pod nekim kutom uz njegovo mijenjanje smjera pri kojem se oba materijala više ili manje oštećuju. Za udare pri kutu većem od kritičnog, a ispod tečenja materijala, penetrator će se najvjerojatnije odbiti bez oštećenja, uz izduljivanje. Erozijska oklopa je tada minimalna. Za brzine udara iznad granice tečenja materijala, penetrator se fragmentira, a oštećenje oklopa je znatno. [3]



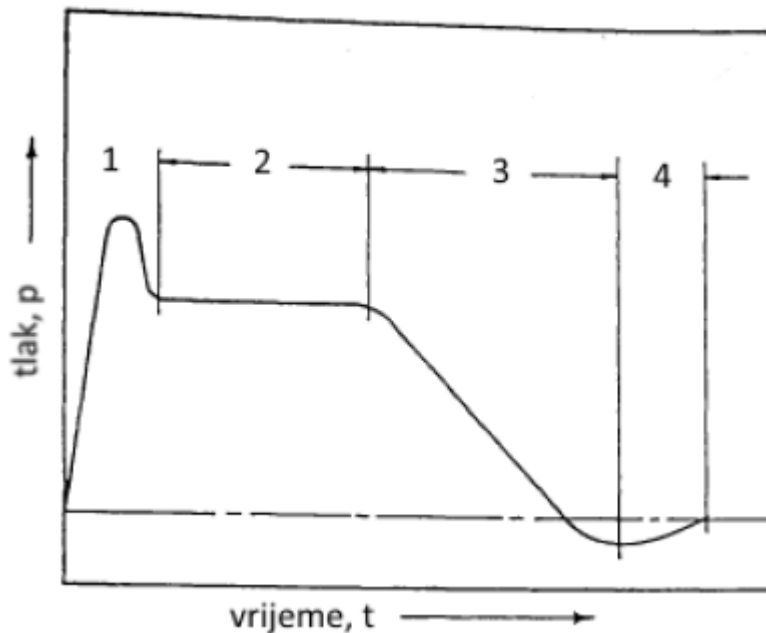
Slika 19. Rikošet [18]

## 4.2.4.1. Podjela procesa proboja

Fenomeni koji se događaju uslijed udara projektila o oklop mogu se karakterizirati na nekoliko načina: prema kutu udara, karakteristikama materijala i geometrije oklopa i projektila, brzini udara, čvrstoći, različitim fenomenima te kombinacijom ovih faktora. [3]

Model prema kojem se dijeli proces proboja sastoji se od 4 faze (Slika 20.) [19]:

1. **Faza inicijalnog udara** - stvara se tlak u dodirnoj točki uzrokujući jednodimenzionalno naprezanje jer udarni valovi u materijalu projektila i oklopa nisu imali vremena reagirati;
2. **Faza stabilnog proboja** - projektil troši svoju kinetičku energiju ponašajući se kao fluid tvoreći kanal u materijalu i pritom erodirajući;
3. **Faza kavitacije** - Nakon potpune erozije penetratora, krater se nastavlja širiti zbog energije zarobljene u materijalu oklopa. Ova faza traje dok gustoća energije udarnog vala ne dostigne dovoljno male veličine kojima više ne može deformirati materijal;
4. **Faza rekuperacije** - U ovoj fazi materijal oklopa vraća se iz stanje elastične deformacije, rekristalizira ispod vidljivog dijela kratera.



Slika 20. Faze proboja [19]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mikrostrukturna ispitivanja zavarenih spojeva ARMOX ploča, provedena je analiza balističkih svojstava zona zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal. Prema dobivenim rezultatima ispitivanja opisan je utjecaj mikrostrukture zavarenog spoja na balistička svojstva spoja.

Eksperimentalni rad se veže na prijašnja istraživanja [3]. U nastavku je naveden postupak pripreme i zavarivanja ploča kao i dodatni materijal koji se koristio.

### 5.1. Proces zavarivanja

Zavareni spojevi izvedeni su spajanjem ploča osnovnog materijala određenih dimenzija. Korišteno je tri vrste dodatnog materijala i tri postupka zavarivanja. Izvedena su 4 zavarena spoja s različitim dodatnim materijalom, različite tvrdoće i različitim redom slaganja kako je navedeno u nastavku. [3]

Plan procesa zavarivanja naveden je u tablici 7.

Tablica 7. Plan procesa zavarivanja [3]

	Uzorak U1	Uzorak U2	Uzorak U3	Uzorak U4
<b>Osnovni materijal</b>	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T	ARMOX® 500T
<b>Dodatni materijal</b>	Lincoln Electric® MIG 309L Si	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Durmat FD 739	Lincoln Electric® MIG 309L Si i Castolin Eutectic® EnDOtec® DO*30
<b>Slaganje slojeva zavara</b>	svi slojevi male tvrdoće	prvi sloj male, drugi sloj velike tvrdoće	Prvi sloj male, drugi sloj velike, treći sloj male tvrdoće	Prvi sloj male, drugi sloj male, treći sloj velike tvrdoće
<b>Postupci zavarivanja</b>	131	131,136	131,114	131,136

Korišteni osnovni materijal je ARMOX® 500T. Ovaj čelik spada u grupu oklopnih čelika velike tvrdoće, OČVT, čiji su kemijski sastav, mikrostruktura i svojstva obrađeni u poglavlju 2. Osnovni materijal je debljine 8 mm. Ploče dimenzija 300x350 mm izrezane su plinskim

rezanjem u struji tehnički čistog kisika. Skošnja za pripremu zavarenog spoja obrađena su odvajanjem čestica, glodanjem pod 45°. Obrada odvajanjem čestica korištena je radi eliminacije prethodno dobivenog ZUT-a plinskim rezanjem. Na taj način pripremljeno je 20 ploča koje se spajaju. [3]

Za provedbu pokusa korištena su 3 dodatna materijala [3]:

1. **Lincoln Electric® MIG 309L Si** - dodatni materijal u obliku pune žice promjera 1,2 mm za koji je potrebna dodatna zaštitna atmosfera tokom zavarivanja. Metal zavara je austenitne strukture. Mehanička svojstva nalaze se u tablici 8.

Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala Lincoln Electric® MIG 309L Si [3]

<b>Granica elastičnosti, <math>R_{p0,2}</math> [Mpa]</b>	<b>450,0</b>
<b>Vlačna čvrstoća, <math>R_m</math> [Mpa]</b>	<b>595,0</b>
<b>Produljenje, <math>A_5</math> [%]</b>	<b>42,0</b>
<b>Feritni broj, FN</b>	<b>14,0</b>

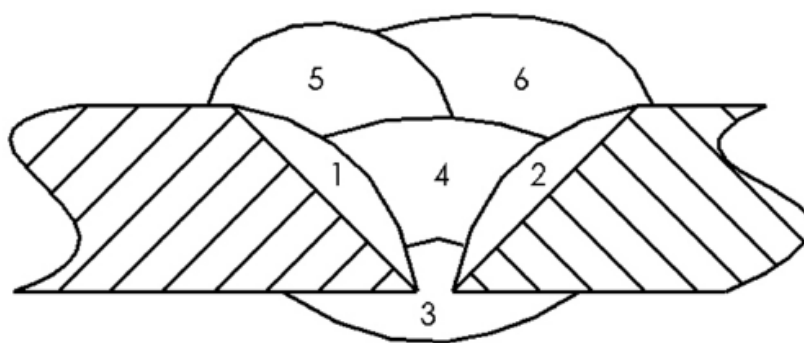
2. **Durmat® FD 739** - dodatni materijal za tvrdo navarivanje u obliku metalnim praškom punjene žice promjera 1,6 mm za koji nije potrebna dodatna zaštitna atmosfera tokom zavarivanja. Specifičnost ovog dodatnog materijala je fina precipitacija karbida. Tvrdoća Durmat® FD 739 je od 67-70 HRC-a.
3. **Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30** - dodatni materijal za tvrdo navarivanje u obliku metalnim praškom punjene žice promjera 1,2 mm za koji je potrebna dodatna zaštitna atmosfera tokom zavarivanja. Specifičnost ovog dodatnog materijala je sidrenje ultra tvrdih mikro konstituenata u eutektičkoj karbidnoj matrici od Fe, Ni i Co. Tvrdoća Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30 je ~67 HRC-a.

