Utjecaj parametara zavarivanja na strukutru i svojstva čelika API 5L X80

Kolednjak, Davor

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:214356

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Davor Kolednjak

UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA STRUKTURU I SVOJSTVA ČELIKA API 5L X80

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2014.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Davor Kolednjak

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF API 5L X80 STEEL

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Davor Kolednjak

UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA STRUKTURU I SVOJSTVA ČELIKA API 5L X80

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Zagreb, 2014.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Davor Kolednjak

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF API 5L X80 STEEL

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Zagreb, 2014.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	621.791:669.15
Ključne riječi:	mikrolegirani čelici, termomehanički kontrolirani proces valjanja, MAG zavarivanje, plinovodi, analiza mikrostrukture, mehanička svojstva, centralno kompozitni plan pokusa
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	STROJARSTVO
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Prof.dr.sc. Zdravko Schauperl
Broj stranica:	186
Broj slika:	132
Broj tablica:	32
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	110
Datum obrane	4. lipanj 2014.
Povjerenstvo:	Prof.dr.sc. Zoran Kožuh, predsjednik Prof.dr.sc. Zdravko Schauperl, mentor Prof.dr.sc. Biserka Runje Doc.dr.sc. Željko Alar Prof.dr.sc. Jadranka Malina
Institucija na kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje

I still look for your face in the crowd

Oh if you could see me now

ZAHVALA

Prvenstveno bih želio izraziti najveću zahvalnost mentoru prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na poticaju pri odluci o upisu doktorskog studija. Zahvaljujem se na njegovoj neumornoj, nesebičnoj i stalnoj potpori tijekom cijelog razdoblja studija, a posebno na pomoći pri izboru teme, oblikovanju hipoteze te njezinoj potvrdi kroz realizaciju ovog doktorskog rada. Obzirom da sam doktorski studij pohađao tijekom perioda vrlo napornog angažmana na radnom mjestu, ovaj rad kao i cijeli studij bili bi neizvedivi bez njegovog stalnog podstreka i pomoći.

Zahvaljujem se predsjedniku Povjerenstva za ocjenu i obranu ovog rada prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu na korisnim primjedbama tijekom čitanja rada čime je značajno doprinio njegovoj kvaliteti te na dobronamjernim i konstruktivnim savjetima tijekom planiranja i pripreme pokusa i izrade rada.

Zahvaljujem se i svim ostalim članovima Povjerenstva za ocjenu i obranu ovog rada doc.dr. sc. Željku Alaru, prof.dr.sc. Biserki Runje i prof.dr.sc. Jadranki Malini koji su svojim komentarima i sugestijama afirmativno utjecali na sadržaj i raspon istraživanja te doprinijeli njihovoj kvaliteti.

Nadalje, želim se iskreno zahvaliti i doc.dr.sc. Ivici Garašiću na pomoći oko izrade većine eksperimentalnog dijela rada, na svim savjetima, razgovorima te vrijednoj i nesebičnoj pomoći tijekom cijele izrade ovog rada.

Posebno zahvaljujem dr.sc. Sanji Šolić na svim stručnim savjetima, korisnim smjernicama i na velikoj pomoći pri izradi rada, bez čije pomoći bi njegova izrada bila znatno teža.

Zahvaljujem dr.sc. Hrvoju Cajneru na pomoći prilikom planiranja pokusa i obrade rezultata.

Zahvaljujem se IMT-u - Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana na pomoći u pripremi uzoraka i korištenju opreme za njihovu analizu.

Zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala i Laboratorija za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na podršci koju su mi pružali za sve vrijeme izrade ovog rada.

Zahvaljujem tvrtki Monter – strojarske montaže d.d. te gospodinu Nevenku Meštroviću i gospođi Suzani Zeljko na nabavi materijala na kojem su provedena ispitivanja te na izrezivanju ploča za zavarivanje. Bez njihove pomoći ovaj rad ne bi bio moguć.

Zahvaljujem tvrtki Metalac PNT d.o.o. te gospodinu Stjepanu Ferketinu i gospodinu Robertu Mikši na izradi pripreme ploča za zavarivanje te za izradu svih uzoraka za mehanička i strukturna ispitivanja.

Zahvaljujem tvrtki Messer CP i gospodinu Robertu Mustaču na donaciji zaštitnih plinova za zavarivanje.

Zahvaljujem kolegi Krešimiru Kukecu na pomoći pri grafičkom uređenju.

Tijekom doktorskog studija u različitim prilikama imao sam veliku pomoć pri pripremi ispita te izradi seminara i znanstvenih radova od mojeg oca Branka Kolednjaka, gospodina Dubravka Kamenečkog i gospođe Suzane Zeljko, kao i od prof.dr.sc Vedrana Mudronje, prof.dr.sc Većeslava Čorića, gospođe Jadranke Radanović, gospode Dalibora Hatića, Josipa Križana. Bez njih bi moje studiranje bilo teže te im svima zahvaljujem na pomoći.

Na kraju se posebno zahvaljujem svojim roditeljima, supruzi Kristini i djeci Ani i Ivanu na potpori, razumijevanju i odricanjima tijekom proteklih godina te na beskrajnoj strpljivosti zbog oduzetog zajedničkog vremena koje sam mogao provesti s njima.
Posebno zahvaljujem supruzi Kristini koja mi je uvijek bila pouzdani oslonac i koja mi je uvijek pružala iskrenu i bezuvjetnu potporu u svim mojim životnim nastojanjima bez koje vjerojatno nikad ne bih ni došao u priliku napisati ovu zahvalu.

SADRŽAJ

PREDGOVOR I
SAŽETAK II
SUMMARY III
KLJUČNE RIJEČI IV
KEY WORDS IV
POPIS OZNAKA V
POPIS SLIKA X
POPIS TABLICA XVIII

1. UVOD 1
1.1 CILJ I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA 3
1.2 METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA 4

2. STANJE I PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 7
2.1 VISOKOČVRSTI MIKROLEGIRANI ČELICI 7
2.1.1 Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na povećanje čvrstoće mikrolegiranih čelika 9
2.2 TERMOMEHANIČKI KONTROLIRANI POSTUPAK VALJANJA 13
2.3 ZAVARLJIVOST I ZAVARIVANJE VISOKOČVRSTIH MIKROLEGIRANIH ČELIKA 20
2.3.1 Procjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) 21
2.3.2 Greške u zavarenim spojevima 23
2.3.3 Tople i hladne pukotine u zavarenim spojevima 25
2.3.4 Zavarljivost mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće 29
2.3.5 Mikrostrukturne faze u zavarenom spoju mikrolegiranih čelika 30
2.3.6 Promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline 34

3. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 38
3.1. OSNOVE POSTUPKA MAG ZAVARIVANJA 39
3.1.1 Načini prijenosa metala 41
3.2 ZAŠTITNI PLINOVI PRI MIG/MAG ZAVARIVANJU 42

3.2.1 Ionizacijski potencijal 43
3.2.2. Toplinska vodljivost 43
3.2.3 Disocijacija i rekombinacija zaštitnih plinova 44
3.2.4 Kemijska reaktivnost zaštitnih plinova 45
3.2.5 Gustoća plina 46
3.2.6 Čistoća plina 46
3.2.7 Vrste zaštitnih plinova 47
3.2.8 Najčešće korištene zaštitne plinske mješavine kod MIG/MAG zavarivanja Argon – Ugljični dioksid 50
3.3 UNOS TOPLINE U ZAVAR I NJEGOV UTJECAJ NA SVOJSTVA ZAVARA 54
3.4 TEMPERATURA PREDGRIJAVANJA OSNOVNOG MATERIJALA 55

4. EKSPERIMENTALNI DIO 59
4.1 OBLIKOVANJE PLANA POKUSA 59
4.2 MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA ČELIKA API 5L X 80 62
4.3 IZRADA UPRAVLJAČKOG PROGRAMA NA ROBOTSKOJ JEDINICI ALMEGA AX V6 64
4.4 PRIPREMA SPOJA 66
4.4.1 Određivanje temperature predgrijavanja 67
4.4.2 Dodatni materijal 69
4.5 IZRADA ISPITNIH UZORAKA 73
4.6 ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA 75
4.6.1 Statičko vlačno ispitivanje 75
4.6.2 Udarni rad loma 77
4.6.3 Ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja 79
4.6.4 Analiza makrostrukture i geometrijskih značajki zavara 82
4.6.5 Analiza mikrostrukture 90
4.6.6 EDS analiza 104

5. STATISTIČKA ANALIZA 108
5.1 ANALIZA UDARNOG RADA LOMA METALA ZAVARA 110

5.2 ANALIZA UDARNOG RADA LOMA ZUT-A 121
5.3 ANALIZA ŠIRINE ZUT-A 131
5.4 ANALIZA TVRDOĆE METALA ZAVARA 142
5.5 ANALIZA TVRDOĆE ZUT-a 144

6. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA 148
6.1 ANALIZA REZULTATA UDARNOG RADA LOMA METALA ZAVARA 148
6.2 ANALIZA REZULTATA UDARNOG RADA LOMA ZONE UTJECAJA TOPLINE 162
6.3 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA TVRDOĆE 170

7. ZAKLJUČAK 171

8. LITERATURA 174

9. PRILOZI 182

ŽIVOTOPIS 185
BIOGRAPHY 186

PREDGOVOR

U doba sve veće ovisnosti o energiji, plin je prepoznat kao energent s izuzetno velikim potencijalom. Njegove zalihe su dovoljno velike da ga se može koristiti još dugi niz godina, a primjena mu je izuzetno prilagođena potrošaču, pa se dostavlja direktno u domove ili proizvodne pogone. Nedostatak plina je da su mu nalazišta relativno udaljena, pa ga se do potrošača treba transportirati.

Plinski opskrbni sustav u Hrvatskoj izgrađen je većim dijelom 70-tih i 80-tih godina, a u sklopu toga izgrađeni su plinovodi radnog tlaka 50 bar, promjera do 500 mm. Materijali koji su korišteni za proizvodnju cijevi su se tih godina razvijali i mijenjali, pa se u početku koristio API 5L Gr.B, a kasnije API 5L X42 i API 5L X52. Daljnjom izgradnjom plinskog transportnog sustava u posljednjih 10-tak godina izgrađeni su plinovodi radnog tlaka 75 bar, promjera 500 mm – 800 mm. U budućnosti se nameće potreba gradnje plinovoda većih promjera i većih radnih tlakova. Najveći projekti u svijetu danas uključuju plinovode promjera do 1200 mm i tlakova do 220 bar. U Hrvatskoj se planira izgraditi novi plinski transportni sustav radnog tlaka 100 bar, promjera 1000 mm, a takvi radni uvjeti zahtijevaju sve kvalitetnije materijale za proizvodnju cijevi plinovoda.

Potencijalni materijal za tu primjenu je mikrolegirani čelik API 5L X80 dobiven termo-mehanički kontroliranim procesom valjanja. Prednost odabira i korištenja takvog novog, kvalitetnijeg materijala je znatno smanjenje debljine stjenke plinovoda, a time i cijene proizvodnje cijevi, transporta i montaže. Međutim svaka primjena novih materijala postavlja pred izvođače zahtjev za tehnološkim promjenama pri zavarivanju u odnosu na do tada korištene materijale.

Ta problematika predstavlja i osnovnu motivaciju za provođenje ovog istraživanja, a koja se temelji na potrebi za što boljim razumijevanjem utjecaja parametara zavarivanja na konzistentnost zavarenog spoja čelika API 5L X80. Dobiveni rezultati su izuzetno značajni u znanstvenom smislu, u smislu razumijevanja značaja, veličine i interakcije sastava zaštitnog plina, unosa topline i temperatura predgrijavanja na svojstva i strukturu dobivenih zavara. Ali rezultati nisu ništa manje značajni i za struku, za petrokemijsku industriju, gdje je sigurna primjena novih materijala imperativ za uspješno poslovanje u budućnosti.

SAŽETAK

U petrokemijskoj industriji svakodnevno je prisutan porast operativnih i eksploatacijskih zahtjeva na ugrađene materijale. Potencijalni materijal za tu primjenu je mikrolegirani čelik API 5L X80 dobiven termomehanički kontroliranim procesom valjanja. Jedno od ključnih svojstava koje taj materijal mora zadovoljavati je svakako dobra zavarljivost i kvalitetan zavareni spoj.

Stoga je u ovom radu istražen značaj i veličina utjecaja ulaznih parametara MAG zavarivanja na strukturu i svojstva zavarenog spoja API 5L X80 čelika. U tu svrhu provedeno je kompleksno istraživanje koje je uključilo planiranje pokusa, izradu uzoraka te laboratorijska ispitivanja svojstava zavarenog spoja. Detaljnim analizama mikrostrukture materijala te analizama termodinamičkih procesa u karakterističnim područjima zavarenog spoja, a uslijed različitih parametara zavarivanja, objašnjeni su dobiveni rezultati te utvrđena korelacija mikrostrukturnih parametara sa svojstvima ispitanih uzoraka. U radu su izrađeni modeli koji doprinose razumijevanju utjecaja korištenih parametara zavarivanja na ispitivana svojstva zavarenog spoja, a posredno omogućuju i njihovo optimiranje.

Njihovim korištenjem moguće je predvidjeti pojedina svojstva zavarenog spoja čelika API 5L X80 uz poznavanje korištenih parametara zavarivanja.

SUMMARY

Petrochemical industry is witnessing a growing interest in the operative and exploitation requirements imposed on incorporated materials. One of adequate materials that can be used is a micro alloyed steel API 5L X80 produced in a controlled process of thermo-mechanical metal rolling. One of the key properties this material has to satisfy is certainly good weldability and a solid weld.

Therefore, this paper examines the importance and impact that MAG welding parameters have on the structure and properties of API 5L X 80 steel welds. For these purposes an extensive research was performed, comprising laboratory test planning, sampling and laboratory testing of weld properties. Using detailed analyses of material microstructure and analyses of the thermodynamic processes in the characteristic areas of the weld, due to different welding parameters, the obtained results have been explained and the correlation between microstructural parameters and the properties of the test samples has been defined. The research resulted in the development of models that demonstrate the impact of welding parameters on weld properties, and indirectly provide prospects for their optimization. The models are capable of anticipating specific properties of API 5L X80 steel weld using the known welding factors.

KLJUČNE RIJEČI:

mikrolegirani čelici, termomehanički kontrolirani proces valjanja, MAG zavarivanje, plinovodi, analiza mikrostrukture, mehanička svojstva, centralno kompozitni plan pokusa

KEY WORDS:

microalloyed steel, thermo-mechanical control process, MAG welding, gas pipelines, microstructure analysis, mechanical properties, central composite experiment design

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
A	istezljivost	%
A	konstanta	
A_t	atom	
A'	konstanta	
A_1	temperatura eutektoidne pretvorbe	^{O}C
A_3	temperatura granica između područja γ'(A) i γ'+Fe_3C''(A+K)	^{O}C
B	konstanta	
C_{ekv}	ekvivalent ugljika	% C
d	veličina zrna	µm
$d_{f\ model}$	stupnjevi slobode modela	
$d_{f\ ost}$	stupnjevi slobode ostataka	
d_k	promjer kapljice rastaljenog metala	mm
$d_ž$	promjer žice	mm
E	energija	J
e	elektron	
e_i	ostatak – razlika između izračunate i stvarne vrijednosti	
F	broj faktorskih stanja	
F_E	sila eksplozije u kapljicama metala	N
F_{EM}	elektromagnetska sila	N
F_G	gravitacijska sila	N
F_{PL}	sila strujanja i pritiska plazme luka	N
F_{PN}	sila površinske napetosti	N
F_R	sila reaktivnog djelovanja	N
H	sadržaj difundiranog vodika u dodatnom materijalu	ml H_2/100g metala zavara
h_{ii}	utjecaj na model	
HV	tvrdoća po Vickersu	
I	jakost struje	A

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
k_z	faktor toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja	
k	broj faktora	
KV	udarni rad loma	J
L	induktivitet	H
$l_{skž}$	slobodni kraj žice	mm
M_o	molekula	
M	mikrolegirni element	
N	normalizirano stanje	
O_{eq}	ekvivalent kisika	
n_0	broj ponavljanja	
PRESS	predviđena suma kvadrata ostataka	
P	rizik odbacivanja hipoteze H_0	
P_w	parametar pukotine	%
pi	pozitivni ion	
Q_{ak}	aktivacijska energija faze M·X	J
Q	kaljeno i popušteno stanje	
Q_{pl}	protok plina	l/min
Q	unos topline u zavar	J/mm
R	opća plinska konstanta	J/mol K
R^2	koeficijent determinacije	
R_e	granica razvlačenja	N/mm^2
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja - naprezanje koje izaziva trajnu deformaciju od 0,2 %	N/mm^2
$R_{t0,5}$	konvencionalna granica razvlačenja - naprezanje koje izaziva trajnu ukupnu deformaciju od 0,5 %	N/mm^2
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm^2
R^2_{adj}	prilagođeni koeficijent determinacije	
R^2_{pred}	predviđeni koeficijent determinacije	
s_{ZUT}	širina ZUT-a	mm
SD	standardna devijacija	
SS_{model}	suma kvadrata modela	

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
$SS_{ostatka}$	suma kvadrata ostataka	
S^2	srednji kvadrat odstupanja	
T	temperatura	K
$t_{8/5}$	vrijeme hlađenja u temperaturnom rasponu između 800 °C i 500 °C	°C
U	napon električnog luka	V
v_z	brzina zavarivanja	mm/min
$v_ž$	brzina dobave žice	m/min
X	metaloid	

Latinske oznake

α'	primarni ferit	
α_{al}	alotriomorfni (izduženi) ferit	
α_{CP}	udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa	
α_A	igličasti ili acikularni ferit	
α_B	bainitni ferit	
α_M	martenzit	
α_W	Widmannstaettenov ferit	
β	nagib pištolja	o
γ'	primarni austenit	
δ	debljina osnovnog materijala	mm
Δl	produljenje	mm
ϑ_p	prijelazna temperatura	^oC
$\vartheta_{o\,min}$	minimalna temperatura predgrijavanja	^oC

Popis kratica

AC	hlađenje na zraku (engl. *Air Cooling*)
AcC	ubrzano hlađenje (engl. *Accelerated Cooling*)
ANOVA	analiza varijance (engl. *Analysis of variance*)
API	Američki institut za naftu (engl. *American Petroleum Institute*)
AR	valjano stanje (engl. *As Rolled)*
ASTM	Američko udruženje za ispitivanje i materijale (engl. *American Society for Testing and Materials*)
CEN	Europska komisija za normizaciju (engl. *Commission for European Normalization*)
DQ	direktno gašenje (engl. Direct Quenching)
DNV	Norveški Veritas (norv. *Det Norske Veritas*)
EDS	mikroanaliza kemijskog sastava (engl. *Energy Dispersive Spectroscopy*)
EN	Europska Norma
FCAW	elektrolučni postupak zavarivanja u plinskoj zaštiti praškom punjenim žicama (engl. *Flux Cored Arc Welding*)
FCC	plošno centrirana kubična rešetka (engl. *Face Centered Cubic Crystal*)
HRN	HRvatska Norma
IACS	Međunarodno udruženje klasifikacijskih društava (engl. *International Association of Classification Societies*)
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju (engl. *International Organization for Standardization*)
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. *Metal Active Gas*)
MAGC	Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina ugljičnog dioksida (engl. *Metal Active Gas Carbon*)
MAGM	Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi mješavine plinova od kojih je jedan aktivan (engl. *Metal Active Gas Mixture*)
MIG	Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. *Metal Inert Gas*)
MZ	Metal Zavara
M/A	Martenzit/Austenit

L	magistralni cjevovod (engl. Linepipe)
OM	Osnovni Materijal
QST	direktno gašenje i samopopuštanje (engl. Quenching and Self Tempering)
REL	Ručno ELektrolučno zavarivanje
SEM	elektronski skenirajući mikroskop (engl. Scanning Electron Microscope)
STT	prijenos materijala kratkim spojevima mehanizmom površinske napetosti (engl. *Surface Tension Transfer*)
SZ	Smanjenje Zrna
TIG	elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. *Tungsten Inert Gas*)
TR	tehnički izvještaj (engl. *Technical Report*)
TTT	vrijeme – temperatura – transformacija (engl. Time Temperature Transformation)
TMCP	termomehanički kontrolirani postupak valjanja (engl. Thermo Mechanical Controlled Process)
TMR	toplinsko mehaničko valjanje (engl. Thermo Mechanical Rolling)
ZUT	Zona Utjecaja Topline

POPIS SLIKA

Broj	Opis slike	Strana
Slika 1:	Kronološki razvoj čelika za cjevovode/plinovode	7
Slika 2:	Shematski prikaz mikrostrukturnih promjena kod valjanja klasičnih čelika	10
Slika 3:	Promjena veličine austenitnog zrna u ovisnosti o broju prolaza valjanja	11
Slika 4:	Utjecaj Nb, Ti i V na povećanje granice razvlačenja i na prijelaznu temperaturu nisko ugljičnog čelika (SZ – smanjenje zrna, P – precipitacijsko očvrsnuće)	12
Slika 5:	Temperature nastanka karbida i nitrida u čelicima mikrolegiranim Ti i Nb	13
Slika 6:	Usporedba klasičnih postupaka valjanja konstrukcijskih čelika i TMCP postupka	14
Slika 7:	Shematski prikaz TMCP postupka, AC - hlađenje na zraku, AcC - ubrzano hlađenje	15
Slika 8:	Utjecaj brzine hlađenja na veličinu feritnih zrna	16
Slika 9:	TTT dijagram s usporedbama brzina ohlađivanja	17
Slika 10:	Odnos ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) i vlačne čvrstoće	17
Slika 11:	Shematski prikaz promjene mikrostrukture tijekom postupka termomehaničkog valjanja i naknadnog ubrzanog hlađenja	18
Slika 12:	Odnos granice razvlačenja TMCP čelika i veličine zrna	19
Slika 13:	C_{ekv} različitih vrsta čelika	22
Slika 14:	Vrste grešaka u zavarenom spoju	23
Slika 15:	Podjela grešaka u zavarenom spoju prema HRN EN ISO 6520 - 1	24
Slika 16:	Temperaturna područja nastanka toplih i hladnih pukotina	25
Slika 17:	Nastanak toplih pukotina: a) uslijed pretaljivanja, b) uslijed skrućivanja metala zavara	26
Slika 18:	Tople pukotine u zavarenom spoju	27
Slika 19:	Hladne pukotine u zavarenom spoju	28
Slika 20:	Pojavni oblici i mjesta nukleacije ferita: a) alotriomorfni i idiomorfni ferit; b) Widmannstaettenov ferit	30

Broj	Opis slike	Strana
Slika 21:	Miješana mikrostruktura alotriomorfnog i Widmannstaettenovog ferita i perlita	31
Slika 22:	Mikrostruktura zavara: a) s dominantno martenzitno – bainitnom strukturom, b) s dominantnom strukturom acikularnog i bainitnog ferita	32
Slika 23:	Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini; a) kod čelika s prisutnim oksidnim uključcima; b) kod čelika bez prisutnih oksidnih uključaka	33
Slika 24:	Shematski prikaz mehanizama potiskivanja bainitne transformacije na račun acikularnog ferita	34
Slika 25:	ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika s 0.2 %C	35
Slika 26:	Mikrostruktura u zoni utjecaja topline	37
Slika 27:	Shematski prikaz pištolja u radu kod MIG/MAG postupka zavarivanja	40
Slika 28:	Shematski prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku	41
Slika 29:	Toplinska vodljivost plinova u ovisnosti o temperaturi	44
Slika 30:	Pojednostavljeni shematski prikaz disocijacije i ionizacije	45
Slika 31:	Kemijske reakcije kod MAG zavarivanja u zaštitnoj atmosferi CO_2	46
Slika 32:	Mikrostruktura zavara dobivenih s različitim mješavinama zaštitnih plinova Ar i CO_2	52
Slika 33:	Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zavara dobivenih s različitim mješavinama zaštitnih plinova	53
Slika 34:	Utjecaj zaštitnog plina na udarni rad loma zavara	53
Slika 35:	Utjecaj unosa topline na brzinu ohlađivanja	54
Slika 36:	Ovisnost rezultata statičkog vlačnog ispitivanja o unosu topline u zavar čelika X80	55
Slika 37:	Utjecaj unosa topline na brzinu hlađenja zavara u ovisnosti o temperaturi predgrijavanja osnovnog materijala	56
Slika 38:	TTT dijagram s krivuljama ohlađivanja zavara sa i bez predgrijavanja	57
Slika 39:	Dijagram temperatura - vrijeme pri višeslojnom zavarivanju	58
Slika 40:	Centralno kompozitni i rotabilni plan pokusa za tri faktora	60

Broj	Opis slike	Strana
Slika 41:	Mikrostrukture API 5L X čelika	62
Slika 42:	Mikrostruktura API 5L X80 čelika	63
Slika 43:	Robotska jedinica za zavarivanje a) shematski prikaz robotske stanice VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm b) Robot OTC Almega AX-V6	64
Slika 44:	Zavarivanje uzorka robotskom jedinicom Almega AX V6	65
Slika 45 :	Priprema zavarenog spoja	66
Slika 46:	Priprema zavarenog spoja	67
Slika 47:	Predgrijavanje osnovnog materijala	68
Slika 48:	Kolut dodatnog materijala LNM MoNi	69
Slika 49:	Lice korijena zavara nakon prvog prolaza	72
Slika 50:	Naličje zavara korijenskog prolaza	72
Slika 51:	Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje	73
Slika 52:	Ispitni uzorak za udarni rad loma a) nagrizeno u 5 % NITALU, b) V - utor	74
Slika 53:	Shematski prikaz pozicioniranja epruvete prema HRN EN 10045-1:2003	75
Slika 54:	Univerzalna kidalica EU 40mod	76
Slika 55:	Ispitni uzorci nakon provedenog statičnog vlačnog ispitivanja	76
Slika 56:	Dijagram sila-produljenje, uzorak br. 123	77
Slika 57:	Ovisnost udarnog rada loma zavara i ZUT-a o parametrima zavarivanja	79
Slika 58:	Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju	79
Slika 59:	Tvrdoća zavarenog spoja u području lica zavara	81
Slika 60:	Tvrdoća zavarenog spoja u području korijena zavara	81
Slika 61:	Makro analiza zavarenih spojeva a) Stereo mikroskop LEICA MZ6 b) računalni program “Image J”	82
Slika 62:	Parametri geometrije zavarenog spoja	82
Slika 63:	Ovisnost širine zavara o parametrima zavarivanja	88
Slika 64:	Ovisnost nadvišenja zavara o parametrima zavarivanja	89
Slika 65:	Ovisnost širine ZUT-a zavara o parametrima zavarivanja	89

Broj	Opis slike	Strana
Slika 66:	Analiza mikrostrukture a) svjetlosni mikroskop Olympus GX51F-5 s ugrađenom CCD kamerom; b) elektronski mikroskop FE SEM JEOL JSM – 6500F	90
Slika 67:	Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 9 s minimalnim udjelom CO2 u Ar, % CO2 = 7,91; a) lice zavara, b) korijen zavara	91
Slika 68:	Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 10 s maksimalnim udjelom CO2 u Ar, % CO2 = 28,09 ; a) lice zavara, b) korijen zavara	92
Slika 69:	Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 11 s minimalnim unosom topline, Q = 8,64 kJ/cm ; a) lice zavara, b) korijen zavara	93
Slika 70:	Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 12 s maksimalnim unosom topline, Q = 15,36 kJ/cm ; a) lice zavara, b) korijen zavara	94
Slika 71:	Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 15 s referentnim parametrima zavarivanja nultog stanja; a) lice zavara, b) korijen zavara	95
Slika 72:	Mikrostruktura zavarenog spoja nultog stanja, stanje pokusa 15, povećanje 1000 x: a) lice zavara, b) sredina zavara, c) korijen zavara	97
Slika 73:	Mikrostrukture zavara stanja pokusa 9 s udjelom CO2 u Ar, % CO_2 = 8; a) lice zavara, b) korijen zavara	99

Broj	Opis slike	Strana
Slika 74:	Mikrostrukture zavara stanja pokusa 10 s udjelom CO2 u Ar, % CO_2 = 28; a) lice zavara, b) korijen zavara	100
Slika 75:	Mikrostrukture zavara stanja pokusa 11 kod minimalnog unosa topline, Q = 8,64 kJ/cm; a) lice zavara, b) korijen zavara	101
Slika 76:	Mikrostrukture zavara stanja pokusa 12 kod maksimalnog unosa topline, Q = 15,36 kJ/cm; a) lice zavara, b) korijen zavara	102
Slika 77:	Mikrostruktura zavarenog spoja nultog stanja, stanje pokusa 15 a) lice zavara, b) korijen zavara	103
Slika 78:	Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 9, stanje s minimalnim udjelom CO_2 u zaštitnom plinu	105
Slika 79:	Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 10, stanje s maksimalnim udjelom CO_2 u zaštitnom plinu	106
Slika 80:	Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 15, stanje pokusa s referentnim razinama parametra zavarivanja za sva tri faktora	107
Slika 81:	Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate udarnog rada loma metala zavara	115
Slika 82:	Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma metala zavara	115
Slika 83:	Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate udarnog rada loma metala zavara	116
Slika 84:	Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma metala zavara	116
Slika 85:	Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 20 °C	117
Slika 86:	Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C	118

Broj **Opis slike** **Strana**

Slika 87: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C 118
Slika 88: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 20 °C 119
Slika 89: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C 119
Slika 90: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C 120
Slika 91: Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate udarnog rada loma ZUT-a 125
Slika 92: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma ZUT-a 125
Slika 93: Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate udarnog rada loma ZUT-a 126
Slika 94: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma ZUT-a 126
Slika 95: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 20 °C 127
Slika 96: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C 128
Slika 97: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C 128
Slika 98: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 20 °C 129
Slika 99: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C 129
Slika 100: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C 130
Slika 101: Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate širine ZUT-a 135

Broj **Opis slike** **Strana**

Slika 102: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate širine ZUT-a 135
Slika 103: Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate širine ZUT-a 136
Slika 104: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate širine ZUT-a 136
Slika 105: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 8 % 137
Slika 106: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 18 % 138
Slika 107: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 23 % 138
Slika 108: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 28 % 139
Slika 109: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 8 % 139
Slika 110: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 18 % 140
Slika 111: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 23 % 140
Slika 112: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 28 % 141
Slika 113: Utjecaj udjela kisika u metalu zavara na mehanička svojstva nelegiranog čelika 148
Slika 114: Promjer austenitnog zrna kao funkcija sadržaja kisika u metalu zavara kod EPP zavarivanja 149
Slika 115: Shematski prikaz utjecaja legirnih elemenata, vremena hlađenja $t_{8/5}$ i udjela kisika u metalu zavarana na veličinu austenitnog zrna 149
Slika 116: TTT dijagram za metal zavara niskougljičnog čelika 150
Slika 117: Ovisnost udjela acikularnog ferita o ekvivalentu kisika u metalu zavara korištenjem MAG postupka 151

Broj **Opis slike** **Strana**

Slika 118: Udio kisika u metalu zavara niskolegiranog čelika kao funkcija udjela kisika i ugljičnog dioksida u zaštitnom plinu 153
Slika 119: Ovisnost udjela mangana i silicija o ekvivalentu kisika 154
Slika 120: Količina izlučene troske za stanja pokusa 9, 11 i 10:
a) 8% CO_2 u Ar;
b) 18 % CO_2 u Ar;
c) 28 % CO_2 u Ar 155
Slika 121: Prikaz utjecaja legirnih elemenata, veličine zrna i kisika na mikrostrukturu u TTT dijagramu zavara niskougljičnog čelika 156
Slika 122: Utjecaj acikularnog ferita na udarni rad loma pri EPP zavarivanju 157
Slika 123: Ovisnost prijelazne temperature o ekvivalentu kisika 158
Slika 124: Utjecaj acikularnog ferita u metalu zavara na krivulje prijelazne temperature udarnog rada loma 159
Slika 125: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 9 160
Slika 126: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 10 160
Slika 127: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 12 161
Slika 128: Shematski prikaz mikrostruktura u
a) jednoprolaznom i
b) višeprolaznom zavarivanju 163
Slika 129: TTT dijagram čelika X80, temperatura zagrijavanja 1350 °C 165
Slika 130: Ovisnost URL i tvrdoće u korijenskom prolazu o unosu topline za čelik X80 167
Slika 131: Mikrostruktura u zoni utjecaja topline za uzorak 121 168
Slika 132: Utjecaj unosa topline na širinu pojedinih zona ZUT-a 169

POPIS TABLICA

Broj	Opis tablice	Strana
Tablica 1.	Vrijednosti konstanti A i B za određene karbide i nitride u mikrolegiranim čelicima	10
Tablica 2.	Energija disociranja i ionizacijski potencijali plinova za zavarivanje	43
Tablica 3.	Fizikalna svojstva plinova	47
Tablica 4.	Prikaz razina stanja pokusa	61
Tablica 5.	Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu u Prilogu I	63
Tablica 6.	Mehanička svojstva čelika API 5L X80 prema certifikatu u Prilogu I	63
Tablica 7.	Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi	69
Tablica 8.	Kemijski sastav dodatnog materijala	69
Tablica 9.	Parametri zavarivanja prema stanjima pokusa	70
Tablica 10.	Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	78
Tablica 11.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 10	80
Tablica 12.	Poprečni presjeci zavara svih stanja pokusa	83
Tablica 13.	Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 9 na prikazanim ispitnim mjestima	105
Tablica 14.	Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 10 na prikazanim ispitnim mjestima	106
Tablica 15.	Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 15 na prikazanim ispitnim mjestima	107
Tablica 16.	Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene udarnog rada loma metala zavara	110
Tablica 17.	Analize varijance rezultata udarnog rada loma metala zavara za upotrjebljeni reducirani kvadratni matematički model	111
Tablica 18.	Pregled statističkih podataka o modelu	113
Tablica 19.	Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene udarnog rada loma ZUT-a	121
Tablica 20.	Analize varijance rezultata udarnog rada loma ZUT-a za upotrjebljeni reducirani kvadratni matematički model	122
Tablica 21.	Pregled statističkih podataka o modelu	123

Broj	Opis tablice	Strana
Tablica 22.	Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene širine ZUT-a	113
Tablica 23.	Analize varijance rezultata udarnog rada loma ZUT-a za upotrjebljeni reducirani kvadratni matematički model	132
Tablica 24.	Pregled statističkih podataka o modelu	133
Tablica 25.	Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene tvrdoće metala zavara	142
Tablica 26.	Analize varijance rezultata tvrdoće metala zavara za upotrjebljeni reducirani kvadratni matematički model	143
Tablica 27.	Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene tvrdoće ZUT-a	144
Tablica 28.	Analize varijance rezultata tvrdoće ZUT-a za upotrjebljeni reducirani kvadratni matematički model	144
Tablica 29.	Pregled statističkih podataka o modelu	146
Tablica 30.	Vrijednosti ekvivalenta kisika za stanja pokusa 1 do 17	152
Tablica 31.	Kemijska analiza metala zavara za stanja pokusa oznaka 9, 10 i 11	155
Tablica 32.	Rezultati vremena $t_{8/5}$ i srednje brzine hlađenja u temperaturnom intervalu između 800 °C i 500 °C za sva stanja pokusa	164

1. UVOD

Stalnim povećanjem potrošnje plina nameće se potreba gradnje plinovoda sve većih promjera i većih radnih tlakova. Najveći projekti danas uključuju plinovode promjera do 1200 mm i tlakova do 220 bar (1 bar = 10^5 Pa) [1,2]. Takvi radni uvjeti zahtijevaju sve kvalitetnije materijale za proizvodnju cijevi plinovoda definiranih normama. U struci se za klasifikaciju i odabir tih materijala najčešće upotrebljava američka norma API 5L. Prednost odabira i korištenja novog, kvalitetnijeg materijala je znatno smanjenje debljine stjenke plinovoda, a time i cijene proizvodnje cijevi, transporta i montaže. Međutim svaka primjena novih materijala postavlja pred izvođače radova zahtjev za tehnološkim promjenama pri zavarivanju u odnosu na do tada korištene materijale. Materijal API 5L X80 je uvršten u API normu prije 30-tak godina [3,4]. Zbog visoke specifične čvrstoće potencijalna područja primjene tog materijala su vrlo široka i to prvenstveno na konstrukcijama gdje se teži smanjenju mase uz istu nosivost, npr. za visoko tlačne cjevovode, odobalna (eng. *off-shore*) postrojenja, itd. [5].

Čelik API 5L X80 proizveden je termomehanički kontroliranim procesom valjanja (TMCP) razvijenim u Japanu prije 30-tak godina [5]. U tom procesu čelik se valja ispod temperature rekristalizacije i potom se podvrgava ubrzanom kontroliranom hlađenju. Primjenom te tehnologije na mikrolegiranim čelicima s niskim udjelom ugljika postiže se homogena mikrostruktura sa sitnozrnatim igličastim (acikularnim) feritom [5]. Takva struktura ima vrlo dobra mehanička svojstva, ali i bolju prokaljivost, te manju osjetljivost na hladne pukotine. TMCP čelici uz isti ekvivalent ugljika imaju znatno bolja mehanička svojstva od konvencionalnih čelika.

Za zavarivanje čelika API 5L X80 u praksi se najčešće primjenjuju elektrolučni postupci zavarivanja u plinskoj zaštiti punim (MAG) i praškom punjenim žicama (FCAW) pri čemu se veliki naglasak stavlja na unos topline te dodatni materijal [6]. Zavarivanjem se u materijal unose velike količine topline što ima za posljedicu nagle lokalne temperaturne, a time i mikrostrukturne promjene. Uslijed toga se stvara diskontinuitet kristalne strukture materijala u zoni zavarenog spoja koji rezultira promjenama svojstava, a moguće su i pojave različitih grešaka i pukotina u materijalu. Termodinamički procesi tijekom zavarivanja ove vrste čelika su izuzetno kompleksni, a njihov utjecaj na strukturu i svojstva navedenih čelika nije do kraja istražen, te je trenutačno predmet brojnih istraživanja. Ta su istraživanja uglavnom usmjerena na razumijevanje procesa u strukturi materijala, poboljšanje kvalitete zavarenih spojeva te na sam razvoj tehnologija zavarivanja tih čelika.

Najveći dio istraživačkih aktivnosti kod ove grupe čelika usmjeren je na objašnjenje pojave grešaka u zoni zavara, prvenstveno hladnih pukotina koje danas predstavljaju jedan od najčešćih problema u zavarivačkoj praksi [7-10]. Te pukotine nastaju pri temperaturama ispod 300 ^{0}C i mogu se pojaviti nekoliko sati ili čak dana nakon zavarivanja. Opasnost od pojave hladnih pukotina raste s povećanjem čvrstoće materijala. Iako su hladne pukotine predmet istraživanja već duže od 50 godina, one i dalje predstavljaju velike probleme za integritet zavarenih konstrukcija pogotovo kod visokočvrstih čelika. Provedena istraživanja pokazala su da je jedan od dominantnih uvjeta za nastanak hladnih pukotina udio vodika u materijalu. Na tu temu je razvijeno nekoliko teorija i objavljeno preko 9000 radova u periodu 1980.-2009. godine [11-20, 26]. Moderne teorije o pukotinama uzrokovanih vodikom govore o mehanizmu djelovanja koji je potpomognut kombinacijama djelovanja atomarnog i molekularnog vodika. Utvrđeno je kako atomi vodika imaju mogućnost prolaska kroz kristalnu rešetku materijala i u interakciji sa zaostalim naprezanjima mogu inicirati nastanak hladne pukotine (ili ih propagirati) u području osnovnog materijala, ZUT-a ili metala zavara. Na putanju vodika, a time i pojavu pukotina kod visokočvrstih čelika, veliki utjecaj ima mikrostruktura materijala i nesavršenosti u njoj [14, 15]. Dokazano je kako povećan udio igličastog ferita u mikrostrukturi povećava otpornost prema vodikom induciranim pukotinama, dok bainitni i martenzitno-austenitni konstituenti loše utječu na svojstva zavarenih uzoraka u kiselom mediju. S ciljem razvoja visokočvrstih čelika otpornih prema vodikom uzrokovanim pukotinama, većina radova obrađuje utjecaj agresivnog sumporovodika (H_2S) na feritno-perlitnu, bainitnu i martenzitnu mikrostrukturu [21]. Pojedina istraživanja pokazuju kako homogena poboljšana bainitno-martenzitna mikrostruktura pokazuje veliku otpornost na vodikom uzrokovane pukotine. Međutim, kako danas ne postoji unificirana metoda određivanja mehanizma djelovanja vodika, većina autora se slaže da je sitnozrnata feritna mikrostruktura i mikrostruktura s igličastim feritom optimalna po pitanju otpornosti na vodikom inducirane pukotine.

Na kompaktnost i homogenost zavarenog spoja čelika API 5L X80 utječe i pojava uključaka u metalu zavara. Prema literaturnim izvorima [20, 21] kod tog čelika su najčešće tri vrste uključaka: na bazi Mn, Al i Si. Dokazano je da su uključci na bazi Mn i Al vrlo često mjesta inicijacije pukotine, dok utjecaj uključaka na bazi Si nije ustanovljen. Nadalje, dokazano je da postoji povezanost udjela sumpora u čeliku API 5L i osjetljivosti na pojavu pukotina u zavaru [21].

Mehanička svojstva zavarenih spojeva čelika API 5L X80 u velikoj mjeri ovise o ujednačenosti strukture osnovnog materijala i materijala zavara što potencira ulogu i utjecaj dodatnog materijala pri zavarivanju. Za tu grupu čelika proizvođači dodatnog materijala predlažu uglavnom punjene žice bazičnog karaktera različitog kemijskog sastava [22], tj. s različitim legirnim elementima. Utjecaj tih legirnih elemenata na homogenost zavara odvija se kroz utjecaj na mikrostrukturu materijala, a time i na svojstva. U literaturi je posebno naglašen utjecaj bakra na homogenost spoja, tj. kako više od 0,2 % Cu značajno smanjuje osjetljivost na pojavu hladnih pukotina [6].

Kompleksnost tehnologije zavarivanja i utjecaja tehnoloških parametara na strukturu, a time i na svojstva zavarenog spoja čelika API 5L X80 izrazito je prisutno kod MAG postupka koji se najčešće i koristi za zavarivanje te vrste materijala. Unosom topline pri zavarivanju i temperaturom predgrijavanja reguliraju se toplinski ciklusi grijanja i hlađenja materijala, a time i transformacija mikrostrukture [23]. Veliki utjecaj na termodinamičke procese u strukturi materijala ima vrsta i sastav zaštitne atmosfere pri zavarivanju. Pojedinačni utjecaji navedenih parametara na strukturnu homogenost ZUT-a i metala zavara su predmet brojnih trenutnih istraživanja, pa odnos postupka zavarivanja, odabira materijala i osjetljivosti prema nastanku hladnih pukotina nije isti za zonu utjecaja topline i za metal zavara [17]. Međutim kompleksno djelovanje navedenih parametara na svojstva zavarenog spoja i njihova interakcija, usprkos njihovoj važnosti još nije istraženo.

1.1 CILJ I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog istraživanja je doprinijeti razumijevanju utjecaja parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80.

Iz postavljenog cilja pretpostavljene su slijedeće *hipoteze*:

1. Laboratorijskim ispitivanjima i karakterizacijom materijala moguće je utvrditi promjene i povezanost strukture i svojstva čelika API 5L X80 u ovisnosti o korištenim parametrima zavarivanja.

2. Primjenom centralno kompozitnog plana pokusa moguće je odrediti značajnost utjecaja parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, veličine njihovog djelovanja i interakciju.

1.2 METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Prema postavljenim hipotezama u radu je bilo potrebno istražiti promjene i međusobnu povezanost svojstava i mikrostrukture čelika API 5L X80 u ovisnosti o korištenim parametrima zavarivanja.

Istraživanje se sastojalo od pripreme, eksperimentalnog dijela s laboratorijskim ispitivanjima, te analize i diskusije dobivenih rezultata. Obzirom da je materijal za provedbu istraživanja bio unaprijed određen, sama priprema obuhvatila je definiranje svih ostalih elemenata nužnih za uspješno provođenje eksperimenta. Prvenstveno definiranje parametara MAG postupka zavarivanja s najvećim utjecajem na dobivenu strukturu i svojstva materijala zavara koji su varirani tijekom istraživanja. Odabrani parametri bili su sastav zaštitnog plina tj. udio CO_2 %, unos topline, kJ/cm, te temperatura predgrijavanja, °C. Razlog odabira upravo tih parametara kao varijabli eksperimentalnog dijela leži u činjenici da zavarljivost i svojstva visokočvrstih čelika uvelike ovise o razini unosa topline, a upravo navedeni parametri izravno ili neizravno utječu na unos topline, što je opisano u literaturi [47, 56 - 58].

Definirana su i laboratorijska ispitivanja koja daju informacije o mehaničkim svojstvima materijala u ZUT-u i području zavara, a time i njihovu ovisnost o parametrima zavarivanja. Ta ispitivanja uključuju statičko vlačno ispitivanje, udarni rad loma i mjerenje tvrdoće.

Stanja pokusa, a time i broj uzoraka za ispitivanje određena su primjenom centralno kompozitnog plana pokusa. Taj plan pripada skupini planova pokusa višega reda, tzv. metoda odzivne površine i obuhvaća skup statističkih i matematičkih modela koji se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Planom pokusa je moguće razviti model koji vjerodostojno opisuje proces ukoliko su proučavani faktori u pokusu utjecajni na proces, te ukoliko su pokusom dobiveni rezultati prihvatljive točnosti i preciznosti. U slučaju potpunog faktorskog pokusa u ovom istraživanju bilo bi potrebno 27 stanja pokusa, ali korištenjem centralno kompozitnog plana pokusa za tri faktora broj izvedenih stanja pokusa smanjen je na 17, bez značajnijeg utjecaja na kvalitetu dobivenih rezultata. Centralno kompozitni plan pokusa primijenjen je u cilju dobivanja što više informacija o postavljenom sustavu uz minimalne troškove. Primjenom opisanog plana pokusa svaki faktor se mijenja na 5 razina, ali se ne provode sve kombinacije razina. Centralna točka plana pokusa daje informaciju o nelinearnosti u odzivu, dok aksijalne točke daju procjene parametara drugog reda. Za svako stanje pokusa, uz uzorke za ispitivanja mehaničkih svojstava, izrađeni su i uzorci za analizu makro i mikrostrukture materijala u području zavara i ZUT-a.

Zavarivanje ispitnih uzoraka izvedeno je na robotskoj jedinici za zavarivanje Almega AX V6 kako bi se eliminirala subjektivnost zavarivača, tj. njegov utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja. Zbog primjene robota u izradi uzoraka, važna aktivnost u pripremi istraživanja bila je izrada računalnih programa za vođenje robotske ruke. Ti se programi izrađuju korištenjem sustava za programiranje na samoj robotskoj jedinici, a određuju brzinu i nagib pištolja, kretanje pištolja i njihanje, kao i parametre zavarivanja, tj. struju, napon, slobodni kraj žice i protok zaštitnog plina. Za zavarivanje korijena zavara korišten je isti program u svih 17 stanja pokusa jer je kvalitetan korijen zavarenog spoja moguće izvesti samo u vrlo uskom području parametara zavarivanja, dok je za ostale prolaze potrebno izvesti određene promjene u upravljanju robotske jedinice ovisno o stanjima pokusa. To se posebice odnosi na tehniku njihanja koja je potrebna u slučajevima kada se zbog većeg unosa topline javlja potreba za kontrolom parametara pri većoj količini taline.

Eksperimentalni dio istraživanja u potpunosti je izveden u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. U prvom koraku provedeno je sučeljeno zavarivanje ploča dimenzija 350 mm x 300 mm x 10 mm prema normi HRN EN ISO 15614-1:2007/A2:2012 – Specifikacija i klasifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja–dio 1: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla. Iz zavarenih ploča zatim su izrezane i strojno obrađene epruvete za laboratorijska ispitivanja i analize u skladu s prethodno navedenom normom HRN EN ISO 15614 - 1:2007/A2:2012. Pri izradi epruveta osmišljen je sustav označivanja kako ne bi došlo do zamjene uzoraka. Izrađene epruvete ispitane su na kidalici i Charpyevom batu radi informacija o mehaničkim svojstvima zavarenih spojeva. Obzirom da je u ovom istraživanju kao kontrolni faktor pri procjeni zavarljivosti materijala korištena i tvrdoća, na izrađenim uzorcima provedeno je i mjerenje udarnog rada loma sukladno odgovarajućoj normi. Plan istraživanja uključio je dalje analizu makro i mikrostrukture materijala ZUT-a i zavara izvedenih različitim parametrima zavarivanja. Metalografski uzorci laboratorijski su pripremljeni za analizu pomoću svjetlosnog i skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Tim je analizama bilo potrebno ustanoviti kvalitativne i kvantitativne mikrostrukturne parametre te eventualno postojanje poroziteta, uključina, pukotina ili drugih grešaka u strukturi. Upotrebom ostalih suvremenih metoda karakterizacije strukture materijala, npr. mikroanalize kemijskog sastava pomoću detektora za mikroanalizu kemijskog sastava (engl. *EDS – Energy Dispersive Spectroscopy*), bilo je potrebno ustanoviti odnose i

eventualne promjene u koncentracijama legirnih elemenata u ovisnosti o parametrima zavarivanja te porijeklo prisutnih nehomogenosti u materijalu.

Analizom rezultata dobivenih ispitivanjima određena je značajnost utjecaja varijabilnih faktora na ispitivana svojstva za što je primijenjen centralno kompozitni plan pokusa umjesto punog faktorskog plana pokusa**.** Pritom je utvrđena značajnost doprinosa pojedinih varijabli te njihov međusobni utjecaj. Poseban naglasak u analizi rezultata dan je na utvrđivanju korelacije mikrostrukturnih parametara s dobivenim svojstvima ispitanih uzoraka.

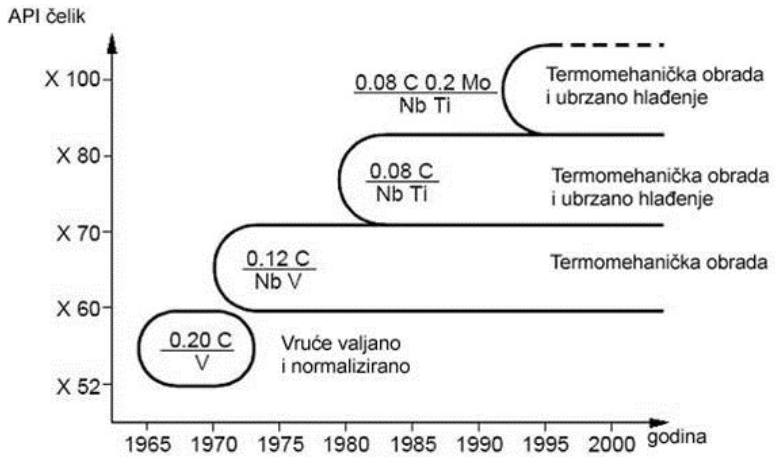
Iz navedenog plana istraživanja proizlazi očekivani znanstveni doprinos koji se sastoji od doprinosa razumijevanju utjecaja tehnoloških parametara zavarivanja na strukturu i svojstva API 5L X80 čelika.

2. STANJE I PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1 VISOKOČVRSTI MIKROLEGIRANI ČELICI

Visokočvrsti mikrolegirani čelici se nazivaju još i mikrolegirani čelici, sitnozrnati čelici ili čelici povišene čvrstoće, a njihov razvoj je uvjetovan sve većim tehničkim zahtjevima na konstrukcijske čelike. Ti zahtjevi se odnose prvenstveno na što bolja mehanička svojstva od kojih je svakako najvažnija visoka granica razvlačenja. Prema vrijednostima tog mehaničkog svojstva, razlikuju se tri grupe ovih čelika: čelici povišene čvrstoće ($R_{p0,2}$ < 500 N/mm^2), čelici visoke čvrstoće (500 N/mm^2 < $R_{p0,2}$ < 1000 N/mm^2) i ultračvrsti čelici ($R_{p0,2}$ > 1000 N/mm^2). Tijekom razvoja tih čelika, povećanje čvrstoće se postizalo dodavanjem legirnih elemenata i povećanjem njihovih udjela što je ujedno imalo i negativan utjecaj na tehnološka svojstva, pogotovo na zavarljivost. To je posebno izraženo u slučaju njihove primjene u izradi zavarenih konstrukcija bez optimiranja parametara zavarivanja, kada je moguća pojava krhkog loma te pojave vodikom izazvanih pukotina u materijalu zavara. Zbog navedenih razloga za primjenu u izradi zavarenih konstrukcija najčešće se koriste konstrukcijski čelici s granicom razvlačenja od 300 N/mm^2 do 700 N/mm^2.

Do 70-tih godina prošlog stoljeća konstrukcijski čelici za cjevovode proizvodili su se s vrlo niskom vlačnom čvrstoćom. Od sredine 50-tih proizvodili su se normalizirani C-Mn čelici, oznake X52, vlačne čvrstoće oko 360 N/mm^2. Mikrolegirani C-Mn čelik oznake X60 koji je imao oko 0,20% C uveden je 60-tih godina prošlog stoljeća, slika 1.



Slika 1: Kronološki razvoj čelika za cjevovode/plinovode [1]

Prema literaturi [25], do kraja 60- tih godina razvijeni su prema API standardu čelici gradacije X60 i X65. Bez smanjenja udarnog rada loma daljnje povećanje čvrstoće C-Mn čelika nije

bilo moguće. Problematika tehnologije zavarivanja bila je ograničavajući faktor za daljnje dodavanje legirnih elemenata u većim udjelima s ciljem postizanja boljih mehaničkih svojstava. Dobru zavarljivost tih grupa čelika, uz istovremeni dobar omjer njihove čvrstoće i udarnog rada loma, danas je moguće postići upotrebom termomehaničkog kontroliranog procesa valjanja (TMCP) [26].

Ovim postupkom u kombinaciji s ubrzanim hlađenjem moguće je dobiti čelične ploče debljine do 100 mm s granicom razvlačenja do 500 N/mm^2 uz dodatak vrlo malih količina legirnih elemenata. Također je moguće dobiti i dobar udarni rad loma osnovnog materija i u zoni utjecaja topline zavarenog spoja, a izvrsna zavarljivost takvih materijala omogućuje izbor učinkovitih i jeftinijih postupaka zavarivanja. Kemijski sastav čelika dobivenih TMCP postupkom karakterizira nizak udio ugljika te dodatak legirnih elemenata poput niobija i vanadija. Za osiguravanje optimalnih svojstava, najvažnije kod TMCP postupka je kontrola temperature za vrijeme zagrijavanja ploče, valjanja i hlađenja nakon valjanja. Ovim postupkom je 1966. godine proizveden čelik gradacije X60, a 1973. godine čelik X70. Čelik gradacije X80 prvi put je proizveden u Japanu sredinom 80-tih godina. U današnje vrijeme se za izgradnju plinovoda radnog tlaka > 100 bar i promjera > 1000 mm najčešće koriste čelici X70 i X80, dok se od čelika X90 i X100 grade kraće dionice, duljine nekoliko kilometara, kako bi se stekla iskustva potrebna za izgradnju magistralnih plinovoda.

Visokočvrsti mikrolegirani čelici osmišljeni su kako bi osigurali bolja mehanička svojstva i/ili bolju otpornost na korozijske uvjete od klasičnih ugljičnih čelika. Prije otprilike 50-ak godina u svijetu je započela intenzivnija primjena mikrolegiranih čelika. Povišene vrijednosti granice razvlačenja ovih čelika omogućavalo je izradu lakših konstrukcija, tako da su se ovi čelici počeli upotrebljavati za izradu mostova, građevinskih strojeva, cjevovoda, tlačnih spremnika, vagon cisterni itd. Naročito značajnu primjenu ovi čelici su imali u brodogradnji. To su legure željeza i ugljika s Al, Nb, V, Ti, B i drugim elementima u vrlo malim količinama. Radi zavarivanja ugljik je rijetko zastupljen u udjelima većim od 0,26 % , s tim da se u posljednje vrijeme teži izradi čelika s manje od 0,1 % C [25, 27-28].

Primjenom postupka mikrolegiranja ostvaruje se povećanje čvrstoće čelika uz istodobnu uštedu legirnih elemenata. Mikrolegiranje se koristi prvenstveno kod izrade konstrukcijskih čelika koje karakterizira visoka granica razvlačenja, zadovoljavajuća rezerva plastične deformacije, neznatna sklonost krhkom lomu te dobra zavarljivost. Razlika u odnosu na uobičajen sastav konstrukcijskih čelika je u relativno niskom udjelu ugljika i dodatku

mikrolegirajućih elemenata. Udjeli mikrolegirajućih elemenata u mikrolegiranim čelicima iznose od 0,01 % do 0,1 %, a sadržaj ugljika je vrlo nizak (0,02 % - 0,20 %). Mikrolegirajući elementi ne mijenjaju osnovnu vrstu čelika tj. nelegirani čelik ostaje nelegiran, niskolegirani čelik ostaje niskolegiran i sl. Svaki mikrolegirajući element ima svoje djelovanje na materijal. Oni mogu stvarati kristale mješance (čvrste otopine) ili spojeve kao što su nitridi, karbidi i karbonitridi.

Za povišenje čvrstoće pri proizvodnji čelika vrlo važnu ulogu imaju mikrolegirajući elementi koji stvaraju karbide i nitride, kao što su već spomenuti niobij, vanadij i titan. Ipak najznačajnije djelovanje tih elemenata je izraženo kroz usitnjenje zrna i očvršćivanje precipitacijom. Na taj se način nadomješta pad čvrstoće izazvan niskim udjelom ugljika te omogućuje daljnji rast čvrstoće [25, 27-29]. Primarni cilj u razvoju ovih čelika je poboljšavanje mehanička svojstva, a ne ciljani kemijski sastav, tako da se ne smatraju klasičnim legiranim čelicima. Kemijski sastav određenog visokočvrstog mikrolegiranog čelika može varirati u ovisnosti o zahtijevanim mehaničkim svojstvima.

2.1.1 Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na povećanje čvrstoće mikrolegiranih čelika

Određivanje utjecaja mikrolegirnih elemenata na stvaranje sitnozrnate mikrostrukture čelika zahtijeva razumijevanje morfologije nastanka intersticijskih faza koje oni tvore i njihove stabilnosti u uvjetima toplog oblikovanja. Mikrolegirni element, M, (Nb, Ti, V, Zr, B) koji je otopljen u čvrstoj otopini austenita na određenoj temperaturi veže se s nekim metaloidom, X, (C, N), u intersticijsku fazu MX s FCC kristalnom rešetkom prema izrazu [27]:

$$[M] + [X] \leftrightarrow M{\cdot}X \tag{1}$$

Topivost MX faza u čvrstoj otopini ovisi o aktivacijskoj energiji potrebnoj za njihovu nukleaciju (otapanje) prema izrazu:

$$log[M] \cdot [X] = -\frac{Q_{ak}}{2{,}303 \cdot R \cdot T} + \frac{A\prime}{2{,}303} \tag{2}$$

pri čemu je Q_{ak} – aktivacijska energija faze M·X, R – opća plinska konstanta, T – temperatura u K, A' – konstanta ovisna o vrsti faze.

Prethodni izraz (2) uobičajeno se prikazuje kao:

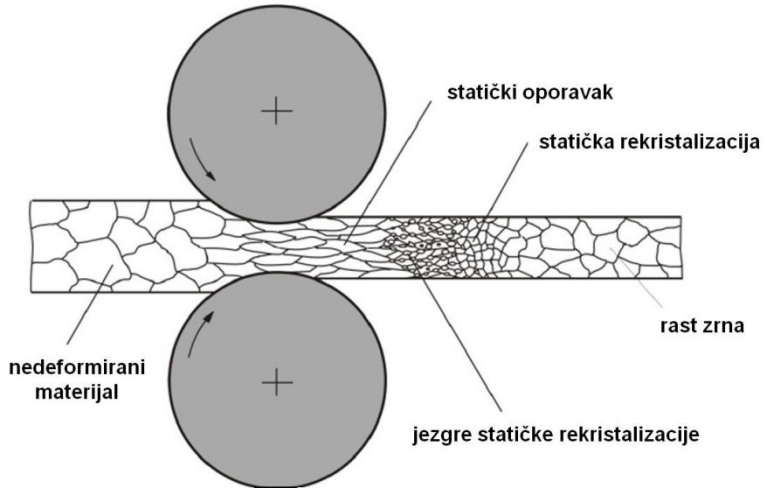
$$log[M] \cdot [X] = A - \frac{B}{T} \tag{3}$$

što omogućuje procjenu temperature početka i završetka precipitacije neke MX faze kod dodavanja određene količine legirnog elementa M u čelik. Vrijednosti konstanti A i B iz izraza (3) prikazani su u tablici 1 za određene MX faze.

Tablica 1: Vrijednosti konstanti A i B za određene karbide i nitride u mikrolegiranim čelicima [27]

	MX precipitati							
konstante	AlN	VC	VN	TiC	TiN	NbC	NbN	BN
A	7184	7840	9500	10745	8000	7290	8500	13970
B	1,79	3,02	6,72	5,33	0,32	3,04	2,8	5,24

Utjecaj ravnomjerno disperziranih čestica MX faza na dobivanje sitnozrnate mikrostrukture može se objasniti strukturnim promjenama koje nastaju prilikom toplog oblikovanja tj. valjanja u više prolaza, na temperaturama višim od temperature rekristalizacije austenita T_R. Materijal (čelična ploča), zagrijan na početnu temperaturu valjanja, prije početka postupka ima izrazito grubozrnatu strukturu. Tijekom valjanja uz dovoljno veliki stupanj redukcije debljine u jednom prolazu (oko 15 %) dolazi do plastične deformacije austenitnih zrna te se ona izdužuju u smjeru valjanja uz istovremeni dinamički oporavak, čime se smanjuje granica razvlačenja, slika 2.



