

UNIVERZITET U ZENICI
Fakultet za metalurgiju i materijale
u Zenici

Belma Fakić, dipl.inž.

UTICAJ POSTUPAKA ZAVARIVANJA NA FIZIKO-METALURŠKE
KARAKTERISTIKE ČELIKA: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5
U ZONI UTICAJA TOPLOTE

Magistarski rad

Zenica, decembar 2010.godine

UNIVERZITET U ZENICI
Fakultet za metalurgiju i materijale

KLJUČNE DOKUMENTACIJSKE INFORMACIJE:

Vrsta rada: Magistarski rad

Autor: Belma Fakić, dipl.inž.

Indeks br: 150/99

Mentor rada: prof.dr.sc.Sreto Tomašević

Naslov rada: „Uticaj postupaka zavarivanja na fiziko-metalurške karakteristike čelika:
S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 u zoni uticaja toplote“

Jezik publikacije: Bosanski

Jezik kratkog sadržaja: Bosanski / Engleski

Zemlja publikovanja: Bosna i Hercegovina

Godina izdanja: 2010.

Izdavač: Fakultet za metalurgiju i materijale

Adresa: Travnička cesta br. 1, 72 000 Zenica

e-mail: fam@famm.unze.ba

Fizički opis rada:

Broj poglavlja	3
Broj stranica	68
Broj tabela	28
Broj slika	54
Broj priloga	1

Naučna oblast: Metalni materijali, Zavarivanje

Ključne riječi: postupak zavarivanja, čelik, zona pod uticajem toplote (ZUT), tvrdoća, žilavost, veličina zrna, mikrostruktura

UDK oznaka Univerzitetske biblioteke: UDK 620.178:669.14/.15]:621.791](043.2)

UDK 620.18:669.14/.15]:621.791](043.2)

Rad je izrađen u 11 primjeraka

Vrijeme odbrane rada: 14.12.2010.

BIOGRAFIJA

Belma Fakić je rođena u Kaknju 12.06.1970.godine. Osnovnu školu „Rudi Čajevac“ u Kaknju je završila 1984.godine, a srednju Elektrotehničku školu je završila 1988.godine. Metalurški fakultet upisuje u školskoj 1988/89. godini, a na istom fakultetu diplomira u aprilu 1996.godine.

Po završetku fakulteta zapošljava se na Metalurškom institutu u Zavodu za fizičku metalurgiju, kao istraživač u Metalografskom laboratoriju. Od 2004-2009 radi kao Tehnički rukovodilac Inspeksijskog tijela za naftu, a od novembra 2008. godine kao Rukovodilac Metalografskog laboratorija. Služi se engleskim jezikom i u manjoj mjeri ruskim.

Kao član Tehničkog komiteta BAS/TC 4 - Čelik, čelični proizvodi, obojeni metali i legure od 2007.godine, radi na usvajanju i prevođenju međunarodnih i evropskih standarda.

Učestvovala je u projektu „Jačanje sistema akreditiranja u BiH“ i dobivanja međunarodne akreditacije od strane Norveškog akreditacionog tijela, u okviru kojeg je Metalografski laboratorij dobio međunarodnu akreditaciju, sredinom novembra 2010.godine.

U okviru postdiplomskog studija „Savremeni metalni materijali i njihova primjena u tehnici“ na Fakultetu za metalurgiju i materijale u Zenici, nakon što je položila sve ispite odobrena joj je tema za izradu magistarskog rada pod naslovom: „ Uticaj postupaka zavarivanja na fiziko-metalurške karakteristike čelika: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 u zoni uticaja toplote“.

Učestvovala je u izradi većeg broja istraživačkih i stručnih radova kao autor i koautor.

UTICAJ POSTUPAKA ZAVARIVANJA NA FIZIKO-METALURŠKE KARAKTERISTIKE ČELIKA: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 U ZONI UTICAJA TOPLOTE

Sažetak

Promjene fiziko-metalurških karakteristika u zoni pod uticajem toplote se ogledaju u promjeni tvrdoće, žilavosti i veličine zrna u odnosu na osnovni materijal. U zoni pod uticajem toplote dolazi do porasta zrna, što se može uzeti kao jedan od glavnih degradacionih mehanizama pri zavarivanju, naročito nakon unosa velike količine toplote. Porast zrna u zoni pod uticajem toplote zavisi od vrste čelika, odnosno njegovog hemijskog sastava i prethodne obrade. Veličina zrna značajno utiče na žilavost zone uticaja toplote. U zoni uticaja toplote tvrdoća je veća u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala a ova razlika zavisi od količine unesene toplote i brzine hlađenja. U ovom radu istraživao je uticaj parametara zavarivanja kod REL, MAG i TIG postupaka na fiziko-metalurške karakteristike nelegiranog čelika S355J2G3, te niskolegiranih čelika 16Mo3 i 13CrMo4-5 sa specificiranim osobinama na povišenim temperaturama, a koji su namijenjeni za rad pod pritiskom.

Ključne riječi: postupak zavarivanja, čelik, zona pod uticajem toplote (ZUT), tvrdoća, žilavost, veličina zrna, mikrostruktura

EFFECT OF WELDING PROCEDURES OF PHYSICO-METALLURGICAL CHARACTERISTICS OF STEELS: S355J2G3, 16Mo3 AND 13CrMo4-5 IN THE HEAT AFFECTED ZONE

Summary

Changes in physical-metallurgical characteristics in the HAZ are reflected in the change of hardness, toughness and grain size in relation to the base material. In the HAZ grain growth occurs, which can be taken as one of the main degradation mechanisms in welding, especially after entering large amounts of heat. Grain growth in the HAZ depends on the type of steel, and its chemical composition and previous treatment. The grain size significantly influences the toughness of heat affected zone. The heat affected zone hardness is higher than the hardness of the base material and this difference depends on the amount of inserted heat and cooling rate. This paper explores the influence of welding parameters for REL, MAG and TIG welding on physico-metallurgical characteristics of carbon steel S355J2G3 and low-alloy steels 16Mo3 and 13CrMo4-5 with specified properties at elevated temperature, which are designed to work under pressure.

Key words: welding, steel, heat affected zone HAZ, hardness, toughness, grain size, microstructure

SKRAĆENICE

ZUT –zona pod uticajem toplote

CE – ekvivalent ugljika

REL – ručno elektrolučno zavarivanje oplštenom elektrodom

MAG - elektrolučno zavarivanje u zaštiti plina CO₂

TIG - elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti argona

EPP - elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom pod zaštitom praška

SEW – Standard Europe Welding

IIW – International Institute of Welding

I N D E K S S L I K A

Broj	Naziv	Stranica
I-1.	Uticaj predgrijavanja na hlađenje zone pod uticajem toplote	4
I-2.	Zavisnost visine termperaturnog uticaja i udaljenosti od zavara	7
I-3.	Termički ciklusi pri zavarivanju: a) u jednom prolazu; b) u tri prolaza	8
I-4.	Termički ciklus različitih tačaka	8
I-5.	Termički ciklus zavarivanja u zoni pod uticajem toplote	9
I-6.	Uticaj uslova zavarivanja na žilavost i prelaznu temperaturu u ZUT-u	9
I-7.	Uticaj uslova zavarivanja na maksimalnu tvrdoću u ZUT-u	10
I-8.	Idealizirana zavisnost $\sigma - \epsilon$ za zonu pod uticajem toplote sučeono zavarenog spoja	11
I-9.	Shematski prikaz hronologije promjena izazvanih zavarivačkim ciklusom	12
I-10.	Pogodinov dijagram - strukture u valjanom čeliku pri zagrijavanju i hlađenju tokom zavarivanja	13
I-11.	Uticaj veličine zrna osnovnog materijala na primarnu kristalizaciju	14
I-12.	Shematski tok tvrdoće zone pod uticajem toplote u zavisnosti od vremena hlađenja	20
I-13.	Zavisnost tvrdoće od ugljikovog ekvivalenta i debljine materijala	21
I-14.	Korelacija između CE i zatezne čvrstoće za normalizirane i poboljšane čelike	21
I-15.	Vrijednosti tvrdoće u funkciji zatezne čvrstoće za normalizirane i poboljšane čelike	21
I-16.	Dijagram udarna radnja loma - temperatura	23
I-17.	Promjene osobina konstrukcionih čelika sa smanjenjem temperature	24
I-18.	Mikrostrukture dijelova zone pod uticajem toplote i osnovnog materijala	26
II-1.	Primjer ploča lima od niskolegiriranog čelika 16Mo3	27
II-2.	Primjer zavarivanja ispitnih uzoraka MAG postupkom zavarivanja	28
II-3.	Primjer zavarenih ploča MAG postupkom zavarivanja	28
II-4.	Zavisnost tvrdoće od ekvivalenta ugljika i debljine materijala za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5	30
II-5.	Shematski prikaz uzorkovanja	31
II-6.	Shematski prikaz sučeono zavarenog spoja sa lokacijama ispitivanja tvrdoće	32
II-7.	Tvrdoća sučeono zavarenog spoja sa lokacijama ispitivanja tvrdoće a) čelik S355J2G3; b) 16Mo3; c) 13CrMo4-5	34
II-8.	Dijagrami udarne radnje loma u zavisnosti od postupka zavarivanja a) čelik S355J2G3; b) 16Mo3; c) 13CrMo4-5	35
II-9.	Shematski prikaz lokacija na kojima je izvršeno ispitivanje mikrostrukture sučeono zavarenog spoja	36
II-10.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 kod REL postupka zavarivanja	37
II-11.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 kod MAG postupka zavarivanja	38

II-12.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 kod TIG postupka zavarivanja	39
II-13.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod REL postupka zavarivanja	40
II-14.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod MAG postupka zavarivanja	41
II-15.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod TIG postupka zavarivanja	42
II-16.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod REL postupka zavarivanja	43
II-17.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod MAG postupka zavarivanja	44
II-18.	Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod TIG postupka zavarivanja	45
III-1.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	56
III-2.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka zavarivanja	57
III-3.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka zavarivanja	57
III-4.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	58
III-5.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod MAG postupka	58
III-6.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka	59
III-7.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	59
III-8.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka zavarivanja	60
III-9.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka zavarivanja	60
III-10.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	61
III-11.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod MAG postupka	61
III-12.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka	62

III-13.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	62
III-14.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona, jačine struje i brzine zavarivanja kod MAG postupka	63
III-15.	Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka	63
III-16.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka	64
III-17.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod MAG postupka	64
III-18.	Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka	65

I N D E K S T A B E L A

Broj	Naziv	Stranica
I-1.	Parametarske jednačine	16
I-2.	Izrazi za tvrdoću martenzita	22
I-3.	Hemijski sastav čelika na kojima su vršena ispitivanja	23
II-1.	Oznake eksperimentalnih uzoraka	28
II-2.	Izrada eksperimentalnih uzoraka	29
II-3.	Hemijski sastav ispitivanih uzoraka i izračunati CE	30
II-4.	Temperatura predgrijavanja	30
II-5.	Rezultati ispitivanja tvrdoće sučeono zavarenih spojeva	33
II-6.	Rezultati ispitivanja udarne radnje loma sučeono zavarenih spojeva	35
III-1.	Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavara čelika S355J2G3	46
III-2.	Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u čelika S355J2G3	47
III-3.	Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik S355J2G3	47
III-4.	Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika S355J2G3	48
III-5.	Pregled mikrostruktura sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3	49
III-6.	Veličina zrna kod čelika S355J2G3	49
III-7.	Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavara čelika 16Mo3	49
III-8.	Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u čelika 16Mo3	50
III-9.	Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik 16Mo3	50
III-10.	Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika 16Mo3	51
III-11.	Pregled mikrostruktura sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3	52
III-12.	Veličina zrna kod čelika 16Mo3	52
III-13.	Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavara čelika 13CrMo4-5	53
III-14.	Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u čelika 13CrMo4-5	53
III-15.	Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik 13CrMo4-5	54
III-16.	Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika 13CrMo4-5	54
III-17.	Pregled mikrostruktura sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5	55
III-18.	Veličina zrna kod čelika 13CrMo4-5	56
III-19.	Pregled vrijednosti koeficijenata korelacije i povezanosti fiziko-metalurških karakteristika tvrdoće i udarne radnje loma sa parametrima zavarivanja	65

S A D R Ź A J

	Stranica
UVOD	1
I TEORETSKI DIO	
1. ZAVARIVANJE	2
1.1 Pojmovi u zavarivanju	2
1.2 Zavarivost	2
1.2.1 Zavarivost nelegiranih konstrukcionih čelika	3
1.2.2 Zavarivost čelika legiranih Cr i Mo	4
1.3 Predgrijavanje	4
1.3.1 Predgrijavanje nelegiranih konstrukcionih čelika	5
1.3.2 Predgrijavanje čelika legiranih Cr i Mo	5
1.3.3 Određivanje temperature predgrijavanja	5
1.4 Termički ciklus zavarivanja	6
1.5 Deformacioni (naponski) ciklus zavarivanja	10
1.6 Strukturne transformacije pri zavarivanju	12
2. ZONA POD UTICAJEM TOPLOTE	14
2.1 Precipitacioni procesi u zoni pod uticajem toplote	17
2.2 Osobine zone pod uticajem toplote	18
2.2.1 Tvrdća zone pod uticajem toplote	19
2.2.2 Žilavost zone pod uticajem toplote	22
2.2.3 Mikrostruktura zone pod uticajem toplote	24
II EKSPERIMENTALNI DIO	
3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	27
3.1 Cilj istraživanja	27
3.2 Plan eksperimenta	27
3.3 Izrada eksperimentalnih uzoraka	28
3.4 Ispitivanja eksperimentalnih uzoraka	29

3.4.1	Određivanje ekvivalenta ugljika	29
3.4.2	Uzorkovanje	31
3.4.3	Ispitivanje tvrdoće	31
3.4.4	Ispitivanje udarne radnje loma	35
3.4.5	Ispitivanje mikrostrukture i veličine zrna	36
	III ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	
4.	ANALIZA REZULTATA	46
4.1	Analiza rezultata ispitivanja za čelik S355J2G3	46
4.1.1	Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	46
4.1.2	Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	47
4.1.3	Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna	48
4.2	Analiza rezultata ispitivanja za čelik 16Mo3	49
4.2.1	Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	49
4.2.2	Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	51
4.2.3	Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna	51
4.3	Analiza rezultata ispitivanja za čelik 13CrMo4-5	53
4.3.1	Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	53
4.3.2	Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	54
4.3.3	Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna	54
5.	STATISTIČKA OBRADA REZULTATA ISPITIVANJA	56
5.1	Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik S355J2G3	56
5.1.1	Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	56
5.1.2	Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	58
5.2	Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik 16Mo3	59
5.2.1	Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	59
5.2.2	Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	61
5.3	Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik 13CrMo4-5	62
5.3.1	Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće	62
5.3.2	Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma	64
6	ZAKLJUČCI	66
	LITERATURA	
	PRILOG	

UVOD

Čovjekova potreba za primjenom metala i raznih metalnih konstrukcija dovela je do razvoja raznih načina spajanja metala. Još u XII vijeku prije nove ere, Grci i Egipćani su spajali (zavarivali) metale kositrom u kovačkoj vatri, a razvojem proizvodnje željeza u srednjem vijeku počelo se primjenjivati kovačko zavarivanje pri izradi oružja. Početkom dvadesetog stoljeća za izradu brodova koristio se postupak spajanja hladnim zakovičenjem.

Hladnim zakovičenjem su bili spojeni limovi u trupu broda „Titanic“ u periodu 1910-1912 godine. Ovakav način spajanja, te uslovi proizvodnje čelika u to vrijeme, kao i niz drugih nesretnih okolnosti koje su materijal čelik, od kog je bio napravljen brod, najvjerovatnije doveli u stanje krug loma [1].

Krajem XIX i početkom XX stoljeća stvoreni su preduslovi za unapređenje postupaka spajanja metala i legura - postupci zavarivanja od elektrootpornog preko elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom do ultrazvučnog zavarivanja. Dok su u drugoj polovini XX stoljeća razvijeni postupci zavarivanja plazmom, difuziono te zavarivanje laserom.

Zavarivanje kao način spajanja metala i legura ima veoma širok spektar primjene, jer više od 70% proizvoda metaloprerađivačke industrije sadrži zavarene spojeve. Sve što se koristi u svakodnevnom životu ili je zavareno ili je dobiveno opremom koja je zavarena.

U okviru ovog rada istraživao je uticaj parametara zavarivanja REL, MAG i TIG postupaka na fiziko-metalurške karakteristike nelegiranog čelika S355J2G3, te niskolegiranih čelika 16Mo3 i 13CrMo4-5 sa specificiranim osobinama na povišenim temperaturama, a koji su namijenjeni za rad pod pritiskom. Naročito je kod zavarenih spojeva svih čelika značajna zona pod uticajem toplote. Promjene fiziko-metalurških karakteristika u zoni pod uticajem toplote se, između ostalog, ogledaju u promjeni tvrdoće, žilavosti i veličine zrna u odnosu na osnovni materijal.

U zoni pod uticajem toplote dolazi do porasta zrna, što se može uzeti kao jedan od glavnih degradacionih mehanizama pri zavarivanju, naročito nakon unosa velike količine toplote. Porast zrna u zoni pod uticajem toplote zavisi od vrste čelika, odnosno njegovog hemijskog sastava i prethodne obrade. Veličina zrna značajno utiče na žilavost zone pod uticajem toplote. U zoni pod uticajem toplote tvrdoća je veća u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala a ova promjena zavisi od količine unošene toplote i brzine hlađenja.

Zadatak istraživanja je bio da se utvrdi uticaj parametara kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja na promjene fiziko-metalurških osobina zone pod uticajem toplote za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5, te da se utvrdi koji parametri negativno utiču na te osobine uz postavljanje zavisnosti mehaničkih osobina i uticajnih faktora koji doprinose poboljšanju osobina cijelog zavarenog spoja.

Magistarski rad je podijeljen na tri dijela. Prvi, teoretski dio govori općenito o zavarivosti čelika, termičkom i deformacionom ciklusu zavarivanja, te osobinama zone pod uticajem toplote. Drugi, eksperimentalni dio sadrži podatke o izradi eksperimentalnih uzoraka, zavarenih proba od čelika kvaliteta S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 primjenom REL, MAG i TIG postupaka, te parametre zavarivanja. U ovom dijelu su prezentirani rezultati provedenih ispitivanja. Treći dio obuhvata analizu rezultata sa zaključcima.

Izrada eksperimentalnih uzoraka obavljena je u firmi „METALNO“ d.o.o. Zenica, dok su izrada epruveta i laboratorijska ispitivanja provedena u Metalurškom institutu „Kemal Kapetanović“ Zenica.

Stoga na ovaj način izražavam zahvalnost svim kolegicama i kolegama, koji su na bilo koji način učestvovali u realizaciji magistarskog rada. Posebnu zahvalnost izražavam mentoru prof.dr.sc. Sreti Tomaševiću, te prof.dr.sc. Mirsadi Oruč koji su imali razumijevanja i uložili trud da ovaj rad zadovolji formu i suštinu.

I TEORETSKI DIO

1. ZAVARIVANJE

Zavarivanje je proces nerastavljivog spajanja materijala. Kod zavarivanja može doći do metalurškog spajanja metalnih dijelova pomoću metala zavara, kako se to dešava kod elektrolučnih postupaka zavarivanja, zatim kod nekih načina zavarivanja električnim otporom, elektronskim ili laserskim zracima, te zavarivanje plazmom. Metal zavara se formira pomoću istopljenog dodatnog materijala (elektrolučno, plazma) ili topljenjem zavarivanih materijala (otporno, laserom) [2] .

1.1 Pojmovi u zavarivanju

Pojmovi koji se susreću u zavarivanju su: osnovni materijal, žlijeb, zavar, šav, dodatni materijal, zavareni spoj, zavarivost, zona pod uticajem toplote.

- **Osnovni materijal** je materijal koji se zavaruje.
- **Žlijeb** je prostor između dijelova pripremljenih za zavarivanje.
- **Zavar** je očvršnuti rastopljeni materijal nastao topljenjem osnovnog i dodatnog materijala samo u jednom prolazu.
- **Šav** je očvršnuti rastopljeni materijal, koji je nastao prilikom topljenja osnovnog i dodatnog materijala, pri zavarivanju u jednom ili više prolaza.
- **Dodatni materijal** je materijal koji prije zavarivanja ne pripada dijelovima koji se spajaju, nego se dodaje pri procesu zavarivanja, topi se zajedno sa osnovnim materijalom i popunjava prostor na mjestu spoja.
- **Zavareni spoj** je cjelina ostvarena zavarivanjem, koja obuhvata dodirne dijelove zavarenog osnovnog materijala. Oblik zavarenog spoja zavisi od međusobnog položaja zavarenih dijelova, a može biti: sučeoni, ugaoni, kutni, preklopljeni, krstasti, itd [3].
- **Zavarivost** je pogodnost materijala za zavarivanje.
- **Zona pod uticajem toplote** - ZUT je onaj dio osnovnog materijala koji naliježe na metal zavara, koji je pod uticajem toplote za vrijeme izrade zavarenog spoja [2].

1.2 Zavarivost

Zavarivost materijala je veoma dobra kada se bez ograničavajućih uslova mogu dobiti zavareni spojevi zahtijevanih osobina. Ako je kod zavarivanja potrebno primijeniti ograničavajuće uslove: predgrijavanje, limitiranje unosa specifične toplote, onda materijal ima ograničenu zavarivost.

Zavarivost je kompleksna osobina konstrukcionog dijela koja zavisi od uticajnih faktora:

1. osobina materijala – hemijski sastav, način proizvodnje, termička obrada;
2. konstrukcije – debljine, kompleksnosti zavarenog spoja (što se izražava pojmom „intenzitet krutosti“) i
3. tehnologije zavarivanja – dovedena količina toplote, sadržaj vodika, vrsta dodatnog materijala itd.

Sposobnost za zavarivanje nekog materijala određuju njegove osobine i promjene osobina koje nastaju u procesu zavarivanja. Zavarivost je zadovoljavajuća ako poslije izrade konstrukcionog dijela osobine šava i zone pod uticajem toplote (ZUT) zadovoljavaju konstrukcione zahtjeve i stepen sigurnosti konstrukcionog dijela [2].

Jedan od najvažnijih pokazatelja zavarivosti je otpornost zavarenih spojeva na stvaranje takvih grešaka kao što su pukotine (vruće, hladne, lamelarne, nastale zbog naknadnog žarenja), koje u najvećoj mjeri određuju sigurnost, odnosno radnu sposobnost zavarene konstrukcije.

Sposobnost zavarivanja čelika zavisi od pojedinačnih i međusobno uticajnih faktora kao što su:

- prisustvo segregacija,
- anizotropija,
- sklonost ka krtom lomu,
- sklonost ka zakaljivanju (prokaljivosti),
- sklonost ka starenju,
- debljina.

Hemijski sastav, posebno visok sadržaj C u čeliku, daje strukture visoke tvrdoće i niske žilavosti u zoni pod uticajem toplote uslijed zakaljivanja. Sklonost ka zakaljivanju se ocjenjuje veličinom vrijednosti ekvivalenta ugljika (CE). Kod primjene IIW¹⁾ formule za veličinu CE, ocjenjuje se da su čelici sa vrijednosti CE >0,45 skloni zakaljivanju i da je potrebno preduzeti tehnološke mjere za smanjenje pojave struktura kaljenja. Uticaj veličine CE na zakaljivost u zoni pod uticajem toplote se povećava sa porastom debljine i broja pravaca odvođenja toplote preko osnovnog materijala [4].

1.2.1 Zavarivost nelegiranih konstrukcionih čelika

Kod nelegiranih konstrukcionih čelika, glavni element koji utiče na zavarivost je ugljik.

Sposobnost zavarivanja konstrukcionih čelika se povećava sa stepenom dezoksidacije, smanjenjem vrijednosti CE, povećanjem sposobnosti za deformaciju u pravcu zatežućih napona, povećanjem vrijednosti žilavosti i smanjenjem debljine.

Porast sadržaja ugljika negativno utiče na zavarivost. Kraće vrijeme hlađenja u temperaturnom intervalu 800 do 500°C i porast sadržaja martenzita dovode do nastajanja zakaljene krte strukture u području metala zavara. Granica vrijednosti sadržaja od 0,2%C pri kojoj nastaje 30-50% martenzita i tvrdoća 300-350HV u zoni pod uticajem toplote, smatra se gornjom sigurnom granicom sa stanovišta pojave pukotina i nastanka krtog loma [3].

Ocjena sposobnosti za zavarivanje čelika pretpostavlja uglavnom primjenu postupaka zavarivanja topljenjem, što u slučaju nelegiranih konstrukcionih čelika znači primjenu REL, MAG, TIG i EPP postupka.

Kratak opis postupaka sa glavnim parametrima – napon, jačina struje i brzina zavarivanja kod REL, MAG i TIG postupka, koji se najčešće koriste kod izrade zavarenih konstrukcija u našem okruženju dat je u Prilogu A ovog rada.

¹⁾ IIW – International Institute of Welding

1.2.2 Zavarivost čelika legiranih Cr i Mo

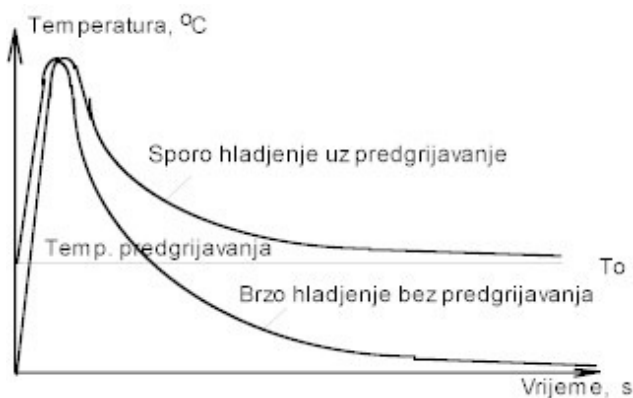
Zavarivost čelika legiranih Cr i Mo je limitirana. Ovi čelici imaju visok ekvivalent ugljika i zato su skloni pojavi nastanka pukotina. Veći stepen prokaljivosti ovih čelika znači i veću sklonost nastajanju bainita ili martenzita u odnosu na nelegirane čelike. Pojava izvjesne količine martenzita u metalu zavara se ne može potisnuti ni predgrijavanjem. U zoni pod uticajem toplote može nastati bainitna mikrostruktura, što za posljedicu ima veće vrijednosti tvrdoće u ZUT-u, što je nepoželjno sa stanovišta nastanka pukotina u ZUT-u. Visoka tvrdoća u ZUT-u je nepoželjna i za slučaj naizmjeničnog opterećenja zavarenih spojeva, naročito kod visokocikličnog zamora. Navedeni elementi imaju značajan uticaj na prokaljivost i zbog toga se po pravilu vrši predgrijavanje prije zavarivanja, prema preporuci SEW 066¹⁾ [3].

1.3 Predgrijavanje

Predgrijavanje podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline, na propisanu temperaturu T_0 , prije početka zavarivanja, te održavanje te temperature za vrijeme zavarivanja. Predgrijavanje je primarno unošenje toplote u zavar, a kasnije se izvorom energije zavarivanja (npr. električnim lukom) sekundarno unosi toplota u zavar, pa su konačni efekti rezultat primarnog i sekundarnog unošenja toplote. Temperatura predgrijavanja je značajna iz više razloga.

Predgrijavanjem se sprječava nastanak hladnih pukotina, jer se postižu efekti:

- a) smanjenje brzine hlađenja ZUT-a u odnosu na veće brzine, ako se ne vrši predgrijavanje, slika I-1. Smanjenjem brzine hlađenja se smanjuje količina tvrdih faza: (zakaljane martenzitne ili nekih manje tvrdih struktura),



Slika I-1. Uticaj predgrijavanja na hlađenje zone pod uticajem toplote [5]

- b) omogućavanje izlaska (efuzije) difuzijskog vodika. Atomarni difuzijski vodik lakše difundira kroz metalnu kristalnu rešetku pri višim temperaturama, jer je srednji razmak između atoma metala veći,
- c) manja su zaostala naprezanja jer se predgrijavanjem hladna okolina također istegne, pa se hlađenjem skraćuje zajedno sa sredinom zavara, ali za manju veličinu, što ima za posljedicu manja zaostala naprezanja uz predgrijavanje.

¹⁾ SEW – Standard Europe Welding

Vrijednost temperature predgrijavanja zavisi od hemijskog sastava i debljine osnovnog materijala i udjela difuzijskog vodika u zavarenom spoju. Temperatura između prolaza je praktično temperatura predgrijavanja za slijedeći prolaz, mjerena na sredini šava. Temperatura predgrijavanja orijentacijski se određuje na osnovu eksperimentalno dobivenih formula, a potvrđuje se eksperimentalnim radovima i certifikacijom postupaka zavarivanja.

1.3.1 Predgrijavanje nelegiranih konstrukcionih čelika

Prema literaturnim podacima nelegirani konstrukcioni čelici sa sadržajem ugljika manjim od 0,20% i ekvivalentom ugljika manjim od 0,45%, te debljinama manjim od 25 mm se kod zavarivanja ne trebaju predgrijavati [2].

1.3.2 Predgrijavanje čelika legiranih Cr i Mo

Predgrijavanje čelika legiranih kromom i molibdenom smanjuje sklonost ka nastanku likvacionih pukotina, smanjuje tvrdoću zone pod uticajem toplote, smanjuje nivo zaostalih naprezanja u metalu zavora. Predgrijavanjem se poboljšava difuzija vodika iz metala zavora.

Čelici legirani kromom imaju veliku osjetljivost na zarez, zbog čega je prilikom zavarivanja potrebno predgrijavanje, kao i kontrola cijelog temperaturnog režima zavarivanja sa naknadnom termičkom obradom nakon zavarivanja. Kod zavarivanja CrMo čelika, u prošlosti se koristila viša temperatura predgrijavanja, čak i iznad temperature nastanka martenzita (M_s tačke) čelika. Vrijednosti temperature predgrijavanja su bile od 300 pa čak i preko 400 °C. Ovako visoka temperatura predgrijavanja pri zavarivanju CrMo čelika se više ne preporučuje iz sljedećeg razloga: zadržavanje metala zavora pri temperaturi u blizini M_s tačke, stabilizira austenit, koji se obogaćuje ugljikom. Tako će u bainitnoj strukturi, koja se dobije nakon hlađenja metala zavora, biti veći procenat stabilnog zaostalog austenita (čak 20-30%). Ovaj zaostali austenit se naknadnim žarenjem raspada na martenzit. Za dobivanje feritno-karbidne smjese dobivene transformacijom potrebno je dvostruko žarenje. Preporučene temperature predgrijavanja za čelike legirane kromom do 1,25% i molibdenom do 0,5%, debljine 12 mm, prema literaturi se kreću od 150 do 200 °C [2].

Međuslojna (interpass) temperatura kod zavarivanja čelika legiranih kromom i molibdenom ima isti značaj kao i temperatura predgrijavanja. Vrijednost međuslojne temperature je ista ili malo niža od temperature predgrijavanja.

1.3.3 Određivanje temperature predgrijavanja

Na koju temperaturu je potrebno zonu zavarivanja predgrijati i da li je uopće potrebno vršiti predgrijavanje (ili je dovoljna temperatura metala, koja je jednaka temperaturi okoline) određuje se na osnovu [5]:

- preporuka iz literature i/ili iskustva,
- proba sklonosti hladnim pukotinama: implant, CTS, Tekken i druge gdje se na probama mjeri veličina i broj pukotina, ako se pojave,
- kvalifikacije postupka - zavaruju se probni uzorci uz preporučene uslove:

temperatura predgrijavanja, temperatura između prolaza, unos toplote, količina difuzijskog vodika, debljina materijala, geometrijski oblik predmeta (lim, cijev). Iz zavarenih uzoraka se izrezuju uzorci za utvrđivanje svojstava: R_m , R_e , A_5 , Z , dinamička čvrstoća, čvrstoća na puzanje, otpornost na razne vrste korozije, tvrdoća ... Koja svojstva će se mjeriti zavisi o otkazu, koji je moguć na proizvodu: krti lom, žilavi lom, trajne deformacije, lom usljed zamora (dinamička čvrstoća) i drugi. Ako se na uzorcima dobiju zadovoljavajući rezultati,

tada se smatra da su uslovi zavarivanja uključujući temperaturu predgrijavanja T_0 i temperaturu između prolaza T_m dobro izabrani,

- proračuna temperature predgrijavanja prema Ito i Bessyo, Seferianu, ili drugim autorima. Da li treba predgrijavati i na koju temperaturu ovisi o hemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala koji se izražava ekvivalentom ugljika, debljini materijala, broju smjerova odvođenja toplote, upetosti i sadržaju difuzijskog vodika.

Ukoliko nema podataka iz prethodnih procesa zavarivanja ili podataka iz literature, onda se koriste računske metode za određivanje minimalno potrebne temperature predgrijavanja. Veliki broj autora se bavio određivanjem temperature predgrijavanja. Metode koje se najviše susreću u literaturi su metoda Seferijana, te metoda Itoa i Bessyoa.