Zavareni spoj je izveden tako da je prvo na svih 20 ploča navaren međusloj kako bi se izbjegle hladne i tople pukotine, osigurala dovoljna prionjivost dodatnih materijala za tvrdo navarivanje te održala čvrstoća spoja. Prije zavarivanja svaki je skošeni rub očišćen žičanom četkom od nehrđajućeg čelika i odmašćen alkoholom. Potom se navaruje međusloj na skošene rubove ploča i spajaju se tako da je korijen zavara u svim slučajevima identično izveden. Zavarivanje je izvedeno u laboratorijskim uvjetima. Parametri zavarivanja za svaki prolaz prikazani su u [3].

## 5.2. Uzorci

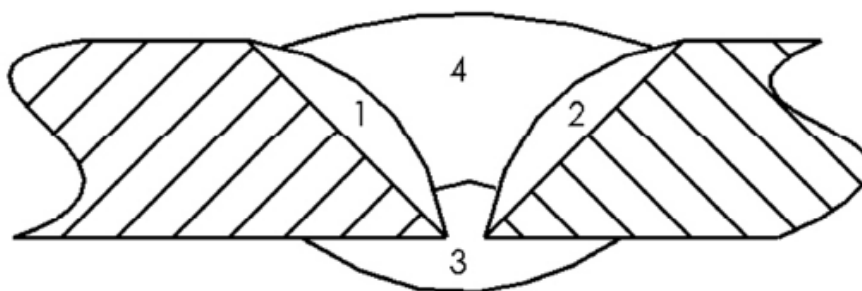
Četiri uzorka koja su ispitivana u ovom eksperimentalnom radu su makroizbrusci iz zavarenih ploča. Postupak navarivanja slojeva za pojedini uzorak naveden je u nastavku. [3]

**Uzorak U1** - izveden je prema slici 21. tako da su svi prolazi izvedeni navarivanjem s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si.



Slika 21. Redoslijed zavarivanja uzoraka U1, U3 i U4 [3]

**Uzorak T2-1 (U2)** - izveden je prema slici 22. tako da su prolazi 1, 2 i 3 izvedeni navarivanjem s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si, a prolaz 4 je izveden tvrdim navarivanjem s dodatnim materijalom Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30.



Slika 22. Redoslijed zavarivanja uzorka U2 [3]

**Uzorak H3-3 (U3)** - izveden je prema slici 21. tako da su prvo prolazi 1, 2 i 3 izvedeni navarivanjem s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L, prolaz 4 je izveden tvrdim navarivanjem s dodatnim materijalom Durmat® FD 739, a prolazi 5 i 6 izvedeni su navarivanjem s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si.

**Uzorak T4-2 (U4)** - izveden je prema slici 21. tako da su prolazi 1, 2, 3 i 4 izvedeni navarivanjem s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si, a prolazi 5 i 6 su izvedeni tvrdim navarivanjem s dodatnim materijalom Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30.

### 5.3. Balistička ispitivanja

Osnovni materijal, ARMOX® 500T, debljine 8 mm proizveden je da izdrži balistička opterećenja razine 2 prema normi NATO AEP-55 STANAG 4569. Stoga je kod balističkih ispitivanja korištena municija upravo te razine probojnosti, standardni 7,62x51 s bakrenom košuljicom. Gađanje je provedeno tenkovskom strojnicom 7,62 mm, a ciljano je pomoću durbina. Vremenski uvjeti:  $\approx 20$  °C uz umjeren vjetar. Udaljenost cijevi strojnice i mete bila je  $\approx 10$  m s približno istom horizontalnom udaljenošću. U svaki uzorak ispućano je po 4 hitca. Za uzorke U1, U2, U3 i U4 balistička svojstva su navedena u nastavku. [3]

#### 5.3.1. Uzorak U1

Zavareni spoj ispitnog uzorka U1 nije izdržao balistička opterećenja kojima je izložen. Hici su potpuno ili parcijalno probili metal zavara, zonu staljivanja i ZUT-a. U tablici 9. navedena su mjesta pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja. [3]

Tablica 9. Pogodci U1 [3]

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H1-1	metal zavara	parcijalni proboj	smicanje po zoni staljivanja
H1-2	zona staljivanja i ZUT	potpuni proboj	izbijanje materijala
H1-3	metal zavara	potpuno proboj	izbijanje materijala
H1-4	metal zavara	potpuni proboj	izbijanje materijala, zrno metka ostalo zarobljeno u perforaciji
H1-5,6,7,8	osnovni metal	bez značajnih oštećenja	-



### 5.3.2. Uzorak U2

Zavareni spoj ispitnog uzorka U2 nije izdržao balistička opterećenja kojima je izložen. Hici su potpuno probili metal zavara, zonu staljivanja i ZUT. U tablici 10. navedena su mjesta pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja. [3]

Tablica 10. Pogodci U2 [3]

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H2-1	metal zavara	potpuni proboj	izbijanje materijala
H2-2	zona staljivanja	potpuni proboj	izbijanje materijala
H2-3	zona staljivanja	potpuni proboj	izbijanje materijala
H2-4	ZUT	potpuni proboj	izbijanje materijala
H2-5,6,7,8	osnovni materijal	potpuni proboj	savijanje, pukotine, izbijanje materijala

### 5.3.3. Uzorak U3

Zavareni spoj ispitnog uzorka U3-1 izdržao je balistička opterećenja kojima je izložen. Hici nisu probili metal zavara, dok su ZUT i zona staljivanja probijeni. U tablici 11. navedena su mjesta pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja. [3]

Tablica 11. Pogodci U3 [3]

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H3-1	ZUT	potpuni proboj	izbijanje materijala
H3-2	metal zavara	udarni kreator, bez proboja, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H3-3	zona staljivanja	potpuni proboj	izbijanje materijala
H3-4	metal zavara	udarni kreator, bez proboja, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H3-5,6,7,8	osnovni materijal	bez značajnih oštećenja	-

### 5.3.4. Uzorak U4

Zavareni spoj ispitnog uzorka U4-1 izdržao je balistička opterećenja kojima je izložen. Hici nisu probili metal zavara i zonu staljivanja, ZUT je djelomično pogoden. U tablici 12. navedena su mjesta pojedinog pogotka, stupanj oštećenja i tip proboja. [3]

Tablica 12. Pogodci U4 [3]

Pogodak	Mjesto pogotka	Stupanj oštećenja	Tip proboja
H4-1	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-
H4-2	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-
H4-3	metal zavara i ZUT	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja, ZUT parcijalno pogoden, vidljivo oštećenje na stražnjoj strani	-
H4-4	metal zavara	pokrovni sloj zavara odlomljen, preostali dio zavara bez većih oštećenja	-

### 5.4. Priprema uzorka

Priprema uzorka sastoji se od nekoliko koraka. Naime, prvo su izrezani ispitni uzorci i to redom: T1-1 uzorak je izrezan iz ploče U1, T2-1 uzorak je izrezan iz ploče U2, H3-3 uzorak je izrezan iz ploče U3 i T4-2 uzorak je izrezan iz ploče U4. Uzorci su rezani tehnologijom abrazivnog vodenog mlaza. Dimenzije uzorka su 12 x 50 x 8 mm.