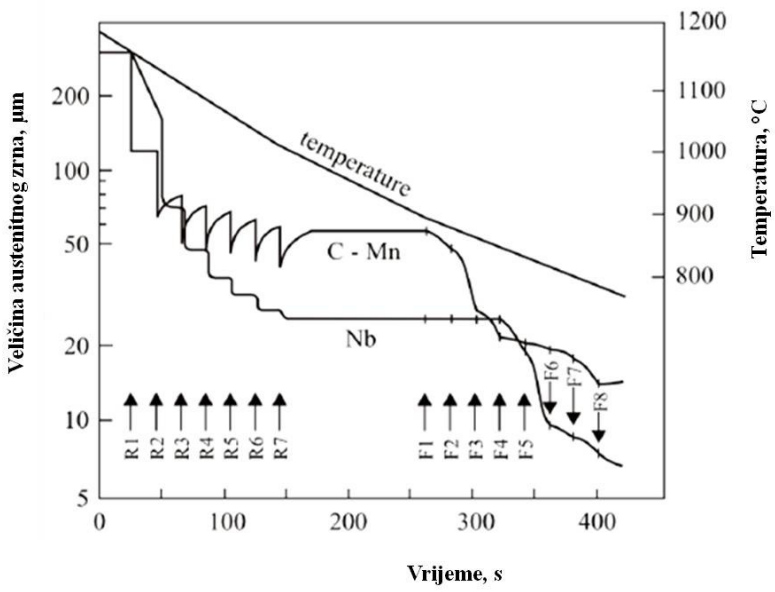
Slika 2: Shematski prikaz mikrostrukturnih promjena kod valjanja klasičnih čelika [27]

Statički oporavak i statička rekristalizacija pojavljuju se u plastično deformiranom materijalu pri izlasku ploče iz valjačkog stana što dovodi do gotovo potpunog opuštanja materijala i stvaranja sitnozrnate strukture γ faze. Ta sitnozrnata struktura nije stabilna zbog velikog

omjera površina granica zrna u odnosu na njihov volumen, što dovodi do nepovoljnog pogrubljena zrna nakon završetka rekristalizacije.

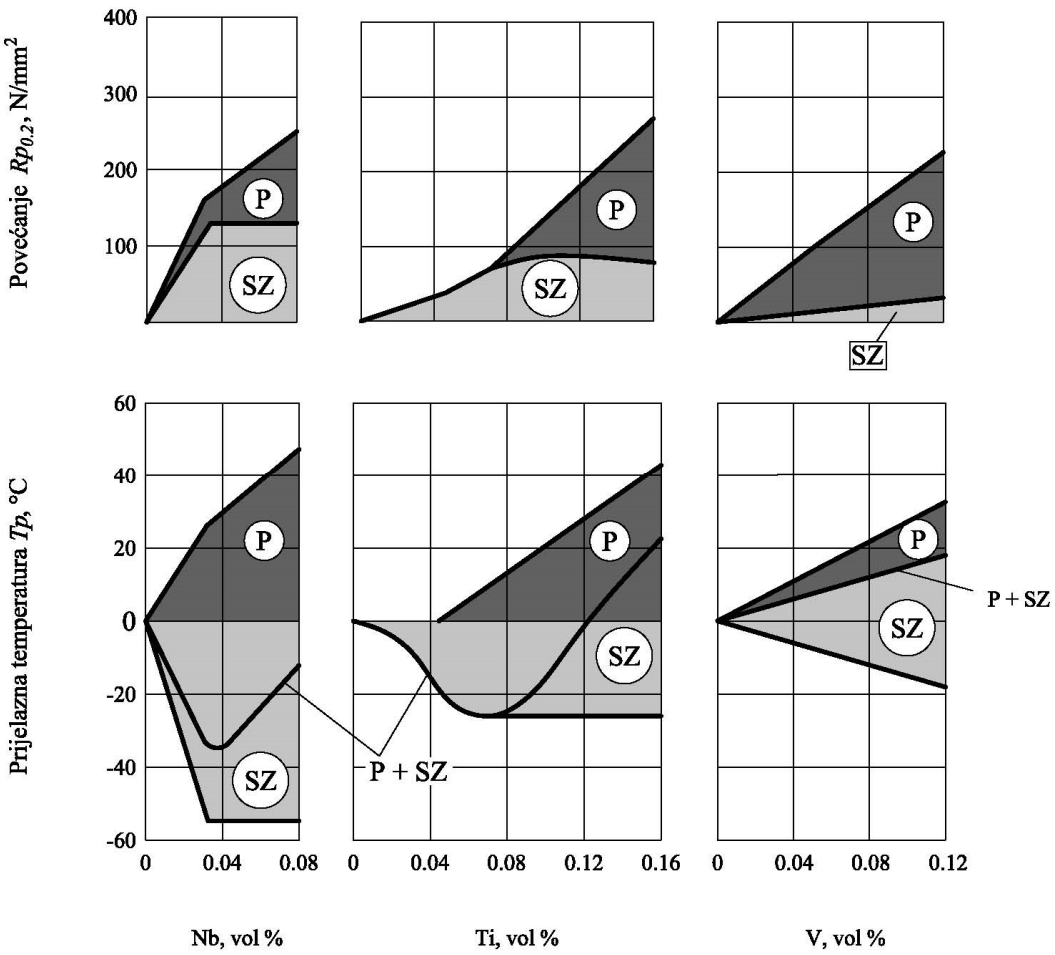
Taj proces pogrubljenja zrna se kod mikrolegiranih čelika može zaustaviti ravnomjerno disperziranim MX fazama nastalim u austenitu tijekom plastične deformacije, a koje sprečavaju pomicanje i gibanje granica zrna. Iz tog razloga je veličina zrna mikrolegiranih čelika nakon više prolaza valjanja znatno manja u odnosu na veličinu zrna kod klasičnih čelika. Ravnomjerno disperzirane MX čestice uz ograničenje gibanja granica zrna uzrokuju i precipitacijsko očvrsnuće čelika.

Slika 3 prikazuje procjenu veličine austenitnih zrna dva čelika tijekom valjanja ploča s debljine 200 mm na 20 mm. Jedan čelik je C-Mn čelik, a drugi je mikrolegiran s 0,04% Nb. Oznake R1-R7 i F1 – F8 su koraci grubog i finog valjanja (uz veću i manju redukciju debljine ploča) [30].



Slika 3: Promjena veličine austenitnog zrna u ovisnosti o broju prolaza valjanja [30]

Faze MX različitih legirnih elemenata različite su toplinske stabilnosti te imaju različit utjecaj na svojstva čelika. Optimalni udio niobija kod niskougljičnih čelika iznosi oko 0,04 %. Taj udio niobija, pri pravilno odabranim parametrima obrade plastičnom deformacijom, omogućuje povećanje granice razvlačenja čelika za 120 N/mm^2 zbog efekta granica zrna te do 160 N/mm^2 zbog precipitacijskog očvrsnuća česticama NbC, uz istovremeno sniženje temperature T_p za otprilike 40 °C, slika 4.



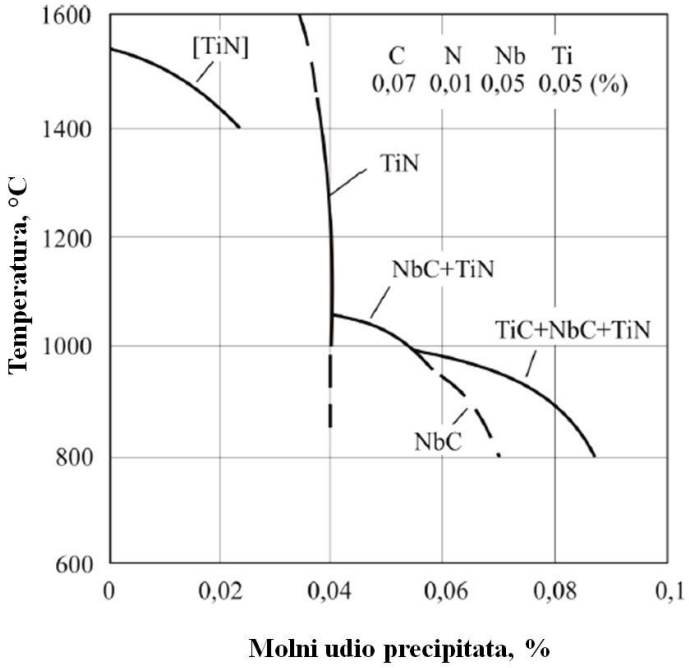
Slika 4: Utjecaj Nb, Ti i V na povećanje granice razvlačenja i na prijelaznu temperaturu nisko ugljičnog čelika (SZ – smanjenje zrna, P – precipitacijsko očvrsnuće) [27]

Titan sa svojim optimalnim udjelom od 0,08 % ima manji utjecaj na očvrsnuće čelika. MX faze titana nastaju na vrlo visokim temperaturama, npr. TiN nastaje tijekom skrućivanja čelika i kasnije u čvrstom stanju, nakon toga precipitiraju Ti (C, N) te posljednji nastaje TiC nakon što je potrošen sav dušik, i to na temperaturama iznad temperatura precipitacije NbC. Daljnjim sniženjem temperature TiX faze koaguliraju čime se smanjuje njihov utjecaj na usitnjenje zrna i precipitacijsko očvrsnuće čelika.

Faze vanadija, VN a pogotovo VC, nastaju blizu temperature A_3 čelika, radi čega je njihov utjecaj na smanjenje zrna vrlo malen, ali su značajne za precipitacijsko očvrsnuće čelika.

Raspon temperatura precipitiranja pojedinih MX faza u mikrolegiranom čeliku ovisi najviše o udjelu ugljika i dušika u čeliku, a zatim i o udjelu mikrolegirnog elementa. Poznavanje tih temperaturnih raspona vrlo je važno pri odabiru parametara termomehaničkog oblikovanja

čelika. Slika 5 prikazuje temperature precipitiranja nitrida i karbida u čelicima mikrolegiranim titanom i niobijem [31].

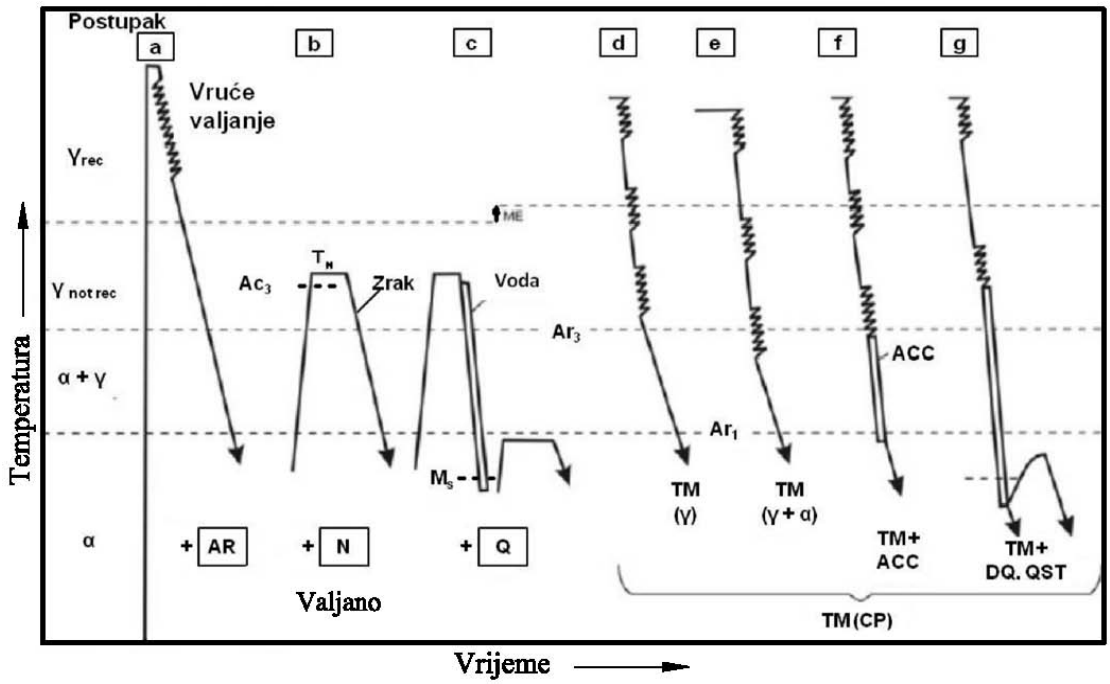


Slika 5: Temperature nastanka karbida i nitrida u čelicima mikrolegiranim Ti i Nb [31]

2.2 TERMOMEHANIČKI KONTROLIRANI POSTUPAK VALJANJA

Termomehanički kontrolirani postupak valjanja, TMCP (engl. *Thermo-Mechanical Control Process*) je postupak termomehaničke obrade uz optimiranje mikrostrukture pomoću kontrole temperature i postupka deformacije za vrijeme vrućeg valjanja, te kontrole procesa gašenja nakon vrućeg valjanja. TMCP postupak razvijen je u Japanu 80-tih godina 20. stoljeća [25], a njegov cilj je stvoriti sitnozrnatu i homogenu strukturu igličastog ferita, umjesto feritno-perlitne strukture prisutne kod konvencionalnih čelika.

Prije razvoja ovog postupka svrha toplog valjanja bila je postizanje konačnih dimenzija čeličnih ploča: debljine, širine i visine. Ukoliko su postojali dodatni zahtjevi za kvalitetom čelika provođene su dodatne toplinske obrade normalizacijskog žarenja ili kaljenje i popuštanje. Sa sve većim zahtjevima za boljom kvalitetom čelika bilo je potrebno razviti novi postupak valjanja koji bi objedinio sve zahtjeve. To je postignuto s TMCP postupkom. Slika 6 prikazuje dijagram temperatura – vrijeme u kojem je prikazana usporedba klasičnog postupka toplog valjanja u kombinaciji s toplinskim obradama i postupka TMCP.



Slika 6: Usporedba klasičnih postupaka valjanja konstrukcijskih čelika i TMCP postupka [29]

Postupci valjanja označeni s a, b i c prikazuju različita stanja gotovog čelika:

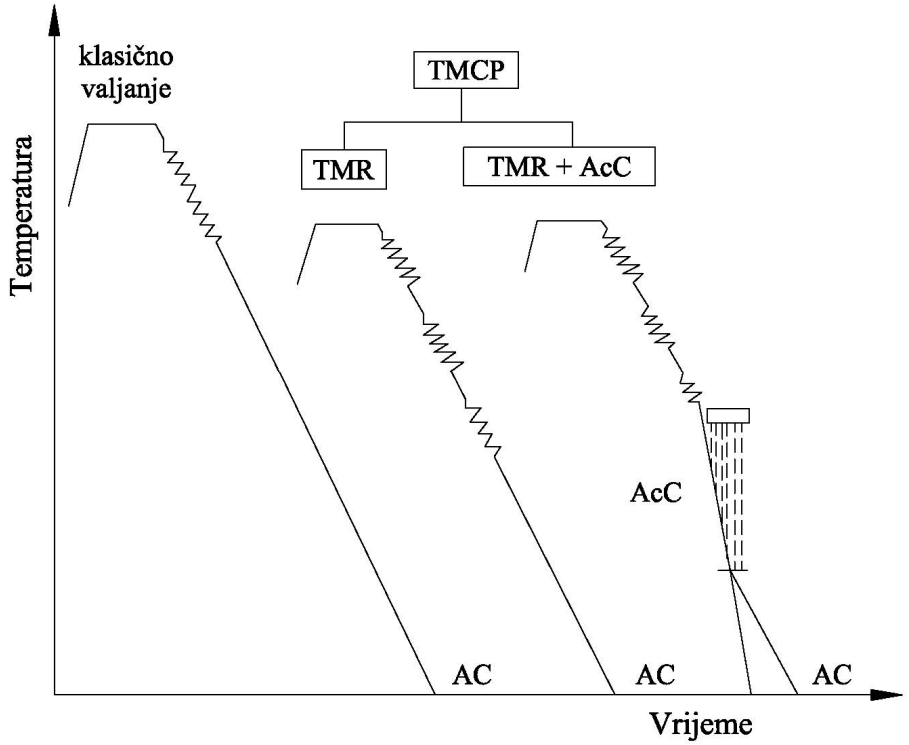
- a - valjano (AR – as rolled)
- b - normalizirano (N)
- c - kaljeno i popušteno (Q).

Postupci d, e, f i g prikazuju različite varijante termomehaničkog valjanja:

- d – valjano samo u austenitnom području
- e – valjano i u austenitnom i u mješovitom (γ' + α') području
- f – valjano u austenitnom i mješovitom (γ' + α') području s ubrzanim hlađenjem
- g – valjano u austenitnom području uz mogućnost dodatnih toplinskih obrada (DQ – direktno gašenje, engl. *direct quenching*, QST – direktno gašenje i samopopuštanje, engl. *quenching* + *self tempering*).

Prema točnoj definiciji u skladu s IACS (*International Association of Classification Societies*) TMCP postupak uključuje: TMR (toplinsko mehaničko valjanje – engl. *Thermo Mechanical*

Rolling) i AcC (ubrzano hlađenje – engl. *Accelerated Cooling*), slika 7. Međutim, u struci se pod postupkom TMCP većinom smatra samo dio postupka AcC tj. ubrzano hlađenje [25].

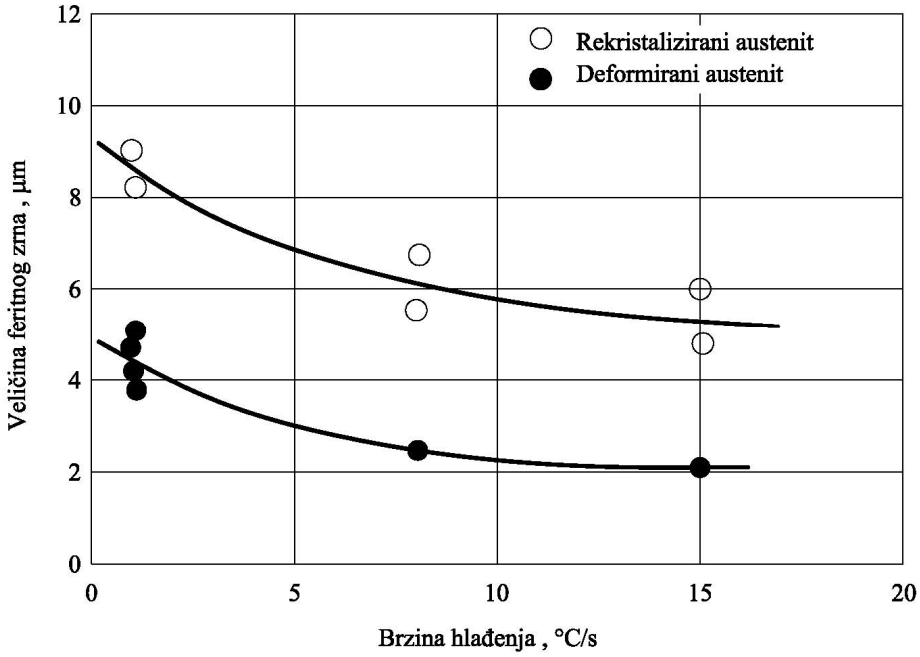


Slika 7: Shematski prikaz TMCP postupka, AC - hlađenje na zraku, AcC - ubrzano hlađenje [25]

Proces termomehaničkog valjanja karakterizira obrada deformiranjem u austenitnom području pri temperaturama iznad 700 °C do 820 °C, kojom se može postići smanjenje debljine čelika do 80 %, uz željeno usitnjenje zrna [25, 27, 29]. Kod kontinuiranog valjanja broj koraka deformacije je ograničen brojem valjačkih stanova. Zbog toga je potreban velik stupanj redukcije po koraku što zahtijeva veliku silu valjanja, uslijed čega je potrebno povećati temperaturu valjanja. Kako je za termomehaničko valjanje nužno zadržati temperaturu ispod rekristalizacijske, dodaje se niobij koji utječe na povišenje temperature rekristalizacije čelika. Niobij je također i karbidotvorni te nitridotvorni element.

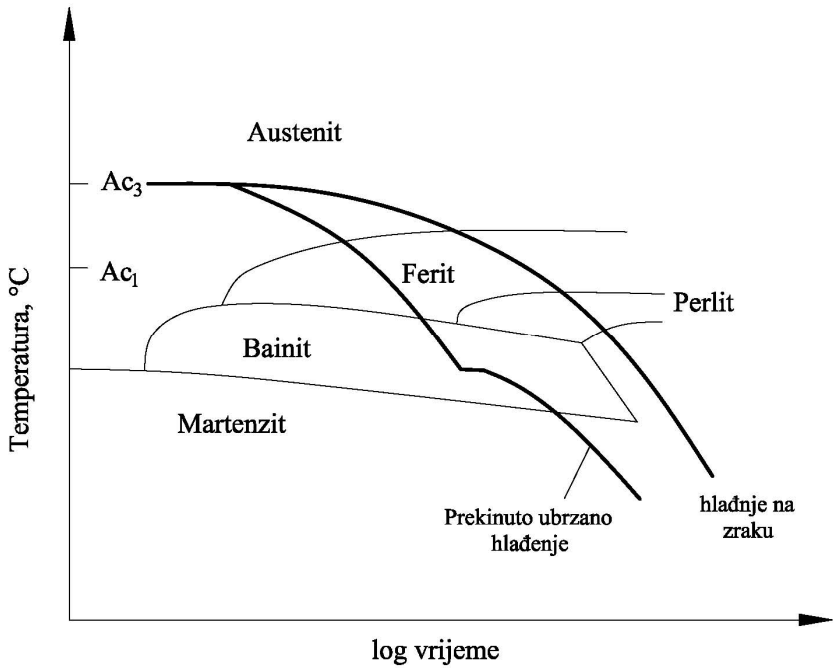
Postupak je jednostavniji pri valjanju gdje je moguće povećati broj koraka valjanja uz manju redukciju po koraku s ciljem smanjivanja sile valjanja.

Daljnje usitnjenje zrna kod termomehaničkog valjanja moguće je ostvariti dodavanjem faze ubrzanog hlađenja nakon valjanja jer niža temperatura transformacije ima za posljedicu formiranje više jezgri kristalizacije u pothlađenom austenitu, slika 8 [27].



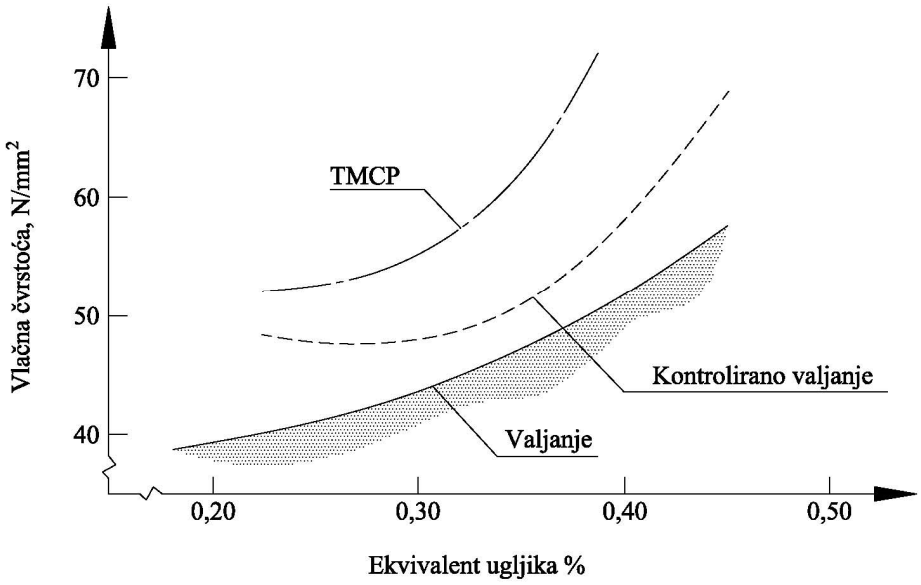
Slika 8: Utjecaj brzine hlađenja na veličinu feritnih zrna [27]

Ubrzanim hlađenjem kod konstrukcijskih čelika postiže se feritno – bainitna mikrostruktura, za razliku od feritno – perlitne koja se postiže pri hlađenju na zraku. Ubrzano hlađenje uobičajeno se prekida pri temperaturi od 550 °C, nakon čega se hlađenje nastavlja na zraku, slika 9.



Slika 9: TTT dijagram s usporedbama brzina ohlađivanja [30]

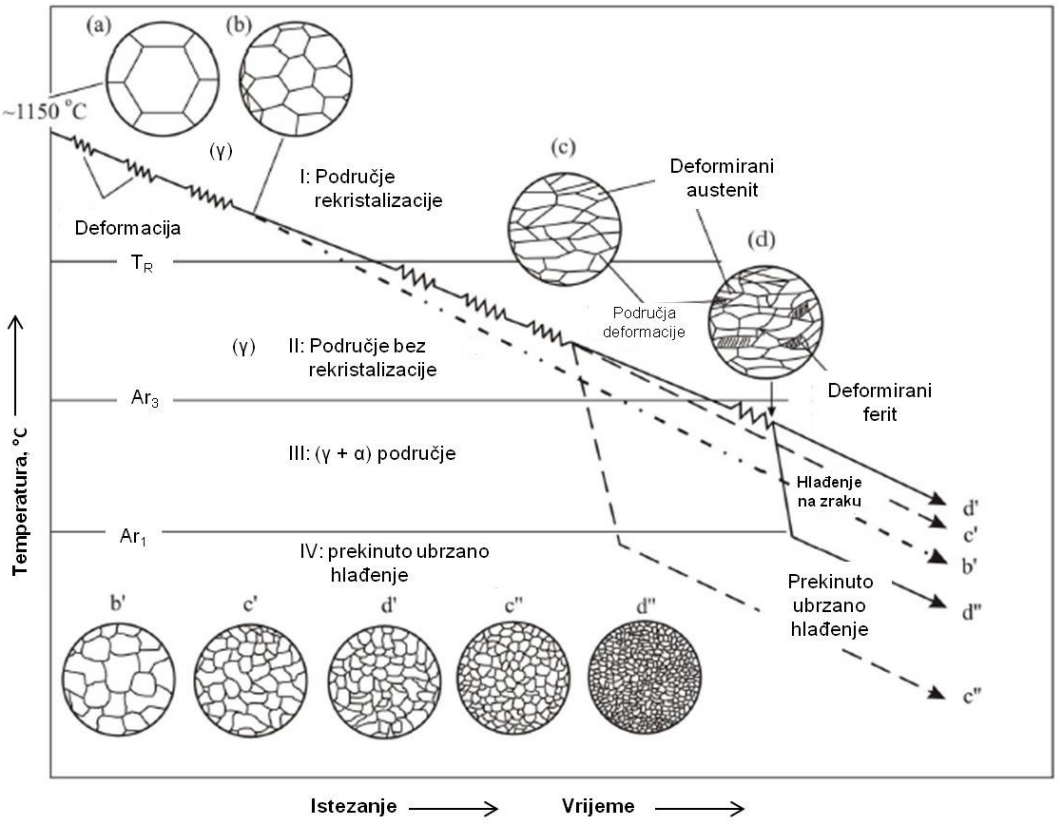
TMCP postupkom postiže se mikrostruktura jednolikog acikularnog i bainitnog ferita što materijalu daje veću čvrstoću i udarni rad loma. Na slici 10 prikazan je omjer vlačne čvrstoće i ekvivalenta ugljika gdje je vidljivo da za jednaki ekvivalent ugljika TMCP čelici imaju višu čvrstoću od klasičnih konstrukcijskih čelika.



Slika 10: Odnos ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) i vlačne čvrstoće [25]

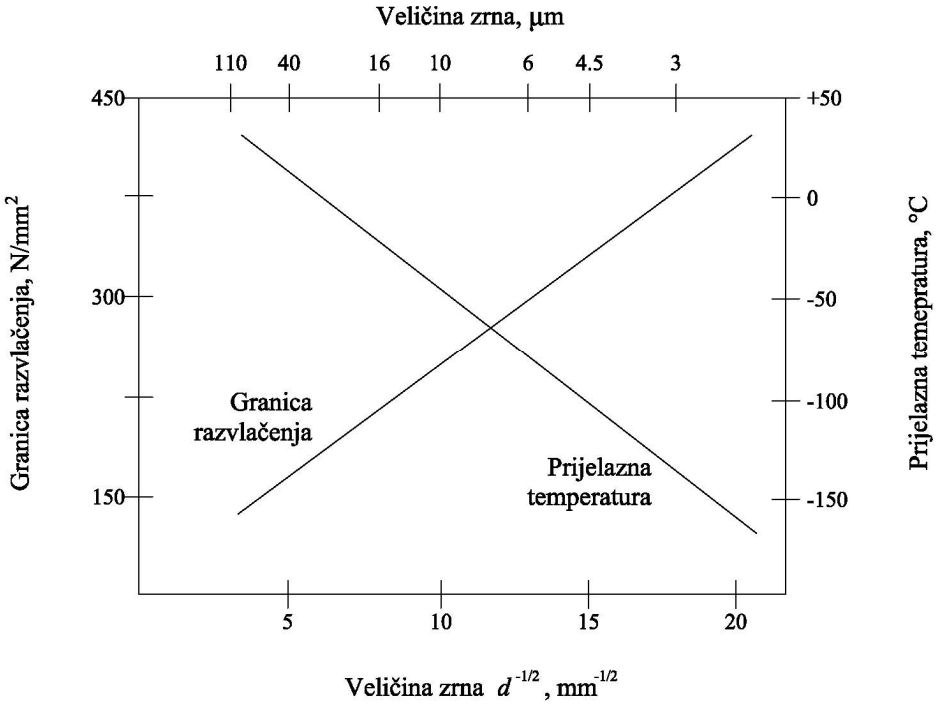
TMCP čelike karakterizira i manja osjetljivost na pojavu hladnih pukotina u zoni utjecaja topline kod zavarivanja zbog načina proizvodnje pri kojem je kontroliran udio karbida, smanjenjem udjela ugljika i ekvivalenta ugljika [25].

Veličina zrna je vrlo važan faktor koji utječe na čvrstoću, a posebno na udarni rad loma čelika. Tijekom termomehaničke obrade tj. valjanja, veličina zrna se pokušava smanjiti na najmanju moguću. Završna temperatura valjanja u termomehaničkom postupku, uz kemijski sastav čelika ima najveći utjecaj na završnu veličinu zrna. Sitnozrnatu strukturu moguće je postići ako je valjanje provedeno na temperaturi koja je nešto viša od temperature $\gamma' \rightarrow \alpha'$ transformacije, a postupak je najučinkovitiji kad se primjenjuje kod mikrolegiranih čelika s povišenom temperaturom rekristalizacije. Slika 11 prikazuje tijek postupka termomehaničkog valjanja s utjecajem ubrzanog hlađenja na mikrostrukturu mikrolegiranog niskougljičnog čelika [32]. Kontrola mikrostrukture započinje zagrijavanjem čelika/ploče i kontroliranim valjanjem s ciljem dobivanja sitnog austenitnog zrna. Slijedi transformacija u igličasti ferit ili strukturu gornjeg bainita u stadiju ubrzanog hlađenja nakon završetka vrućeg valjanja. Na slici je vidljivo da je struktura TMCP čelika ujednačena i sitnozrnata [27].



Slika 11: Shematski prikaz promjene mikrostrukture tijekom postupka termomehaničkog valjanja i naknadnog ubrzanog hlađenja [27]

TMCP postupkom se uslijed usitnjenja zrna čelika snižava i prijelazna temperatura, tako da ovi čelici uz visoku čvrstoću imaju i dobar udarni rad loma, slika 12.



Slika 12: Odnos granice razvlačenja TMCP čelika i veličine zrna [30]

Postupak termomehaničkog valjanja podijeljen je u nekoliko faza kojima se postižu konačna svojstva materijala:

1. Predgrijavanje - temperatura predgrijavanja značajan je faktor za postizanje jednolike raspodjele topline po cjelokupnom volumenu materijala i potpuno otapanje karbida i nitrida mikrolegirnih elemenata. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o vrsti i udjelu mikrolegirnih elemenata u čeliku.

2. Grubo termomehaničko valjanje - ima za cilj postići homogenu austenitnu strukturu prije postizanja temperature rekristalizacije.

3. Završno termomehaničko valjanje - akumulira naprezanja pri valjanju u zoni ne-rekristalizacije austenitnog zrna kako bi nastala feritna struktura. Tijekom ove faze postupka dolazi do izduživanja austenitnog zrna te se ovim postupkom u konačnici može dobiti vrlo homogena, sitnozrnata feritna struktura.

4. Veliko smanjenje debljine lima - za vrijeme kontroliranog procesa termomehaničkog valjanja povećava granicu razvlačenja bez nepovoljnog djelovanja na prijelaznu temperaturu (prijelaz žilavo – krhko). Smanjenje debljine lima rezultira usitnjavanjem zrna.

5. Režim hlađenja - vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće jer se hlađenjem kontrolira promjena mikrostrukture, usitnjavanje feritnog zrna i precipitacijsko očvrsnuće. Brzina hlađenja utječe na povećanje udjela bainita ili martenzitno – austenitne strukture ili pak na pojavu igličastog ferita.

6. Namatanje ploča - tijekom procesa namatanja ne dolazi do promjene strukture materijala, ali je ova faza vrlo bitna za precipitacijsko očvrsnuće čelika. Stoga je bitno strogo kontrolirati temperaturu pri namatanju da bi se postiglo maksimalno precipitacijsko očvrsnuće. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što krajnje rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala.

2.3 ZAVARLJIVOST I ZAVARIVANJE VISOKOČVRSTIH MIKROLEGIRANIH ČELIKA

Istraživanje zavarljivosti čelika teklo je usporedno s razvojem tehnika zavarivanja. Cilj istraživanja zavarljivosti je pronalaženje optimalnih parametara zavarivanja koji će u okviru praktične primjene omogućiti dobivanje zavarenih spojeva potrebne kvalitete. Istraživanje zavarljivosti je kompleksan problem koji uz krajnju ozbiljnost pristupa, zahtjeva i visoku razinu znanja te veliko praktično iskustvo na području tehnike zavarivanja.

Utvrđivanje zavarljivosti kod standardnih vrsta čelika (nelegirani čelici, čelici s vrlo niskim ekvivalentom ugljika) nije više od tolike važnosti, međutim razvojem novih (specijalnih) čelika pristup problemu zavarljivosti postalo je složeno i interdisciplinarno pitanje. Zavarljivost se općenito može izraziti kao skup faktora koji utječu na [28, 31]:

- sposobnost zavarivanja
- postizanje kvalitetnog zavarenog spoja
- pouzdanu eksploataciju zavarenog proizvoda u zahtijevanom vijeku trajanja.

Postoji više definicija zavarljivosti, a najčešće se koristi definicija Međunarodnog instituta za zavarivanje, a što je i definicija prema ISO standardu [28]:

"Metalni materijal smatra se zavarljivim po određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se može postići homogenost zavarenog spoja pri upotrebi pogodnog postupka zavarivanja. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio."

Suvremena definicija zavarljivosti određuje se kroz materijal, sigurnost zavarenog spoja te mogućnost zavarivanja. U definiranje materijala ulaze kemijski sastav, metalurška svojstva materijala koja prvenstveno ovise o načinu njegove proizvodnje te fizikalna odnosno mehanička svojstva materijala. U pogledu sigurnosti zavarenog spoja posebna pažnja se posvećuje konstrukcijskom obliku zavarivanog spoja, vrstama i iznosu naprezanja, debljini elemenata, radnim temperaturama te okolnom mediju.

Mogućnost zavarivanja obuhvaća niz elemenata kao što su priprema za zavarivanje (određivanje temperature predgrijavanja, kemijskog sastava, debljine materijala i dr.), postupci i parametri izvođenja zavarivanja te naknadni postupci toplinske obrade.

Kvaliteta zavarenog spoja može se izraziti usporedbom svojstava osnovnog materijala i zavarenog spoja. Kod zavarivanja redovito dolazi do razlike u svojstvima osnovnog materijala i zavarenog spoja, a ta je razlika veća što je zavarljivost, kao kompleksna veličina, manja.

Ne postoji jedinstvena metoda ispitivanja koja bi sveobuhvatno odredila i kvantificirala pojam zavarljivosti. Za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti koristi se niz metoda od kojih svaka služi samo za određivanje pojedinih svojstava iz definicije zavarljivosti.

2.3.1 Procjena zavarljivosti čelika pomoću ekvivalenta ugljika (C_{ekv})

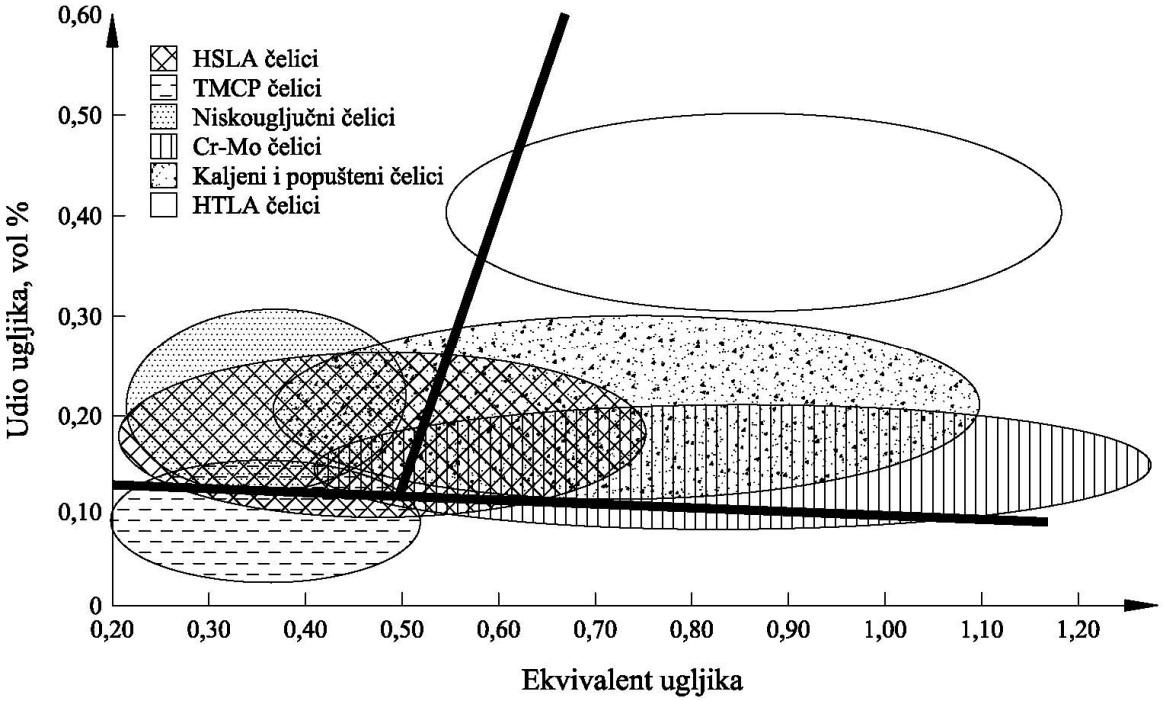
Ekvivalent ugljika, C_{ekv}, daje procjenu zakaljivosti nekog čelika tj. kod zavarivanja procjenu zakaljivosti osnovnog materijala. Zavarljivost čelika najčešće se u praksi procjenjuje upravo pomoću ekvivalenta ugljika. Mogućnost pojave martenzita i drugih tvrdih mikrostrukturnih faza i konstituenata direktno je povezana s ekvivalentom ugljika i brzinom hlađenja čelika s temperatura iznad temperatura transformacija. Što je viši ekvivalent ugljika i veća brzina hlađenja veća je mogućnost pojave tvrdih i krhkih mikrostrukturnih faza pri hlađenju. To je osobito važno kod čelika povišene čvrstoće, ali i kod ostalih čelika koji pokazuju sklonost prema zakaljivanju i pojavi hladnih pukotina [34].

Željena mikrostruktura zavarenog spoja koja će imati optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava postiže se djelovanjem ugljika i drugih kemijskih elemenata iz čelika, uz određeni unos topline, brzinu hlađenja i druge faktore. Ugljik kao najznačajniji element ima veliki utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika. Budući da u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ugljik ima odlučujući utjecaj i na njegovu zavarljivost. Sa stajališta zavarivanja poželjno je imati što niži udio ugljika u čeliku (C ≤ 0,20 %) pa tako i što niži ekvivalent ugljika [6, 28, 33]. Čelici sa C_{ekv} < 0,45 smatraju se zavarljivim te za njih uglavnom postoje poznati parametri zavarivanja.

Više je izraza kojima je moguće računati ekvivalent ugljika, a koji će se odabrati ovisi o vrsti čelika. Jedan od korištenih izraza za određivanja ekvivalenta ugljika u praksi prema IIW (engl. *International Institute of Welding*) [34] je:

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5} \tag{4}$$

Na slici 13 prikazan je ekvivalent ugljika kod različitih vrsta čelika.

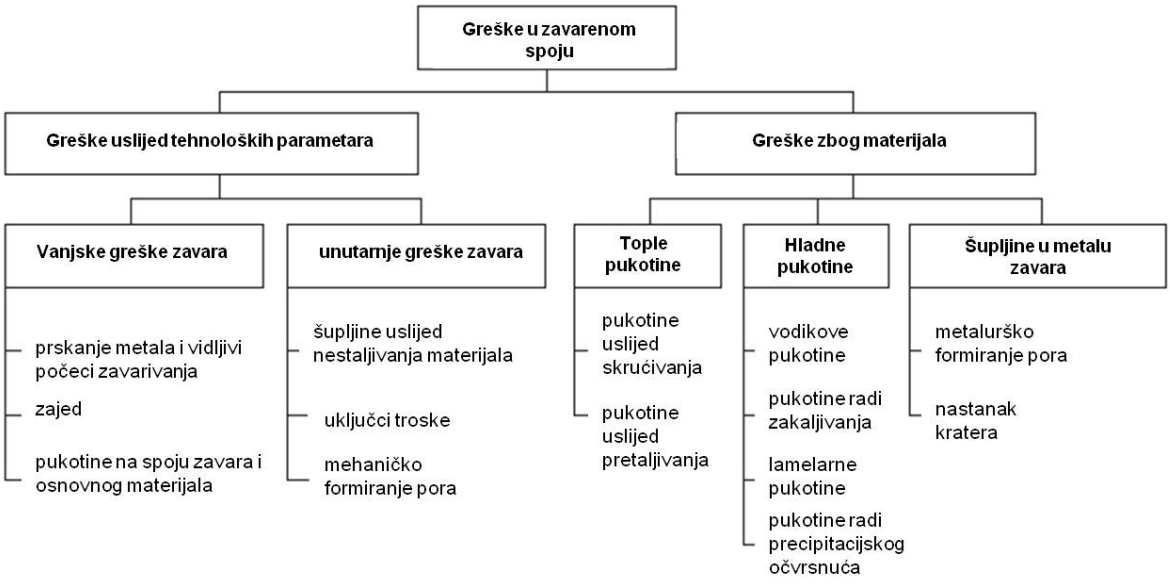


Slika 13: C_{ekv} različitih vrsta čelika [34]

Obzirom da je većina metalurških karakteristika čelika određena kemijskim sastavom, minimalna promjena kemijskog sastava osnovnog ili dodatnog materijala pri zavarivanju može znatno utjecati na pojavu pukotina u zavaru. Mogućnost pojave pukotina povećava se s povećanjem tvrdoće i smanjenjem udarnog rada loma ZUT-a te je stoga C_{ekv} koristan pri procjeni mogućnosti pojave pukotina kod zavarivanja legiranih čelika u odnosu na nelegirane [35].

2.3.2 Greške u zavarenim spojevima

Pukotine/greške koje se mogu pojaviti kod zavarivanja čelika mogu se podijeliti na nekoliko načina. Najčešća podjela pukotina/grešaka u zavarenim spojevima je prema mjestu pojavljivanja i prema načinu njihovog nastanka. Na slici 14 prikazana je podjela pukotina/grešaka u zavarima prema načinu njihovog nastanka.



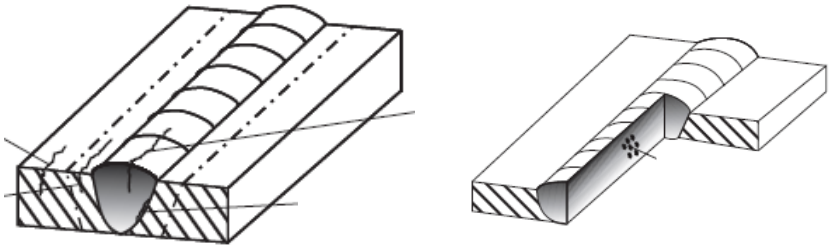
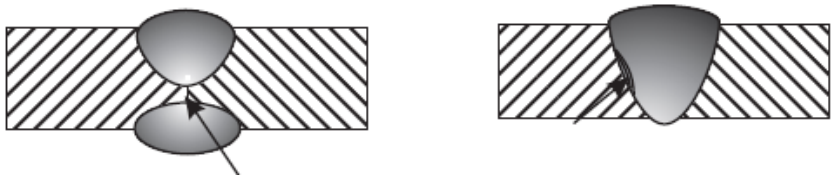
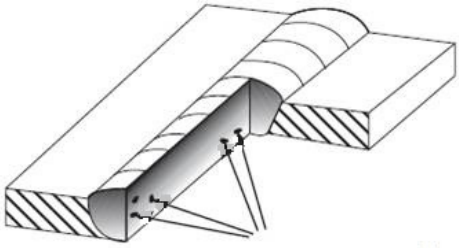
Slika 14: Vrste grešaka u zavarenom spoju [36]

Prema HRN EN ISO 6520-1 Zavarivanje i srodni procesi - Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima - 1. dio: Zavarivanje spajanjem (ISO 6520-1:2007; EN ISO 6520-1:2007) podjela grešaka u zavarenim spojevima je prema mjestu na kojima se pojavljuju i to na četiri vrste:

- greške oblika zavara

- pukotine i šupljine u zavaru
- nestaljivanje materijala i nedovoljni provari
- čvrsti uključci u zavaru

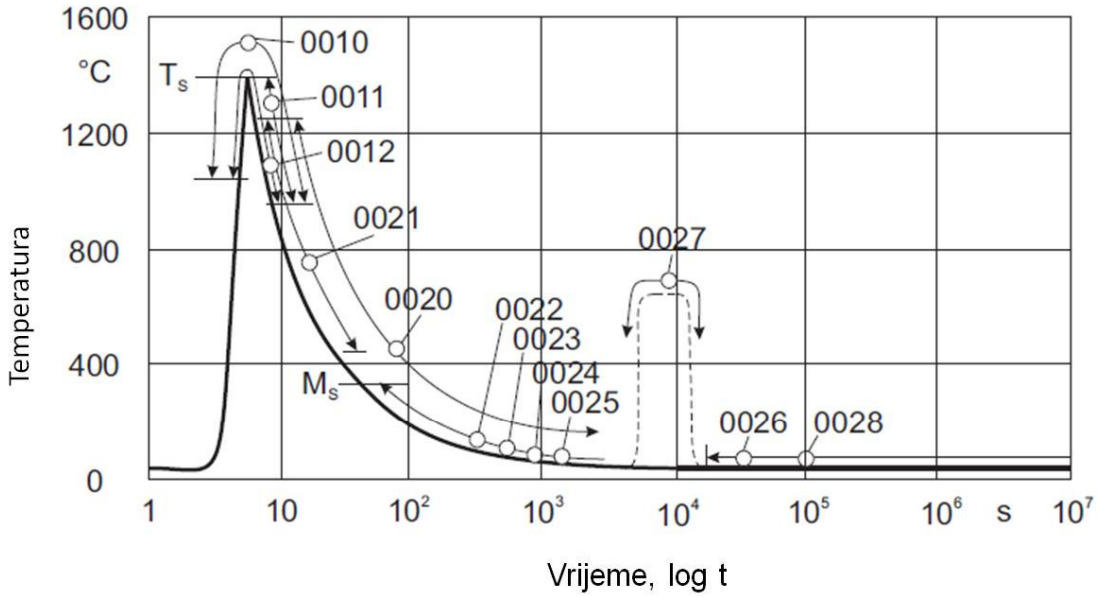
Slika 15 prikazuje primjere ove četiri vrste grešaka [37]

• greške oblika zavara	
• pukotine i šupljine u zavaru	
• nestaljivanje materijala i nedovoljni provari	
• čvrsti uključci u zavaru	

Slika 15: Podjela grešaka u zavarenom spoju prema HRN EN ISO 6520 - 1

2.3.3 Tople i hladne pukotine u zavarenim spojevima

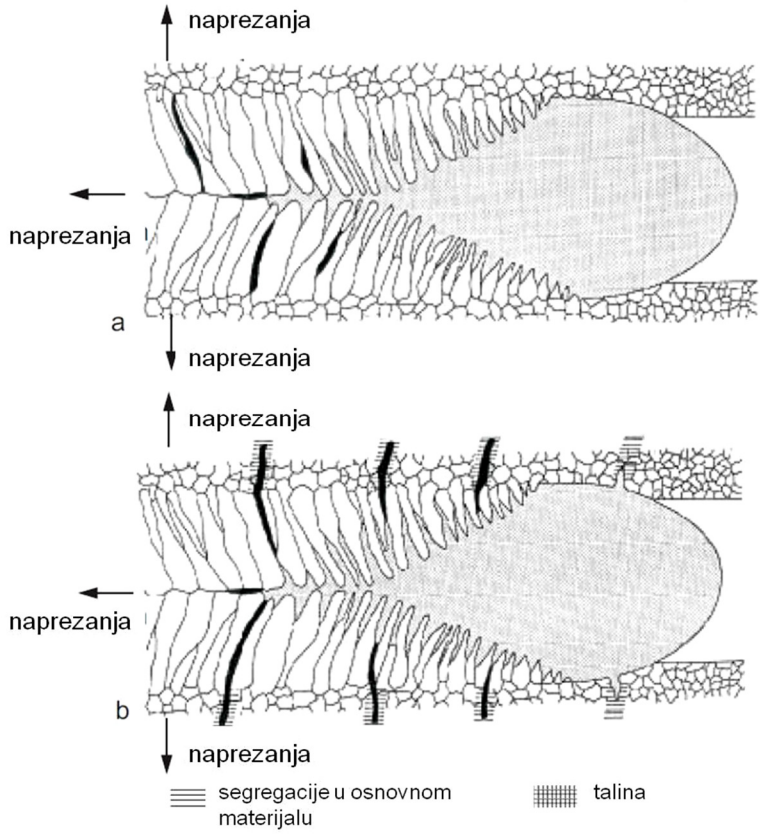
Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama npr. kod čelika od temperature kristalizacije do približno 900 °C. Nastaju odmah nakon skrućivanja u samom zavaru uslijed nastanka segregacija pojedinih legirnih elemenata i/ili nečistoća, koje se stvaraju u samom procesu skrućivanja taline. U uvjetima toplinskih naprezanja koja nastaju zbog hlađenja zavarenog spoja, različite segregacije kao mjesta inicijacije pukotina osnovni su uzročnik nastajanja te vrste pukotina. Slika 16 prikazuje temperaturna područja nastanka pojedinih vrsta pukotina. Grupacija 0010 se odnosi na tople pukotine, a 0020 na hladne pukotine.



0010 područje toplih pukotina
0011 područje pukotina uslijed skrućivanja
0012 područje pukotina uslijed pretaljivanja
0020 područje hladnih pukotina
0021 područje pukotina krhkog loma
0022 područje pukotina uslijed stezanja
0023 područje vodikovih pukotina
0024 područje pukotina uslijed zakaljivanja
0025 područje pukotina cijepanja
0026 područje pukotina uslijed starenja
0027 područje pukotina precipitacijskog očvrsnuća
0028 područje lamelarnih pukotina

Slika 16: Temperaturna područja nastanka toplih i hladnih pukotina [37]

Slika 17 prikazuje nastanak toplih pukotina uslijed pretaljivanja (17 a) i uslijed skrućivanja pri hlađenju metala zavara (17 b).



Slika 17: Nastanak toplih pukotina
a) uslijed pretaljivanja
b) uslijed skrućivanja metala zavara [37]

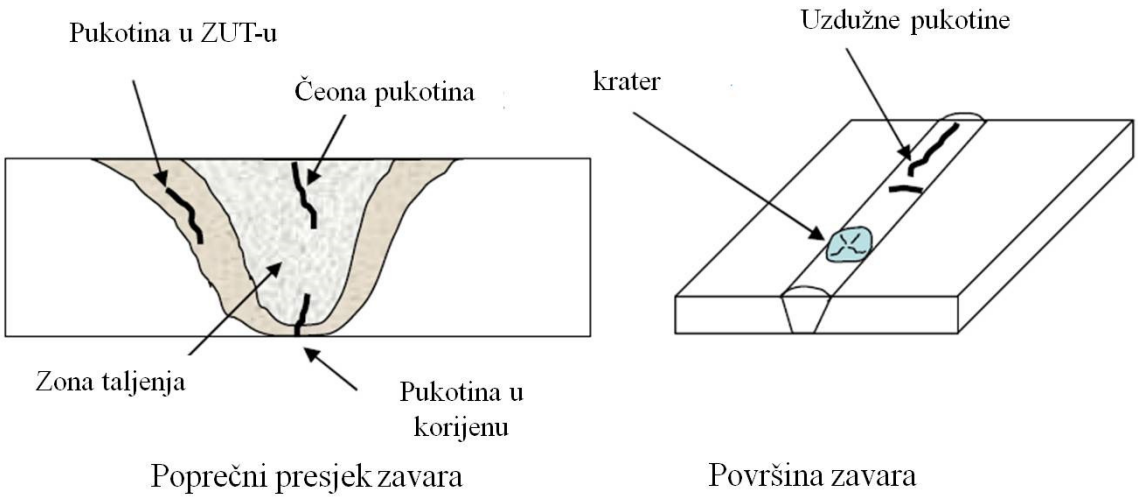
Ograničavanje udjela legirnih elementa s velikom tendencijom stvaranja segregacija jedan je od načina prevencije pojave toplih pukotina. Na pojavu i veličinu segregacija također veliki utjecaj ima i temperatura taline što se regulira unosom topline pri zavarivanju.

Premalim unosom topline povećava se čvrstoća i tvrdoća zavarenog spoja, što uz krutost konstrukcije i prisutnost vodika u zavarenom spoju može uzrokovati nastajanje i pojavu pukotina. Time se smanjuje deformabilnost i povećava sklonost krhkom lomu. Preveliki unos topline može uzrokovati pojavu toplih pukotina različitog karaktera te osjetljivost na početak i širenje krhkog loma duž linije staljivanja pri niskim temperaturama.

Mjesto nastanka ovih pukotina je najčešće u zoni utjecaja topline, ali se isto tako mogu pojaviti i u zoni taljenja zavarenog spoja, slika 18.

Postoje dva osnovna tipa toplih pukotina [37]:

- kristalizacijske tople pukotine – nastaju u zoni taljenja
- podsolidusne ili likvacijske tople pukotine – nastaju u zoni utjecaja topline.



Slika 18: Tople pukotine u zavarenom spoju [36]

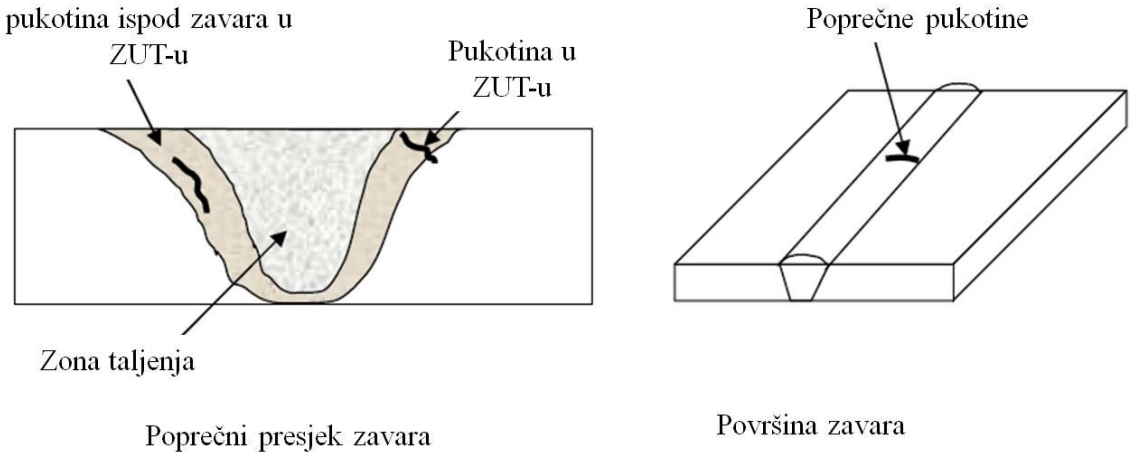
Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturama uglavnom ispod 200 °C, a mogu nastati i nekoliko dana nakon zavarivanja. Takve pukotine zovu se "zakašnjele" hladne pukotine. Kod čelika koji pokazuju sklonost pojavi hladnih pukotina kontrolu kvalitete potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja metodama bez razaranja, a što se smatra inkubacijskim periodom nastajanja zakašnjelih hladnih pukotina. Hladne pukotine mogu nastati u zavaru i u zoni utjecaja topline, a mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi zavarenog spoja, okomito ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja.

Tri su osnovna uzroka nastajanja hladnih pukotina [36,37]:

- sklonost materijala prema zakaljivanju (ocjenjuje se preko različitih eksperimentalno dobivenih formula za ekvivalent ugljika)
- postojanje zaostalih naprezanja (mogu se mjeriti jednom od tenzometrijskih metoda ili procjenjivati s obzirom na debljinu materijala, oblik i položaj zavarenog spoja na konstrukciji, gustoći toplinskog toka i količini unesene energije)

- količina difuzijskog vodika (može se eksperimentalno odrediti, npr. glicerinskom metodom).

Za nastanak hladnih pukotina nužna su sva tri navedena uzročnika, a vjerojatnost nastajanja je veća što je veći iznos svakog uzročnika. Slika 19 prikazuje mjesta pojave hladnih pukotina u zavaru.



Slika 19: Hladne pukotine u zavarenom spoju [36]

Prijelomna površina hladnih pukotina je svijetla, za razliku od toplih pukotina kod kojih dolazi do površinske oksidacije površina pukotina koje nastaju na povišenim temperaturama tijekom hlađenja [16].

Površinske pukotine i pukotine kroz cijelu debljinu lima najbolje se otkrivaju pomoću penetranata te magnetskom metodom uz obaveznu prethodnu vizualnu kontrolu pomoću odgovarajućih povećala. Pukotine u unutrašnjosti lima moguće je otkriti drugim nerazornim metodama kao npr. ultrazvučna ispitivanja ili radiografija. U praksi se najčešće susreću hladne pukotine, ali se jednako ozbiljno trebaju shvatiti i ostale pukotine, jer svaka pukotina u uvjetima koji pogoduju njezinom širenju može dovesti do loma zavarenog spoja ili proizvoda u eksploataciji.

2.3.4 Zavarljivost mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće

Problemu zavarljivosti mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće može se pristupiti s metalurškog, konstrukcijskog i izvedbenog stajališta. Metalurška zavarljivost čelika često se izražava ekvivalentom ugljika, kako je već spomenuto. Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće potrebno je dodatnim ispitivanjima donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti, jer uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i različitih udjela vodika u zavaru, pokazuju različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama.

Za procjenu zavarljivosti mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće ispituje se još i mogućnost nastanka [27]:

- hladnih pukotina
- toplih pukotina
- lamelarnog trganja
- krhkog loma
- povišenja tvrdoće materijala
- starenja materijala.

Prilikom zavarivanja čelika visoke čvrstoće na prvom mjestu javlja se problem pojave pukotina. Prema mjestu pojavljivanja, pukotine se mogu podijeliti na one koje se pojavljuju u:

- metalu zavara
- osnovnom materijalu (mogu nastati i u zoni utjecaja topline).

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u metalu zavara:

- prevelika brzina hlađenja zavarenog spoja
- strukturne transformacije u zavarenom spoju (nastajanje krhkih mikrostrukturnih faza).

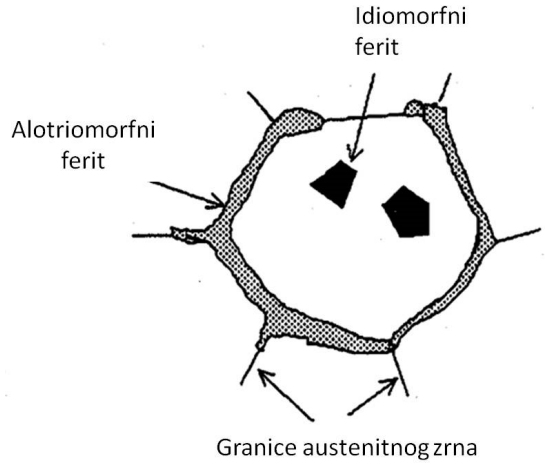
Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u osnovnom materijalu su:

- kemijski sastav materijala
- prisutnost vodika
- nastajanje unutrašnjih naprezanja zbog temperaturnih ciklusa pri zavarivanju.

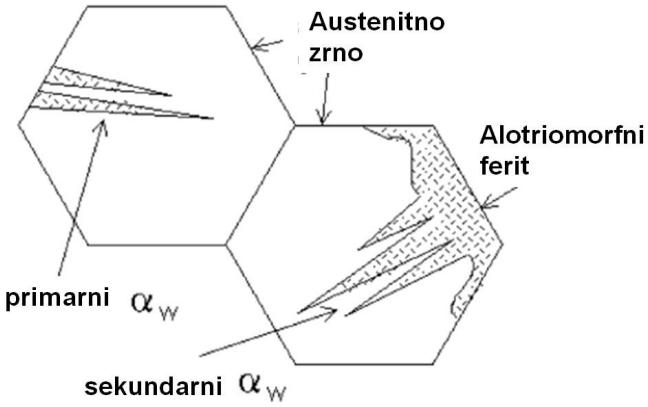
2.3.5 Mikrostrukturne faze u zavarenom spoju mikrolegiranih čelika

U metalu zavara mikrolegiranih čelika dominira struktura ferita, koja se javlja u različitim morfološkim oblicima. Pri ohlađivanju zavara na temperaturu okoline nastaje mikrostruktura čiji su glavni konstituenti, odnosno morfološki oblici: α_{al} – alotriomorfni (izduženi) ferit, α_w – Widmannstaettenov ferit te α_A – igličasti ili acikularni ferit. Također, moguća je prisutnost i martenzita, zaostalog austenita ili pak novonastalog perlita [38].