Metoda Seferijana u obzir uzima hemijski sastav materijala izražen preko ekvivalenta ugljika i debljine materijala koji se zavaruje. Ova metoda je klasična i daje dosta dobre rezultate, posebno u grupi nisko legiranih čelika. Temperatura predgrijavanja se prema metodi Seferijana računa [2]:

$$T = 350\sqrt{CE \cdot (1 + 0,005h)} - 0,25 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

gdje je CE– ekvivalent ugljika

h – debljina osnovnog materijala (mm)

1.4 Termički ciklus zavarivanja

Proces zavarivanja metala topljenjem odvija se u uslovima brzih temperaturnih promjena, od sobne do temperature topljenja pa i isparavanja metala. U ovom širokom temperaturnom intervalu odvijaju se različiti fizički i hemijski procesi:

- zagrijavanje osnovnog i dodatnog materijala,
- topljenje osnovnog i dodatnog materijala,
- metalurške reakcije u zavarivačkoj kupki,
- kristalizacija rastopljenog materijala,
- strukturne i zapreminske promjene osnovnog i dodatnog materijala.

Termički ciklus za vrijeme zavarivanja ima značajan uticaj na mehaničke osobine zavarenog spoja. Tvrdća i žilavost zavarenog spoja su posebno pod uticajem faktora:

- debljine materijala,
- oblika spoja,
- unešene toplote za vrijeme zavarivanja i
- temperature predgrijavanja [6].

Termički ciklus karakterišu tri osnovne veličine: brzina zagrijavanja do maksimalne temperature, maksimalna temperatura i brzina hlađenja. Karakteristične faze termičkog ciklusa zavarivanja su:

I faza: brzina zagrijavanja do maksimalne temperature –

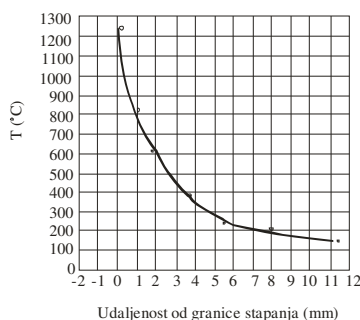
brzina može biti manja (kod elektrozavarivanja pod troškom), veća (kod zavarivanja pod električnim lukom) ili ekstremno velika (kod elektrootpornog ili laserskog zavarivanja). Prilikom zagrijavanja u materijalu dominiraju naponi na pritisak kao posljedica širenja metala uslijed porasta temperature. Kod čelika je prisutna i polimorfna transformacija $\alpha \rightarrow \gamma$, odnosno $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$. Obzirom da polimorfna transformacija spada u termički aktivne procese, koji imaju etapu nukleacije i rasta, brzina zagrijavanja će uticati na veličinu temperaturne histereze tačaka transformacije. Ovu fazu karakteriše parametar vrijeme zagrijavanja na maksimalnu temperaturu t [s]. Ovaj parametar dovodi se u vezu sa rastom primarnih zrna i difuzionim procesima [2].

II faza: maksimalna temperatura –

može biti iznad temperature topljenja ili ispod temperature topljenja kod zavarivanja u čvrstom stanju. Za vrijeme držanja na maksimalnoj temperaturi dolazi do ogrubljenja zrna. Što je ovo vrijeme duže, austenitno zrno je grublje. Maksimalna temperatura ciklusa $T_{\max}$ [°C] je bazni parametar. Ovaj parametar dovodi se u vezu sa podjelom metala zavarenog spoja na karakteristične zone:

- metal zavara kao dio zavarenog spoja, zagrijan iznad temperature solidusa,
- prelazni pojas – granica stapanja, uska zona zagrijana na temperaturu solidusa,
- zona pod uticajem toplote – ZUT sa temperaturama:
 - a) iznad A_3 – potpuna transformacija $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$,
 - b) interval A_1 - A_3 – zona sa djelimičnom transformacijom,
 - c) ispod A_1 – strukturne promjene- precipitacija, dislokacione reakcije [2].

Maksimalna temperatura ciklusa eksponencijalno pada sa porastom udaljenosti od ose metala zavara, slika I-2.



Slika I-2. Zavisnost visine termperaturnog uticaja i udaljenosti od zavara [2]

III faza: brzina hlađenja –

je bitna zbog dva procesa, tj. polimorfne transformacije i difuzije ugljika:

- što je veća brzina hlađenja u području transformacionih temperatura veća je vjerovatnoća za dobivanje neravnotežnih struktura (npr. martenzita),
- što je manja brzina hlađenja kod nižih temperatura (oko 300 °C) veća je vjerovatnoća za difuziju vodika iz područja zavarenog spoja.

Brzina hlađenja se izražava parametrom vremena hlađenja, a može biti:

- a) $t_{8/5}$ – vrijeme hlađenja između temperatura 800 i 500 °C,
- b) $t_{12/8}$ – vrijeme hlađenja između temperatura 1200 i 800 °C,
- c) $t_{T_{\max}/100}$ – vrijeme hlađenja između maksimalne temperatura ciklusa i 100 °C i
- d) V_{300} – brzina hlađenja kod 300 °C [2].

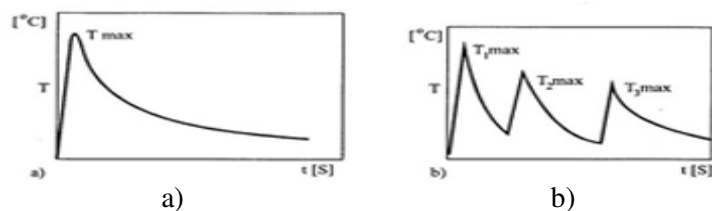
Najčešće se kod čelika koristi parametar $t_{8/5}$, koji je funkcija energije zavarivanja, termičkih osobina materijala, te geometrije spoja i spojenih elemenata. Parametar $t_{8/5}$ karakteriše mikrostrukture nastale transformacijom $\gamma \rightarrow \alpha$.

Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ je karakteristika termičkog ciklusa pojedinačnog prolaza za vrijeme zavarivanja i prolazak ZUT-a kroz temperaturni interval od 800°C do 500°C. Za niskolegirane čelike, približno vrijeme hlađenje $t_{8/5}$ je između 10 i 25 sekundi.

Za određivanje vremena hlađenja $t_{8/5}$, u zavisnosti od postupka zavarivanja, debljine materijala i uslova zavarivanja, danas se koristi čitav niz inženjerskih dijagrama.

Na mikrostrukturu i mehaničke osobine zavarenog spoja utiče i broj termičkih ciklusa u toku zavarivanja, odnosno da li se radi o jednostrukom ili višestrukome temperaturnom ciklusu pri

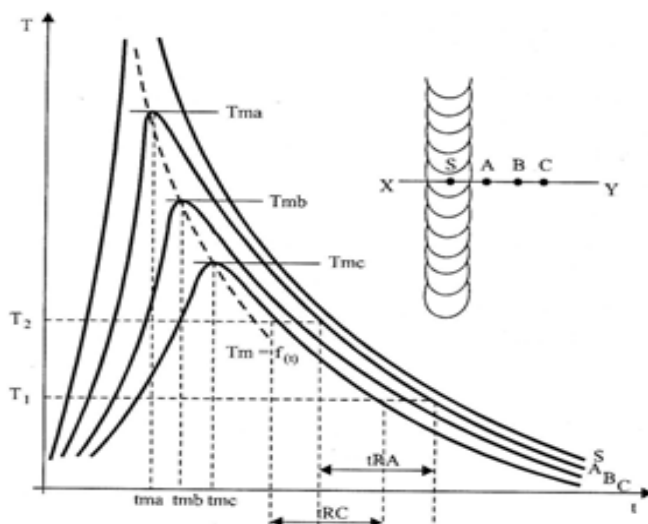
zavarivanju u jednom ili više prolaza. Na slici I-3. dat je primjer ovih ciklusa pri jednoprolaznom i višeprolaznom zavarivanju [3].



Slika I-3. Termički ciklusi pri zavarivanju: a) u jednom prolazu; b) u tri prolaza [3]

Za slučaj zavarivanja u tri prolaza, temperatura dostiže tri maksimalne vrijednosti u jednoj tački pri svakom prolazu. Vrijednost maksimalne temperature u toj tački u prvom prolazu je najveća, i smanjuje se u drugom i trećem prolazu.

Što je tačka udaljenija od ose kretanja, kasnije će početi rasti temperatura te tačke i njena maksimalna temperatura će biti niža. Termički ciklus različitih tačaka A, B i C dat je na slici I-4. Maksimalna temperatura tačke A je najviša jer se nalazi najbliže izvoru toplote, dok je maksimalna temperatura tačke C najniža.



Slika I-4. Termički ciklus različitih tačaka [3]

gdje je: T_{ma} – maksimalna temperatura u tački A,

T_{mb} – maksimalna temperatura u tački B,

T_{mc} – maksimalna temperatura u tački C,

t_{ma} – brzina hlađenja tačke A,

t_{mb} – brzina hlađenja tačke B,

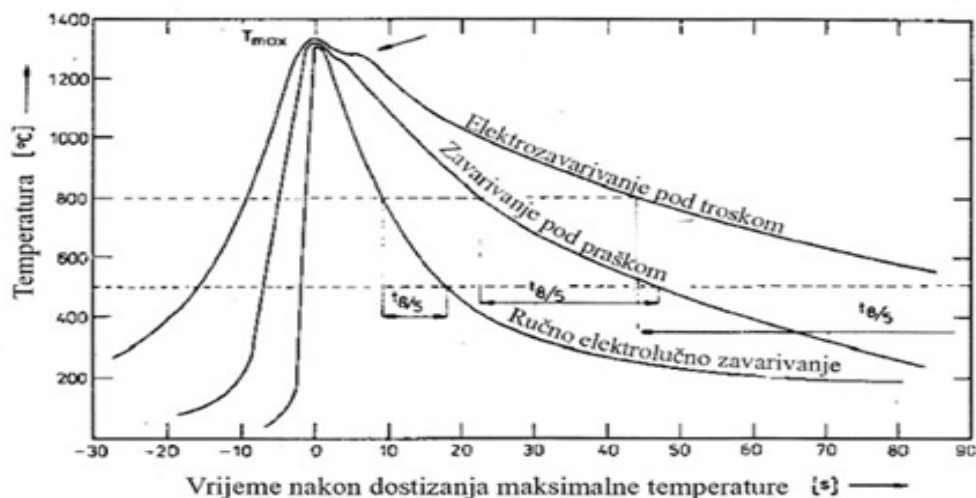
t_{mc} – brzina hlađenja tačke C,

t_{RA} – brzina hlađenja tačke A sa temperature T_2 na temperaturu T_1 ,

t_{RC} – brzina hlađenja tačke C sa temperature T_2 na temperaturu T_1 .

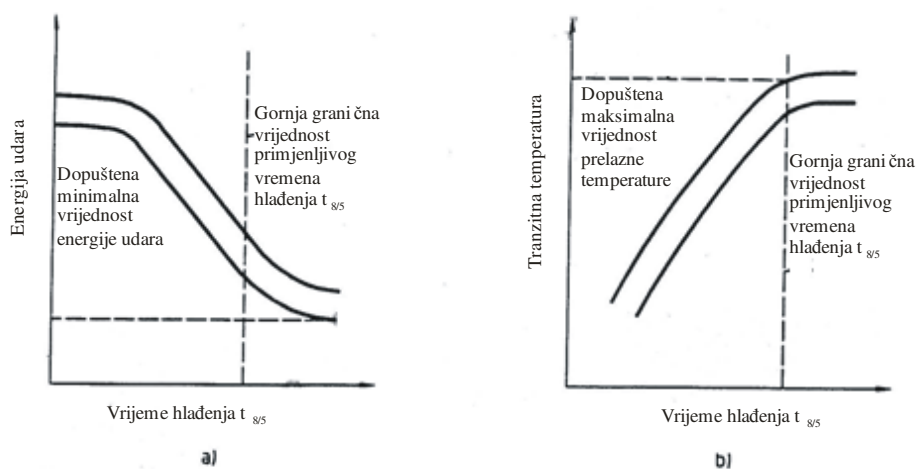
Karakteristični oblici termičkog ciklusa kod različitih postupaka zavarivanja za jednu tačku u zoni pod uticajem toplote dati su na slici I-5. Na oblik krivih termičkog ciklusa pored primijenjenog postupka zavarivanja utiču i parametri zavarivanja. Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ kod

ručnog elektrolučnog postupka zavarivanja, u odnosu na postupke zavarivanja pod praškom i troskom je najmanje, što pokazuje nagib krive na slici I-5.



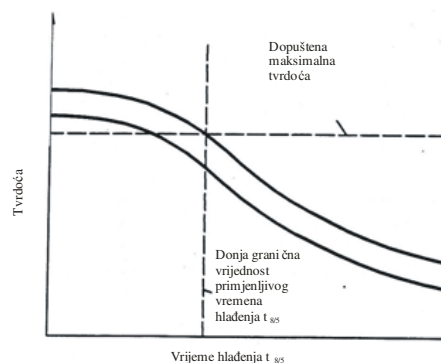
Slika I-5. Termički ciklus zavarivanja u zoni pod uticajem toplote [2]

Uticaj uslova zavarivanja na žilavost i prelaznu temperaturu u zoni pod uticajem toplote dat je na slici I-6. Povećanje vremena hlađenja $t_{8/5}$ vodi smanjenju energije udara (slika I-6.-a) i povećanju tranzitne temperature (slika I-6.-b) zone pod uticajem toplote. Step en pogoršanja žilavosti zavisi od hemijskog sastava i vrste čelika [6].



Slika I-6. Uticaj uslova zavarivanja na žilavost i prelaznu temperaturu u ZUT-u [6]

Promjena tvrdoće sa promjenom vremena hlađenja $t_{8/5}$ je data na slici I-7. Tvrdoća u zoni pod uticajem toplote opada sa povećanjem vremena hlađenja $t_{8/5}$.



Slika I-7 . Uticaj uslova zavarivanja na maksimalnu tvrdoću u ZUT-u [6]

Termički ciklus zavarivanja se može karakterisati parametarskom jednačinom:

$$P_a = \frac{1}{T_M} - \frac{R}{\Delta H} \ln \left(\frac{aQ}{\lambda(T_M - T_0)} \right)^{-1} \quad (2)$$

gdje je: T_M - maksimalna temperatura (K),
 T_0 - temperatura predgrijavanja (K),
 $a = 0,03$ za ugljenične čelike,
 λ - koeficijent toplotne provodnosti,
 Q - specifična toplota zavarivanja (kJ/cm),
 ΔH - energija aktivacije rasta γ -zrna, za konstrukcione ugljenične čelike iznosi 240,7 J/mol.

Količina toplote potrebna za izvođenje jedinice dužine zavara kod zavarivanja električnim lukom, data je izrazom [6]:

$$Q = \varepsilon \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v} \quad (\text{kJ/mm}) \quad (3)$$

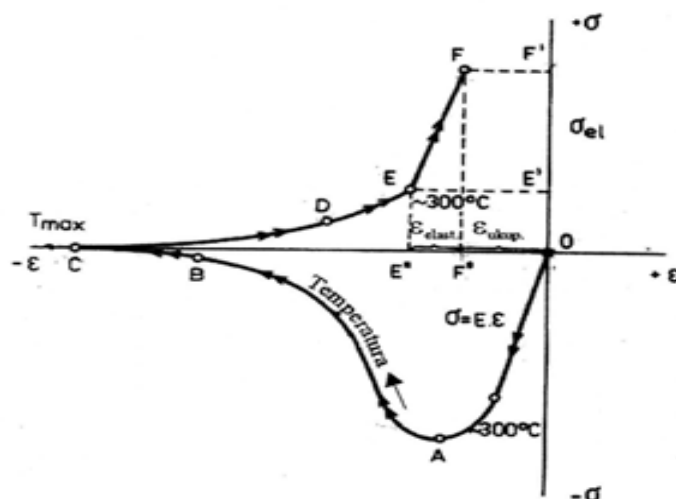
gdje je: U – napon zavarivanja (V),
 I – struja zavarivanja (A),
 v – brzina zavarivanja (mm/s),
 ε - toplotna efikasnost postupka zavarivanja za: REL postupak $\varepsilon = 0,85$;
MAG postupak $\varepsilon = 0,85$.

1.5 Deformacioni (naponski) ciklus zavarivanja

U toku zavarivanja dolazi do neravnomjernog zagrijavanja ili hlađenja zavarivanih metalnih dijelova, što dovodi do prelaznih i promjenljivih naprezanja koja mogu uzrokovati deformaciju zavarenog spoja.

Deformacioni ciklus zavarivanja je posljedica djelovanja termičkog ciklusa. U oblasti zavarenog spoja, a zbog ometane dilatacije (širenja) dolazi do pojave napona. Širenje u zoni pod uticajem toplote pod dejstvom termičkog ciklusa se može realizovati u ograničenoj mjeri jer ga sprječava hladni osnovni materijal.

Idealizirana zavisnost σ - ε (napon - jedinična deformacija) za zonu pod uticajem toplote sučeono zavarenog spoja data je na slici I-8.



Slika I- 8. Idealizirana zavisnost σ - ϵ za zonu pod uticajem toplote sučeono zavarenog spoja [2]

Analiza dijagrama datog na slici I-8. pokazuje:

- polazna tačka je O i predstavlja sobnu temperaturu,
- porastom temperature indukuje se napon na pritisak, dio krive O-A. Zavisnost σ - ϵ je linearna sve do 300-400 °C i vrijedi Hook-ov zakon,
- daljim rastom temperature oko 500°C dolazi do pada čvrstoće (granica pritiska je jako mala) i relativno manji priraštaj napona izaziva veću deformaciju pri pritisku,
- pri temperaturi 600-700 °C, čvrstoća metala je tako mala da i veoma mali naponi na pritisak uzrokuju veću deformaciju pri pritisku, dio krive B-C,
- u tački C je maksimalna temperatura i deformacija pri pritisku je maksimalna.

Hlađenjem, odnosno smanjenjem temperature dolazi do skupljanja koje se ne može realizovati, pa nastaju naponi zatezanja.

- pri visokim temperaturama, dovoljno mali napon na zatezanje izaziva velike deformacije pri zatezanju, dio krive C-D,
- padom temperature do 300 °C čvrstoća (granica tečenja) je tako velika da ponovo vrijedi Hook-ov zakon, zavisnost σ - ϵ je linearna, dio krive E-F, dok je dio krive DE nelinearan,
- daljim hlađenjem, odnosno završetkom termičkog ciklusa (tačka F) karakteristično je prisustvo zaostalih naprežanja na zatezanje σ_{ZV} i zaostala deformacija ϵ_{ZV} . Ukupna deformacija uzorka je data deformacijom pri pritisku dio O-C i deformacijom pri zatezanju dio C-F'.

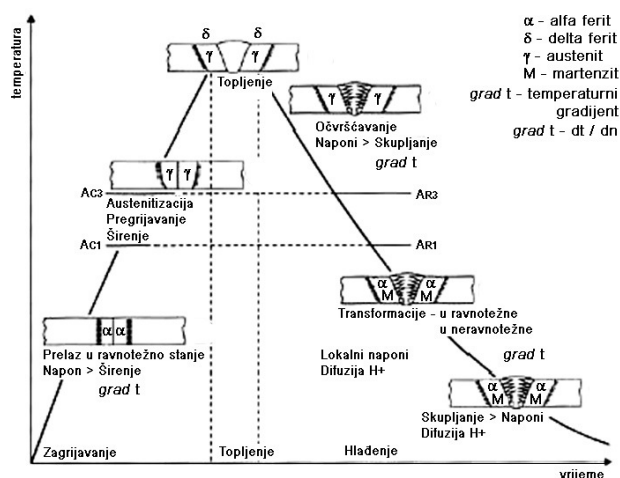
Konačna deformacija je dio OF', što predstavlja samo dio ukupne deformacije. Elastično naprežanje E'F' se oslobodi odstranjivanjem čvrstih ukrućenja krajeva epruvete, elastična deformacija ϵ_{el} se na taj način smanji ili poveća naprežanje, dio OE' ostaje djelovati i po oslobađanju čvrsto ukrućenih krajeva.

Znači, zaostali naponi nakon zavarivanja se sastoje od elastične i neelastične komponente. Neelastična komponenta se može odstraniti žarenjem [2].

Obzirom na anizotropnost čelika kao materijala, (osobina nekih tijela da u raznim smjerovima imaju različite osobine), širenje deformacionog ciklusa nije homogeno tako da u metalu postoje mikro područja sa različitim deformacionim ciklusima. Deformacioni ciklus u svakoj tački zavarenog spoja je drugačiji. Posljedice termo-deformacionog ciklusa se mijenjaju i

ogledaju kroz pojavu općih deformacija, zaostalih napona, nastanka grešaka i hladnih pukotina. U zavarenom spoju se mogu pojaviti pukotine kao posljedica prevelike lokalne koncentracije napona, jer je iscrpljena deformaciona sposobnost oblasti zavarenog spoja. Posljedica strukturnih transformacija u čeliku je dilatacija – širenje, koja ima značajan uticaj na nivo zaostalih napona. Tok strukturnih transformacija pri hlađenju zavisi od niza faktora kao što su maksimalna temperatura austenitizacije, veličina zrna, vrijeme hlađenja $t_{8/5}$. Naponi nastali uslijed strukturnih transformacija se superponiraju sa termičkim naponima stvarajući određeno naponsko stanje koje uslovljava pojavu deformacija u zoni zavarenog spoja.

Promjene koje se javljaju prilikom spajanja zavarivanjem uslijed djelovanja zavarivačkih termo-deformacionih ciklusa predstavljene su šematski na slici I-9. Razlikuju se tri perioda: zagrijavanje, topljenje i hlađenje.



Slika I- 9. Shematski prikaz hronologije promjena izazvanih zavarivačkim ciklusom [3]

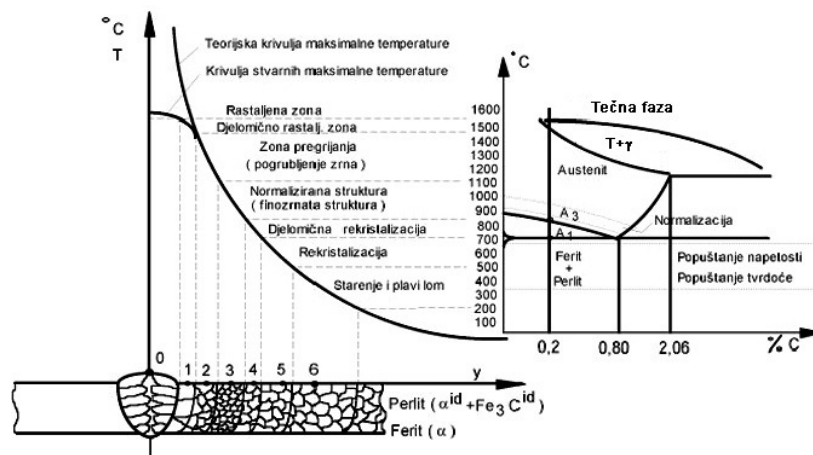
1.6 Strukturne transformacije pri zavarivanju

Strukturne transformacije pri zavarivanju imaju odlučujući uticaj na mehaničke osobine materijala šava i zone pod uticajem toplote. Ove transformacije u materijalu se javljaju zbog termičkog i deformacionog ciklusa u zavarenom spoju. Prema Seferijanu, strukturne transformacije pri zavarivanju zavise od:

- hemijskog sastava materijala,
- veličine austenitnog zrna iz kojeg se obrazuju sekundarne strukture (pregrijavanje),
- brzine hlađenja austenita.

Pri djelovanju termičkih ciklusa zavarivanja, porastom sadržaja legirajućih elemenata raste sklonost ka pojavi neravnotežnih struktura tipa bainita i martenzita što može dovesti do transformacionog očvršćavanja, smanjenja žilavosti i povećanja tranzitne temperature, što su negativne posljedice djelovanja zavarivačkih ciklusa na strukturne transformacije.

Kriva raspodjele temperature poprečno na pravac zagrijavanja u kombinaciji sa Fe-Fe₃C dijagramom pokazuje strukturne promjene u valjanom čeliku pri zagrijavanju i hlađenju tokom zavarivanja, slika I-10. [7].



Slika I-10. Pogodinov dijagram - strukture u valjanom čeliku pri zagrijavanju i hlađenju tokom zavarivanja [7]

Prilikom zavarivanja, osnovni materijal sa polimorfnom transformacijom, kakav je čelik, ima slijedeće zone:

- 1 **rastaljena i djelimično rastaljena zona**, nastaju u oblasti između solidus i likvidus linije (iznad 1400 °C) i odlikuje se usmjerenim kristalnim zrnima, u pravcu najbržeg odvođenja toplote;
- 2 **zona pregrijanja – pogrubljenja zrna**, nastaje u temperaturnom intervalu 1100 °C do 1400 °C, u oblasti krupnozrnog austenita i ima nehomogenu raspodjelu ugljika, tako da u oblastima siromašnim ugljikom postoje uslovi za nastanak krupnoigličaste feritne faze (Widmanštetenova struktura), dok u oblastima bogatim ugljikom može da nastane martenzit; usljed pregrijavanja austenitna zrna mogu jako porasti što može dovesti do sniženja žilavosti i plastičnosti;
- 3 **zona normalizacije – finozrnata struktura**, nastaje u intervalu od oko 850 °C do 1100 °C u oblasti usitnjavanja austenitnog zrna pod uslovima koji odgovaraju istoimenoj termičkoj obradi;
- 4 **zona rekristalizacije**, nastaje ispod 850 °C u oblasti polazne feritno-perlitne strukture, odlikuje se feritom krupnijeg zrna i perlitom sitnijeg zrna;
- 5 **osnovni materijal** – feritno perlitna mikrostruktura.

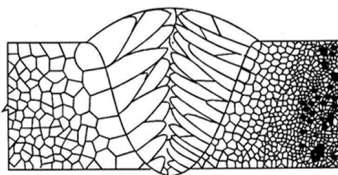
Ogrubljenje zrna se javlja na mjestima gdje najviša temperatura termičkog ciklusa zavarivanja prelazi vrijednost temperature ogrubljenja zrna. U ovoj zoni nastaju austenitna zrna i rastu relativno sporo, ali iznad određene tačke (temperatura ogrubljenja zrna) stopa rasta se naglo povećava. Ispod ove temperature termički ciklus će dovesti do stvaranja sitnijeg zrna u odnosu na osnovni materijal. Mikrostruktura grubozrnatog dijela je karakteristična po rastu austenitnog zrna i promjeni pod strukture unutar zrna.

Veličina zrna je, pak određena sa dva faktora: prirodom termičkog ciklusa zavarivanja i temperaturom ogrubljenja zrna u čeliku. Veći unos toplote i duže vrijeme držanja iznad temperature ogrubljenja zrna dovodi do grubljeg zrna [8].

Neravnotežne strukture u zoni pod uticajem toplote dovode do stvaranja unutrašnjih napona koji ne mogu biti kompenzirani plastičnom deformacijom samog materijala što može izazvati lom. Pravilan izbor parametara zavarivanja – odgovarajući dodatni materijal, predgrijavanje i brzina hlađenja su osnovno sredstvo za izbjegavanje nepovoljnih struktura.

Uticaj veličine zrna osnovnog materijala na primarnu kristalizaciju čelika dat je na slici I-11. Grubozrnata struktura osnovnog materijala će za posljedicu imati grublje zrno u zoni pod

uticajem toplote, dok će sitnozrnata struktura osnovnog materijala u zoni pod uticajem toplote generirati strukturu sa sitnijim zrnom.



Slika I-11. Uticaj veličine zrna osnovnog materijala na primarnu kristalizaciju [3]

2. ZONA POD UTICAJEM TOPLOTE

U zoni pod uticajem toplote (ZUT), odnosno dijelu osnovnog materijala čija je mikrostruktura pod uticajem toplote za vrijeme izrade zavarenog spoja, kod polimorfnih materijala, kakav je čelik, dolazi do značajnih strukturnih promjena koje imaju uticaj na osobine zavarenog spoja.

Strukturne promjene osnovnog materijala, a time i osobina uzrokuje termički ciklus zavarivanja. Zona pod uticajem toplote se može podijeliti na više područja. U svakom je mikrostruktura zavisna od dostignute maksimalne temperature termičkog ciklusa i od brzine hlađenja.

U čeliku sa polaznom feritno-perlitnom mikrostrukturom, zona pod uticajem toplote obzirom na karakteristične temperature se dijeli na:

- a) zona zagrijana ispod temperature A_1 ,
- b) zona zagrijana na temperaturu A_1 do A_3 – u zoni zagrijanoj iznad temperature A_1 počinje rastvaranje perlita (eutektoid). Kod eutektoidne temperature bi se cijela količina perlita trebala transformisati u austenit eutektoidne koncentracije. Obzirom da se ta promjena obavlja sa nukleacijom i rastom, to je za ovu promjenu potrebno izvjesno vrijeme. Zbog ovoga se, za vrijeme zavarivanja temperature transformacije A_1 i A_3 pomjeraju ka višim vrijednostima od ravnotežnih. Ovo pomjeranje je tim veće ako je veća brzina zagrijavanja. Na temperaturama iznad A_1 okolni ferit ostaje nepromijenjen. Iz austenita eutektoidne koncentracije, dolazi do difuzije ugljika u okolni ferit, prvenstveno po granicama zrna i subzrna. Difuzijom ugljika kroz granice zrna i subzrna, dolazi do drobljenja feritnih zrna, što ima za posljedicu usitnjenje zrna,
- c) zona zagrijana na temperaturu iznad A_3 ,
- d) prelazni dio zone pod uticajem toplote koji je zagrijan iznad kritične temperature rasta zrna [2].

Kvalitet zavarenog spoja zavisi od mehaničkih osobina i naponskog stanja zavara i zone pod uticajem toplote, a mehaničke osobine i naponsko stanje zavara zavise od metalografske strukture spoja. Zbog različitog rasporeda temperatura u zoni pod uticajem toplote, sve tačke u ZUT-u neće imati isti termički ciklus, ali se javljaju pojasevi oko zavara sa istim temperaturnim ciklusom. Ovi pojasevi u zoni pod uticajem toplote imaju izmijenjen hemijski sastav, kristalnu građu a time i fizičke osobine u odnosu na osnovni materijal.

Mikrostrukturne promjene u ZUT-u zavise od hemijskog sastava čelika, polazne mikrostrukture, visine temperaturnog uticaja i brzine hlađenja.

Pri zavarivanju čelika iz osnovnih struktura ferita, perlita i austenita, nastaje niz međustruktura i hemijskih spojeva što zavisi kako od hemijskog sastava osnovnog materijala tako i od režima zavarivanja.

U toku zavarivanja se uslijed termičkog ciklusa, u svakoj tački osnovnog materijala stvara prividno stacionarno stanje. Ovo stanje određeno je maksimalnom temperaturom $T_{\max}$ i brzinom hlađenja v_h . Maksimalna temperatura i brzina hlađenja pri zavarivanju su različite za pojedine tačke zavarenog spoja, što za posljedicu ima različite strukturne zone.

Kod brzina hlađenja kakve su kod elektrolučnih postupaka zavarivanja, neće se odvijati suprotan proces difuzije ugljika iz austenita do bivšeg perlitnog zrna, što za posljedicu ima pojavu strukture u vidu rozeta, a ne trakastu feritno-perlitnu mikrostrukturu kao što je bilo na početku zavarivanja. Kod većih brzina hlađenja bivše jezgro perlita se može zakaliti u martenzit eutektoidne koncentracije ili u međustrukturu (bainit).

Kod temperatura iznad A_3 nastaje potpuna polimorfna transformacija $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$. Za vrijeme zagrijavanja mikrostruktura te zone je čisto austenitna. U zavisnosti od brzine hlađenja, može nastati feritno-perlitna, bainitna, martenzitna mikrostruktura, kao i izmiješane mikrostrukture. Karakter strukture te zone je određen dijagramom raspada austenita i uslovima zavarivanja. Ovaj dijagram se razlikuje od dijagrama kontinuiranog raspada austenita, prije svega zbog toga što su strukturne promjene u području zavarenih spojeva karakterizirane prisustvom gradijenata, tako da temperaturni gradijent uzrokuje koncentracioni i deformacioni gradijent.

U ZUT-u se pored austenitizacije odvija i rast zrna. Kritična temperatura rasta zrna kod konstrukcionih čelika je oko 1050 °C. Mjera rasta zrna zavisi od hemijskog sastava čelika i intenziteta toplotnog uticaja, odnosno od specifične toplote pri zavarivanju [2].

Različiti postupci zavarivanja daju i različit stepen ogrubljenja zrna: relativno mali porast zrna u ZUT-u je kod REL postupka, dok je kod EPP postupka rast zrna znatno izraženiji, a kod elektro zavarivanja pod rastopljenom troskom, apsolutna veličina zrna može porasti i do nekoliko milimetara. Rast zrna kod svih postupaka zavarivanja, svih metala i legura je najveći problem zavarivosti. Posljedice grubog primarnog zrna su:

1. pogoršana plastičnost zone pod uticajem toplote,
2. usporena kinetika raspada austenita, jer se preferira izlučivanje ferita u cijepanim ravninama austenita, nastanak Widmanstättenove mikrostrukture,
3. povećanje sklonosti ka likvacijom, hladnim pukotinama i nastanak pukotina kod termičke obrade.