Nakon rezanja, površine ispitnih uzoraka su ispolirane na način da su prvo uzorci brušeni brusnim papirom hrapavosti P320, nadalje sve finijom hrapavosti P500, P1000, P2000 i naposljetku P4000, sve pri brzini vrtnje od 300 okr/min pri čemu je korištena voda kao sredstvo za hlađenje. Nakon toga uzorci su polirani u dva koraka s platnima za poliranje pri brzini vrtnje od 150 okr/min i uz hlađenje lubrikantom (mješavina alkohola i vode). U prvom koraku korištena je dijamantna pasta granulacije 3  $\mu\text{m}$  u trajanju od 3 min, a u drugom koraku korištena je dijamantna pasta granulacije 1  $\mu\text{m}$  također u trajanju od 3 min. Nakon toga uzorci su ispolirani i spremni za nagrizanje površine kako bi se mogla analizirati mikrostruktura.

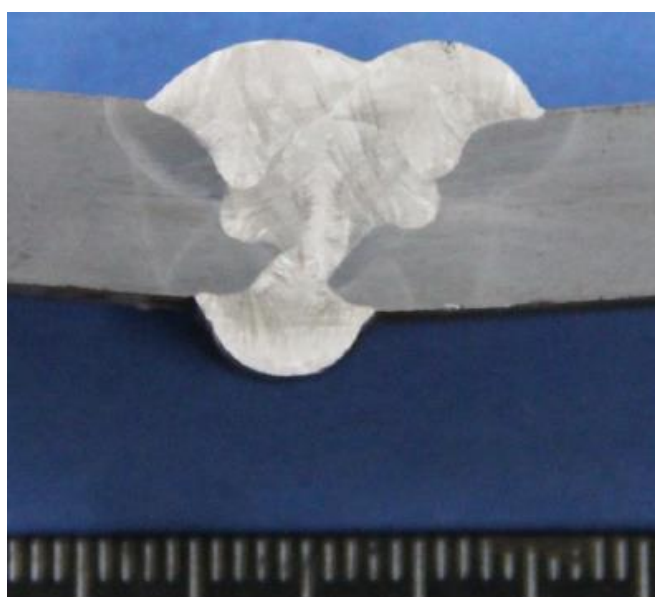
Nagrizanje površine uzoraka izvedeno je elektro nagrizanjem u otopini od 10 g  $\text{CrO}_3$  u 100 ml vode pri jakosti struje od 4 A s uzorkom na (+) polu u trajanju od 2 minute i 15 sekundi.

## 5.5. Mikroanaliza uzoraka

Provedena je mikroanaliza na 4 uzorka. Nakon pripreme uzorci su spremni za analiziranje. Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 i na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM) TESCAN VEGA 5136 MM koji je opremljen s Oxford EDS detektorom.

### 5.5.1 Uzorak T1-1

Na slici 23. je prikazan makro uzorak gdje se jasno vidi metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Uzorak je izveden u 6 prolaza s istim dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si i s parametrima koji su navedeni u [3].

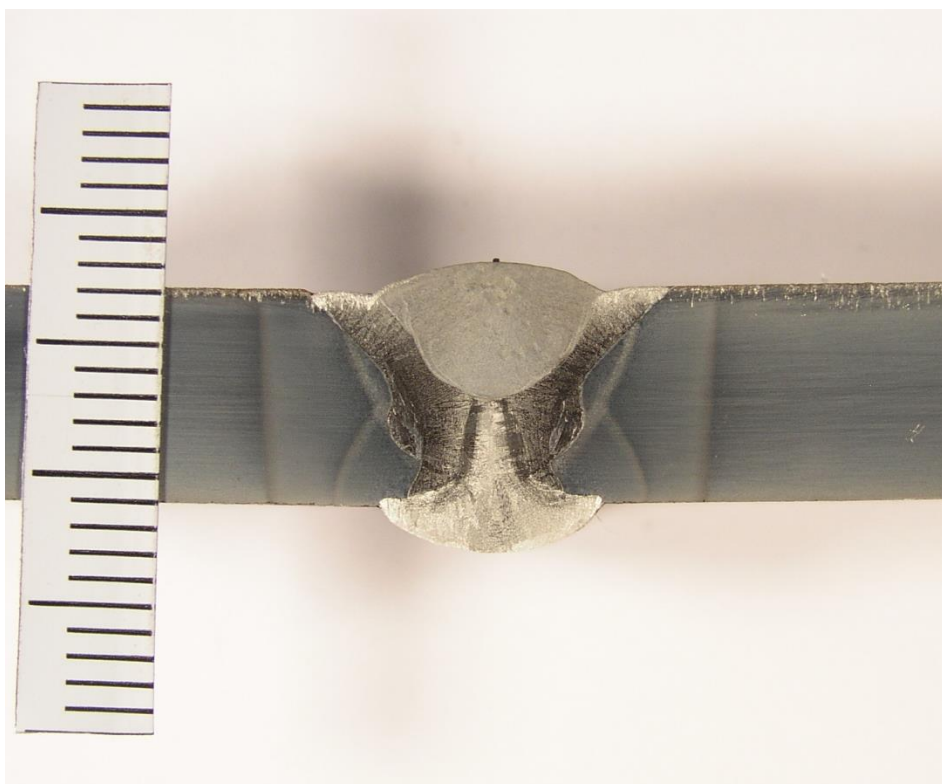


Slika 23. Makro uzorak T1-1

Zavareni spoj po cijelom presjeku ima istu mikrostrukturu i to pretežito austenitnu. Ploča U1 iz koje je izrezan uzorak T1-1 nije izdržala balistička opterećenja (Tablica 9.). U ZUT-u je došlo do pogrubljenja zrna osnovnog materijala čime se smanjila nazivna tvrdoća i čvrstoća. Mikrostruktura zavarenog spoja sastoji se od austenita koji je kristal mješanac željeza i ugljika te kristalizirane plošno centrirane kubične rešetke (FCC). FCC rešetka sadrži veći broj kliznih ravnina i veću žilavost. Takva mikrostruktura ima manju tvrdoću od osnovnog materijala čija je mikrostruktura martenzitna i/ili bainitna, a samim time i lošija balistička svojstva koja su potrebna za zavareni spoj ARMOX 500T ploča.