Alotriomorfni ferit nastaje na granicama austenitnog zrna, a naziv mu ukazuje da oblik ferita ne odražava njegovu unutarnju simetriju, slika 20 a. Primarni Widmannstaettenov ferit nastaje direktno na granici austenitnog zrna dok sekundarni Widmannstaettenov ferit nastaje na alotriomorfnom feritu, slika 20 b [39].



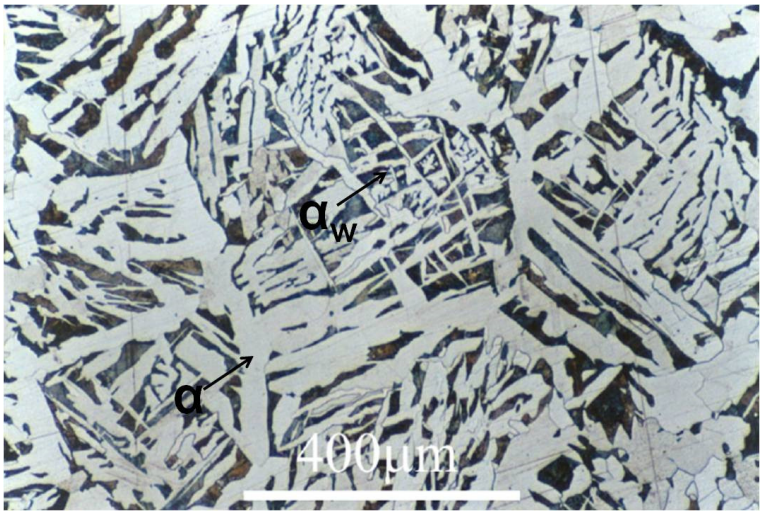
a)



b)

Slika 20: Pojavni oblici i mjesta nukleacije ferita
a) alotriomorfni i idiomorfni ferit
b) Widmannstaettenov ferit [39]

Nastajanje Widmannstaettenove strukture u čeliku ovisi o kemijskom sastavu, veličini austenitnih zrna i brzini hlađenja [38]. U zavarenim spojevima Widmannstaettenova struktura može nastati u metalu zavara i u pregrijanom osnovnom materijalu, a uslijed izražene krupnozrnatosti izaziva povećanje krhkosti materijala, slika 21. Legirni elementi kao što su mangan, krom i molibden pospješuju stvaranje Widmannstaettenove strukture u čeliku.



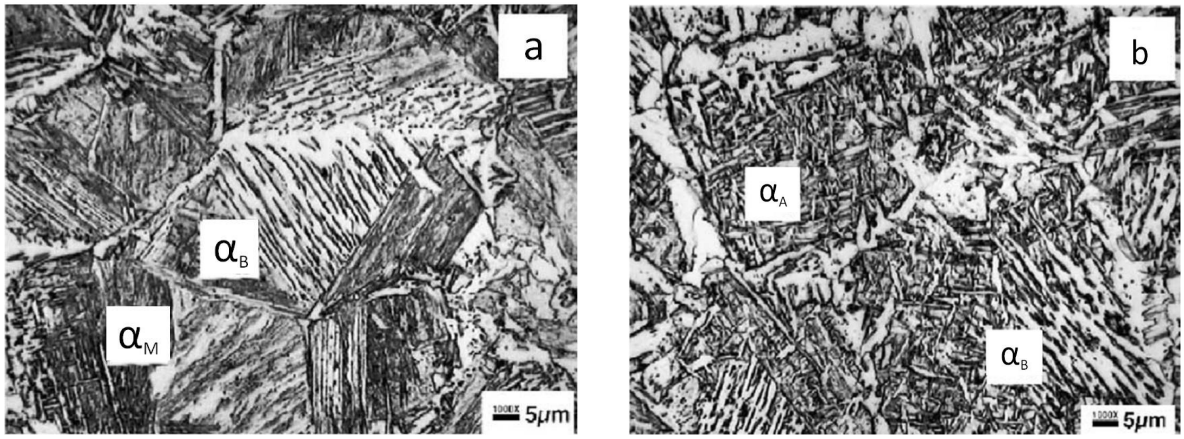
Slika 21: Miješana mikrostruktura alotriomorfnog i Widmannstaettenovog ferita i perlita [38]

Acikularni ili igličasti ferit se često naziva i bainitni ferit jer vrlo često u praksi, radi velike sličnosti, dolazi do karakteriziranja acikularnog/igličastog ferita kao bainitnog. Transformacija acikularnog ferita nastaje uslijed nepotpune reakcije, što je ujedno i karakteristika bainita, stoga je ove dvije strukture ponekad teško razlikovati [39]. Razlika između njih je u mjestu nukleacije. Nukleacija acikularnog feritna je intragranularna tj. unutar austenitnog zrna, a bainita intergranularna tj. na granici austenitnog zrna.

Iglice acikularnog ferita rastu uslijed neprekidne ponavljajuće nukleacije feritnih jediničnih ćelija koje nastaju bezdifuzijskom pretvorbom bez premještanja ugljikovih atoma [40]. Ugljikovi atomi prelaze u austenit nakon završetka stvaranja svake pojedine iglice. Kontinuiranim rastom acikularnog ferita austenit sve više se obogaćuje ugljikom do razine nakon koje više nije moguća bezdifuzijska pretvorba acikularnog ferita. Ta kritična koncentracija ugljika u austenitu odgovara stanju u kojem je slobodna energija austenita jednaka onoj akumuliranoj u feritu (što iznosi 400 J/mol). Taj trenutni prestanak transformacije acikularnog ferita naziva se nepotpuna reakcija [41]. Eksperimentalna

istraživanja takvih nepotpunih reakcija tijekom transformacije acikularnog ferita u zavarima predmet su brojnih istraživanja [40, 42].

Danas je u metalurgiji zavarivanja prihvaćeno da se morfologija za koju su karakteristične iglice, odnosno pločice koje se prostiru u više pravaca i po pravilu su ujezgrene unutar zrna na uključcima, naziva acikularni ili igličasti ferit. Kemijski sastav aktivnih oksidnih uključaka na kojima dolazi do nukleacije igličastog ferita nije točno određen, pa tako sve vrste uključaka kao što su npr. TiO_2, Al_2O_3, SiO_2, $MnO\text{-}SiO_2$, TiO, mogu ujezgriti igličasti ferit u početnoj fazi nukleacije [40, 41]. Slika 22 prikazuje mikrostrukturu zavara dva čelika kontinuirano hlađenih s 1200 °C brzinom hlađenja od 80 °C/s. Na slici 22 a vidljiva je dominantno martenzitno bainitna mikrostruktura jer u mikrostrukturi čelika nije bilo uključaka na bazi titana na kojima bi prilikom hlađenja došlo do nukleacije acikularnog ferita. Slika 22 b prikazuje mikrostrukturu čelika koji je imao prisutne uključke na bazi titana tako da se mikrostruktura sastoji većinom od acikularnog ferita uz prisutnost manje količine bainitnog ferita koji je nastao jer se alotriomorfni ferit nije prostirao u potpunosti duž granica austenitnih zrna. [41]

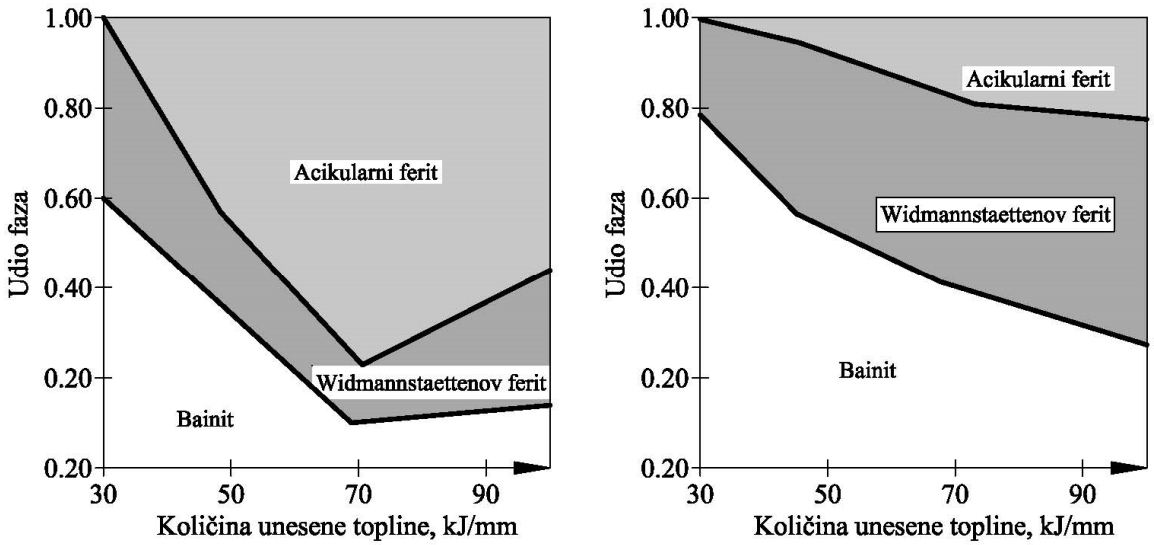


a) b)

Slika 22: Mikrostruktura zavara:
a) s dominantno martenzitno – bainitnom strukturom,
b) s dominantnom strukturom acikularnog i bainitnog ferita [41]

U više-prolaznom zavarenom spoju, svaki slijedeći prolaz toplinski utječe na prethodni sloj, odnosno izvodi se toplinska obrada prethodnog sloja. To dovodi do usitnjenja zrna u mikrostrukturi prethodnog sloja.

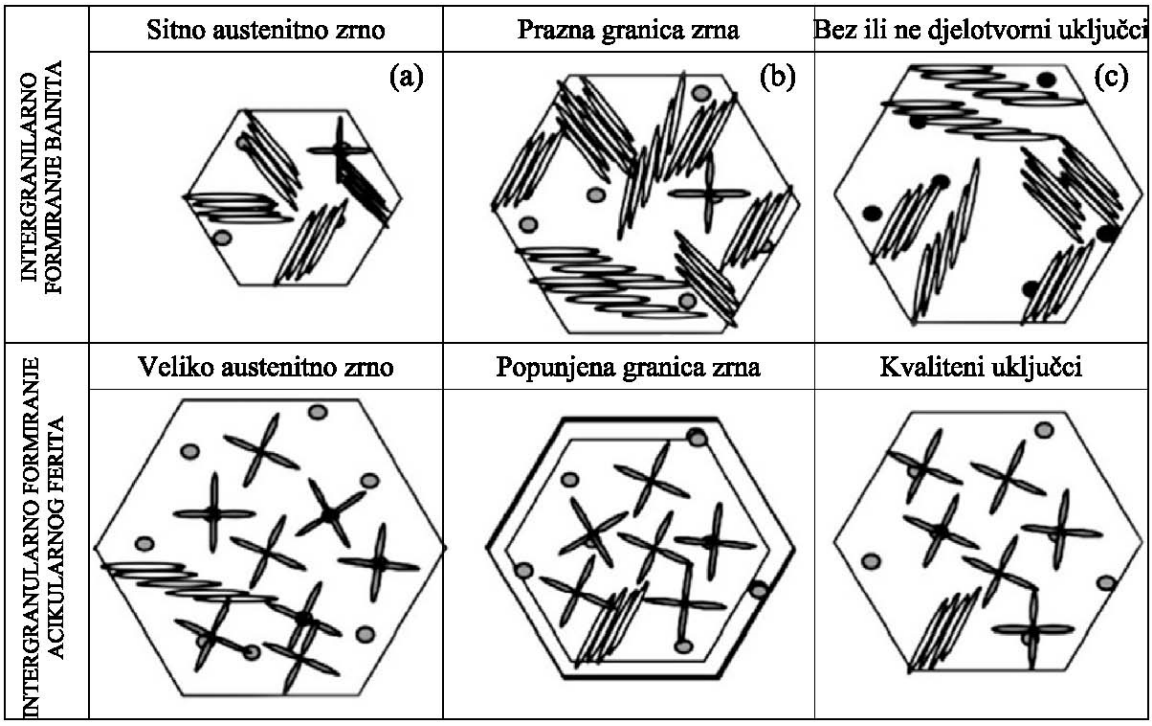
Pri zavarivanju čelika, u zoni utjecaja topline dolazi do porasta austenitnih zrna, a veličina zrna ovisi o količini unesene topline tijekom samog postupka. Iz ovoga proizlazi da kada se zavaruju čelici koji sadrže odgovarajuće uključke na kojima može početi nukleacija acikularnog ferita, količina igličastog ferita koji se formira u ZUT-u raste na račun bainita, s porastom količine unesene topline (pri čemu raste i veličina austenitnog zrna) što pokazuje slika 23 a [43]. Pri vrlo velikim količinama unesene topline brzina hlađenja toliko opada da se javljaju veće količine Widmannstaettenovog ferita pri čemu dolazi do odgovarajućeg smanjenja količine igličastog ferita. U čeliku koji ne sadrži odgovarajuće uključke na kojima bi započela nukleacija igličastog ferita njegov udio je uvijek mali, slika 23 b.



Slika 23: Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini
a) kod čelika s prisutnim oksidnim uključcima
b) kod čelika bez prisutnih oksidnih uključaka [43]

Iako je mehanizam nastanka bainita i acikularnog ferita vrlo sličan, acikularni ferit radi velikog broja klica nukleacije sadrži vrlo veliki broj različitih kristalografskih ravnina što stvara vrlo nepravilnu mikrostrukturu, a u konačnici rezultira većim udarnim radom loma zavara s strukturom acikularnog ferita u odnosu na zavare s dominantnom bainitnom strukturom [40, 41, 44]. Istraživanja su pokazala da je u istom čeliku i jednakom zavaru moguće postići više intragranularnih mjesta nukleacije acikularnog ferita u odnosu na intergranularna mjesta nukleacije bainita. Slika 24 prikazuje načine na koje je moguće potisnuti stvaranje bainita s ciljem postizanja acikularnog ferita [45]. Prvi način je povećanje

austenitnog zrna čime se smanjuje broj granica zrna po jedinici volumena i smanjuje kinetika intergranularnih mjesta nukleacije na račun intragranularnih (slika 24 a) [38, 46]. Drugi način je nastanak alotriomorfnog ferita na granicama zrna čime se stvara nepovoljna podloga za intergranularnu nukleaciju (slika 24 b) [42, 47] i treći način je postojanje uključaka na kojima će doći do nukleacije acikularnog ferita (slika 24 c) [45, 48].



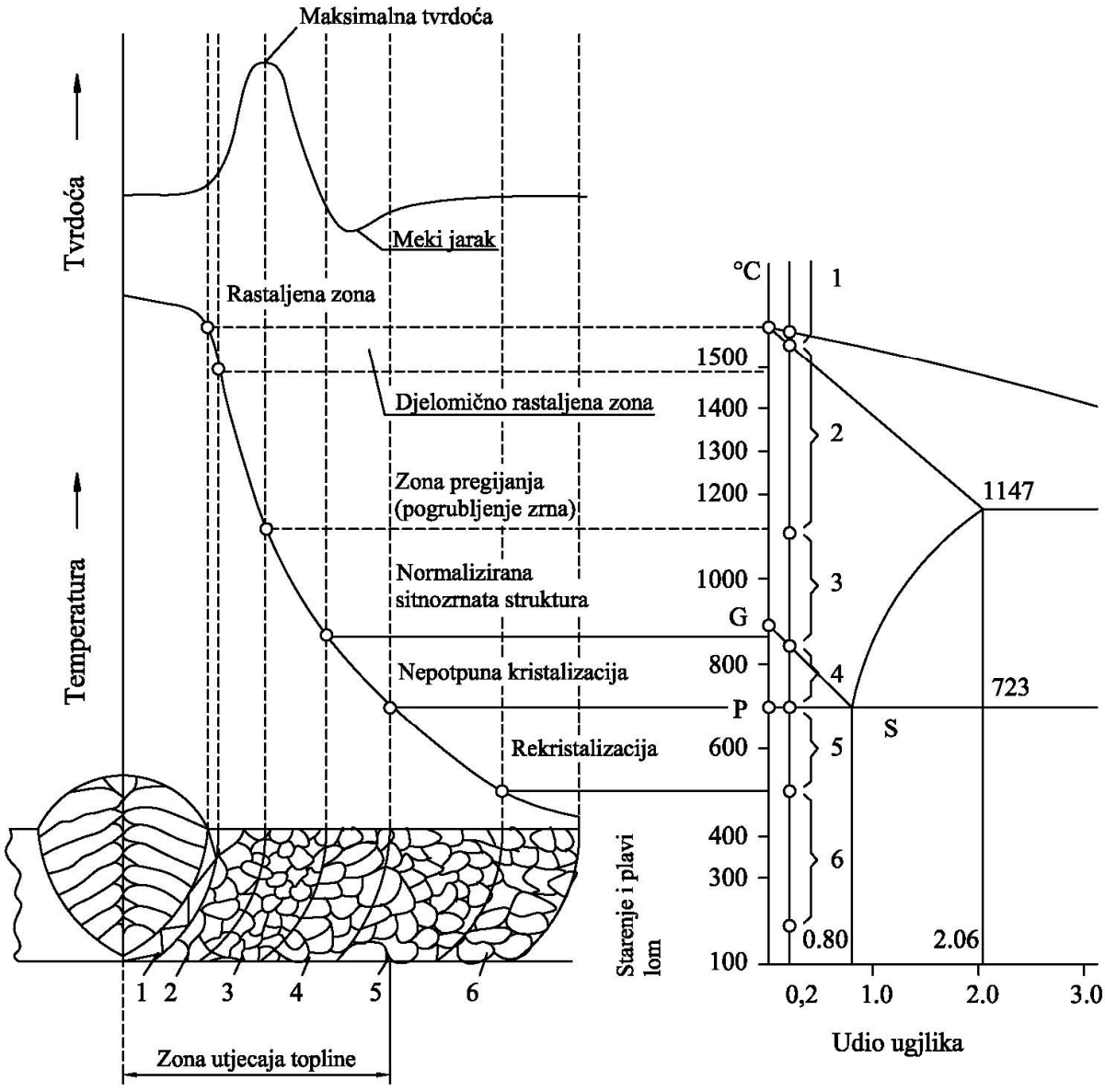
Slika 24: Shematski prikaz mehanizama potiskivanja bainitne transformacije na račun acikularnog ferita [45]

2.3.5 Promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline

Zona utjecaja topline ili ZUT teorijski obuhvaća područje osnovnog materijala (OM), u kojem nije došlo do taljenja OM tijekom zavarivanja, ali u kojem je došlo do promjene mikrostrukture, a time i mehaničkih ili drugih svojstava uslijed unošenja topline zavarivanjem.

Kod dovoljno sporog ohlađivanja nelegiranih čelika iznad temperature A_1 (723 °C) dolazi do izrazitih promjena strukture u ZUT-u. Ova zona je vidljiva u odnosu na osnovni materijal, jer u tom volumenu materijala dolazi do promjene veličine zrna i usmjerenosti što utječe na refleksiju svjetla, a time i na izgled.

Za poboljšane čelike, koji se kale i popuštaju pri relativno niskim temperaturama do 300 °C, svako grijanje iznad 300 °C uzrokovati će promjene svojstava OM (niža čvrstoća), pa će ZUT obuhvatiti zonu zagrijavanja na temperaturama od 300 °C do 1500 °C. Širina ZUT-a ovisi o unosu topline i iznosi najčešće 2 mm - 8 mm. Na slici 25 prikazane su mikrostrukturne promjene u zoni utjecaja topline zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog čelika s feritno – perlitnom strukturom i udjelom ugljika od 0,2 %.



Slika 25: ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika s 0.2 %C [49]

Zona taljenja, 0, obuhvaća dio zavarenog spoja, koji je bio iznad likvidus linije, tj. koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen. Pri ohlađivanju dolazi do kristalizacije pri čemu nastaje struktura različita od strukture osnovnog materijala. Pojava klica i rast kristala ovisit će o ohlađivanju rastaljenog metala. Kristali najčešće rastu okomito na rubove spoja, a dodiruju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati nastanak vrućih pukotina ili biti koncentrator naprezanja pri opterećenju.

Djelomično rastaljena zona, 1, (između likvidus i solidus linije) predstavlja dvofazno područje (talina + krutina), bogata je legirnim elementima, nečistoćama koje imaju nižu temperaturu taljenja, a sadrži i plinove. Lokalno povišen udio nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti s okolinom pa u strukturi ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Pri ovako visokim temperaturama dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi i oksidi), čime dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu što omogućuje pojavu toplih pukotina.

Zona pregrijavanja, 2, nalazi se ispod solidus temperature ali dosta iznad temperature Ar_3 (1100-1450 °C). U ovoj zoni dolazi do porasta tj. pogrubljenja austenitnog zrna, koja pri brzom hlađenju prelaze u Widmannstaettenovu strukturu, koja je tvrđa i krhkija od poželjnog. U slučaju pojave Widmannstaettenove strukture sitnozrnata i žilava feritno-perlitna struktura može se ponovo postići normalizacijskim žarenjem.

Zona normalizacije, 3, nalazi se neznatno iznad temperature A_3. U toj zoni nastaje sitnozrnata, normalizirana struktura koja najčešće posjeduje bolja svojstva od osnovnog materijala. Ovdje je zagrijavanjem došlo do potpune transformacije ferita i perlita u austenit, a prilikom hlađenja do ponovne transformacije stvaranjem klica i njihovim rastom u vrlo finu feritno-perlitnu strukturu. Ukoliko je čelik zakaljiv, tada u ovoj zoni kao i u ostalim zonama zagrijanim iznad temperature A_3 može doći do zakaljivanja, a u ekstremnom slučaju i do pojave 100 %-tne martenzitne strukture, što ovisi o brzini hlađenja i kemijskom sastavu čelika. Izbjegavanje zakaljivanja može se postići predgrijavanjem ili unošenjem veće količine topline pri zavarivanju. Kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj žari tj. normalizira djelomično sloj ispod, što povoljno djeluje na čvrstoću zavarenog spoja. Zbog toga zavari u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu i lošija svojstva od višeslojnih.

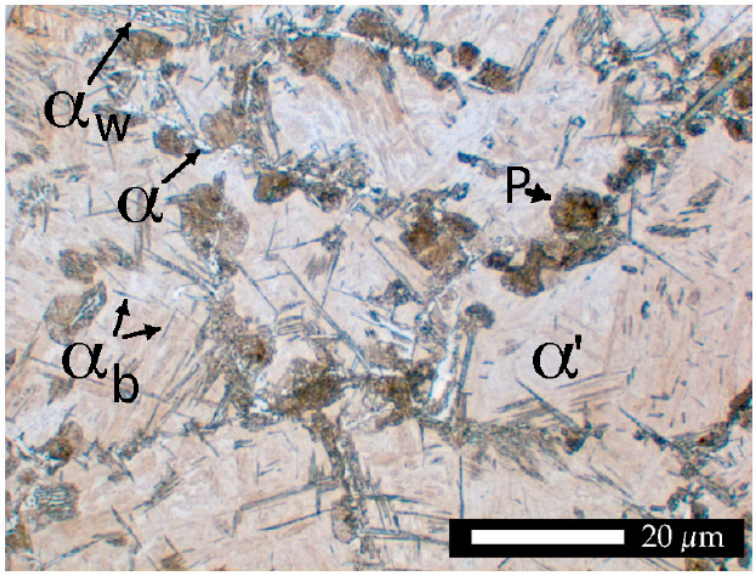
Zona djelomične prekristalizacije, 4, nalazi se u temperaturnom području između temperatura A_1 i A_3. Za vrijeme hlađenja u toj zoni dolazi do nastajanja klica ferita, na granicama ili unutar zrna austenita, koje zatim rastu, a kad temperatura padne ispod temperature A_1,

zaostali se austenit pretvara u perlit. Naravno, u ovisnosti o vrsti čelika i brzini hlađenja, moguća je i pretvorba zaostalog austenita u tvrdi, krhki i nepoželjni martenzit.

Zona rekristalizacije, 5, se nalazi na temperaturama nižim od A_1 temperature, do 500 °C, gdje zaostali austenit prelazi u perlit.

Zona starenja i plavog loma, 6, nalazi se u temperaturnom intervalu od 200 °C do 500 °C. U ovoj zoni ne dolazi do strukturnih promjena (ostaje feritno-perlitna mikrostruktura) ni do promjena oblika zrna, ali uslijed starenja može doći do pojave krhkosti.

Slika 26 prikazuje mikrostrukturu ZUT-a u zoni pregrijavanja, u području grubog austenitnog zrna. U mikrostrukturi su u većini prisutni martenzit s alotriomorfnim i Widmannstaettenovim feritom, bainitom i perlitom. [50]



Slika 26: Mikrostruktura u zoni utjecaja topline [38]

3. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Kod zavarivanja cjevovoda velikih promjera i velikih debljina stjenka upotrebljavaju se uglavnom elektrolučni postupci zavarivanja kao npr. REL postupak, koji je vrlo pogodan za rad na terenu zbog širokog izbora dodatnih materijala i otpornosti na atmosferske utjecaje. Osim REL postupka, za zavarivanje cjevovoda sve se više koristi MAG zavarivanje koje je do nedavno bilo slabije primjenjivano zbog osjetljivosti zaštitne plinske atmosfere pri radu na otvorenom. Taj problem uspješno se eliminira upotrebom zaštitnih kabina koje umanjuju atmosferske utjecaje pri radu na otvorenom (npr. vjetar, kiša i sl.) Glavna prednost MAG postupka pri zavarivanju cjevovoda je što taj postupak daje veće količine rastaljenog materijala čime se smanjuje vrijeme zavarivanja i povećava produktivnost. Nadalje, intenzivnim razvojem upravljanja prijenosa metala u električnom luku pri MAG zavarivanju bilježi se pojava modificiranih inačica koje su upravo namijenjene za zavarivanje korijenskog prolaza pri izgradnji cjevovoda. Postupci poput MAG – STT ili MAG - Fastroot sve više zamjenjuju tradicionalne tehnologije zavarivanja korijena celulozom obloženom elektrodom ili TIG postupkom.

MAG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između kontinuirane taljive elektrode u obliku žice i radnog komada pri čemu pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj direktno u električni luk. Kod MAG zavarivanja čelika najčešće se koriste pune čelične žice promjera 0,6 mm do 2,4 mm s prevlakom bakra ili nikla radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Dodatni zahtjevi na dodatni materijal su visoka glatkoća površine, točnost dimenzija te pravilno namatanje na kolut kako bi se osigurala konstantna dobava žice. [51]

Parametri MAG zavarivanja su sljedeći:

- jakost struje I, A – razmjerna s brzinom dobave žice $v_{ž,}$ m/min
- napon električnog luka U, V – razmjeran s visinom električnog luka
- brzina zavarivanja v_z, mm/min
- slobodni kraj žice $l_{skž}$, mm
- protok plina Q_{pl}, l/min
- vrsta plina
- induktivitet L, H

- promjer žice $d_ž$, mm
- nagib pištolja β, ^{O}

Prednosti MAG zavarivanja u odnosu na ostale elektrolučne postupke su:

- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala
- veliki raspon mogućih parametara i načina prijenosa materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- široki raspon debljina osnovnog materijala
- visoka učinkovitost i produktivnost
- pogodnost za automatizaciju.

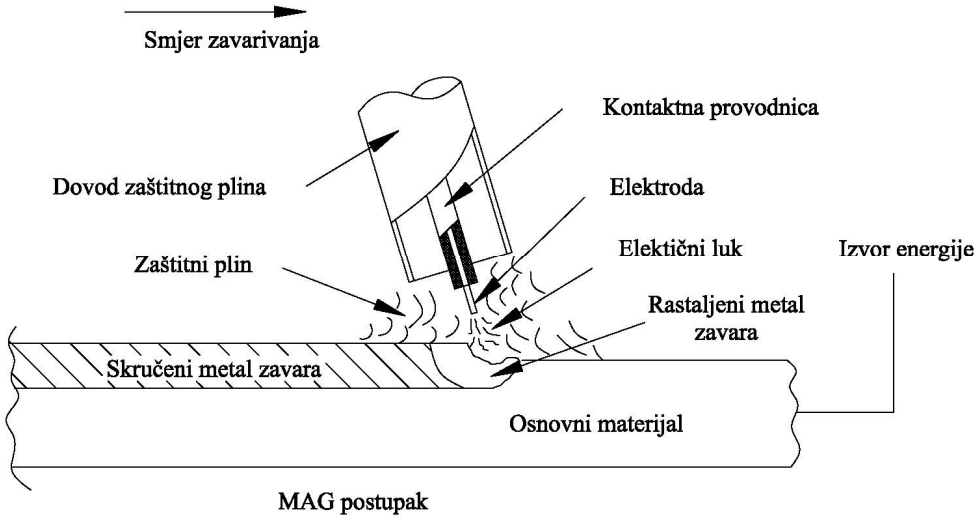
Nedostaci MAG zavarivanja:

- mogućnost grešaka kod rada na terenu (vjetar može otpuhivati zaštitni plin)
- problemi kod dovođenja žice (pogotovo kod duljina polikabela većih od 3m)
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potrebna naknadna obrada zavarenog spoja)
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

3.1. OSNOVE POSTUPKA MAG ZAVARIVANJA

MAG (engl. *Metal Active Gas*) i MIG (engl. *Metal Inert Gas*) su postupci zavarivanja kod kojih do taljenja metala dolazi djelovanjem topline električnog luka uspostavljenog između konstantno dobavljane elektrode kao dodatnog materijala i radnog komada. Proces zavarivanja se ostvaruje u zaštitnoj atmosferi aktivnih ili inertnih plinova odnosno plinskih

mješavina koje struje kroz sapnicu. U okviru MAG zavarivanja razlikuju se MAGC (engl. *Metal Active Gas Carbon*) i MAGM (engl. *Metal Active Gas Mixture*) postupci. Kod MAGC kao zaštitni plin koristi se čisti CO_2, a kod MAGM plinske mješavine sa značajnim udjelom aktivnog plina. Slika 27 shematski prikazuje MIG/MAG zavarivanje s presjekom pištolja u radu.



Slika 27: Shematski prikaz pištolja u radu kod MIG/MAG postupka zavarivanja [52]

Na prijenos metala kod MAG postupka zavarivanja djeluju sljedeće sile [53]:

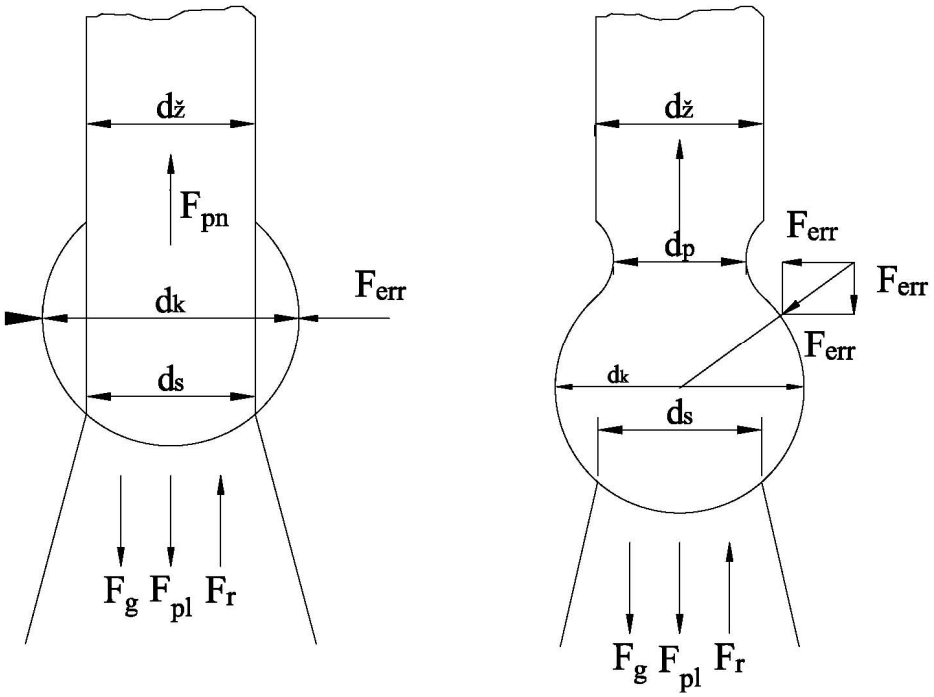
- gravitacijska sila – F_G, N
- elektromagnetska sila – F_{EM}, N
- sila površinske napetosti – F_{PN}, N
- sila strujanja i pritiska plazme luka – F_{PL}, N
- sila eksplozije u kapljicama metala – F_E, N
- sila reaktivnog djelovanja – F_R, N

Slika 28 prikazuje djelovanje sila na kapljicu rastaljenog metala u električnom luku. Ukupna sila prikazana je izrazom (5) :

$$F = F_G + F_{PN} + F_{EM} + F_R + F_{PL} + F_E \quad (5)$$

Od navedenih sila koje djeluju u električnom luku najveći utjecaj ima elektromagnetska sila. Omjerom radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile stvaraju se uvjeti za tzv.

„Pinch“ efekt koji doprinosi odvajanju kapljice rastaljenog metala u zavarivačku kupku. Upravljanjem elektromagnetskom silom preko jačine struje indirektno se omogućava kvalitetno prenošenje materijala kroz električni luk što je pretpostavka za formiranje stabilne taline i homogenost metala zavara.



Slika 28: Shematski prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku [51]

3.1.1 Načini prijenosa metala

Način prijenosa metala ovisi o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti dodatnog materijala , promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Osnovni prirodni načini prijenosa metala u električnom luku ovise prvenstveno o intenzitetu narinute struje i napona i to su kako slijedi:

- **prijenos kratkim spojevima** - nastaje pri niskoj razini parametara i definira ga izmjena faza kratkog spoja i električnog luka što rezultira niskim unosom topline. Daje talinu malog volumena koja se brzo hladi i zbog čega je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavara kod debljih komada; najčešće se izvodi u zaštitnoj atmosferi ugljičnog dioksida i njegovih mješavina s argonom.
- **prijenos mješovitim lukom** – ovaj način prijenosa teško se kontrolira zbog pojave kapljica velikog promjera (višestruko od promjera žice) te se zbog toga javlja

intenzivno prskanje i slabije kvašenje taline. Posljedica je loša geometrija zavara s pojavom nalijepljenih zona. Ovaj prijenos metala prvenstveno je karakterističan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida.

- **prijenos štrcajućim lukom** – karakteriziraju ga veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala zbog čega se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Prijenos se realizira u obliku velikog broja sitnih kapljica koje u slobodnom letu prelaze u talinu tzv. free flight transfer. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Ovaj način prijenosa topline podržavaju plinske mješavine s većinskim udjelom argona.

Osim ovih prirodnih načina prijenosa metala u električnom luku postoje još i opcije pri kojima se primjenjuju posebno oblikovani oblici struje i napona poput impulsnog zavarivanja. Uz to su moguće i kombinacije upravljanja drugim prisutnim silama u električnom luku, npr. površinskom napetošću.

3.2 ZAŠTITNI PLINOVI PRI MIG/MAG ZAVARIVANJU

Odabir zaštitnih plinova kod postupaka zavarivanja značajno utječe na kvalitetu i izgled samog zavara. Pri izboru zaštitnih plinova potrebno je uzeti u obzir sljedeće [54]:

- potrebna mehanička svojstva zavara
- materijal elektrode
- debljina osnovnog materijala i oblik spoja zavara
- početno stanje materijala (prisutnost korozije, oksida, ulja, prevlaka itd.)
- način prijenosa metala
- položaj zavarivanja
- kvaliteta pripreme zavara
- željeni izgled zavara i profil penetracije
- cijena.

Utjecaj zaštitnih plinova na kvalitetu i svojstva zavarenog spoja određen je fizikalnim svojstvima plina, ionizacijskim potencijalom, toplinskom vodljivosti, disocijacijom i rekombinacijom plinova, kemijskom reaktivnosti, gustoćom te čistoćom samog plina.

3.2.1 Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal plina predstavlja energiju, izraženu u elektronvoltima, potrebnu za ionizaciju plina. Pri konstantnim parametrima plina manji ionizacijski potencijal imaju plinovi s većom molekulskom tj. atomskom masom plina. Zbog razlike u atomskoj masi, kod primjene helija i helijem obogaćenih mješavina, za jednake duljine električnog luka potrebni su veći naponi nego pri upotrebi argona i argonskih mješavina. Obzirom da toplinu u luku predstavlja produkt napona i jakosti struje, upotreba helija rezultira većom raspoloživom toplinom.

Uspostavljanje i održavanje električnog luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu zaštitnog plina. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala značajno olakšavaju uspostavljanje električnog luka i povećavaju stabilnost u radu. U tablici 2 prikazane su vrijednosti ionizacijskog potencijala zajedno s energijom disociranja pojedinih plinova.

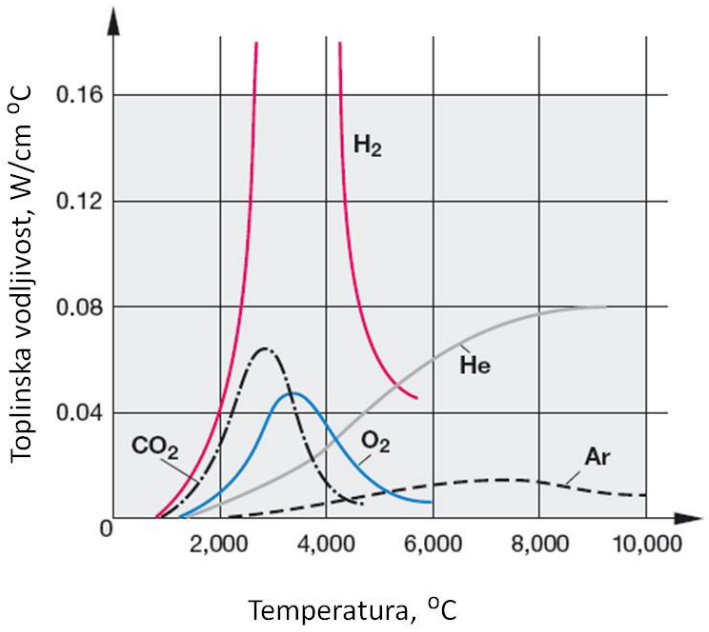
Tablica 2. Energija disociranja i ionizacijski potencijali plinova za zavarivanje [55]

Zaštitni plin	Energija disocijacije (eV)	Ionizacijski potencijal (eV)
vodik	4,5	12,6
kisik	5,1	12,6
dušik	9,7	14,5
ugljični dioksid	5,3	14,4
helij	-	26,4
argon	-	15,8

3.2.2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost utječe na raspodjelu topline u električnom luku te na gubitke topline od sredine električnog luka prema krajevima. Čisti argon ima slabu toplinsku vodljivost što utječe na formiranje električnog luka koji čine dvije zone: vruća uska jezgra te znatno hladnija vanjska zona što rezultira penetracijskim profilom zavara s uskim korijenom i širim vrhom.

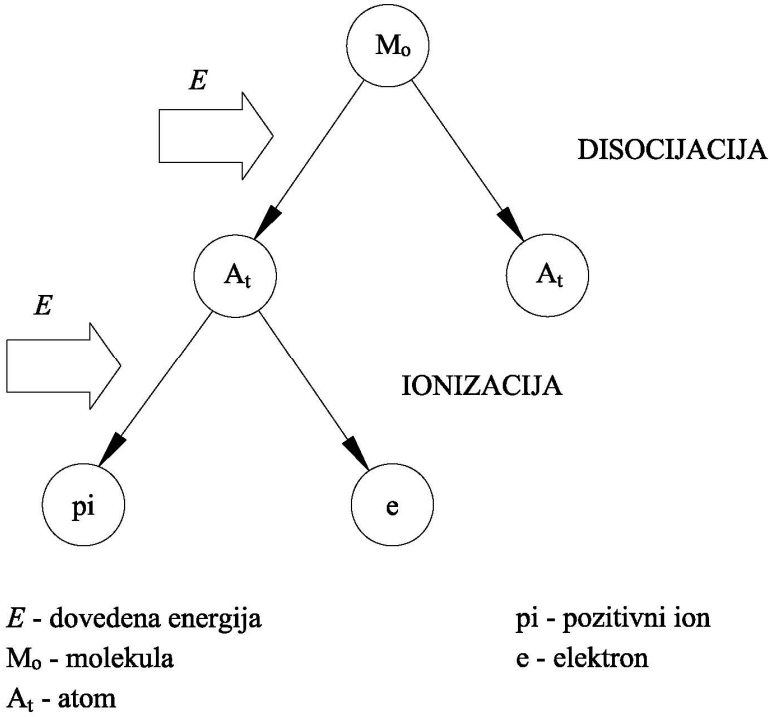
Zaštitni plinovi s većom toplinskom vodljivosti koji provode veću količinu topline u vanjsku zonu zavara stvaraju širi električni luk s ravnomjernijom temperaturnom raspodjelom čime se postiže širi penetracijski profil na mjestu spoja. U ovu skupinu spadaju helij, mješavine argon / vodik i argon / CO_2. Slika 29 prikazuje toplinsku vodljivost nekoliko najznačajnijih plinova u ovisnosti o temperaturi.



Slika 29: Toplinska vodljivost plinova u ovisnosti o temperaturi [56]

3.2.3 Disocijacija i rekombinacija zaštitnih plinova

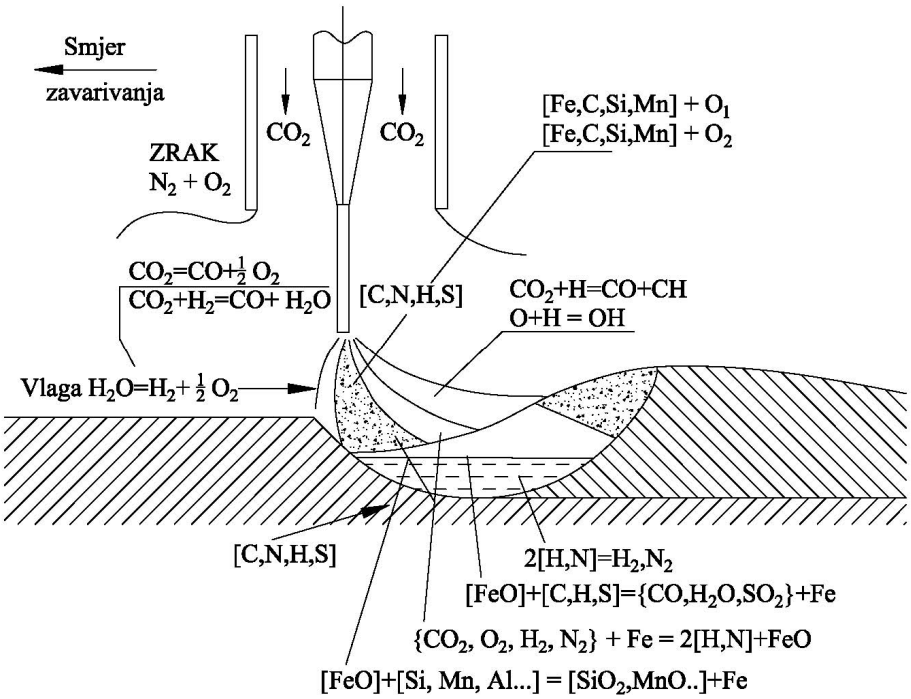
Kod vrlo visokih temperatura u plazmi električnog luka, koje iznose do 10 000 °C, dolazi do razlaganja tj. disocijacije zaštitinih plinova u atomarno stanje. Atomi plina se zatim djelomično ioniziraju čime se poboljšava strujni tok tj. povećava broj nosilaca električnog naboja. Pri kontaktu disociranog plina s znatno hladnijom površinom radnog komada atomi ulaze u rekombinaciju stvarajući ponovo molekule čime se oslobađa velika količina energije u obliku topline, a što zatim utječe na intenzitet taljenja osnovnog metala. U slučaju korištenja argona i helija kao zaštitnih plinova nema rekombinacije obzirom da su argon i helij već u atomarnom stanju zbog čega ne može doći do disocijacije. Iz toga proizlazi da će pri jednakoj temperaturi električnog luka, generirana toplina na radnoj površini biti veća pri upotrebi ugljičnog dioksida, kisika i vodika kao zaštitnih plinova nego kod argona i helija. Slika 30 shematski prikazuje proces disocijacije i ionizacije aktivnih zaštitnih plinova.



Slika 30: Pojednostavljeni shematski prikaz disocijacije i ionizacije [51]

3.2.4 Kemijska reaktivnost zaštitnih plinova

Kemijska reaktivnost (kemijska inertnost) odnosi se na sklonost pojedinog plina iz zaštitne atmosfere da na temperaturama električnog luka reagira s elementima prisutnim u talini. Argon i helij spadaju u skupinu inertnih plinova i kemijski ne utječu na sam zavar. Dušik pri sobnim temperaturama također spada u inerne plinove, ali pri temperaturama zavarivanja postaje reaktivan te može imati nepoželjan utjecaj na kemijski sastav metala zavara. U skupinu reaktivnih plinova na bazi kisika, tzv. oksidansa, spadaju ugljični dioksid i kisik. Ovi plinovi reagiraju s rastaljenim metalom u luku i u kupki stvarajući pri tome okside, a nerijetko i otpadne plinove. Vodik također spada u skupinu reaktivnih plinova iako je po prirodi reducirajući plin jer reagira s oksidacijskim sredstvima i na taj način sprečava stvaranje oksida u talini. Vodik u većim količinama također postaje izuzetno štetan jer uzrokuje pojavu hladnih pukotina u zavaru i poroziteta. Slika 31 prikazuje moguće kemijske reakcije pri MAG zavarivanju u zaštitnoj atmosferi CO_2.



Slika 31: Kemijske reakcije kod MAG zavarivanja u zaštitnoj atmosferi CO_2 [56]

3.2.5 Gustoća plina

Gustoća plina ima veliki utjecaj na njegovu učinkovitost. Plinovi veće gustoće od gustoće zraka za jednaku zaštitu taline zavara zahtijevaju manji dotok od plinova gustoće manje od gustoće zraka.

3.2.6 Čistoća plina

Prisutne nečistoće u plinu mogu imati nepovoljan utjecaj na brzinu zavarivanja, cjelovitost zavara, izgled i oblik zavara te na porozitet. Stoga svaki plin koji se primjenjuje kao zaštitni plin kod zavarivanja mora zadovoljiti minimalnu čistoću koja je određena normama. Tablica 3 prikazuje fizikalna svojstva pojedinih plinova uključujući i čistoću.

Tablica 3. Fizikalna svojstva plinova [55]

Vrsta plina	Specifična toplina, J/Km³	Gustoća, kg/m³	Čistoća, vol. %	Temperatura rosišta pri 1 bar, °C
Argon	936	1,784	99,99	-50
Helij	936	0,179	99,99	-50
Ugljični dioksid	1659	1,977	99,99	-35
Kisik	1315	1,429	99,50	-
Dušik	1302	1,251	99,50	-50
Zrak	1302	1.293	-	-

3.2.7 Vrste zaštitnih plinova

Plinovi koji se koriste kao zaštitna atmosfera kod zavarivanja mogu biti pojedinačni, dvokomponentne, trokomponentne i četverokomponentne plinske mješavine. Komponente mogu biti argon, helij, ugljični dioksid, kisik, vodik i dušik. Kao samostalni zaštitni plin mogu se koristiti samo argon, helij i ugljični dioksid dok se kisik, vodik i dušik koriste samo u plinskim mješavinama u malim volumnim udjelima radi moguće štetnosti. Vrste zaštitnih plinova definirane su normom HRN EN ISO 14175 - Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008) [67].

- ***Argon*** - jednoatomni kemijski inertni plin bez boje, mirisa i okusa, neotrovan, nije zapaljiv i ne topi se u talini. U atmosferi je prisutan manje od 1 %. Gustoća argona je približno 1,4 puta veća nego gustoća zraka, a dobiva se procesom ukapljivanja i destilacije zraka. Inertnost i velika gustoća čine ga izrazito povoljnim za upotrebu u obliku zaštite od atmosferskih kontaminacija, pa se intenzivno koristi kao zaštitni plin pri zavarivanju metala na bazi željeza kao i neželjeznih metala i legura. Može se koristiti samostalno ili u kombinaciji s drugim plinovima radi postizanja veće stabilnosti električnog luka. Gotovo svi elektrolučni postupci zavarivanja dozvoljavaju primjenu argona ili njegovih mješavina kao zaštitne atmosfere s ciljem postizanja što kvalitetnijeg zavara traženih mehaničkih svojstava. Osim legura na bazi željeza, koristi se i za zavarivanje aluminija, nikla, bakra, magnezijskih legura te cirkonija i titana. Zahvaljujući niskoj energiji ionizacije doprinosi uspostavljanju i stabilnosti električnog luka uz veliku gustoću struje odnosno energija luka fokusirana je na

malom središnjem području kupke zavara. Plinske mješavine s visokim udjelima argona podržavaju sve konvencionalne načine prijenose metala. Argon se u praksi danas koristi najviše od svih plinova za zaštitne atmosfere.

- ***Helij*** - jednoatomni inertni plin, male atomske mase i male gustoće (otprilike 14 % gustoće zraka). Cijena mu je mnogo veća nego argona zbog čega se u Europi gotovo i ne koristi. Zbog malog volumnog udjela u atmosferi dobiva se separacijom iz prirodnog plina u kojem se smatra nečistoćom. Koristi se u zavarivanju gdje je potreban veliki unos topline čime omogućava veću žitkost taline, dubinu provara i brzinu zavarivanja. Također ima veću toplinsku vodljivost od argona te širi stup električnog luka. Izrazito je koristan kod zavarivanja aluminija i magnezija koji su „netolerantni“ na uključke oksida, primjenjuje se i u plinskim mješavinama pri zavarivanju korozijski postojanih čelika. Ima izrazito stabilan električni luk te se primjenjuje kod zavarivanja visokim gustoćama struje.

- ***Ugljični dioksid*** - reaktivan plin koji se sastoji od dva kemijska elementa: ugljika i kisika. Iako pri sobnoj temperaturi nije kemijski reaktivan, pri zavarivanju, npr. kod MAG postupka, potaknuta velikom energijom plazme, molekula CO_2 se u anodnom području luka raspada na ugljični monoksid i kisik. Slobodni elementi nastali disocijacijom miješaju se s talinom ili se u hladnijem, katodnom području rekombiniraju pri čemu ponovno nastaje CO_2, pri čemu dolazi do oslobađanja velike količine energije čime se formira dublji i širi zavar. Slobodni kisik nastao disocijacijom također može reagirati s kemijskim elementima koji putuju lukom tvoreći okside. To se može spriječiti dodavanjem dezoksidanata poput silicija, mangana i titana u žicu dodatnog materijala koji vežu kisik na sebe i potom se izlučuju na vrhu taline u obliku troske. Veće količine ugljičnog dioksida daju veći oksidacijski potencijal i veću količinu troske na površini zavara. U suprotnom slučaju došlo bi do većeg stupnja legiranja zavara silicijem, manganom i sličnim elementima. CO_2 je posebno pogodan za MAG zavarivanje kratkim spojem. Iako ima nisku cijenu i vrlo ga je lako nabaviti, njegova upotreba ne garantira ekonomsku isplativost prvenstveno zbog intenzivnijeg štrcanja ali i nestabilnog ponašanja pri većim strujama zavarivanja.

- ***Kisik*** - plin koji u volumnom udjelu zauzima 50 % zemljine kore i 21 % atmosfere. Dobiva se ukapljivanjem i destilacijom zraka. Reaktivan je s gotovo svim elementima izuzev

rijetkih i inertnih plinova. Bez boje je i mirisa, neotrovan i nezapaljiv, ali izrazito podržava gorenje. Zahvaljujući navedenim svojstvima, idealan je plin za povećanje temperatura plamena kod plinskog zavarivanja i rezanja. Primjena kisika kod zavarivanja povećava stabilnost električnog luka, smanjuje površinsku napetost i povećava žitkost taline. Dodavanjem od 1 % do 5 % O_2 smanjuje se promjer kapljica dodatnog metala, poboljšava se spajanje na rubovima, a površina zavara znatno je ravnija. Često se dodaje argonu kod MAG postupaka u svrhu povećanja stabilnosti luka i radi doprinosa kvašenju te obliku šava pri zavarivanju niskougljičnih i korozijski postojanih čelika. Također se upotrebljava za povećanje brzina kod rezanja plazmom i laserom. Međutim prisutnost kisika pri zavarivanju ima značajan utjecaj na mikrostrukturu materijala zavara a time i na njegova osnovna mehanička svojstava, posebno na udarni rad loma. Stoga se u zavarivanju uvodi pojam ekvivalenta kisika radi procjene utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara. Kisik se koristi samo u plinskim mješavinama, u malim postotcima.

- ***Vodik*** - kemijski aktivan te iznimno zapaljiv plin. Temperatura zapaljenja iznosi 560 °C, a u određenim koncentracijama pomiješan s kisikom, zrakom ili drugim oksidacijskim sredstvima je i eksplozivan. Vodik se u plinskim zaštitnim mješavinama koristi u vrlo malim udjelima, otprilike 1 % do 5 %. Njegova visoka toplinska vodljivost omogućuje nastajanje žitke taline što je dobro za kvašenje rubova i veće brzine zavarivanja. Često se dodaje argonu radi zaštite pri zavarivanju korozijski postojanih čelika i legura na bazi nikla. U malim količinama primjenjuje se kao zaštita kod plazma rezanja.

- ***Dušik*** - atmosferski plin bez boje, mirisa i okusa kojeg u zraku ima do 78 %. Dobiva se kao proizvod procesa ukapljivanja zraka, ne izgara, ne podržava gorenje i nešto je lakši od zraka. Kemijski nije aktivan, ali pri temperaturama električnog luka reagira s metalima poput aluminija, magnezija i titana. Zaštitni plinovi koji sadrže dušik preporučuju se za zavarivanje ugljičnih čelika. Često se primjenjuje za zaštitu korijena zavara od onečišćenja iz atmosfere. Kod primjena za korozijski postojane čelike zahtijeva se opreznost jer dušik može reducirati količinu ferita, što je nepovoljno. Do 3% N_2 dodaje se argonu kod MIG i TIG postupka za zavarivanje dupleks korozijski postojanih čelika. Dušik se široko primjenjuje kod rezanja plazmom i laserom. [57]

3.2.8 Najčešće korištene zaštitne plinske mješavine kod MIG/MAG zavarivanja

Argon – Ugljični dioksid [58]

Ar – CO_2 najčešće je primjenjivana dvokomponentna plinska mješavina. Ova mješavina podržava sve načine prijenosa metala. Disociranjem CO_2 u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu žitkost i doprinosi stabilizaciji luka. Svojom toplinskim vodljivošću CO_2 utječe i na veću širinu provara. Štrcajući prijenos metala zahtijeva da količina ugljičnog dioksida bude manja od 18 %. Porastom njegova udjela raste unos topline, a time i opasnost od progaranja. Ar / CO_2 mješavine do 18 % CO_2 podržavaju također i impulsni način prijenosa metala. Prijenos metala kratkim spojevima je metoda prijenosa metala s niskim unosom topline te se za nju koriste mješavine s udjelom ugljičnog dioksida jednakim ili većim od 20 %. Kod primjene kratkih spojeva zahtijeva se opreznost ukoliko se upotrebljavaju veće količine argona.

- ***97,5 % Ar + 2,5 % CO_2*** - mješavina koja se najviše koristi za štrcajući prijenos i prijenos metala impulsnim strujama kod nelegiranih i korozijski postojanih čelika. Služi i kod zavarivanja tankih limova velikim brzinama. Glavne karakteristike ove kombinacije jesu dobra žitkost taline i velike brzine zavarivanja.

- ***92 % Ar + 8 % CO_2*** - koristi se i kod prijenosa metala štrcajućim lukom i impulsnim strujama. Veća toplinska vodljivost povećava žitkost rastaljenog metala.

- ***82 % Ar +18 % CO_2*** - mješavina koja predstavlja gornju granicu za primjenu metode prijenosa metala štrcajućim lukom. Ova mješavina se mnogo koristi u Europi za materijale različitih debljina stijenki. Široki električni luk rezultira kvalitetnijim penetracijskim profilom na mjestu spoja. Primjenjuje se i kod zavarivanja kratkim spojevima i kod STT (*eng. Surface Tension Transfer*) zavarivanja.

- ***80 % Ar + 20 % CO_2*** - mješavina za široku primjenu, dodatno reducira prskanje i doprinosi kvalitetnijem izgledu zavara. Ponajviše se koristi kod prijenosa metala kratkim spojevima.

Mješavine argona s 11 % do 20 % ugljičnog dioksida postižu maksimalne produktivnosti pri zavarivanju tankostijenih osnovnih materijala tj. minimalna je vjerojatnost progaranja te se postiže velika količina nataljenog materijala i velike brzine zavarivanja. Niži postotci CO_2 u

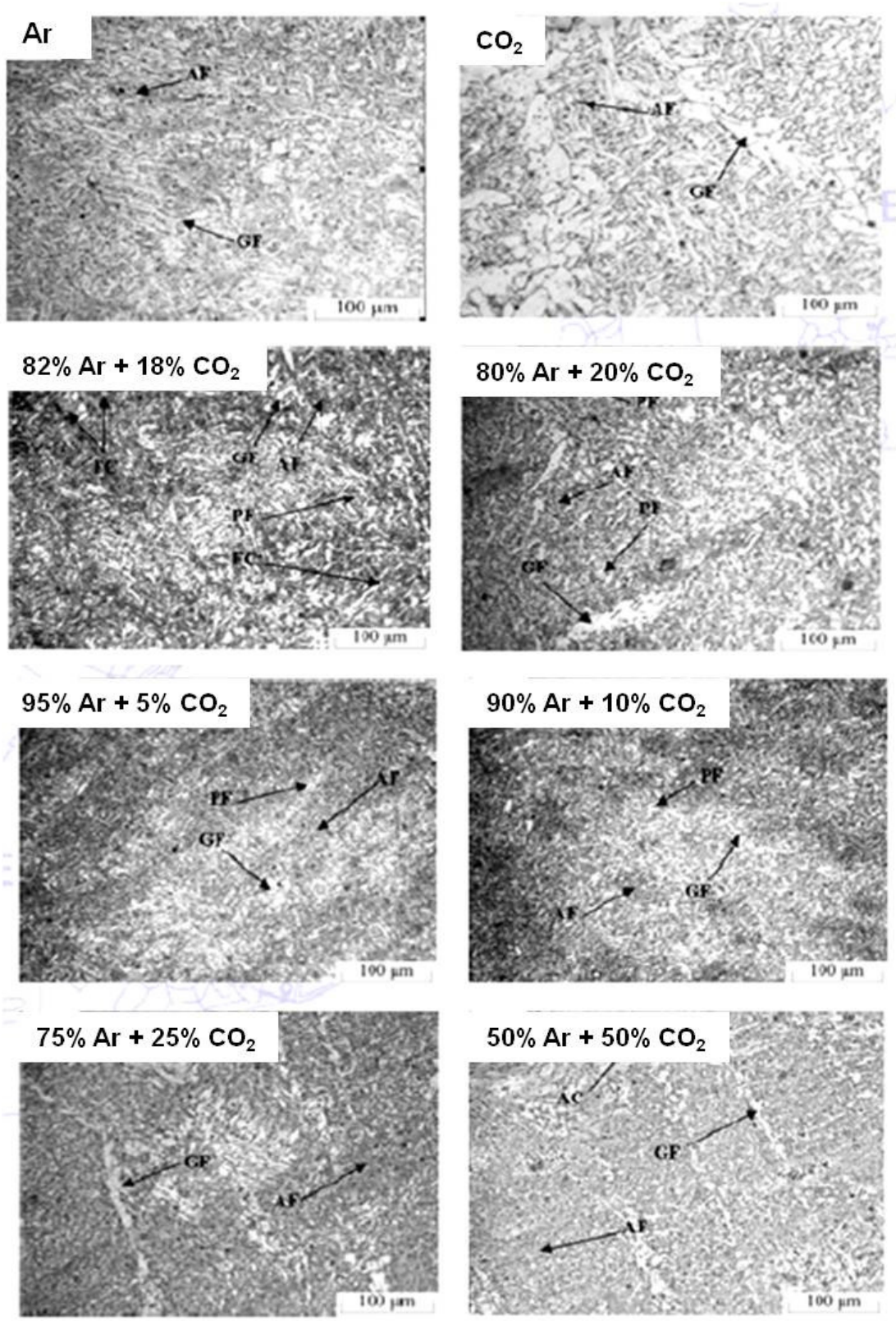
okviru ovih mješavina povećavaju učinkovitost deponiranog materijala smanjivanjem nepotrebnog prskanja. Slika 32 pokazuje utjecaj dodavanja CO_2 argonu na izgled zavara.

- ***75 % Ar + 25 % CO_2*** - ublažava prskanje i utječe na kvalitetniji izgled zavara kod ugljičnih čelika. Koristi se kod metode prijenosa metala kratkim spojevima.

- ***50 % Ar + 50 % CO_2*** - primjenjuje se kod zahtjeva za visokim unosom topline i dubokom penetracijom. Preporučuju se radni komadi debljina većih od 3 mm, a moguće je zavarivanje u prisilnim položajima. Vrlo dobro kvašenje i žitkost taline te dobar izgled zavara temeljne su prednosti ove mješavine. Pri zavarivanju tankostijenih materijala postoji opasnost od progaranja što umanjuje mogućnosti primjene. Kada zavaruje uz velike jakosti struje, tada prijenos metala više nalikuje na onaj uz primjenu 100 % CO_2 nego prethodnih mješavina no, unatoč tome, prisutnost argona donekle smanjuje količinu prskanja.