Nakon potpune transformacije $\alpha \rightarrow \gamma$ zrna nisu u ravnoteži s obzirom na površinske napone granica zrna. Velika zrna „progutaju“ manja i dolazi do rasta zrna.

U mikrostrukтури zone pod uticajem toplote mogu se javiti i faze kao što je zaostali austenit. Zaostali austenit se može stabilizirati ako u njega difundira ugljik. Ova pojava nastaje kod visokih temperatura predgrijavanja ili kod visokih međuslojnih temperatura [2].

Dijagram raspada austenita za uslove zavarivanja omogućava prognoziranje mikrostrukture u zoni pod uticajem toplote. Određivanjem graničnih uslova kod kojih nastaje čista martenzitna, feritno-bainitna ili feritno-perlitna mikrostruktura, moguće je optimizirati proces zavarivanja. Hemijski sastav čelika se u tom slučaju izražava ekvivalentom ugljika CE.

Parametarske jednačine, koje sa većom ili manjom tačnošću na osnovu hemijskog sastava daju osnovne podatke o parametrima raspada austenita date su u tabeli I-1. [2].

Tabela I-1. Parametarske jednačine

Parametar	Parametarska jednačina	
Temperatura početka formiranja martenzita (°C)	$M_s = 539 - 42,3C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 7,5Mo$ (4)	
	$M_s = 530 - 415C + 90C^2 - 35Mn - 20Ni - 30Cr - 10Mo - 15W$ (5)	
	$M_s = 500 - 300C - 35Mn - 15Ni - 20Cr - 10Mo - 10Si$ (6)	
Temperatura završetka formiranja martenzita (°C)	$M_f = 346 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo$ (7)	
Temperatura početka formiranja bainita (°C)	$B_s = 830 - 270C - 90Mn - 70Cr - 83Mo$ (8)	
Kritično vrijeme hlađenja između temperatura A_{c3} i $500^\circ C$, t_B za početak bainitne transformacije	$\log t_B = 5,81CE_B - 1,13$ (9)	$CE_B = C + \frac{Si}{16} + \frac{Mn}{19} + \frac{Ni}{48} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{7} + \frac{V}{28}$
Kritično vrijeme hlađenja između temperatura A_{c3} i $500^\circ C$, t_F za početak izlučivanja ferita	$\log t_F = 5,80CE_F - 0,83$ (10)	$CE_F = C + \frac{Si}{291} + \frac{Mn}{14} + \frac{Ni}{67} + \frac{Cr}{16} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{425}$
Kritično vrijeme hlađenja između temperatura A_{c3} i $500^\circ C$, t_P za početak izlučivanja perlita	$\log t_P = 5,14CE_P + 0,06$ (11)	$CE_P = C + \frac{Si}{17} + \frac{Mn}{19} + \frac{Ni}{25} + \frac{Cr}{16} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{3}$

Za prevođenje parametra vremena hlađenja između A_{c3} i $500^\circ C$ u parametar vremena hlađenja $t_{8/5}$, koje se danas najčešće koristi kao funkcija energije zavarivanja, Beckert i Herold su ustanovili nomogram za oba parametra [2].

Karakter toplotnog toka pri zavarivanju čelika određuje prirodu termičkog ciklusa zavarivanja i mikrostrukturu metala zavara i zone pod uticajem toplote.

Mnogi autori su se bavili istraživanjem rasta zrna u zoni pod uticajem toplote, među kojima su Easterling, Ikawa, Bourges, Maynier, Blondeau. Bourges, Maynier i Blondeau za kontrolirani rast austenitnih zrna koriste parametar P_a [2].

$$P_a = \left(\frac{1}{T} - \frac{R}{\Delta H} \ln \frac{t}{t_0} \right)^{-1} \quad (12)$$

gdje je T - temperatura (K),

R - plinska konstanta,

ΔH - energija aktivacije rasta γ - zrna.

U zoni rasta zrna, konačna veličina zrna zavisi uglavnom od maksimalne temperature kojoj je izložen zavareni spoj, te vremena zagrijavanja i hlađenja (vremena držanja). Srednja veličina zrna d_t za čelik, za izotermalno zagrijavanje je [8]:

$$d_t^n = kt + d_0^n \quad (13)$$

gdje je k – konstanta,
 t – vrijeme,
 d_0 – polazna veličina zrna.

Konačna veličina zrna će rasti sa porastom maksimalne temperature i porastom vremena držanja.

2.1 Precipitacioni procesi u zoni pod uticajem toplote

Značajne promjene u zoni pod uticajem toplote kod zavarivanja čelika su promjene u precipitaciji karbida, nitrida i karbonitrída. U čeliku su prisutni legirajući elementi koji imaju velik afinitet prema ugljiku ili dušiku i sa njima stvaraju karbide, nitride ili karbonitride.

Karbid željeza - cementit, u Fe-C dijagramu prema temperaturnom području nastanka može biti:

- primarni – izlučuju se direktno iz taline, iznad eutektičke temperature, duž linije CD,
- sekundarni – izlučuje se iz austenita kod nadeutektoidnih čelika, u intervalu između eutektoidne i eutektičke temperature, duž linije ES,
- tercijalni – izlučuje se iz ferita kod podeutektoidnih čelika, pri temperaturi ispod A_1 , duž linije PQ,
- ledeburitski – kao dio eutektika u intervalu između eutektoidne i eutektičke temperature,
- perlitni, kao dio perlita [2].

Kod čelika legiranih molibdenom, pored karbida željeza, može precipitirati karbid Mo_2C , dok krom kao legirajući elemenat stvara nekoliko tipova precipitata:

- rastvoriv je u cementitu – M_3C ,
- kubični karbid $Cr_{23}C_6$,
- heksagonalni karbid Cr_7C_3 ,
- ortorombski karbid Cr_3C_2 ,
- nitridi Cr_2N [2].

Karbid kroma $Cr_{23}C_6$ može rastvoriti volfram, željezo, molibden i mangan i tvoriti kompleksni karbid $M_{23}C_6$. Ovaj karbid se izlučuje po granicama primarnih austenitnih zrna.

Legirajući elementi krom i molibden povećavaju zakaljivost čelika i čvrstoću pri višim temperaturama. Krom povećava i korozionu otpornost čelika, zbog visokog afiniteta kroma prema kisiku i stvaranja zaštitnog filma na površini čelika [2].

Legirajući elementi Mo, Cr, Mn, Si otežavaju difuziju ugljika u austenitu, čime se transformacija $\alpha \rightarrow \gamma$ pomjera ka dužim vremenima i na taj način smanjuje kritična brzina hlađenja. Krom i molibden proširuju područje bainita, čime se uz visoku čvrstoću zadržava visoka žilavost. Krom je karbidotvorni element i pri laganom hlađenju dolazi do izlučivanja karbida [3].

U zoni pod uticajem toplote, kod viših temperatura termičkog ciklusa može nastati ogrubljenje (koagulacija) precipitata, a zatim njihovo rastvaranje. Ovi procesi su kontrolirani difuzijom, zbog čega su vremenski i temperaturno ovisni.

Nitridi željeza se mogu izlučivati pri temperaturama ispod A_1 . Precipitacija nitrda željeza $Fe_{16}N_2$ pri sobnoj temperaturi je poznata kao starenje čelika (slika I-10.). Prije više od 50 godina, pojava starenja kod konstrukcionih čelika je bila jedan od limitirajućih faktora zavarivosti. Maksimalna rastvorivost dušika je pri temperaturi $590^{\circ}C$ i iznosi 0,1%, dok je maksimalna rastvorivost ugljika na eutektoidnoj temperaturi $723^{\circ}C$ i iznosi 0,8% [2].

U zoni pod uticajem toplote, kao posljedica promjene temperature - toplotnih uticaja pri zavarivanju i naknadno brzo hlađenje, može nastati prezasićeni čvrsti rastvor dušika (i ugljika) u α_{Fe} , nakon čega slijedi precipitacija koherentnog nitrda $\alpha'' - Fe_{16}N_2$, koji uzrokuje starenje konstrukcionog čelika. Kao posljedica starenja je pad osobina plastičnosti i čelik postaje krt.

Povećanje gustoće dislokacija u zoni pod uticajem toplote ima karakter deformacionog starenja. Pri deformacionom starenju dolazi:

- u prvom stadiju do segregacija atoma dušika po dislokacijama, čime se koči pokretljivost dislokacija,
- u drugom stadiju do precipitacije nitrda $\alpha'' - Fe_{16}N_2$ po dislokacijama,
- u trećem stadiju do precipitacije u cijelom obimu [2].

Kroz razvoj novih metalurških postupaka u proizvodnji čelika, vezivanjem dušika za stabilnu fazu nitrda (npr. AlN) smanjila se sklonost konstrukcionih čelika prema starenju čime se povećala sposobnost zavarivanja ovih čelika.

Precipitacija u zavarenim spojevima ima dvojak uticaj:

- povoljan uticaj koji se ogleda kroz vezivanje intersticijalnog dušika, jer većina precipitata nisu čisti karbidi već karbonitridi. Vezivanjem dušika u stabilnu karbonitridnu fazu smanjuje se sklonost čelika ka starenju,
- nepovoljan uticaj koji se ogleda kroz povećanje čvrstoće čelika, odnosno zone metala zavara. Naime, metal zavara je, nasuprot osnovnom materijalu, transformaciono ojačan. Precipitacionim ojačavanjem, koje spada u krte mehanizme ojačavanja, istovremeno dolazi do pada žilavosti metala zavara.

2.2 Osobine zone pod uticajem toplote

Strukturne promjene u zoni pod uticajem toplote imaju uticaj na njene mehaničke i fizikalne osobine. Uslijed termo-deformacionog ciklusa u toku zavarivanja dolazi do pada čvrstoće zone pod uticajem toplote, odnosno omekšanje u zoni zagrijavanja ispod (ali i iznad) temperature A_1 , što je u vezi sa većim popuštanjem mikrostrukture i rekristalizacijom. U ovim slučajevima se mora ograničiti korištena toplotna energija u cilju smanjenja širine omekšane zone.

U dijelu zone pod uticajem toplote sa temperaturama iznad A_3 odvijaju se dva oprečna procesa, odnosno dolazi do:

- a) ogrubljenja austenitnih zrna, što vodi padu čvrstoće i
- b) transformacionog ojačanja u vidu strukturnih promjena usmjerenih nastajanju bainitno-martenzitnih struktura, što vodi povećanju čvrstoće.

Transformaciono ojačanje znatno nadmašuje omekšanje prouzrokovano rastom zrna [2].

Parametri koji daju najbolju ocjenu kontinuiteta osobina između osnovnog materijala i metala zavara su ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture po presjeku zavarenog spoja. Ispitivanjem udarnog rada loma, odnosno žilavosti zavarenog spoja određuje se njegova sklonost ka krtom lomu.

2.2.1 Tvrdća zone pod uticajem toplote

Jedna od najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja zavarenog spoja je ispitivanje tvrdoće, koja najbrže daje informacije o promjenama nastalim u zoni pod uticajem toplote uslijed termičkog ciklusa zavarivanja.

Tvrdoća je otpornost ispitivanog materijala prema prodiranju u njega drugog znatno tvrdjeg tijela [16]. Kao ispitna metoda, tvrdoća omogućava utvrđivanje mehaničkih osobina u veoma malim razmacima.

Maksimalna tvrdoća zavisi od: hemijskog sastava, korištene toplotne energije zavarivanja (koja utiče na vrijeme hlađenja $t_{8/5}$). U zoni A₁ može doći do blagog omekšavanja, mada ne mora uvijek biti takav tok tvrdoće, kao na primjer kod čelika koji su manje osjetljivi na termički ciklus zavarivanja [2].

Ito i saradnici su za niskolegirane čelike uveli indeks ojačavanja D_{IB} kao mjeru povećanja čvrstoće zone pod uticajem toplote u odnosu na osnovni materijal. Indeks ojačavanja D_{IB} se računa iz hemijskog sastava kako slijedi [2, 9]:

$$D_{IB} = (0,5 - \sqrt{C}) \times (1 + 0,64Si) \times (1 + 4,10Mn) \times (1 + 2,85P) \times (1 - 0,62S) \times (1 + 2,33Cr) \times (1 + 0,25Ni) \times (1 + 3,14Mo) \times (1 + 0,27Cu) \times [1 + 1,5(0,9 - C)B] \quad (14)$$

Očekivana maksimalna tvrdoća za konstrukcione čelike u zavisnosti od hemijskog sastava [2, 10]:

$$HV_{max} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr \quad (15)$$

ili prema Dearden-u [2, 11]:

$$HV_{max} = 1200 \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} \right) - 200 \quad (16)$$

Veliki broj istraživača, među kojima su Düren, Harrison, Hart, Yurioka, Terasaki je radio na izračunavanju tvrdoće u zavisnosti od vremena hlađenja $t_{8/5}$.

Prema Dürenu, tvrdoća zone pod uticajem toplote se računa iz jednačine [2, 12]:

$$HV = 2019 [C(1 - 0,5 \log t_{8/5}) + 0,3(CE_B - C)] + 66(1 - 0,8 \log t_{8/5}) \quad (17)$$

gdje je

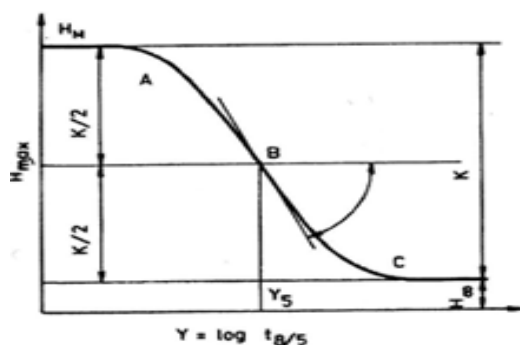
$$CE_B = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (18)$$

Sredinom XX vijeka je vrijedilo pravilo da je maksimalna dozvoljena tvrdoća zone pod uticajem toplote vrijednost od 350 HV, odnosno za niskolegirane čelike koji rade u području temperatura puzanja 400HV (ali ne više od 125HV iznad tvrdoće osnovnog materijala) [2].

Na osnovu rezultata regresione analize iz ispitivanja sklonosti za nastanak pukotina navarivanih proba i proba implant, prema kojima je još sigurna vrijednost tvrdoće (vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina), Hart i Harrison su izveli jednačinu [2, 13]:

$$HV = 283,3 + 668,1 \left(C + \frac{Mn}{42} + \frac{Mo}{24} + \frac{V}{4} \right) \quad (19)$$

Maksimalna vrijednost tvrdoće se dobije kod kratkih vremena hlađenja $t_{8/5}$ kod kojih se stvara čista martenzitna struktura (H_M), što je predstavljeno na slici I-12.



Slika I- 12. Shematski tok tvrdoće zone pod uticajem toplote u zavisnosti od vremena hlađenja [2]

Tvrdoća zone pod uticajem toplote je mjera zatezne čvrstoće čelika, i daje indicaciju stepena krtosti. Granične vrijednosti tvrdoće preko 350 HV kod konstrukcionih i niskolegiranih čelika ukazuju na povećanu osjetljivost na prskanje. Tvrdoća zavisi od prokaljivosti čelika, brzine hlađenja i u manjoj mjeri od veličine primarnog austenitnog zrna.

Prokaljivost čelika je povezana sa ekvivalentom ugljika (CE). U literaturi se susreće veliki broj formula za izračunavanje ekvivalenta ugljika, prema Tanaki, Ito - Bessyo, Dueren itd [2]. U formuli za CE efekat otvrdnjavanja svakog legirajućeg elementa je poređen sa ugljikom, i sadržaj legirajućeg elementa je podijeljen sa faktorom koji daje ekvivalent ugljiku tog elementa.

Prema IIW (International Institute of Welding) obrazac za ekvivalent ugljika je [6]:

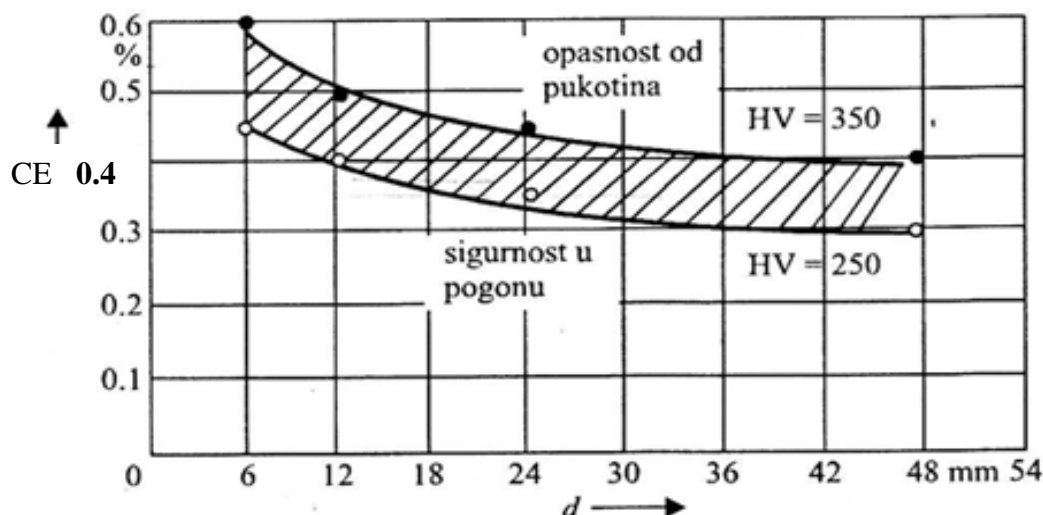
$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (20)$$

Formula CE (IIW), ima područje primjene samo u okviru graničnih vrijednosti sadržaja [6]:

$$< 0,5\%C; < 1,0\%Mn; < 1,0\%Cr; < 3,5\%Ni, < 0,6\%Mo.$$

Sklonost čelika prema nastanku tvrdih, transformacijom dobivenih struktura u zoni pod uticajem toplote je u vezi sa prokaljivošću, odnosno sadržajem ugljika i prisustvom legirajućih elemenata.

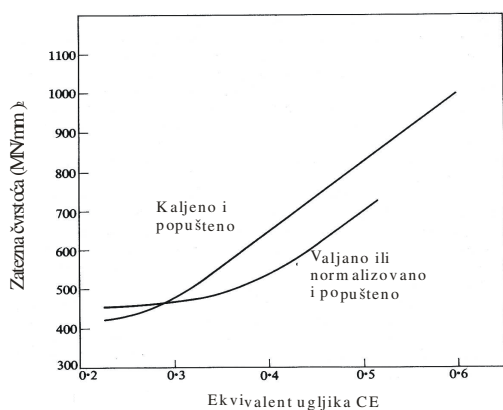
Zavisnost između ekvivalenta ugljika, debljine i tvrdoće u zoni pod uticajem toplote data je na slici I-13.



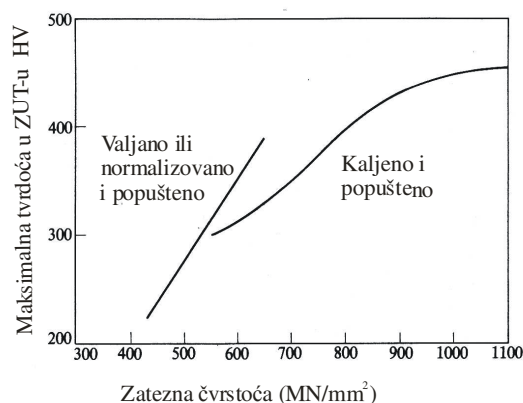
Slika I-13. Zavisnost tvrdoće od ugljikovog ekvivalenta i debljine materijala [3]

Prema slici I-13. za debljinu lima 10 mm vrijednost CE od 0,40 do 0,51 te vrijednost tvrdoće u intervalu HV 250 – 350, daje sigurnost u pogonu, dok veće vrijednosti CE povećavaju opasnost od pojave pukotina.

Korelacija između CE i zatezne čvrstoće data je na slici I-14., dok slika I-15. daje odgovarajuće vrijednosti tvrdoće u funkciji zatezne čvrstoće za normalizirane i poboljšane čelike. Krive pokazuju srednje vrijednosti i imaju prilično široku raspršenost. Korelacija na slici I-14. je dobra za nisko legirane čelike, dok nije primjenljiva za visoko legirane čelike [8]. Za vrijednosti ekvivalenta ugljika veće od 0,3%, čelici u kaljenom i popuštenom stanju imaju veću vrijednost zatezne čvrstoće u odnosu na valjane ili normalizovane i popuštene čelike. Za istu vrijednost tvrdoće u ZUT-u, valjani ili normalizovani i popušteni čelici imaju manju vrijednost zatezne čvrstoće u odnosu na čelike u kaljenom i popuštenom stanju.



Slika I-14. Korelacija između CE i zatezne čvrstoće za normalizirane i poboljšane čelike [8]



Slika I-15. Vrijednosti tvrdoće u funkciji zatezne čvrstoće za normalizirane i poboljšane čelike [8]

U literaturi se susreće više izraza za izračunavanje tvrdoće martenzita kod konstrukcionih čelika koji u obzir uzimaju samo sadržaj ugljika, a u tabeli I-2. su dati neki od njih [2, 14, 12, 15].

Tabela I-2. Izrazi za tvrdoću martenzita [2]

Autor/autori	Izraz za tvrdoću martenzita u zoni pod uticajem toplote
Satoh i Terasaki	$H_M=812x(\%C)+293$
Düren	$H_M=802 x(\%C)+305$
Yurioka	$H_M=884 x(\%C)+287$

2.2.2 Žilavost zone pod uticajem toplote

Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala na krti lom. Energija utrošena na lom epruvete (u J) je mjera žilavosti materijala, dok žilavost K predstavlja odnos između udarnog rada loma i površine lomnog presjeka epruvete [16].

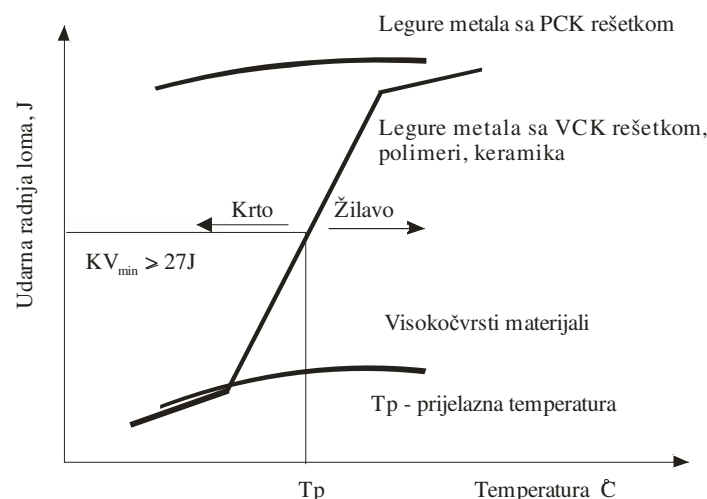
$$K = \frac{KV(i)KU}{S} \quad (J/cm^2) \quad (21)$$

gdje je KV – udarna radnja loma epruvete sa V zarezom (J) ili
 KU – udarna radnja loma epruvete sa U zarezom (J)
 S – površina lomnog presjeka epruvete (cm²).

Mikrostruktura utiče na žilavost čeličnih materijala. Naročito velik uticaj ima smanjenje veličine zrna, literaturni podaci pokazuju da smanjenje veličine zrna za jedan stepen po ASTM – skali snižava prelaznu temperaturu za 15°C [16].

Žilavost materijala, općenito opada sa snižavanjem temperature ispitivanja, slika I-16. Razlog za to je smanjenje plastičnosti, odnosno deformabilnosti materijala sa snižavanjem temperature. Kod vrlo žilavih materijala (austenitni čelici, Al, Cu i Ni) sa PCK rešetkom (površinski centriranom kubnom rešetkom) – krivulja-I, opadanje žilavosti je neznatno i postepeno. Ovi materijali su deformabilni u širokom temperaturnom intervalu. Visoko čvrsti materijali (visokočvrsti čelici) su krti, imaju malu žilavost i deformabilnost bez obzira na temperaturu ispitivanja (krivulja-II). Legure metala sa VCK rešetkom (volumno centriranom kubnom rešetkom) kakva je kod većine konstrukcionih čelika, imaju karakterističnu krivulju sa izraženom prelaznom temperaturom ispitivanja.

Prelazna temperatura krtosti je temperatura ispod koje čelik gubi osobine plastičnosti, odnosno čelik koji je inače duktilan ponaša se krto. Na slici I-16. prelazna temperatura T_p odvaja područje žilavog od područja krtog ponašanja materijala. Naime, iznad ove temperature materijal je žilav a ispod se očekuje krto ponašanje. Niža prelazna temperatura krtosti omogućava primjenu materijala u nepovoljnijim uslovima eksploatacije i na nižim temperaturama [16].



Slika I-16. Dijagram udarna radnja loma-temperatura [16]

Žilavost zone pod uticajem toplote zavisi od termičkog ciklusa, temperature ogrubljenja zrna, transformacionih karakteristika, sadržaja legirajućih elemenata i nemetalnih uključaka.

U zoni pod uticajem toplote deformacioni mehanizmi utiču na smanjenje plastičnosti. Jedan od mehanizama je starenje, koje za posledicu ima smanjenje žilavosti u zoni pod temperaturom A_1 . U zoni iznad temperature A_1 (A_1 - A_3) javlja se mehanizam segregacija nekih površinski aktivnih elemenata na granicama γ -zrna. Ovaj mehanizam se najčešće javlja kod višeslojnog zavarivanja, kod koga dolazi do višekratnog uticaja na tu zonu. Pad žilavosti koji se javlja u prelaznom dijelu zone pod uticajem toplote vezan je za ogrubljenje zrna (grubozrnati dio ZUT-a). Ovaj izraziti pad žilavosti povezan je sa nepovoljnom mikrostrukturom i označava se kao transformaciona krtost.

Izračunavanje indeksa žilavosti P_{BA} za mikrostrukturu donjeg bainita grubozrnatog dijela ZUT-a koristi se jednačina [2]:

$$P_{BA} = C - \frac{Cu}{6} - \frac{Ni}{5} - \frac{Mo}{11} + 4S \quad (22)$$

dok se izračunavanje indeksa žilavosti P_{BB} za feritno-perlitnu mikrostrukturu ili mikrostrukturu gornjeg bainita grubozrnatog dijela ZUT-a koristi jednačina [2]:

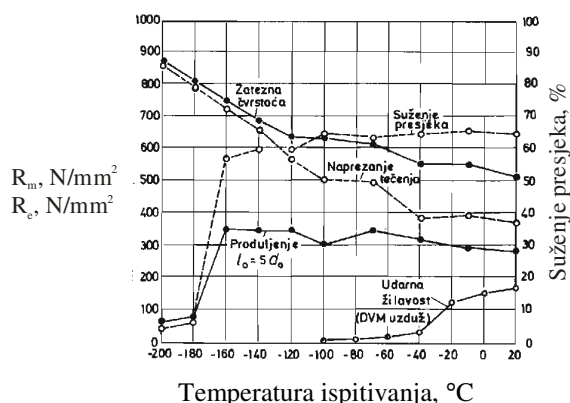
$$P_{BB} = C + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{6} + \frac{Cr}{12} + \frac{Mo}{13} - \frac{Ni}{50} \quad (23)$$

Istraživanja su vršena na čelicima sa hemijskim sastavom datim u tabeli I-3 [2]:

Tabela I-3: Hemijski sastav čelika na kojima su vršena ispitivanja

Sadržaj elementa, (%)									
%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%V
0,06-0,22	0,55-2,30	0,20-0,40	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	$\leq 0,30$	$\leq 2,5$	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	$\leq 0,1$

Svojstva žilavosti a time i osjetljivost prema krtom lomu su od posebnog značaja za primjenu konstrukcionih čelika. Slika I-17. pokazuje da se sa padom temperature žilavost neznatno mijenja, i da tek od određene temperature – temperature prelaza žilavosti naglo pada. Na niskim temperaturama, pri dostizanju određene visine naprezanja dolazi do promjene mehanizma loma. Na normalnim temperaturama lom nastaje tek nakon više ili manje jake deformacije, a na niskim temperaturama prekoračenje kritičnog naprezanja uzrokuje krti lom nakon vrlo malog plastičnog tečenja koje se odvija pretežno bez deformacije. Temperatura prelaza žilavosti je temperatura na kojoj se odvija prelaz od žilavog prema krtom lomu, pod jednakim uslovima naprezanja i uzima se kao mjerilo osjetljivosti prema krtom lomu [17].



Slika I-17. Promjene osobina konstrukcionih čelika sa smanjenjem temperature [17]

2.2.3 Mikrostruktura zone pod uticajem toplote

Ispitivanje mikrostrukture po presjeku zavarenog spoja je, zajedno sa ispitivanjem tvrdoće, najpodesnija metoda za ocjenu kontinuiteta osobina između osnovnog materijala i metala zavaru [18]. Neke osnovne karakteristike su:

- Mikrostruktura osnovnog materijala nelegiranih i niskolegiranih čelika je feritno-perlitna (slika I-18.a).
- U dijelu zone pod uticajem toplote zagrijanom na temperature dosta iznad A_{c3} , odvijaju se promjene mikrostrukture osnovnog materijala koje se dešavaju pod uticajem toplote termičkog ciklusa u toku zavarivanja, uz sam metal zavaru. Ove promjene uzrokuju ogrubljenje zrna osnovnog materijala na liniji stapanja sa metalom zavaru. Ovo je grubozrnata zona ili zona pregrijavanja. Uslijed intenzivnog odvođenja toplote u ovoj zoni se javljaju velike brzine hlađenja, strukturni preobražaj se odvija sa manjim stepenom difuzije, a ponekad difuzija izostane u potpunosti. Posljedica je nastajanje igličastih struktura koje su različite od struktura dobivenih pri normalnim brzinama hlađenja (ferit i perlit).

Ukoliko je odvođenje toplote jako intenzivno, znači da proces difuzije potpuno izostaje (bezdifuzioni preobražaj), dolazi do nastanka martenzita koji predstavlja prezasićeni rastvor ferita sa ugljikom (slika I-18.b).

U slučaju preobražaja sa malim stepenom difuzije nastaju međustrukture. Međustrukture koje se javljaju kod zavarenih spojeva u zoni pod uticajem toplote, odnosno njenom dijelu – u zoni pregrijavanja su:

- Widmanstättenska struktura, koja je po mehaničkim osobinama najbliža feritno-perlitnoj strukturi (slika I-18.c),

- grubi gornji i fini donji bainit koji su definisani kao ferit koji sadrži karbide (slika I-18.d i I-18.e).

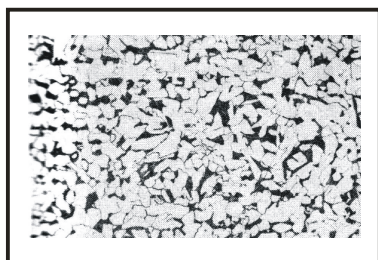
Pojava martenzita i grubog gornjeg bainita u zoni pregrijanja zone pod uticajem toplote je nepoželjna jer negativno utiče na kvalitet zavarenog spoja. Ovi mikrostrukturni konstituenti su krti i imaju štetne posljedice u pogledu žilavosti i dinamičke čvrstoće.

Ukoliko je primijenjeno predgrijavanje preobražaj se odvija sa manjim brzinama hlađenja, i uz viši stepen difuzije u zoni pregrijavanja javlja se grubo perlitno zrno uz prisustvo Widmanstättenске strukture.

Pomenuti preobražaji u zoni pregrijavanja (grubozrnata zona) mogu dovesti do povećanja tvrdoće u ovom dijelu zavarenog spoja.

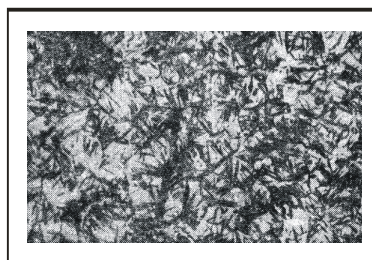
- U dijelu zone pod uticajem toplote sa temperaturama malo iznad A_{c3} - temperatura normalizacije, dio do grubozrnate zone, osnovni materijal se u toku zavarivanja zagrijava do temperature iznad A_{c3} – znači hlađenje je laganije i dobije se fina normalizovana struktura (slika I-18.f).
- U dijelu zone pod uticajem toplote sa temperaturama u intervalu A_{c1} - A_{c3} , dio do normalizovane zone, osnovni materijal se u toku zavarivanja zagrijava u temperaturnom intervalu A_{c1} - A_{c3} , znači hlađenje je još laganije i dobije se mekožarena struktura (slika I-18.g).

Daljim hlađenjem nema strukturnih promjena u osnovnom materijalu.