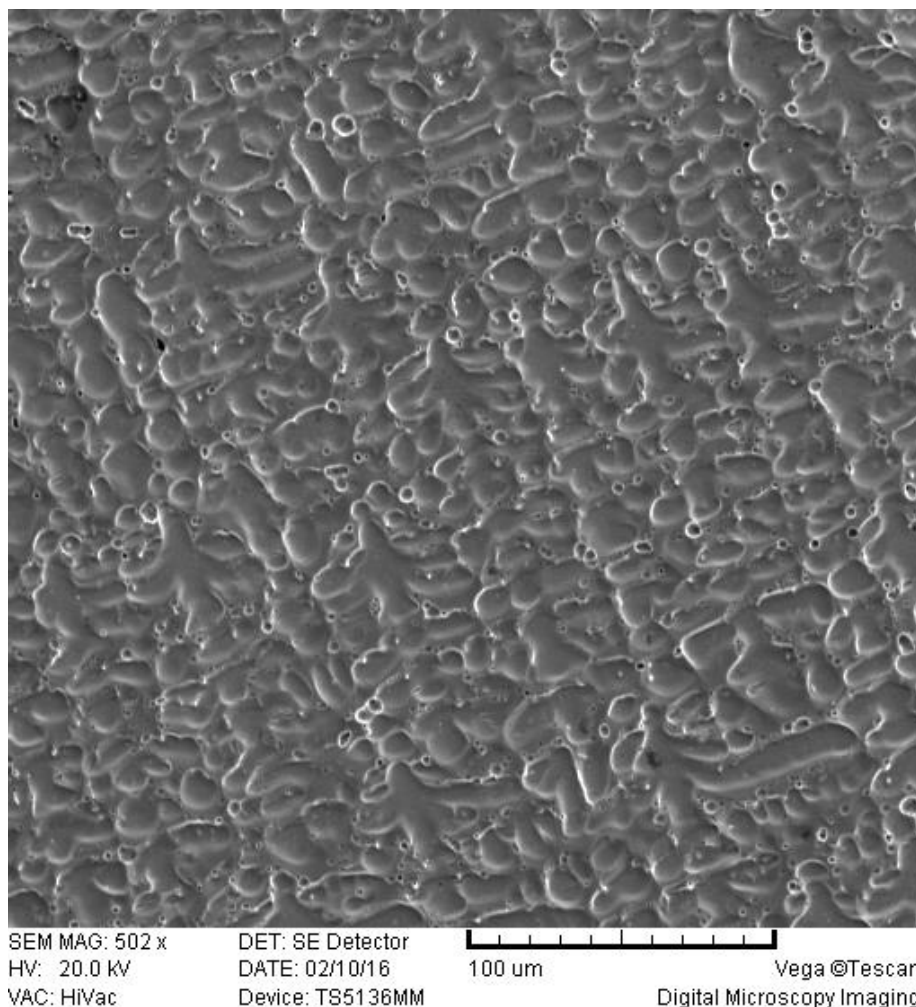
### 5.5.2. Uzorak T2-1

Na slici 24. prikazan je makro uzorak zavarenog spoja gdje je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Zavareni spoj je izveden u 4 prolaza, korijen i međusloj su izvedeni dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si, a završni prolaz, odnosno četvrti je izveden dodatnim materijalom Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30. Parametri zavarivanja su navedeni u [3].