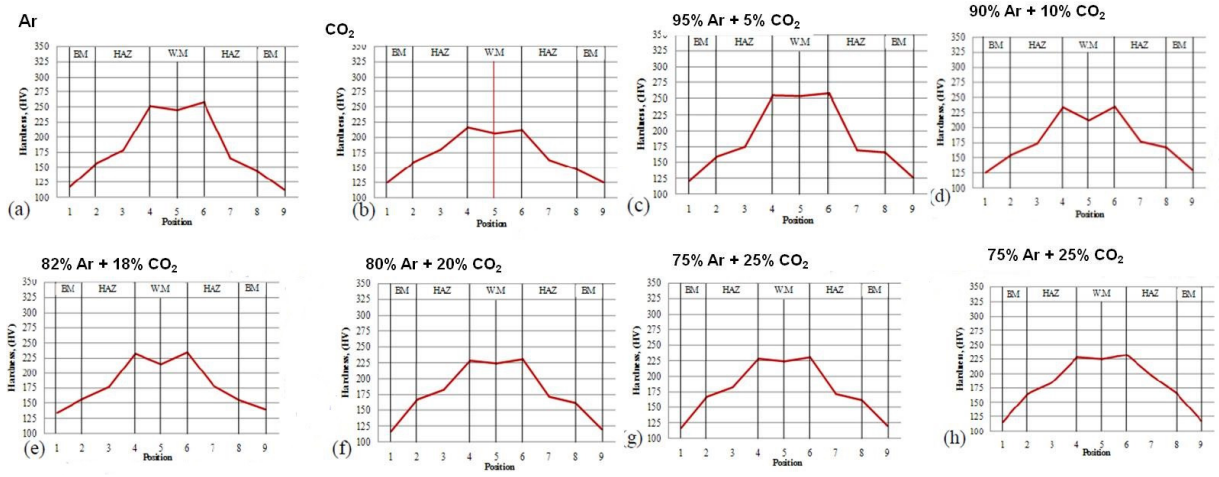
- ***25 % Ar + 75 % CO_2*** - mješavina u kojoj je glavni plin CO_2, a argon je dodatak. Mješavina se koristi kod zavarivanja cjevovoda debljih stijenki i optimalna je za postizanje dobrog rubnog spajanja i dubokog provara. Argon stabilizira električni luk i smanjuje prskanje.

Na slici 32 prikazan je utjecaj različitih plinskih mješavina na mikrostrukturu zavara čelika St 37-3. Prve dvije slike prikazuju mikrostrukturu zavara kod upotrebe čistog Ar i čistog CO_2. Na obje slike je vidljiva igličasta struktura acikularnog i alotriomorfnog ferita samo što su kod CO_2 feritna zrna znatno grublja. To je moguće povezati sa znatno većom silom miješanja u luku kod upotrebe Ar kao zaštitnog plina nego kod CO_2 [33]. U daljnjim mješavinama s 5 % i 10 % CO_2 vidljiva je pojava finih dendrita u mikrostrukturi koja se sastoji od acikularnog, alotriomorfnog i poligonalnog ferita koji je nastao na granicama austenitnog zrna radi velikog unosa topline u zavare. Daljnje povećanje udjela CO_2, na 18 % i 20 %, u zaštitnom plinu rezultira stvaranjem feritno karbidnih tj. bainitnih dijelova u mikrostrukturi uz acikularni, alotriomorfni i poligonalni ferit. Daljnjim povećanjem udjela CO_2 na 25 % vidljivo je smanjenje udjela bainita i poligonalnog ferita u strukturi zavara uz povećanje alotriomorfnog ferita koji nastaje po granicama austenitnog zrna, a također je vidljiv i manji udio acikularnog ferita u strukturi. Kod sastava mješavine s 50 % CO_2 vidljivo je da se struktura sastoji od ferita s karbidima izlučenim po granicama zrna te od alotriomorfnog ferita.



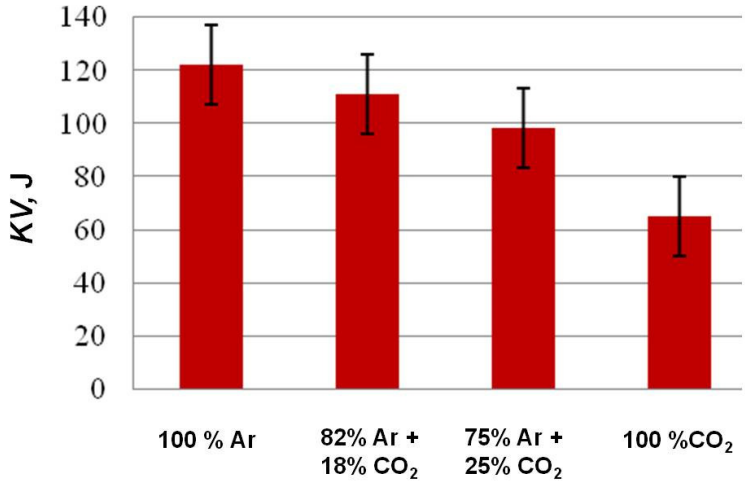
Slika 32: Mikrostruktura zavara dobivenih s različitim mješavinama zaštitnih plinova Ar i CO_2 [59]

Slika 33 prikazuje raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zavarenih spojeva prethodno analizirane mikrostrukture.



Slika 33: Raspored tvrdoće po poprečnom presjeku zavara dobivenih s različitim mješavinama zaštitnih plinova [59]

Iz slike 33 je vidljivo da tvrdoća zavara opada s povećanjem udjela CO_2 u mješavini zaštitnog plina što može nastati uslijed gubitka nekih legirnih elemenata kao Mn i Si tijekom zavarivanja, a što rezultira smanjenjem količine acikularnog ferita u strukturi kao što je vidljivo i na slici 32. Na slici 34 je prikazan utjecaj različitih mješavina na rezultate udarnog rada loma zavara. Vidljivo je da s povećanjem udjela CO_2 u mješavini dolazi do opadanja udarnog rada loma zavara što je u skladu i s prikazanom mikrostrukturom na slici 32 te s objašnjenjem u poglavlju 2.3.4 prema kojem udio acikularnog ferita u zavaru značajno doprinosi povećanju udarnog rada loma.



Slika 34: Utjecaj zaštitnog plina na udarni rad loma zavara [59]

3.3 UNOS TOPLINE U ZAVAR I NJEGOV UTJECAJ NA SVOJSTVA ZAVARA

Unos topline u zavar ima vrlo velik utjecaj na svojstva zavara. Općenito unos topline u zavar predstavlja količinu električne energije koja se preko zavarivačkog luka unosi u materijal koji se zavaruje. Moguće ga je izračunati prema izrazu (6), [60]:

$$Q = k_z \cdot \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot 10^{-3} \text{ , J / mm} \qquad (6)$$

pri čemu je:

Q – unos topline u zavar, J/mm

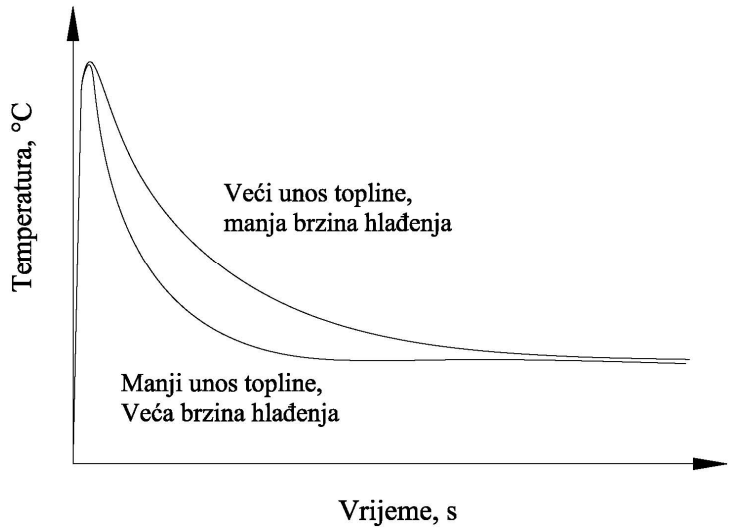
k_z – faktor toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja, za MAG postupak $k_z = 0{,}8$ [60]

U – napon, V

I – jakost struje, A

v_z – brzina zavarivanja, mm/s.

Na slici 35 prikazan je utjecaj količine unesene topline u zavar na brzinu ohlađivanja, a brzina ohlađivanja zavara je glavni faktor koji određuje mikrostrukturu, a time i svojstva zavarenog spoja.

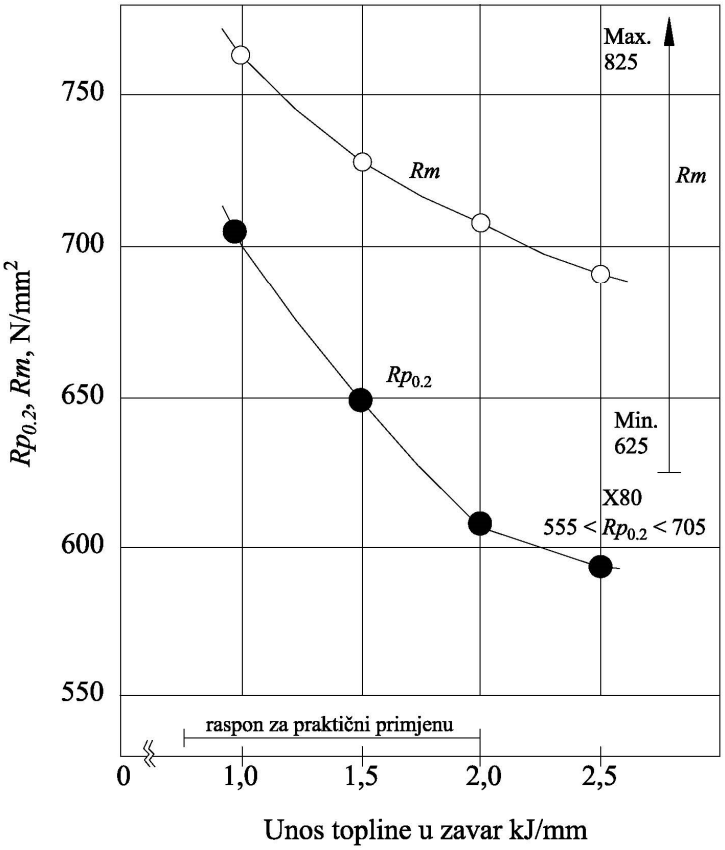


Slika 35: Utjecaj unosa topline na brzinu ohlađivanja [61]

Općenito veća količina unesene topline u zavar znači manju brzinu hlađenja. Također, širina poprečnog presjeka zavara ovisi o količini unesene topline. Što je više energije u luku doći će do taljenja veće količine osnovnog i dodatnog materijala po jedinici duljine. Obzirom da unos

topline direktno utječe na mikrostrukturu i svojstva zavara potrebno je pažljivo odabrati optimalni unos topline u zavar kako bi se osigurala tražena svojstva određene zavarene konstrukcije.

Slika 36 prikazuje utjecaj unosa topline kod zavarivanja čelika API 5L X80 na konvencionalnu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Na slici je vidljiv i preporučeni raspon unosa topline za tu vrstu čelika. Vidljivo je da je čvrstoća kod ovih mikrolegiranih čelika viša sa što manjim unosom topline u zavar.



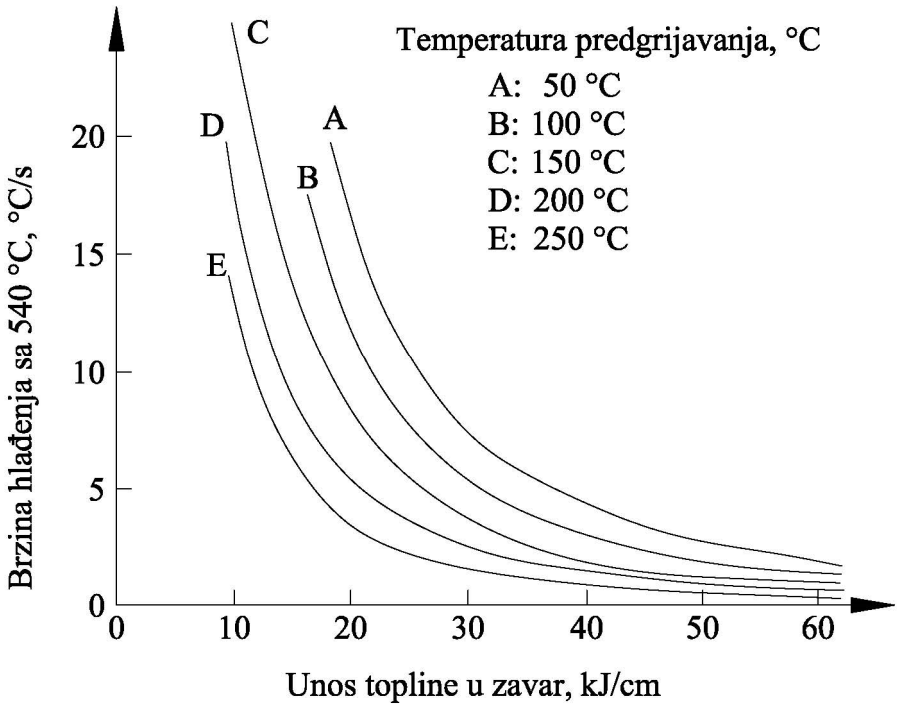
Slika 36: Ovisnost rezultata statičkog vlačnog ispitivanja o unosu topline u zavar čelika X80 [59]

3.4 TEMPERATURA PREDGRIJAVANJA OSNOVNOG MATERIJALA

Temperatura predgrijavanja kao i temperatura zavara između dva prolaza vrlo su važni parametri pri zavarivanju konstrukcijskih čelika. Predgrijavanje obuhvaća ugrijavanje osnovnog materijala na neku željenu temperaturu prije početka zavarivanja. Predgrijavanje se kod zavarivanja izvodi iz sljedećih razloga [53]:

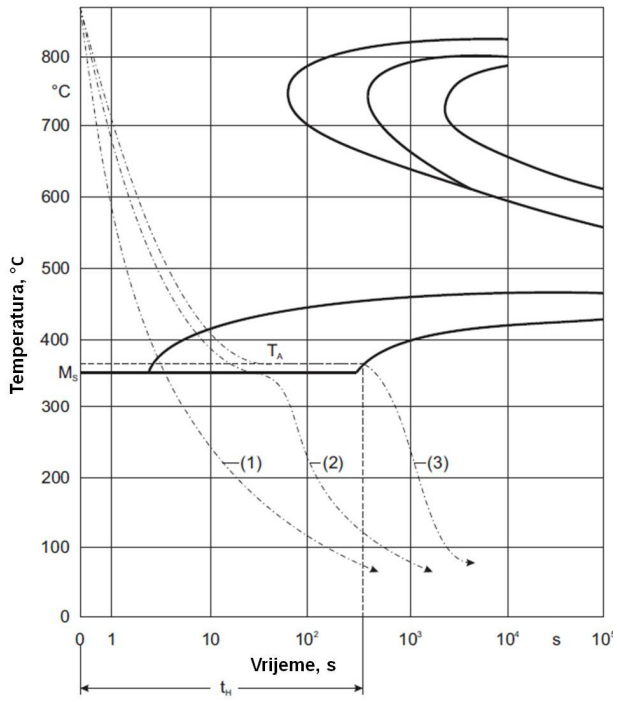
- smanjenje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukturi
- lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja
- smanjenje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja metala pri hlađenju
- postizanje određenih, željenih mehaničkih svojstava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

Kod čelika koji se koriste za konstrukcijsku primjenu temperatura predgrijavanja se određuje na temelju debljine osnovnog materijala, kemijskog sastava osnovnog materijala i vrste dodatnog materijala. Utjecaj unosa topline na brzinu hlađenja zavara kao funkcija temperature predgrijavanja prikazana je na slici 37. Iz slike je vidljivo da je s nižom temperaturom predgrijavanja uz jednaki unos topline u zavar brzina hlađenja veća, a što je i logično obzirom na manji temperaturni gradijent pri većim temperaturama predgrijavanja [60-62].



Slika 37: Utjecaj unosa topline na brzinu hlađenja zavara u ovisnosti o temperaturi predgrijavanja osnovnog materijala [59]

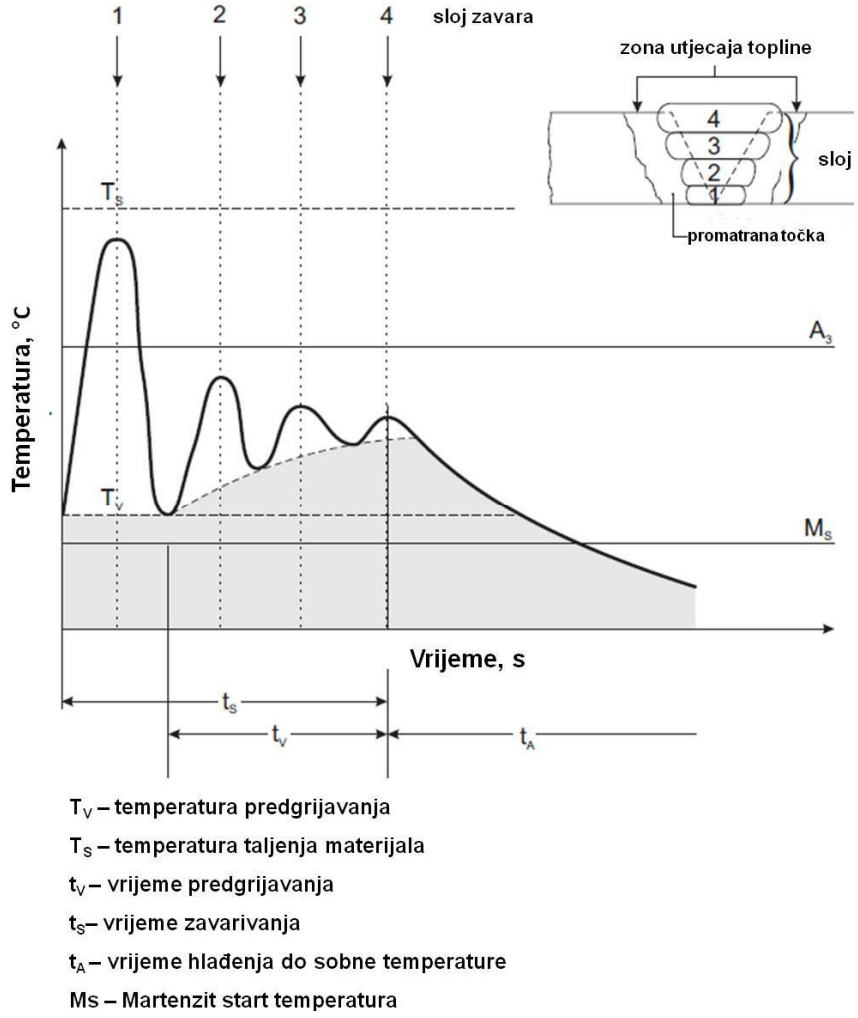
Temperatura zavara između dva prolaza odnosi se na početnu temperaturu zavarenog spoja neposredno prije drugog i svakog idućeg prolaza kod višeslojnih zavara. Nakon nanesenog početnog sloja zavara o međuprolaznoj temperaturi će ovisiti mehanička svojstva zavarenog spoja, konkretno vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Općenito, visoke temperature zavara između dva prolaza smanjuju njegovu čvrstoću, ali više temperature utječu povoljno na dobivanje sitnozrnate strukture čime se ostvaruje bolji udarni rad loma i duktilnost zavara. Ipak, ukoliko je temperatura previsoka udarni rad loma će biti loša [49, 62 - 64]. Slika 38 pokazuje TTT dijagram s ucrtanim krivuljama hlađenja zavara bez predgrijavanja, s predgrijavanjem te uz prekinuto hlađenje tj. izotermički zastoj iznad Ms temperature. Vidljivo je da je najveća brzina hlađenja kod zavarivanja bez predgrijavanja (krivulja 1) te se nakon takvog zavarivanja postiže dominantno martenzitna mikrostruktura uz mali udio bainita. Predgrijavanjem osnovnog materijala postiže se smanjenje brzine ohlađivanja prema krivulji 2 čime se smanjuje i udio martenzita, a time i stupanj zakaljenja. Ukoliko je tijekom zavarivanja temperatura cijelo vrijeme iznad Ms temperature (krivulja 3) moguće je u potpunosti spriječiti pojavu martenzita te ostvariti dobar udarni rad loma i duktilnost zavarenog spoja.



(1) – zavarivanje bez predgrijavanja
(2) – zavarivanje sa predgrijavanjem do 380 °C bez izotermičkog zastoja
(3) – zavarivanje sa predgrijavanjem do 380 °C uz aprox. 10 min izotermičkog zastc
T_A – temperatura izotermičkog zastoja
t_H – vrijeme izotermičkog zastoja

Slika 38: TTT dijagram s krivuljama ohlađivanja zavara sa i bez predgrijavanja [49]

Temperaturnu raspodjelu u zoni utjecaja topline kod zavarivanja u više prolaza s ucrtanim svim temperaturama koje na nju utječu prikazuje dijagram temperatura – vrijeme na slici 39. Zavarivanje započinje od temperature predgrijavanja. Sljedeći slojevi zavara prema slici započeti su prije nego je temperatura ponovo pala na temperaturu predgrijavanja što uzrokuje povišenje radne temperature sa svakim sljedećim prolazom. Pozitivan efekt višeslojnog zavarivanja je zagrijavanje svakog prethodnog zavarenog sloja na temperaturu iznad temperature rekristalizacije čime dolazi do efekta usitnjenja zrna u ZUT-u, a grubozrnata struktura s nepovoljnim mehaničkim svojstvima ostaje prisutna samo u posljednjem prolazu. Ipak, radi postizanja optimalnih mehaničkih svojstava zavarivanje se ne provodi prema primjeru na slici 39, već se između svakog prolaza čeka da radna temperatura padne na početnu temperaturu predgrijavanja radi već spomenutog lošeg utjecaja previsoke temperature zavara između dva prolaza na smanjenje čvrstoće zavarenog spoja.



T_V – temperatura predgrijavanja
T_S – temperatura taljenja materijala
t_V – vrijeme predgrijavanja
t_S – vrijeme zavarivanja
t_A – vrijeme hlađenja do sobne temperature
Ms – Martenzit start temperatura

Slika 39: Dijagram temperatura - vrijeme pri višeslojnom zavarivanju [49]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela je utvrđivanje utjecaja parametara MAG zavarivanja na mehanička svojstva čelika API 5L X80. Pregledom i analizom dostupne znanstvene i stručne literature odlučeno je promatrati tri parametra s najznačajnijim utjecajem na mikrostrukturu i mehanička svojstva, konkretno čvrstoću, udarni rad loma i tvrdoću zavarenog spoja mikrolegiranih visokočvrstih čelika.

Parametri zavarivanja čiji se utjecaji razmatraju u ovome radu su unos topline, temperatura predgrijavanja, te sastav zaštitnog plina.

4.1 OBLIKOVANJE PLANA POKUSA

Primijenjen je centralno kompozitni i rotabilni plan pokusa čija je svrha generiranje modela, odnosno jednadžbe (polinoma II. stupnja) koja opisuje proces. Odabrani plan pokusa je model I. reda (2^k) proširen dodatnim točkama tj. stanjima pokusa u centru i točkama u osima da bi se omogućila procjena parametara modela II. reda.

Sastoji se od tri dijela:

(a) potpuni faktorski plana pokusa s $2^k = 8$ stanja na dvije razine (+1 i -1) - točke na vrhovima u prikazanom modelu, slika 40

(b) osnog dijela koji se sastoji od $2k = 6$ stanja (osne točke, smještene na k osi, jednako odmaknute od centralne točke, α_{CP}) - točke na osima u prikazanom modelu, slika 40

(c) centralna točka n_0 gdje razina svakog faktora ima srednju vrijednost (0, 0, 0).

Centralno kompozitni plan pokusa je alternativa 3^k modelu pri sastavljanju modela pokusa II. reda jer je broj izvođenja smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa [65-68].

Broj pokusa N, koji je potreban unutar ove analize je:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \tag{7}$$

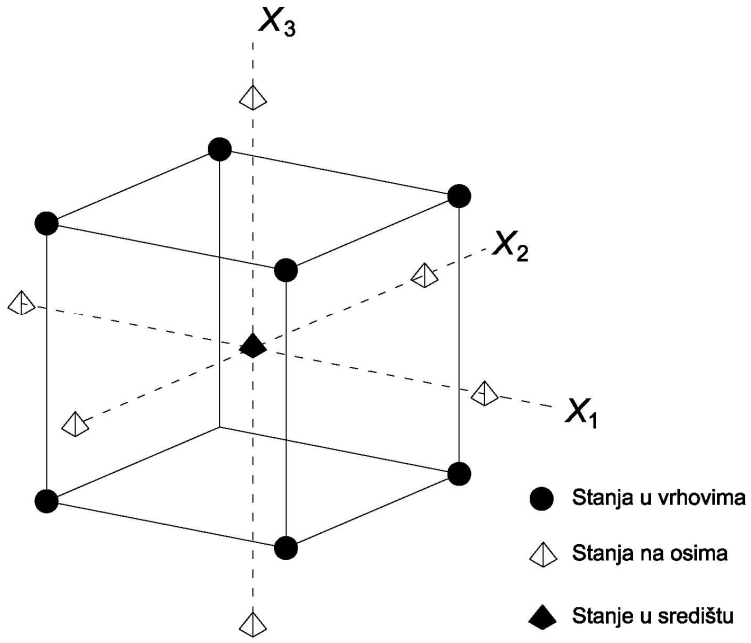
gdje je:

k – broj faktora

n_0 – broj ponavljanja.

Primjenom tog plana svaki faktor se varira na 5 razina, ali se ne provode sve kombinacije razina. Centralna točka plana pokusa daje informaciju o nelinearnosti u odzivu, dok aksijalne točke daju procjene parametara drugog reda.

Za $k = 3$ (faktori su x_1, x_2, x_3) na slici 40 je prikazan model kompozitnog pokusa za koji je potrebno 17 stanja pokusa (broj ponavljanja n_0 je 3).



Slika 40: Centralno kompozitni i rotabilni plan pokusa za tri faktora

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo kojih dviju kolona u matrici pokusa jednak nuli [69-71]. Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti α_{CP} (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa) [69-70].

Pokus je rotabilan, ukoliko je:

$$\alpha_{CP} = \sqrt[4]{F} \tag{8}$$

gdje je F – broj faktorskih stanja [70].

Za određivanje plana pokusa u eksperimentalnom radu odabrana su k = 3 faktora (parametara zavarivanja) uz n_0 =3, odnosno 3 broja ponavljanja. Odabrani faktori su:

- udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %
- unos topline, Q, kJ/cm
- temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

a ispitan je njihov utjecaj na udarni rad loma osnovnog materijala i ZUT-a, na širinu ZUT-a te na tvrdoću osnovnog materijala i ZUT-a.

Prema izrazu (7) ustanovljeno je da je potrebno izvesti 17 stanja pokusa s 3 ponavljanja. Prema izrazu (8) za broj faktora k = 3, osna udaljenost α_{CP} = 1,6818.3

Parametri zavarivanja za sva stanja pokusa 1 do 17 prikazani su u tablici 4.

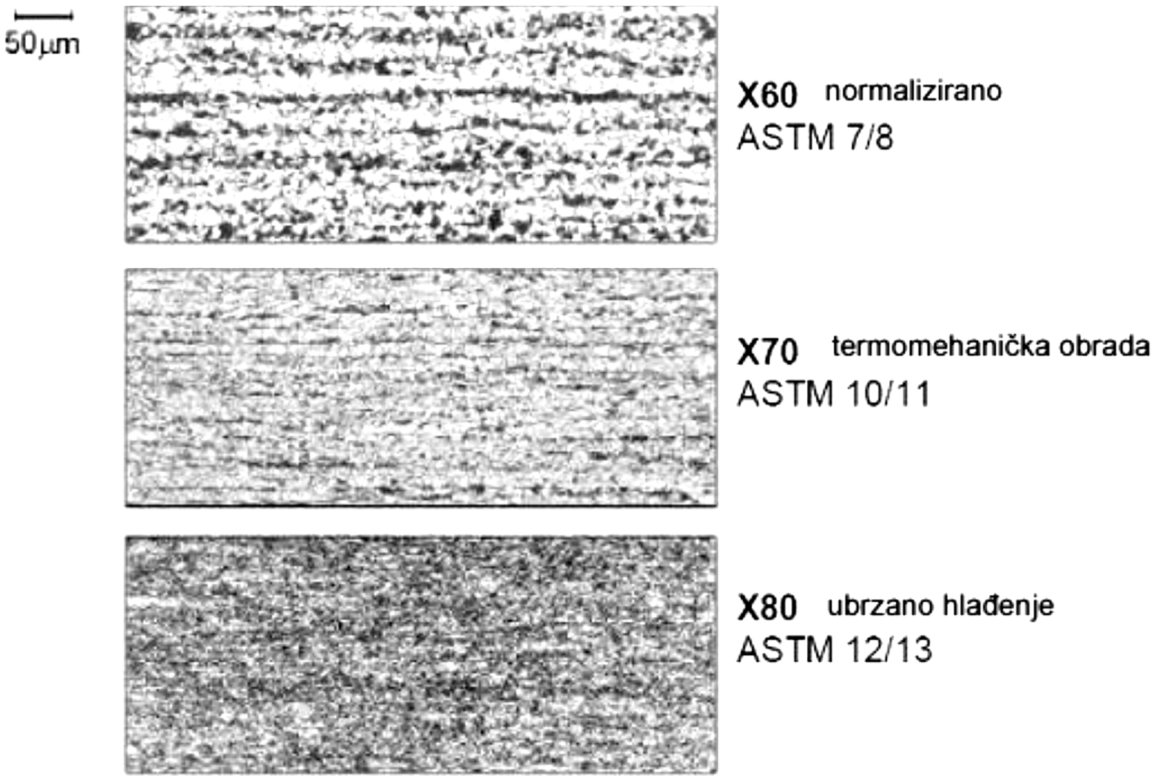
Tablica 4: Prikaz razina stanja pokusa

Stanje pokusa	**Udio CO_2 u Ar**		**Unos topline**		**Temperatura predgrijavanja**	
	%	razina	kJ/cm	razina	^{0}C	razina
1	**12**	-1	**10**	-1	**45**	-1
2	**24**	1	**10**	-1	**45**	-1
3	**12**	-1	**14**	1	**45**	-1
4	**24**	1	**14**	1	**45**	-1
5	**12**	-1	**10**	-1	**115**	1
6	**24**	1	**10**	-1	**115**	1
7	**12**	-1	**14**	1	**115**	1
8	**24**	1	**14**	1	**115**	1
9	**7,91**	-1,6818	**12**	0	**80**	0
10	**28,09**	1,6818	**12**	0	**80**	0
11	**18**	0	**8,64**	-1,6818	**80**	0
12	**18**	0	**15,36**	1,6818	**80**	0
13	**18**	0	**12**	0	**21,14**	-1,6818
14	**18**	0	**12**	0	**138,86**	1,6818
15	**18**	0	**12**	0	**80**	0
16	**18**	0	**12**	0	**80**	0
17	**18**	0	**12**	0	**80**	0

4.2 MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA ČELIKA API 5L X 80

Ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada provedena su na mikrolegiranom visokočvrstom čeliku oznake API 5L X80. Norma API (*American Petroleum Institute*) specificira gradaciju čelika za cjevovode. Oznaka X predstavlja seriju na temelju mehaničkih svojstava, a broj označava granicu razvlačenja čelika u tisućama funti po kvadratnom inch-u (psi – *pound per square inch*). Čelik API 5L X80 ima granicu razvlačenja 555 N/mm^2 (80 500 psi).

Na slici 41 prikazane su mikrostrukture čelika X60, X70 i X80. Čelici X60 imaju normaliziranu trakastu feritno-perlitnu strukturu veličine zrna 7/8 po ASTM E112/96. Struktura čelika X70 je ujednačenija, a zrno je veličine po ASTM 10/11. Čelik X80 ima feritno-bainitnu strukturu veličine zrna 12/13 po ASTM [10].



Slika 41: Mikrostrukture API 5L X čelika [72]

Čelik API 5L X80 na tržištu dolazi s različitim kemijskim sastavom i strukturama, ali uvijek u istom području iznosa mehaničkih svojstava [72]. U tablici 5 je prikazan kemijski sastav čelika API 5L X80 korištenog u eksperimentu.

Tablica 5: Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu u Prilogu I

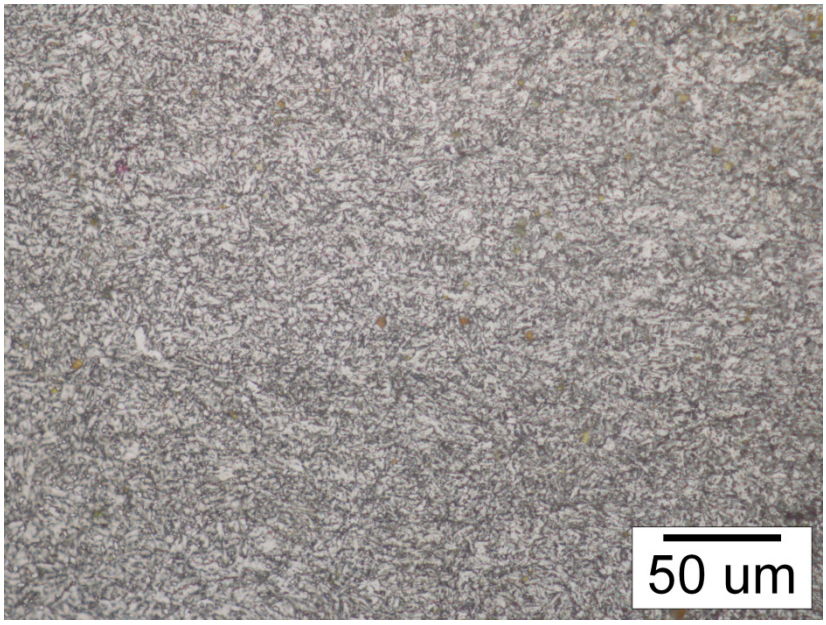
Kem. el.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	B	Ca
Vol, %	0,064	0,33	1,94	0,015	0,0006	0,033	0,17	0,18	0,002	0,09	0,001	0,063	0,014	0,0036	0,0002	0,0001

U tablici 6 prikazana su mehanička svojstva čelika API 5L X80 korištenog u eksperimentu.

Tablica 6: Mehanička svojstva čelika API 5L X80 prema certifikatu u Prilogu I

Oznaka čelika	$R_{t0,5}$, N/mm^2	R_m, N/mm^2	A, %
X80	557	670	28

Čelik API 5L X80 ima sitnozrnatu mikrostrukturu sastavljenu od bainita i ferita, slika 42. Sitnozrnata feritno-bainitna mikrostruktura ima za posljedicu povećanje čvrstoće, povećanje udarnog rada loma i duktilnosti, te povećanu dinamičku izdržljivost. Također se povećava i otpornost na vodikovu krhkost.

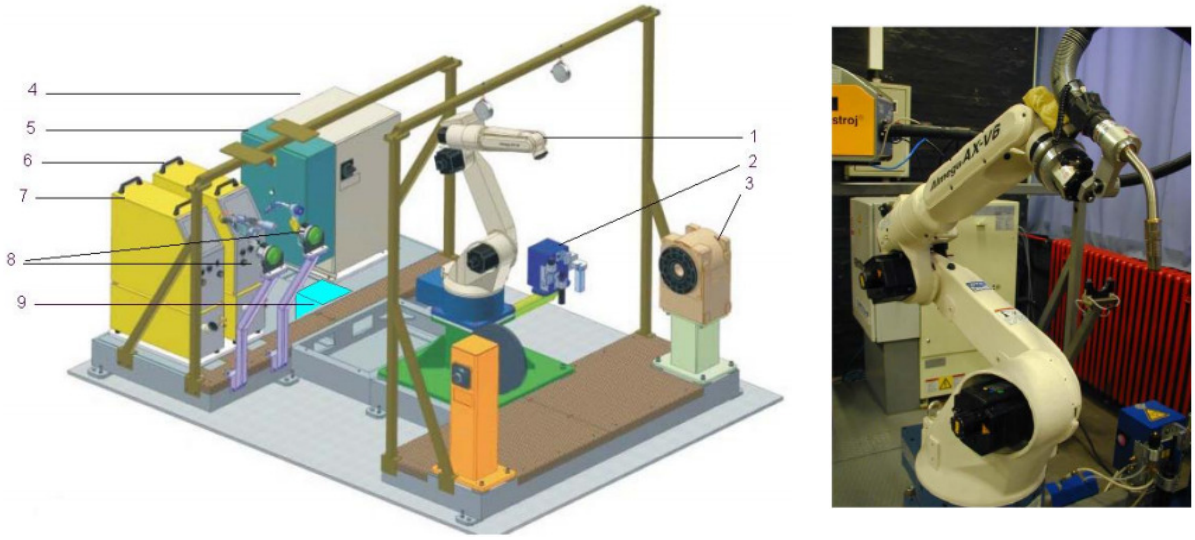


Slika 42: Mikrostruktura čelika API 5L X80 korištenog u eksperimentu

Čelik za izradu ispitnih uzoraka isporučen je u obliku ploče dimenzija 6000 mm x 2000 mm x 10 mm prema certifikatu u Prilogu I.

4.3 IZRADA UPRAVLJAČKOG PROGRAMA NA ROBOTSKOJ JEDINICI ALMEGA AX V6

U eksperimentalnom dijelu rada za izradu ispitnih uzoraka korištena je robotska jedinica za zavarivanje Almega AX V6, čime je eliminiran utjecaj tehnike zavarivanja na izgled i mehanička svojstva zavarenog spoja koji se inače javlja u slučajevima kada se zavar izvodi ručno. Robotska jedinica nalazi se u Laboratoriju za zavarene konstrukcije FSB-a u sklopu robotske stanice VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm, slika 43a.



a) b)

Slika 43: Robotska jedinica za zavarivanje
a) shematski prikaz robotske stanice VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm,
b) Robot OTC Almega AX-V6

Robotska stanica sastoji se od:

1. robota OTC Almega AX-V6, slika 43 b
2. uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja
3. sustava za pozicioniranje P250V ROBO
4. električne jedinice
5. upravljačke jedinice

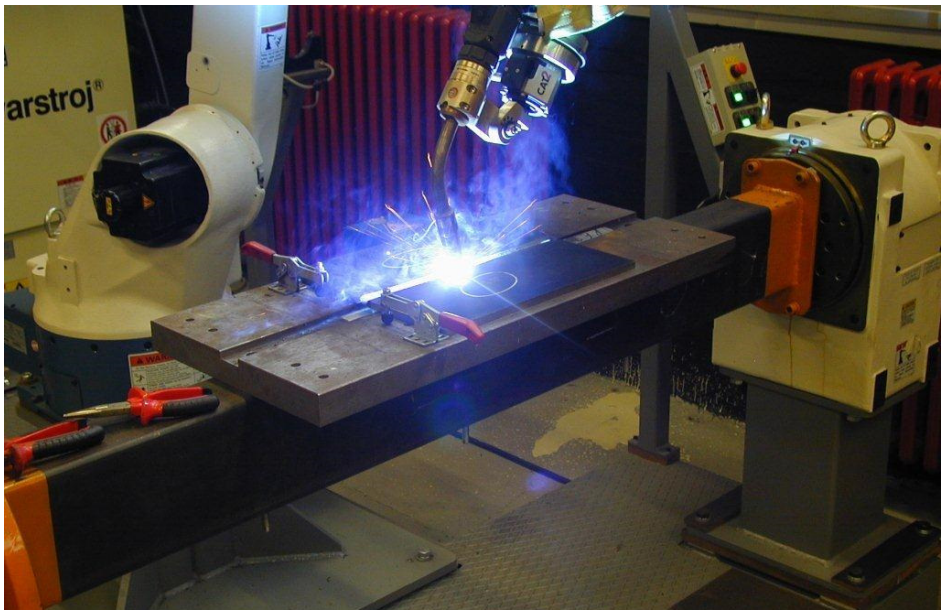
6. izvora struje MIG/MAG VPS 4000
7. izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC
8. sustava za automatsku izmjenu pištolja
9. senzora električnog luka AX-AR.

Programi korišteni za zavarivanje uzoraka prema stanjima pokusa načinjeni su korištenjem sustava za programiranje na samoj robotskoj jedinici. Nakon što su programom određeni parametri: brzina i nagib pištolja, kretanje pištolja te njihanje, određeni su parametri zavarivanja, tj. struja, napon, slobodni kraj žice i protok zaštitnog plina.

Za zavarivanje korijena korišten je isti program u svih 17 stanja pokusa jer je kvalitetan korijen zavarenog spoja moguće izvesti samo u vrlo uskom području parametara zavarivanja.

Zbog toga što su parametri zavarivanja u određenim stanjima pokusa bili vrlo različiti bilo je potrebno izvršiti određene promjene i na upravljačkom programu robotske jedinice. To se posebice odnosi na tehniku njihanja koja je bila potrebna u slučajevima kada se zbog većeg unosa topline javila potreba za kontrolom veće količine taline.

Slika 44 prikazuje zavarivanje uzoraka robotskom jedinicom Almega AX V6 pri zavarivanju ploča ispitivanog materijala.



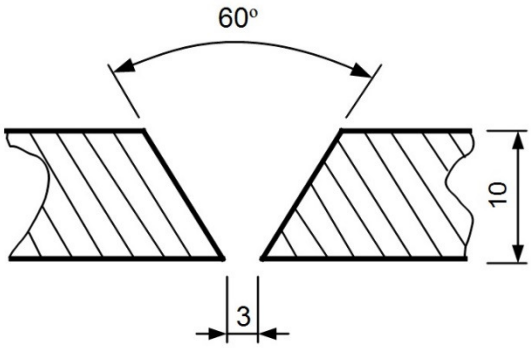
Slika 44: Zavarivanje uzorka robotskom jedinicom Almega AX V6

U upravljačkom programu 111 korištenom za zavarivanje korijena, bilo je potrebno definirati vrijednosti koje određuju putanju i brzinu njihanja. Kao funkcija njihanja odabrana je linearna funkcija, a vrijeme zadržavanja električnog luka na obje strane lima iznosila je 0,5 s. Amplituda njihanja je iznosila 2,2 mm u obje strane, uz frekvenciju njihanja 2 Hz. Ovi parametri određeni su na temelju snimanja ručnog zavarivanja korijena.

4.4 PRIPREMA SPOJA

Priprema spoja kao i parametri za zavarivanje postupaka korištenih u eksperimentu određeni su na temelju proučene literature. Parametri zavarivanja za sva stanja pokusa 1 do 17 prikazani su u tablici 4 na strani 61, dok je skica pripreme zavarenog spoja prikazana slikom 45.

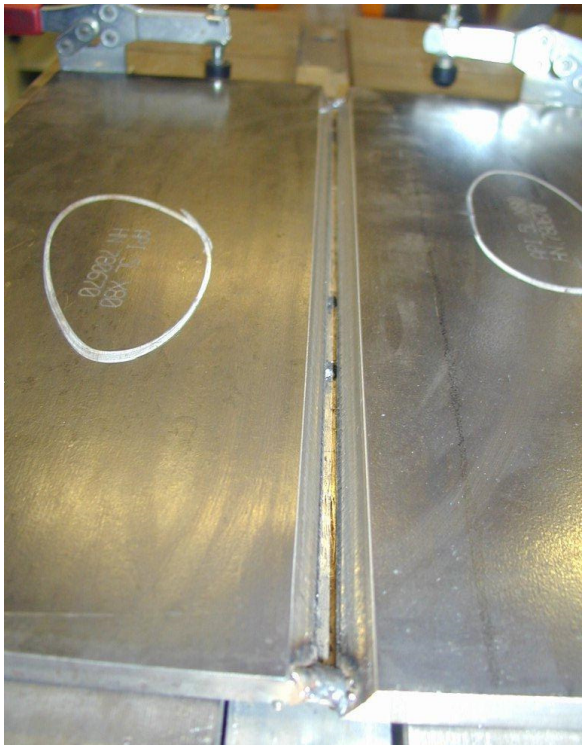
Debljina lima uvjetovala je izvedbu zavarenog spoja u tri prolaza. Priprema je izvedena kao V - spoj pod kutom od 60 °, dok je razmak između ploča iznosio 3 mm. Dobra priprema spoja nužna je za ostvarenje kvalitetnog zavarenog spoja. Ukoliko zbog loše pripreme spoja dođe do prevelikog smicanja ili razmaka ploča, korijenski zavar može biti loše izveden. Samim time upitna je i kvaliteta cijelog zavarenog spoja, zbog toga što popuna i završni sloj ovise o dobro izvedenom korijenskom zavaru.



Slika 45 : Priprema zavarenog spoja

Kako bi se osigurala kvalitetna priprema zavarenog spoja, rubovi ploče strojno su obrađeni. Ploče su pozicionirane na preporučeni razmak od 3 mm i pripojene na rubovima zavarima duljine 30 mm.

Slika 46 prikazuje ploče osnovnog materijala API 5L X80 dimenzija 350 mm x 300 mm, u pripremljenom stanju prije početka zavarivanja.



Slika 46: Priprema zavarenog spoja

Na slici su vidljive naprave za stezanje koje su korištene za fiksiranje ploče koje se zavaruju.

4.4.1 Određivanje temperature predgrijavanja

Na temelju kemijskog sastava čelika API 5L X80 izračunata je potrebna temperatura predgrijavanja. Za određivanje temperature predgrijavanja korištena je metoda *Ito-Bessyo* koja se prema literaturi preporuča za mikrolegirane čelike. Prema toj metodi, temperatura predgrijavanja ovisi o kemijskom sastavu materijala te o debljini stjenke. Minimalna temperatura predgrijavanja ϑ_o za čelik X 80 prema metodi *Ito-Bessyo* izračunata je izrazom (9):

$$\vartheta_{o\,min} = 1440 \cdot P_w - 392, ℃ \tag{9}$$

gdje je:

P_w parametar pukotine i izračunava se pomoću izraza (10)

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B + \frac{\delta}{600} + \frac{H}{60}, \% \tag{10}$$

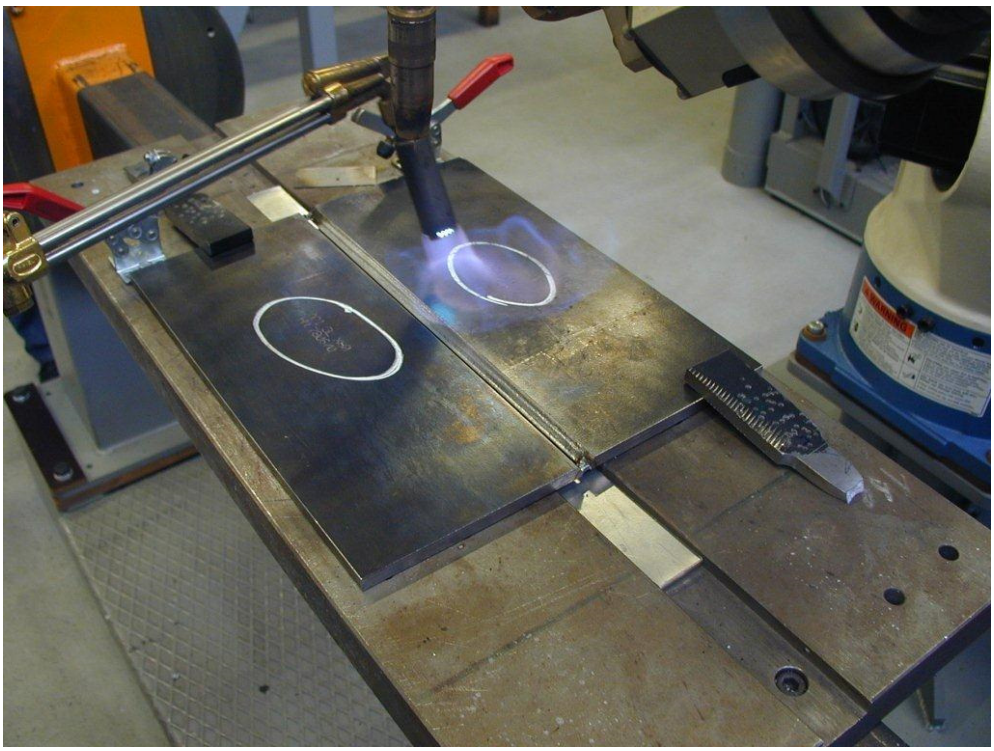
δ - debljina osnovnog materijala, mm

H - sadržaj difuzijskog vodika, ml/100 g metala zavara

U određenim stanjima pokusa predviđeno je predgrijavanje osnovnog materijala s ciljem razmatranja utjecaja predgrijavanja na mehanička svojstva zavarenog spoja. U tu svrhu odabrano je predgrijavanje koje se najčešće koristi u praksi kao tzv. tehnološko predgrijavanje za uklanjanje vlage i nečistoća, na 80 °C. U stanjima pokusa u kojima je osnovni materijal predgrijavan, temperatura je bila jednaka međuprolaznoj temperaturi, odnosno nakon svakog prolaza čekalo se kako bi se temperatura smanjila na temperaturu predgrijavanja.

Temperature predgrijavanja i međuprolaza kontrolirale su se kontaktnim termometrom „Iskra Termomer 21“, tip ODT0302, mjerno područje od -100 °C do 200 °C. U navedenom mjernom području rezolucija mjernog uređaja iznosi 0,1 °C, a greška očitanja ± 0,5 °C.

Slika 47 prikazuje predgrijavanje ploče osnovnog materijala API 5L X80 plinskim plamenom.



Slika 47: Predgrijavanje osnovnog materijala

4.4.2 Dodatni materijal

Pri zavarivanju korištena je žica za MAG zavarivanje LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric promjera $d_ž = 1,2$ mm, čiji je certifikat u Prilogu II. Navedena žica je klasificirana kao dodatni materijal pri zavarivanju visokočvrstih čelika te zadovoljava zahtjeve na udarni rad loma do - 40 °C.

Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 7.

Tablica 7: Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi

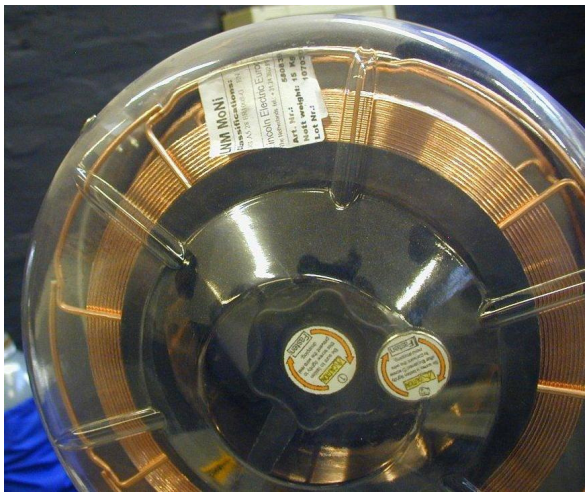
R_e, N/mm²	R_m, N/mm²	A, %	udarni rad loma KV, J		
			- 20 °C	- 40 °C	- 60 °C
635	770	19	100	90	70

Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je tablicom 8.

Tablica 8: Kemijski sastav dodatnog materijala

C, %	Mn, %	Si, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %	Cu, %	Fe, %
0,1	1,65	0,75	0,55	0,6	0,3	0,08	ostalo

Slika 48 prikazuje kolut žice korištenog dodatnog materijala LNM MoNi na robotskom dodavaču žice.



Slika 48: Kolut dodatnog materijala LNM MoNi

Nakon definiranja osnovnog i dodatnog materijala te izračuna temperature predgrijavanja određeni su svi parametri za sva stanja pokusa koji su prikazani u tablici 9.

Tablica 9: Parametri zavarivanja prema stanjima pokusa

Stanje pokusa	Prolazi	Parametri stanja pokusa			*Očitane vrijednosti*		*Brzina zavarivanja* v_z, cm/min	*Izračunata vrijednost unosa topline Q* , kJ/cm
		Plin, % CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperatura predgrijavanja, °C	*U*, V	*I*, A		
1	korijen	12	10	45	18,66	105	11,5	8,18
	1.	12	10	45	29,1	270	38	9,92
	2.	12	10	45	28,5	277	38	9,97
	3.	12	10	45	28,5	277	38	9,97
2	korijen	24	10	45	18,6	107	11,5	8,31
	1.	24	10	45	28,9	260	38	9,5
	2.	24	10	45	29	270	38	9,89
	3.	24	10	45	29	270	38	9,89
3	korijen	12	14	45	18,9	106	11,5	8,36
	1.	12	14	45	29	271	27	13,97
	2.	12	14	45	28,9	270	27	13,87
4	korijen	24	14	45	18,5	109	11,5	8,42
	1.	24	14	45	30,1	254	27	13,59
	2.	24	14	45	29,8	264	27	13,99
5	korijen	12	10	115	18,8	105	11,5	8,24
	1.	12	10	115	28,2	270	38	9,62
	2.	12	10	115	28,5	273	38	9,83
	3.	12	10	115	28,5	273	38	9,83
6	korijen	24	10	115	18,4	108	11,5	8,29
	1.	24	10	115	29	254	38	9,30
	2.	24	10	115	28,8	263	38	9,57
	3.	24	10	115	28,8	263	38	9,57
7	korijen	12	14	115	18,9	107	11,5	8,44
	1.	12	14	115	28,8	260	27	13,31
	2.	12	14	115	29,1	275	27	14,23
8	korijen	24	14	115	18,6	111	11,5	8,62
	1.	24	14	115	29,8	255	27	13,51
	2.	24	14	115	29,4	271	27	14,16
9	korijen	8*	12	80	18,8	107	11,5	8,40
	1.	8*	12	80	28	278	31	12,05
	2.	8*	12	80	28,2	281	31	12,27

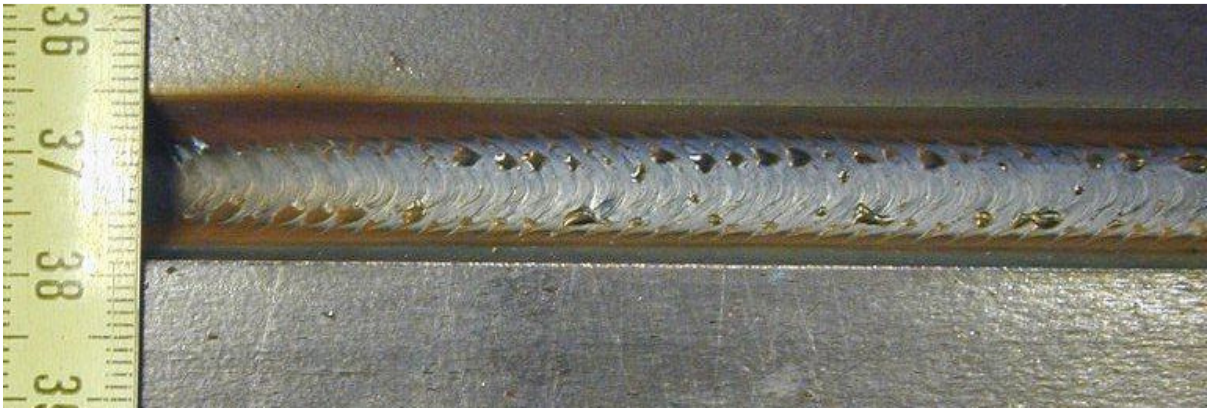
Nastavak tablice 9

Stanje pokusa	Prolazi	Parametri stanja pokusa			Očitane vrijednosti		Brzina zavarivanja v_z, cm/min	Izračunata vrijednost unosa topline Q, kJ/cm
		Plin, % CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperatura predgrijavanja, °C	U, V	I, A		
10	korijen	28*	12	80	18,8	105	11,5	8,24
	1.	28*	12	80	28,7	257	31	11,42
	2.	28*	12	80	29,3	266	31	12,07
11	korijen	18	8,64	80	18,8	107	11,5	8,40
	1.	18	8,64	80	28,9	267	44	8,42
	2.	18	8,64	80	28,8	274	44	8,61
	3.	18	8,64	80	28,8	274	44	8,61
12	korijen	18	15,36	80	18,9	105	11,5	8,28
	1.	18	15,36	80	29,1	273	25	15,25
	2.	18	15,36	80	29,3	272	25	15,30
13	korijen	18	12	20*	18,9	106	11,5	8,36
	1.	18	12	20*	28,8	261	31	11,64
	2.	18	12	20*	29,3	270	31	12,25
14	korijen	18	12	140*	19,9	107	11,5	8,89
	1.	18	12	140*	29,1	265	31	11,94
	2.	18	12	140*	29,6	269	31	12,33
15	korijen	18	12	80	18,8	110	11,5	8,63
	1.	18	12	80	28,5	269	31	11,87
	2.	18	12	80	29,5	275	31	12,56
16	korijen	18	12	80	18,5	108	11,5	8,34
	1.	18	12	80	28,9	264	31	11,81
	2.	18	12	80	29,3	276	31	12,52
17	korijen	18	12	80	18,7	110	11,5	8,59
	1.	18	12	80	28,9	266	31	11,90
	2.	18	12	80	29,6	274	31	12,56

* Sukladno tablici 4, izračunate vrijednosti udjela CO_2 u argonu za razine stanja pokusa 1,6818 i -1,6818 su 28,09 % i 7,91 %, a vrijednosti temperature predgrijavanja su 21,14 °C i 138,86 °C. Obzirom da je te vrijednosti u praksi vrlo teško postići, u eksperimentalnom radu korištene su vrijednosti koje su bile mjerljive. 5

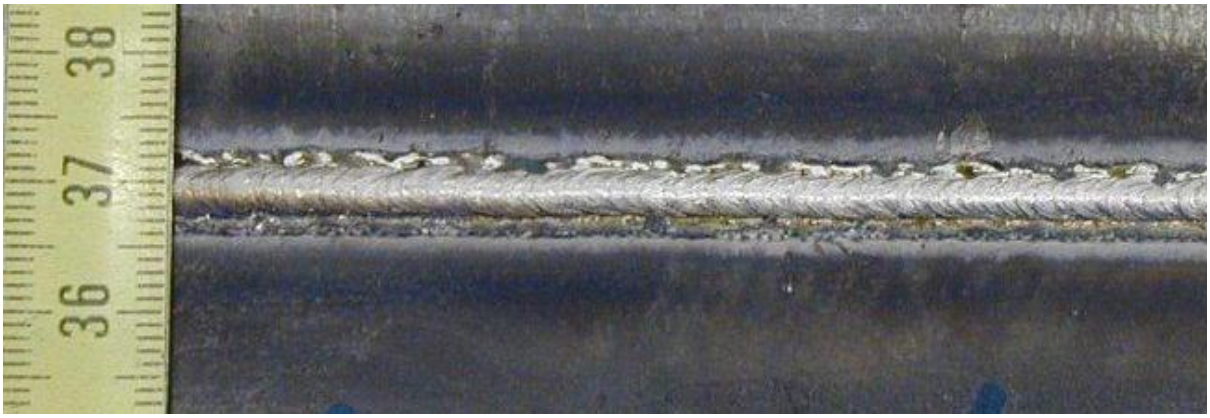
Nakon izvedenog pozicioniranja čeličnih ploča te predgrijavanja slijedilo je zavarivanje korijena te popuna završnog sloja. Zavarivanje korijena u svim stanjima pokusa izvedeno je istim parametrima zavarivanja jer se optimalni parametri izvođenja korijena zavara nalaze u vrlo uskom području. Iz tog je razloga unos topline kontroliran u ostalim prolazima čime se nije utjecalo na oblik zavarenog spoja. Promjena količine unosa topline izvedena je kontrolom unosa topline s promjenom brzine zavarivanja pri jednakim parametrima struje i napona. Time je izbjegnut utjecaj načina prijenosa metala u električnom luku.

Nakon izvedenog prvog prolaza zavarivanja korijena napravljena je vizualna kontrola zavara. Na slici 49 prikazano je lice korijena zavara nakon prvog prolaza. Vidljivo je da u zavaru nema pojave površinskih nepravilnosti niti pojave pukotina.



Slika 49: Lice korijena zavara nakon prvog prolaza

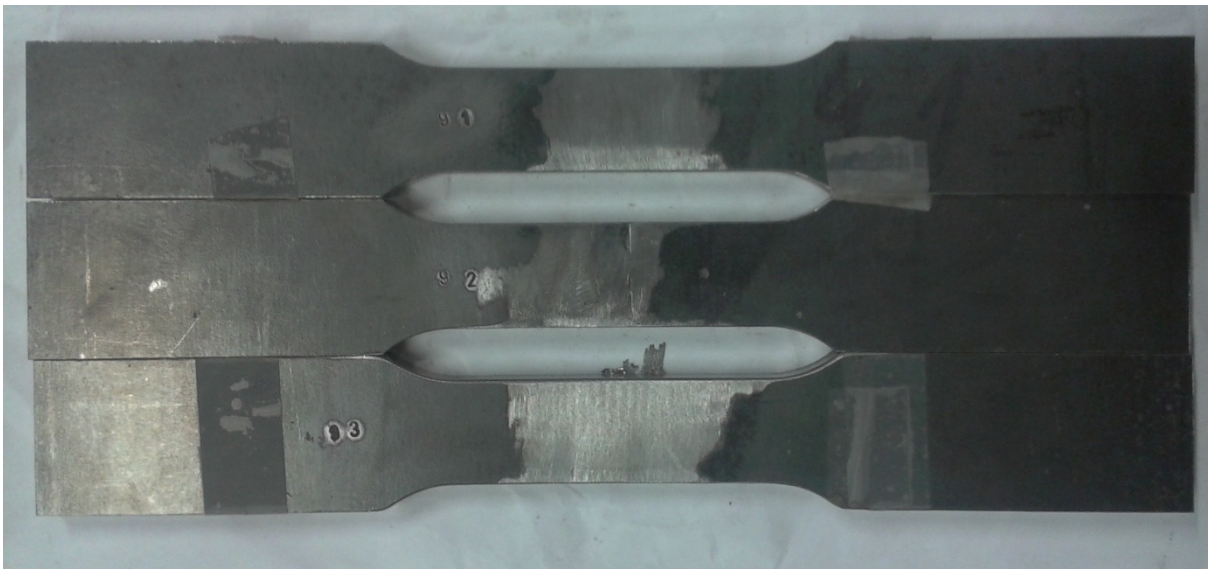
Na slici 50 prikazan je korijenski zavar s naličja zavara. Odabirom optimalnih parametara postignuto je zadovoljavajuće nadvišenje korijenskog zavara bez nehomogenosti u zavarenom spoju i bez neprovara zavarenog spoja.