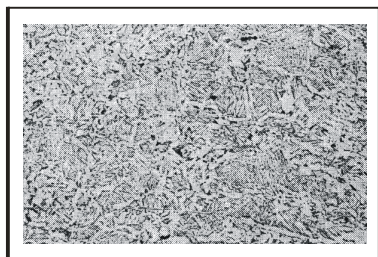
2% HNO₃ x 100

a) osnovni materijal -
ferritno-perlitna mikrostruktura



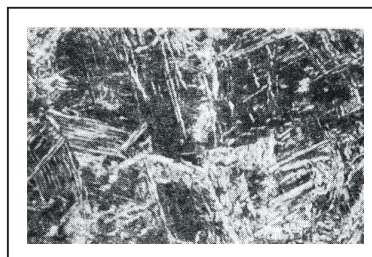
2% HNO₃ x 100

b) ZUT - grubozrnata -
martenzit u pregrijanoj zoni



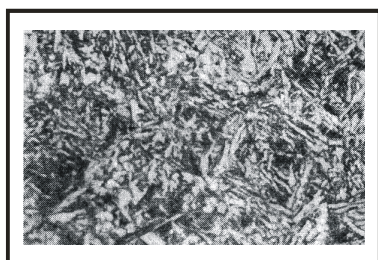
2% HNO₃ x 100

c) ZUT - grubozrnata - Widmanštetenska
struktura u pregrijanoj zoni



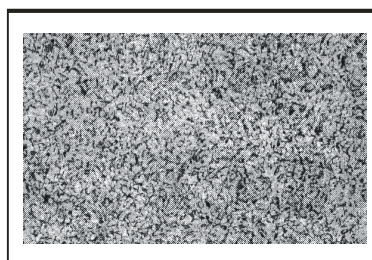
2% HNO₃ x 100

d) ZUT - grubozrnata - grubi
gornji beinit u pregrijanoj zoni



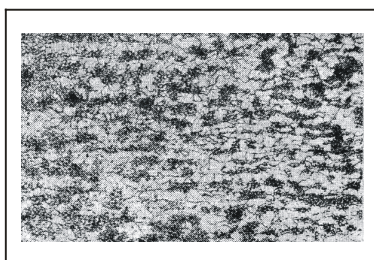
2% HNO₃ x 100

e) ZUT - grubozrnata - fini
donji beinit u pregrijanoj zoni



2% HNO₃ x 100

f) ZUT - normalizovana struktura



2% HNO₃ x 100

g) ZUT - mekožarena struktura

Slika I -18. Mikrostrukture dijelova zone pod uticajem toplote i osnovnog materijala [18]

II EKSPERIMENTALNI DIO

3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

3.1 Cilj istraživanja

Osnovni cilj ovog rada je istraživanje uticaja postupaka zavarivanja REL, MAG i TIG na fiziko-metalurške karakteristike čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5, praćenjem odnosa između parametara: jačine struje, napona i brzine zavarivanja kod navedenih postupaka sa dobivenim vrijednostima tvrdoće i udarnog rada loma (utrošene energije udara) u zoni pod uticajem toplote, kao i utvrđivanje korelacije između dobivenih fiziko-metalurških karakteristika i parametara zavarivanja za nelegirani čelik S355J2G3 i niskolegirane čelike 16Mo3 i 13CrMo4-5.

Istraživanje je izvršeno za svaki čelik – praćene su promjene fiziko-metalurških karakteristika materijala u zavisnosti od postupaka zavarivanja REL, MAG i TIG.

3.2 Plan eksperimenta

Istraživanja su izvedena na osnovu rezultata ispitivanja eksperimentalnih uzoraka zavarenih u firmi „METALNO“ d.o.o. Zenica.

Plan eksperimenta je obuhvatio tri veoma često korištena kvaliteta čelika S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 i tri postupka zavarivanja – REL, MAG i TIG čije se tehnologije najčešće primjenjuju u firmama koje se bave zavarivanjem konstrukcija, postrojenja koja rade na povišenim temperaturama i posudama pod pritiskom.

Program istraživanja obuhvata:

1. zavarivanje lima debljine 10mm od nelegiranog konstrukcionog čelika S355J2G3 postupcima: REL, MAG i TIG,
2. zavarivanje lima debljine 10mm od niskolegiranog čelika 16Mo3 postupcima: REL, MAG i TIG,
3. zavarivanje lima debljine 10mm od niskolegiranog čelika 13CrMo 4-5 postupcima: REL, MAG i TIG.

Slika II-1. pokazuje primjer ploča lima debljine 10mm od niskolegiranog čelika 16Mo3 koji su zavareni i na kojima su izvršena ispitivanja tvrdoće, udarnog rada loma mikrostrukture i veličine zrna.



Slika II-1. Primjer ploča lima od niskolegiranog čelika 16Mo3

Za svaki kvalitet čelika je od jedne table lima debljine 10mm, izrezano po šest ploča. Oznake uzoraka date su u tabeli II-1.

Tabela II-1. Oznake eksperimentalnih uzoraka

Čelik	Postupak	Oznaka uzorka
S355J2G3	REL	1.1
	MAG	1.2
	TIG	1.3
16Mo3	REL	2.1
	MAG	2.2
	TIG	2.3
13CrMo4-5	REL	3.1
	MAG	3.2
	TIG	3.3

3.3 Izrada eksperimentalnih uzoraka

Planom istraživanja izrađeni su eksperimentalni uzorci - zavarene probe od sva tri kvaliteta čelika primjenom REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja.

Na pločama lima debljine 10mm, izvršena je priprema V žlijeba. Na svim uzorcima zavarivanje je izvedeno jednim korjenskim i dva pokrovna sloja. Pregled primijenjenih postupaka, uređaja za zavarivanje, elektroda, pripreme međusloja, temperatura predgrijavanja i parametri zavarivanja dati su u tabeli II-2.

Slika II-2. pokazuje primjer zavarivanja ispitnih uzoraka MAG postupkom zavarivanja, provedeno u firmi „Metalno“ d.o.o. Zenica, dok je na slici II-3. predstavljen primjer zavarenih ploča MAG postupkom zavarivanja.



Slika II-2. Primjer zavarivanja ispitnih uzoraka MAG postupkom zavarivanja



Slika II-3. Primjer zavarenih ploča MAG postupkom zavarivanja

U toku izvođenja postupaka zavarivanja praćeni su parametri zavarivanja:

1. U - napon (V)
2. I - jačina struje (A)
3. v - brzina zavarivanja (m/min) kod MAG postupka.

Tabela II-2: Izrada eksperimentalnih uzoraka

Materijal	Postupak	Elektroda	Uređaj	Predgr. °C	Priprema međusl.	Broj slojeva	Parametri zavarivanja		
							Napon (V)	Jačina struje (A)	Brzina žice (m/min)
S355J2G3	REL	EVB 50 Bazična	Fronius	80-100	Četkanje	I	20-22	74-76	-
						II	21-23	81-83	-
						III	21-25	81-82	-
	MAG	VAC 60	Varstroj	80-100		I	20,9-21,5	106-120	3,0-4,0
						II	23,3-25,3	250-260	7,2-8,2
						III	26,0-26,6	250-260	7,2-8,2
	TIG	TIG Mo	Fronius	80-100		I	13,8-16,0	160-180	-
						II	14,7-15,5	180-217	-
						III	13,4-17,8	178-204	-
16Mo3	REL	EVB Mo Bazična	Fronius	130-150	Četkanje	I	21,0-23,0	80-83	-
						II	19,5-23,0	80-82	-
						III	21,5-25,0	81-83	-
	MAG	Bohler CrMo1Si	Varstroj	130-150		I	16,5-17,6	110-135	2,8-3,2
						II	26,0-27,0	230-245	6,8-7,8
						III	30,0-31,0	265-275	7,2-8,5
	TIG	TIG Mo	Fronius	130-150		I	19,0-20,0	160-180	-
						II	14,0-15,5	160-178	-
						III	17,0-20,0	195-200	-
13CrMo4-5	REL	EVB CrMo Bazična	Fronius	200-250	Četkanje	I	20,0-22,0	80-90	-
						II	21,0-24,0	86-90	-
						III	21,0-23,0	85-88	-
	MAG	Bohler CrMo1Si	Varstroj	200-250		I	18,4-18,7	105-115	3,0-4,0
						II	25,0-25,5	220-240	6,8-7,8
						III	27,0-27,5	250-265	7,2-8,5
	TIG	TG CrMo	Fronius	200-250		I	11,5-12,0	120-130	-
						II	12,5-13,0	135-140	-
						III	14,0-14,5	155-160	-

3.4 Ispitivanja eksperimentalnih uzoraka

Osobine zavarenog spoja ne smiju puno odstupati od osobina osnovnog materijala, i u tom pogledu izbor tehnologije i parametara zavarivanja trebaju biti izvedeni korektno.

3.4.1 Određivanje ekvivalenta ugljika

Za provođenje postupka zavarivanja, odnosno određivanje ekvivalenta ugljika potrebno je poznavanje hemijskog sastava materijala. Propisani hemijski sastav za čelike S355J2G3 (standard BAS EN 10025-2) [19], 16Mo3 i 13CrMo4-5 (BAS EN 10028-2) [20], hemijski sastav ispitivanih uzoraka i izračunati CE dati su u tabeli II-3.

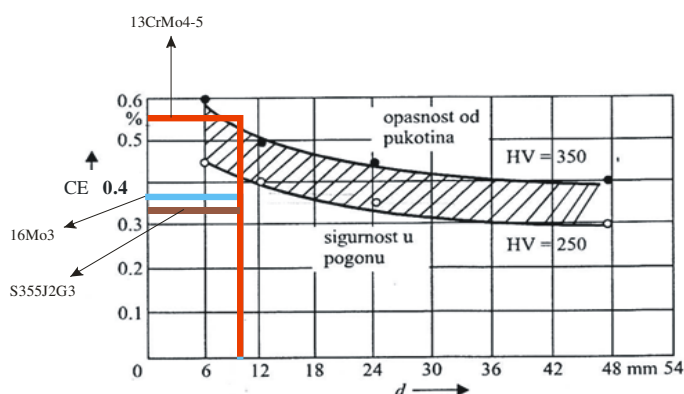
Tabela II-3. Hemijski sastav ispitivanih uzoraka i izračunati CE

Čelik / uzorak		Sadržaj elemenata, %										CE ¹⁾
Oznaka	WNo.	C	Si	Mn max	P max	S max	Cu max	N	Cr	Mo	Ni	
Propisani sastav S355J2G3 [19]	1.0577	0,23	0,60	1,70	0,035	0,035	0,60	-	-	-	-	0,45 ²⁾
1.1, 1.2, 1.3		0,17	0,08	1,02	0,011	0,007						0,34
Propisani sastav 16Mo3 [20]	1.5415	0,12 do 0,20	≤ 0,35	0,40 do 0,90	0,025	0,010	≤ 0,30	≤ 0,012	≤ 0,30	0,25 do 0,35	≤ 0,30	0,52
2.1, 2.2, 2.3		0,17	0,22	0,72	0,010	0,008	0,04	0,0056	0,09	0,28	0,05	0,37
Propisani sastav 13CrMo4-5 [20]	1.7335	0,08 do 0,18	≤ 0,35	0,40 do 1,00	0,025	0,010	≤ 0,30	≤ 0,012	0,70 do 1,15	0,40 do 0,60	-	0,57
3.1, 3.2, 3.3		0,17	0,30	0,56	0,010	0,005	0,20	0,0060	0,99	0,42	-	0,56

¹⁾ Prema IIW ekvivalent ugljika je izračunat po formuli (20)

²⁾ Maksimalna vrijednost za CE data je prema literaturi [19]

Prema literaturnim podacima, vrijednost ekvivalenta ugljika od 0,33% za čelik S355J2G3, odnosno 0,37% za čelik 16Mo3 daje sigurnost u pogonu, dok vrijednost ekvivalenta ugljika od 0,56% za čelik 13CrMo4-5 dovodi materijal u područje opasnosti od pojave pukotina što zahtjeva odgovarajuću temperaturu predgrijavanja. Pravilnim odabirom temperature predgrijavanja sprječava se nastanak hladnih pukotina u zavarenom spoju. Zavisnost tvrdoće od ekvivalenta ugljika i debljine materijala za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 data je na slici II-4.



Slika II-4. Zavisnost tvrdoće od ekvivalenta ugljika i debljine materijala za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5

Temperatura predgrijavanja prema metodi Seferijana [2] za ispitivane čelike data je u tabeli II-4.

Tabela II-4. Temperatura predgrijavanja

Čelik	Temperatura predgrijavanja prema Seferijanu*	Temperatura predgrijavanja (°C)
S355J2G3	$350\sqrt{0,33 \cdot (1 + 0,005 \cdot 10)} - 0,25$	108
16Mo3	$350\sqrt{0,37 \cdot (1 + 0,005 \cdot 10)} - 0,25$	130
13CrMo4-5	$350\sqrt{0,56 \cdot (1 + 0,005 \cdot 10)} - 0,25$	203

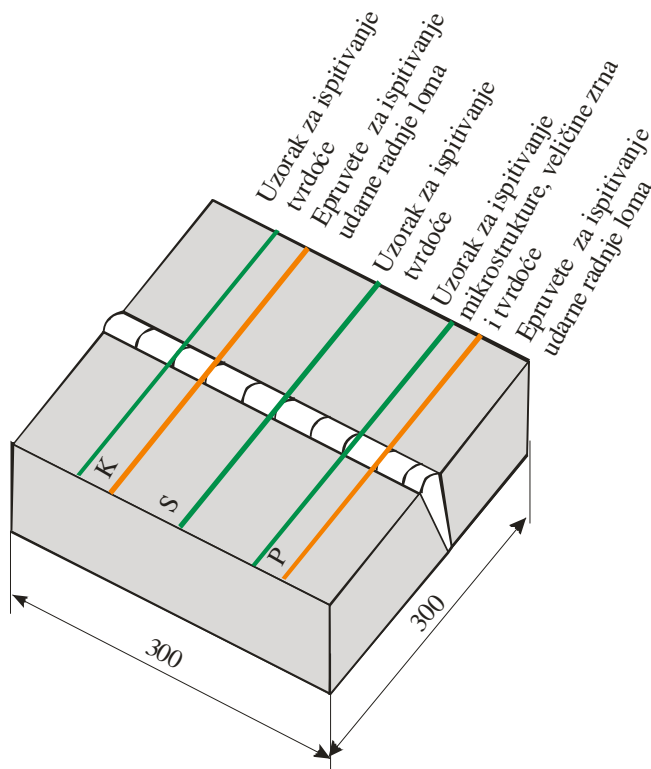
* Temperatura predgrijavanja prema Seferijanu po formuli (1)

Temperature predgrijavanja koje su primjenjene kod zavarivanja ispitnih uzoraka su u skladu sa proračunatim vrijednostima po formuli.

3.4.2 Uzorkovanje

Od svih zavarenih ploča, tri kvaliteta materijala po tri postupka zavarivanja, ukupno 9 ploča, izvršeno je uzorkovanje epruveta za ispitivanje udarne radnje loma i uzoraka za ispitivanje tvrdoće, mikrostrukture i veličine zrna. Shematski prikaz uzorkovanja dat je na slici II-5.

Uzorci za ispitivanje tvrdoće su uzeti prema standardu BAS EN 15614-1: 05 [21], i na tim uzorcima je izvršeno ispitivanje veličine zrna i mikrostrukture (oznaka P) dok su uzorci sa oznakama S i K korišteni za ispitivanje tvrdoće u cilju izračunavanja koeficijenta korelacije i ocjene regresione analize. Uzorci za ispitivanje udarne radnje loma (utrošene energije udara) sa oznakama P su uzeti prema standardu BAS EN 15614-1: 05 [21], dok su uzorci sa oznakom K korišteni za ispitivanje u cilju izračunavanja koeficijenta korelacije i ocjene regresione analize.

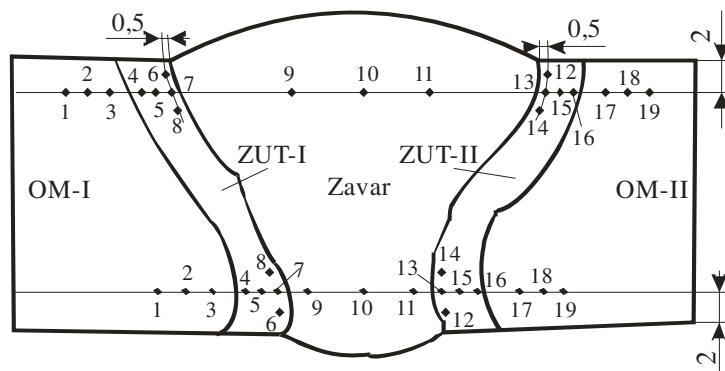


Slika II-5. Shematski prikaz uzorkovanja

U Metalografskom laboratoriju Instituta, na brušenim i poliranim uzorcima izvršeno je ispitivanje tvrdoće, mikrostrukture i veličine zrna, a u Mehaničkom laboratoriju provedeno je ispitivanje udarne radnje loma na pripremljenim epruvetama.

3.4.3 Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće zavarenih spojeva izvršeno je prema standardu BAS EN 1043-1:09 [22], koji specificira ispitivanje tvrdoće na poprečnom presjeku elektrolučno zavarenog spoja metalnih materijala, po metodi Vickers u skladu sa standardom BAS EN ISO 6507-1 [23], opterećenja HV10. Ispitivanje tvrdoće izvodi se u ambijentalnim uslovima, temperatura 23 ± 5 °C. Ispitivanje je provedeno na uređaju za ispitivanje tvrdoće i mikrotvrdoće ZWICK. Primijenjena metoda mjerenja tvrdoće je identifikacija u nizu, pri čemu je ispitivanjem obuhvaćen osnovni materijal (OM-I i OM-II), zona pod uticajem toplote (ZUT-I i ZUT-II) i metal zavares na udaljenosti ≤ 2 mm od površine i 0,5 mm od linije stapanja. Shematski prikaz sučeono zavarenog spoja sa lokacijama i vrijednostima ispitivanja tvrdoće dat je na slici II-6.



Slika II-6. Shematski prikaz sučeono zavarenog spoja sa lokacijama ispitivanja tvrdoće

U tabeli II-5 su dati rezultati ispitivanja tvrdoće sučeono zavarenih spojeva lima debljine 10mm sa rasporedom otisaka prema slici II-6:

- a) OM-I i OM-II: osnovni materijal I i II,
- b) ZUT-I i ZUT-II: zona pod uticajem toplote I i II,
- c) zavar.

Lokacije otisaka tvrdoće u ZUT-u, kod ispitivanja tvrdoće u nizu su, prema standardu BAS EN 1043-1:09[22] kako slijedi:

- uz liniju stapanja, odnosno grubozrnati dio ZUT-a smještena su tri otiska tvrdoće na udaljenosti 0,5mm od linije stapanja sa zavarom (broj 6,7,8 u ZUT –I i 12,13,14 u ZUT-II),
- u sitnozrnatom dijelu ZUT-a, na udaljenosti od oko 1,5mm od linije stapanja se nalaze otisci broj 5 u ZUT –I i 15 u ZUT-II,
- u rekristaliziranom dijelu ZUT-a, na udaljenosti od oko 2,5mm od linije stapanja se nalaze otisci broj 4 u ZUT –I i 16 u ZUT-II.

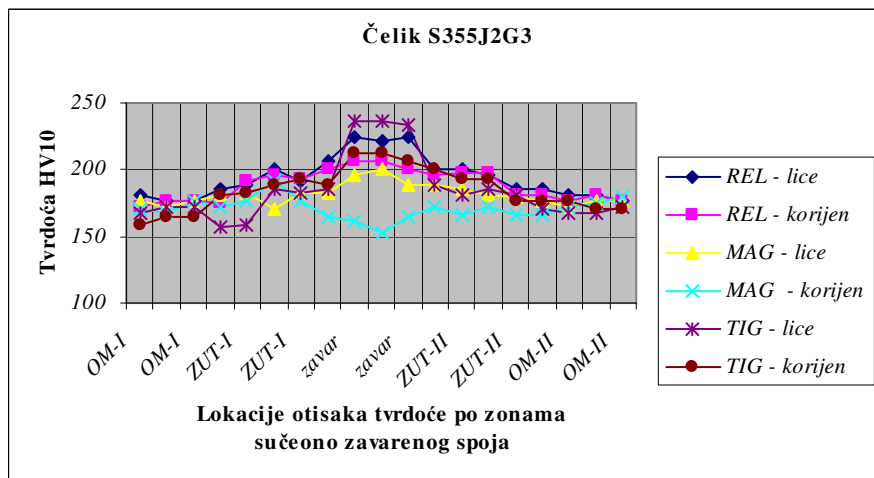
Rezultati ispitivanja tvrdoće sučeono zavarenih spojeva dati su u tabeli II-5.

Tabela II-5: Rezultati ispitivanja tvrdoće sučeono zavarenih spojeva

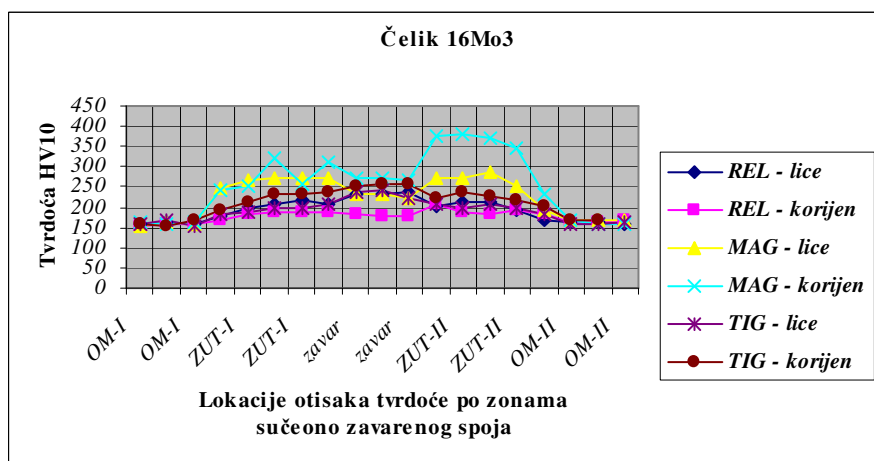
Materijal / postupak			Lokacije otisaka tvrdoće prema slici II-5																			
			OM-I			ZUT-I					Zavar			ZUT-II						OM-II		
						RZ*	SZ*	GZ*						GZ*			SZ*	RZ*				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
S355J2G3	REL	Lice	181	177	186	186	188	201	191	206	224	221	224	201	201	196	186	186	181	181	177	
		Korijen	172	177	177	175	191	196	193	201	206	206	201	196	198	198	181	181	177	181	177	
	MAG	Lice	177	172	177	179	181	186	183	183	196	201	188	188	186	181	179	177	172	177	177	
		Korijen	170	168	177	172	177	191	177	164	162	152	164	172	166	172	166	166	172	175	180	
	TIG	Lice	168	172	172	157	159	186	183	186	236	236	233	188	181	186	181	170	168	168	172	
		Korijen	159	164	164	181	183	188	193	188	212	212	206	201	193	193	177	177	177	170	170	
16Mo3	REL	Lice	160	164	160	179	198	206	218	206	230	230	236	201	215	215	191	168	164	164	159	
		Korijen	155	157	157	170	181	186	186	188	183	179	179	206	188	181	191	181	164	164	166	
	MAG	Lice	153	162	160	247	266	274	270	274	233	233	224	274	274	287	254	191	168	170	170	
		Korijen	164	160	164	243	251	322	258	312	270	274	266	376	383	370	345	230	166	160	160	
	TIG	Lice	160	166	153	183	188	198	196	206	236	243	224	206	196	206	196	183	160	157	164	
		Korijen	160	153	166	191	212	233	230	236	251	258	258	224	236	227	218	201	166	166	160	
13CrM4-5	REL	Lice	166	166	170	230	262	247	292	274	283	292	283	292	283	292	230	172	170	164	170	
		Korijen	166	164	172	266	270	251	270	258	247	247	254	274	270	258	230	224	164	170	168	
	MAG	Lice	146	172	172	160	188	206	198	203	206	206	203	191	201	209	188	170	146	150	157	
		Korijen	153	164	164	175	175	172	175	188	203	188	188	191	186	191	181	166	146	153	150	
	TIG	Lice	157	166	162	191	266	306	312	306	258	262	266	297	312	292	283	236	172	177	177	
		Korijen	172	170	160	287	292	297	302	297	266	258	251	351	333	345	327	297	181	179	177	

* GZ- grubozrnati dio ZUT-a, SZ- sitnozrnati dio ZUT-a, RZ – rekristalizirani dio ZUT-a

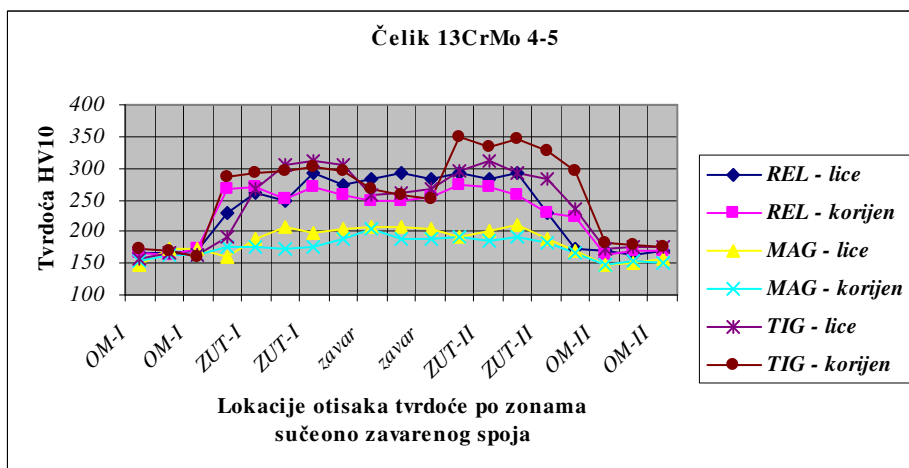
Dijagramski prikaz rasporeda otisaka sa vrijednostima tvrdoće prezentiran je na slici II-7. za sva tri kvaliteta čelika i postupka zavarivanja.



a)



b)



c)

Slika II-7. Tvrdoća sučeono zavarenog spoja sa lokacijama ispitivanja tvrdoće
a) čelik S355J2G3; b) 16Mo3; c) 13CrMo4-5

3.4.4 Ispitivanje udarne radnje loma

Izrada epruveta sa V zarezom u zoni pod uticajem toplote i ispitivanje udarne radnje loma izvršeno je prema standardu BAS EN 10045-1:98 na Charpy klatnu. Propisane vrijednosti za udarnu radnju loma (utrošenu energiju udara) za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5, te dobivene vrijednosti za zavarene spojeve su date u tabeli II-6.

Udarne radnje loma po Charpy-ju je ispitana na temperaturi -20°C za čelik S355J2G3, i na +20°C za čelike 16Mo3 i 13CrMo4-5.

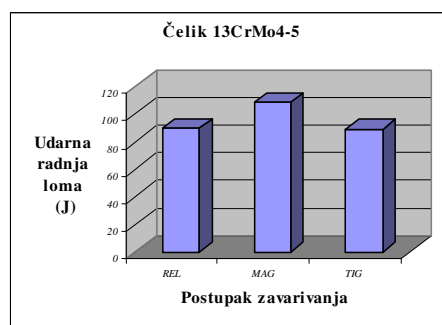
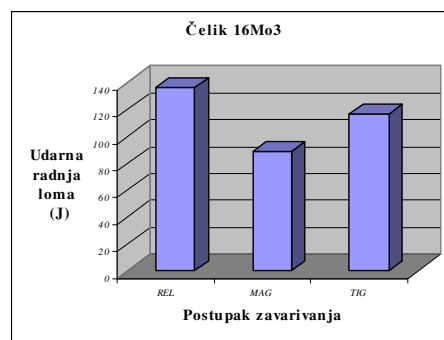
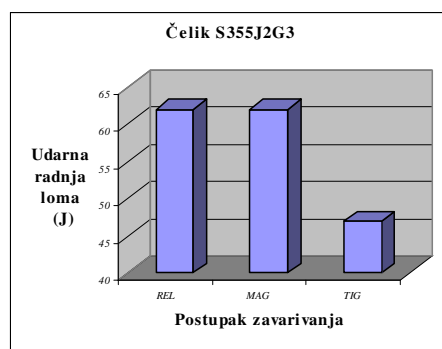
Tabela II-6: Rezultati ispitivanja udarne radnje loma sučeono zavarenih spojeva

Materijal / postupak		Temperatura ispitivanja (°C)	Minimalna propisana vrijednost ¹⁾	Udarne radnje loma (J) KV
				Uzorci P (slika II-5.)
S355J2G3	REL	-20	27 J [19]	62
	MAG	-20		62
	TIG	-20		47
16Mo3	REL	+20	31 J [20]	136
	MAG	+20		89
	TIG	+20		117
13CrMo4-5	REL	+20	31 J [20]	90
	MAG	+20		108
	TIG	+20		89

¹⁾ propisane vrijednosti za osnovni materijal

Sve dobivene vrijednosti udarne radnje loma su iznad minimalno propisane za sva tri kvaliteta čelika kod primjenjenih postupaka zavarivanja.

Na slici II-8. prezentirane su vrijednosti udarne radnje loma za sva tri kvaliteta čelika i postupka zavarivanja.



Slika II-8. Dijagrami udarne radnje loma u zavisnosti od postupka zavarivanja

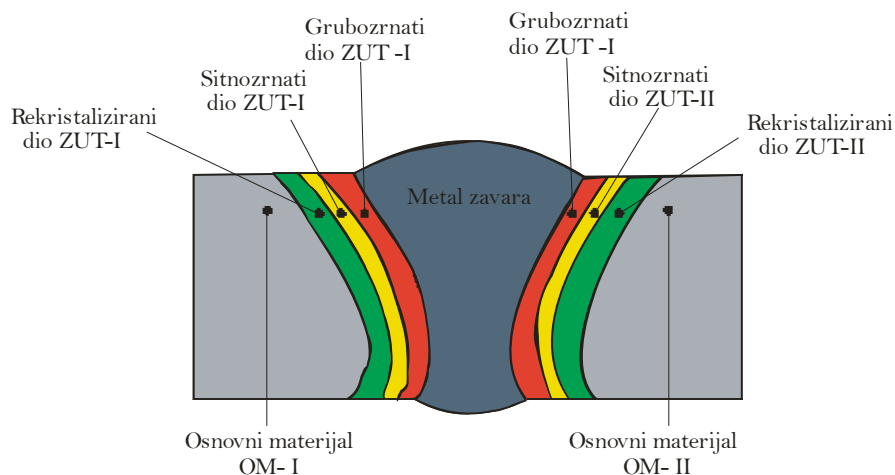
3.4.5 Ispitivanje mikrostrukture i veličine zrna

Metalografska ispitivanja sučeo zavarenih uzoraka su provedena na optičkom mikroskopu Olympus PMG3 u cilju otkrivanja uticaja različitih postupaka zavarivanja na mikrostrukturne karakteristike zavarenog spoja, prvenstveno u zoni pod uticajem toplote za sva tri kvaliteta čelika.

Zavarivanje probnih ploča debljine 10mm izvršeno je u tri sloja, što je dovelo do promjene mikrostrukture korijena zavora, uslijed termičkog ciklusa zavarivanja.

Ispitivanje mikrostrukture izvedeno je nagrizanjem u NITAL-u (2% HNO_3) prema standardu ASTM E 407:99 [24].

Slika II-9. predstavlja shematski prikaz lokacija na kojima je izvršeno ispitivanje mikrostrukture sučeo zavarenog spoja: osnovnog materijala OM-I i OM-II, metala zavora i osnovnog materijala izmijenjenog uslijed termičkog ciklusa zavarivanja, odnosno ZUT-I i ZUT-II. Mikrostruktura u zoni pod uticajem toplote je snimljena u blizini mjesta gdje je ispitana tvrdoća, znači u grubozrnatoj zoni na udaljenosti do 0,5mm od linije stapanja, zatim u sitnozrnatoj zoni na udaljenosti oko 1,5mm od linije stapanja i u rekristaliziranoj zoni, oko 2,5mm od linije stapanja.



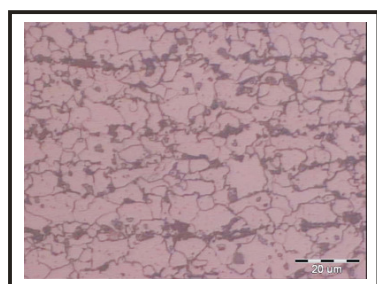
Slika II-9. Shematski prikaz lokacija na kojima je izvršeno ispitivanje mikrostrukture sučeo zavarenog spoja

Reprezentativni snimci i opis otkrivenih mikrostrukture [25,26,27,28] po zonama zavarenog spoja dati su kako slijedi:

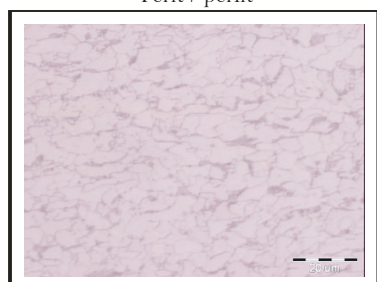
1. čelik S355J2G3 slike II-10. do II-12.,
2. čelik 16Mo3 slike II-13. do II-15.,
3. čelik 13CrMo4-5 slike II-16. do II-18.

Ispitivanje veličine zrna polaznog osnovnog materijala i veličine zrna nastale uslijed termičkog ciklusa zavarivanja u zoni pod uticajem toplote, prvenstveno u grubozrnatom dijelu, izvršeno je poređenjem sa standardnom skalom (Plate I) standarda ASTM E 112:96 [29].