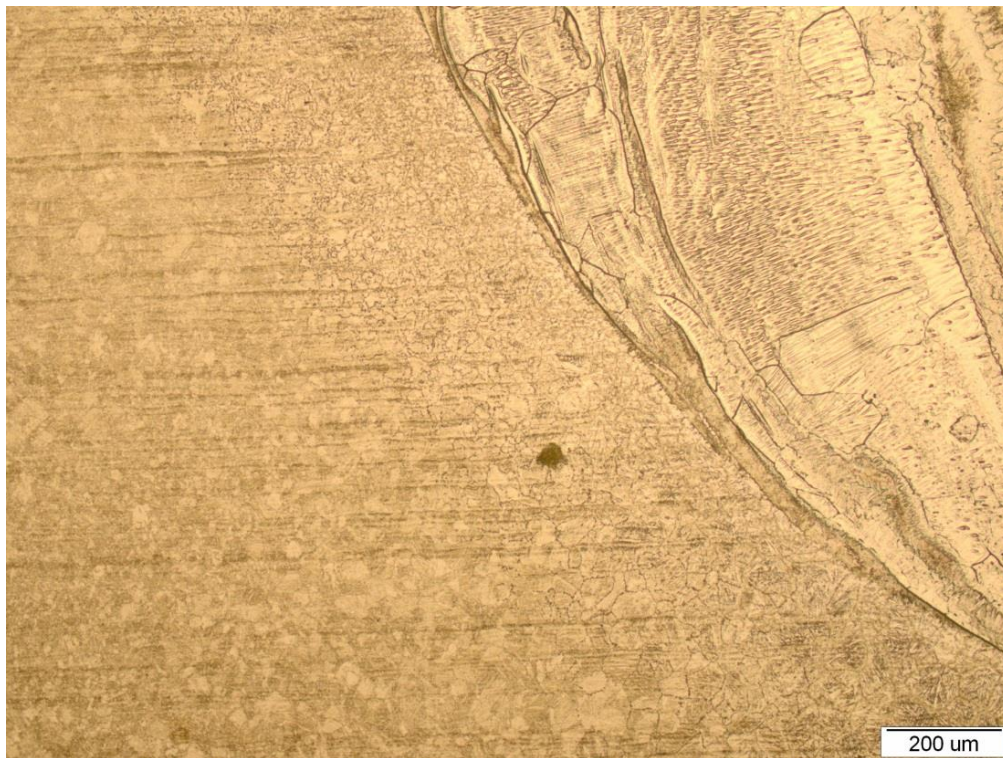


Slika 24. Makrouzorak T2-1

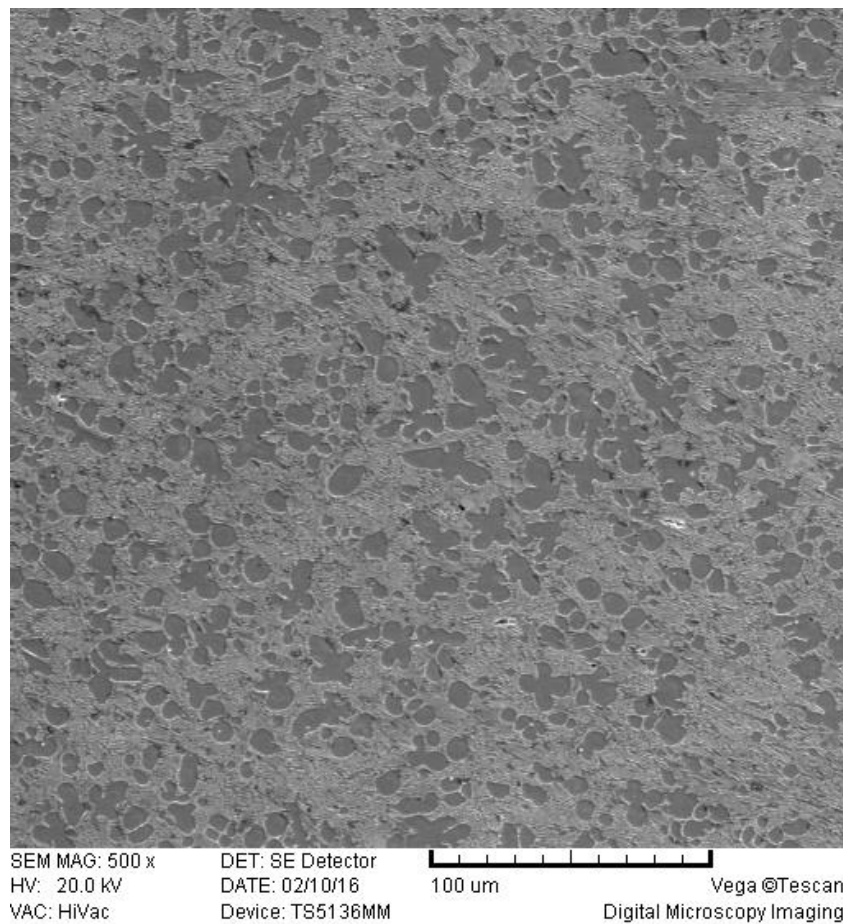
Po presjeku zavarenog spoja prikazane su različite mikrostrukture. U korijenu zavora (Slika 25.) prevladava austenitna mikrostruktura. Slika 26. prikazuje snimak pod svjetlosnim mikroskopom gdje je vidljiv osnovi materijal, ZUT i zona staljivanja te je vidljiva sitnozrnata mikrostruktura osnovnog materijala. Prema mjestu staljivanja vidljivo je kako je došlo do formiranja grubog zrna mikrostrukture što je dovelo do smanjenja tvrdoće i čvrstoće. Metal zavora također je kao i korijen zavarenog spoja austenitne mikrostrukture.



Slika 25. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka T2-1



Slika 26. Mikrostruktura linije staljivanja zavarenog spoja uzorka T2-1 snimljena svjetlosnim mikroskopom



Slika 27. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka T2-1

Mikrostruktura vrha zavarenog spoja (Slika 27.) pretežito je martenzitna s manjim udjelom karbida. Ploča U2 iz koje je izrezan uzorak T2-1 nije izdržala balistička opterećenja (Tablica 10.). Hici su potpuno probili metal zavara, zonu staljivanja i ZUT. Naime, mikrostruktura korijena zavara i međusloja je austenitna te posjeduje manju tvrdoću od osnovnog materijala. Vrh zavarenog spoja izveden je tvrdim navarivanjem i posjeduje martenzitnu mikrostrukturu s manjim udjelom karbida. Martenzitna mikrostruktura ima vrlo visoku tvrdoću i čvrstoću ali i povećanu krhkost, a osnovno svojstvo karbida je visoka tvrdoća. Loša balistička svojstva posljedica su austenitne mikrostrukture u zavarenom spoju koja je manje tvrdoće te je došlo do potpunog proboja. Također unos topline koji je smanjio tvrdoću i čvrstoću u ZUT-u uzrokovao je pad balističkih svojstava tj. zavareni spoj nije izdržao silu proboja.

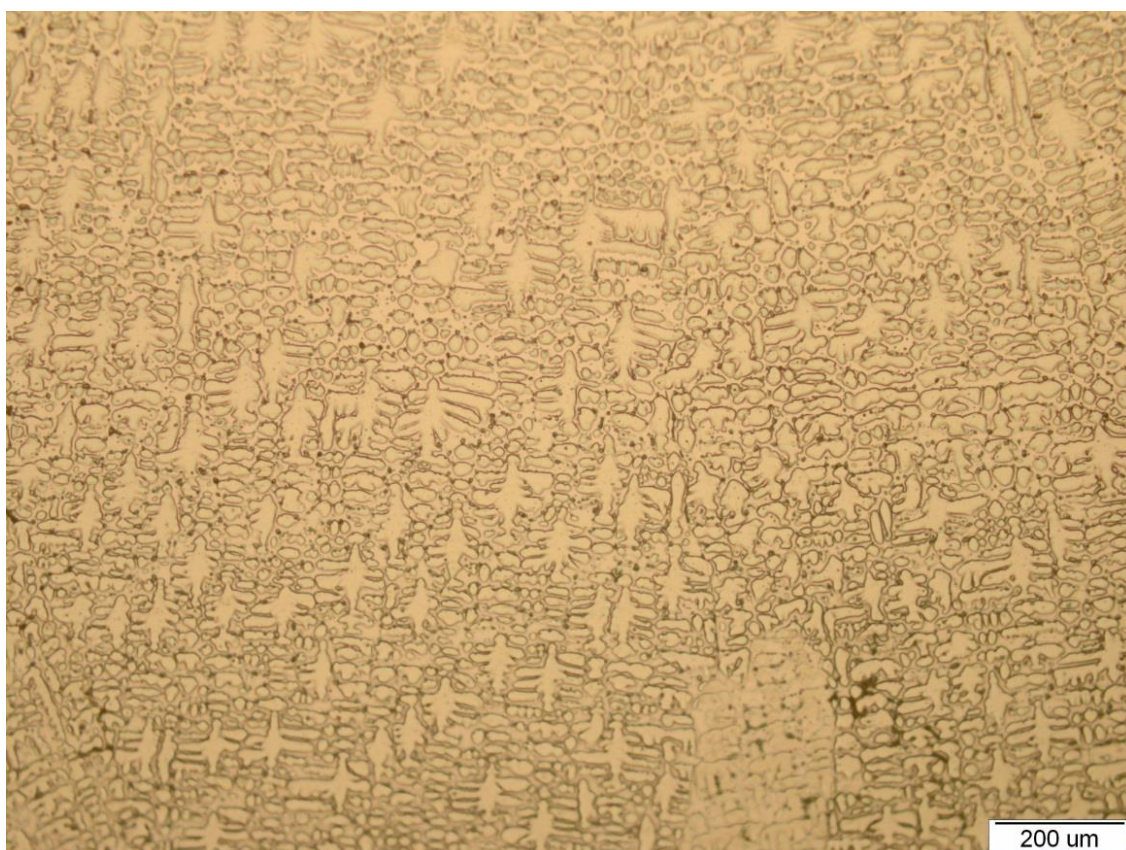
### 5.5.3. Uzorak H3-3

Na slici 28. prikazan je makrouzorak zavarenog spoja gdje je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Zavareni spoj izveden je u 6 prolaza, tako da su svi prolazi izvedeni s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L osim srednjeg, odnosno četvrtog prolaza koji je izveden s dodatnim materijalom Durmat® FD 739. Parametri zavarivanja su navedeni u [3].