Slika 50: Naličje zavara korijenskog prolaza

4.5 IZRADA ISPITNIH UZORAKA

Nakon provedenog postupka zavarivanja iz zavarenih ploča izrezani su ispitni uzorci sukladno normi HRN EN ISO 15614-1 Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale - Ispitivanje postupka zavarivanja - 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla (ISO 15614-1:2004; EN ISO 15614-1:2004) [76]. Za svako stanje pokusa predviđeno je tri ponavljanja, tako da je za statičko vlačno ispitivanje izrezan 51 ispitni uzorak. Svaki ispitni uzorak označen je brojem stanja i brojem ponavljanja. Na slici 51 prikazani je primjer izrezanih i označenih ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje.

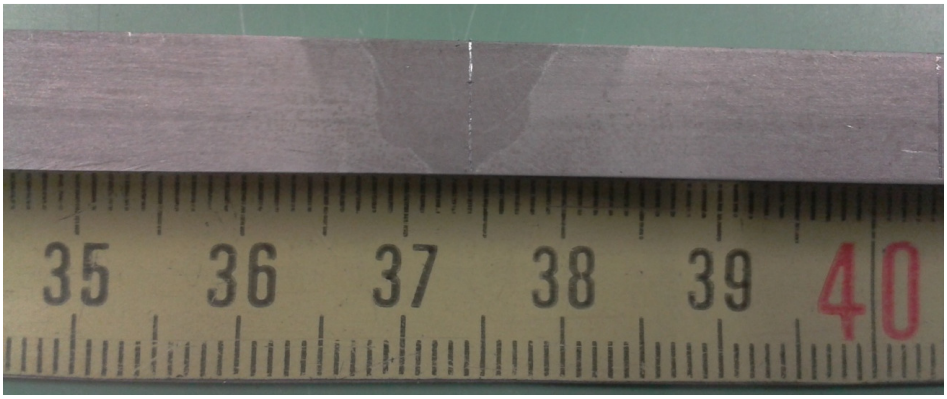


Slika 51: Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje

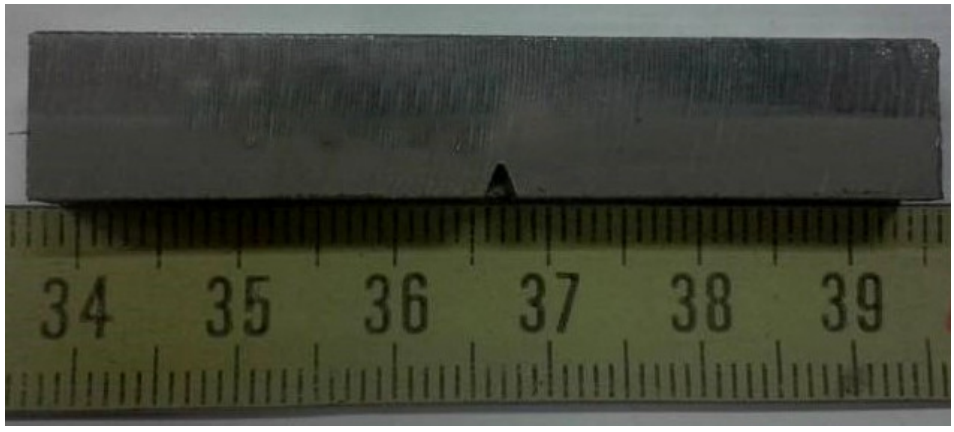
Za udarni rad loma izrezano je 153 ispitna uzorka za ispitivanje materijala zavara i 153 ispitna uzorka za ispitivanje zone utjecaja topline. Ispitni uzorci su označeni brojem stanja pokusa te dodatnom oznakom ponavljanja. Kod tih uzoraka uvodi se i broj uzorka zbog postojanja šest uzoraka za svako stanje pokusa, tri za materijal zavara, tri za ZUT, pri čemu su uzorci oznake od 1 do 3 pripremljeni za ispitivanje metala zavara, a uzorci od 4 do 6 za ispitivanje zone utjecaja topline.

Radi određivanja linije staljivanja ispitni uzorci su nagrizeni 5 % NITAL-om u vremenu 25 s – 30 s. Slika 52 a prikazuje nagriženi uzorak za ispitivanje udarnog rada loma. Kao

koncentrator naprezanja korišten je standardni V - utor za ispitivanje Charpyevim batom dubine 2 mm prema normi HRN EN ISO 148-1:2012: Metalni materijali - Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom - 1. dio: Metoda ispitivanja (ISO 148-1:2009; EN ISO 148-1:2010) [75], slika 52 b.



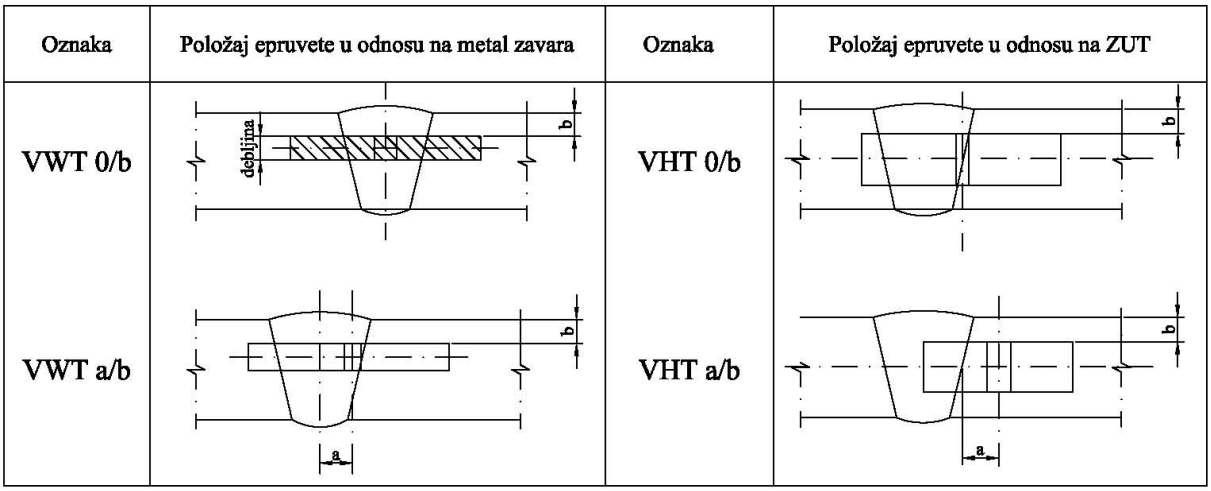
a)



b)

Slika 52: Ispitni uzorak za udarni rad loma a) nagriženo u 5 % NITALU
b) V - utor

Na slici 53 prikazan je način uzimanja uzoraka za ispitivanje udarnog rada loma prema normi HRN EN ISO 148-1:2012 za metal zavara i za zonu utjecaja topline. Za metal zavara uzorci su uzeti u sredini zavarenog spoja prema oznaci VWT 0/b, a za zonu utjecaja topline VHT a/b.



Slika 53: Shematski prikaz pozicioniranja epruvete prema HRN EN ISO 148-1:2012 [67]

Kao što prikazuje slika 53 vrijednosti koje su dobivene za metal zavara označene su oznakom VWT 0/1, zbog toga što se zarez nalazi na sredini zavarenog spoja, a vrijednost *b* je iznosila 1 mm, zbog toga što je ukupna debljina epruvete iznosila 7,5 mm.

Za ispitivanje mikrostrukture i mjerenja geometrije zavara za svako ispitno stanje izuzet je po jedan uzorak.

4.6 ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA

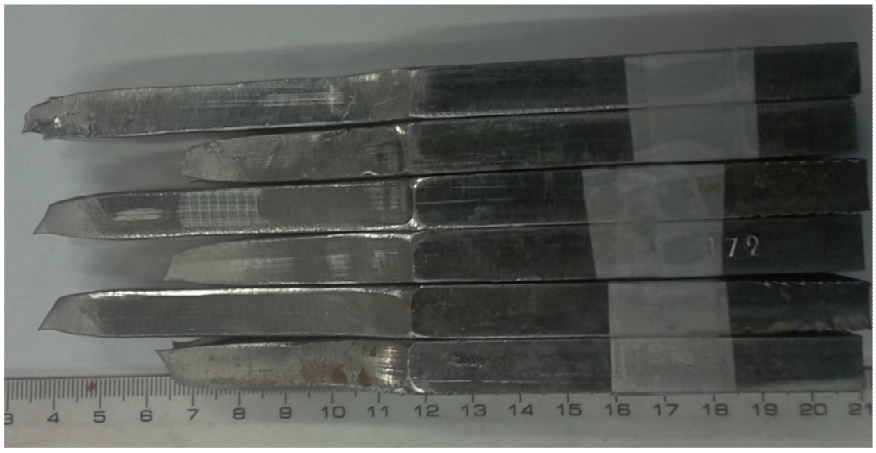
4.6.1 Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje zavarenih spojeva provedeno je prema normi HRN EN 876: 1999 Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Uzdužno vlačno ispitivanje zavara nastalih taljenjem (EN 876:1995) [77] u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala FSB-a. Ispitivanje je provedeno na računalom upravljanom, moderniziranoj verziji kidalice maksimalne sile 400 kN (proizvođač: WPM, Njemačka; vrsta: EU 40mod), slika 54.

Slika 54: Univerzalna kidalica EU 40mod

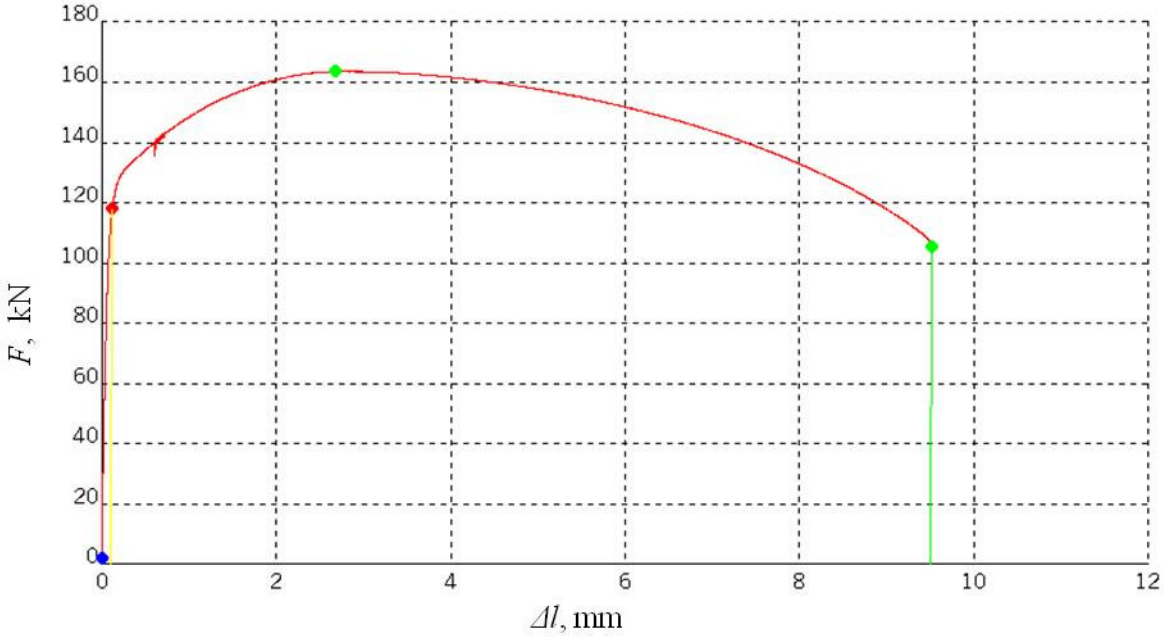
Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi.

Nakon provedenog ispitivanja utvrđeno je da su svi ispitni uzorci puknuli u području osnovnog materijala, slika 55. Dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće, konvencionalne granice razvlačenja, istezanja i kontrakcije odgovaraju vrijednostima iz certifikata osnovnog materijala.



Slika 55: Ispitni uzorci nakon provedenog statičnog vlačnog ispitivanja

Na slici 56 prikazan je dijagram sila-produljenje za ispitni uzorak broj 123 nakon provedenog ispitivanja.



Slika 56: Dijagram sila-produljenje, uzorak br.123

Iako ovim ispitivanjem nisu dobivene vrijednosti čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja zavara jer su svi ispitni uzorci pukli u zoni osnovnog materijala, moguće je zaključiti da su mehanička svojstva zavarenog spoja zadovoljavajuća. Mjesto zavarenog spoja na ispitnim uzorcima nije predstavljalo mjesto slabijih mehaničkih svojstava od svojstava osnovnog materijala.

4.6.2 Udarni rad loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpy-jevom batu maksimalne energije udara 350 J u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a sukladno normi HRN EN ISO 148-1:2012: Metalni materijali - Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom - 1. dio: Metoda ispitivanja (ISO 148-1:2009; EN ISO 148-1:2010) [75]. Za ispitivanje udarnog rada loma uzorci su ohlađeni na temperaturu 0 °C radi moguće usporedbe s vrijednostima iz certifikata materijala (Prilog I). Uzorci su pothlađeni uranjanjem u termostabilnu kupku etilnog alkohola pothlađenog suhim ledom.

U tablici 10 prikazani su rezultati ispitivanja udarnog rada loma metala zavara i ZUT-a. Prikazani rezultati predstavljaju srednje vrijednosti rezultata dobivenih za svako pojedino stanje uz pripadnu standardnu devijaciju.

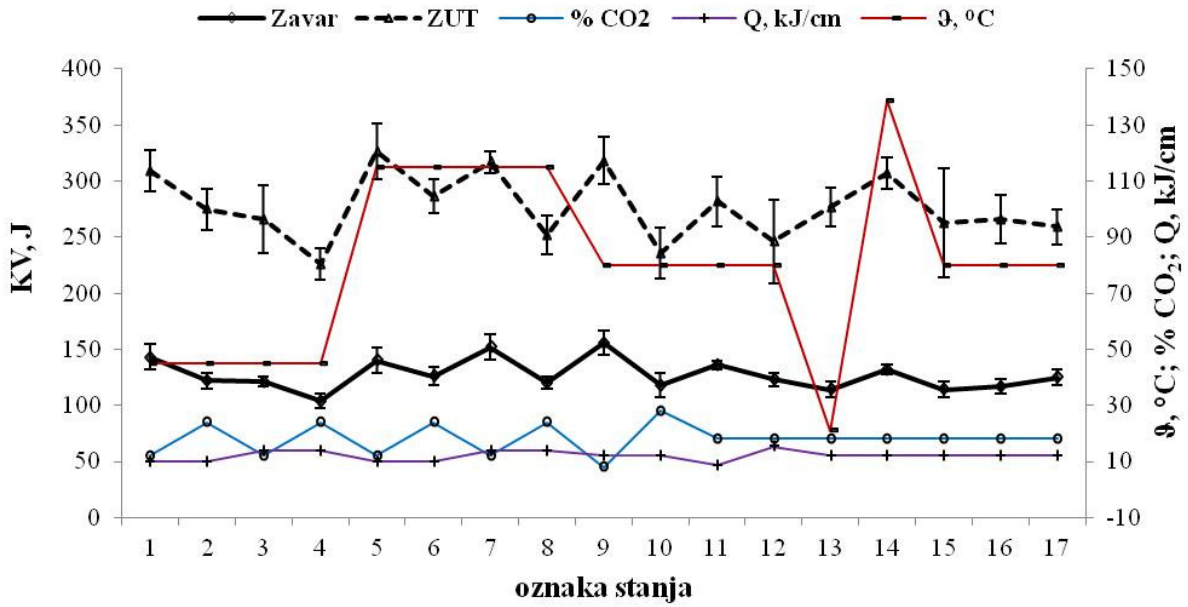
Tablica 10: Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Stanje pokusa	**Parametri zavarivanja**			**Zavar**		**ZUT**	
	% CO_2	Q, kJ/cm	ϑ, ^{O}C	KV, J	SD	KV, J	SD
1	12	10	45	**142,7**	11,30	**308,6**	18,02
2	24	10	45	**122,1**	6,90	**275,0**	18,28
3	12	14	45	**120,7**	4,15	**265,5**	30,49
4	24	14	45	**104,1**	6,72	**226,4**	14,33
5	12	10	115	**140,0**	11,10	**326,0**	24,82
6	24	10	115	**126,1**	8,00	**285,7**	15,07
7	12	14	115	**152,4**	11,27	**317,1**	9,78
8	24	14	115	**119,5**	5,44	**252,3**	17,17
9	8	12	80	**157,7**	10,59	**318,4**	21,00
10	28	12	80	**117,7**	11,07	**235,9**	22,82
11	18	8,64	80	**135,6**	3,82	**282,0**	22,03
12	18	15,36	80	**123,0**	6,08	**245,8**	36,83
13	18	12	20	**114,4**	7,08	**277,4**	17,48
14	18	12	140	**132,2**	3,91	**306,6**	14,49
15	18	12	80	**114,2**	7,26	**262,7**	48,42
16	18	12	80	**117,1**	6,14	**266,4**	21,21
17	18	12	80	**125,0**	7,31	**259,4**	15,60

Slika 57 prikazuje dijagramski prikaz udarnog rada loma zavara i ZUT-a u ovisnosti o promatranim parametrima zavarivanja.

Obzirom da su se ploče tijekom zavarivanja deformirale, strojnom obradom epruveta za ispitivanje udarnog rada loma uzorci su s početne debljine 10 mm obrađeni na način da im je konačna debljina iznosila 7,5 mm.

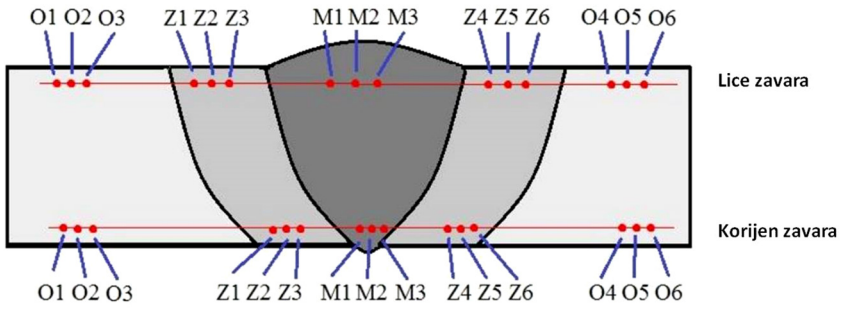
Nakon provedenog ispitivanja udarnog rada loma dobivene vrijednosti su svedene na površinu standarde epruvete 1 cm x 1 cm. Navedeno je učinjeno kako bi se anulirale razlike u dimenzijama epruveta koje su se pojavile tijekom strojna obrade, te kako bi se postigla kompatibilnost rezultata obzirom da se u literaturi najčešće navode vrijednosti ispitivanja udarnog rada loma provedenog na standardnim epruvetama.



Slika 57: Ovisnost udarnog rada loma zavara i ZUT-a o parametrima zavarivanja

4.6.3 Ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja

Tvrdoća zavarenih spojeva mjerena je prema normi HRN EN ISO 6507-1:2008, Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu - 1. dio: Ispitna metoda (ISO 6507-1:2005; EN ISO 6507-1:2005) [78] metodom prema Vickersu HV 10 (98,04 N). Trajanje utiskivanja opterećenja bilo je 10 s. Tvrdoća je mjerena okomito na metal zavara, zonu utjecaja topline i osnovni materijal prema shemi na slici 58.



Slika 58: Raspored mjernih mjesta za ispitivanje tvrdoće na zavarenom spoju

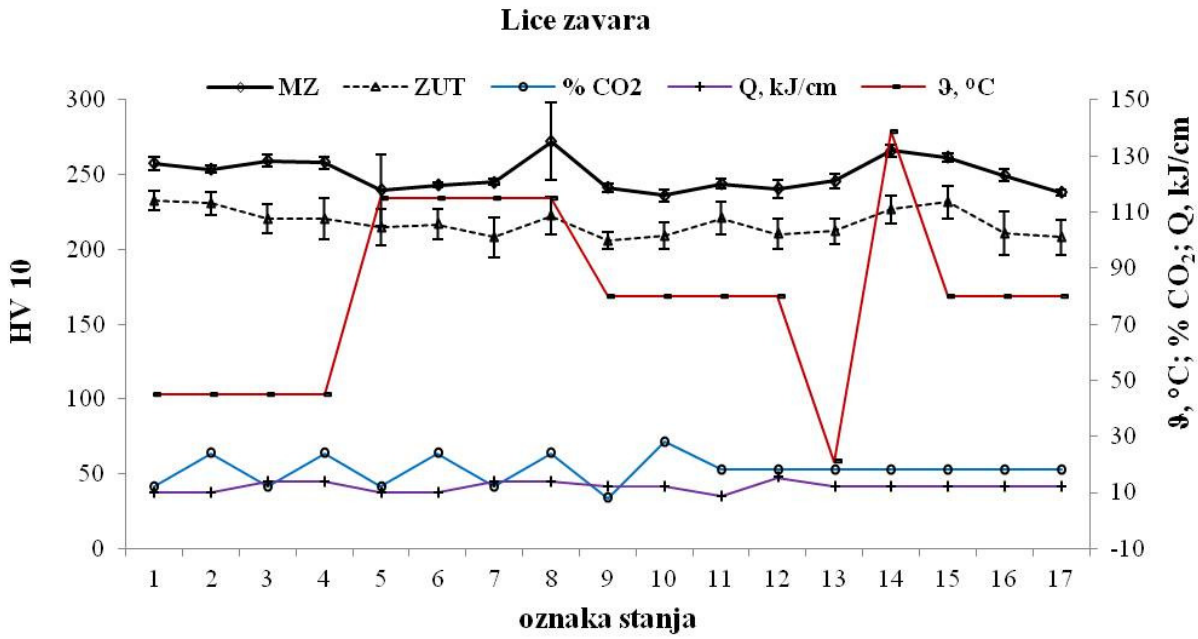
Tvrdoća je ispitivana na Vickersovom tvrdomjeru u Laboratoriju za zavarene konstrukcije FSB-a. Mjerenje tvrdoće zavarenih spojeva provodi se radi utvrđivanja maksimalne vrijednosti tvrdoće koja se postiže u zoni zavara. Prema standardu API 5L izmjerena

vrijednost tvrdoće za materijal API 5L X80 ne bi smjela biti viša od 345 HV10 [3]. Prema normi HRN EN 10208-2:2009 Čelične cijevi za cjevovode zapaljivih medija - Tehnički uvjeti isporuke - 2. dio: Cijevi razreda B [4] prema svojstvima isporučenog materijala, utvrđena je oznaka čelika L555MB. Prema normi CEN ISO/TR 20172-2009 čelik L555MB pripada skupini 2.2, a norma HRN EN ISO 15614-1 propisuje maksimalnu vrijednost tvrdoće zavarenog spoja od 380 HV10 [76]. Zbog sveg navedenog provođenje mjerenja tvrdoće vrlo je važno radi osiguravanja sigurnosti i strukturnog integriteta konstrukcije. U okviru provedenog mjerenja iznosi tvrdoće nisu bili veći od normama propisanih vrijednosti.

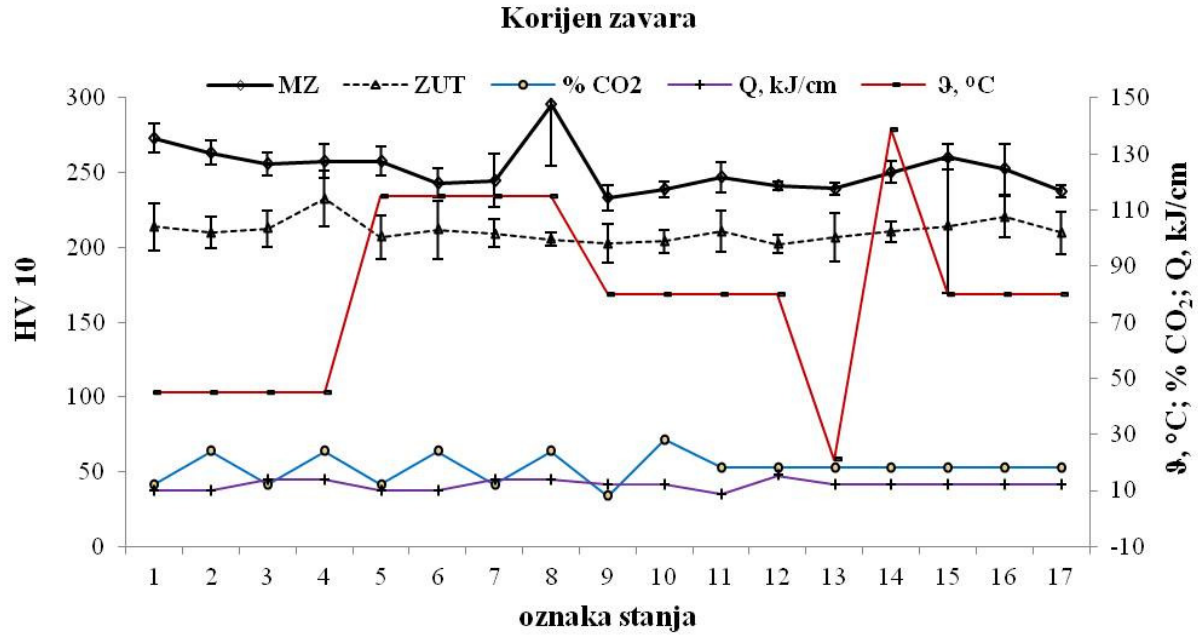
U tablici 11 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće na liniji lica zavara i liniji korijena zavara. Svaki rezultat prikazuje srednju vrijednost tri mjerenja uz pripadnu vrijednost standardne devijacije. Slike 59 i 60 prikazuju rezultate mjerenja tvrdoće u području lica zavara i u području korijena zavara za metal zavara i zonu utjecaja topline u ovisnosti o parametrima zavarivanja.

Tablica 11: Rezultati mjerenja tvrdoće HV 10

Stanje pokusa	Parametri zavarivanja			**ZUT**				**Metal zavara**			
				Lice zavara		Korijen zavara		Lice zavara		Korijen zavara	
	% CO_2	Q, kJ/cm	ϑ, °C	**HV 10**	SD	**HV 10**	SD	**HV 10**	SD	**HV 10**	SD
1	12	10	45	**231**	6,5	**214**	15,8	**258**	4,5	**273**	9,8
2	24	10	45	**231**	7,9	**210**	10,8	**254**	2,5	**263**	8,1
3	12	14	45	**220**	9,9	**213**	12,0	**259**	4,2	**256**	7,6
4	24	14	45	**221**	14,0	**233**	18,5	**258**	4,0	**258**	11,2
5	12	10	115	**215**	12,0	**207**	14,7	**240**	24,0	**258**	9,6
6	24	10	115	**217**	10,1	**212**	19,4	**243**	1,7	**243**	9,8
7	12	14	115	**208**	13,5	**209**	9,4	**245**	2,0	**245**	17,9
8	24	14	115	**223**	12,5	**206**	4,5	**272**	26,1	**296**	41,0
9	8	12	80	**206**	5,8	**203**	12,7	**241**	2,6	**233**	8,7
10	28	12	80	**209**	8,6	**204**	8,0	**236**	4,0	**239**	5,1
11	18	8,64	80	**221**	10,7	**211**	13,5	**244**	3,6	**247**	10,1
12	18	15,36	80	**210**	9,9	**202**	6,0	**240**	6,4	**241**	2,6
13	18	12	20	**212**	8,5	**207**	16,4	**246**	4,6	**239**	4,0
14	18	12	140	**227**	9,5	**211**	6,6	**266**	4,0	**250**	7,4
15	18	12	80	**232**	11,3	**214**	44,6	**261**	3,1	**260**	8,6
16	18	12	80	**211**	14,2	**221**	13,4	**250**	4,2	**252**	17,0
17	18	12	80	**208**	11,9	**210**	14,4	**238**	2,0	**238**	3,8



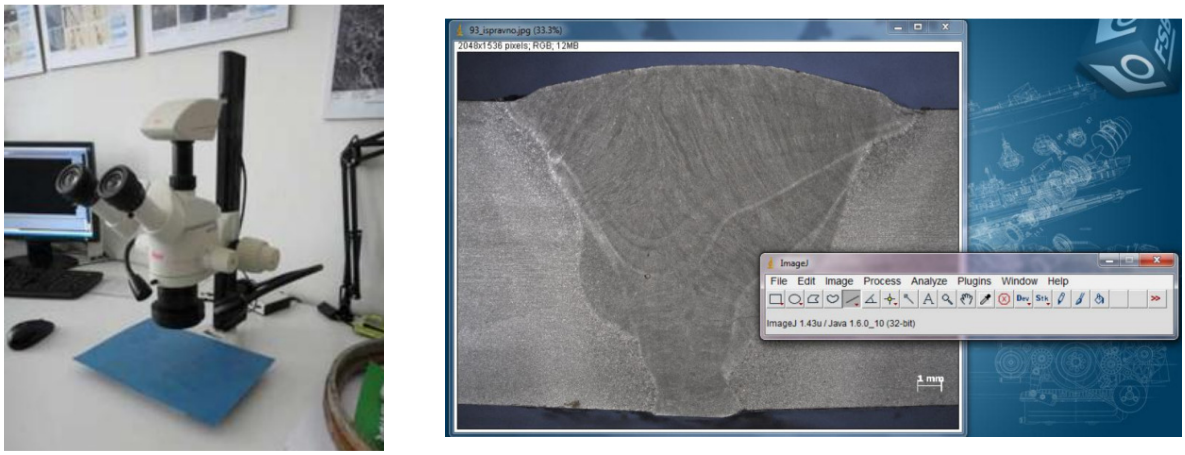
Slika 59: Tvrdoća zavarenog spoja u području lica zavara



Slika 60: Tvrdoća zavarenog spoja u području korijena zavara

4.6.4 Analiza makrostrukture i geometrijskih značajki zavara

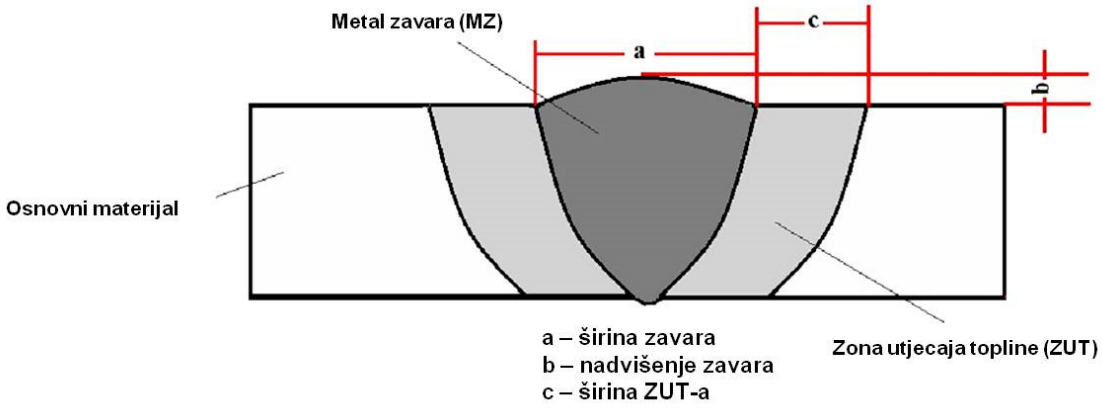
Za analizu makro i mikrostrukture uzorci su metalografski pripremljeni standardnim postupkom: rezanje uz obilno ohlađivanje kako ne bi došlo do strukturnih promjena u materijalu, grubo i fino brušenje te poliranje. Za makro analizu zavarenog spoja uzorci su nagriženi 7 % NITAL-om. Uzorci za makro i mikro analizu strukture pripremljeni su u Laboratoriju za materijalografiju FSB-a. Makro analiza zavarenih spojeva provedena je na stereo mikroskopu LEICA MZ6, slika 61 a, u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB-a. Geometrijske značajke zavarenog spoja mjerene su računalnim programom „Image J“, slika 61 b.



a) b)

Slika 61: Makro analiza zavarenih spojeva a) Stereo mikroskop LEICA MZ6
b) računalni program “Image J”

Na slici 62 prikazani su mjereni parametri geometrije zavarenog spoja.

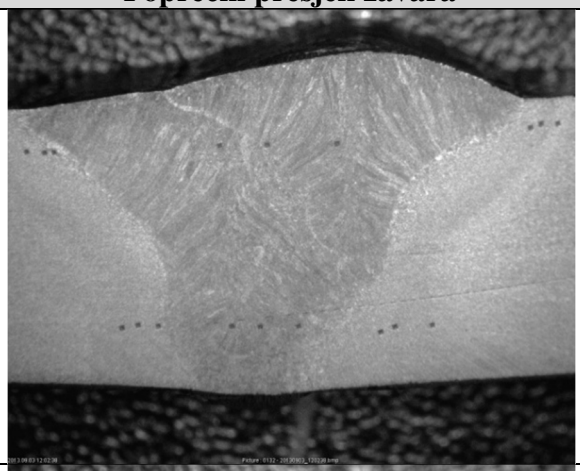
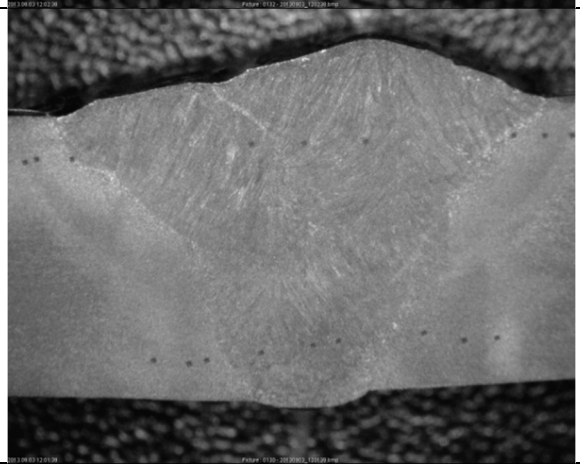


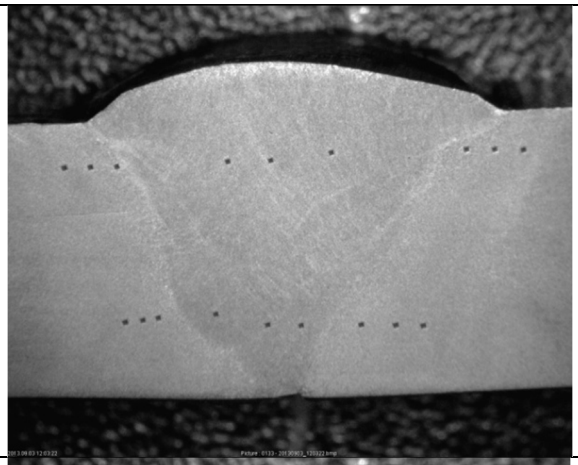
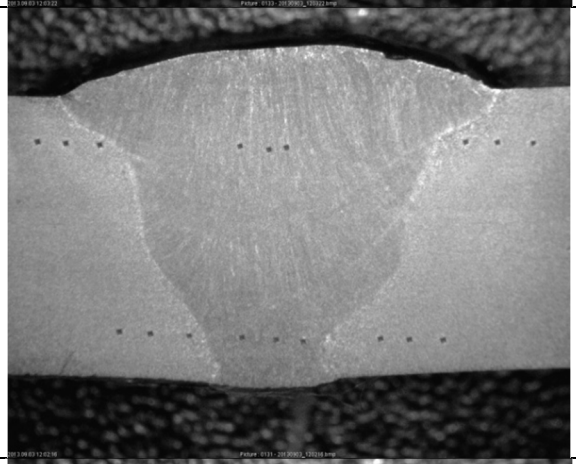
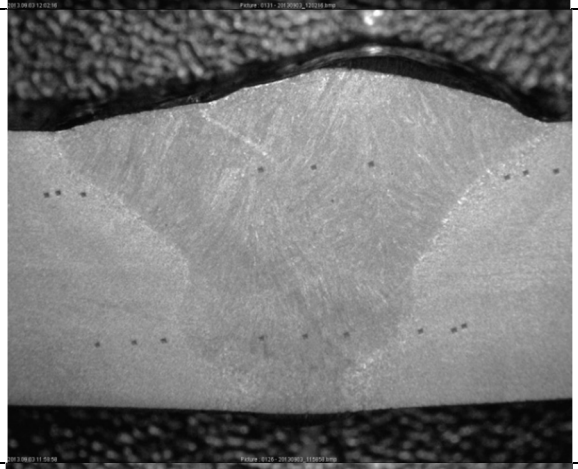
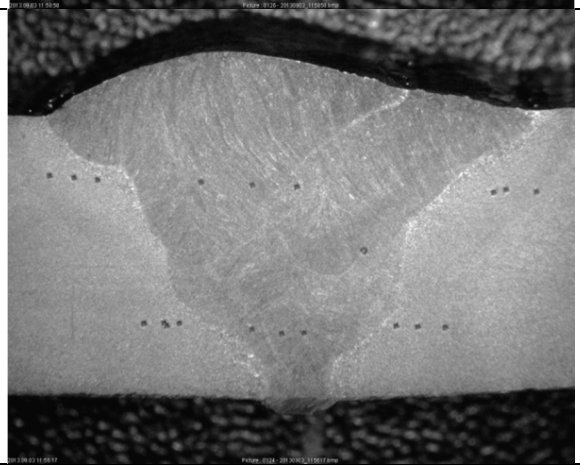
Slika 62: Parametri geometrije zavarenog spoja

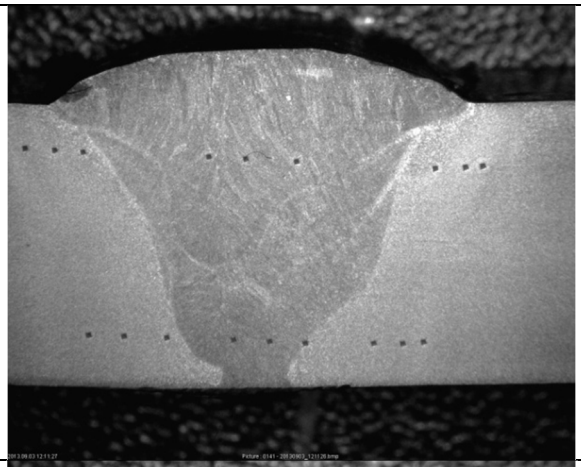
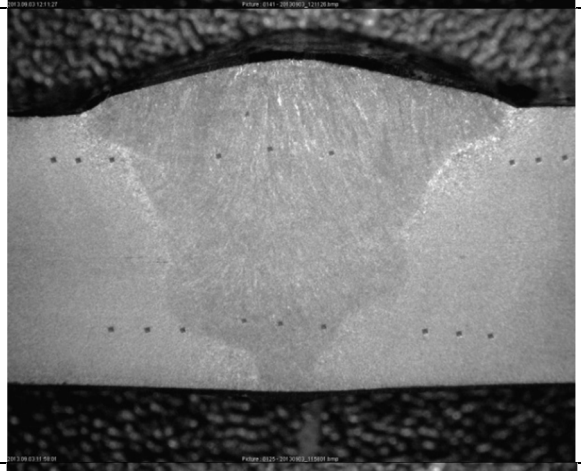
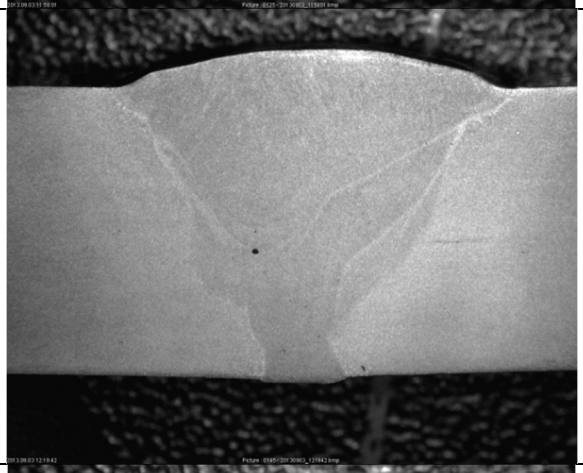
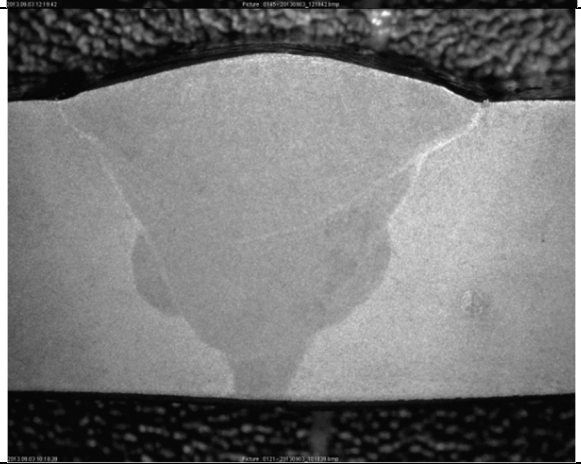
Na slikama u tablici 12 prikazani su poprečni presjeci zavarenih spojeva svih sedamnaest stanja pokusa na kojima su izmjerene vrijednosti širine i nadvišenja zavara te širine ZUT-a. Pregledom makro strukture zavarenih spojeva utvrđeno je da niti na jednom uzorku nije uočena pojava pukotina, niti u metalu zavara niti u ZUT-u. Ova analiza nije mogla isključiti pojavu mikro pukotina.

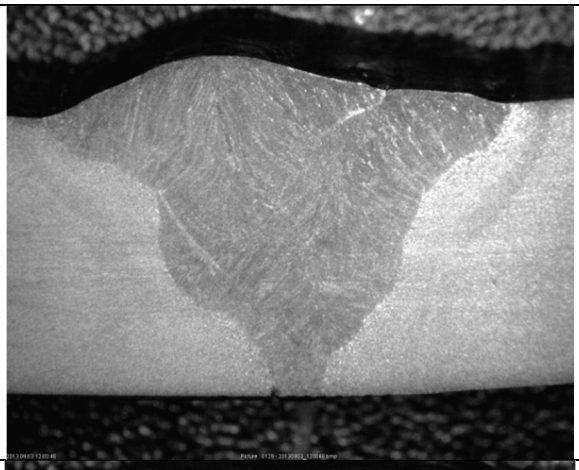
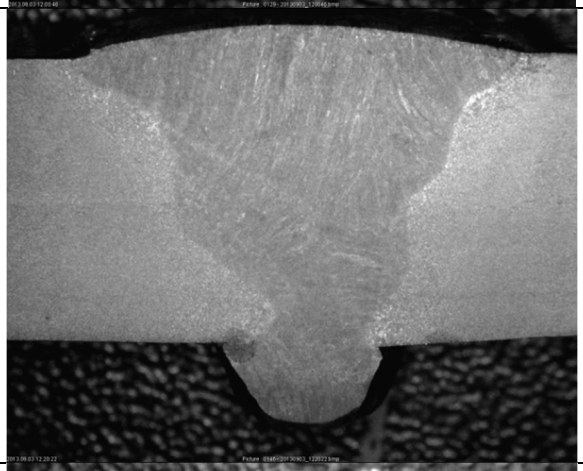
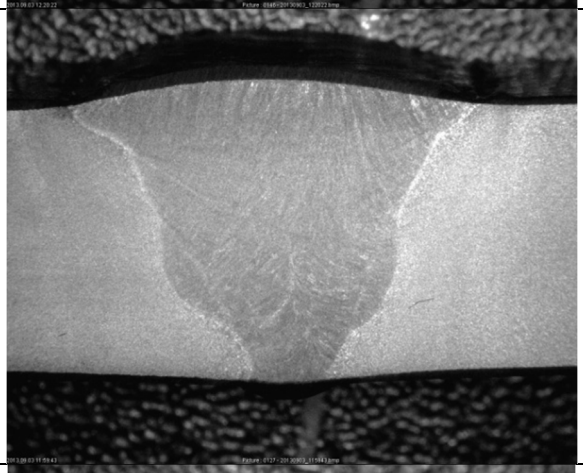
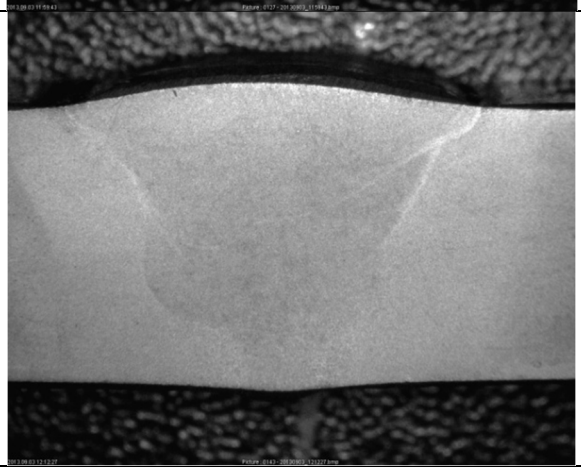
Izgled zavara na svim uzorcima ukazuje da razlika između primijenjenih parametara zavarivanja ne utječe značajno na geometriju zavarenog spoja. Vidljivo je i da je na uzorcima stanja 12 došlo do prokapljivanja korijena što se nije ponovilo niti kod jednog drugog stanja. Razlog tomu je visok unos topline u drugom prolazu popune koji je protalio korijenski zavar debljine 3 mm. Mala količina rastaljenog metala pri korijenskom prolazu uvjetovala je prokapljivanje korijena pri visokom unosu topline pri drugom prolazu.

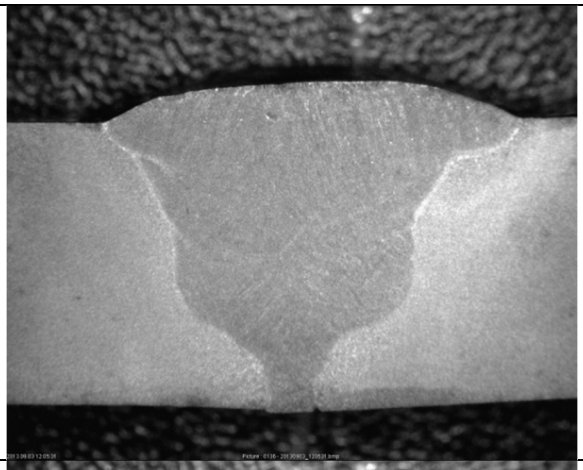
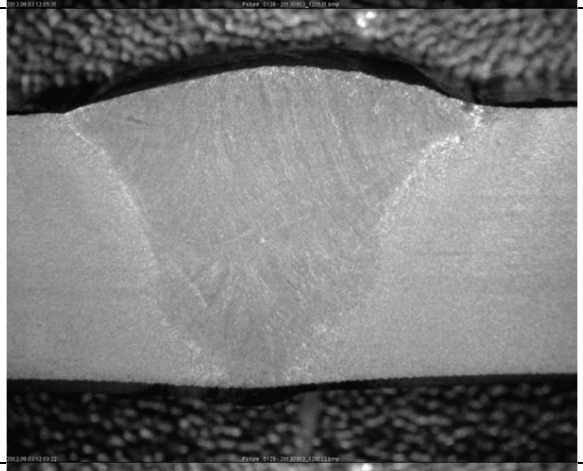
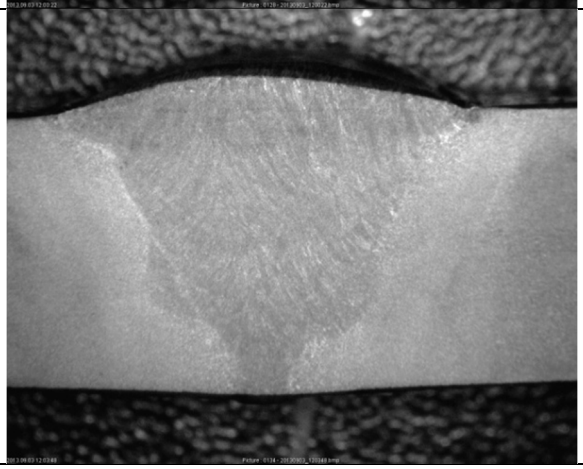
Tablica 12: Poprečni presjeci zavara svih stanja pokusa

Stanje pokusa	Broj prolaza	Poprečni presjek zavara
1	3	
2	3	

3	3		
4	3		
5	3		
6	3		

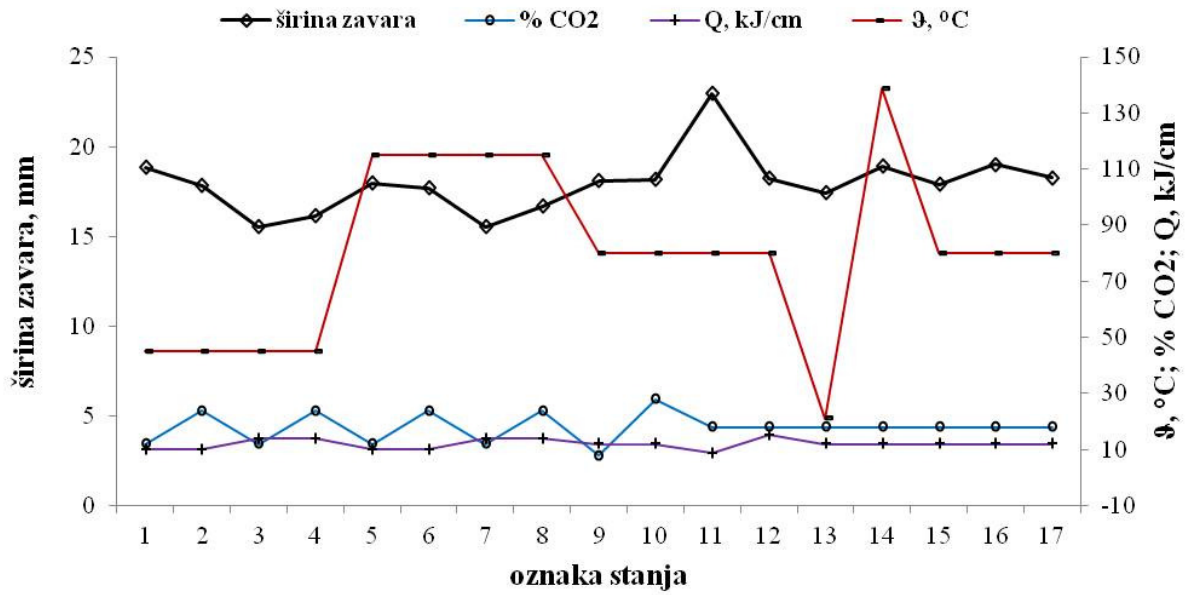
7	3		
8	3		
9	3		
10	3		

11	3		
12	4		
13	3		
14	3		

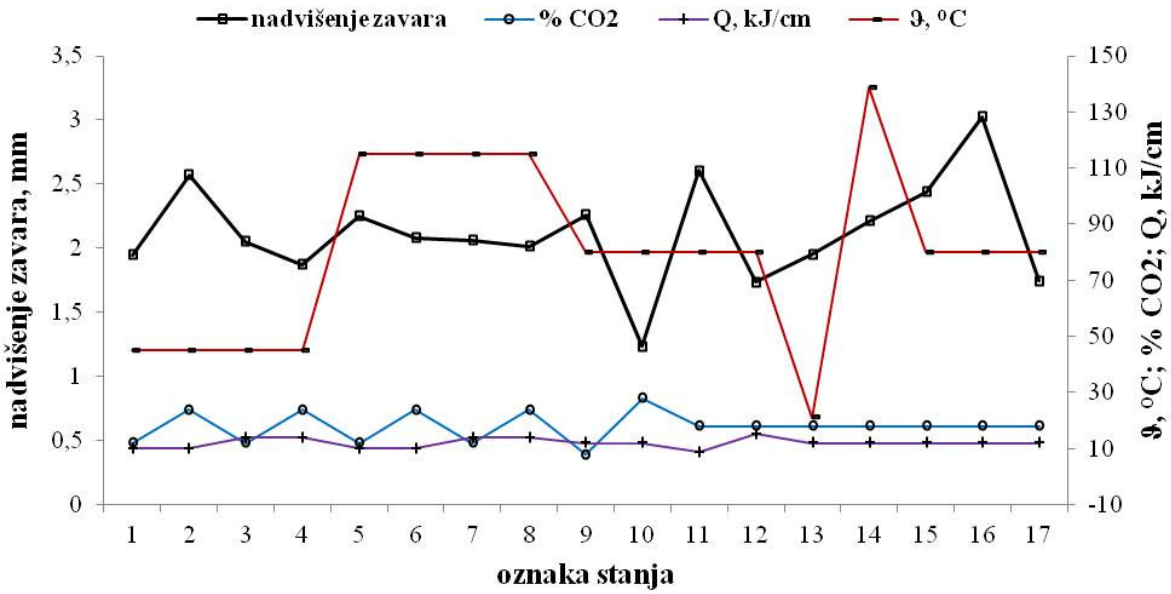
15	3		
16	3		
17	3		

Na uzorcima stanja 15 i 16 moguće je uočiti naljepljivanje u korijenskom dijelu zavara što može biti posljedica neadekvatne odnosno prevelike brzine zavarivanja pri kojoj ne dolazi do dovoljnog zagrijavanja osnovnog materijala pa kapljice padaju na hladni osnovni materijal i ne dolazi do protaljivanja. Također, naljepljivanje može biti posljedica i pogreške u gibanju pištolja, odnosno njegovom nedovoljnom zadržavanju na krajevima V spoja, uslijed čega također ne dolazi do potpunog protaljivanja.
U poprečnom presjeku zavara može se uočiti dendritna struktura u području metala zavara, a vidljiv je i smjer rasta zrna tijekom skrućivanja taline. Zrna su orijentirana okomito u odnosu na granicu područja taljenja.

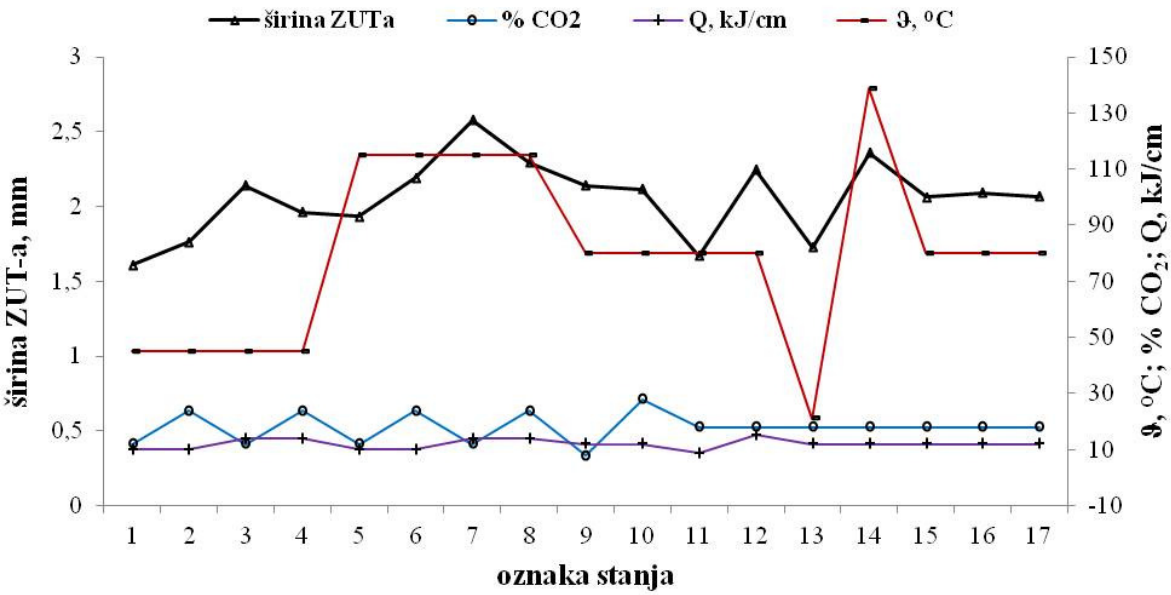
Na slikama 63, 64 i 65 prikazana je ovisnost širine zavara, nadvišenja zavara i širine ZUT-a o primijenjenim parametrima zavarivanja za sva stanja pokusa.



Slika 63: Ovisnost širine zavara o parametrima zavarivanja



Slika 64: Ovisnost nadvišenja zavara o parametrima zavarivanja



Slika 65: Ovisnost širine ZUT-a zavara o parametrima zavarivanja

4.6.5 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju FSB-a, na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51F-5 s ugrađenom CCD kamerom opremljenim s računalnim programom za analizu slike AnalySIS; te na Institutu za materijale i tehnologiju u Ljubljani na elektronskom mikroskopu FE SEM JEOL JSM – 6500F, slika 66 a i b. Uzorci za analizu mikrostrukture pripremljeni su standardnim postupkom, a mikrostruktura je razvijena nagrizanjem u 2 % NITAL-u.

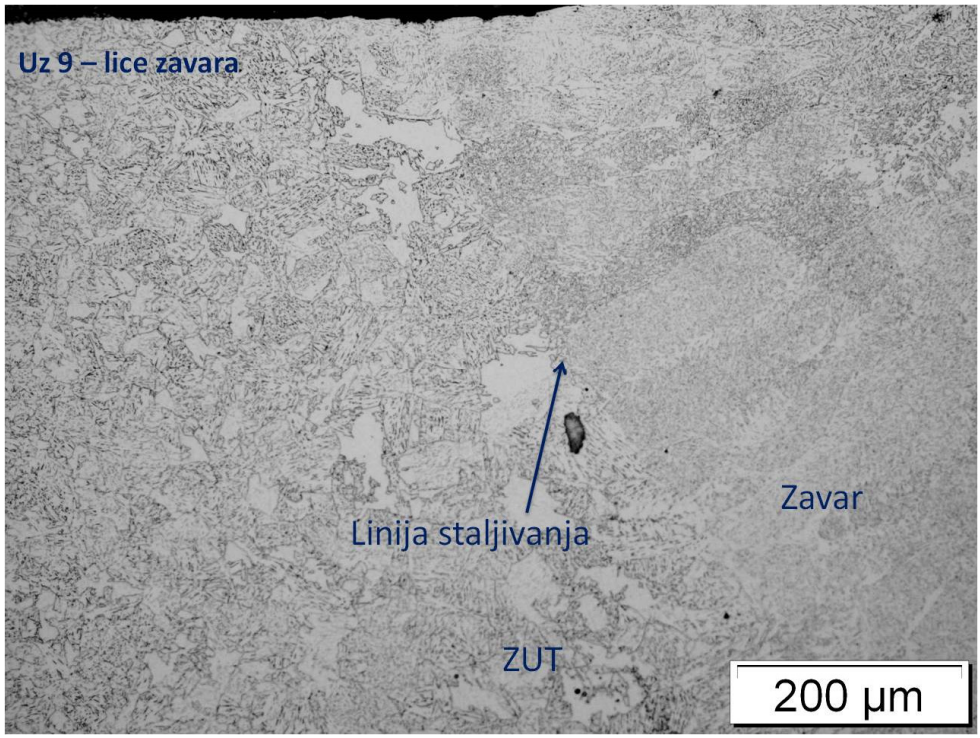
a) b)

Slika 66: Analiza mikrostrukture

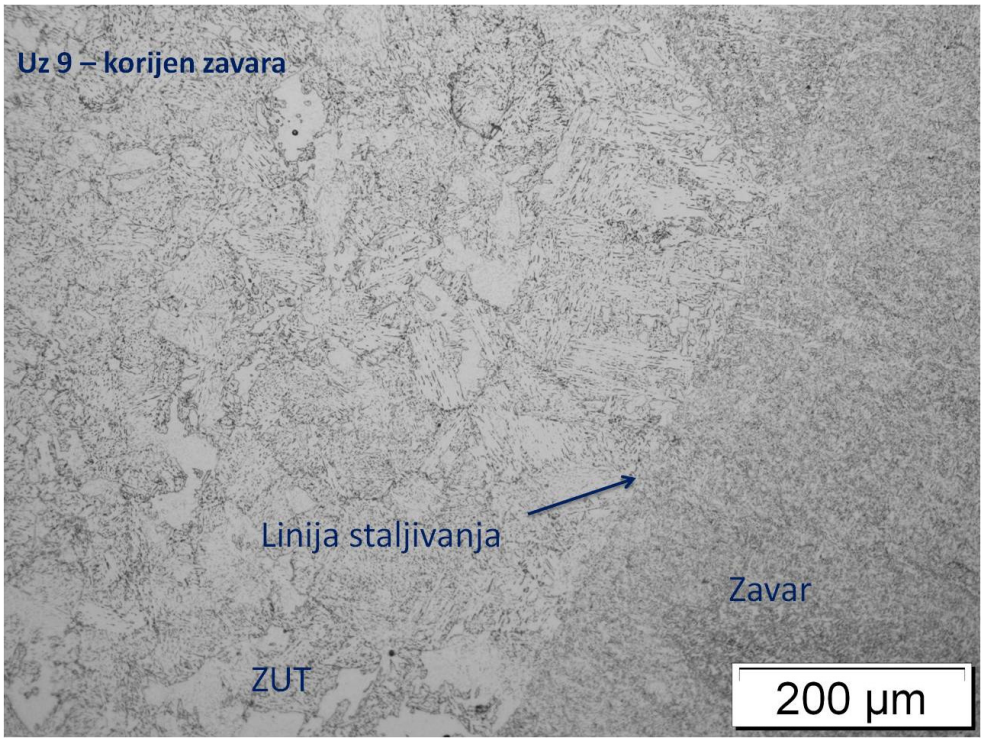
a) svjetlosni mikroskop Olympus GX51F-5 s ugrađenom CCD kamerom

b) elektronski mikroskop FE SEM JEOL JSM – 6500F

Na slikama 67 i 68 prikazane su mikrostrukture zavarenih spojeva u ZUT-u i korijenskom dijelu zavara i licu zavara za stanja s minimalnim i maksimalnim udjelom CO_2 (stanja pokusa 9 i 10). Na slikama 69 i 70 prikazane su mikrostrukture zavarenih spojeva s minimalnim i maksimalnim unosom topline Q (stanja pokusa 11 i 12), a na slici 71 mikrostrukture za referentno stanje parametara zavarivanja (stanje pokusa 15).