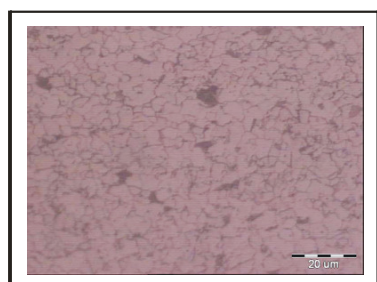
a) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3, postupak zavarivanja REL



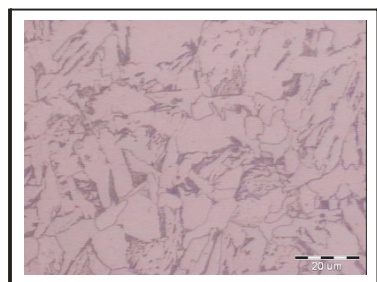
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



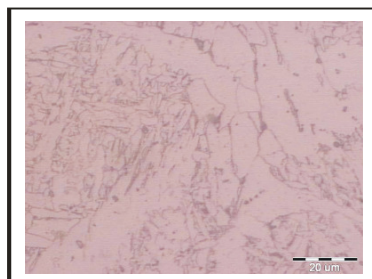
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit +trustit+ perlit



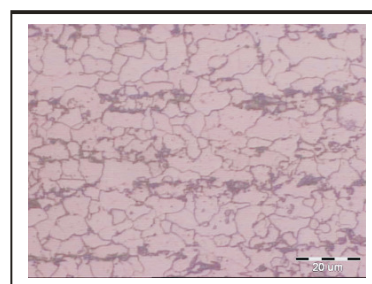
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit + perlit



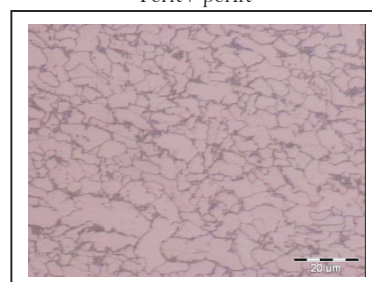
d) Grubozrnati dio ZUT-I
Widmanstatten ferit po granicama
primarnih austenitnih zrna, perlit i bainit



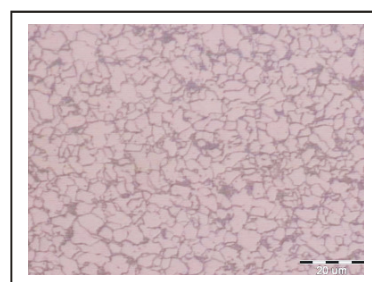
e) Metal zavara
Livena struktura,
ferit + bainit



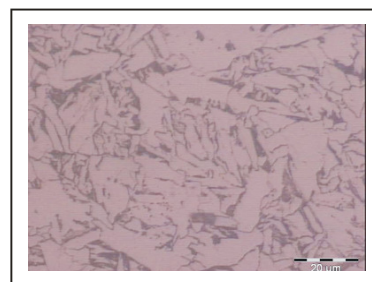
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



g) Rekristalizirani dio ZUT-II
Rekristalizirana, ferit +trustit+ perlit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +perlit

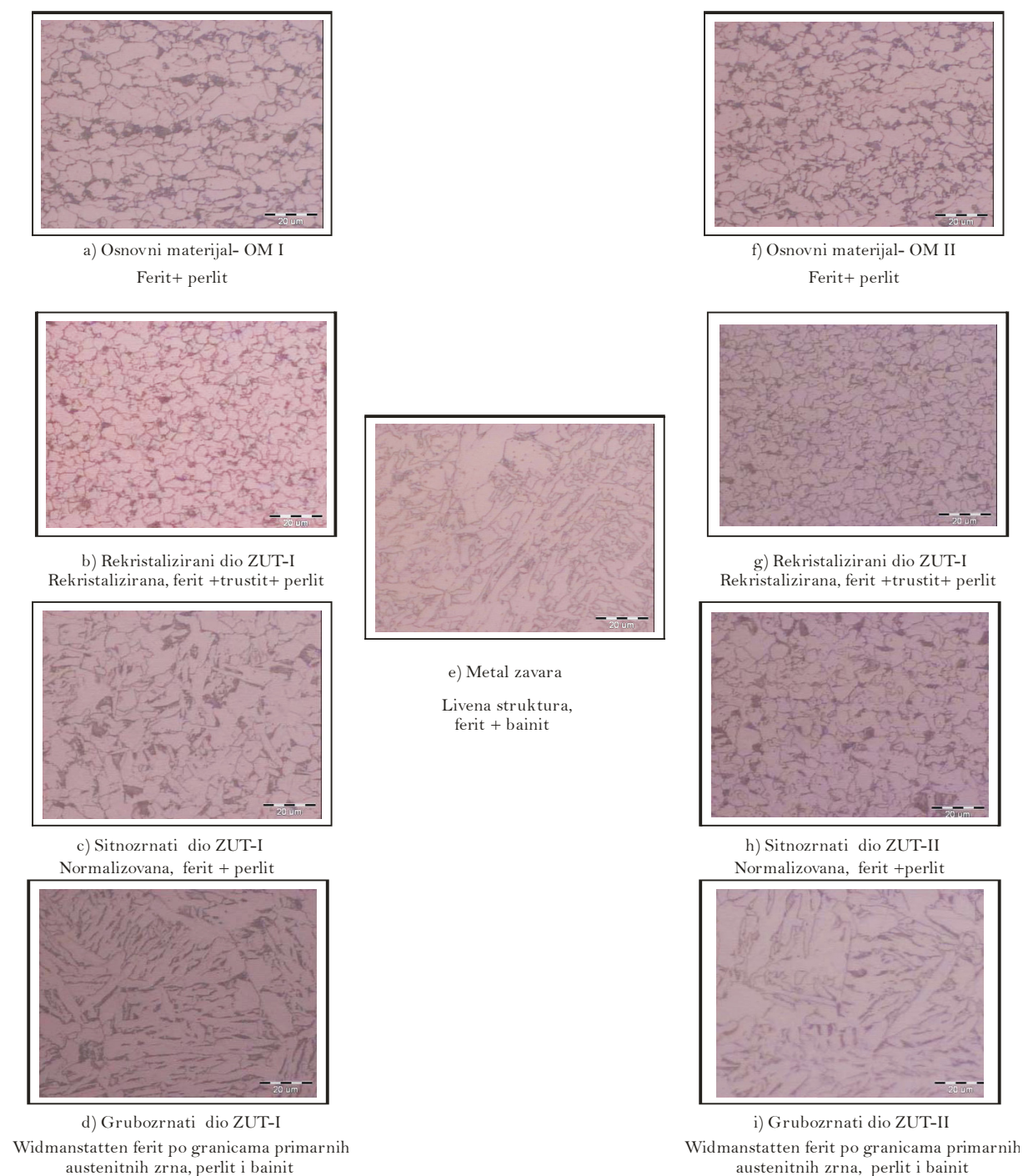


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Widmanstatten ferit po granicama
primarnih austenitnih zrna, perlit i bainit

*Slika II-10. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3
kod REL postupka zavarivanja*

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 9,5 dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 7.

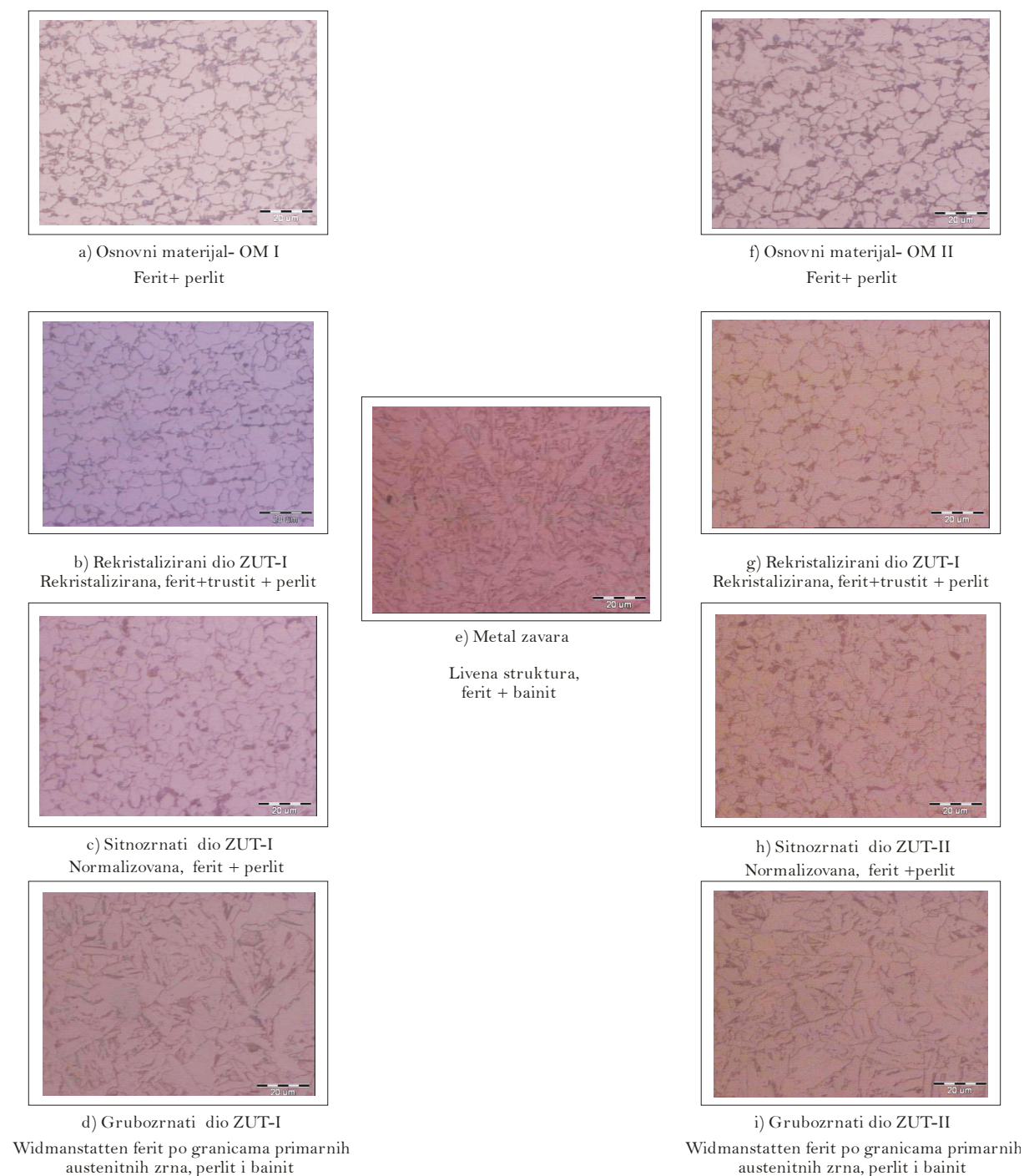
b) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3, postupak zavarivanja MAG



Slika II-11. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 kod MAG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 9,5, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 7.

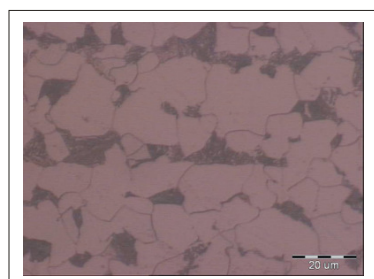
c) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3, postupak zavarivanja TIG



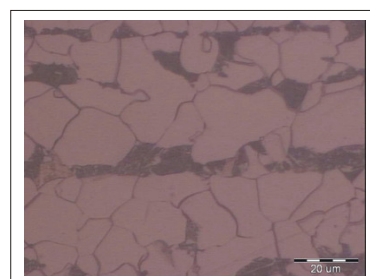
Slika II-12. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 kod TIG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 9,5, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 6,5.

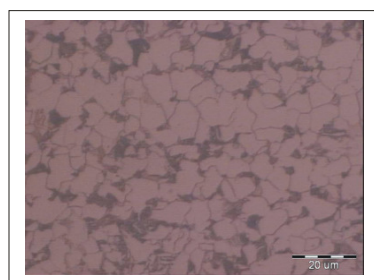
d) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3, postupak zavarivanja REL



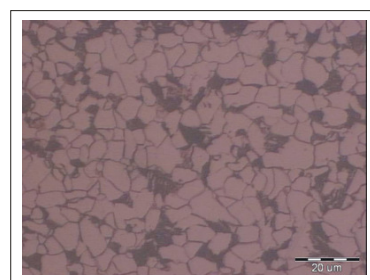
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



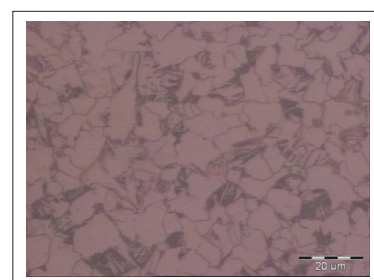
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + perlit



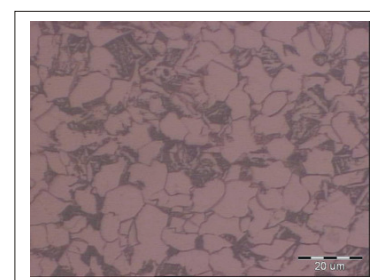
g) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + perlit



e) Metal zavara
Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit



c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit + perlit+bainit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +perlit+bainit



d) Grubozrnati dio ZUT-I
Widmanstatten ferit +
bainit + martenzit

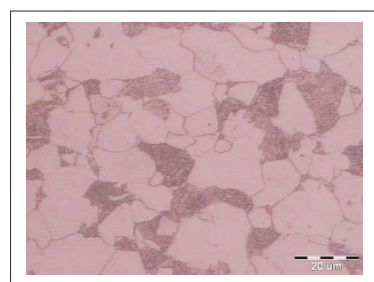


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Widmanstatten ferit +
bainit + martenzit

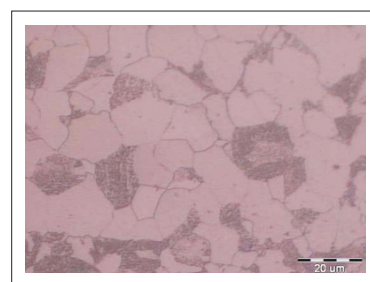
Slika II-13. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod REL postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8,5, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 6.

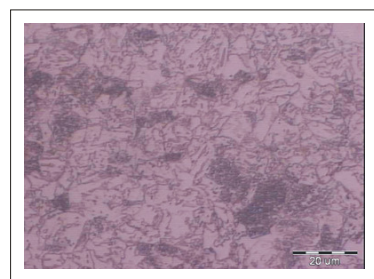
e) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3, postupak zavarivanja MAG



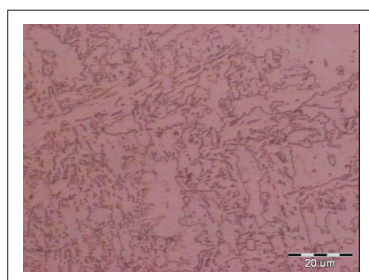
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



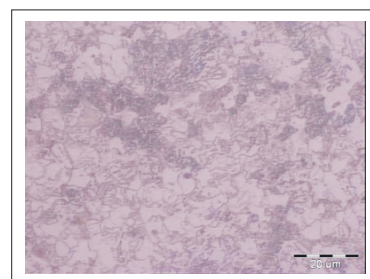
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



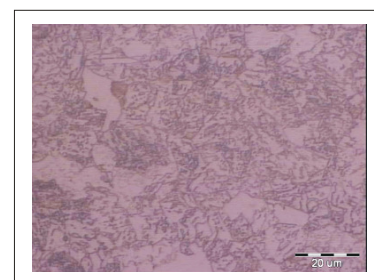
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + bainit+perlit



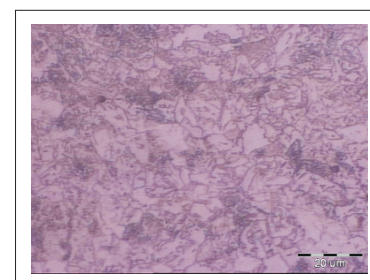
e) Metal zava
Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit



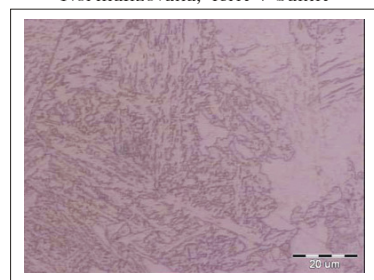
g) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + bainit +perlit



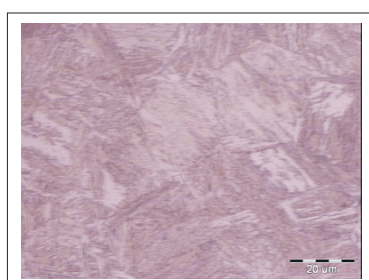
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit + bainit



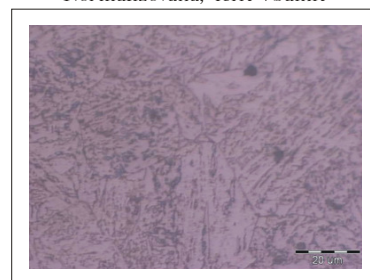
h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +bainit



d) Grubozrnati dio ZUT-I
Bainit (koagulirani karbidi unutar bainita)
+martenzit



j) Grubozrnati dio ZUT-I
Martenzit + bainit

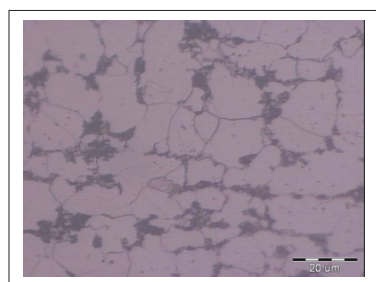


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Bainit (koagulirani karbidi unutar bainita)
+martenzit

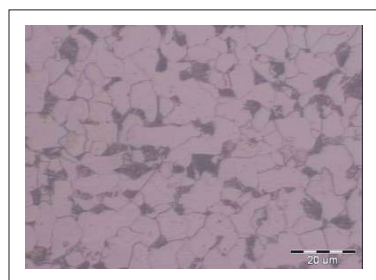
Slika II-14. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod MAG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8,5 dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 5,5.

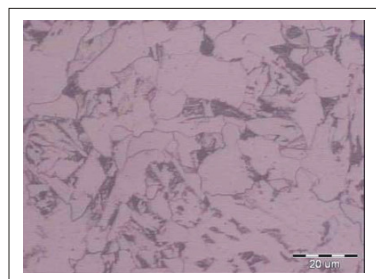
f) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3, postupak zavarivanja TIG



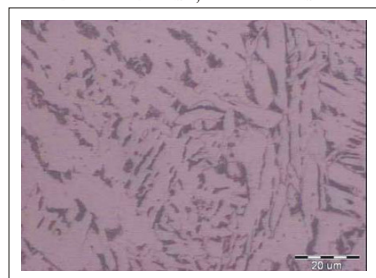
a) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



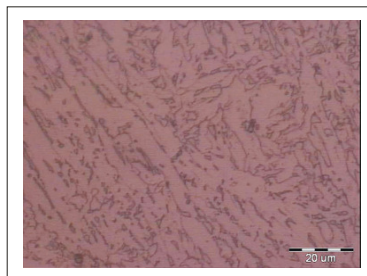
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + perlit+bainit



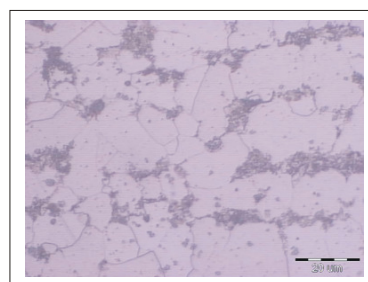
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit + bainit



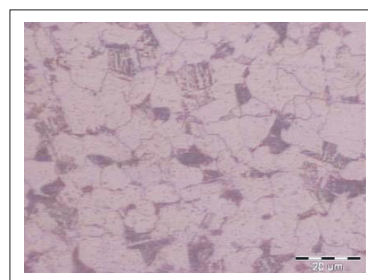
d) Grubozrnati dio ZUT-I
Widmanstatten ferit +
bainit + martenzit



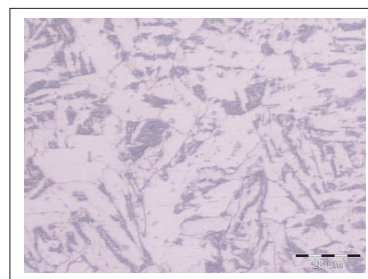
e) Metal zavara
Livena struktura,
ferit + bainit



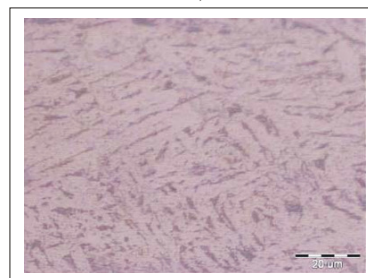
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



g) Rekristalizirani dio ZUT-II
Rekristalizirana, ferit + perlit+bainit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +bainit

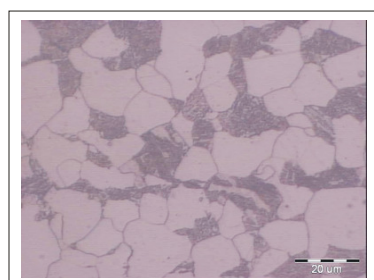


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Widmanstatten ferit +
bainit + martenzit

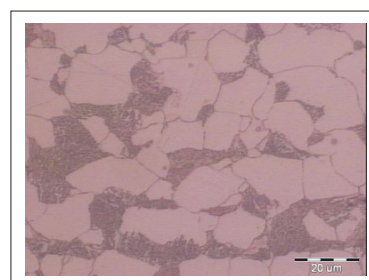
Slika II-15. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 kod TIG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8,5, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 6.

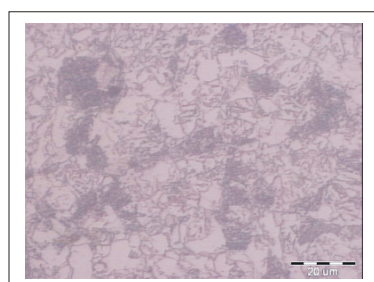
g) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, postupak zavarivanja REL



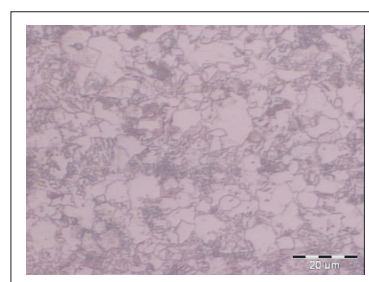
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



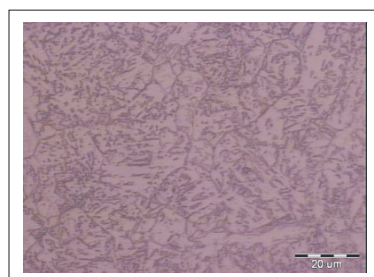
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



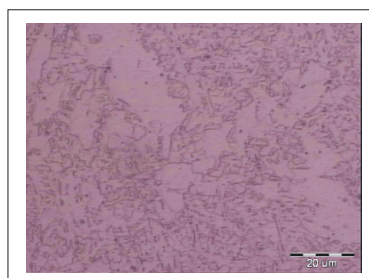
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + bainit+perlit



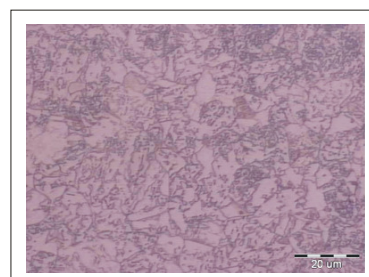
g) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + bainit+perlit



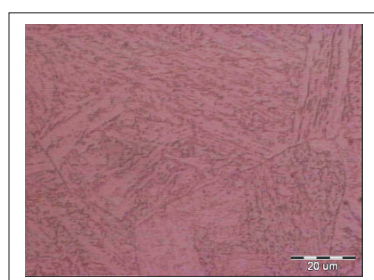
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit +bainit



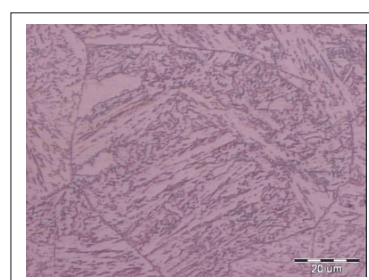
e) Metal zavora
Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +bainit



d) Grubozrnati dio ZUT-I
Ogrubljeni bainit (koagulirani
karbidi unutar bainita)+ martenzit

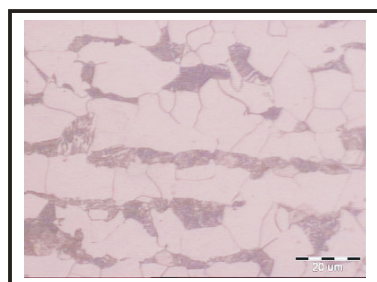


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Ogrubljeni bainit (koagulirani
karbidi unutar bainita)+ martenzit

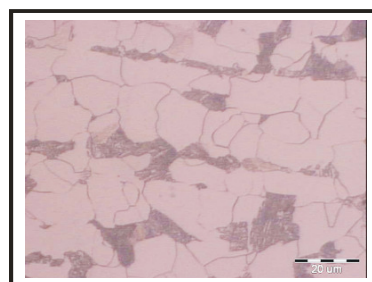
Slika II-16. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod REL postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 6,5.

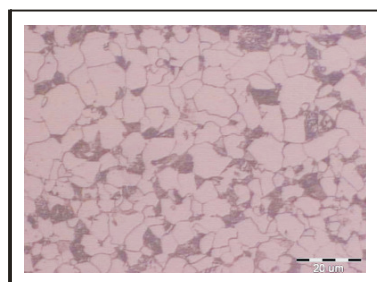
h) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, postupak zavarivanja MAG



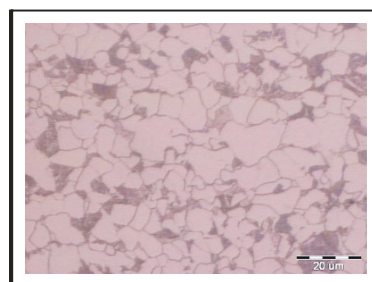
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



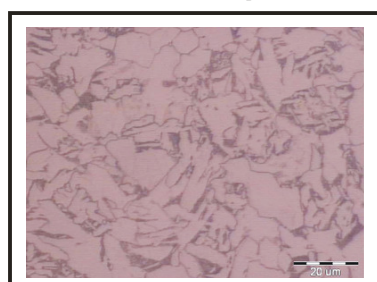
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



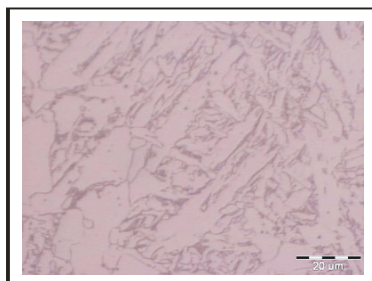
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + perlit+bainit



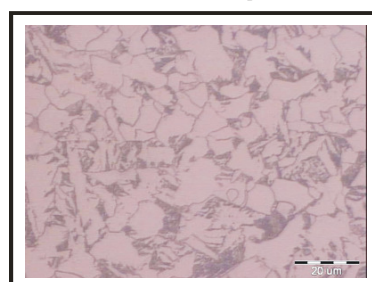
g) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + perlit+bainit



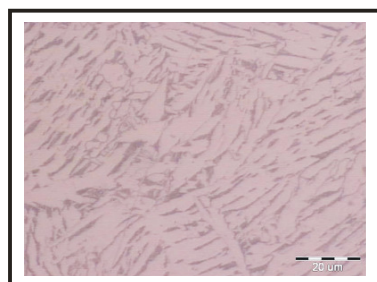
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit + perlit+bainit



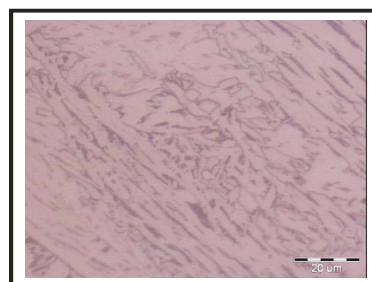
e) Metal zavera
Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit +perlit+bainit



d) Grubozrnati dio ZUT-I
Bainit+martenzit

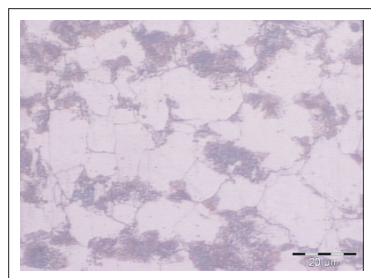


i) Grubozrnati dio ZUT-II
Bainit+martenzit

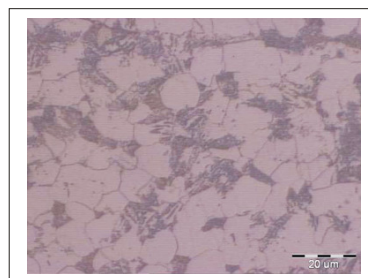
Slika II-17. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod MAG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8,5, dok je u grubozrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 6,5.

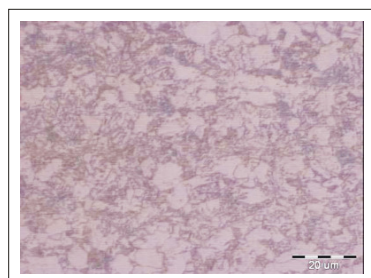
i) Mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, postupak zavarivanja TIG



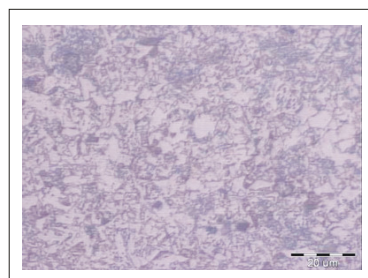
a) Osnovni materijal- OM I
Ferit+ perlit



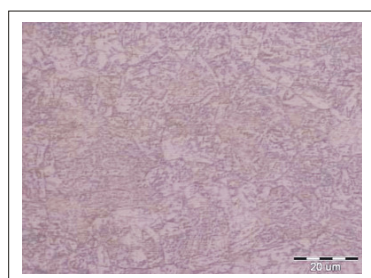
f) Osnovni materijal- OM II
Ferit+ perlit



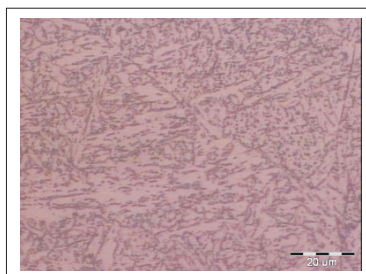
b) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit +bainit+perlt



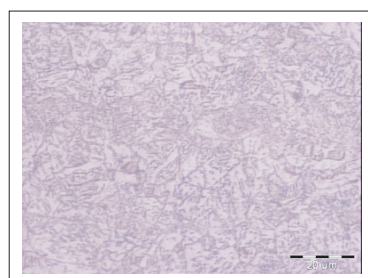
g) Rekristalizirani dio ZUT-I
Rekristalizirana, ferit + bainit+perlit



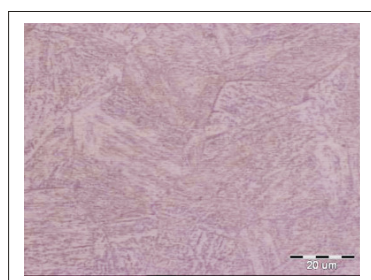
c) Sitnozrnati dio ZUT-I
Normalizovana, ferit +bainit



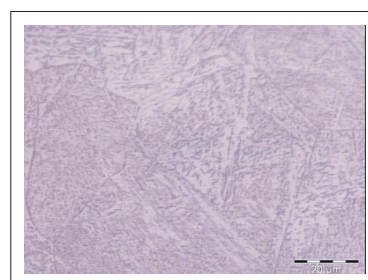
e) Metal zavara
Livena struktura,
ferit po granicama primarnih
austenitnih zrna+ bainit



h) Sitnozrnati dio ZUT-II
Normalizovana, ferit+bainit



d) Gruboizrnat dio ZUT-I
Bainit+martenzit



i) Gruboizrnat dio ZUT-II
Bainit+ martenzit

Slika II-18. Mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 kod TIG postupka zavarivanja

Indeks veličine zrna osnovnog materijala OM-I i OM-II je ASTM G 8,5, dok je u gruboizrnatom dijelu ZUT-I i ZUT-II indeks veličine zrna ASTM G 5,5.

III ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

4. ANALIZA REZULTATA

U cilju utvrđivanja odnosa između parametara zavarivanja kod postupaka REL, MAG i TIG sa dobivenim vrijednostima ispitivanja tvrdoće i udarne radnje loma u zoni pod uticajem toplote, prvenstveno u njenom grubozrnatom dijelu, kao i utvrđivanja korelacije između dobivenih fiziko-metalurških karakteristika i parametara zavarivanja za nelegirani čelik S355J2G3 i niskolegirane čelike 16Mo3 i 13CrMo4-5 izvršeno je zavarivanje probnih ploča. U toku zavarivanja probnih ploča praćeni su parametri zavarivanja napon, jačina struje, te kod MAG postupka i brzina zavarivanja.