Slika 28. Makrouzorak H3-3

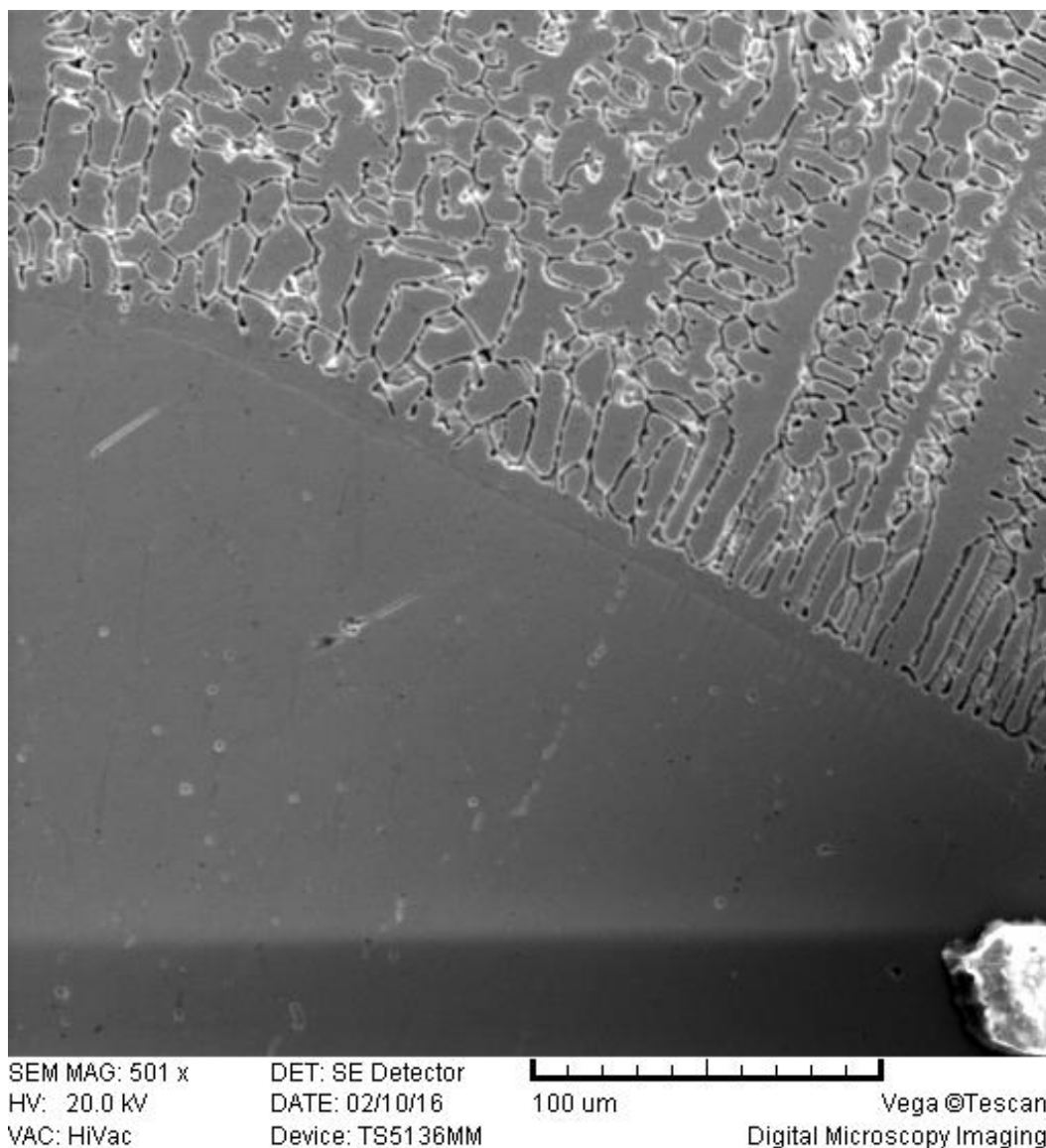
Slika 29. prikazuje mikrostrukturu korijena zavarenog spoja koja je snimljena pod svjetlosnim mikroskopom i jasno je vidljivo da korijen posjeduje pretežito austenitnu mikrostrukturu s nešto delta-feritom. Delta-ferit predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza, te se javlja odmah nakon skrućivanja metala zavara i njegova količina se izražava preko Feritnog broja (FN). Delta-ferit djeluje negativno tako da smanjuje žilavost i istežljivost.



Slika 29. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka H3-3

Na slici 30. prikazano je područje zone staljivanja gdje je vidljiv metal zavara koji je austenitne mikrostrukture i osnovni materijal martenzitne i/ili bainitne mikrostrukture. Austenitna mikrostruktura korijena zavara kao i međusloja prikazanog u zoni staljivanja manje je tvrdoće i čvrstoće od osnovnog materijala, ali dobro podnosi udarna opterećenja. Delta-ferit se pojavljuje u austenitnoj mikrostrukturi korijena te smanjuje količinu nisko taljivih faza pri čemu se povećava otpornost na tople pukotine. Da ne bi došlo do pojave toplih pukotina sadržaj delta-ferita mora biti manji od 10 %.





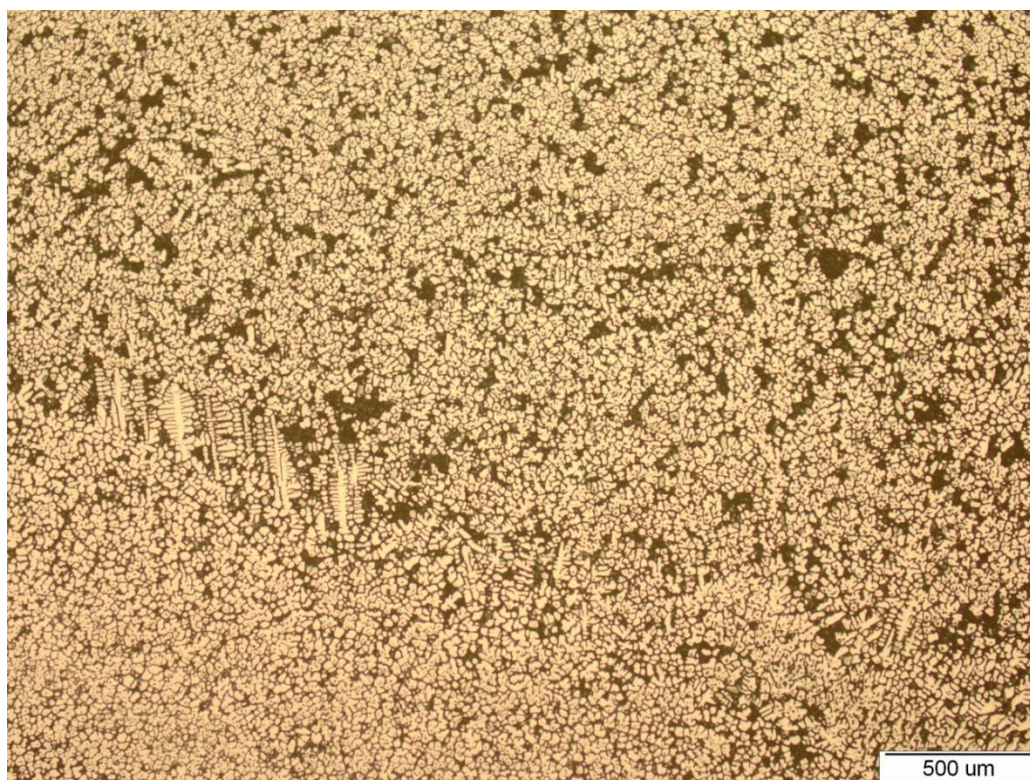
Slika 30. Mikrostruktura u području linije staljivanja uzorka H3-3

Slika 31. prikazuje pretežito igličastu martenzitnu mikrostrukturu s manjim udjelom karbida koju posjeduje tvrdi navar u zavarenom spoju. Takva mikrostruktura slična je po tvrdoći i čvrstoći mikrostrukturi osnovnog materijala ali je vrlo krhka.