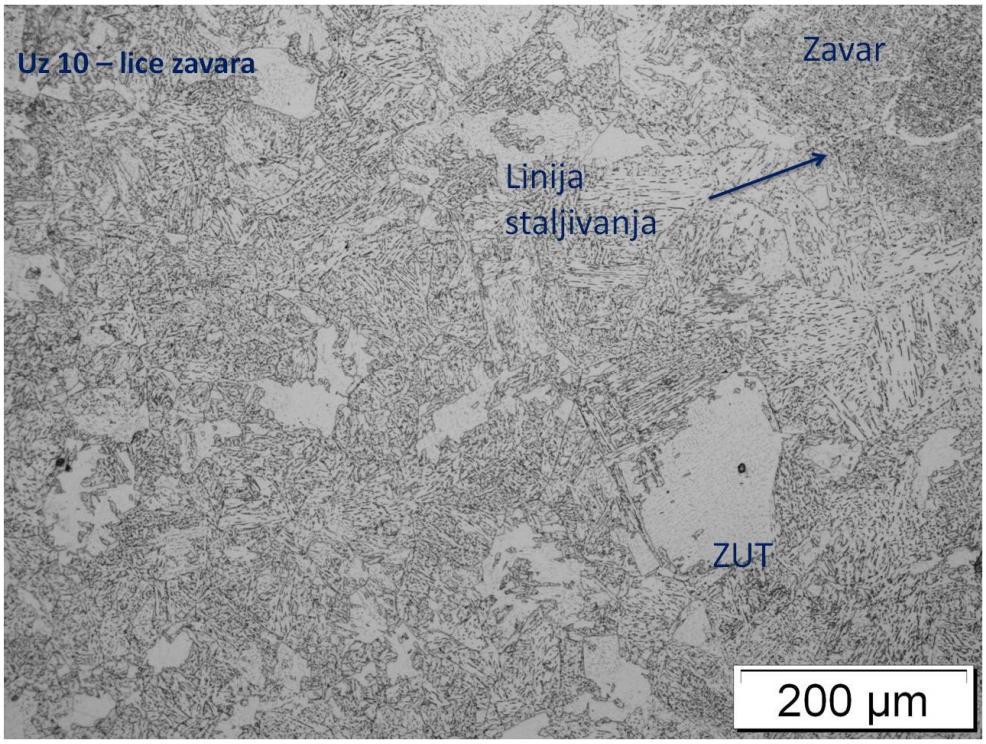


a)

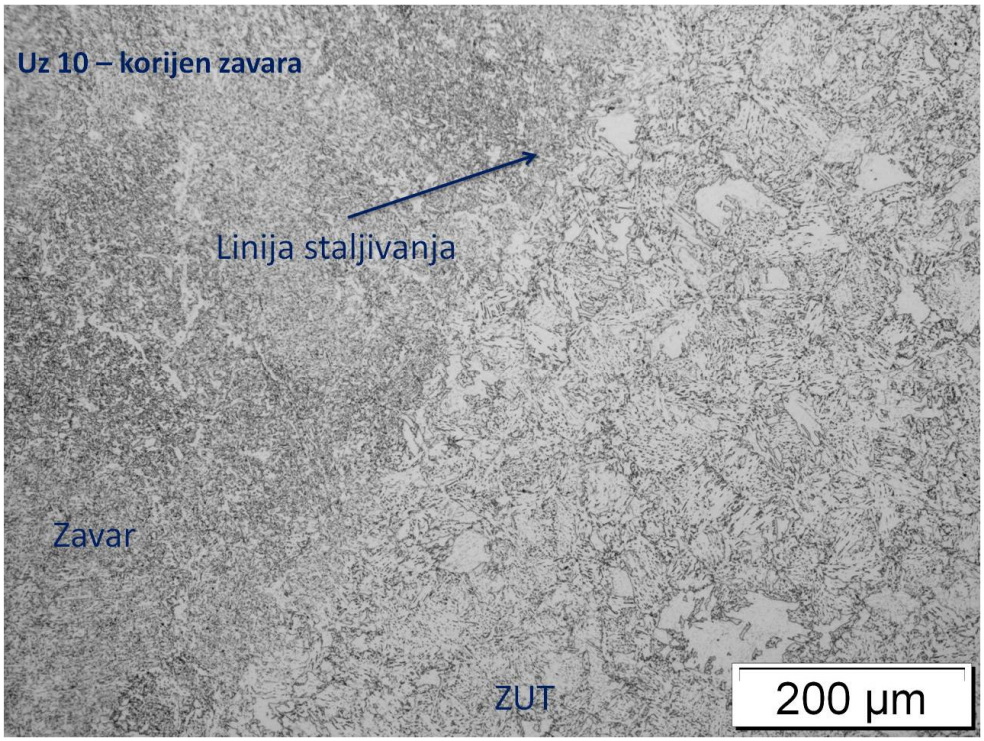


b)

Slika 67: Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 9 s minimalnim udjelom CO_2 u Ar, % CO_2 = 8 a) lice zavara
b) korijen zavara

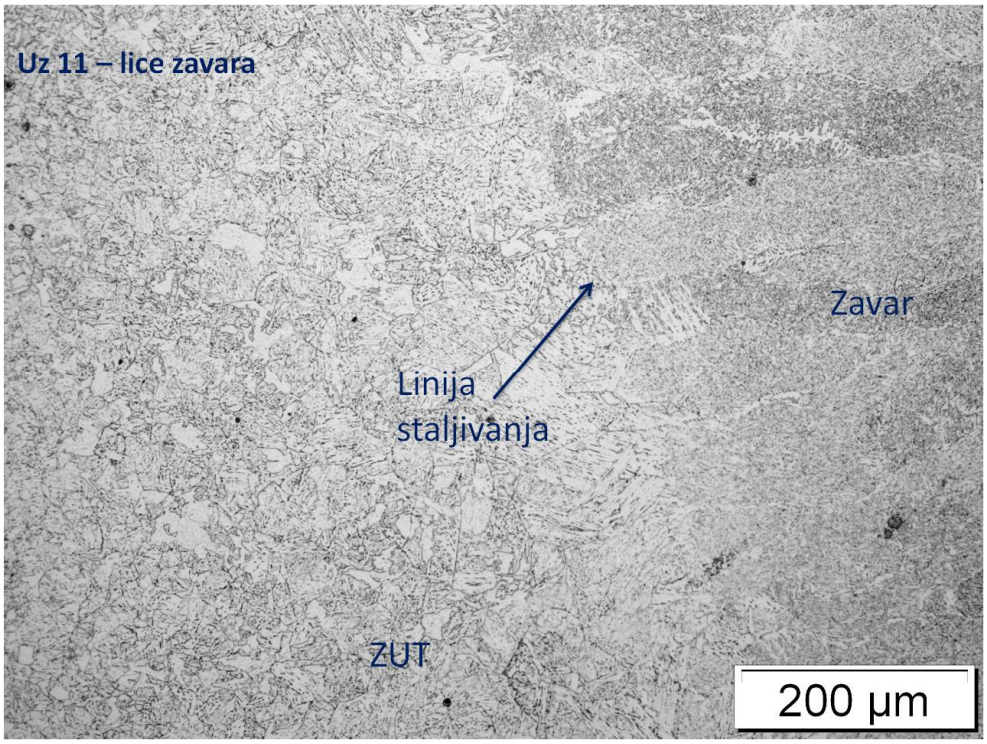


a)

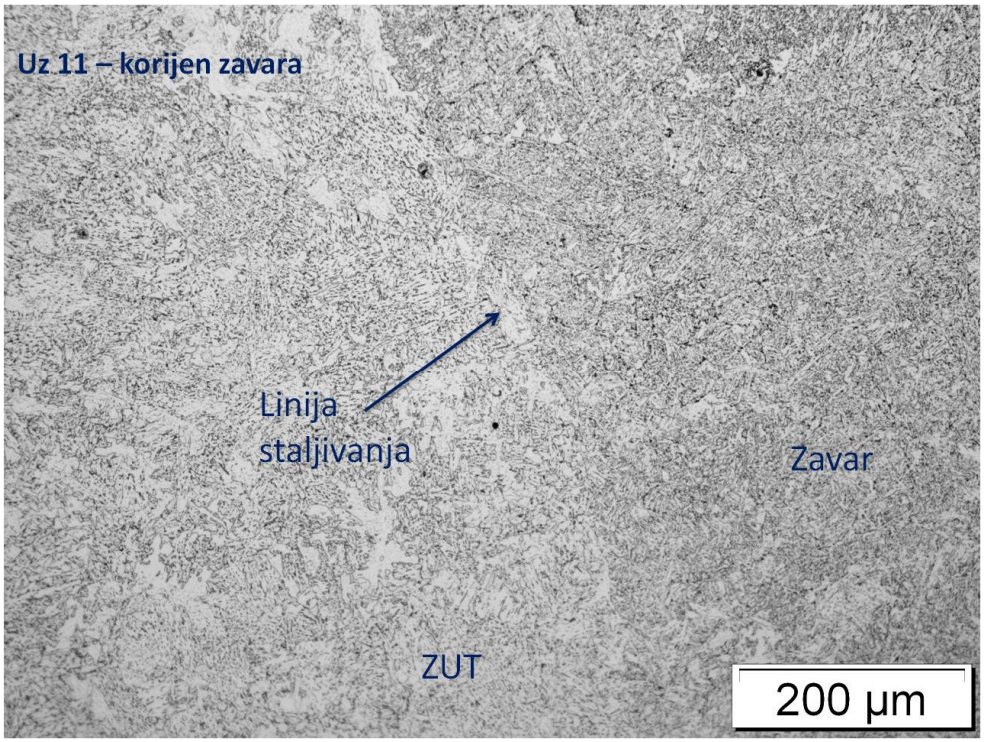


b)

Slika 68: Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 10 s maksimalnim udjelom CO2 u Ar, % CO2 = 28 a) lice zavara
b) korijen zavara

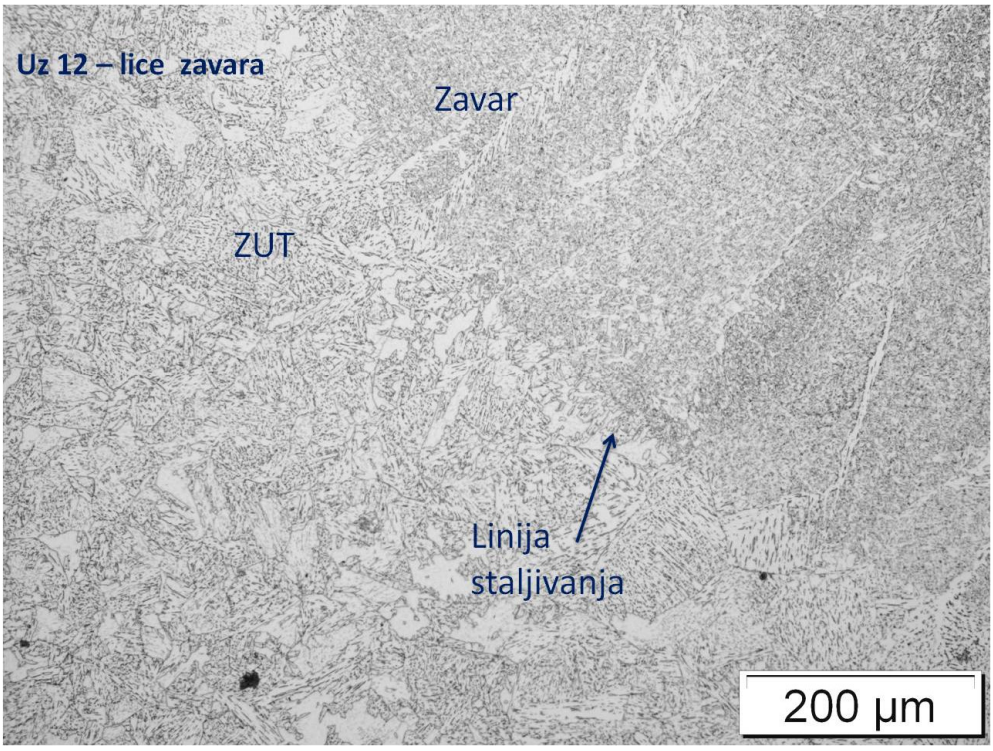


a)

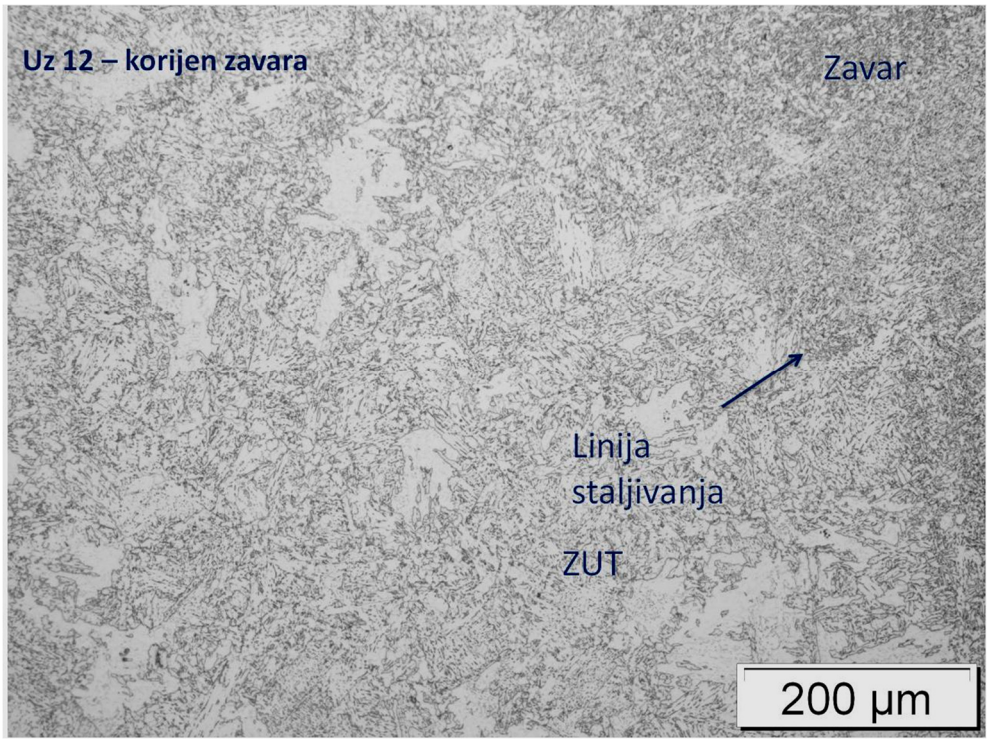


b)

Slika 69: Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 11 s minimalnim unosom topline, Q = 8,64 kJ/cm a) lice zavara
b) korijen zavara

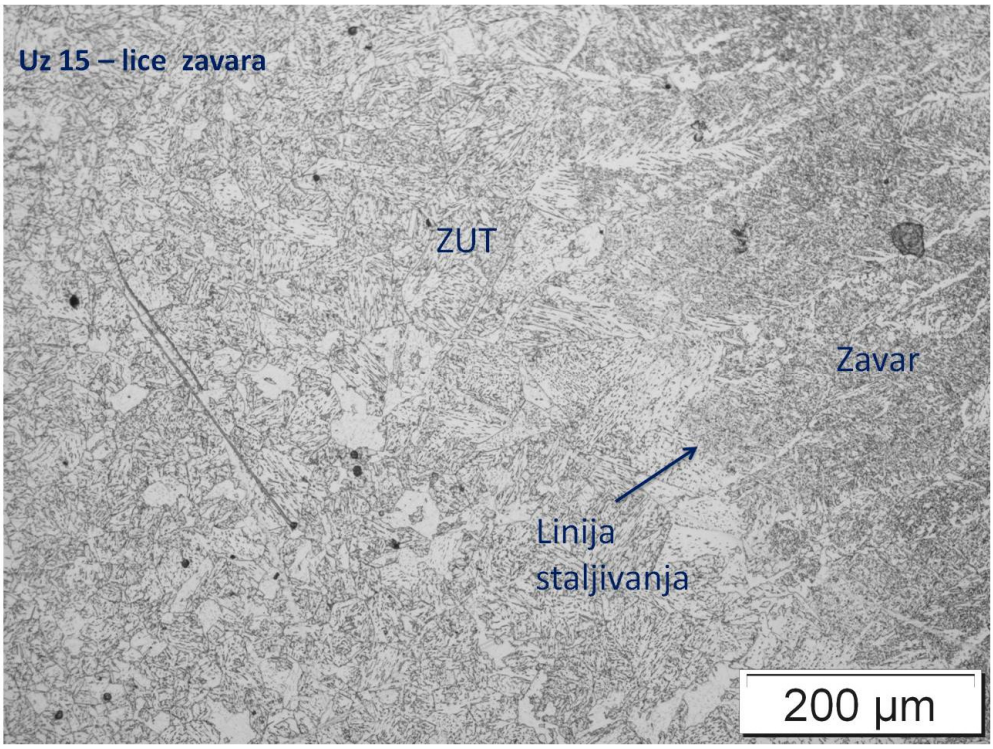


a)

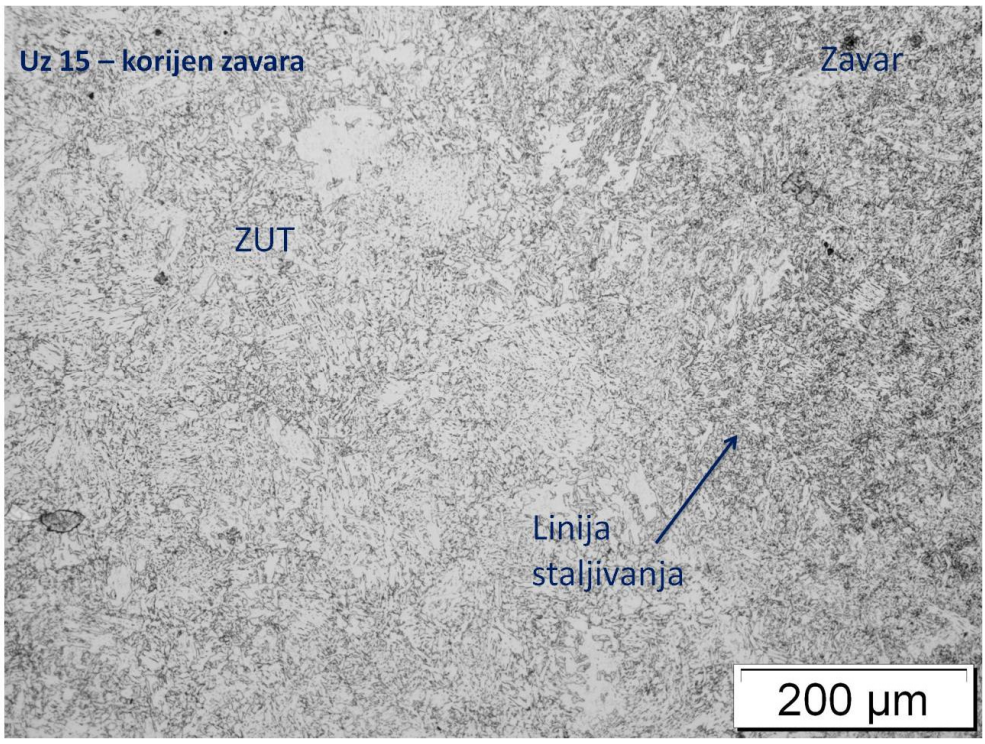


b)

Slika 70: Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 12 s maksimalnim unosom topline, Q = 15,36 kJ/cm a) lice zavara
b) korijen zavara



a)

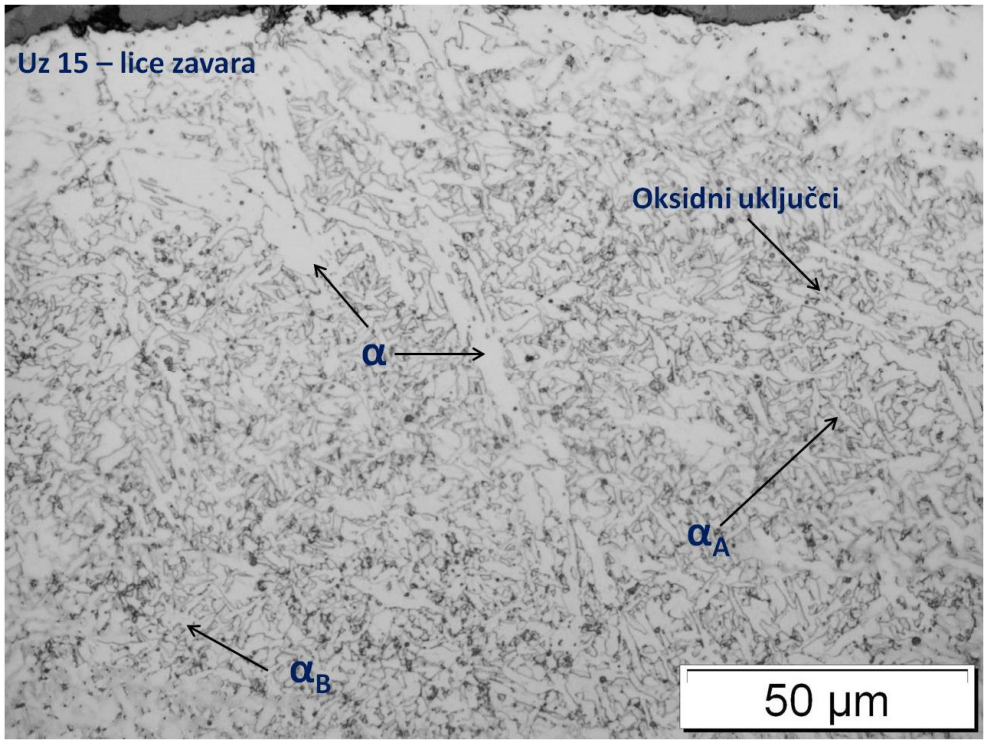


b)

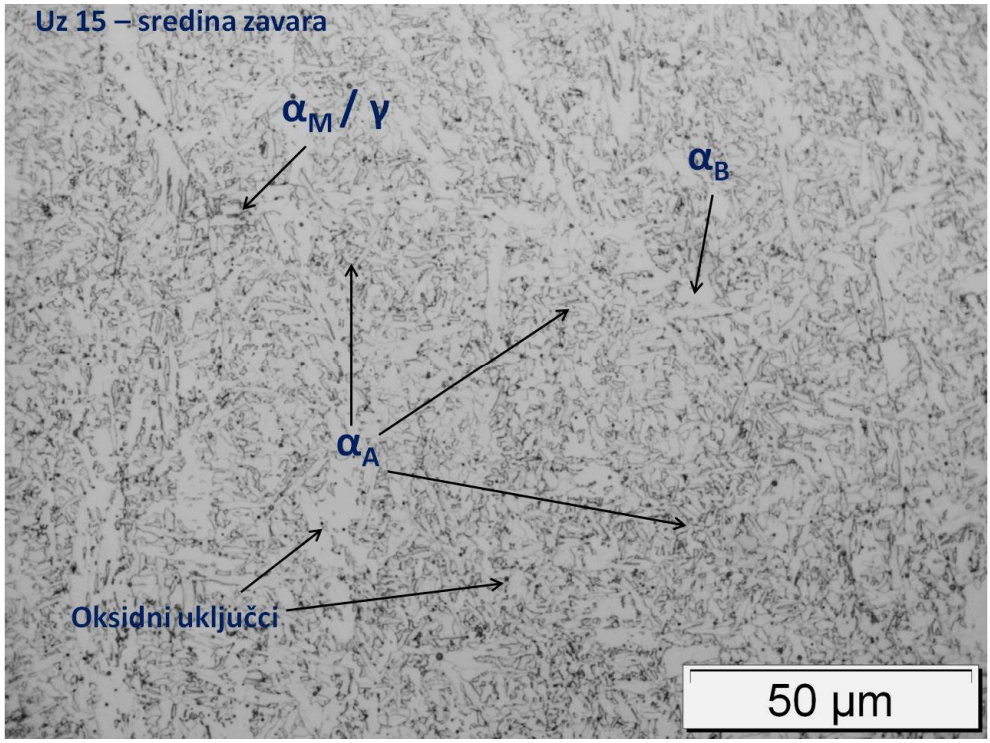
Slika 71: Mikrostrukture ZUT-a i zavara stanja pokusa 15 s referentnim parametrima zavarivanja nultog stanja a) lice zavara
b) korijen zavara

Na slikama je vidljiva karakteristična mikrostruktura zavarenih spojeva s vidljivom linijom staljivanja, grubljom mikrostrukturom u ZUT-u uslijed povećanog unosa topline u materijal te mikrostruktura zavara. Vidljivo je da je mikrostruktura u korijenskom dijelu zavara sitnijeg zrna u odnosu na površinski sloj zavara jer kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj žari tj. normalizira djelomično sloj ispod, što povoljno djeluje na mikrostrukturu i čvrstoću zavarenog spoja.

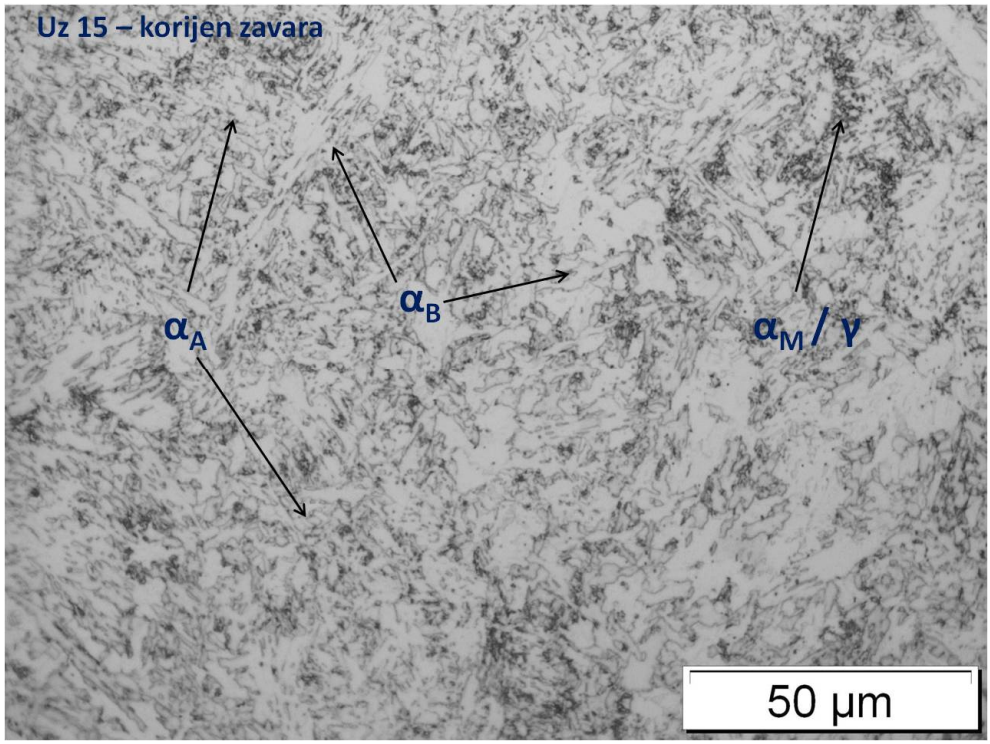
Na slici 72 prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja izvedenog s referentnim razinama parametra zavarivanja za sva tri faktora (stanje pokusa 15).



a)



b)



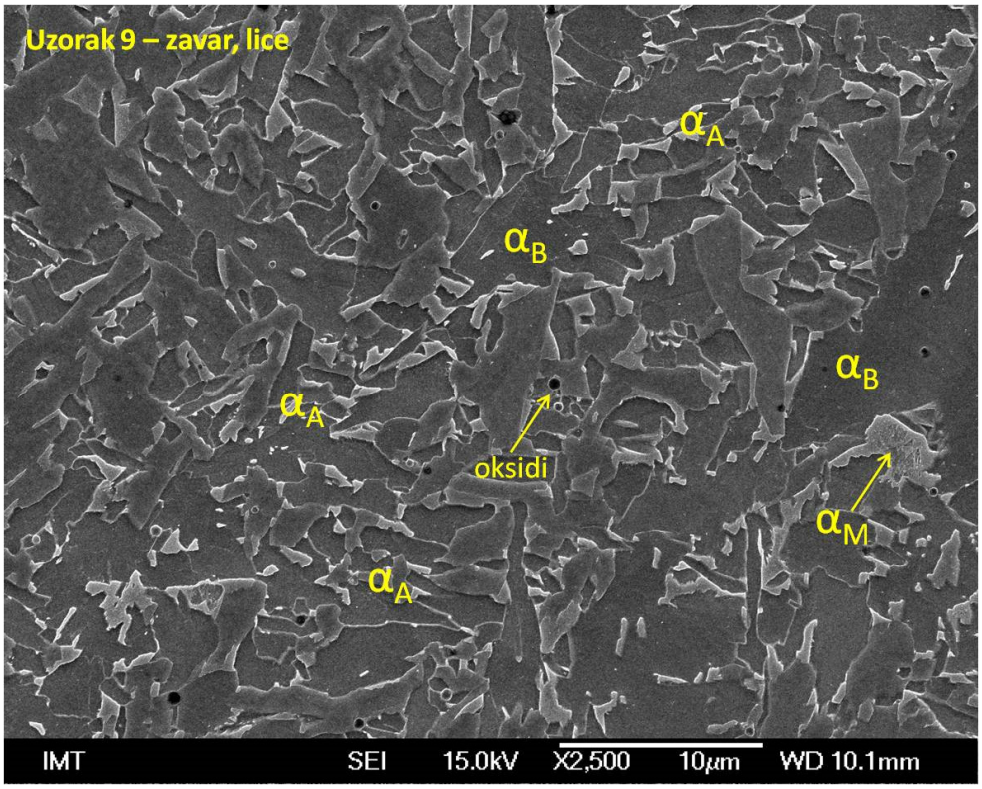
c)

Slika 72: Mikrostruktura zavarenog spoja nultog stanja, stanje pokusa 15, povećanje 1000 x

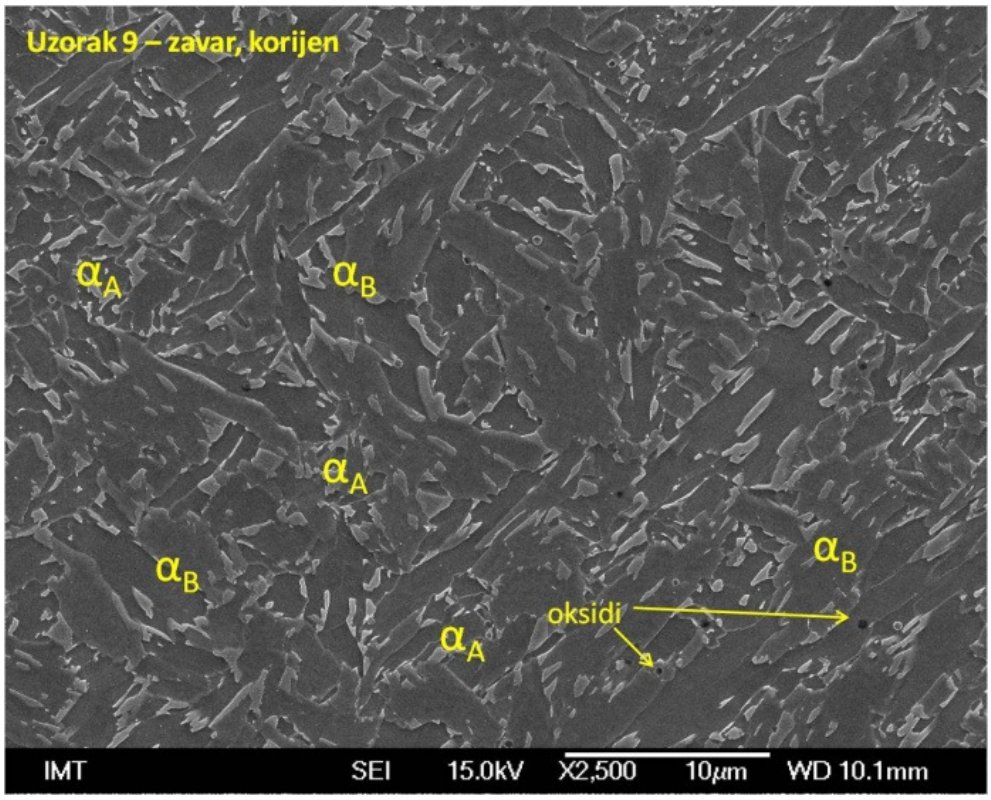
a) lice zavara
b) sredina zavara
c) korijen zavara

Na slici 72 vidljiva je sitnozrnata mikrostruktura zavara u kojoj prevladava feritna faza. Vidljiva je mješovita mikrostruktura acikularnog (α_A) i bainitnog (α_B) ferita uz postojanje vrlo male količine austenitno/martenzitnog područja. Također je vidljiva i veća količina oksidnih uključaka nastalih u samom zavaru, koji su odgovorni za nukleaciju acikularnog ferita.

Na slikama 73 i 74 prikazane su mikrostrukture zavarenih spojeva korijenskog dijela zavara i vrha zavara za stanja s minimalnim i maksimalnim udjelom CO_2 (uzorci stanja pokusa 9 i 10) slikane na FE SEM mikroskopu. Na slikama 75 i 76 prikazane su mikrostrukture zavarenih spojeva s minimalnim i maksimalnim unosom topline Q (uzorci stanja pokusa 11 i 12) te na slici 77 mikrostrukture s referentnim razinama parametra zavarivanja za sva tri faktora (uzorak stanja pokusa 15).



a)

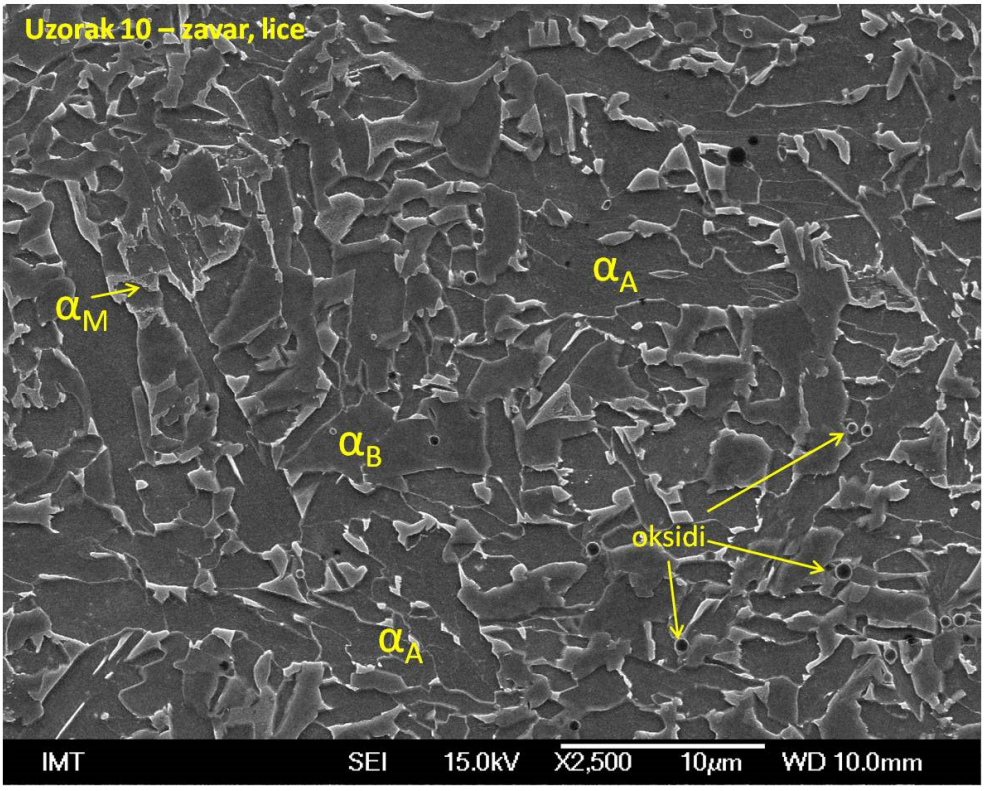


b)

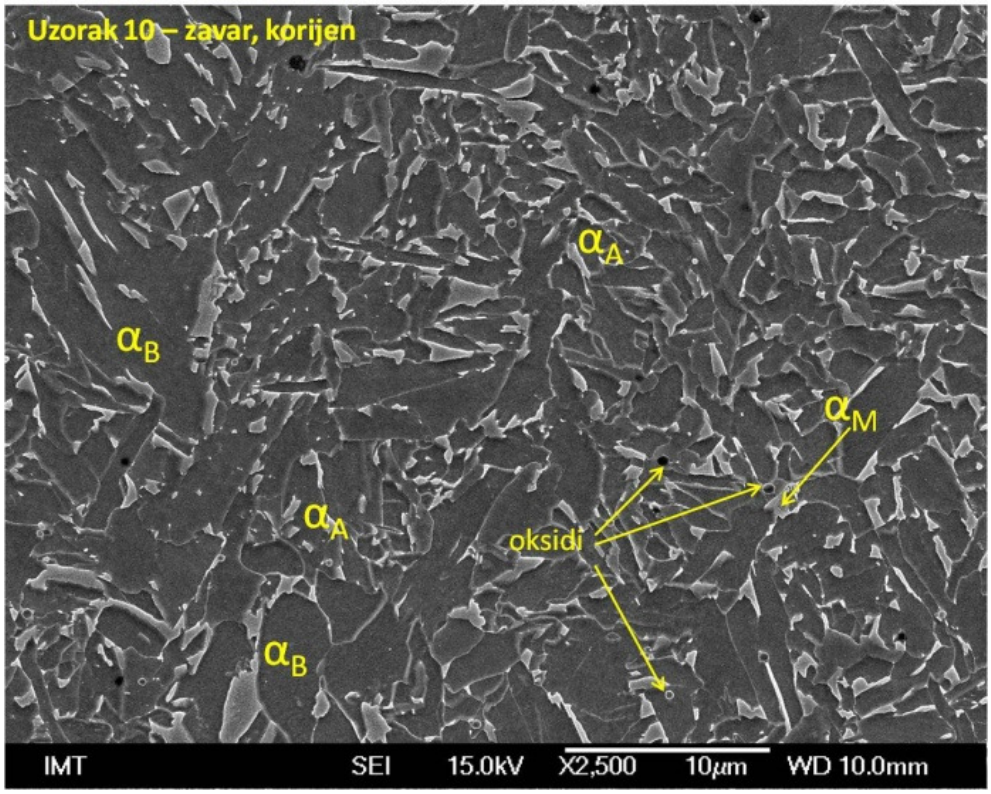
Slika 73: Mikrostrukture zavara stanja pokusa 9 s udjelom CO_2 u Ar, % CO_2 = 8

a) lice zavara

b) korijen zavara



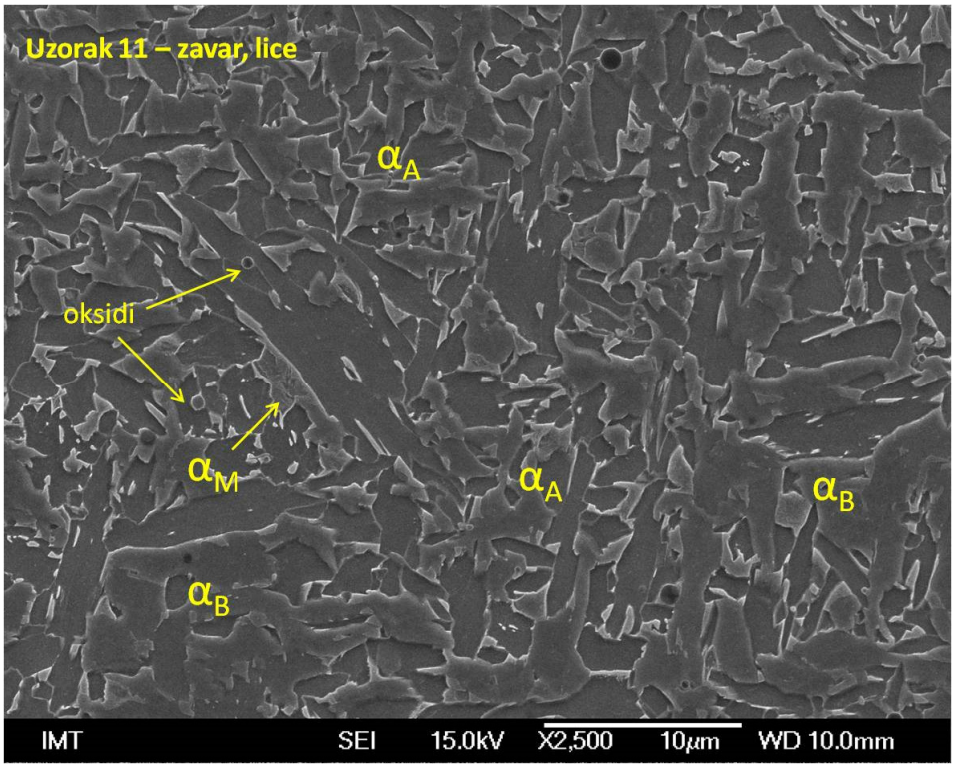
a)



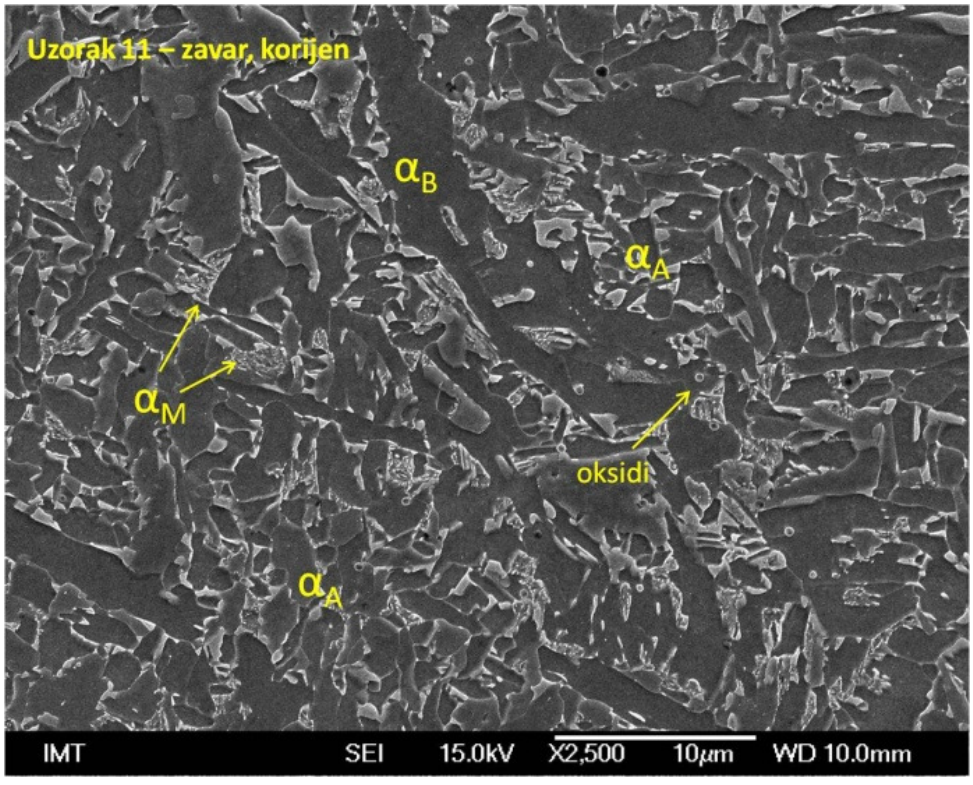
b)

Slika 74: Mikrostrukture zavara stanja pokusa 10 s udjelom CO_2 u Ar, % CO_2 = 28

a) lice zavar
b) korijen zavara



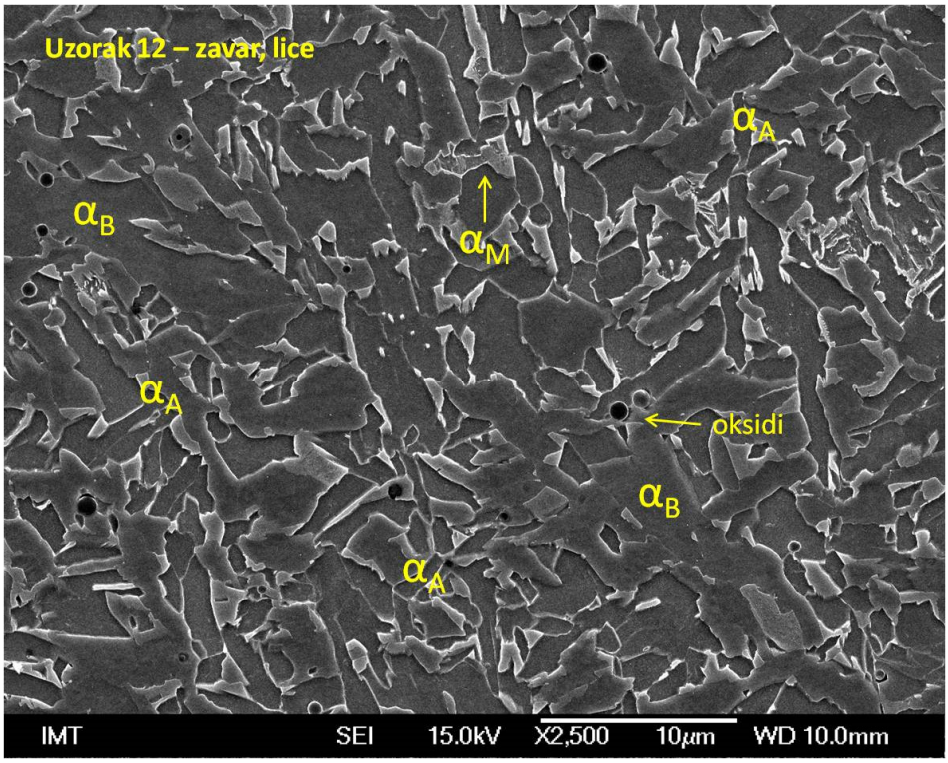
a)



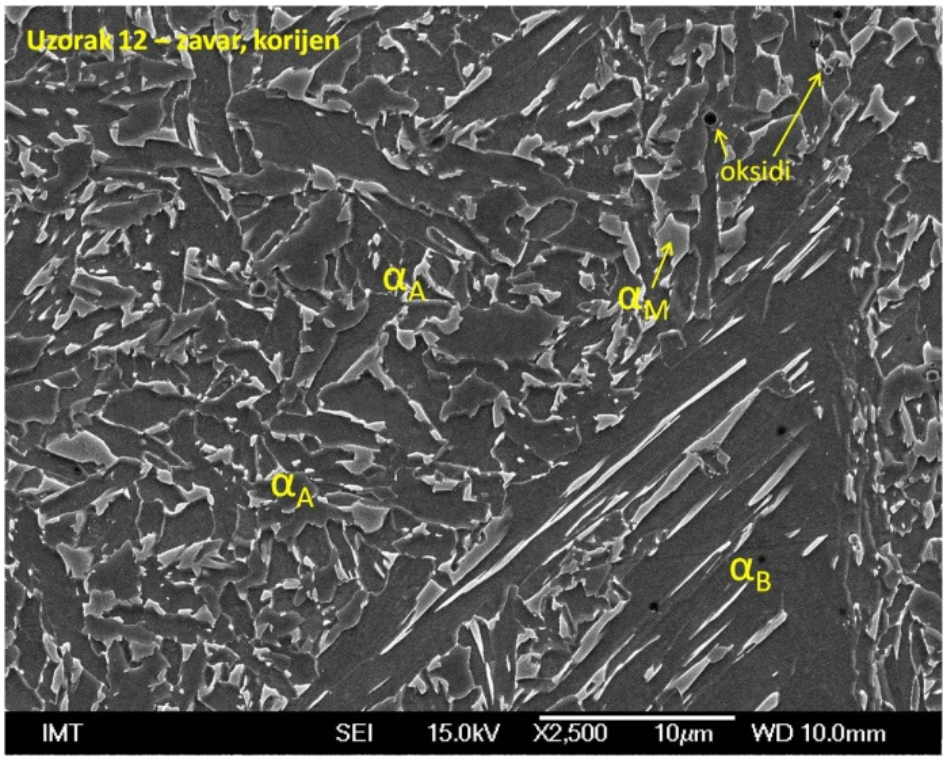
b)

Slika 75: Mikrostrukture zavara stanja pokusa 11 kod minimalnog unosa topline, Q = 8,64 kJ/cm

a) lice zavara
b) korijen zavara



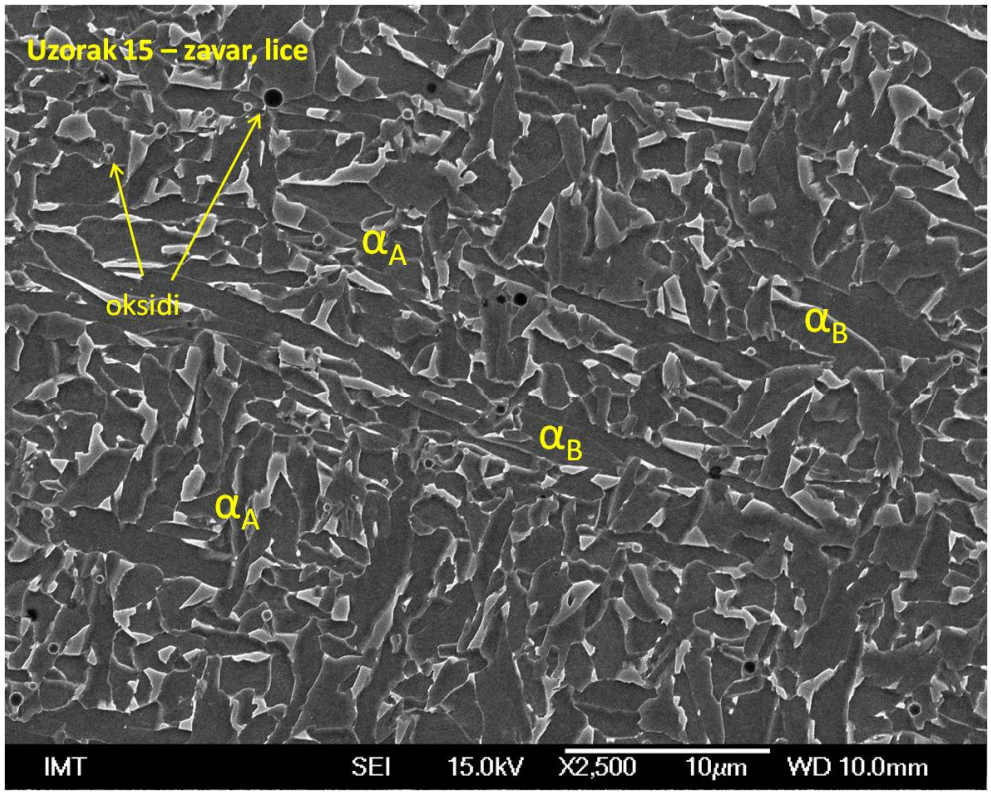
a)



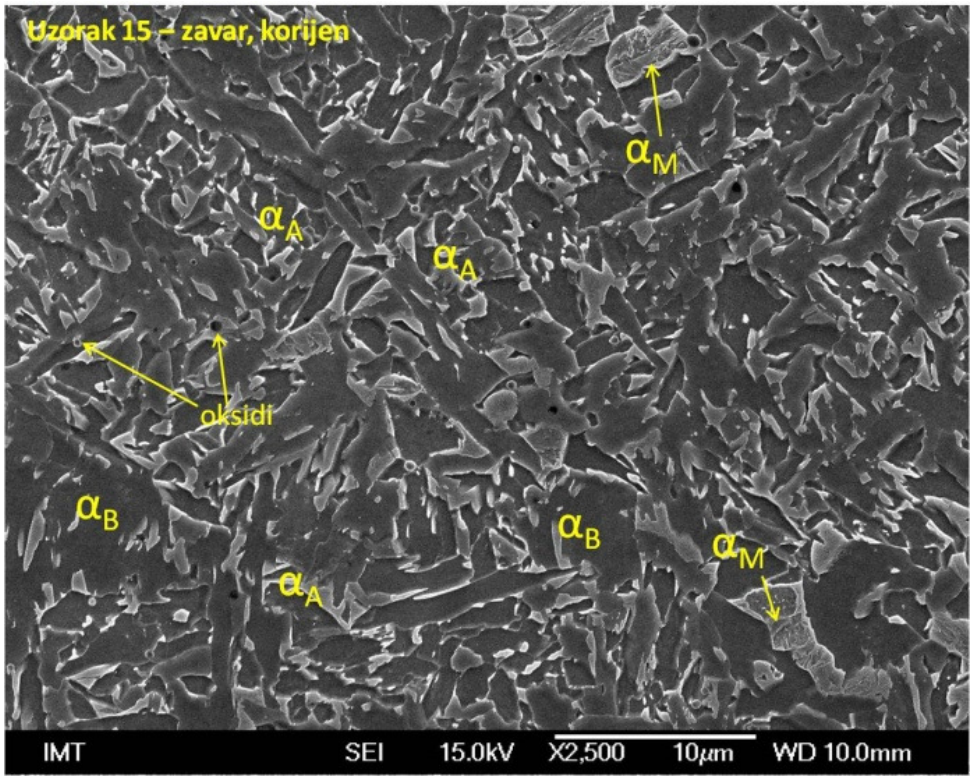
b)

Slika 76: Mikrostrukture zavara stanja pokusa 12 kod maksimalnog unosa topline, Q = 15,36 kJ/cm

c) lice zavara
d) korijen zavara



a)



b)

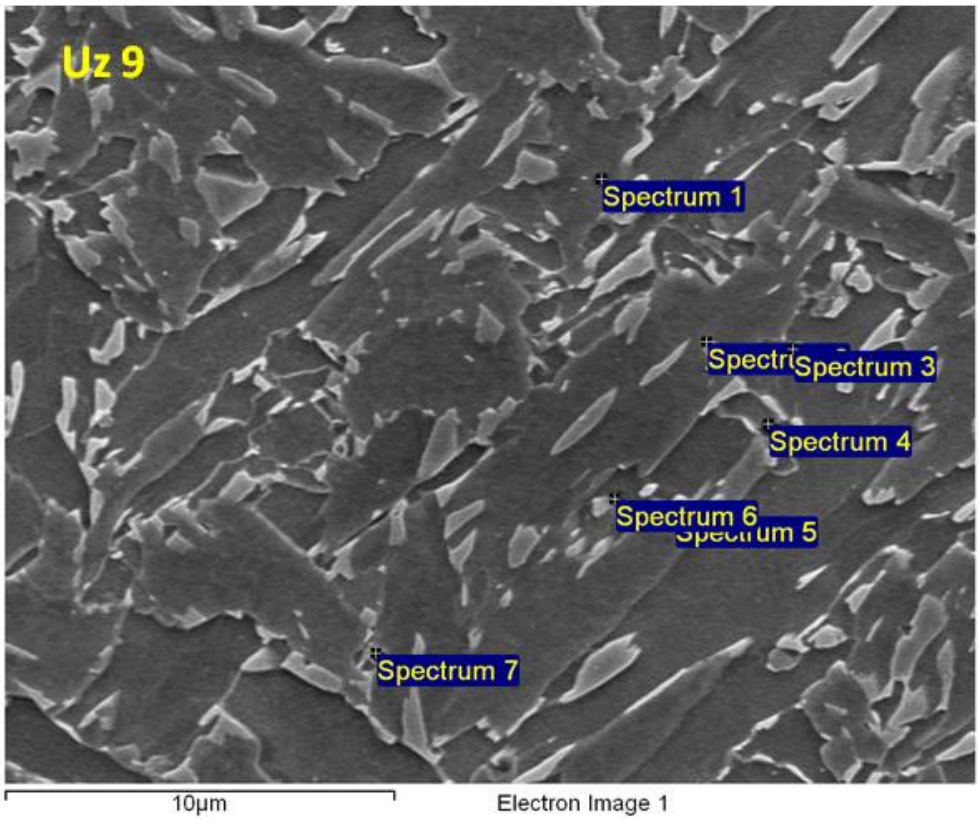
Slika 77: Mikrostruktura zavarenog spoja nultog stanja, stanje pokusa 15

e) lice zavar
f) korijen zavara

4.6.6 EDS analiza

Na Institutu za materijale in tehnologijo u Ljubljani na FE SEM Jeol JSM – 6500F napravljena je mikroanaliza kemijskog sastava, tj. EDS (eng. *Energy Dispersive x-ray Spectroscopy*) analiza strukturnih konstituenata uzoraka s minimalnim i maksimalnim udjelom CO_2 u Ar (stanja pokusa 9 i 10) te referentnog, nultog stanja, stanje pokusa 15. Na slikama 78, 79 i 80 prikazane su mikrostrukture zavara na kojima je provedena EDS analiza radi utvrđivanja prisutnih kemijskih elemenata u uključcima koji su uočeni u zavarima kod svih ispitivanih uzoraka. U tablicama 13, 14 i 15 prikazani su maseni udjeli prisutnih kemijskih elemenata na pojedinim ispitnim mjestima.

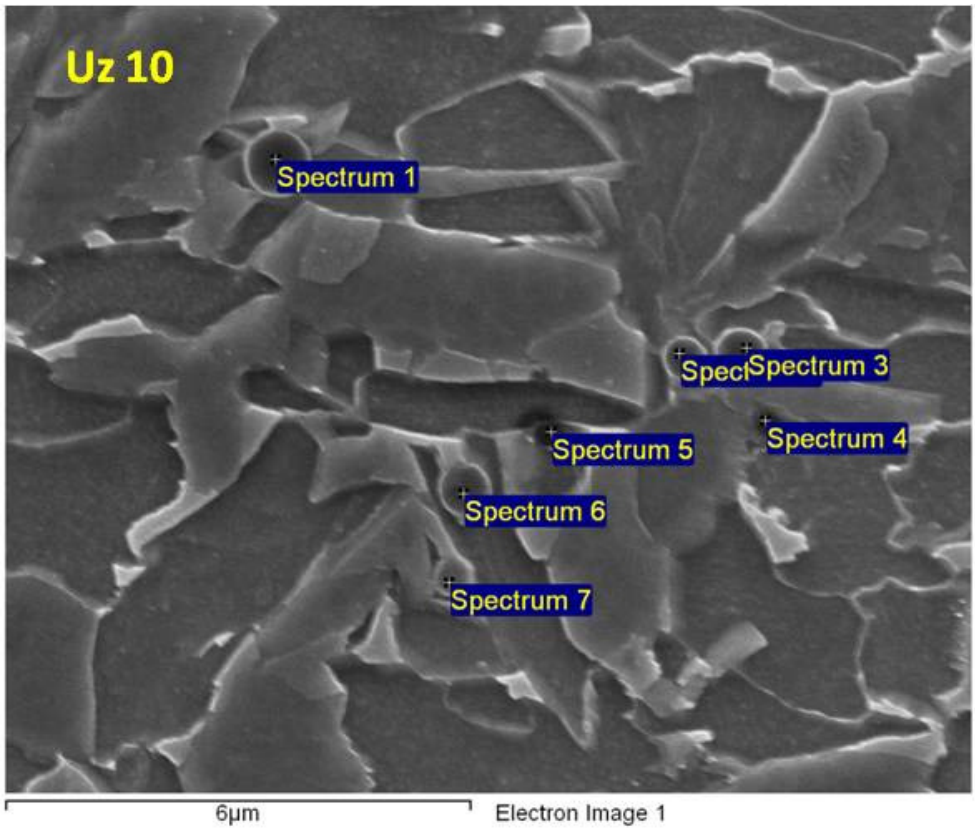
Važno je napomenuti da kvantitativne vrijednosti udjela elemenata dobivene EDS analizom ovise i o nizu drugih parametara koji nisu direktno povezani s kemijskim sastavom uzorka kao što su priprema uzoraka, oprema na kojoj se analiza provodi te parametri analize. Stoga se dobivene kvantitativne vrijednosti ne mogu koristiti za apsolutne usporedbe kemijskog sastava uzoraka s literaturnim izvorima, već za međusobne odnosno relativne usporedbe na pojedinim mjestima analiza.