Na zavarenim uzorcima izvršeno je ispitivanje:

1. tvrdoće,
2. udarne radnje loma,
3. mikrostrukture i
4. veličine zrna.

Istraživanje je izvršeno za svaki navedeni čelik, tj. S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5, naime praćene su promjene fiziko-metalurških karakteristika materijala u zavisnosti od postupaka zavarivanja REL, MAG i TIG.

4.1 Analiza rezultata ispitivanja za čelik S355J2G3

4.1.1 Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća osnovnog materijala OM-I i OM-II se kreće od 168 do 181 HV10, što odgovara tvrdoći polazne trakaste feritno-perlitne mikrostrukture [30].

Tvrdoća u licu i korijenu metala zavara kod čelika S355J2G3 za sva tri postupka zavarivanja je data u tabeli III-1.

Tabela III-1. Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavara čelika S355J2G3

Lokacija/postupak	Tvrdoća HV10		
	REL	MAG	TIG
Lice	223	195	234
Korijen	205	160	210

Najveća vrijednost tvrdoće u metalu zavara dobivena je kod TIG postupka zavarivanja (234HV10).

U zoni pod uticajem toplote tvrdoća je mjerena na pet mjesta, kako je opisano u tački 3.5.1, tabela III-2. Analizom rezultata ispitivanja tvrdoće u ZUT-u kod čelika S355J2G3 kod zavarivanja REL, MAG i TIG postupcima vidljivo je da je tvrdoća u grubozrnatom dijelu ZUT-a (ZUT-I i ZUT-II na licu zavara) veća od tvrdoće u sitnozrnatom i rekristaliziranom dijelu.

Najveće vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a postignute su pri zavarivanju REL postupkom (206HV10).

Tabela III-2. Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u čelika S355J2G3

Postupak	Lokacija	ZUT-I				ZUT-II			
		Broj otiska	GZ	SZ	R	Broj otiska	GZ	SZ	R
REL	Lice	6	201	188	186	12	201	186	186
		7	191			13	201		
		8	206			14	196		
	Korijen	6	196	191	175	12	196	181	181
		7	193			13	198		
		8	201			14	198		
MAG	Lice	6	181	183	181	12	188	179	177
		7	183			13	186		
		8	183			14	181		
	Korijen	6	191	177	172	12	172	166	166
		7	177			13	166		
		8	164			14	172		
TIG	Lice	6	186	159	157	12	188	181	170
		7	183			13	181		
		8	186			14	186		
	Korijen	6	188	183	181	12	201	177	177
		7	193			13	193		
		8	188			14	193		

Prema literaturnim podacima očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće i maksimalno dozvoljena vrijednost prema standardu BAS EN 15614-1 [21], te vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina, kao i maksimalno dobivena vrijednost pri zavarivanju REL, MAG i TIG postupcima za čelik S355J2G3 data je u tabeli III-3.

Tabela III-3. Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik S355J2G3

Materijal / postupak		Očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće (formula 15)	Vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina (formula 19)	Maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće prema standardu BAS EN 15614-1	Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće HV10 u ZUT-u
S355J2G3	REL	348	413	320	206
	MAG				191
	TIG				201

Dobivene vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, za sva tri postupka zavarivanja kod čelika S355J2G3 su manje od maksimalno dozvoljenih vrijednosti.

4.1.2 Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

Udarne radnja loma za čelik S355J2G3, prema standardu BAS EN 10025-2 [19] se ispituje na temperaturi -20 °C i minimalna propisana vrijednost je 27 J. Zavareni spoj treba da ima vrijednost udarne radnje loma veću ili jednaku onoj za osnovni materijal.

Vrijednost udarne radnje loma za sučeono zavareni spoj čelika S355J2G3 dobiven REL postupkom zavarivanja iznosi 62 J, MAG postupkom 62 J dok je TIG postupkom dobivena vrijednost od 47 J, što je veće od minimalno propisane vrijednosti.

Tabela III-4: Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika S355J2G3

Na osnovu vrijednosti za udarnu radnju loma izračunata je žilavost (po formuli 21) čelika S355J2G3 kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja i data u tabeli III-4.

Materijal / postupak		Žilavost (J/cm ²)
S355J2G3	REL	77,5
	MAG	77,5
	TIG	58,7

Najmanja vrijednost udarne radnje loma i žilavosti za čelik S355J2G3 je kod TIG postupka zavarivanja.

4.1.3 Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna

Obzirom da su svi zavareni uzorci izrezani iz jedne table lima debljine 10mm, mikrostruktura osnovnog materijala koji nije bio pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja, kod postupaka REL, MAG i TIG je trakasta feritno-perlitna (slike II-10. a) i f); II-11. a) i f); II-12. a) i f)). Početak zone pod uticajem toplote je dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan u temperaturnom intervalu A_{c1} i A_{c3} , odnosno rekristalizirani dio ZUT-a. Struktura odražava transformaciju perlita u austenit za vrijeme zagrijavanja, odnosno raspadom austenita za vrijeme sporog hlađenja nastaje modificirana mikrostruktura ferita i trustita sa tendencijom nastanka perlita (slike II-10. b) i g); II-11 b) i g); II-12. b) i g)).

Dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan na temperature iznad A_{c3} se potpuno transformiše iz feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, odnosno za vrijeme bržeg hlađenja austenit se transformiše u ferit i perlit. Obzirom da vrijednosti temperatura u ovom području odgovaraju temperaturama normalizacionog žarenja, dolazi do usitnjavanja nastale feritno-perlitne mikrostrukture (slike II-10. c) i h); II-11 c) i h); II-12. c) i h)).

Dio osnovnog materijala koji je za vrijeme termičkog ciklusa zavarivanja zagrijan na temperature znatno iznad A_{c3} je pregrijani odnosno grubozrnati dio ZUT-a. Za vrijeme zagrijavanja dolazi do potpune transformacije feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, a obzirom na vrijednosti temperatura koje vladaju u ovom dijelu ZUT-a dolazi do ogrubljenja austenitnog zrna. Za vrijeme hlađenja, brzinama većim od onih u sitnozrnatom dijelu ZUT-a dolazi do transformacije austenita u bainit sa Widmanstätenskim feritom po granicama primarnih austenitnih zrna i ostrvca perlita (slike II-10. d) i i); II-11 d) i i); II-12. d) i i)).

Metal zavara ima livenu mikrostrukturu, koja je nastala hlađenjem istopljenog osnovnog i dodatnog materijala pod dejstvom termičkog ciklusa zavarivanja. Zavarivanje je provedeno u tri sloja, tako da je mikrostruktura prethodnog sloja (u korijenu metala zavara) pod djelovanjem termičkog ciklusa zavarivanja, odnosno dolazi do normalizacije mikrostrukture u korijenu metala zavara. U zadnjem sloju, na licu metala zavara otkrivena je dendritna mikrostruktura ferita po granicama primarnih austenitnih zrna i bainit [30] (slike II-10. e); II-11 e); II-12. e)).

Tabelarni pregled mikrostrukture osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara dat je u tabeli III-5.

Tabela III-5. Pregled mikrostruktura sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3

Lokacija			Postupak / mikrostruktura		
			REL	MAG	TIG
Osnovni materijal koji nije pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja			trakasta, ferit i perlit, slike II-10.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-11.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-12.a) i f)
ZUT	ZUT između A_{c1} i A_{c3}	R	rekristalizirana, ferit i trustit sa tendencijom nastanka perlita, slike II-10.b) i g)	rekristalizirana, ferit i trustit sa tendencijom nastanka perlita, slike II-11.b) i g)	rekristalizirana, ferit i trustit sa tendencijom nastanka perlita, slike II-12.b) i g)
	ZUT malo iznad A_{c3}	SZ	normalizirana, ferit i perlit, slike II-10.c) i h)	normalizirana, ferit i perlit, slike II-11.c) i h)	normalizirana, ferit i perlit, slike II-12.c) i h)
	ZUT između A_{c3} i linije stapanja	GZ	Widmanst. ferit po granicama primarnih austenitnih zrna, perlit i bainit, slike II-10.d) i i)	Widmanst. ferit po granicama primarnih austenitnih zrna, perlit i bainit, slike II-11.d) i i)	Widmanst. ferit po granicama primarnih austenitnih zrna, perlit i bainit, slike II-12.d) i i)
Metal zavora			livena struktura, ferit i bainit, slika II-10.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-11.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-12.e)

Analiza mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG je pokazala da nema bitne razlike u nastalim mikrokonstituentima u toku zavarivanja.

Termički ciklus zavarivanja, na temperaturama znatno iznad A_{c3} tačke koje vladaju u blizini linije stapanja, uzrokuje ogrubljenje feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala, znači dolazi do ogrubljenja zrna.

Tabela III-6. Veličina zrna kod čelika S355J2G3

U tabeli III-6 je dat pregled veličina zrna osnovnog materijala i veličine zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a kod sučeono zavarenih spojeva čelika S355J2G3 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG.

Postupak	Veličina zrna ASTM	
	Osnovni materijal	Grubozrnati dio ZUT-a
REL	9,5	7
MAG		7
TIG		6,5

4.2 Analiza rezultata ispitivanja za čelik 16Mo3

4.2.1 Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća osnovnog materijala OM-I i OM-II se kreće od 153 do 170 HV10, što odgovara tvrdoći polazne trakaste feritno-perlitne mikrostrukture [26].

Tabela III-7. Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavora čelika 16Mo3

Tvrdoća u licu i korijenu metala zavora kod čelika 16Mo3 za sva tri postupka zavarivanja je data u tabeli III-7.

Lokacija/postupak	Tvrdoća HV10		
	REL	MAG	TIG
Lice	232	180	234
Korijen	180	270	256

Najveća vrijednost tvrdoće u metalu zavarava dobivena je kod MAG postupka zavarivanja (270HV10).

Analizom rezultata ispitivanja tvrdoće u ZUT-u kod čelika 16Mo3 kod zavarivanja REL, MAG i TIG postupcima vidljivo je da je tvrdoća u grubozrnatom dijelu ZUT-a (ZUT-I i ZUT-II na licu zavarava) veća od tvrdoće u sitnozrnatom i rekristaliziranom dijelu.

Najveće vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a postignute su pri zavarivanju MAG postupkom (383HV10).

Tabela III-8. Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u kod čelika 16Mo3

U zoni pod uticajem toplote tvrdoća je mjerena na pet mjesta, kako je opisano u tački 3.5.1, tabela III-8.

Postupak	Lokacija	ZUT-I				ZUT-II			
		Broj otiska	GZ	SZ	R	Broj otiska	GZ	SZ	R
REL	Lice	6	206	198	179	12	201	191	168
		7	218			13	215		
		8	206			14	215		
	Korijen	6	186	181	170	12	206	191	181
		7	186			13	188		
		8	188			14	181		
MAG	Lice	6	274	266	247	12	274	254	191
		7	270			13	274		
		8	274			14	287		
	Korijen	6	322	251	243	12	376	345	230
		7	258			13	383		
		8	312			14	370		
TIG	Lice	6	198	188	183	12	206	196	183
		7	196			13	196		
		8	206			14	206		
	Korijen	6	233	212	191	12	224	218	201
		7	230			13	236		
		8	236			14	227		

Prema literaturnim podacima očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće i maksimalno dozvoljena vrijednost prema standardu BAS EN 15614-1 [21], te vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina, kao i maksimalno dobivena vrijednost pri zavarivanju REL, MAG i TIG postupcima za čelik 16Mo3 data je u tabeli III-9.

Tabela III-9. Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik 16Mo3

Materijal / postupak		Očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće (formula 15)	Vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina (formula 19)	Maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće prema BAS EN 15614-1	Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće HV10 u ZUT-u
S355J2G3	REL	335	416	320	215
	MAG				383
	TIG				236

Dobivene vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, za REL i TIG postupke zavarivanja kod čelika 16Mo3 su manje od maksimalno dozvoljenih i maksimalno očekivanih vrijednosti, dok najveća izmjerena tvrdoća (383HV10) dobivena MAG postupkom zavarivanja prelazi očekivanu vrijednost od 335 HV i maksimalnu vrijednost po standardu od 320 HV. Mikrostruktura uz otisak tvrdoće od 383HV10 je martenzitno-bainitna (slika II-14. j). Vrijednost tvrdoće od 383HV10 je blizu vrijednosti vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina od 416 HV, što znači da ovaj sučeono zavareni spoj ima visoku sklonost ka nastanku hladnih pukotina.

4.2.2 Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

Udarne radnja loma za čelik 16Mo3, prema standardu BAS EN 10028-2 [20] se ispituje na temperaturi +20 °C i minimalna propisana vrijednost je 31 J. Vrijednost udarne radnje loma za sučeono zavareni spoj čelika 16Mo3 dobiven REL postupkom zavarivanja iznosi 136 J, MAG postupkom 89 J dok je TIG postupkom dobivena vrijednost od 117 J, što je veće od minimalno propisane vrijednosti.

Na osnovu vrijednosti za udarnu radnju loma izračunata je žilavost (po formuli 21) čelika 16Mo3 kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja i data u tabeli III-10.

Tabela III-10: Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika 16Mo3

Materijal / postupak		Žilavost (J/cm ²)
16Mo3	REL	170,0
	MAG	111,2
	TIG	146,2

Najmanja vrijednost udarne radnje loma i žilavosti za čelik 16Mo3 je kod MAG postupka zavarivanja.

4.2.3 Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna

Mikrostruktura osnovnog materijala koji nije bio pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja, kod postupaka REL, MAG i TIG je trakasta feritno-perlitna (slike II-13. a) i f); II-14. a) i f); II-15. a) i f)).

Rekristalizirani dio ZUT-a predstavlja početak zone pod uticajem toplote, odnosno dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan u temperaturnom intervalu A_{c1} i A_{c3} . Struktura odražava transformaciju perlita u austenit za vrijeme zagrijavanja, odnosno raspadom austenita za vrijeme sporog hlađenja nastaje mikrostruktura ferita i perlita (slike II-13. b) i g)) kod REL; ferita, bainita i perlita (slike II-14 b) i g)) kod MAG; te ferita, perlita i bainita (slike II-15. b) i g)) kod TIG postupka zavarivanja.

Dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan na temperature malo iznad A_{c3} se potpuno transformiše iz feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, odnosno za vrijeme bržeg hlađenja austenit se transformiše u ferit, perlit i bainit (slike II-13. c) i h)) kod REL postupka zavarivanja; ferita i bainita (slike II-14 c) i h)) kod MAG postupka i TIG postupka zavarivanja (slike II-15. c) i h)). Obzirom da vrijednosti temperatura u ovom području odgovaraju temperaturama normalizacionog žarenja, dolazi do usitnjavanja nastale mikrostrukture.

Dio osnovnog materijala koji je za vrijeme termičkog ciklusa zavarivanja zagrijan na temperature znatno iznad A_{c3} je pregrijani odnosno grubozrnati dio ZUT-a. Za vrijeme zagrijavanja dolazi do potpune transformacije feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, a obzirom na vrijednosti temperatura koje vladaju u ovom dijelu ZUT-a dolazi do ogrubljenja austenitnog zrna. Za vrijeme hlađenja, brzinama većim od onih u

sitnozrnatom dijelu ZUT-a dolazi do transformacije austenita u Widmanstattenski ferit, bainit i martenzit (slike II-13. d) i i)) kod REL i TIG postupaka zavarivanja (slike II-15. d) i i)); te bainit i martenzit (slike II-14 d) i i)) kod MAG postupka zavarivanja.

Metal zavora ima livenu mikrostrukturu, koja je nastala hlađenjem istopljenog osnovnog i dodatnog materijala pod dejstvom termičkog ciklusa zavarivanja. Zavarivanje je provedeno u tri prolaza, tako da je mikrostruktura prethodnog prolaza (u korijenu metala zavora) pod djelovanjem termičkog ciklusa zavarivanja, odnosno dolazi do normalizacije mikrostrukture u korijenu metala zavora. U zadnjem prolazu, na licu metala zavora otkrivena je dendritna mikrostruktura ferita po granicama primarnih austenitnih zrna i bainit [30] (slike II-13. e); II-14 e); II-15. e)).

Pregled mikrostrukture osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavora dat je u tabeli III-11.

Tabela III-11. Pregled mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3

Lokacija			Postupak / mikrostruktura		
			REL	MAG	TIG
Osnovni materijal koji nije pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja			trakasta, ferit i perlit, slike II-13.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-14.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-15.a) i f)
ZUT	ZUT između A_{c1} i A_{c3}	R	rekristalizirana, ferit i perlit, slike II-13.b) i g)	rekristalizirana, ferit, bainit i perlit, slike II-14.b) i g)	rekristalizirana, ferit+perlit+bainit, slike II-15.b) i g)
	ZUT malo iznad A_{c3}	SZ	normalizirana, ferit, perlit i bainit, slike II-13.c) i h)	normalizirana, ferit i bainit, slike II-14.c) i h)	normalizirana, ferit+bainit, slike II-15.c) i h)
	ZUT između A_{c3} i linije stapanja	GZ	Widmanstattenski ferit, bainit i martenzit, slike II-13.d) i i)	bainit i martenzit, slike II-14.d) i i)	Widmanstattenski ferit, bainit i martenzit, slike II-15.d) i i)
Metal zavora			livena struktura, ferit i bainit, slika II-13.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-14.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-15.e)

Analiza mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG je pokazala razliku u nastalim mikrokonstituentima u toku zavarivanja.

U tabeli III-12. je dat pregled veličina zrna osnovnog materijala i veličine zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a kod sučeono zavarenih spojeva čelika 16Mo3 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG.

Tabela III-12. Veličina zrna kod čelika 16Mo3

Postupak	Veličina zrna ASTM	
	Osnovni materijal	Grubozrnati dio ZUT-a
REL	8,5	6
MAG		5,5
TIG		6

Najveće ogrubljenje zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a otkriveno je kod MAG postupka zavarivanja, gdje je žilavost najmanja a tvrdoća najveća (prelazi maksimalno dozvoljene vrijednosti).

4.3 Analiza rezultata ispitivanja za čelik 13CrMo4-5

4.3.1 Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća osnovnog materijala OM-I i OM-II se kreće od 146 do 181 HV10, što odgovara tvrdoći polazne trakaste feritno-perlitne mikrostrukture [30].

Tvrdoća u licu i korijenu metala zavara kod čelika 13CrMo4-5 za sva tri postupka zavarivanja je data u tabeli III-13.

Tabela III-13. Pregled rezultata ispitivanja tvrdoće metala zavara čelika 13CrMo4-5

Lokacija/postupak	Tvrdoća HV10		
	REL	MAG	TIG
Lice	287	205	262
Korijen	249	193	258

Najveća vrijednost tvrdoće u metalu zavara dobivena je kod REL postupka zavarivanja (287HV10).

Analizom rezultata ispitivanja tvrdoće u ZUT-u kod čelika 13CrMo4-5 kod zavarivanja REL, MAG i TIG postupcima vidljivo je da je tvrdoća u grubozrnatom dijelu ZUT-a (ZUT-I i ZUT-II na licu zavara) veća od tvrdoće u sitnozrnatom i rekristaliziranom dijelu.

Najveće vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a postignute su pri zavarivanju TIG postupkom (351HV10).

U zoni pod uticajem toplote tvrdoća je mjerena na pet mjesta, kako je opisano u tački 3.5.1, tabela III-14.

Tabela III-14. Rezultati ispitivanja tvrdoće u ZUT-u kod čelika 13CrMo4-5

Postupak	Lokacija	ZUT-I				ZUT-II			
		Broj otiska	GZ	SZ	R	Broj otiska	GZ	SZ	R
REL	Lice	6	247	262	230	12	292	230	172
		7	292			13	283		
		8	274			14	292		
	Korijen	6	251	270	266	12	274	230	224
		7	270			13	270		
		8	258			14	258		
MAG	Lice	6	206	188	160	12	191	188	170
		7	198			13	201		
		8	203			14	209		
	Korijen	6	172	175	175	12	191	181	166
		7	175			13	186		
		8	188			14	191		
TIG	Lice	6	306	266	191	12	297	292	287
		7	312			13	312		
		8	306			14	292		
	Korijen	6	297	292	287	12	351	327	297
		7	302			13	333		
		8	297			14	345		

Prema literaturnim podacima očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće i maksimalno dozvoljena vrijednost prema standardu BAS EN 15614-1 [21], te vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina, kao i maksimalno dobivena vrijednost pri zavarivanju REL, MAG i TIG postupcima za čelik 13CrMo4-5 data je u tabeli III-15.

Tabela III-15. Maksimalne vrijednosti tvrdoće prema literaturnim podacima za čelik 13CrMo4-5

Materijal / postupak		Očekivana maksimalna vrijednost tvrdoće (formula 15)	Vrijednost tvrdoće vezano za sklonost nastanka hladnih pukotina (formula 19)	Maksimalna dozvoljena vrijednost tvrdoće prema BAS EN 15614-1	Maksimalna izmjerena vrijednost tvrdoće HV10 u ZUT-u
S355J2G3	REL	355	417	320	292
	MAG				209
	TIG				351

Dobivene vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, za REL i MAG postupke zavarivanja kod čelika 13CrMo4-5 su manje od maksimalno dozvoljenih i očekivanih maksimalnih vrijednosti, dok najveća izmjerena tvrdoća (351HV10) dobivena TIG postupkom zavarivanja prelazi maksimalnu vrijednost po standardu od 320 HV. Vrijednost tvrdoće od 351HV10 je blizu vrijednosti očekivane maksimalne tvrdoće (355HV). Ovaj sučeono zavareni spoj, ipak ima relativno visoku sklonost ka nastanku hladnih pukotina. Naime, razlika od 66HV dovodi ovaj zavareni spoj u zonu opasnosti od pojave pukotina, što je u skladu sa CE od 0,56% (slika II-4.).

4.3.2 Analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

Udarne radnje loma za čelik 13CrMo4-5, prema standardu BAS EN 10028-2 [20] se ispituje na temperaturi +20°C i minimalna propisana vrijednost je 31 J.

Vrijednost udarne radnje loma za sučeono zavareni spoj čelika 13CrMo4-5 dobiven REL postupkom zavarivanja iznosi 90 J, MAG postupkom 108 J, dok je TIG postupkom dobivena vrijednost od 89 J, što je veće od minimalno propisane vrijednosti.

Tabela III-16: Žilavost sučeono zavarenih spojeva čelika 13CrMo4-5

Na osnovu vrijednosti za udarnu radnju loma izračunata je žilavost (po formuli 21) čelika 13CrMo4-5 kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja i data u tabeli III-16.

Materijal / postupak		Žilavost (J/cm ²)
13CrMo4-5	REL	112,5
	MAG	135,0
	TIG	111,2

Najniža vrijednost udarne radnje loma i žilavosti za čelik 13CrMo4-5 je kod TIG postupka zavarivanja, gdje je otkriveno i najveće zrno u grubozrnatom dijelu ZUT-a.

4.3.3 Analiza rezultata ispitivanja mikrostrukture i veličine zrna

Mikrostruktura osnovnog materijala koji nije bio pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja, kod postupaka REL, MAG i TIG je trakasta feritno–perlitna (slike II-16. a) i f); II-17. a) i f); II-18. a) i f)).

Početak zone pod uticajem toplote, odnosno dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan u temperaturnom intervalu A_{c1} i A_{c3} predstavlja rekristalizirani dio ZUT-

a. Struktura odražava transformaciju perlita u austenit za vrijeme zagrijavanja, odnosno raspadom austenita za vrijeme sporog hlađenja nastaje mikrostruktura ferita, bainita i perlita kod REL i TIG postupka zavarivanja (slike II-16. b) i g); slike II-18.b) i g)); dok je kod MAG postupka zavarivanja u ovom dijelu ZUT-a nastala mikrostruktura ferita, perlita i bainita (slike II-17 b) i g)).

Dio osnovnog materijala koji je u toku zavarivanja zagrijan na temperature malo iznad A_{c3} se potpuno transformiše iz feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, odnosno za vrijeme bržeg hlađenja austenit se transformiše u ferit i bainit (slike II-13. c) i h) kod REL postupka zavarivanja; ferita i bainita kod REL i TIG postupaka zavarivanja (slike II-16.c) i h); slike II-18.c) i h)); dok je kod MAG postupka zavarivanja u ovom dijelu ZUT-a otkrivena mikrostruktura ferita, perlita i bainita (slike II-17 c) i h)).

Vrijednosti temperatura u ovom području odgovaraju temperaturama normalizacionog žarenja, što dovodi do značajnog usitnjavanja zrna.

Osnovni materijal koji je za vrijeme termičkog ciklusa zavarivanja zagrijan na temperature dosta iznad A_{c3} je pregrijani odnosno grubozrnati dio ZUT-a. Za vrijeme zagrijavanja dolazi do potpune transformacije feritno-perlitne mikrostrukture osnovnog materijala u austenit, a obzirom na vrijednosti temperatura koje vladaju u ovom dijelu ZUT-a dolazi do ogrubljenja austenitnog zrna. Uslijed velikih brzina hlađenja u ovom dijelu ZUT-a, dolazi do transformacije austenita u grubi bainit (sa koaguliranim karbidima unutar bainita) i martenzit (slike II-16. d) i i)) kod REL postupka zavarivanja; te bainit i martenzit (slike II-17 d) i i), i II-18. d) i i)) kod MAG i TIG postupaka zavarivanja.

Metal zavara ima livenu mikrostrukturu, koja je nastala hlađenjem istopljenog osnovnog i dodatnog materijala pod dejstvom termičkog ciklusa zavarivanja. Zavarivanje je provedeno u tri prolaza, tako da je mikrostruktura prethodnog prolaza (u korijenu metala zavara) pod djelovanjem termičkog ciklusa zavarivanja, odnosno dolazi do normalizacije mikrostrukture u korijenu metala zavara. U zadnjem prolazu, na licu metala zavara otkrivena je dendritna mikrostruktura ferita po granicama primarnih austenitnih zrna i bainit [30] (slike II-16. e); II-17 e); II-18. e)).

Pregled mikrostrukture osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara dat je u tabeli III-17.

Tabela III-17. Pregled mikrostrukture sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5

Lokacija			Postupak / mikrostruktura		
			REL	MAG	TIG
Osnovni materijal koji nije pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja			trakasta, ferit i perlit, slike II-16.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-174.a) i f)	trakasta, ferit i perlit, slike II-18.a) i f)
ZUT	ZUT između A_{c1} i A_{c3}	R	rekristalizirana, ferit, bainit i perlit, slike II-16.b) i g)	rekristalizirana, ferit, perlit i bainit, slike II-17.b) i g)	rekristalizirana, ferit, bainit i perlit, slike II-18.b) i g)
	ZUT malo iznad A_{c3}	SZ	normalizirana, ferit i bainit, slike II-16.c) i h)	normalizirana, ferit, perlit i bainit, slike II-17.c) i h)	normalizirana, ferit i bainit, slike II-18.c) i h)
	ZUT između A_{c3} i linije stapanja	GZ	bainit i martenzit, slike II-16.d) i i)	bainit i martenzit, slike II-17.d) i i)	bainit i martenzit, slike II-15.d) i i)
Metal zavara			livena struktura, ferit i bainit, slika II-16.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-17.e)	livena struktura, ferit i bainit, slika II-18.e)

Analiza mikrostrukture po zonama sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG pokazala je malu razliku u nastalim mikrokonstituentima u toku zavarivanja. Naime, prilikom zavarivanja čelika 13CrMo4-5 postupcima REL i TIG

dobivene su iste mikrostrukture u zoni pod uticajem toplote, dok su kod uzoraka zavarenih MAG postupkom zavarivanja otkrivene mikrostrukture sa manjom vrijednosti tvrdoće.

U tabeli III-18. je dat pregled veličina zrna osnovnog materijala i veličine zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a kod sučeono zavarenih spojeva čelika 13CrMo4-5 postupcima zavarivanja REL, MAG i TIG.

Tabela III-18. Veličina zrna kod čelika 13CrMo4-5

Postupak	Veličina zrna ASTM	
	Osnovni materijal	Grubozrnati dio ZUT-a
REL	8,5	6,5
MAG		6,5
TIG		5,5

Najveće ogrubljenje zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a otkriveno je kod TIG postupka zavarivanja, gdje je žilavost najmanja a tvrdoća najveća (prelazi maksimalno dozvoljene vrijednosti).

5. STATISTIČKA OBRADA REZULTATA ISPITIVANJA

Dobiveni rezultati ispitivanja tvrdoće i udarne radnje loma su obrađeni primjenom regresione analize [31, 32, 33, 34, 35, 36].

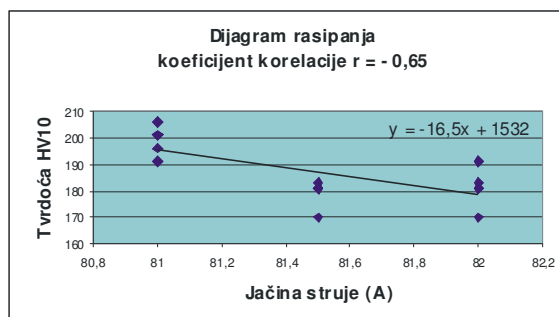
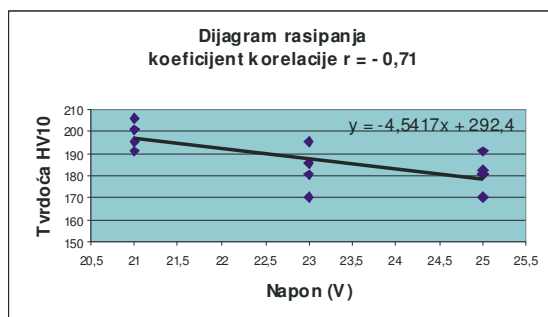
Postavljanjem i rješavanjem jednačina linearnog regresionog modela utvrđena je zavisnost fiziko-metalurških karakteristika tvrdoće i udarne radnje loma za čelike S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 od parametara zavarivanja – napona i jačine struje kod REL i TIG postupaka zavarivanja, te napona, jačine struje i brzine zavarivanja kod MAG postupka.

5.1 Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik S355J2G3

5.1.1 Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, (broj otiska 6, 7, 8, 12, 13 i 14) na uzorcima uzetim na početku, sredini i na kraju zavarivanja, prema slici II-4. kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja (od napona i jačine struje).

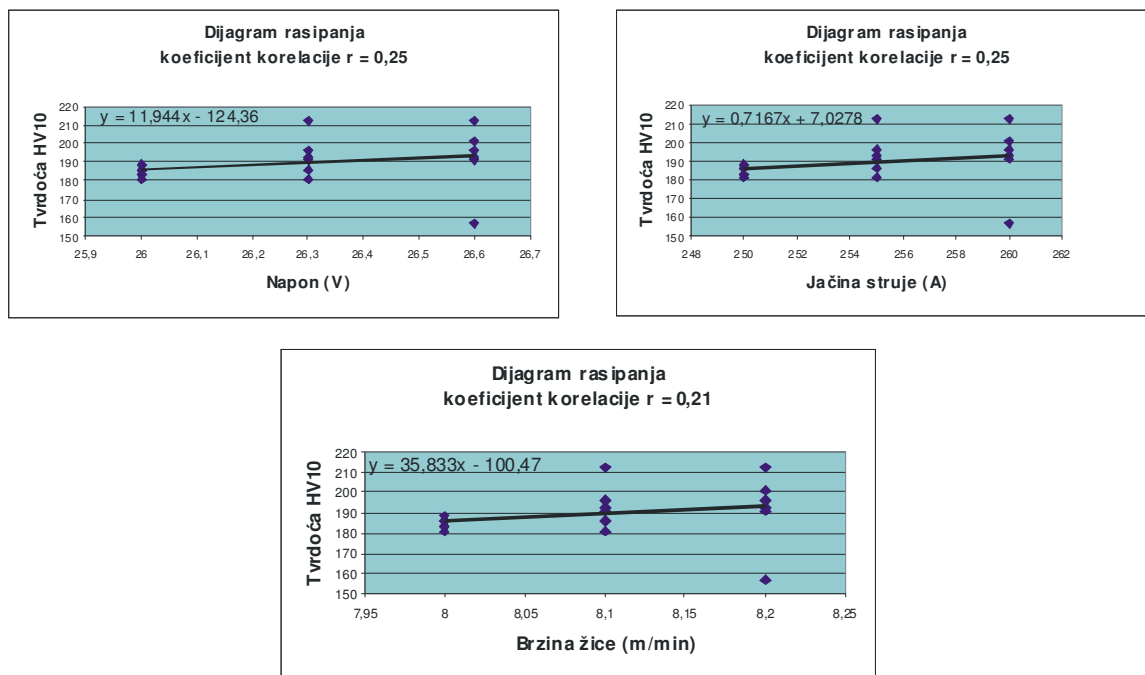
Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela za čelik S355J2G3 su dati na slikama III-1., III-2. i III-3. za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



Slika III-1. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

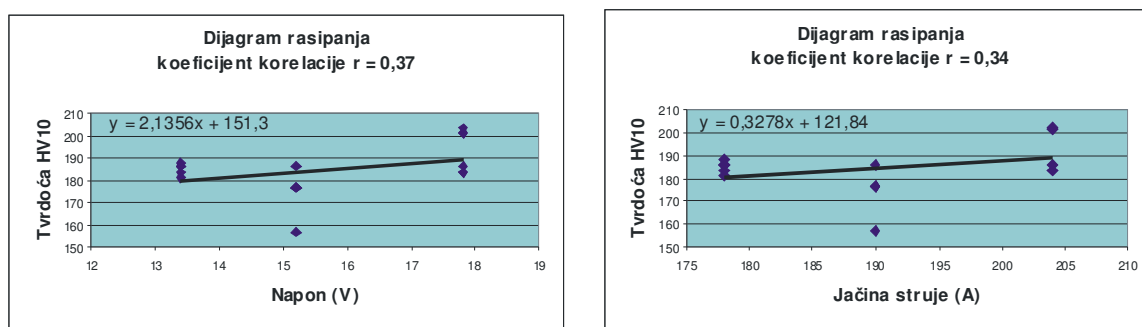
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost promjene tvrdoće čelika S355J2G3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Znači, ukoliko bi, u završnom

sloju, parametri zavarivanja napon i jačina struje kod REL postupka bili manji od vrijednosti datih u tabeli II-2. došlo bi do povećanja vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a.