Slika 31. Mikrostruktura tvrdog navarenog sloja uzorka H3-3

Mikrostruktura vrha zavarenog spoja prikazana na slici 32. posjeduje austenitnu mikrostrukturu s dendritima i manjim udjelom ferita.



Slika 32. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka H3-3

Pri hlađenju rastaljenog metala u žlijebu zavara dolazi prvo do kristalizacije metala zavara, a eventualne nečistoće ostaju zarobljene između kristala dendrita u gornjoj zoni zavara i na takvim mjestima postoji mogućnost nastanka toplih pukotina. Ploča U3 iz koje je izrezan uzorak H3-3 izdržala je balistička opterećenja (Tablica 11.). Naime hici nisu probili metal zavara, dok su zonu staljivanja i ZUT probili. Metal zavara izdržao je balistička opterećenja zahvaljujući mikrostrukturi tvrdog navara kao i austenitnoj mikrostrukturi koja dobro podnosi udarna opterećenja. Energiju projektila koju je primio metal zavara preuzela je martenzitna mikrostruktura te zatim austenitna koja je apsorbirala i amortizirala energiju hica. Martenzitna mikrostruktura je krhka i zbog tog je došlo do pojave pukotine. Zona staljivanja i ZUT nisu zadovoljili balistička svojstva zbog prevelikog udarnog opterećenja za austenitnu mikrostrukturu te zbog manje tvrdoće i čvrstoće austenita koja je potrebna da bi se zadovoljila balistička svojstva.

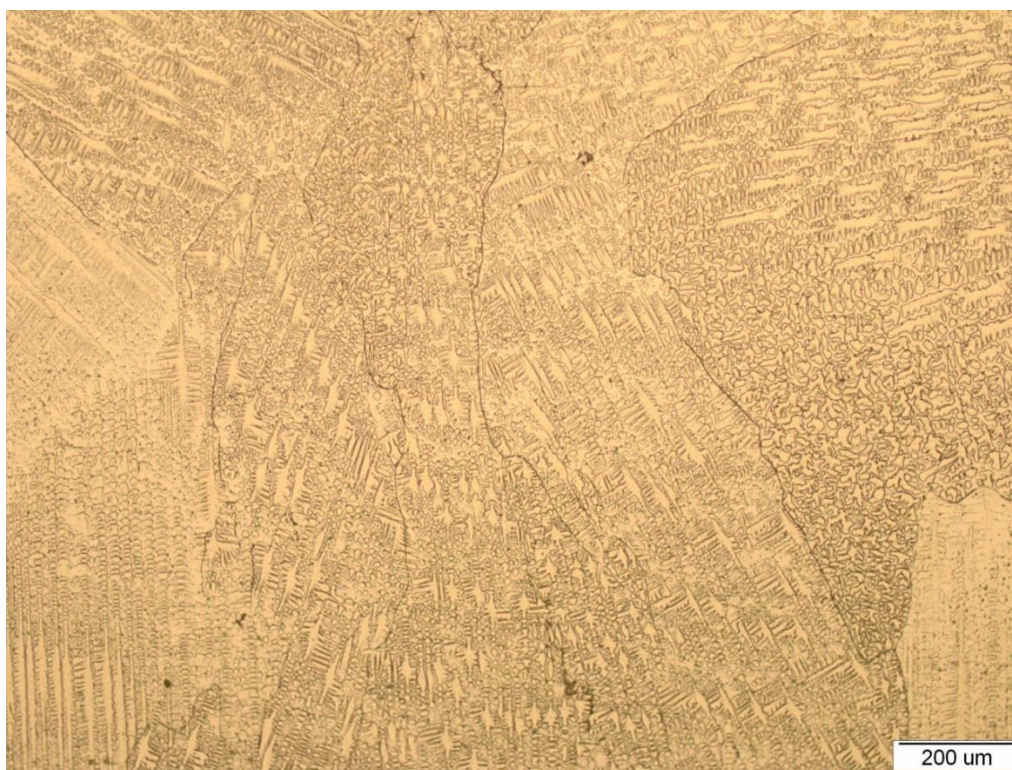
#### 5.5.4. Uzorak T4-2

Na slici 33. prikazan je makrouzorak zavarenog spoja gdje je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Zavareni spoj je izveden u 6 prolaza tako da su završna dva prolaza izvedena s dodatnim materijalom Castolin Eutectic® EnDOtec® DO\*30, a ostali prolazi s dodatnim materijalom Lincoln Electric® MIG 309L Si.

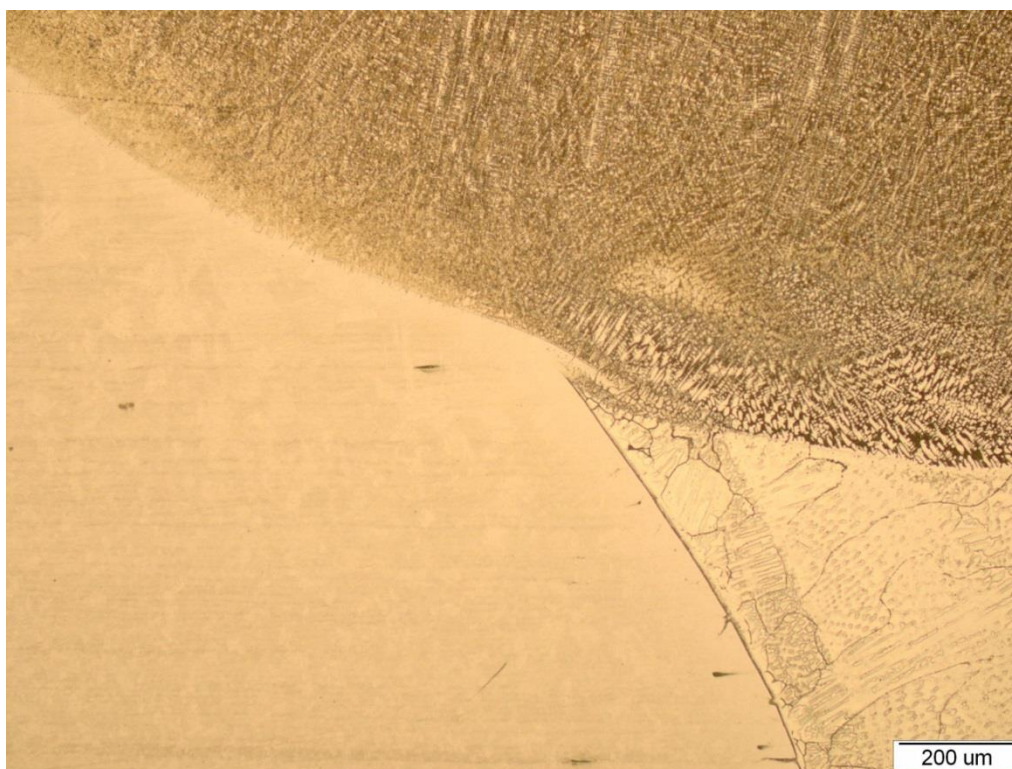


Slika 33. Makrouzorak T4-2

Slika 34. prikazuje mikrostrukturu korijena zavarenog spoja koja je austenitna. Područje zone staljivanja (Slika 35.) obuhvaća ZUT, međuprolaz i tvrdo završno navarivanje. Jasno je vidljiva linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala kao i spoj dvaju dodatnih materijala.