Slika 78: Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 9, stanje s minimalnim udjelom CO_2 u zaštitnom plinu

Tablica 13: Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 9 na prikazanim ispitnim mjestima

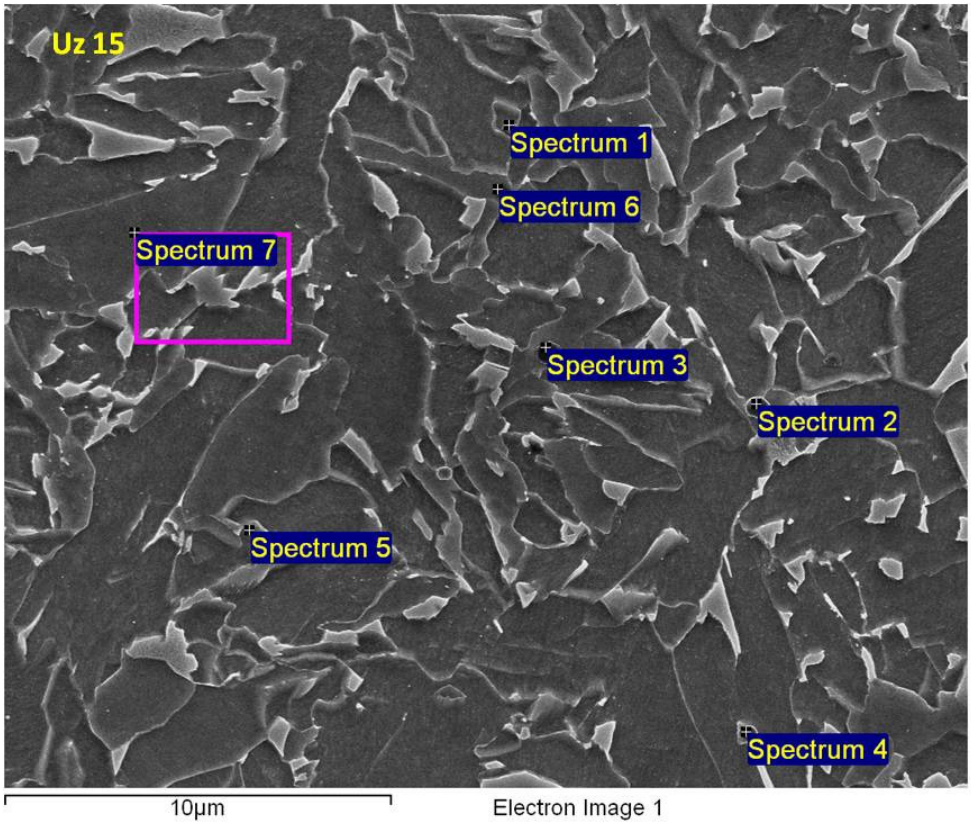
Spektar	C %	O %	Al %	Si %	S %	Cr %	Mn %	Fe %	Ukupno %
Spektar 1		4,48		2,78	1,29	0,76	7,82	82,86	100,00
Spektar 2	1,86			2,00			3,29	92,85	100,00
Spektar 3	1,94			0,61		0,70	1,90	94,85	100,00
Spektar 4		11,26	1,08	5,05			10,43	72,17	100,00
Spektar 5		8,72	0,81	4,08			8,10	78,28	100,00
Spektar 6		7,63		3,17	3,57		13,83	71,80	100,00
Spektar 7		9,32	1,01	3,59			8,05	78,02	100,00
Max.	1,94	11,26	1,08	5,05	3,57	0,76	13,83	94,85	
Min.	1,86	4,48	0,81	0,61	1,29	0,70	1,90	70,21	



Slika 79: Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 10, stanje s maksimalnim udjelom CO_2 u zaštitnom plinu

Tablica 14: Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 10 na prikazanim ispitnim mjestima

Spektar	C %	O %	Al %	Si %	S %	Cr %	Mn %	Fe %	Ukupno %
Spektar 1		13,92		5,86			13,19	67,03	100,00
Spektar 2		12,53		5,30			10,05	72,11	100,00
Spektar 3		12,09		5,19	1,07	0,65	11,46	69,53	100,00
Spektar 4		9,02		4,36	1,66		13,20	71,76	100,00
Spektar 5		11,34	0,45	5,82	1,39		19,08	61,92	100,00
Spektar 6		13,05	0,45	5,27	1,56	0,80	14,76	64,11	100,00
Spektar 7	1,69	6,21		2,61			6,46	83,03	100,00
Max.	1,69	13,92	0,45	5,86	1,66	0,80	19,08	83,03	
Min.	1,69	6,21	0,45	2,61	1,07	0,65	6,46	61,92	



Slika 80: Ispitna mjesta EDS analize provedene na uzorku stanja pokusa 15, stanje pokusa s referentnim razinama parametra zavarivanja za sva tri faktora

Tablica 15: Kemijski sastav dobiven EDS analizom uzorka stanja pokusa 15 na prikazanim ispitnim mjestima

Spektar	C %	O %	Al %	Si %	S %	Mn %	Fe %	Ukupno %
Spektar 1		7,79	0,77	3,50	3,30	13,21	71,43	100,00
Spektar 2		13,25	1,07	5,57	0,77	12,41	66,94	100,00
Spektar 3		15,59	2,00	6,29	1,46	14,33	60,33	100,00
Spektar 4		8,17	0,55	3,42	4,21	13,91	69,75	100,00
Spektar 5						1,59	98,41	100,00
Spektar 6	1,48	5,96	0,47	3,17	2,88	15,93	70,11	100,00
Spektar 7	1,57			0,68			97,75	100,00
Max.	1,57	15,59	2,00	6,29	4,21	15,93	98,41	
Min.	1,48	5,96	0,47	0,68	0,77	1,59	60,33	

5. STATISTIČKA ANALIZA

Rezultati dobiveni eksperimentalnim ispitivanjima statistički su obrađeni pomoću računalnog programa Design Expert 7, te su izrađeni modeli za opisivanje utjecaja ulaznih faktora na mjerenu veličinu. Prikladnost dobivenih modela utvrđena je pomoću F-testa kao i pomoću maksimalne vrijednosti koeficijenta determinacije tj. prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Značajnost modela i članova odzivnog polinoma određena je analizom varijance (”ANOVA”) [79].

Veličine korištene za analizu i vrednovanje kvalitete izrađenih matematičkih modela su:

- Koeficijent determinacije *(R-Squared)* - predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka objašnjenih pomoću modela odnosno mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je vrijednost R^2 bliža 1, to model bolje slijedi rezultate dobivene pokusom, odnosno pojava je bolje objašnjena. Izračunava se prema izrazu (9):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{ost}}{SS_{model} + SS_{ost}} \tag{9}$$

gdje je:

R^2 koeficijent determinacije

SS_{ostatka} suma kvadrata ostataka

SS_{model} suma kvadrata modela.

- Prilagođeni koeficijent determinacije (*Adjusted R-Squared)* - koeficijent determinacije prilagođen broju članova modela u odnosu na broj stanja pokusa. Za razliku od koeficijenta determinacije prilagođeni koeficijent determinacije se povećava samo ukoliko nova vrijednost poboljšava model više od očekivanog. Prilagođeni koeficijent determinacije može biti negativan, a uvijek je jednak ili manji od koeficijent determinacije. Izračunava se prema izrazu:

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\left(\frac{SS_{ost}}{df_{ost}}\right) / \left(\frac{SS_{ost} + SS_{\text{model}}}{df_{ost} + df_{\text{model}}}\right) \right] \tag{10}$$

gdje je:

R^2_{adj} prilagođeni koeficijent determinacije

SS_{ost} suma kvadrata ostataka

SS_{model} suma kvadrata modela

df_{ost} stupnjevi slobode ostataka

df_{model} stupnjevi slobode modela.

- Predviđeni koeficijent determinacije (*Predicted R-Squared*) - mjera iznosa varijacija u novim podacima objašnjenim pomoću modela. Vrijednosti predviđenog i prilagođenog koeficijent determinacije trebale bi biti blizu vrijednosti 1. Ukoliko jesu, onda je 100 % varijacije promatranih vrijednosti objašnjeno modelom. Ukoliko je Prilagođeni koeficijent determinacije veći od 75 %, model se može smatrati značajnim 80]. Izračunava se prema izrazu:

$$R^2_{pred} = 1 - \left(\frac{PRESS}{SS_{ost} + SS_{model}}\right) \tag{11}$$

gdje je:

R^2_{pred} predviđeni koeficijent determinacije

$PRESS$ predviđena suma kvadrata ostataka

SS_{ost} suma kvadrata ostataka

SS_{model} suma kvadrata modela.

Predviđena suma kvadrata ostatka izračunava se prema:

$$PRESS = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}}\right)^2 \tag{12}$$

gdje je:

$PRESS$ predviđena suma kvadrata ostataka

e_i ostatak – razlika između izračunate i stvarne vrijednosti

h_{ii} utjecaj na model.

- Utjecaj na model (Leverage) – ima vrijednosti u području od 0 do 1 i pokazuje koliko pojedino stanje plana pokusa utječe na predviđene vrijednosti modela. Ukoliko model prolazi kroz pojedinu točku pokusa, vrijednost ostatka u toj točki jednaka je nuli i točka kontrolira model. Ta se pojava naziva *utjecaj na model* i u navedenom slučaju jednaka je jedinici. Visoki iznos vrijednosti utjecaja na model je nepovoljan. Ako postoji neočekivana greška mjerenja u takvoj točki, ta greška snažno utječe na model.

5.1 ANALIZA UDARNOG RADA LOMA METALA ZAVARA

U tablici 16 prikazani su rezultati udarnog rada loma metala zavara dobiveni u eksperimentalnom dijelu ispitivanja za pojedino stanje pokusa uz pripadajuće faktore pokusa.

Tablica 16: Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene udarnog rada loma metala zavara

Stanje pokusa	Udio CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperature predgrijavanja ϑ, ^{O}C	Udarni rad loma metala zavara KV, J
1	12	10	45	142,7
2	24	10	45	122,1
3	12	14	45	120,7
4	24	14	45	104,1
5	12	10	115	140,0
6	24	10	115	126,1
7	12	14	115	152,4
8	24	14	115	119,5
9	8	12	80	157,7
10	28	12	80	117,7
11	18	8,64	80	135,6
12	18	15,36	80	123,0
13	18	12	20	114,4
14	18	12	140	132,2
15	18	12	80	114,2
16	18	12	80	117,1
17	18	12	80	125,0

U svrhu dobivanja matematičkog modela za opis utjecaja parametara zavarivanja na udarni rad loma metala zavara, odnosno modela kojim će se ovisno o ulaznim tehnološkim parametrima moći izračunati i predvidjeti udarni rad loma metala zavara potrebno je statistički obraditi rezultate dobivene eksperimentalnim putem. Analiza varijance pokazala je da se ovisnost udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja najbolje može opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom. Navedena analiza varijance prikazana je tablicom 17.

Tablica 17: Analize varijance rezultata udarnog rada loma metala zavara za upotrijebljeni reducirani kvadratni matematički model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja *SS*	Stupnjevi slobode df	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla *F*	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 *P*	Značajnost
Model	3066,462	6	511,0770	24,55112	< 0,0001	značajan
A	1675,578	1	1675,578	80,49146	< 0,0001	značajan
B	224,6577	1	224,6577	10,79211	0,0082	značajan
C	449,3359	1	449,3359	21,58520	0,0009	značajan
BC	262,2050	1	262,2050	12,59581	0,0053	značajan
A^2	423,3904	1	423,3904	20,33884	0,0011	značajan
B^2	102,8014	1	102,8014	4,93837	0,0505	značajan*
Ostatak	208,1685	10	20,81685			
Odstupanje od modela	145,6818	8	18,21023	0,58285	0,7601	neznačajan
Čista pogreška	62,48667	2	31,24333			
Ukupno	3274,631	16				

A - udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %

B - unos topline, *Q*, kJ/cm

C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

* Vrijednost B^2 nije odbačena iako je vrijednosti rizik odbacivanja hipoteze H_0 veći od 0,05 (u ovom slučaju to je 0,0505), jer se nije željelo odbaciti član s *P* vrijednosti gotovo na granici značajnosti na model.

Kod linearnog modela pojavljuju se samo članovi nultog reda, faktori i članovi prvog reda te njihove interakcije. Kod modela viših redova pojavljuju se još interakcije viših redova, koje u tehničkim sustavima mogu imati zanemariv utjecaj, zbog čega je izvršena redukcija izrađenog modela natražnom metodom.

Redukcija modela je provedena eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost "Prob > F" je veća od 0,05. Model sačinjavaju svi članovi čija je vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 ("Prob > F") manja od 0,05.
Redukcijom modela eliminacijom unatrag svi članovi imaju mogućnost uključivanja, te je dobiveni model znatno robusniji od pristupa uključivanjem unaprijed.

Analiza rezultata pokazala je da utjecajnost modela postoji, tj. da postoji dio varijabilnosti funkcijskih veličina kojima se može opisati dobivene vrijednosti udarnog rada loma metala zavara u ovisnosti od ispitivanih faktora.
F-vrijednost modela od 24,55112 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi manje od 0.01%. Svi članovi čija je *P*-vrijednost manja od 0,05 čine matematički model jer se smatraju značajnima na temelju testirane hipoteze. [79] Pomoću *P* vrijednosti ispituje se hipoteze H_0 prema alternativnoj hipotezi H_1. *P* vrijednost pokazuje vjerojatnost postizanja *F* vrijednosti ako se prihvati H_0, tj. ako nema utjecaja faktora. Male *P* vrijednosti upućuju na odbacivanje H_0 i prihvaćanje alternativne hipoteze H_1, tj. ukazuju da postoji značajan utjecaj parametra na promatranu izlaznu veličinu (ispitivano svojstvo). Vjerojatnost odgovara površini ispod krivulje *F*-razdiobe koja je određena pripadajućom *F* vrijednosti. *P* vrijednost je najniža razina signifikantnosti koja rezultira odbacivanjem H_0.
Članovi čija *P* vrijednost iznosi više od 0,1 ne smatraju se značajnima. U području vrijednosti *P* između 0,05 i 0,1 nalazi se ˝siva zona˝ gdje se može dogoditi da se preoštrim kriterijem odbaci član koji ima stanoviti utjecaj.

Vrijednost *P* manja od 0,05 za pojedine članove predloženog matematičkog modela ukazuje u prilog značajnosti njihovog utjecaja na model. Nakon analize varijance, u ovom modelu su se faktori *A*, *B* i *C*, te njihove interakcije *BC*, A^2 i B^2 pokazali značajnim. Analiza varijance pokazuje značajan utjecaj faktora *A* i *C*, te A^2. To potvrđuje utjecajnost udjela CO_2 u zaštitnom plinu i temperature predgrijavanja na udarni rad loma metala zavara.

F - vrijednost veličine odstupanja od modela u iznosu od 0,58 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu pogrešku. Postoji vjerojatnost od 76 % da *F* - vrijednost veličine odstupanja od modela nastaje zbog šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model se može prihvatiti.

Redukcijom modela, odnosno izbacivanjem većeg broja neznačajnih članova iz modela, može doći do njegovog poboljšanja koje je određeno vrijednostima prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Prilagođena vrijednost koeficijenta determinacije definira iznos varijacije oko srednje vrijednosti objašnjene modelom, te uzima u obzir broj članova u matematičkom modelu u odnosu na broj stanja u planu pokusa. Predviđena vrijednost koeficijenta determinacije je mjera iznosa varijacija novih podataka objašnjenih u modelu. Razlika između te dvije vrijednosti mora biti manja od 0,2 [79]. Ako je razlika znatno veća, postoji sumnja u vjerodostojnost podataka ili izrađenog matematičkog modela.

U tablici 18 prikazani su osnovni statistički podaci izrađenog reduciranog kvadratnog matematičkog modela.

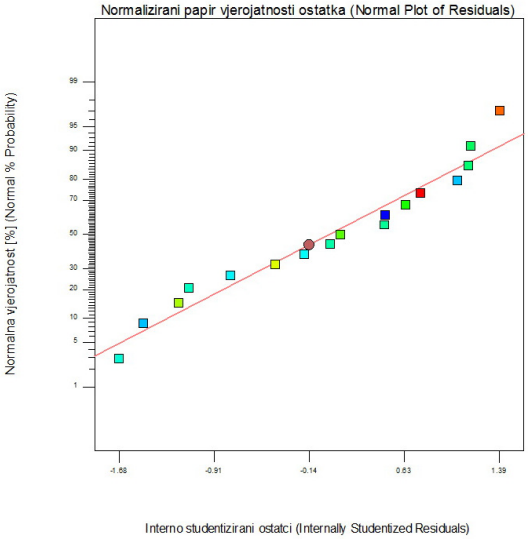
Tablica 18: Pregled statističkih podataka o modelu

Standardna devijacija	4,562548
Aritmetička sredina	127,3235
Koeficijent varijacije %	3,583429
Predviđena suma kvadrata ostatka	523,8519
R^2 – koeficijent determinacije	0,936430
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,898288
R_{pred}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,840027
Adekvatna preciznost	18,11714

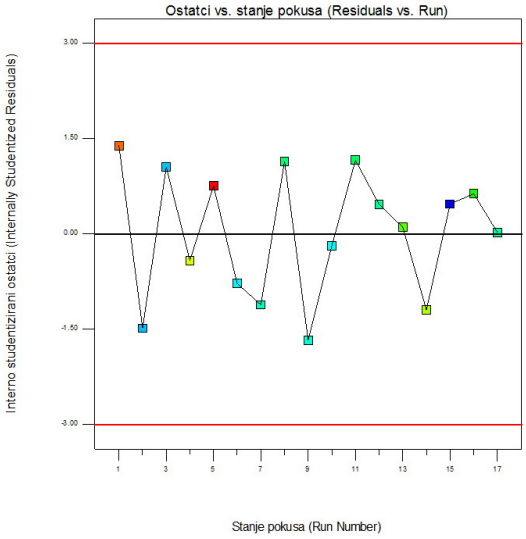
Udio odstupanja sume kvadrata ukupne pogreške i sume kvadrata čitavog modela (pogreška odstupanja modela) [82] iznosi 6,36%. Podatak o udjelu varijabilnosti modela za udarni rad loma metala zavara se interpretira koeficijentom determinacije, koji ovdje iznosi 0,9364. Stoga je potvrđen udjel od 93,64% varijabilnosti rezultata udarnog rada loma i objašnjiv s ispitnim faktorima.

Vrijednost R^2 (koeficijent determinacije) raste dodavanjem pojedinog faktora ili njihove interakcije u model, bez obzira na utjecaj pojedinog od njih.
Za razliku od toga, vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) se smanjuje dodavanjem faktora koji ne utječu na model, pa se njime može odrediti koliko utjecajnih faktora je uzeto u model. Zbog toga je vrijednost R_{adj}^2 uvijek manja od R^2.
Vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) od 0,898 ukazuje nam da su utjecajni faktori dobro odabrani odnosno da je 89,9% modela objašnjivo odabranim faktorima i njihovim interakcijama. Ta je vrijednost usklađena s vrijednošću R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) koja iznosi 0,84. Vrijednost R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) pokazuje koliko je podataka dobivenih eksperimentom moguće objasniti predviđajućim modelom, što u ovom slučaju iznosi 84%. Stoga je takav rezultat primjenjiv za okvirno predviđanje udarnog rada loma metala zavara.

Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a poželjna vrijednost je 4 ili više. Obzirom da je u ovom slučaju taj omjer 18,117, zaključeno je da postoji primjeren signal te se stoga ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.
Normalnost izmjerenih vrijednosti za pojedina stanja pokusa ispituje se normaliziranim papirom vjerojatnosti ostataka. Dijagram na slici 81 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa za rezultate udarnog rada loma metala zavara.
Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva će ukazati na problem ukoliko postoji neki obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva. Papir vjerojatnosti ostataka većinom je raspodijeljen po normalnoj razdiobi uz odstupanja na gornjem dijelu grafa, pa je vjerojatnost pojave takvih slučajeva relativno mala.



Slika 81: Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate udarnog rada loma metala zavara



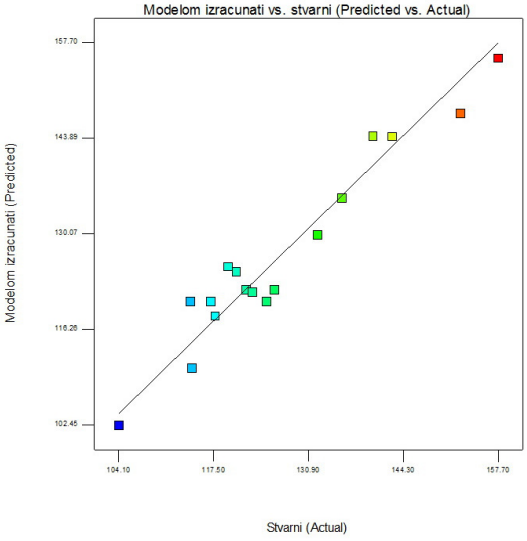
Slika 82: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma metala zavara

Postojanje sustavne pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom provođenja eksperimenta provjerava se dijagramom ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Provjera ostataka pokazuje da ne postoji ostatak koji prelazi postavljene granice vjerojatnosti. Niti jedan podatak ne prelazi granicu od ± 3,00 te su stoga svi uključeni u opisivanje modela.

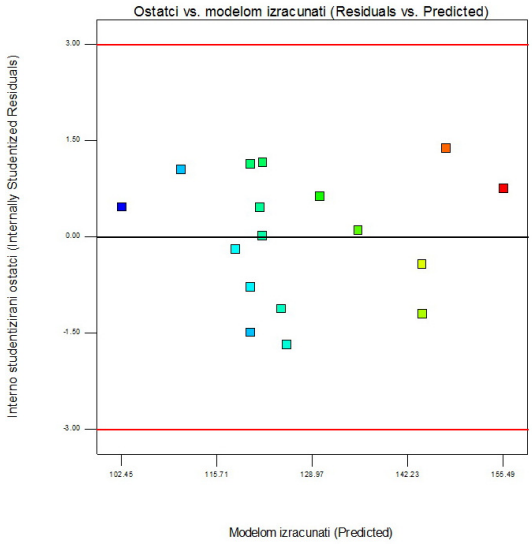
Dijagram na slici 82 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma metala zavara. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška u pozadini jer nije moguće raspoznati pravilnu strukturu dijagrama.

Dijagram na slici 83 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma metala zavara. Vidljivo je da se vrijednosti dobro podudaraju.

Dijagram na slici 84 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma metala zavara. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška.



Slika 83: Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate udarnog rada loma metala zavara



Slika 84: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma metala zavara

Nakon provedenog eksperimenta prema centralno kompozitnom planu pokusa s tri numerička faktora, mjerenja dobivenih vrijednosti udarnog rada loma i obradi dobivenih rezultata, dobiven je matematički model koji opisuje vrijednosti udarnog rada loma metala zavara u ovisnosti o ulaznim faktorima.

Završni matematički model s kodiranim faktorima iznosi:

$$KV_{MZ} = 120{,}3 - 11{,}08\,A - 4{,}06\,B + 5{,}74\,C + 5{,}72\,BC + 5{,}85\,A^2 + 2{,}88\,B^2 \qquad (13)$$

Matematički model s kodiranim faktorima se prevodi u model sa stvarnim faktorima prema izrazu (14).

Završni matematički model sa stvarnim faktorima:

$$KV_{MZ} = 399{,}82387 - 7{,}70093\,A - 25{,}8807\,B - 0{,}81754\,C + 0{,}081786\,BC + 0{,}16236\,A^2 + 0{,}72125\,B^2 \qquad (14)$$

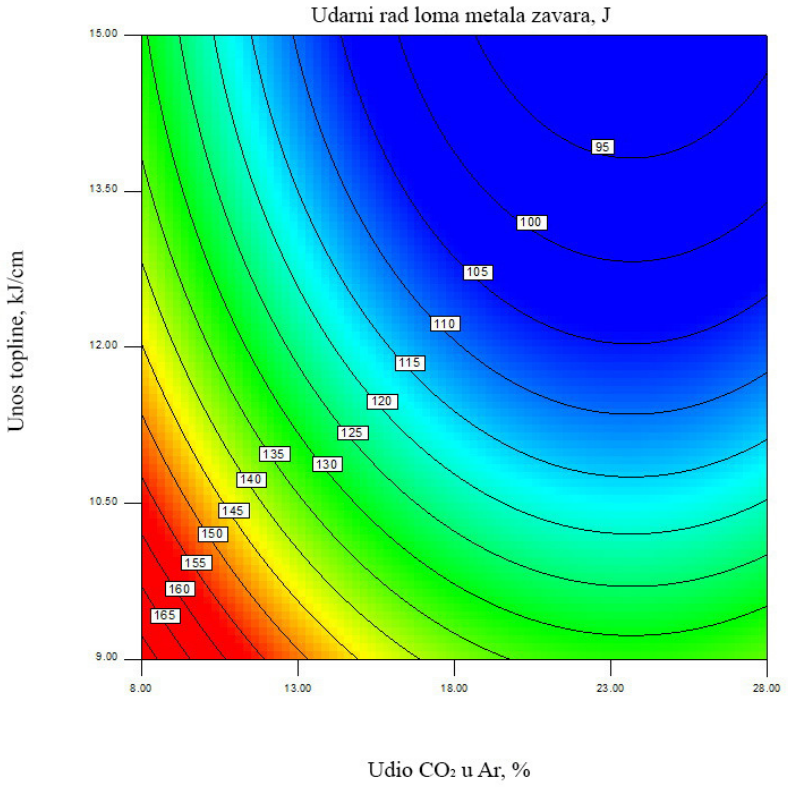
gdje je:

A - udio CO2 u zaštitnom plinu Ar, %

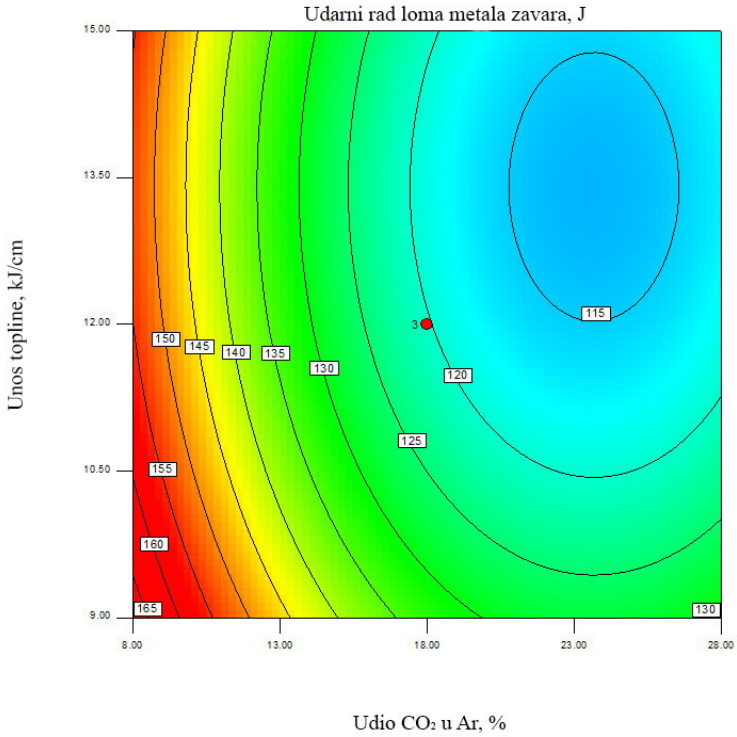
B - unos topline, Q, J/cm

C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

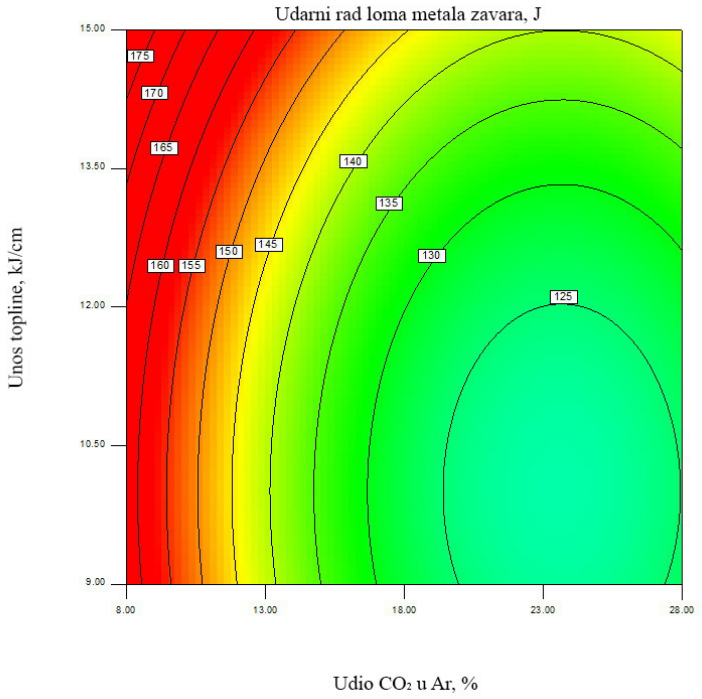
Na slikama 85, 86 i 87 su prikazani konturni prikazi matematičkog modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o udjelu CO_2 u Ar i unosu topline u zavar, a slike 88, 89 i 90 prikazuju 3D odzivne površine navedenog matematičkog modela. Kako bi se moglo grafički prikazati ovisnost udarnog rada loma metala zavara o parametrima procesa, faktor *C* (temperatura predgrijavanja) je na navedenim dijagramima konstantan, i prikazan je za najmanju, srednju i najveću ispitivanu vrijednost. Taj je faktor izabran kao konstantan jer je iz dobivenog matematičkog modela vidljivo da on najmanje utječe na udarni rad loma metala zavara.



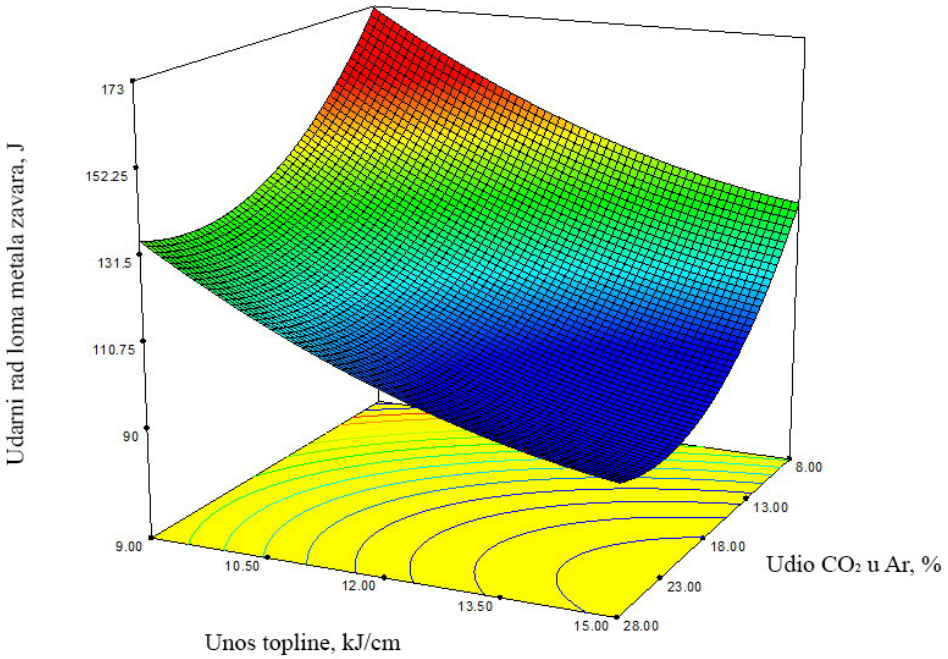
Slika 85: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 20$ °C



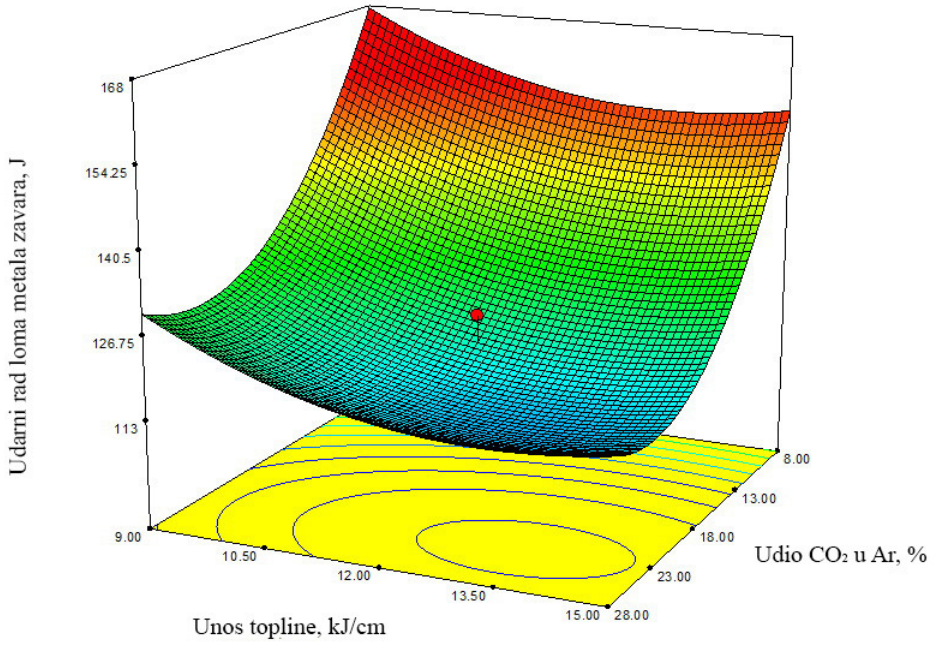
Slika 86: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C



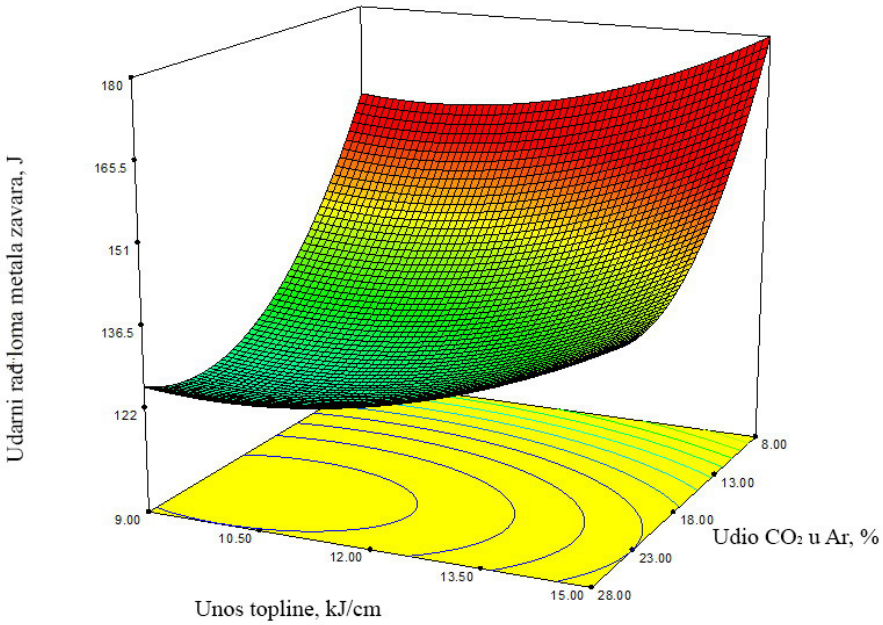
Slika 87: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C



Slika 88: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 20$ °C



Slika 89: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala zavara o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 80$ °C



Slika 90: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma metala o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 140$ °C

Nakon provedene analize vidljivo je da se pri temperaturi predgrijavanja od 20 °C najveće vrijednosti udarnog rada loma metala zavara postižu s parametrima zavarivanja kod kojih su korištene niske vrijednosti unosa topline i malog postotka CO_2 u zaštitnom plinu. Kod pokusa provedenih s većim vrijednostima temperature predgrijavanja uočljivo je da se najveće vrijednosti udarnog rada loma metala zavara postižu s parametrima zavarivanja kod kojih su korišteni niski postotka CO_2 u zaštitnom plinu, dok količina unesene topline ne utječe znatno na dobivene rezultate. Štoviše, najveće vrijednosti udarnog rada loma metala zavara postižu se s većim vrijednostima unosa topline ($Q = 15$ J/cm).

5.2 ANALIZA UDARNOG RADA LOMA ZUT-a

Vrijednosti faktora i rezultata udarnog rada loma zone utjecaja topline dobivenih u eksperimentalnom dijelu prikazani su u Tablici 19.

Tablica 19: Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene udarnog rada loma ZUT-a

Stanje pokusa	Udio CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperature predgrijavanja ϑ, ^{O}C	Udarni rad loma ZUT-a KV, J
1	12	10	45	308,6
2	24	10	45	275,0
3	12	14	45	265,5
4	24	14	45	226,4
5	12	10	115	326,0
6	24	10	115	285,7
7	12	14	115	317,1
8	24	14	115	252,3
9	8	12	80	318,4
10	28	12	80	235,9
11	18	8,64	80	282,0
12	18	15,36	80	245,8
13	18	12	20	277,4
14	18	12	140	306,6
15	18	12	80	262,7
16	18	12	80	266,4
17	18	12	80	259,4

Nakon provedene analize varijance ustanovljeno je da se ovisnost udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja najbolje može opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom. Navedena analiza varijance prikazana je tablicom 20.

Tablica 20: Analize varijance rezultata udarnog rada loma ZUT-a za upotrijebljeni reducirani kvadratni matematički model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja *SS*	Stupnjevi slobode df	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla *F*	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 *P*	Značajnost
Model	13723	6	2287,167	40,04054	< 0,0001	značajan
A	7337,164	1	7337,164	128,4489	< 0,0001	značajan
B	2780,916	1	2780,916	48,68441	< 0,0001	značajan
C	1752,576	1	1752,576	30,68166	0,0002	značajan
BC	305,0450	1	305,0450	5,340304	0,0434	značajan
A^2	373,1304	1	373,1304	6,532248	0,0286	značajan
C^2	1426,447	1	1426,447	24,97225	0,0005	značajan
Ostatak	571,2128	10	57,12128			
Odstupanje od modela	546,6862	8	68,33577	5,572365	0,1610	neznačajan
Čista pogreška	24,52667	2	12,26333			
Ukupno	14294,22	16				

A - udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %
B - unos topline, *Q*, kJ/cm
C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

U modelu se pojavljuju članovi nultog reda, faktori i članovi prvog reda te njihove interakcije. Kod modela viših redova pojavljuju se još interakcije viših redova, koje u tehničkim sustavima mogu imati zanemariv utjecaj. Iz tog razloga provedena je redukcija izrađenog modela natražnom metodom.

Redukcija modela je provedena eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost ”Prob > F” je veća od 0,05. Model sačinjavaju svi članovi čija je vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 (”Prob > F”) manja od 0,05.

Analiza je pokazala da utjecajnost modela postoji, tj. da postoji dio varijabilnosti funkcijskih veličina kojima se može opisati dobivene vrijednosti udarnog rada loma ZUT-a u ovisnosti od ispitivanih faktora.

F-vrijednost modela od 40,04054 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi manje od 0.01%. Svi članovi čija je *P*-vrijednost manja od 0,05 čine matematički model jer se smatraju značajnima na temelju testirane hipoteze [79].

Članovi čija *P* vrijednost iznosi više od 0,1 ne smatraju se značajnima. U području vrijednosti *P* između 0,05 i 0,1 nalazi se ˝siva zona˝ gdje se može dogoditi da se preoštrim kriterijem odbaci član koji ima stanoviti utjecaj.

Nakon analize varijance, u ovom modelu su se faktori *A*, *B* i *C*, te njihove interakcije *BC*, A^2 i B^2 pokazali značajnim. Analiziranjem se može uočiti veliki utjecaj faktora *A*, *B* i *C*, te C^2. To potvrđuje utjecajnost udjela CO_2 u zaštitnom plinu i temperature predgrijavanja na udarni rad loma ZUT-a.

F - vrijednost veličine odstupanje od modela od 5,57 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu pogrešku. Postoji vjerojatnost od 16 % da *F* - vrijednost veličine odstupanje od modela nastaje zbog šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model se može prihvatiti.

Redukcijom modela, odnosno izbacivanjem većeg broja neznačajnih članova iz modela, može doći do njegovog poboljšanja koje je određeno vrijednostima prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Prilagođena vrijednost koeficijenta determinacije definira iznos varijacije oko srednje vrijednosti objašnjene modelom, te uzima u obzir broj članova u matematičkom modelu u odnosu na broj stanja u planu pokusa. Predviđena vrijednost koeficijenta determinacije je mjera iznosa varijacija novih podataka objašnjenih u modelu. Razlika između te dvije vrijednosti mora biti manja od 0,2 [79]. Ako je razlika znatno veća, postoji sumnja u vjerodostojnost podataka ili izrađenog matematičkog modela.

U Tablici 21 prikazani su osnovni statistički podaci izrađenog reduciranog kvadratnog matematičkog modela.

Tablica 21: Pregled statističkih podataka o modelu

Standardna devijacija	7,557862
Aritmetička sredina	277,1294
Koeficijent varijacije %	2,727196
Predviđena suma kvadrata ostatka	1824,948
R^2 – koeficijent determinacije	0,960039
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,936062
R_{pred}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,87233
Adekvatna preciznost	20,11497

Udjel odstupanja sume kvadrata ukupne pogreške i sume kvadrata čitavog modela (pogreška odstupanja modela) [82] iznosi 4 %. Podatak o udjelu varijabilnosti modela za udarni rad loma ZUT-a se interpretira koeficijentom determinacije, koji ovdje iznosi 0,96. Stoga je potvrđen udjel od 93,64 % varijabilnosti rezultata udarnog rada loma i objašnjiv s ispitnim faktorima.

Vrijednost R^2 (koeficijent determinacije) raste dodavanjem pojedinog faktora ili njihove interakcije u model, bez obzira na utjecaj pojedinog od njih.

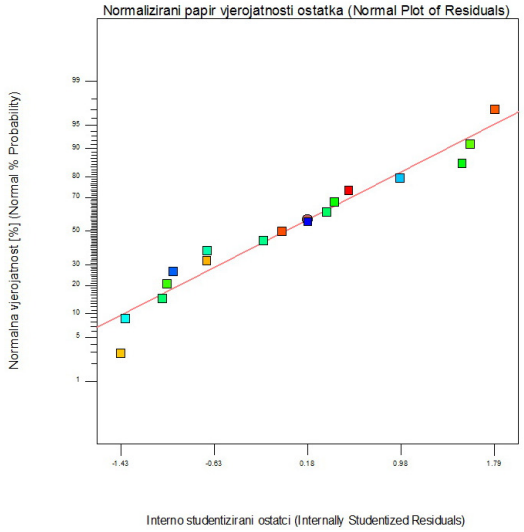
Za razliku od toga, vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) se smanjuje dodavanjem faktora koji ne utječu na model, pa se njime može odrediti koliko utjecajnih faktora je uzeto u model. Zbog toga je vrijednost R_{adj}^2 uvijek manja od R^2.

Vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) od 0,936 ukazuje nam da su utjecajni faktori dobro odabrani odnosno da je 93,6 % modela objašnjivo odabranim faktorima i njihovim interakcijama. Ta je vrijednost usklađena s vrijednošću R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) koja iznosi 0,872. Vrijednost R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) pokazuje koliko je podataka dobivenih eksperimentom moguće objasniti predviđajućim modelom, što u ovom slučaju iznosi 87,2%. Stoga je takav rezultat primjenjiv za okvirno predviđanje udarnog rada loma ZUT-a.

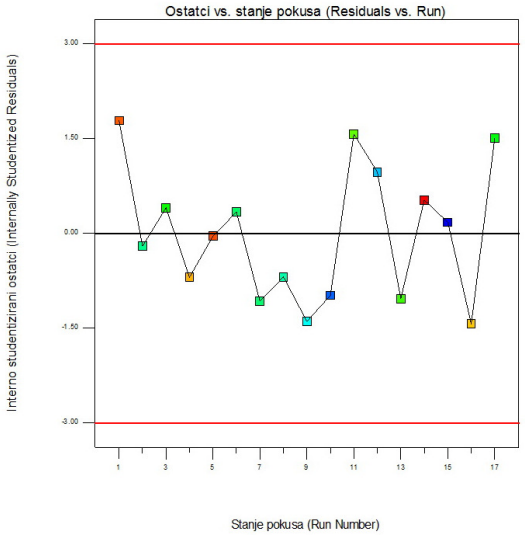
Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a poželjna vrijednost je 4 ili više. Obzirom da je u ovom slučaju taj omjer 20,115, zaključeno je da postoji primjeren signal te se stoga ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Normalnost izmjerenih vrijednosti za pojedina stanja pokusa ispituje se normaliziranim papirom vjerojatnosti ostataka. Dijagram na slici 91 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa za rezultate udarnog rada loma ZUT-a.

Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva će ukazati na problem ukoliko postoji neki obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva. Papir vjerojatnosti ostataka većinom je raspodijeljen po normalnoj razdiobi uz odstupanja na gornjem dijelu grafa, pa je vjerojatnost pojave takvih slučajeva relativno mala.



Slika 91: Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate udarnog rada loma ZUT-a



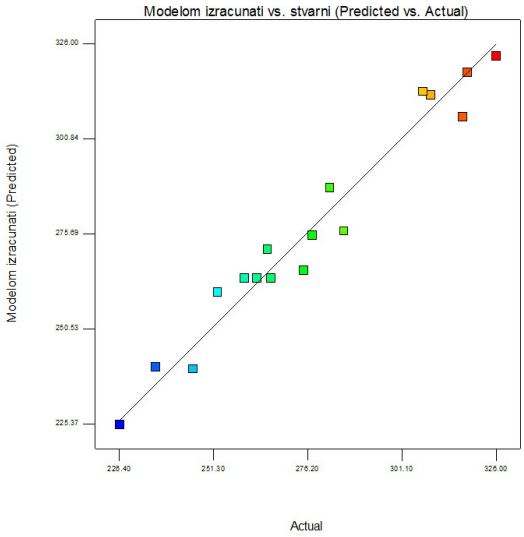
Slika 92: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma ZUT-a

Postojanje sustavne pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom provođenja eksperimenta provjerava se dijagramom ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Provjera ostataka pokazuje da ne postoji ostatak koji prelazi postavljene granice vjerojatnosti. Niti jedan podatak ne prelazi granicu od ± 3,00 te su stoga svi uključeni u opisivanje modela.

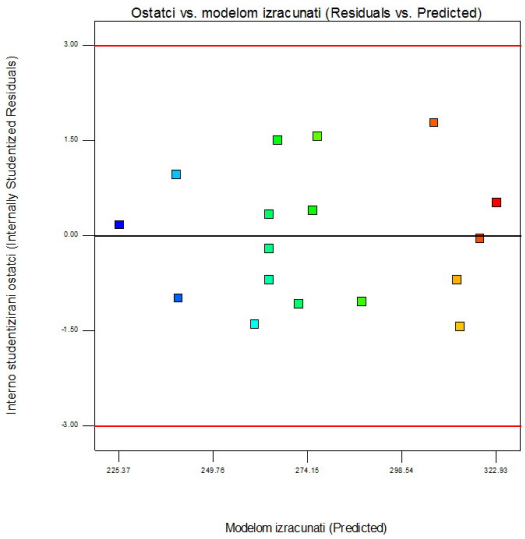
Dijagram na slici 92 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate udarnog rada loma ZUT-a. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška u pozadini jer nije moguće raspoznati pravilnu strukturu dijagrama.

Dijagram na slici 93 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma ZUT-a. Vidljivo je da se vrijednosti dobro podudaraju.

Slika 94 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma ZUT-a. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška.



Slika 93: Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate udarnog rada loma ZUT-a



Slika 94: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate udarnog rada loma ZUT-a

Nakon provedenog eksperimenta prema centralno kompozitnom planu pokusa s tri numerička faktora, mjerenja dobivenih vrijednosti udarnog rada loma i obradi dobivenih rezultata, dobiven je matematički model koji opisuje vrijednosti udarnog rada loma ZUT-a u ovisnosti o ulaznim faktorima.

Završni matematički model s kodiranim faktorima:

$$KV_{ZUT} = 264{,}08 - 23{,}18\,A - 14{,}27\,B + 11{,}33\,C + 6{,}17\,BC + 5{,}5\,A^2 + 10{,}75\,C^2 \quad (15)$$

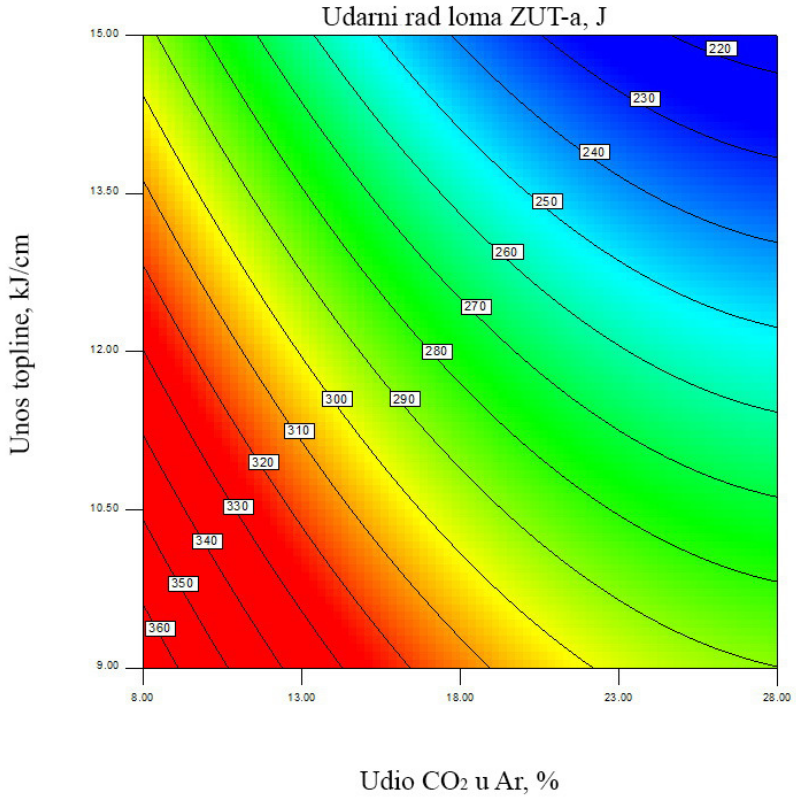
Matematički model s kodiranim faktorima se prevodi u model sa stvarnim faktorima prema izrazu (16).

Završni matematički model sa stvarnim faktorima:

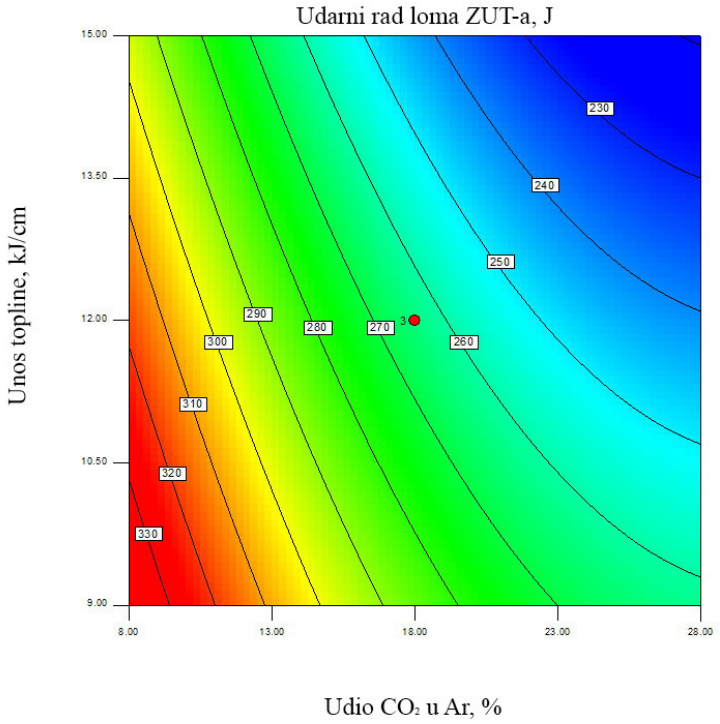
$$KV_{ZUT} = 583{,}64098 - 9{,}35946\,A - 14{,}19205\,B - 2{,}13855\,C + 0{,}088214\,BC + 0{,}15268\,A^2 + 8{,}77275\text{E-}003\,C^2 \quad (16)$$

gdje je:
A - udio CO_2 u zaštitnom plinu, Ar, %
B - unos topline, Q, J/cm
C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

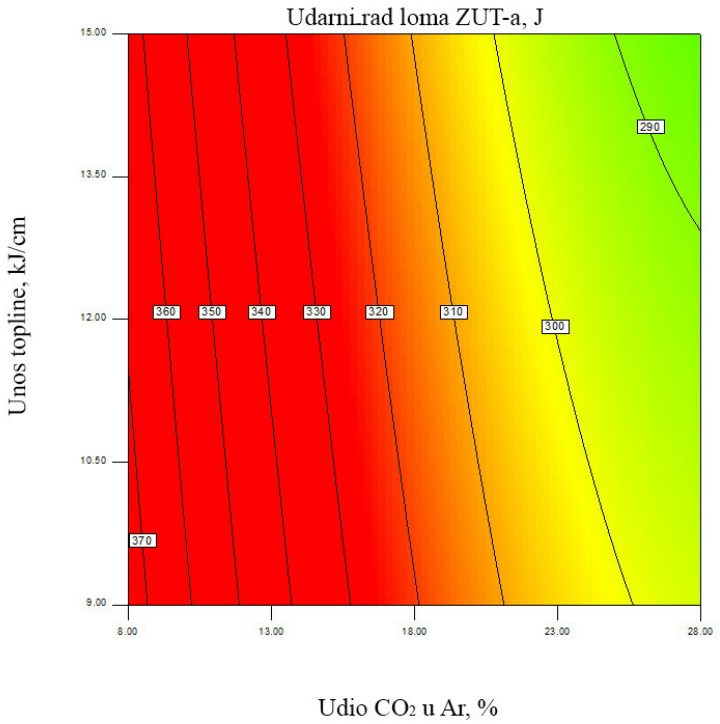
Na slikama 95, 96 i 97 su prikazani konturni prikazi matematičkog modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o udjelu CO_2 u Ar i unosu topline u zavar, a slike 98, 99 i 100 prikazuju 3D odzivne površine navedenog matematičkog modela. Kako bi se moglo grafički prikazati ovisnost udarnog rada loma ZUT-a o parametrima procesa, faktor *C* (temperatura predgrijavanja) je na navedenim dijagramima konstantna, i prikazana je za najmanju, srednju i najveću ispitivanu vrijednost. Taj je faktor izabran kao konstantan jer je iz dobivenog matematičkog modela vidljivo da on najmanje utječe na udarni rad loma ZUT-a.



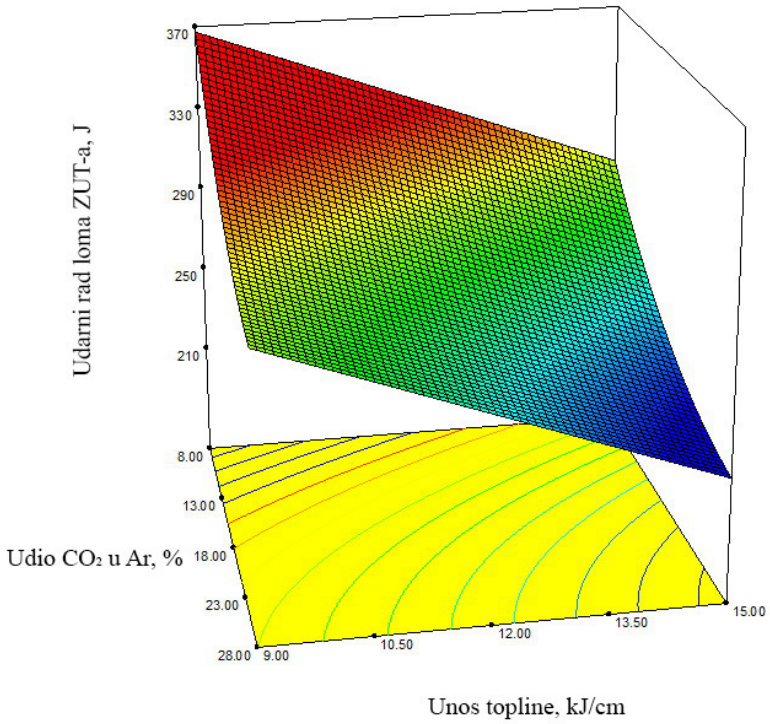
Slika 95: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 20 °C



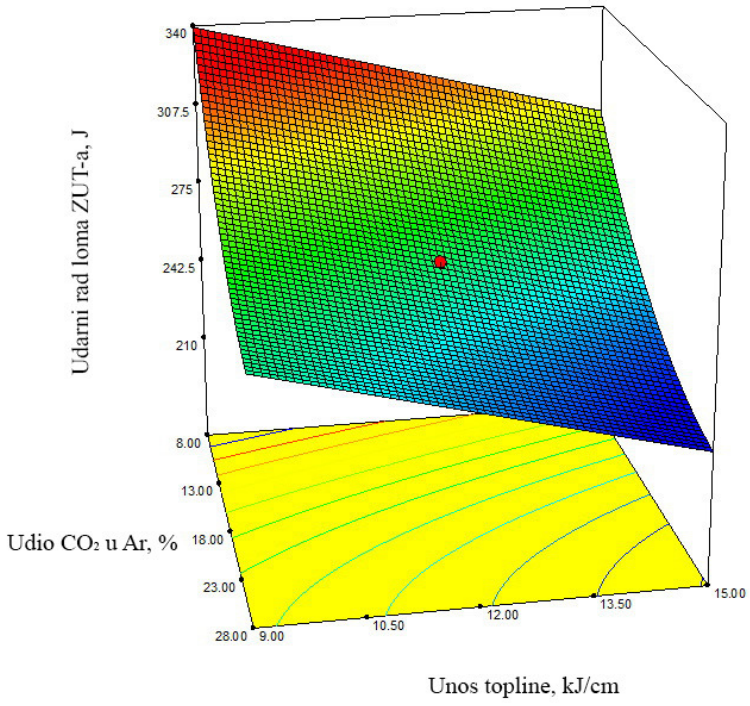
Slika 96: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 80 °C



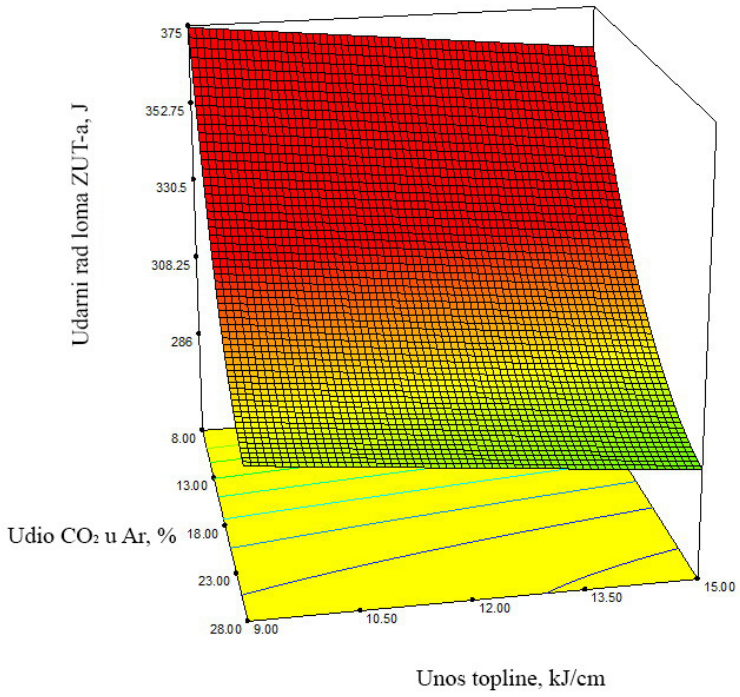
Slika 97: Konturni prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C



Slika 98: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 20$ °C



Slika 99: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz $\vartheta = 80$ °C



Slika 100: 3D prikaz modela ovisnosti udarnog rada loma ZUT-a o parametrima zavarivanja uz ϑ = 140 °C

Analiza pokazuje je da se pri temperaturi predgrijavanja od 20 °C najveće vrijednosti udarnog rada loma ZUT-a postižu s parametrima zavarivanja kod kojih su korištene manje vrijednosti unosa topline i manjeg postotka CO_2 u zaštitnom plinu. Kod pokusa provedenih s većim vrijednostima temperature predgrijavanja (ϑ = 140 °C) uočljivo je da se najveće vrijednosti udarnog rada loma ZUT-a postižu s parametrima zavarivanja kod kojih nisu korišteni veliki postotci CO_2 u zaštitnom plinu, dok količina unesene topline gotovo da ne utječe na dobivene rezultate.

5.3 ANALIZA ŠIRINE ZUT-a

Vrijednosti faktora i rezultata mjerenja širine ZUT-a dobivenih eksperimentalnim putem prikazani su u Tablici 22.

Tablica 22: Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene širine ZUT-a

Stanje pokusa	Udio CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperature predgrijavanja ϑ, ^{O}C	Širina ZUT-a s_{ZUT}, mm
1	12	10	45	1,6090
2	24	10	45	1,7621
3	12	14	45	2,1395
4	24	14	45	1,9592
5	12	10	115	1,9332
6	24	10	115	2,1910
7	12	14	115	2,5777
8	24	14	115	2,2941
9	8	12	80	2,1395
10	28	12	80	2,1163
11	18	8,64	80	1,6662
12	18	15,36	80	2,2427
13	18	12	20	1,7253
14	18	12	140	2,3594
15	18	12	80	2,0621
16	18	12	80	2,0924
17	18	12	80	2,0636

U cilju dobivanja matematičkog modela opisivanje utjecaja parametara zavarivanja na širinu ZUT-a, odnosno modela kojim će se ovisno o ulaznim tehnološkim parametrima moći izračunati (predvidjeti) širinu zone utjecaja topline provedena je analiza varijance koja je pokazala da se ovisnost širine ZUT-a o parametrima zavarivanja najbolje može opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom. Navedena analiza varijance prikazana je tablicom 23.