Slika III-2. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, niska korelacija i mala povezanost promjene tvrdoće čelika S355J2G3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona, jačine struje i brzine žice kod zavarivanja MAG postupkom. Znači, ukoliko bi, u završnom sloju, parametri zavarivanja napon, jačina struje i brzine žice kod MAG postupka bili veći od vrijednosti datih u tabeli II-2. došlo bi do povećanja vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a (ovo treba uzeti sa rezervom zbog male vrijednosti koeficijenta korelacije r).



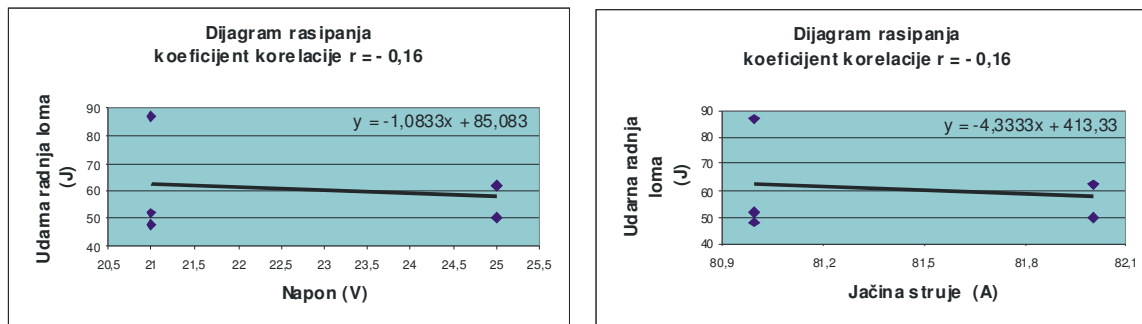
Slika III-3. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, niska korelacija i mala povezanost promjene tvrdoće čelika S355J2G3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Znači, ukoliko bi, u završnom sloju, parametri zavarivanja napon i jačina struje kod TIG postupka bili veći od vrijednosti datih u tabeli II-2. došlo bi do povećanja vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a.

5.1.2 Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

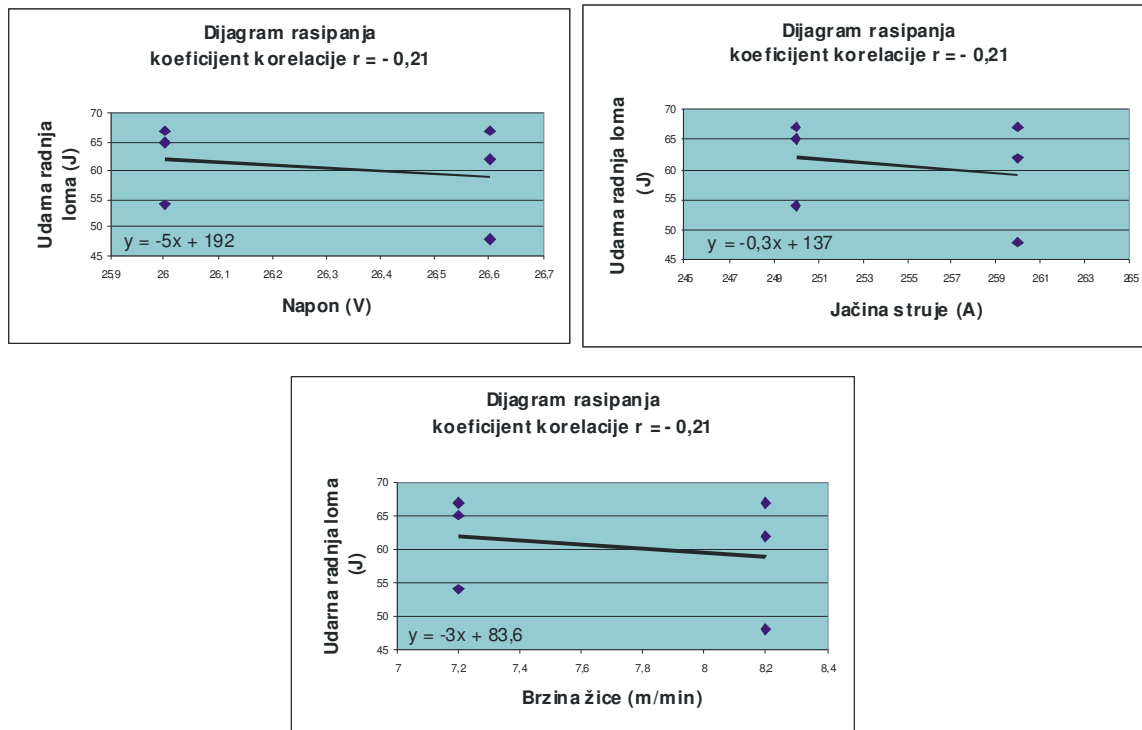
U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja udarne radnje loma, na epruvetama uzetim na početku i na kraju zavarivanja, prema slici II-4.

Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela dati su na slikama III- 4., III-5. i III-6. za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



Slika III-4. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

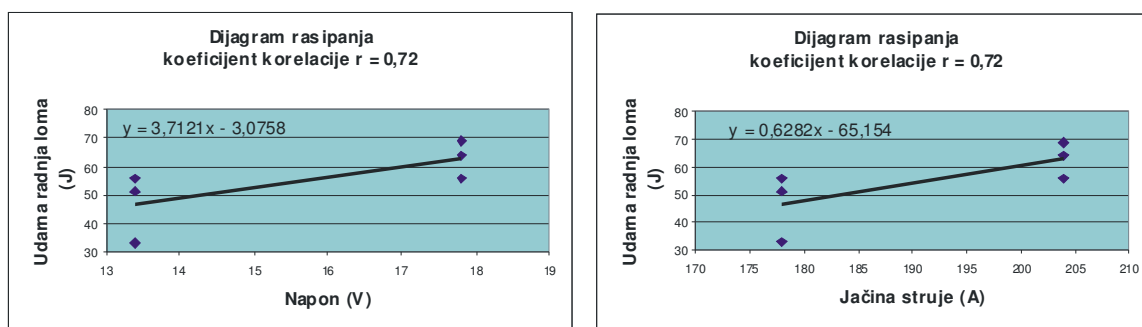
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost i neznatna korelacija između udarne radnje loma zavarenog spoja čelika S355J2G3 od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje kod REL postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. ne bi dovelo do većih promjena vrijednosti udarne radnje loma.



Slika III-5. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, niska korelacija i mala povezanost udarne radnje loma zavarenog spoja čelika S355J2G3 od napona,

jačine struje i brzine žice kod zavarivanja MAG postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do malih promjena vrijednosti udarne radnje loma.



Slika III-6. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika S355J2G3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

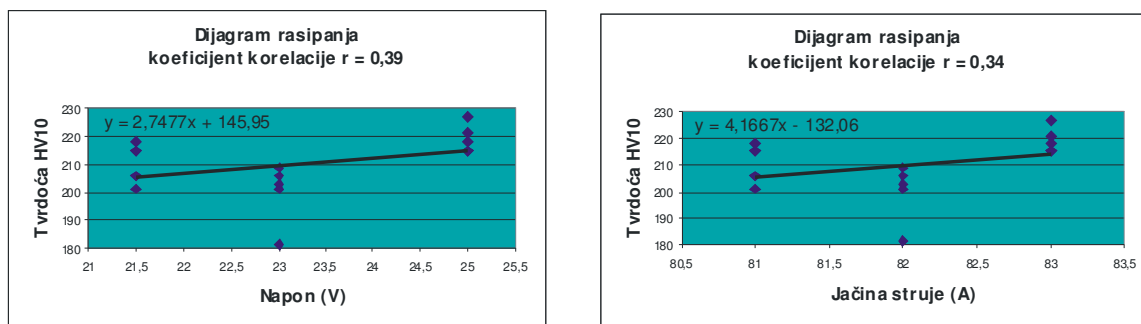
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, visoka korelacija i izrazita povezanost udarne radnje loma zavarenog spoja čelika S355J2G3 od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje kod TIG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do većih promjena vrijednosti udarne radnje loma. Naime, smanjenjem napona i jačine struje, u ovom slučaju, dolazi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.

5.2 Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik 16Mo3

5.2.1 Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, (broj otiska 6,7,8,12,13 i 14) na uzorcima uzetim na početku, sredini i na kraju zavarivanja, prema slici II-4.

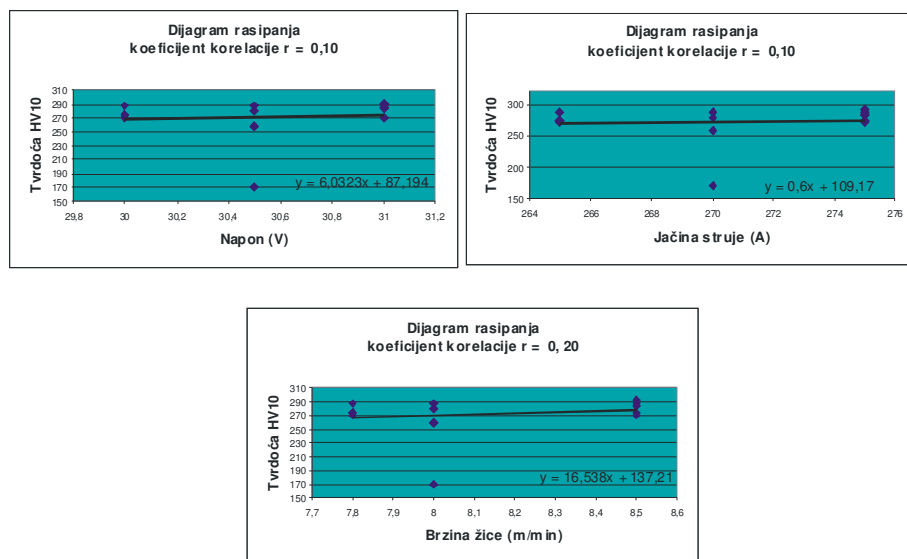
Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela dati su na slikama III- 7., III-8. i III-9. za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



Slika III-7. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

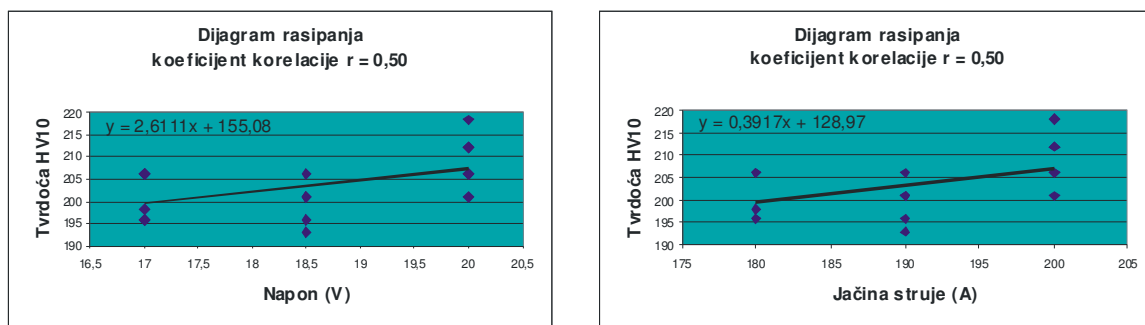
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, niska korelacija i mala povezanost tvrdoće čelika 16Mo3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Povećanjem vrijednosti parametara

zavarivanja, napona i jačine struje kod REL postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do manjih promjena vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a.



Slika III-8. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost i neznatna korelacija između tvrdoće čelika 16Mo3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona, jačine struje i brzine žice kod zavarivanja MAG postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do malih promjena vrijednosti tvrdoće.



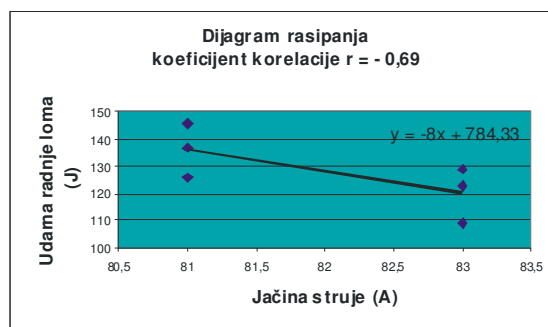
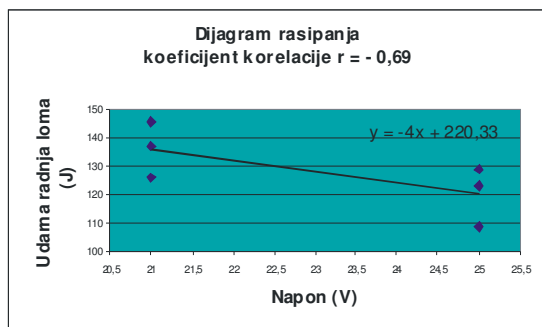
Slika III-9. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost tvrdoće čelika 16Mo3 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Znači, ukoliko bi, u završnom sloju, parametri zavarivanja napon i jačina struje kod TIG postupka bili veći od vrijednosti datih u tabeli II-2. došlo bi do povećanja vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a.

5.2.2 Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

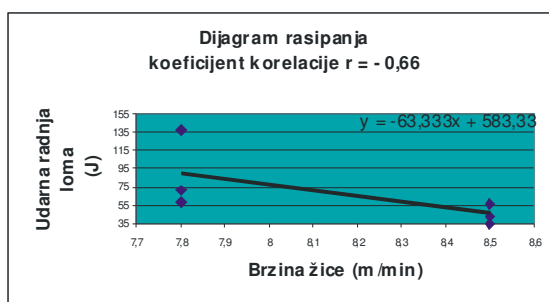
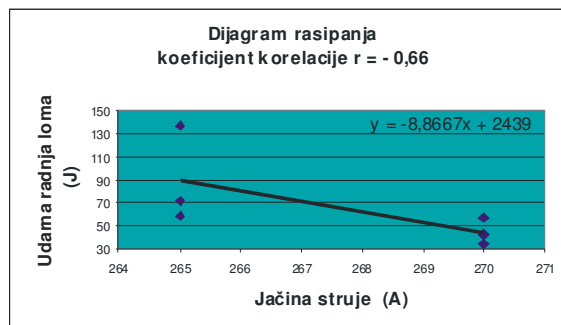
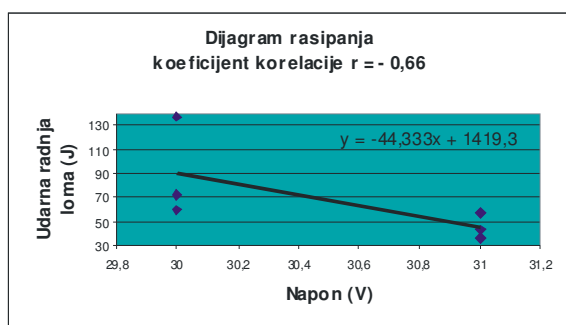
U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja udarne radnje loma, na epruvetama uzetim na početku i na kraju zavarivanja, prema slici II-4.

Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela dati su na slikama III-10., III-11. i III-12. za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



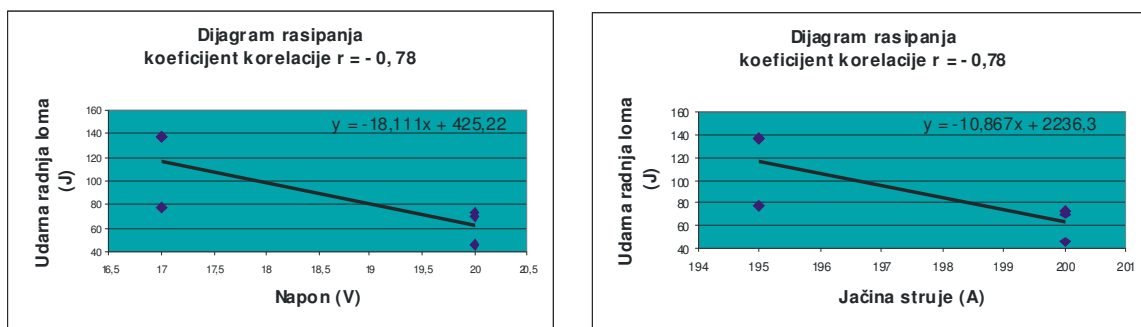
Slika III-10. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 16Mo3 od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Znači, povećanje parametara zavarivanja napona i jačine struje kod REL postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3.



Slika III-11. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost između udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 16Mo3 od napona i jačine struje kod zavarivanja MAG postupkom. Znači, povećanje parametara zavarivanja napona i jačine struje kod MAG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.



Slika III-12. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

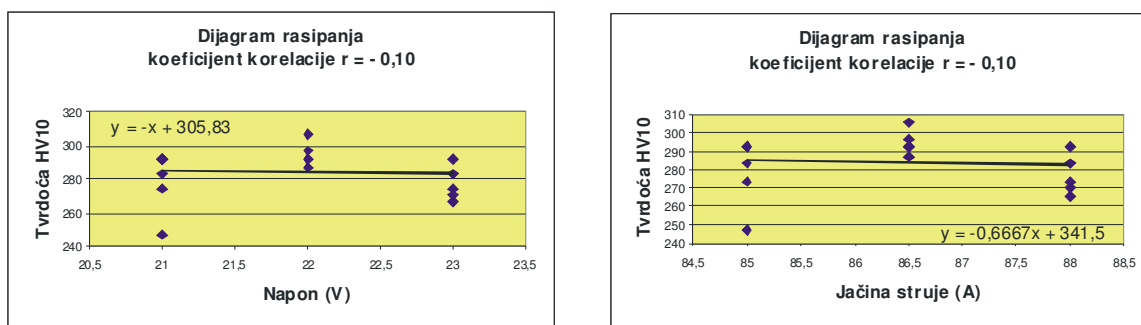
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, visoka korelacija i izrazita povezanost između udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 16Mo3 od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Malo povećanje parametara zavarivanja napona i jačine struje kod TIG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 16Mo3, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.

5.3 Regresiona analiza rezultata ispitivanja za čelik 13CrMo 4-5

5.3.1 Regresiona analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

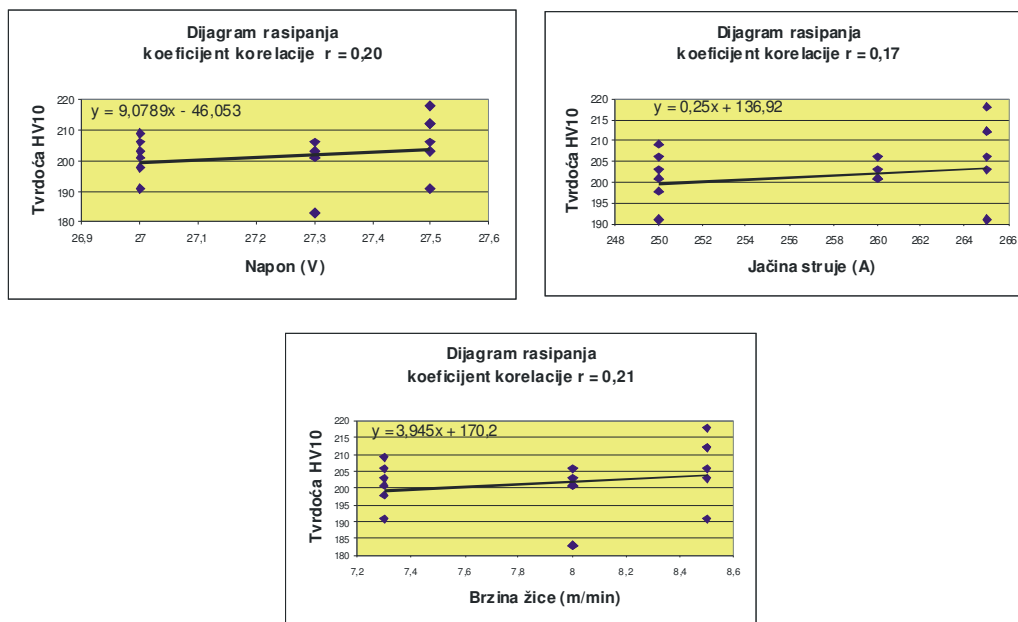
U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a, (broj otiska 6, 7, 8, 12, 13 i 14) na uzorcima uzetim na početku, sredini i na kraju zavarivanja, prema slici II-4 kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja.

Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela za čelik 13CrMo4-5 su dati na slikama III-13., III-14. i III-15 za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



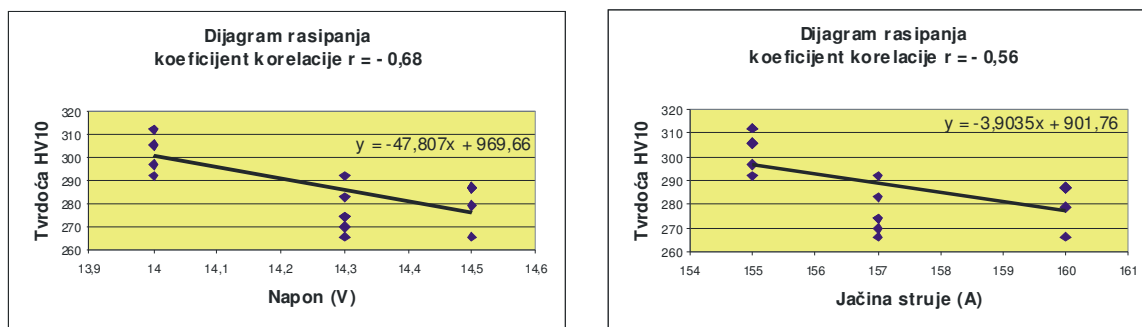
Slika III-13. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost i neznatna korelacija tvrdoće čelika 13CrMo4-5 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje žice kod REL postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do malih promjena vrijednosti tvrdoće.



Slika III-14. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se direktna zavisnost, niska korelacija i mala povezanost tvrdoće čelika 13CrMo4-5 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona, jačine struje i brzine žice kod zavarivanja MAG postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do malih promjena vrijednosti tvrdoće.



Slika III-15. Zavisnost tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

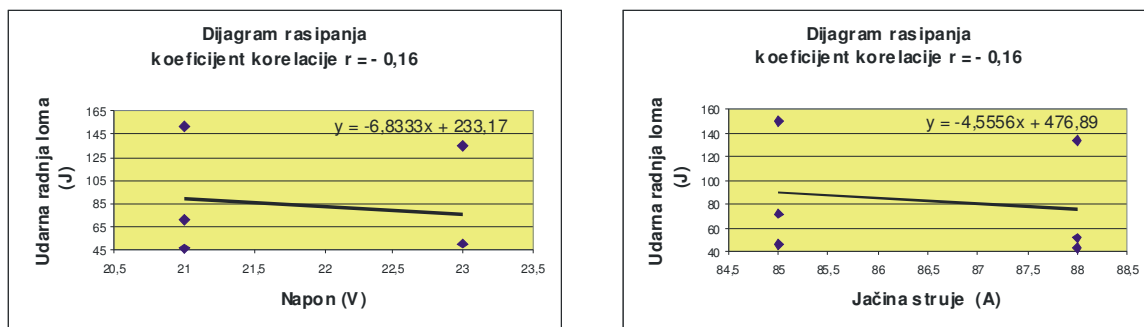
Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost tvrdoće čelika 13CrMo4-5 u grubozrnatom dijelu ZUT-a od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Znači, ukoliko bi, u završnom prolazu, parametri zavarivanja napon i jačina struje kod TIG postupka bili manji od vrijednosti datih u

tabeli II-2. došlo bi do povećanja vrijednosti tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a. Obzirom na vrijednost CE od 0,56% i debljinu lima 10 mm, prema slici II-4., ovako izabrani parametri zavarivanja dovode zavareni spoj u oblast povećane opasnosti od pojave pukotina.

5.3.2 Regresiona analiza rezultata ispitivanja udarne radnje loma

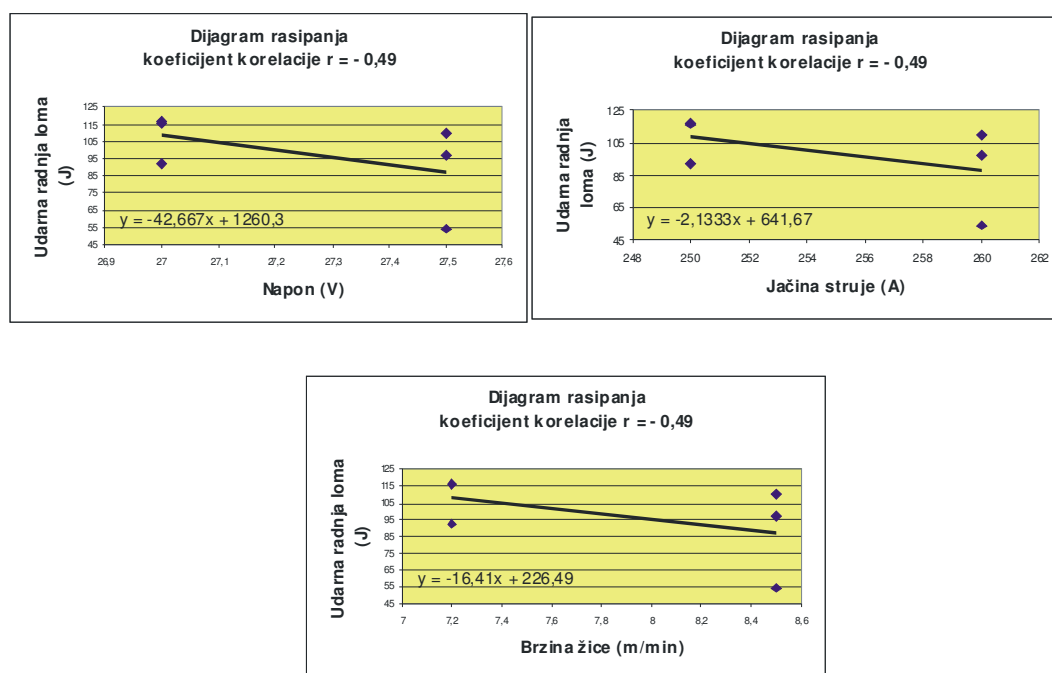
U regresionu analizu uključeni su rezultati ispitivanja udarne radnje loma, na epruvetama uzetim na početku i na kraju zavarivanja, prema slici II-4.

Dijagrami rasipanja, koeficijent korelacije i jednačine linearnog regresionog modela dati su na slikama III-16., III-17. i III-18. za postupke REL, MAG i TIG respektivno.



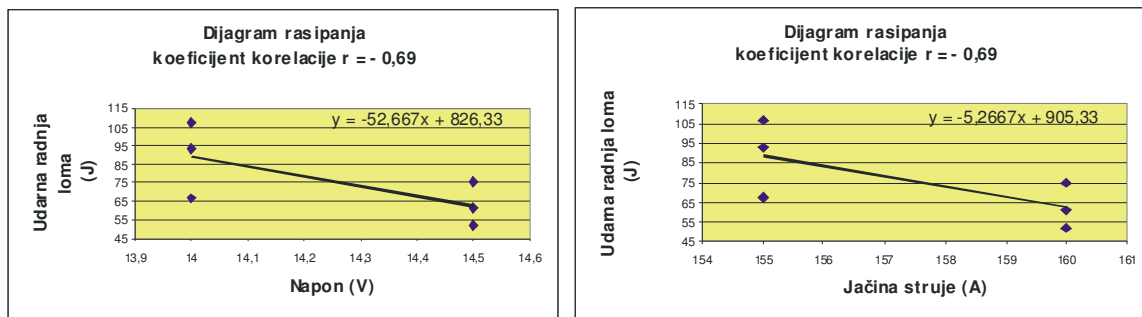
Slika III-16. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod REL postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost i neznatna korelacija udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od napona i jačine struje kod zavarivanja REL postupkom. Povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje kod REL postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. ne bi dovelo do većih promjena vrijednosti udarne radnje loma.



Slika III-17. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona, jačine struje i brzine žice kod MAG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od napona, jačine struje i brzine žice kod zavarivanja MAG postupkom. Znači, povećanje parametara zavarivanja napona i jačine struje kod MAG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.



Slika III-18. Zavisnost udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od parametara napona i jačine struje kod TIG postupka

Prema dijagramu rasipanja i koeficijentu korelacije uočava se inverzna zavisnost, umjerena korelacija i bitna povezanost udarne radnje loma zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5 od napona i jačine struje kod zavarivanja TIG postupkom. Znači, povećanje parametara zavarivanja napona i jačine struje kod TIG postupka u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo bi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma sučeono zavarenog spoja čelika 13CrMo4-5, što može uticati na eksploatacione osobine zavarenog spoja.

Tabelarni prikaz vrijednosti koeficijenata korelacije i povezanosti fiziko-metalurških karakteristika tvrdoće i udarne radnje loma sa parametrima zavarivanja dat je u tabeli III-19.