Slika 34. Mikrostruktura korijena zavarenog spoja uzorka T4-2



Slika 35. Mikrostruktura u području zone staljivanja uzorka T4-2

Međuprolaz uzorka T4-2 je austenitne mikrostrukture, a vrh zavarenog spoja je martenzitno-bainitne mikrostrukture (Slika 36.).



Slika 36. Mikrostruktura vrha zavarenog spoja uzorka T4-2

Ploča U4 iz koje je izrezan uzorak T4-2 izdržala je balistička opterećenja (Tablica 12.). Naime hici nisu probili metal zavara i zonu staljivanja, a ZUT je djelomično oštećen. Ploča U4 rezultirala je najboljim balističkim svojstvima. Najzaslužniji za takve rezultate su završni prolazi izvedeni tvrdim navarivanjem koji posjeduju martenzitno-bainitnu mikrostrukturu te zatim austenitna mikrostruktura koja je apsorbirala i amortizirala smanjeni dio energije hica koju je primila od martenzitne mikrostrukture. Martenzitna mikrostruktura ima visoku tvrdoću i čvrstoću, ali i povećanu krhkost te je zbog tog na nekim dijelovima došlo do odlamanja krhotina zavara, dok austenitna mikrostruktura dobro podnosi udarna opterećenja.

## **5.6. Preporuka daljnjeg razvoja tehnologije zavarivanja**

Na temelju dosadašnjeg istraživanja i vlastitih razmatranja predlaže se daljnje istraživanje:

- izvedba zavarenog spoja odnosno redosljed prolaza - predlaže se da zbog boljih balističkih svojstava broj prolaza kao i sam položaj zavarivanja s dodatnim materijalom velike tvrdoće bude izveden u minimalno dva završna prolaza, s tendencijom na tri ili više ukoliko je to moguće, a da ne dođe do narušavanja drugih svojstava. Završni prolazi trebaju prekrivati zavar i većinu ZUT-a kako bi se smanjila njegova probojnost;
- unos topline - predlaže se smanjenje unosa topline, odnosno veće njeno odvođenje. Prvo se moraju navariti međuslojevi koji bi se trebali izvesti tanjom žicom i sa što manjim parametrima čime bi postigli manji unos topline i manji ZUT;
- vezano za samu izvedbu zavarenog spoja i unos topline - predlaže se da ukupan broj prolaza zavarenog spoja bude veći čime će i unos topline biti manji. Ne smije doći do naljepljivanja već mora biti potpuno staljivanje svih zona spojeva;
- dodatni materijal - predlaže se izvedba tehnologije zavarivanja s dodatnim materijalom koji posjeduje visok udio nikla umjesto do sad korištene nehrđajuće austenitne žice. Naime, austenitna nehrđajuća žica u svojoj strukturi posjeduje krom koji stvara delta-ferite čime se smanjuje žilavost i duktilnost metala zavara.

## **6. ZAKLJUČAK**

Na temelju proučene literature i provedenog ispitivanja opisanog u eksperimentalnom dijelu mogu se donijeti zaključci u pogledu balističke otpornosti u odnosu na mikrostrukturu zavarenog spoja te predložiti daljnja istraživanja.

Uzorci U3 i U4 za razliku od uzoraka U1 i U2 zadovoljili su balistička svojstva. Uzorak U4 u potpunosti je zadovoljio balistička svojstva i samim time u tom smjeru bi se trebao kretati daljnji tijek istraživanja. Kombinacija zavarivanja različitim vrstama materijala pokazala se vrlo uspješnom. Sloj zavarivanja kod kojeg je korišten dodatni materijal visoke tvrdoće polučio je ove dobre rezultate. Struktura koja je dobivena u slojevima navara gdje je korišten dodatni materijal visoke tvrdoće slična je osnovnom materijalu čime je zavarenom spoju povećana tvrdoća i čvrstoća. Austenitna struktura koja posjeduje dobru otpornost na udarna opterećenja pokazala se odličnom kada se nalazi iza navara martenzitne tvrde mikrostrukture. Naime, energiju koju je zavareni spoj primio od projektila i koja je došla do austenitne strukture bez problema je akumulirana i amortizirana. Područje ZUT-a posjeduje lošija balistička svojstva zbog unosa topline pri čemu je došlo do pogrubljenja zrna u uskom području ZUT-a uz metal zavara te samim time i padom tvrdoće u tom području.

Za kraj se može zaključiti da je ovo područje vrlo kompleksno ali i vrlo široko u smislu istraživanja. U pogledu balističkih svojstava metala zavara postignuti su zadovoljavajući rezultati, ali problem ZUT-a ostavlja prostor za istraživanje. Postupak zavarivanja i dodatni materijal su osnova, tako da promjenama u odabiru dodatnih materijala i parametrima zavarivanja postigla bi se mikrostruktura koja bi posjedovala još bolja svojstva od navedenih u ovom radu te tako pospješila nastavak istraživanja.

## 7. LITERATURA

- [1] D. Showalter, W. Gooch, M. Burkins, J. Montgomery, and R. Squillacioti: *Development and Ballistic Testing of a New Class of Auto-Tempered High-Hard Steels Under Military Specification MIL-DTL-46100E*, Army Reserach Laboratory, Aberdeen Proving ground, 2009.
- [2] <http://www.ssab.com/Products/Brands/Armox>; 21.1.2016.
- [3] Barišić A.: *Određivanje balističkih značajki zavarenog spoja čelika ARMOX 500T*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] M. Novosel, D. Krumes: *Posebni čelici*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [5] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [6] I. Barényi, O. Híreš, P. Lipták: *Changes in Mechanical Properties of Armoured UHSLA Steel ARMOX 500 After Over Tempering*, University of Alexander Dubcek, University of Trencin, Faculty of Special Technology, Trencin, Slovak Republic, 2013.
- [7] Kuzman V.: *Utjecaj parametara zavarivanja na mikrostrukturu zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [8] Stupnišek M., Cajner F.: *Osnove toplinske obrade metala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [9] Garašić I.: *Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [10] Lukačević Z.: *Zavarivanje*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [11] Kolednjak, D.: *Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [12] Juraga I., Ljubić K., Živčić M., Garašić I.: *Pogreške u zavarenim spojevima*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [13] Tomić T.: *Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [14] Garašić I.: *Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [15] Samardžić I.: *Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija - digitalni udžbenik*,



Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet, Slavonski Brod

- [16] Pakrac J.: *Zavarivanje visokolegiranog čelika praškom punjenim žicama*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [17] Cvetković N.: *Primjena robotiziranog MIG zavarivanja u proizvodnji kompresijskih stezaljki*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [18] Seretinek Ž.: *Osnove balistike i teorije gađanja*, Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Zagreb, 2011.
- [19] Zukas J. A.: *High Velocity Impact Dynamics*, Willey-Interscience, 1990.
- [20] Kuzmikova L.: *An Investigation of the weldability of high hardness armour steels*, Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering, University of Wollongong, , 2013.