Tabela III-19. Pregled vrijednosti koeficijenata korelacije i povezanosti fiziko-metalurških karakteristika tvrdoće i udarne radnje loma sa parametrima zavarivanja

Materijal / postupak / parametar			Koeficijent korelacije			
			Tvrdoća		Udarne radnje loma	
			vrijednost	povezanost	vrijednost	povezanost
S355J2G3	REL	Napon	-0,71	Bitna povezanost i umjerena korelacija	-0,16	Neznatna korelacija
		Jačina struje	-0,65		-0,16	
	MAG	Napon	0,25	Mala povezanost i niska korelacija	-0,21	Mala povezanost i niska korelacija
		Jačina struje	0,25		-0,21	
		Brzina žice	0,21		-0,21	
	TIG	Napon	0,37	Mala povezanost i niska korelacija	0,72	Izrazita povezanost i visoka korelacija
		Jačina struje	0,34		0,72	
16Mo3	REL	Napon	0,39	Mala povezanost i niska korelacija	-0,69	Bitna povezanost i umjerena korelacija
		Jačina struje	0,34		-0,69	
	MAG	Napon	0,10	Neznatna korelacija	-0,66	Bitna povezanost i umjerena korelacija
		Jačina struje	0,10		-0,66	
		Brzina žice	0,20		-0,66	
	TIG	Napon	0,50	Bitna povezanost i umjerena korelacija	-0,78	Izrazita povezanost i visoka korelacija
		Jačina struje	0,50		-0,78	
13CrMo4-5	REL	Napon	-0,10	Neznatna korelacija	-0,16	Neznatna korelacija
		Jačina struje	-0,10		-0,16	
	MAG	Napon	0,20	Mala povezanost i niska korelacija	-0,49	Bitna povezanost i umjerena korelacija
		Jačina struje	0,17		-0,49	
		Brzina žice	0,21		-0,49	
	TIG	Napon	-0,68	Bitna povezanost i umjerena korelacija	-0,69	Bitna povezanost i umjerena korelacija
		Jačina struje	-0,56		-0,69	

6. ZAKLJUČCI

Na osnovu teoretskih razmatranja i rezultata provedenih ispitivanja na sučeono zavarenim uzorcima čelika S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 postupcima REL, MAG i TIG u okviru eksperimentalnog dijela rada može se zaključiti slijedeće:

1. Različit hemijski sastav čelika S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5, određuje i različite vrijednosti ekvivalenta ugljika CE. Najveću vrijednost CE ima čelik 13CrMo4-5, koje se prema vrijednosti CE od 0,56% (tabela II-3. i slika II-4.) nalazi u oblasti povećane opasnosti od pojave pukotina. Kod zavarivanja ovog kvaliteta čelika mora se obratiti posebna pažnja na izbor temperature predgrijavanja i međuslojeva, da ne bi došlo do pojave krtih mikrostrukturnih konstituenata.
2. Zavarivanje ispitnih uzoraka izvedeno je u skladu sa proračunatim vrijednostima za temperaturu predgrijavanja.
3. U pogledu rezultata ispitivanja za čelik S355J2G3:
 - nema bitne razlike u promjeni mikrostrukture osnovnog materijala u zoni pod uticajem toplote (slike II-10. do II-12.). Dobivene vrijednosti tvrdoće u zoni pod uticajem toplote kod sva tri postupka su manje od maksimalno dozvoljenih i u skladu su sa utvrđenom mikrostrukturom;
 - na osnovu rezultata regresione analize (tabela III-19.) utvrđeno je da bi smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja napona i jačine struje u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo do povećanja tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a kod REL postupka, dok bi kod MAG i TIG postupaka zavarivanja povećanje napona i jačine struje dovelo do povećanja tvrdoće;
 - dobivene vrijednosti udarne radnje loma kod sva tri postupka zavarivanja su iznad minimalno propisane vrijednosti. Najveće ogrubljenje zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a je kod TIG postupka zavarivanja što je u skladu sa najmanjom vrijednosti udarne radnje loma (tabele III-4. i III-6.);
 - regresionom analizom utvrđeno je da povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. ne bi dovelo do većih promjena vrijednosti udarne radnje loma kod REL postupka, dok bi kod MAG postupka povećanje ili smanjenje vrijednosti parametara zavarivanja dovelo do malih promjena vrijednosti udarne radnje loma. Kod TIG postupka zavarivanja, obzirom na izrazitu povezanost parametara sa promjenama fiziko-metalurških karakteristika, smanjenje napona i jačine struje dovodi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.
4. U pogledu rezultata ispitivanja za čelik 16Mo3:
 - otkrivena je razlika u promjeni mikrostrukture osnovnog materijala u zoni pod uticajem toplote (slike II-13. do II-15.) i u skladu su sa dobivenim vrijednostima tvrdoće. Dobivene vrijednosti tvrdoće u zoni pod uticajem toplote kod postupaka REL i TIG su manje od maksimalno dozvoljenih, dok su u korijenu ZUT-II kod MAG postupka zavarivanja izmjerene vrijednosti koje prelaze očekivanu maksimalnu vrijednost i maksimalno dozvoljenu vrijednost po standardu BAS EN 15614-1 (tabele III-8. i III-9.) što upućuje na veću brzinu hlađenja u toku zavarivanja. Veća brzina hlađenja je dovela do formiranja nepoželjne martenzitne mikrostrukture u ZUT-u (slika II-14.j);
 - na osnovu rezultata regresione analize (tabela III-19.) utvrđeno je da bi povećanje vrijednosti parametara zavarivanja napona i jačine struje u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo do povećanja tvrdoće u grubozrnatom dijelu ZUT-a kod REL i TIG postupaka zavarivanja, dok je kod MAG postupka neznatna korelacija

parametara zavarivanja sa promjenom tvrdoće u ZUT-u, što znači da bi povećanje ili smanjenje vrijednosti napona, jačine struje i brzine žice u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo do malih promjena vrijednosti tvrdoće;

- dobivene vrijednosti udarne radnje loma kod sva tri postupka zavarivanja su iznad minimalno propisane vrijednosti. Najveće ogrubljenje zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a je kod MAG postupka zavarivanja što je u skladu sa najmanjom vrijednosti udarne radnje loma (tabele III-10. i III-12.);
 - regresionom analizom utvrđeno je da bi povećanje vrijednosti parametara zavarivanja, napona i jačine struje u odnosu na vrijednosti date u tabeli II-2. dovelo do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma kod REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja. Kod TIG postupka zavarivanja, obzirom na izrazitu povezanost parametara sa promjenama fiziko-metalurških karakteristika, smanjenje napona i jačine struje dovodi do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.
5. U pogledu rezultata ispitivanja za čelik 13CrMo4-5:
- otkrivena je razlika u promjeni mikrostrukture osnovnog materijala u zoni pod uticajem toplote (slike II-16. do II-18.) i u skladu su sa dobivenim vrijednostima tvrdoće. Dobivene vrijednosti tvrdoće u zoni pod uticajem toplote kod postupaka REL i MAG su manje od maksimalno dozvoljenih, dok je u ZUT-u kod TIG postupka zavarivanja izmjerena vrijednost koja prelazi maksimalno dozvoljenu vrijednost po standardu BAS EN 15614-1 (tabela III-15.) što upućuje na veću brzinu hlađenja u toku zavarivanja. Ovako visoka vrijednost tvrdoće i CE od 0,56% dovode ovaj zavareni spoj u zonu opasnosti od pojave pukotina što je u skladu sa slikom II-4;
 - na osnovu rezultata regresione analize (tabela III-19.) utvrđena je neznatna korelacija promjene vrijednosti tvrdoće od parametara zavarivanja napona i jačine struje kod REL i MAG postupaka, dok bi kod TIG postupka zavarivanja smanjenje napona i jačine struje dovelo do povećanja tvrdoće;
 - dobivene vrijednosti udarne radnje loma kod sva tri postupka zavarivanja su iznad minimalno propisane vrijednosti. Najveće ogrubljenje zrna u grubozrnatom dijelu ZUT-a je kod TIG postupka zavarivanja što je u skladu sa najmanjom vrijednosti udarne radnje loma (tabele III-16. i III-18.);
 - regresionom analizom utvrđena je neznatna korelacija između promjene vrijednosti udarne radnje loma i parametara zavarivanja kod REL postupka, dok bi kod MAG i TIG postupaka povećanje vrijednosti parametara zavarivanja dovelo do smanjenja vrijednosti udarne radnje loma, što može imati loše posljedice u eksploataciji zavarenog spoja.

Na osnovu navedenog se može zaključiti da je čelik S355J2G3 dobro zavariv i primjena parametara zavarivanja za postupke REL, MAG i TIG kao u tabeli II-2. obezbjeđuje dobar sučeono zavareni spoj. Kod zavarivanja čelika 16Mo3 primjenom parametara zavarivanja kao u tabeli II-2. za REL i TIG postupke zavarivanja obezbjeđen je dobar sučeono zavareni spoj, dok kod MAG postupka sa parametrima datim u tabeli II-2 sučeono zavareni spoj ima visoku sklonost ka nastanku hladnih pukotina, i kod zavarivanja se mora posvetiti posebna pažnja odabiru temperature predgrijavanja i temperature međusloja, da bi se izbjegle visoke vrijednosti tvrdoće u ZUT-u. Zavarivanjem čelika 13CrMo4-5 postupcima REL i MAG a primjenom parametara zavarivanja iz tabele II-2. obezbjeđen je dobar sučeono zavareni spoj, dok se kod zavarivanja TIG postupkom mora voditi računa o temperaturi predgrijavanja i međusloja. Naime, većim brzinama hlađenja i mogućnošću nastanka krtih struktura, ovaj čelik, sa CE=0,56% se nalazi u zoni opasnosti od pojave pukotina što je u skladu sa slikom II-4.

Provedenim istraživanjima utvrđeno je da postoji ovisnost između parametara REL, MAG i TIG postupaka zavarivanja i fiziko-metalurških karakteristika tri kvaliteta čelika – S355J2G3, 15Mo3 i 13CrMo4-5. Ovisnost tvrdoće od parametara zavarivanja je najviše izražena kod čelika S355J2G3 kod REL postupka, odnosno kod čelika 16Mo3 i 13CrMo4-5 kod TIG postupka zavarivanja. Ovisnost udarne radnje loma od parametara zavarivanja je najviše izražena kod zavarivanja TIG postupkom za sva tri kvaliteta čelika.

Ovim se potvrđuju postavljeni ciljevi istraživanja o uzajamnoj ovisnosti fiziko-metalurških karakteristika čelika S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 od parametara zavarivanja kod REL, MAG i TIG postupaka.

Rad pruža važne podatke za metalnu industriju koja se bavi proizvodnjom, zavarivanjem i ugradnjom raznih konstrukcionih čelika za veoma odgovorne objekte.

Takođe, rad pruža smjernice za dalje istraživanje u ovom pravcu, tj. proširivanje ovih ispitivanja na druge vrste čelika i postupaka zavarivanja, te analizu i ostalih uticajnih faktora pri zavarivanju kao što su vrsta elektrode, uslovi zavarivanja, predgrijavanje i sl.

L I T E R A T U R A

- [1] *Pavle Pavlović* Časopis „Hemijska industrija“, broj 47,1998.
- [2] *Ivan Hrivnjak* Teorija zavarivosti metala i legura, Slovačka akademija nauka, Bratislava, 1989.
- [3] *Omer Pašić* Zavarivanje, IP Svjetlost d.d. Sarajevo, 1998.
- [4] *INTERNET* Zavarivanje i zavarene konstrukcije (1/2004), str.43-46,
www.duzs.org.rs/casopis_files/abstracts/2004/1.../43-1-2004.pdf
- [5] *INTERNET* <http://brod.sfsb.hr/kth/zavar/tii/predg.html>
- [6] *Standard* BAS EN 1011-2:02- Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika
- [7] *INTERNET* <http://webmail.mef.unsa.ba/mts/docs/vTS1-V5-Strukturne%20transformacije.pdf>
- [8] *J.F. Lancaster* Metallurgy of welding, George Allen&Unwin, Boston 1980.
- [9] *ITO Y., Ikeda M., Nakanishi M., Kohyama A.* The effect of alloying elements on Charpy impact properties of welded bond, Doc.IIW IX-842-72
- [10] *Coe F.R* Welding steel without hydrogen cracking, Doc. IIW –II-512-69
- [11] *Ivan Hrivnjak* Analytical calculation methods used in determining the weldability of steels, Proc. Of.the int.conf. JOM-2, Helsingor, april 15-18, 1984
- [12] *C. Düren* Formulae for calculating the maximum hardness in the heat affecting zone of welded joints, Doc IIW-IX-1473-86
- [13] *P.H.M. Hart, P.L. Harrison* Compositional parameters for HAZ cracking and hardening in C-Mn steels, Doc.IIW-IX-1440-86
- [14] *T. Terasaki, T. Akiyama, M. Serino* Chemical composition and welding procedure to avoid cracking, Proc. of the Int. Conf.JOM-2, Helsingor, april 15-18, 1984
- [15] *N. Yurioka at al.* Prediction of HAZ hardness of transformable steels, Metal construction, april, 1987
- [16] *I. Vitez, M. Oruč R. Sunulahpašić* Ispitivanje metalnih materijala, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2006
- [17] *Pavle Pavlović* Materijal čelik, SKTH/Kemija u industriji, Zagreb, 1990.

- [18] *Rimac Milan* Kontrola sa razaranjem, Kontrola kvaliteta u zavarivanju, MIZ, Zenica, 1982.
- [19] *Standard* BAS EN 10025-2:05 -Toplo valjani proizvodi od konstrukcionih čelika– Dio 2: Tehnički uslovi isporuke za nelegirane konstrukcije čelike
- [20] *Standard* BAS EN 10028-2:04 – Pljosnati čelični proizvodi za rad pod pritiskom – Dio 2:Nelegirani i niskolegirani čelici sa definisanim osobinama na povišenim temperaturama
- [21] *Standard* BAS EN 15614-1:05 – Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja metalnih materijala - Ispitivanje postupka zavarivanja- Dio 1: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla
- [22] *Standard* BAS EN 1043-1:09 Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala - Ispitivanje tvrdoće - Dio 1: Ispitivanje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva
- [23] *Standard* BAS EN ISO 6507-1: 2007 – Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće po Vickersu – Dio 1: Ispitna metoda
- [24] *Standard* ASTM E 407- Mikronagrizanje metala i legura
- [25] *Metals handbook* Metals handbook, Vol 8, Metallography, Structures and phase diagrams, 8th edition, American Society for metals, Ohio, USA
- [26] *Herman Šuman* Metalografija, Univerzitet u Beogradu, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd, 1962.
- [27] *Metals handbook* Metals handbook, Vol 7, Metallography, Atlas of microstructures of industrial alloys, 8th edition, American Society for metals, Ohio, USA
- [28] *De Ferry metallographia* Metalografija željeza I, Osnovi metalografije I sa atlasom mikrofotografija, Moskva 1972.
- [29] *Standard* ASTM E 112:96 – Standardna ispitna metoda za određivanje prosječne veličine zrna
- [30] *De Ferry metallographia* *De Ferry metallographia IV, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1983.*
- [31] *Džorž V. Snidikor i Viljem C. Kohren* Statistički metodi, Vuk Karadžić, Beograd, 1971.
- [32] *Tomka Subašić* Vjerovatnoća i matematička statistika, FMM, Univerzitet u Zenici, Zenica 2007.
- [33] *J.R.Green and D. Margerison* Statistical treatment of experimental data, Amsterdam 1978, Elsevier Scientific publishing company
- [34] *INTERNET* <http://hr.wikipedia.org/wiki/Korelacija>

- [35] *INTERNET* <http://www.efbl.org/upload/2410900-Menadzment-kvaliteta-Prezentacija-Dijagram-rasipanja-korelaciona-i-regresiona-analiza-2010-03-30.pdf>
- [36] *INTERNET* <http://www.efbl.org/upload/5086231-Menadzment-kvaliteta-Vjezbe-Dijagram-rasipanja-korelaciona-i-regresiona-analiza-2010-03-30.pdf>
- [37] *INTERNET* <http://www.ram-rijeka.com/ContentDetails/2235/lang/Croatian/Osnovni-postupci-zavarivanja.wshtml>
- [38] *INTERNET* <http://brod.sfsb.hr/kth/zavar1/3.1.pdf>
- [39] *Sadin Zalihić* Zavarivanje i srodni postupci, Sarajevo, 1998.
- [40] *INTERNET* <http://mef.unsa.ba>
- [41] *Edib Tarabar* Konvencionalni i nekonvencionalni postupci zavarivanja, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 1999

A1. POSTUPCI ZAVARIVANJA

Osnovne karakteristike postupaka zavarivanja, kod izbora optimalnog postupka pri proizvodnji zavarenih elemenata i konstrukcija su:

- osnovni princip i izvor energije,
- način zaštite spoja za vrijeme zavarivanja,
- vrsta i način dovođenja dodatnog materijala,
- mogućnosti primjene postupka,
- produktivnost postupka,
- mogućnost mehanizacije, automatizacije i robotizacije,
- poznavanje opreme i instalacija,
- poznavanje zahtjeva vezanih za obuku i rad operatera,
- mogućnost postupka sa aspekta kvaliteta [3].

Prema načinu spajanja metode zavarivanja se dijele u dvije velike grupe:

a) zavarivanje topljenjem - zavarivanje materijala u rastopljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega:

- plinsko zavarivanje,
- elektrolučno zavarivanje.

b) zavarivanje pritiskom - zavarivanje materijala u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja pomoću pritiska ili udarca:

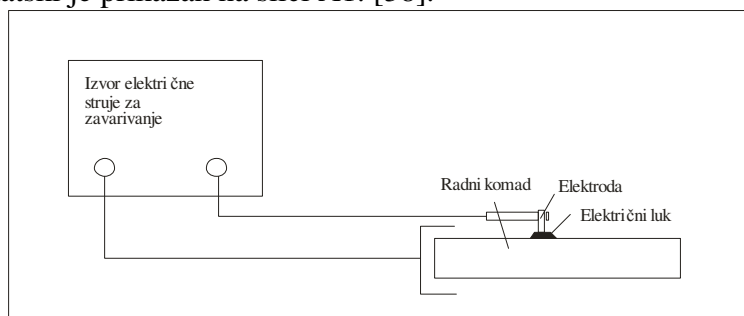
- kovačko zavarivanje,
- elektrootporno zavarivanje.

Primjena zavarivanja kao načina spajanja danas ima veliki značaj, za primjer na jednom tankeru nosivosti 82.000 t zavaruje se: 261.6 km kutnih spojeva i 11.6 km sučeonih spojeva.

Na postrojenjima velikih termoelektrana ili na nuklearnim elektranama, rafinerijama nafte ima po 10.000 do 100.000 zavarenih spojeva cijevi pod pritiskom [37].

A1.1 Glavni parametri elektrolučnih postupaka zavarivanja

Elektrolučni postupci zavarivanja međusobno se dosta razlikuju ali svima je zajedničko da postoji električni luk, a također im je zajedničko da se ubrajaju u postupke zavarivanja topljenjem. Električni luk se uspostavlja između dvije elektrode, a to su kod zavarivanja elektroda (koja može biti i dodatni materijal) i radni komad. Postupak elektrolučnog zavarivanja shematski je prikazan na slici A1. [38].



Slika A1. Shematski prikaz elektrolučnog zavarivanja [38]

Električni luk je intenzivno izbijanje u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji nastaju prvenstveno od metala elektrode, obloge, zaštitnih plinova ili praškova.

Kod raznih autora postoje različitosti u skupu parametara zavarivanja, ali svi se slažu u jednome da je propisivanje parametara zavarivanja neophodno za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja. Pravilnim propisivanjem i provođenjem parametara zavarivanja osigurava se kvalitetan zavar, zavar bez proizvodnih, strukturnih i geometrijskih grešaka, odnosno sa potrebnim mehaničkim osobinama. Skup glavnih parametara zavarivanja za određeni materijal i geometriju (debljina, ostale dimenzije) određuje slijedeće veličine:

- napon električnog luka, $U(V)$
- jačina struje za zavarivanje, $I(A)$
- brzina zavarivanja, $v(mm/s)$
- stupanj iskorištenja energije u električnom luku, η
- unesena toplota, E_{ef}
- temperatura metala koji se zavaruje definirana temperaturom predgrijavanja i
- temperaturom međuprolaza .

Kao važne varijable elektrolučnih postupaka često se navode:

- dužina električnog luka $L(mm)$,
- promjer elektrode odnosno žice,
- vrsta i polaritet struje,
- duljina slobodnog kraja žice.

A1.1.1 Napon električnog luka

Napon električnog luka pri zavarivanju kreće se orijentacijski u granicama od 18 do 35 V. Dužina luka određuje i napon luka, a kod REL postupaka zavarivanja zavisi o promjeru elektrode i tipu njene obloge. U praksi se kod REL postupaka zavarivanja dužina električnog luka određuje orijentacijski na osnovu promjera i tipa obloge elektrode. Tako se u praksi koriste slijedeće orijentacijske vrijednosti za duljinu električnog luka:

- $L = d(mm)$ (za rutilne, kisele, celulozne obložene elektrode)
- $L = 0,5 d(mm)$ (za bazično obložene elektrode) [38].

Povećanjem dužine luka povećava se toplotna energija u jedinici vremena, duži luk daje veći napon, veću količinu toplote, brže topljenje elektrode, što za posljedicu ima slabije zagrijavanje materijala i manju dubinu penetracije. S druge strane, prekratak luk uzrokuje povećanu turbulenciju kupke što dovodi do uključaka troske i grešaka naljepljivanja [39].

Uticaj napona na oblik zavara dat je na slici A2.



Slika A2. Uticaj napona zavarivanja na oblik zavara [38]

Pri REL zavarivanju nije moguće držati parametre zavarivanja konstantnim zbog samoga načina izvođenja postupka zavarivanja. Normalno je da zavarivaču zadrhti ruka, tu je prisutan i uticaj okoline te je normalno da se parametri zavarivanja uzimaju orijentacijski. Kod poluautomatiziranih postupaka zavarivanja, dužina luka i dužina slobodnog kraja žice vrlo je bitna i zbog njihovog uticaja na kvalitet zavarenog spoja i stabilnost procesa zavarivanja te se veličine nastoje održati nepromijenjene tokom zavarivanja.

A1.1.2 Jačina struje za zavarivanja

Kod REL postupka zavarivač bira samo jedan parametar na uređaju za zavarivanje, a to je struja zavarivanja. Struja zavarivanja prvenstveno zavisi od promjera elektrode koja će se koristiti u radu, što opet zavisi od deblje i vrste radnog komada, od hemijskog sastava elektrode jezgre, te o položaju zavarivanja. Proizvođač elektroda daje upute o preporučenim vrijednostima struje, a za grubo pravilo može se uzeti podatak da struja zavarivanja pri zavarivanju običnom elektrodom iznosi 30 do 40 A za svaki milimetar promjera jezgre.

Polaritet i vrsta struje se biraju prema vrsti obloge elektrode.

U slučaju korištenja bazične obložene elektrode, električni luk ima manju duljinu zbog teže ionizacije, što je posljedica sastava obloge. U slučaju da struja zavarivanja nije dobro odabrana, mijenja se oblik zavara kao i dubina penetracije.

Kod premale struje zavarivanja zavar je uzak i ima izrazito nadvišen oblik. Rastopljeni metal je relativno hladan i zbog toga nema dobro razlijevanje, a nema niti zagrijavanja osnovnog materijala pa je i penetracija mala.

Kod prejake struje zavarivanja postoji velika količina taline niske površinske napetosti pa se dobiva širok razliven zavar. Karakteristika zavara je da uz rubove zavara postoje zajedi (ugorine). Velika količina energije protaljuje osnovni materijal pa postoji i opasnost od prevelike penetracije i protaljivanja materijala. Prevelika struja daje grubozrnatu strukturu metala šava i povećava sagorijevanje legirajućih elemenata [39].

Kad je struja zavarivanja odgovarajuća, zavar ima zadovoljavajuću penetraciju, malo nadvišenje i blage prijelaze sa zavara prema osnovnom materijalu. Geometrijski oblik zavara značajno ovisi o parametrima zavarivanja od kojih su najznačajniji struja zavarivanja, napon na električnom luku te brzina zavarivanja. Promjena jednog parametra izaziva odmah i promjenu ostalih parametara. Parametri koji utiču na geometrijski oblik zavara su na primjer slobodna dužina žice, mjesto priključka mase na radni komad, nagib radnog komada, a postoje i još neki. Zbog toga je moguća upotreba jačih struja zavarivanja, stvara se velika količina taline te se osigurava velika penetracija. To stvara uslove za mogućnost procurenja taline na korijenskoj strani. U svrhu sprečavanja te pojave, odnosno da bi se pravilno oblikovao korijen zavara primjenjuju se podloge različitih oblika iz različitih materijala [38].

Uticaj struje zavarivanja na oblik zavara dat je na slici A3.

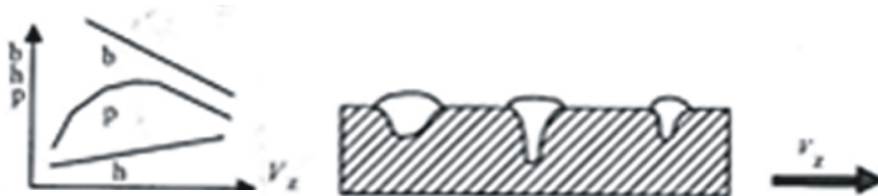


Slika A3. Uticaj jačine struje zavarivanja na oblik zavara [38]

A1.1.3 Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja zavisi od oblika i dimenzija spoja, vrste materijala i elektrode. Prevelika brzina zavarivanja dovodi do pojave neuvarenih mjesta jer je smanjena penetracija, povećava se nadvišenje lica zavara. Premala brzina zavarivanja dovodi do pojave troske u metalu zavara [39].

Uticaj brzine zavarivanja na oblik zavara dat je na slici A4. [38].

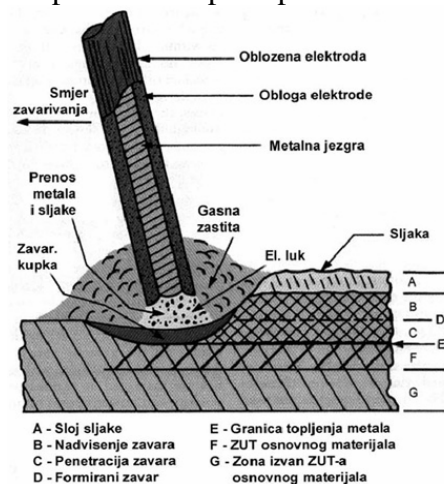


Slika A4. Uticaj brzine zavarivanja na oblik zavora [38]

A1.2 Ručno-elektrolučno zavarivanje oplštenom elektrodom (111-REL)

A1.2.1 Princip ručnog-elektrolučnog postupka zavarivanja oplštenom elektrodom

REL postupak zavarivanja je elektrolučni proces zavarivanja između elektrode i osnovnog materijala. Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne ili izmjenične). Za zavarivanje je poželjna istosmjerna struja sa stabilnim električnim lukom. Jačina električnog luka određuje se na osnovu propisanih vrijednosti iz odgovarajućih standarda. Toplina električnog luka rastapa osnovni materijal i dodatni materijal u elektrodi, koji se u kapljicama prenosi na osnovni materijal. Elektroda može biti vezana za plus ili minus pol zavisno od vrste elektrode. Rubovi koji se zavaruju moraju biti očišćeni od nečistoća koje sadrže ugljik te vlage. Sastav žice i obloge ima važnu ulogu u stvaranju kvalitetnog zavora. Pri tome sadržaj dodatnog materijala mora odgovarati sadržaju osnovnog materijala uz relativno malu korekciju zbog izgaranja nekih elemenata pri zavarivanju. Topljenjem jezgra elektrode popunjava se žlijeb, a topljenjem obloge štiti se istopljena masa na mjestu spoja od uticaja gasova iz atmosfere. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja je dat na slici A5. [40].



Slika A5. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [40]

U kupku zavora prelazi u kapljicama 90-95% rastopljenog metala sa elektrode, a samo 10-5% u parama. Pri prelazu kapljica sa elektrode u zavar djelimično izgara ugljik, silicij i mangan, dok se metal zavora istovremeno obogaćuje kisikom, vodikom i dušikom. Gubici nastali izgaranjem se nadoknađuju iz materije plašta elektrode.

Priprema materijala prije zavarivanja obuhvaća rezanje materijala, pripremu zavarivanih površina, čišćenje i djelimično zavarivanje ili učvršćivanje napravama radi obezbjeđenja

položaja zavarivanih materijala za vrijeme zavarivanja. Oblici stranica za zavarivanje se pripremaju rezanjem kisikom ili strojnom obradom [41].

A1.2.2 Parametri zavarivanja

Osnovni parametri REL postupka zavarivanja su [39]:

- a) vrsta i prečnik elektrode,
- b) jačina, vrsta i polaritet struje zavarivanja,
- c) dužina električnog luka,
- d) nagib elektrode,
- e) brzina zavarivanja,
- f) tehnika vođenja elektrode (njihanje),
- g) vrsta i kvalitet pripreme za zavarivanje.

- Na izbor vrste elektrode najvažniji uticaj imaju osobine osnovnog materijala koji se zavaruje, a izbor se vrši prema mehaničkim osobinama i hemijskom sastavu materijala. Prečnik elektrode u najvećoj mjeri zavisi od debljine osnovnog materijala koji se zavaruje i položaja zavarivanja.

- Jačina struje je najuticajniji parametar pri REL zavarivanju. Nakon izbora položaja zavarivanja, vrste i prečnika elektrode vrši se izbor jačine struje. Povećanje prečnika elektrode povećava i jačinu struje zavarivanja.

Opće pravilo za izbor jačine struje pri zavarivanju je [37]:

$$I \text{ (A)} = 40 \times d \text{ (mm)} \quad (24)$$

- Izbor jačine struje utiče na oblik šava i mehaničke osobine zavarenog spoja – povećanje jačine struje povećava dubinu uvarivanja (penetraciju h) i nadvišenje šava.

- Optimalna dužina električnog luka je udaljenost kraja elektrode od zavarivanog materijala i zavisi od vrste elektrode. Povećanje dužine luka povećava toplotnu energiju u jedinici vremena, što uzrokuje veću brzinu topljenja elektrode i zbog toga slabije zagrijavanje materijala što dovodi do manje penetracije. Prekratak luk dovodi do povećane turbulencije kupke što može uzrokovati pojavu uključaka troske i greške naljepljivanja, dok predugačak luk uzrokuje slabiju zaštitu kupke, gubitak materijala zbog rasprskavanja.

- Nagib elektrode utiče na penetraciju (dubinu uvara) i na dužinu električnog luka, znači da više nagnuta elektroda uzrokuje povećanje električnog luka i smanjenje penetracije. REL zavarivanje se izvodi sa nagibom elektroda od 70-90°.

- Brzina zavarivanja zavisi od oblika i dimenzija spoja, vrste materijala i elektrode. Prevelika brzina zavarivanja smanjuje penetraciju i pojačava nadvišenje zavara, dok premala brzina zavarivanja dovodi do pojave uključaka troske u zavaru.

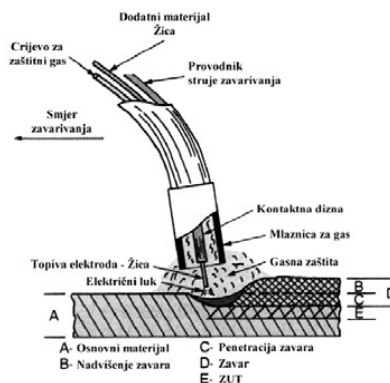
Najvažniji parametri koji utiču na režim zavarivanja su: jačina struje, vrsta elektrode, dužina električnog luka, brzina i položaj zavarivanja [41].

A1.3 Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plina CO₂ (135-MAG)

A1.3.1 Princip elektrolučnog postupka zavarivanja u zaštiti plina CO₂

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni proces zavarivanja između elektrode i osnovnog materijala.

Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom žicom u zaštiti gasa je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem dijela osnovnog i dodatnog materijala (elektrodna žica) pri čemu se za zaštitu rastopljenog metala koriste inertni i aktivni gasovi, ili njihove mješavine. Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja je dat na slici A6. [39]:



Slika A6. Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa [40]

A1.3.2 Parametri zavarivanja

Osnovni parametri MAG postupka zavarivanja su [41]:

- jačina struje zavarivanja,
- napon,
- brzina dovoda žice,
- prečnik žice,
- brzina zavarivanja,
- dužina slobodnog kraja žice,
- protočna količina zaštitnog plina,
- polaritet elektrode i
- nagib pištolja.

- Jačina struje zavisi od debljine osnovnog materijala, položaja zavarivanja, prečnika žice i toplotnih uslova zavarivanja. Količina topline koja se razvija tokom zavarivanja zavisi od jačine struje i brzine zavarivanja. Najveći dio te topline zadržava se u osnovnom materijalu, a vrlo mala količina ide u okolni vazduh.

- Najviši uticaj na kvalitet zavarenog spoja, pored jačine struje ima napon. Povećanjem napona povećava se i širina zavara, prskanje metala za vrijeme zavarivanja, a smanjuje se uvar i nadvišenje zavara. Niži napon daje bolje mehaničke osobine zavarenog spoja, ali je izgled zavara lošiji.

- Brzina zavarivanja zavisi od položaja zavarivanja i odabrane jačine struje. Veća brzina zavarivanja stvara prekomjerno prskanje metala, slabu penetraciju, ugorine i veliko nadvišenje šava, dok premala brzina zavarivanja stvara velike količine pregrijanog metala šava.

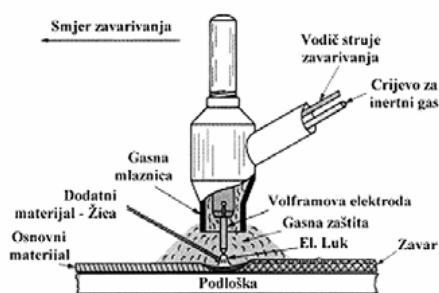
- Protočna količina zaštitnog plina se kreće od 6 do 10 l/min sa žicama prečnika 0,8 do 1,2 mm, odnosno od 10 do 22 l/min sa žicama prečnika 1,6 do 2,4 mm. Premala količina zaštitnog plina može uzrokovati poroznost u zavarenom spoju.

- Nagib pištolja u smjeru zavarivanja stvara veći uvar i nadvišenje zavora, dok nagib pištolja suprotno od smjera zavarivanja stvara zavar veće širine a uvar i nadvišenje zavora su manji [41].

A1.4 Elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti argona (141-TIG)

A1.4.1 Princip elektrolučnog postupka zavarivanja sa volframovom elektrodom u zaštiti argona

Elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti argona je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem dijela osnovnog i dodatnog materijala (žica za zavarivanje - ako se koristi), pri čemu se kao zaštita koristi inertan gas (aktivni gasovi ne dolaze u obzir jer bi izazvali oksidaciju vrha elektrode). Elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti argona je shematski prikazano na slici A7. [39].



Slika A7. Elektrolučno zavarivanje sa volframovom elektrodom u zaštiti argona [40]

Električni luk kod TIG postupka zavarivanja razlikuje se od drugih elektrolučnih postupaka po tome što nema prijenosa kapljica metala kroz stup luka i zbog toga nema ni rasprskavanja dodatnog materijala. Zavar dobiven ovim postupkom je čist i kvalitetan [39].

A1.4.2 Parametri zavarivanja

Osnovni parametri TIG postupka zavarivanja su [39]:

- a) vrsta i prečnik volframove elektrode,
- b) vrsta, polaritet i jačina struje,
- c) vrsta i prečnik dodatnog materijala,
- d) brzina zavarivanja,
- e) sastav i protok zaštitnog plina,
- f) prečnik mlaznice,
- g) priprema žlijeba za zavarivanje.

Uticaj i izbor nekih osnovnih parametara (vrsta elektrode, žice i struje, sastav i protok zaštitnog gasa), Uticaj prečnika žice, brzine zavarivanja i jačine struje je praktično isti kao kod drugih elektrolučnih postupaka. Uticaj i izbor prečnika elektrode je usko vezan za materijal od koga je elektroda napravljena, tj. jačinu struje.