Tablica 23: Analize varijance rezultata širine ZUT-a za upotrijebljeni reducirani kvadratni matematički model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja *SS*	Stupnjevi slobode df	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla *F*	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 *P*	Značajnost
Model	1,056710	6	0,176118	214,5549	< 0,0001	značajan
A	0,000620	1	0,000620	0,755309	0,4052	neznačajan
B	0,437643	1	0,437643	533,1547	< 0,0001	značajan
C	0,492185	1	0,492185	599,6011	< 0,0001	značajan
BC	0,095659	1	0,095659	116,5363	< 0,0001	značajan
A^2	0,008086	1	0,008086	9,851223	0,0105	značajan
C^2	0,015774	1	0,015774	19,2165	0,0014	značajan
Ostatak	0,008209	10	0,000821			
Odstupanje od modela	0,007625	8	0,000953	3,268391	0,2553	neznačajan
Čista pogreška	0,000583	2	0,000292			
Ukupno	1,064919	16				

A - udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %

B - unos topline, *Q*, kJ/cm

C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

Redukcija modela je provedena eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost ”Prob > F” je veća od 0,05. Model sačinjavaju svi članovi čija je vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 (”Prob > F”) manja od 0,05.
Redukcijom modela eliminacijom unatrag svi članovi imaju mogućnost uključivanja, te je dobiveni model znatno robusniji od pristupa uključivanjem unaprijed.

Analiza je pokazala da utjecajnost modela postoji, tj. da postoji dio varijabilnosti funkcijskih veličina kojima se može opisati dobivene vrijednosti širine ZUT-a u ovisnosti od ispitivanih faktora.
F-vrijednost modela od 214,5549 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi manje od 0,01 %. Svi članovi čija je *P*-vrijednost manja od 0,05 čine matematički model jer se smatraju značajnima na temelju testirane hipoteze [79].

Nakon analize varijance, u ovom modelu su se faktori *B* i *C*, te njihove interakcije *BC*, A^2 i C^2 pokazali značajnim. Analiza varijance pokazuje značajan utjecaj faktora *B* i *C*, te *BC* i C^2. To potvrđuje utjecajnost udjela CO_2 u zaštitnom plinu i temperature predgrijavanja na širinu ZUT-a.

F - vrijednost veličine Odstupanje od modela od 3,268 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu pogrešku. Postoji vjerojatnost od 25,53 % da *F* - vrijednost veličine odstupanje od modela nastaje zbog šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model se može prihvatiti.

Redukcijom modela, odnosno izbacivanjem većeg broja neznačajnih članova iz modela, može doći do njegovog poboljšanja koje je određeno vrijednostima prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Prilagođena vrijednost koeficijenta determinacije definira iznos varijacije oko srednje vrijednosti objašnjene modelom, te uzima u obzir broj članova u matematičkom modelu u odnosu na broj stanja u planu pokusa. Predviđena vrijednost R^2 je mjera iznosa varijacija novih podataka objašnjenih u modelu. Razlika između te dvije vrijednosti mora biti manja od 0,2 [79]. Ako je razlika znatno veća, postoji sumnja u vjerodostojnost podataka ili izrađenog matematičkog modela.

U tablici 24 prikazani su osnovni statistički podaci izrađenog reduciranog kvadratnog matematičkog modela.

Tablica 24: Pregled statističkih podataka o modelu

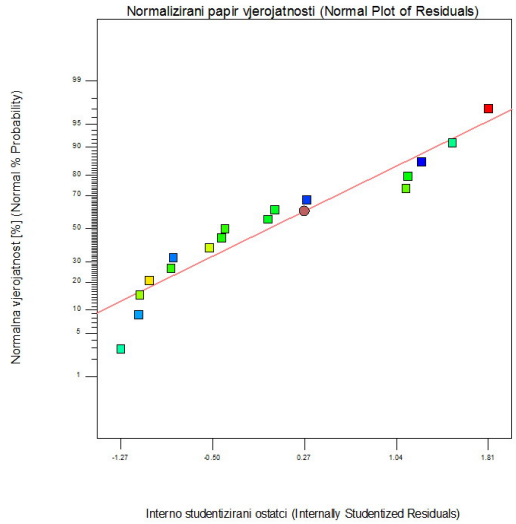
Standardna devijacija	0,028651
Aritmetička sredina	2,0549
Koeficijent varijacije %	1,394256
Predviđena suma kvadrata ostatka	0,024059
R^2 – koeficijent determinacije	0,992292
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,987667
R_{pred}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,977408
Adekvatna preciznost	52,02176

Udjel odstupanja sume kvadrata ukupne pogreške i sume kvadrata čitavog modela (pogreška odstupanja modela) [82] iznosi 0,77 %. Podatak o udjelu varijabilnosti modela za širinu ZUT-a se interpretira koeficijentom determinacije, koji ovdje iznosi 0,9923. Stoga je potvrđen udjel od 99,23 % varijabilnosti rezultata udarnog rada loma i objašnjiv s ispitnim faktorima.
Vrijednost R^2 (koeficijent determinacije) raste dodavanjem pojedinog faktora ili njihove interakcije u model, bez obzira na utjecaj pojedinog od njih.

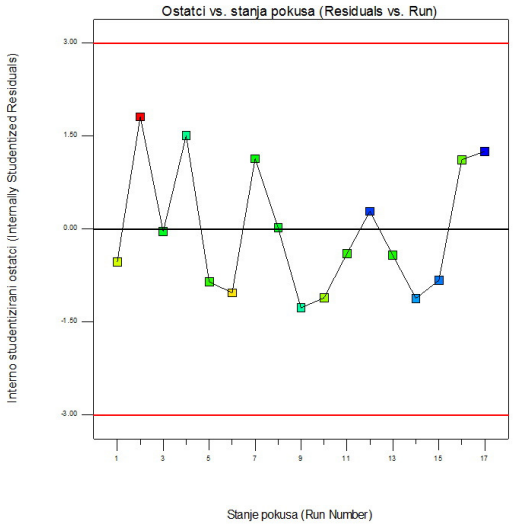
Za razliku od toga, vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) se smanjuje dodavanjem faktora koji ne utječu na model, pa se njime može odrediti koliko utjecajnih faktora je uzeto u model. Zbog toga je vrijednost R_{adj}^2 uvijek manja od R^2.

Vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) od 0,9876 ukazuje da su utjecajni faktori dobro odabrani odnosno da je 98,76% modela objašnjivo odabranim faktorima i njihovim interakcijama. Ta je vrijednost usklađena s vrijednošću R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) koja iznosi 0,977. Vrijednost R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) pokazuje koliko je podataka dobivenih eksperimentom moguće objasniti predviđajućim modelom, što u ovom slučaju iznosi 97,7%. Stoga je takav rezultat primjenjiv za okvirno predviđanje širine ZUT-a.
Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a poželjna vrijednost je 4 ili više. Obzirom da je u ovom slučaju taj omjer 52,02176, zaključeno je da postoji primjeren signal te se stoga ovaj model može koristiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Normalnost izmjerenih vrijednosti za pojedina stanja pokusa ispituje se normaliziranim papirom vjerojatnosti ostataka. Slika 101 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa.
Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva će ukazati na problem ukoliko postoji neki obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva. Papir vjerojatnosti ostataka većinom je raspodijeljen po normalnoj razdiobi uz odstupanja na gornjem dijelu grafa, pa je vjerojatnost pojave takvih slučajeva relativno mala.



Slika 101: Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za reducirani kvadratni matematički model za rezultate širine ZUT-a



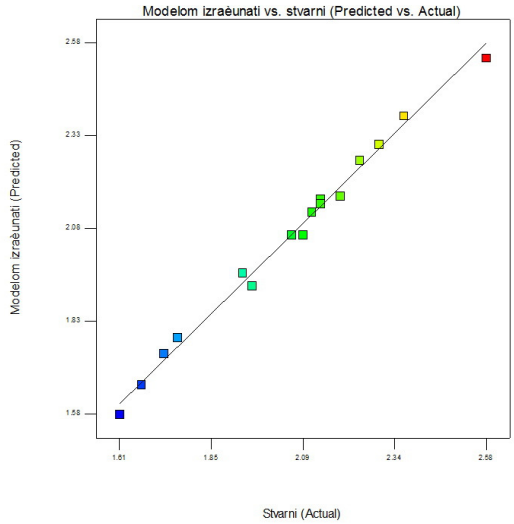
Slika 102: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate širine ZUT-a

Postojanje sustavne pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom provođenja eksperimenta provjerava se dijagramom ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa. Provjera ostataka pokazuje da ne postoji ostatak koji prelazi postavljene granice vjerojatnosti. Niti jedan podatak ne prelazi granicu od ± 3,00 te su stoga svi uključeni u opisivanje modela.

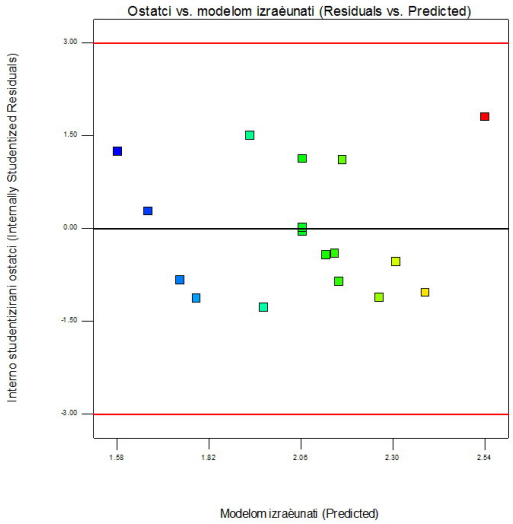
Slika 102 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za rezultate širine ZUT-a. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška u pozadini jer nije moguće raspoznati pravilnu strukturu dijagrama.

Slika 103 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti za rezultate širine ZUT-a.

Vidljivo je da se vrijednosti dobro podudaraju. Slika 104 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti. Vidljivo je da ne postoji sustavna pogreška.



Slika 103: Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati (predviđeni) za rezultate širine ZUT-a



Slika 104: Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na modelom izračunate (predviđene) vrijednosti za rezultate širine ZUT-a

Nakon provedenog eksperimenta prema centralno kompozitnom planu pokusa s tri numerička faktora, mjerenja dobivenih vrijednosti udarnog rada loma i obradi dobivenih rezultata, dobiven je matematički model koji opisuje vrijednosti širine ZUT-a u ovisnosti o ulaznim faktorima.

Završni matematički model s kodiranim faktorima:

$$s_{ZUT} = 2{,}063 - 0{,}00674\,A + 0{,}18\,B + 0{,}19\,C - 0{,}11\,AB + 0{,}026\,A^2 - 0{,}036\,B^2 \quad (17)$$

Matematički model s kodiranim faktorima se prevodi u model sa stvarnim faktorima prema izrazu (18).

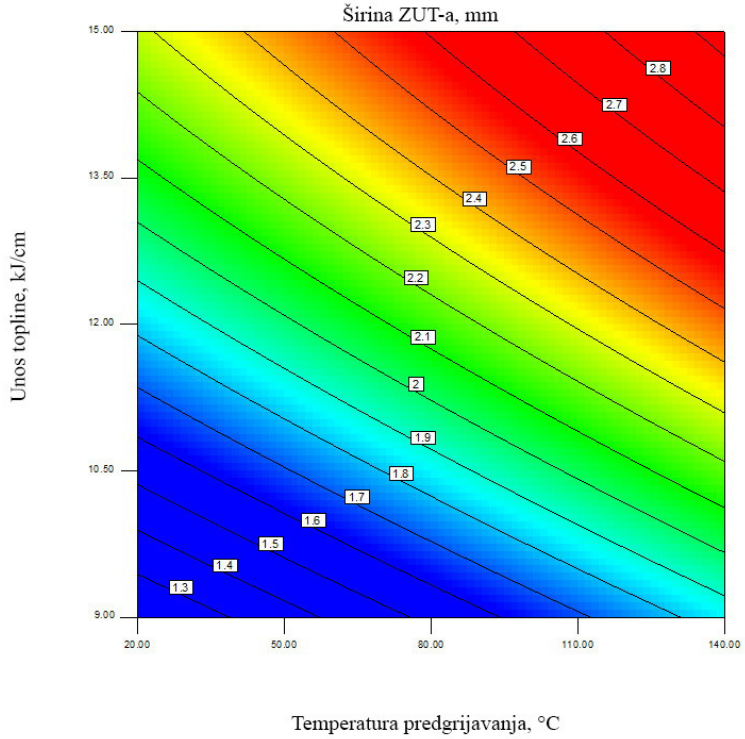
Završni matematički model sa stvarnim faktorima:

$$s_{ZUT} = -2{,}44927 + 0{,}08264\,A + 0{,}46795\,B + 5{,}424\text{x}10^{-3}\,C - 9{,}1125\ \text{x}10^{-3}\,AB + 7{,}1075\ \text{x}10^{-4}\,A^2 - 8{,}934\text{x}10^{-3}\,B^2 \quad (18)$$

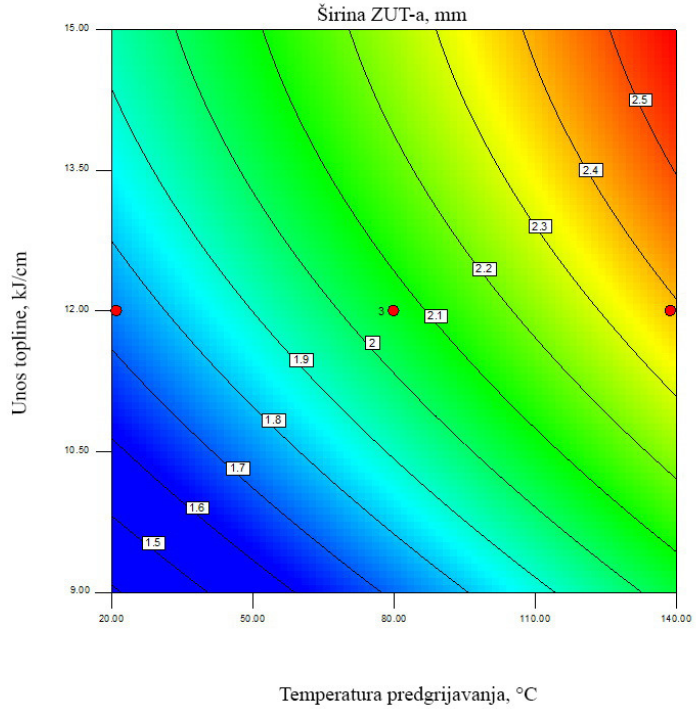
gdje je:

A - udio CO2 u zaštitnom plinu Ar, %
B - unos topline, *Q*, J/cm
C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

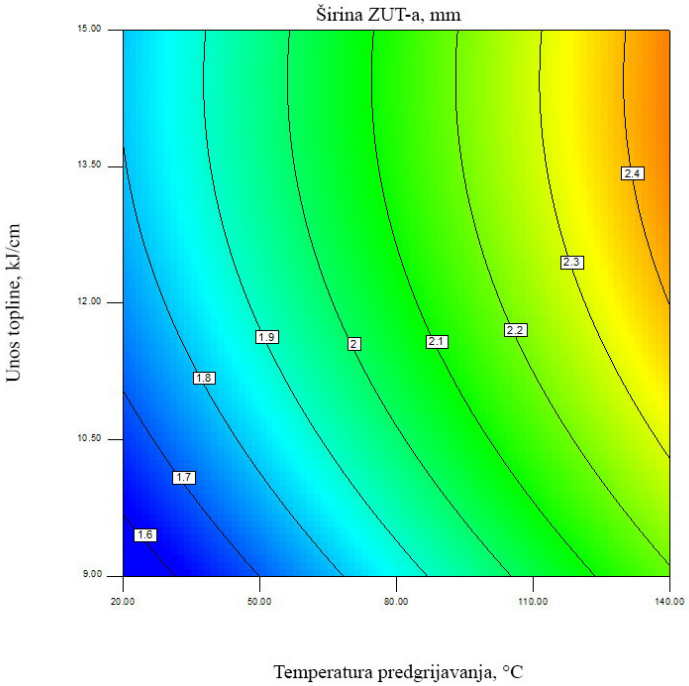
Na slikama 105, 106 i 107 su prikazani konturni prikazi matematičkog modela ovisnosti širine ZUT-a o unosu topline u zavar i temperaturi predgrijavanja, a slike 108, 109, 110, 111 i 112 prikazuju 3D odzivne površine navedenog matematičkog modela. Kako bi se moglo grafički prikazati ovisnost širine ZUT-a o parametrima procesa, faktor *A* (udio CO_2 u Ar) je na navedenim dijagramima konstantan, i prikazan je za vrijednosti 8 %, 18 %, 23 % i 28 % CO_2 u zaštitnom plinu. Grafički prikaz rezultata širine ZUT-a za konstantne razine CO_2 odabran je zbog identičnog (komparabilnog) karaktera odzivne plohe na svim razinama CO_2 što dokazuje robusnost planiranog eksperimenta tj. interakcije djelovanja unosa topline i temperature predgrijavanja na širinu ZUT-a neovisno od sastava zaštitnog plina.



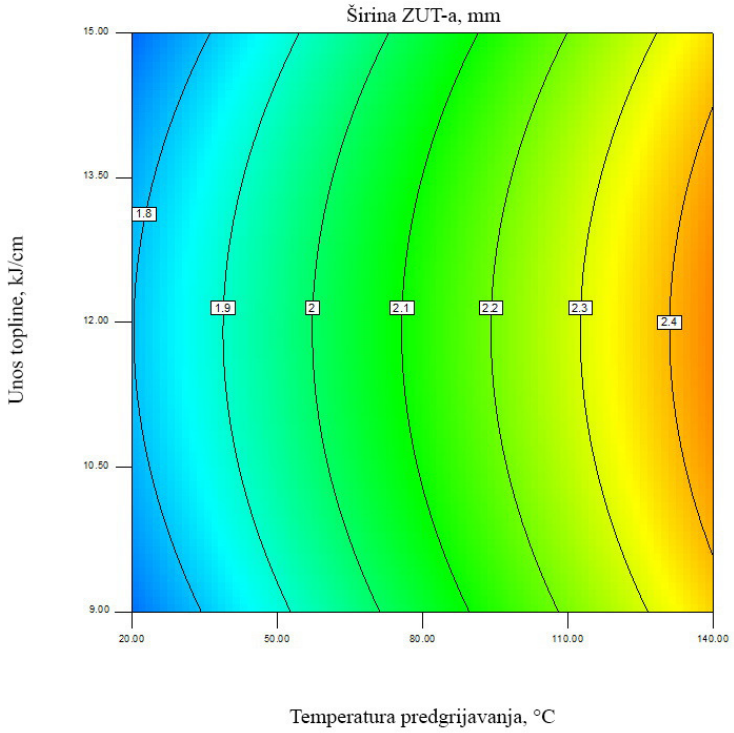
Slika 105: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 8 %



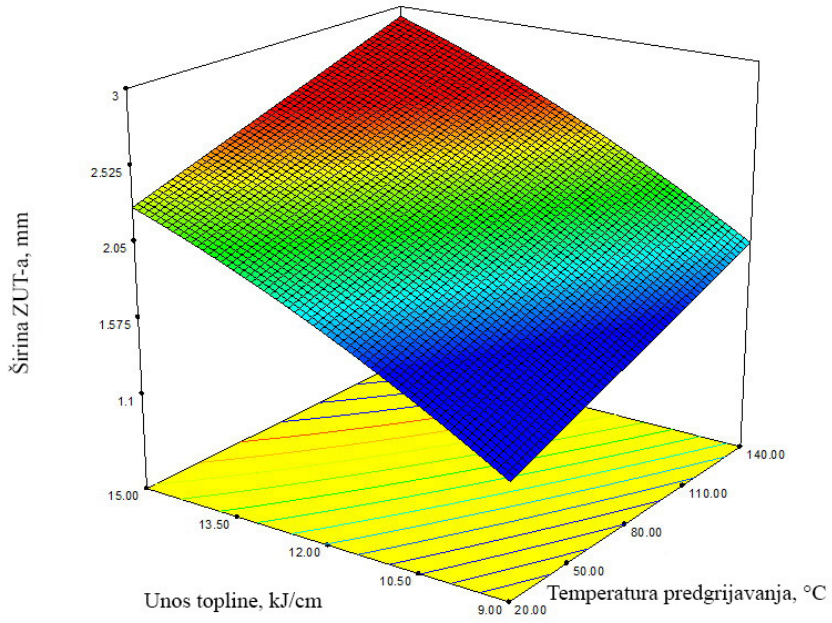
Slika 106: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 18 %



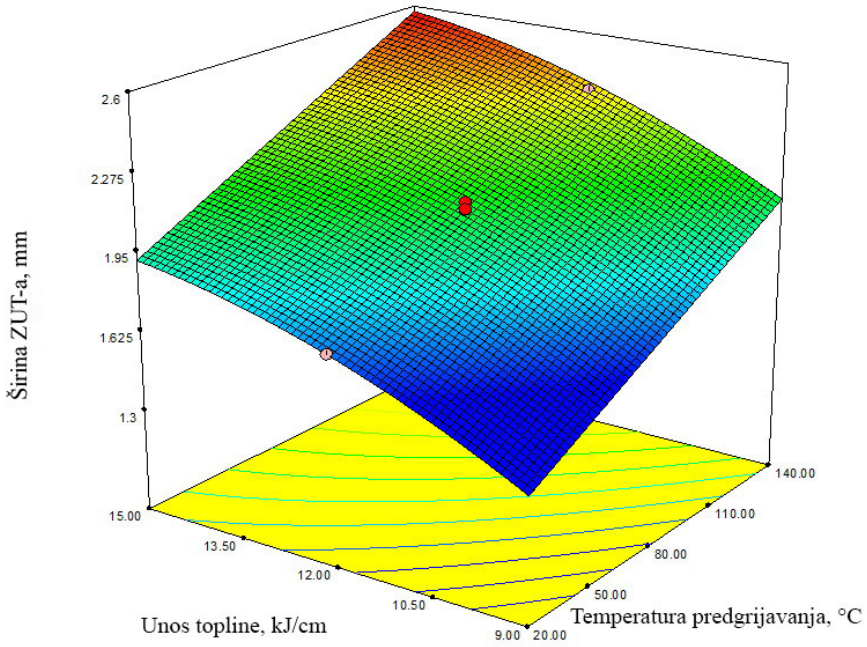
Slika 107: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 23 %



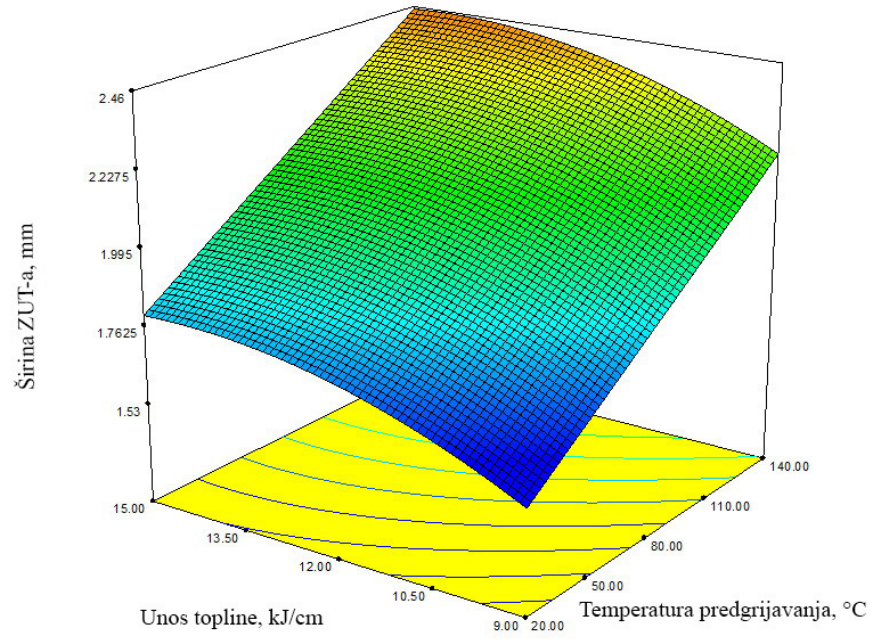
Slika 108: Konturni prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 28 %



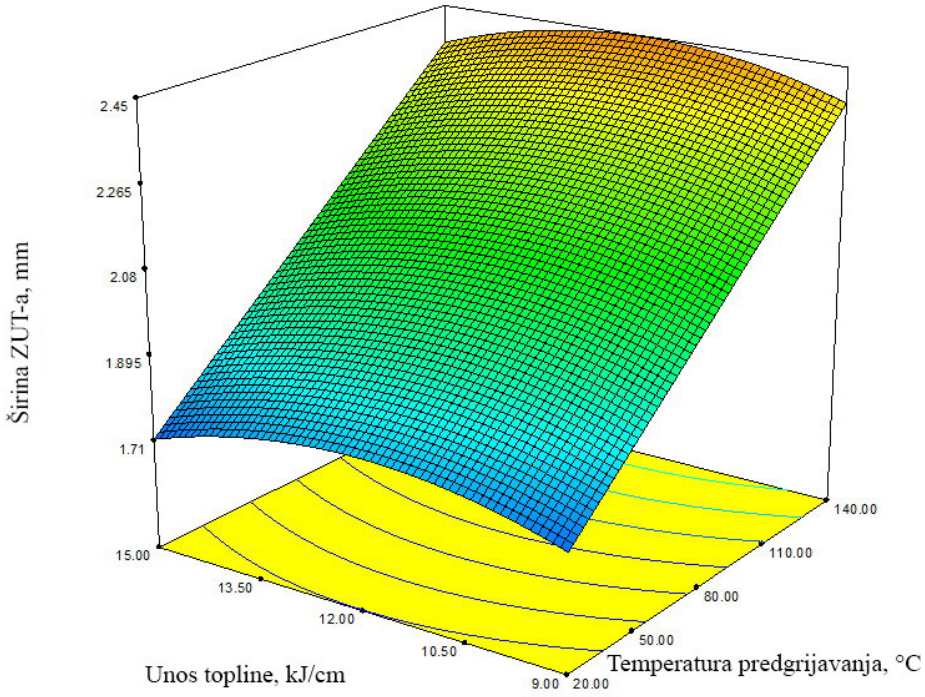
Slika 109: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 8 %



Slika 110: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 18 %



Slika 111: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 23 %



Slika 112: 3D prikaz modela ovisnosti širine ZUT-a o parametrima zavarivanja uz udio CO_2 u zaštitnom plinu 28 %

Vidljivo je da se pri korištenju zaštitnog plina s 8 % CO_2 najmanje vrijednosti širine ZUT-a postižu primjenom parametara zavarivanja s manjim unosima topline. Pri tome temperatura predgrijavanja ima manji utjecaj na širinu ZUT-a. Kod pokusa provedenih s većim vrijednostima udjela CO_2 u zaštitnom plinu (23 % i 28 %) utjecaj unosa topline pri zavarivanju na širinu ZUT-a je gotovo zanemariv.

5.4 ANALIZA TVRDOĆE METALA ZAVARA

U tablici 25 prikazani su rezultati ispitivanja tvrdoće metala zavara dobiveni u eksperimentalnom dijelu ispitivanja za pojedino stanje pokusa uz pripadajuće faktore pokusa.

Tablica 25: Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene tvrdoće metala zavara

Stanje pokusa	Udio CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperature predgrijavanja ϑ, ^{O}C	Tvrdoća metala zavara HV10
1	12	10	45	265
2	24	10	45	258
3	12	14	45	258
4	24	14	45	259
5	12	10	115	253
6	24	10	115	242
7	12	14	115	247
8	24	14	115	277
9	8	12	80	238
10	28	12	80	237
11	18	8,64	80	246
12	18	15,36	80	242
13	18	12	20	242
14	18	12	140	259
15	18	12	80	262
16	18	12	80	248
17	18	12	80	238

U svrhu dobivanja matematičkog modela za opis utjecaja parametara zavarivanja na tvrdoću metala zavara, odnosno modela kojim će se ovisno o ulaznim tehnološkim parametrima moći izračunati i predvidjeti tvrdoću metala zavara potrebno je statistički obraditi rezultate dobivene eksperimentalnim putem. Analiza varijance pokazala je da se ovisnost tvrdoće metala zavara o parametrima zavarivanja najbolje može opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom. Navedena analiza varijance prikazana je tablicom 26.

Tablica 26: Analize varijance rezultata tvrdoće metala zavara za upotrijebljeni reducirani kvadratni matematički model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja SS	Stupnjevi slobode df	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 P	Značajnost
Model	1113,8232	9	123,7581	0,9263	0,5535	neznačajan
A	55,9236	1	55,9236	0,4186	0,5383	neznačajan
B	88,3056	1	88,3056	0,6609	0,4430	neznačajan
C	54,2807	1	54,2807	0,4063	0,5441	neznačajan
AB	312,5000	1	312,5000	2,3390	0,1700	neznačajan
AC	2,0000	1	2,0000	0,0150	0,9061	neznačajan
BC	40,5000	1	40,5000	0,3031	0,5990	neznačajan
A^2	208,0371	1	208,0371	1,5571	0,2522	neznačajan
B^2	93,6084	1	93,6084	0,7006	0,4302	neznačajan
C^2	490,1602	1	490,1602	3,6687	0,0970	neznačajan
Ostatak	935,2356	7	133,6051			
Odstupanje od modela	924,5690	5	184,9138	34,6713	0,0283	značajan
Čista greška	10,6667	2	5,3333			
Ukupno	2049,0588	16				

A - udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %

B - unos topline, Q, kJ/cm

C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

Analiza varijance pokazuje da niti jedan faktor kao niti jedna interakcija faktora nije značajna, odnosno da promatrani parametri zavarivanja u granicama odabranim u ovom radu nemaju značajan utjecaj na tvrdoću metala zavara.

5.5 ANALIZA TVRDOĆE ZUT-a

U tablici 27 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće ZUT-a dobiveni u eksperimentalnom dijelu ispitivanja za pojedino stanje pokusa uz pripadajuće faktore pokusa.

Tablica 27: Stanja pokusa, faktori, njihove razine i vrijednosti te vrijednosti izmjerene tvrdoće ZUT-a

Stanje pokusa	Udio CO_2 u Ar	Unos topline Q, kJ/cm	Temperature predgrijavanja ϑ, ^{O}C	Tvrdoća ZUT-a HV10
1	12	10	45	223
2	24	10	45	221
3	12	14	45	217
4	24	14	45	226
5	12	10	115	211
6	24	10	115	214
7	12	14	115	209
8	24	14	115	214
9	8	12	80	205
10	28	12	80	207
11	18	8,64	80	216
12	18	15,36	80	206
13	18	12	20	209
14	18	12	140	219
15	18	12	80	229
16	18	12	80	215
17	18	12	80	208

U svrhu dobivanja matematičkog modela za opis utjecaja parametara zavarivanja na tvrdoću ZUT-a, odnosno modela kojim će se ovisno o ulaznim tehnološkim parametrima moći izračunati i predvidjeti tvrdoću ZUT-a potrebno je statistički obraditi rezultate dobivene eksperimentalnim putem. Analiza varijance pokazala je da se ovisnost tvrdoće ZUT-a o parametrima zavarivanja najbolje može opisati reduciranim kvadratnim matematičkim modelom. Navedena analiza varijance prikazana je tablicom 28.

Tablica 28: Analize varijance rezultata tvrdoće ZUT-a za upotrijebljeni reducirani kvadratni matematički model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja *SS*	Stupnjevi slobode df	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla *F*	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 *P*	Značajnost
Model	501,3931	4	125,3482	4,723	0,0160	značajan
A	16,7756	1	16,7756	0,6321	0,4420	neznačajan*
C	195,2325	1	195,2325	7,356	0,0189	značajan
AC	144,5	1	144,5	5,4445	0,0378	značajan
C^2	144,885	1	144,885	5,4589	0,0376	značajan
Ostatak	318,4892	12	26,5408			
Odstupanje od modela	309,8226	10	30,9822	7,1498	0,1289	neznačajan
Čista pogreška	8,6667	2	4,3333			
Ukupno	819,8823	16				

A - udio CO_2 u zaštitnom plinu Ar, %

C - temperatura predgrijavanja, ϑ, °C

* Vrijednost *A* nije odbačena iako je vrijednosti rizik odbacivanja hipoteze H_0 veći od 0,05 (u ovom slučaju to je 0,442), jer se nije željelo odbaciti član *AC* koji je značajan na model.

Kod linearnog modela pojavljuju se samo članovi nultog reda, faktori, i članovi prvog reda te njihove interakcije. Kod modela viših redova pojavljuju se još interakcije viših redova, koje u tehničkim sustavima mogu imati zanemariv utjecaj, zbog čega je izvršena redukcija izrađenog modela natražnom metodom.

Redukcija modela je provedena eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost ”Prob > F” je veća od 0,05. Model sačinjavaju svi članovi čija je vrijednost rizika odbacivanja hipoteze H_0 (”Prob > F”) manja od 0,05.

Analiza rezultata pokazala je da utjecajnost modela postoji, tj. da postoji dio varijabilnosti funkcijskih veličina kojima se može opisati dobivene vrijednosti tvrdoće ZUT-a u ovisnosti od ispitivanih faktora.

F-vrijednost modela od 0,016 ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost da se pojavi tako velika vrijednost uslijed šuma iznosi manje od 1,6%. Svi članovi čija je *P* - vrijednost manja

od 0,05 čine matematički model jer se smatraju značajnima na temelju testirane hipoteze. [79].
Nakon analize varijance, u ovom modelu su se faktori *A* i *C*, te njihove interakcije *AC* i C^2 pokazali značajnim. Analiziranjem se može uočiti veliki utjecaj faktora *C*. To potvrđuje utjecajnost temperature predgrijavanja na tvrdoću ZUT-a.

F - vrijednost veličine odstupanja od modela u iznosu od 7,1498 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu pogrešku. Postoji vjerojatnost od 12,9 % da *F* - vrijednost veličine odstupanja od modela nastaje zbog šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model se može prihvatiti.

Redukcijom modela, odnosno izbacivanjem većeg broja neznačajnih članova iz modela, može doći do njegovog poboljšanja koje je određeno vrijednostima prilagođenog i predviđenog koeficijenta determinacije. Prilagođena vrijednost koeficijent determinacije definira iznos varijacije oko srednje vrijednosti objašnjene modelom, te uzima u obzir broj članova u matematičkom modelu u odnosu na broj stanja u planu pokusa. Predviđena vrijednost koeficijent determinacije je mjera iznosa varijacija novih podataka objašnjenih u modelu. Razlika između te dvije vrijednosti mora biti manja od 0,2 [79]. Ako je razlika znatno veća, postoji sumnja u vjerodostojnost podataka ili izrađenog matematičkog modela.

U tablici 29 prikazani su osnovni statistički podaci izrađenog reduciranog kvadratnog matematičkog modela.

Tablica 29: Pregled statističkih podataka o modelu

Standardna devijacija	5,15177
Aritmetička sredina	214,647
Koeficijent varijacije %	2,4001
Predviđena suma kvadrata ostatka	733,1061
R^2 – koeficijent determinacije	0,611542
R_{adj}^2 – prilagođeni koeficijent determinacije	0,482057
R_{pred}^2 – predviđeni koeficijent determinacije	0,105839
Adekvatna preciznost	7,729339

Udio odstupanja sume kvadrata ukupne pogreške i sume kvadrata čitavog modela (pogreška odstupanja modela) [82] iznosi 33,85%. Podatak o udjelu varijabilnosti modela za udarni rad loma metala zavara se interpretira koeficijentom determinacije, koji ovdje iznosi 0,6115. Stoga je potvrđen udjel od 61,15% varijabilnosti rezultata udarnog rada loma i objašnjiv s ispitnim faktorima.

Vrijednost R^2 (koeficijent determinacije) raste dodavanjem pojedinog faktora ili njihove interakcije u model, bez obzira na utjecaj pojedinog od njih.

Za razliku od toga, vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) se smanjuje dodavanjem faktora koji ne utječu na model, pa se njime može odrediti koliko utjecajnih faktora je uzeto u model. Zbog toga je vrijednost R_{adj}^2 uvijek manja od R^2.

Vrijednost R_{adj}^2 (prilagođeni koeficijent determinacije) od 0,482 ukazuje da utjecajni faktori nisu dobro odabrani odnosno da je 48,2% modela objašnjivo odabranim faktorima i njihovim interakcijama. Ta vrijednost nije usklađena s vrijednošću R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) koja iznosi 0,10. Vrijednost R_{pred}^2 (predviđeni koeficijent determinacije) pokazuje koliko je podataka dobivenih eksperimentom moguće objasniti predviđajućim modelom, što u ovom slučaju iznosi 10%. Stoga takav rezultat nije primjenjiv za okvirno predviđanje tvrdoće materijala u ZUT-u. Nizak koeficijent determinacije dobiven ovim modelima je posljedica izrazite heterogenosti mikrostrukture materijala u području zone utjecaja topline i posljedičnom razlikom u svojstvima. Naime u izradi modela koristila se srednja vrijednost tvrdoće izmjerena na tri različita mjesta unutar ZUTa, a uslijed njene heterogenosti i na različitim mikrostrukturama što je utjecalo na dobivene rezultate.

Analiza utjecaja parametara zavarivanja na tvrdoću ZUT-a pokazuje da značajan utjecaj ima samo temperatura predgrijavanja. Udio CO_2 u zaštitnom plinu nema značajan utjecaj na model ($P = 0{,}442$), a u analizi varijance nije odbačen zbog njegove interakcije s temperaturom predgrijavanja.

Obzirom da je utvrđen značajan utjecaj samo jednog od tri parametara zavarivanja na tvrdoću ZUT-a, obzirom da je samo 48,2% modela objašnjivo odabranim faktorima i njihovim interakcijama (prilagođeni koeficijent determinacije iznosi 0,482) te obzirom da je samo 10% podataka dobivenih eksperimentom moguće objasniti predviđajućim modelom (predviđeni koeficijent determinacije = 0,10) nije nastavljena daljnja analiza utjecaja parametara zavarivanja na tvrdoću ZUT-a.

6. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

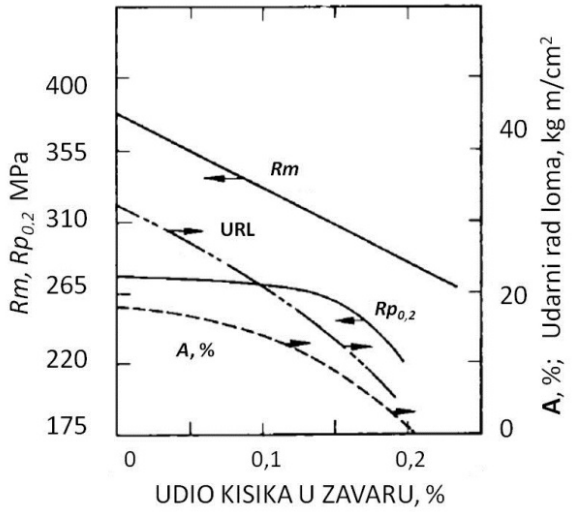
U svrhu izrade modela utjecaja parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80 provedena su laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava te detaljna analiza makro i mikrostrukture zavarenih spojeva što je opisano u poglavlju 4, te je provedena statistička analiza dobivenih rezultata, što je prikazano u poglavlju 5. U ovom poglavlju prikazana je analiza dobivenih rezultata prikazanih u poglavlju 4 i 5 te diskusija o utjecaju pojedinih parametara zavarivanja na mehanička svojstva i mikrostrukturu.

6.1 ANALIZA REZULTATA UDARNOG RADA LOMA METALA ZAVARA

U svrhu analize rezultata udarnog rada loma metala zavara potrebno je uzeti u obzir utjecaj kisika u metalu zavara na metalurške procese pri formiranju mikrostrukture zavarenog spoja.

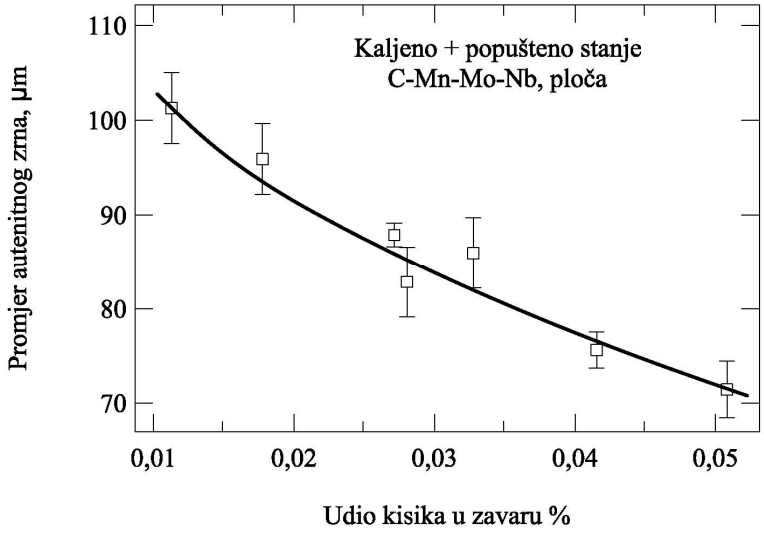
Utjecaj kisika u metalu zavara

Prisutnost kisika u metalu zavara utječe na smanjenje udarnog rada loma, ali i na nastanak acikularnog ferita koji s druge strane poboljšava udarni rad loma [83 - 85]. Iz navedenih razloga potrebno je optimizirati udio kisika s ciljem postizanja maksimalne udarnog rada loma. Na slici 113 prikazan je utjecaj udjela kisika u metalu zavara na mehanička svojstva nelegiranog čelika.

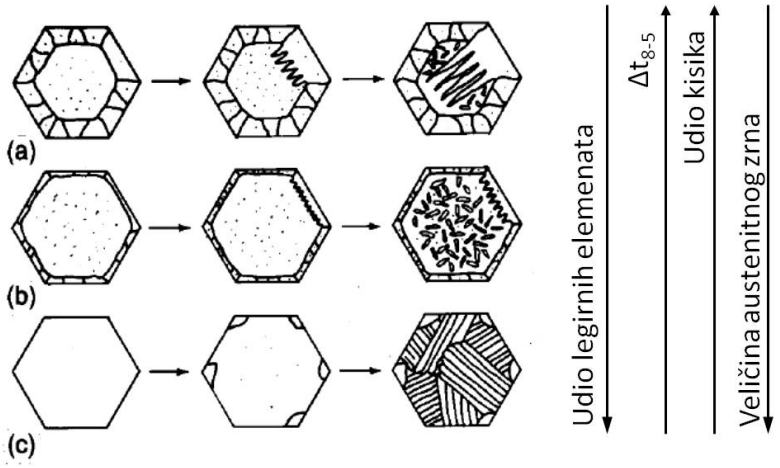


Slika 113: Utjecaj udjela kisika u metalu zavara na mehanička svojstva nelegiranog čelika [84]

Prema [86], prikazano na slici 114, dokazano je da pri elektrolučnom zavarivanju pod zaštitom praška dolazi do rasta austenitnog zrna prije transformacije uslijed porasta udjela kisika. Prema [87] primijećeno je da je pri većem udjelu kisika u zavaru došlo do povećanja broja oksidnih uključaka uz istovremeno smanjenje njihove prosječne veličine. U spomenutom istraživanju primijećen je i veliki broj manjih čestica promjera do 0,1 µm. Poznato je da čestice sekundarne faze pojačano ograničavaju rast zrna pomoću mehanizma zapinjanja granica zrna osobito kad su čestice manje i brojnije. Iz navedenog slijedi da bi povećanje udjela kisika trebalo smanjiti veličinu primarnog austenitnog zrna, slika 115.



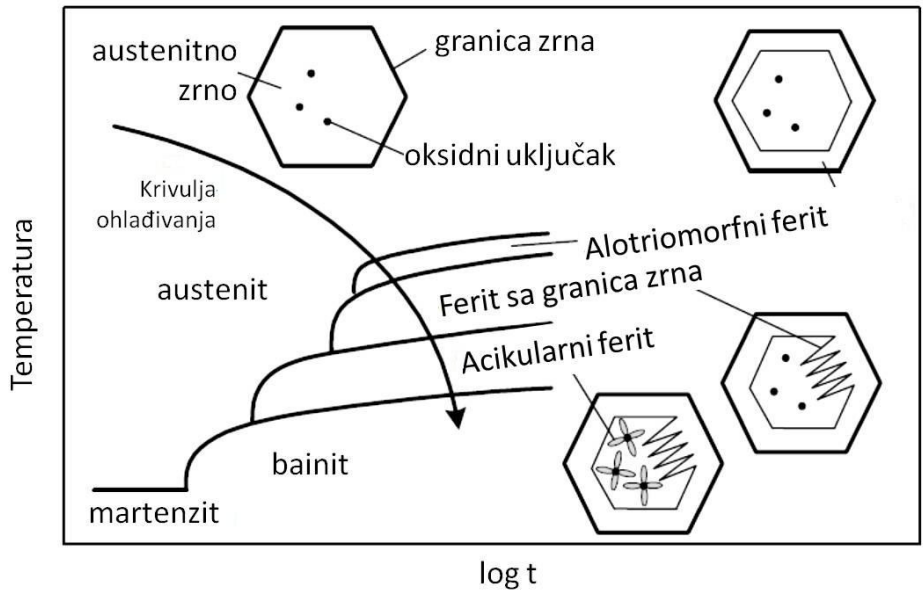
Slika 114: Promjer austenitnog zrna kao funkcija sadržaja kisika u metalu zavara kod EPP zavarivanja [86]



Slika 115: Shematski prikaz utjecaja legirnih elemenata, vremena hlađenja $t_{8/5}$ i udjela kisika u metalu zavarana na veličinu austenitnog zrna [88]

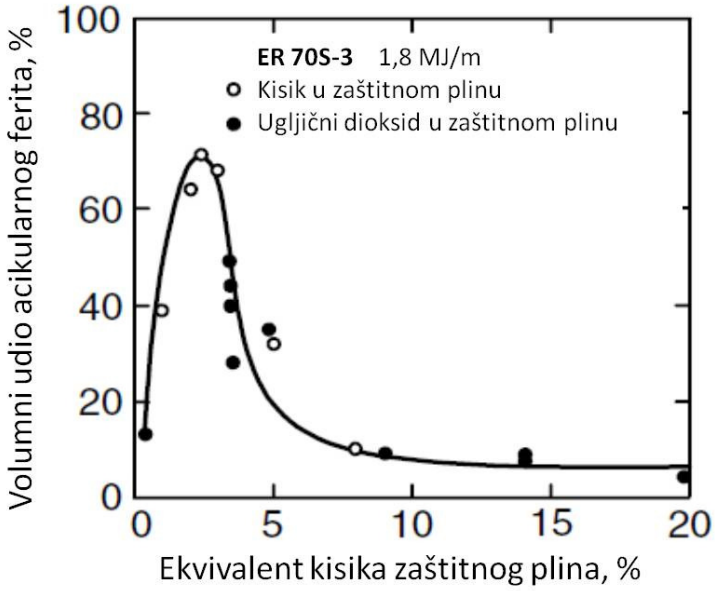
Veći uključci koji se javljaju kod nižih koncentracija kisika služe kao pogodna nukleacijska mjesta za acikularni ferit. Veličina tj. promjer uključaka koji se javljaju je u rasponu između 0,2 µm i 2,0 µm, a prosječna veličina od oko 0,4 µm smatra se optimalnom. Prema [89] prikazano je da se pri elektrolučnom zavarivanju pod praškom čelika visoke čvrstoće HY-100 ne stvara dovoljno nukleacijskih mjesta za formiranje acikularnog ferita ukoliko je udio kisika manji od 200 ppm. S druge strane, pokazano je da ukoliko je koncentracija kisika iznad 300 ppm dolazi do stvaranja velikog broja oksidnih uključaka manjih od 0,2 µm. Ovakvi uključci, iako premali da bi uspješno formirali mjesta za nukleaciju acikularnog ferita smanjuju veličinu zrna te osiguravaju veliku granicu zrna koja je preduvjet za stvaranje graničnog tj. alotriomorfnog ferita. Za stvaranje acikularnog ferita potrebno je optimizirati količinu kisika, slika 116, jer je nužno stvoriti dovoljan broj, dobru disperziju kao i optimalnu veličinu oksidnih uključaka.

Slijed solidifikacije i formiranja mikrostrukture ovisno o brzini hlađenja prikazan je na slici 116 te je u kontekstu povišenja udarnog rada loma potrebno usmjeriti krivulju hlađenja u područje koje će rezultirati maksimalnim udjelom acikularnog ferita ali, kako je već spomenuto, ne smije se zanemariti bitan utjecaj kisika u metalu zavara.



Slika 116: TTT dijagram za metal zavara niskougljičnog čelika [83]

U [85] je također ukazana potreba za određivanjem optimalne koncentracije kisika za formiranje acikularnog ferita kod MAG zavarivanja u mješavinama argona i kisika te argona i ugljičnog dioksida što je prikazano na slici 117.



Slika 117: Ovisnost udjela acikularnog ferita o ekvivalentu kisika u metalu zavara korištenjem MAG postupka [85]

Kod mješavine argona i kisika, ekvivalent kisika zaštitnog plina jednak je volumnom udjelu kisika, dok se kod mješavina s ugljičnim dioksidom kao ekvivalent kisika uzima volumni udio ugljičnog dioksida koji će rezultirati istom količinom kisika u metalu zavara.

Određivanje udjela kisika u metalu zavara

Ekvivalent kisika, O_{eq}, računa se prema formuli [85]:

$$O_{eq} = - 0{,}088 + 0{,}148\ [CO_2]^{1{,}524} + [O_2] \qquad (19)$$

pri čemu $[CO_2]$ i $[O_2]$ predstavljaju volumne udjele.

Rezultati izračuna ekvivalenta kisika za stanja pokusa prikazani su u tablici 30.

Tablica 30: Vrijednosti ekvivalenta kisika za stanja pokusa 1 do 17

Stanje pokusa	**% CO_2, volumni udio**	**Ekvivalent kisika O_{eq}, %**
1	12	6,4
2	24	18,7
3	12	6,4
4	24	18,7
5	12	6,4
6	24	18,7
7	12	6,4
8	24	18,7
9	8	3,4
10	28	23,8
11	18	12,0
12	18	12,0
13	18	12,0
14	18	12,0
15	18	12,0
16	18	12,0
17	18	12,0

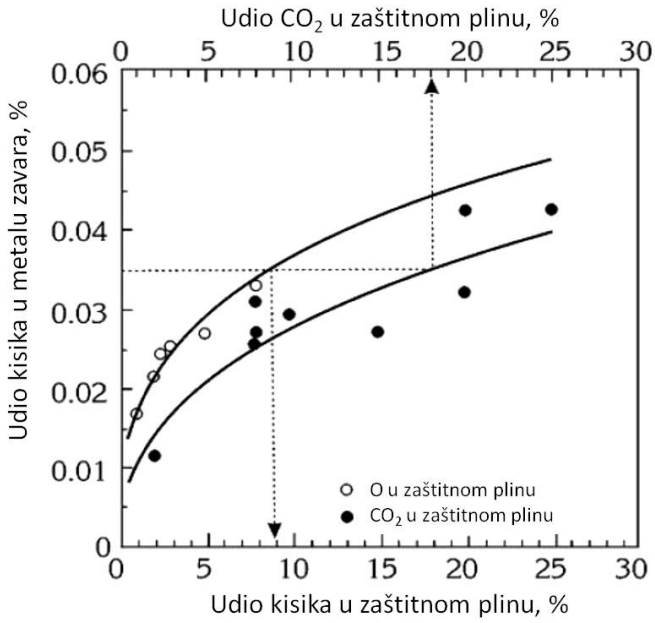
Iz rezultata je vidljivo da je ekvivalent kisika za stanja pokusa minimalan za stanje 9 (O_{eq} = 3,37 %) i maksimalan za stanje 10 (O_{eq} = 23,78 %). Treba naglasiti da se radi o približno sedam puta većoj vrijednosti što ukazuje na bitnu razliku u kemijskoj reaktivnosti same atmosfere u području električnog luka kada se u mješavini s argonom koristi 8 %CO_2 i 28 %CO_2.

Kako su plinske mješavine standardizirane prema normi HRN EN ISO 14175 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke [74] slijedi da se pri izboru zaštitne plinske mješavine uopće ne razmišlja o primjeni revidirane smjese koja bi u određenim situacijama mogla bitno utjecati na mehanička svojstva spoja, jer iako se radi o relativnoj maloj promjeni udjela ugljičnog dioksida vidljivo je da se ekvivalent kisika značajno mijenja.

Prema slici 117 vidljivo je da se vrijednosti udjela ugljičnog dioksida u eksperimentu s aspekta utjecaja na udio acikularnog ferita u metalu zavara poklapaju s područjem

maksimalnog udjela za oko 3 % ekvivalenta kisika što odgovara stanju pokusa 9 koji sadrži 8 %CO_2 u mješavini. To u konačnici ukazuje na značajan utjecaj ekvivalenta kisika na formiranje mikrostrukture u metalu zavara. Povećanjem ekvivalenta kisika smanjuje se udio acikularnog ferita pa je za očekivati da za maksimalne udjele ugljičnog dioksida udio acikularnog ferita padne ispod 20 % (npr. za O_{eq} = 23,78 %).

Nadalje, osim formiranja mikrostrukture acikularnog ferita, bitan faktor je i količina oksidnih uključaka u metalu zavara koji će ovisno o svojoj veličini pozitivno ili negativno utjecati na mehanička svojstva. Količina oksidnih uključaka može se procijeniti ovisno o vrsti i količini zaštitnog plina. Udio kisika u metalu zavara ovisi o udjelu aktivne komponente u zaštitnom plinu prema slici 118.

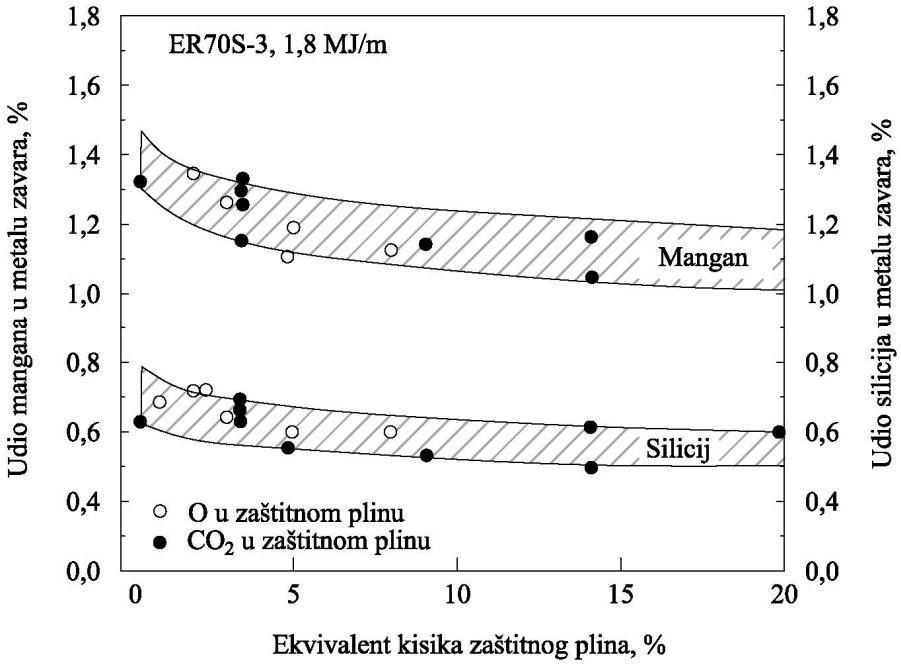


Slika 118: Udio kisika u metalu zavara niskolegiranog čelika kao funkcija udjela kisika i ugljičnog dioksida u zaštitnom plinu [85]

Slijedi da se prema slici 118 udio kisika u metalu zavara za stanja pokusa kreće između približno 0,025 % i 0,05 % što korelira s podacima iz [89].

Utjecaj ekvivalenta kisika na kemijski sastav metala zavara

S porastom udjela kisika ili ugljičnog dioksida dolazi do oksidacije tj. povezivanja mangana i silicija s kisikom. Mangan i silicij značajno utječu na čvrstoću zavarenog spoja. Slika 119 prikazuje gubitak mangana i silicija iz zavara, a koji se izlučuju u trosku ovisno o veličini ekvivalenta kisika. Slijedi da je povećanjem ekvivalenta kisika moguće očekivati pad mehaničkih svojstava zavara.



Slika 119: Ovisnost udjela mangana i silicija o ekvivalentu kisika [85]

U ovom doktorskom radu gubitak mangana i silicija u zavaru dokazan je i eksperimentalno, kemijskom analizom pomoću metode optičke emisijske spektrometrije na uređaju GDS 850 Leco. Kemijska analiza je provedena na tri uzorka stanja pokusa 9, 10 i 11, a rezultati su prikazani u tablici 31. Uzorak stanja pokusa 9 ima najniži ekvivalent kisika, O_{eq} = 3,37 %, uzorak stanja pokusa 10 ima najveću vrijednost O_{eq} = 23,78 % dok uzorak stanja pokusa 11 ima relativnu medijalnu vrijednost O_{eq} = 12,03 %.

Vidljivo je da je najveći udio mangana i silicija zadržan kod uzorka stanja pokusa 9, dok je najniži kod uzorka stanja pokusa 10. Jednako tako, kod uzorka stanja pokusa 10 vidljiv je povećan i udio ugljika što se može pripisati pougljičenju oslobođenim ugljikom iz disociranog

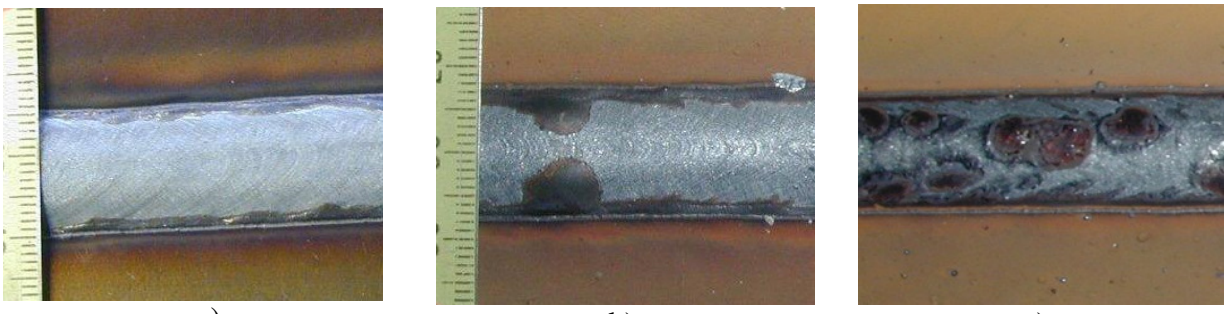
ugljičnog dioksida. Vrijednosti kroma, nikla, molibdena i bakra nisu bitno promijenjene obzirom na veličinu ekvivalenta kisika.

Tablica 31: Kemijska analiza metala zavara za stanja pokusa oznaka 9, 10 i 11

Oznaka uzorka	**%, maseni udio**									
	C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Cu**	**Fe**
Uz 9 8 % CO_2	0,066	0,67	1,53	0,017	0,014	0,55	0,51	0,26	0,099	ostatak
Uz 11 18 % CO_2	0,065	0,62	1,51	0,017	0,013	0,51	0,47	0,24	0,095	ostatak
Uz 10 28 % CO_2	0,067	0,58	1,42	0,017	0,013	0,52	0,49	0,25	0,096	ostatak

Iz rezultata je vidljivo da se povećanjem ekvivalenta kisika smanjuje količina mangana i silicija u metalu zavara i to prema trendu prikazanom na slici 119. Ustanovljeno je približno 10 % razlike u odnosu minimalnog i maksimalnog ekvivalenta kisika u masenom udjelu mangana i silicija u metalu zavara. Kao posljedica toga povećanjem udjela ugljičnog dioksida u zaštitnoj mješavini dolazi do intenzivnijeg nastanka mangan i silicij oksida koji se izlučuju na površni zavara u obliku troske.

Slika 120 prikazuje količinu troske za stanja pokusa 9, 11 i 10 (8, 18 i 28 % CO_2). Vidljivo je da se porastom oksidativne atmosfere značajno povećava količina izlučene troske na površini zavara što odgovara većem gubitku legirnih elemenata.



a) b) c)

Slika 120: Količina izlučene troske za stanja pokusa 9, 11 i 10:

a) 8% CO_2 u Ar

b) 18 % CO_2 u Ar

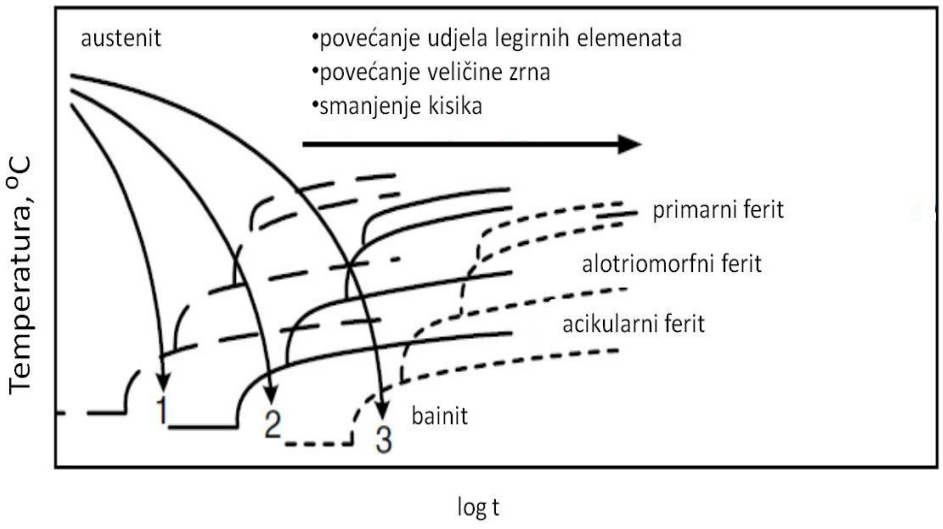
c) 28 % CO_2 u Ar

Kumulativni utjecaj unosa topline i sastava zaštitnog plina na mikrostrukturu metala zavara

Za kvalitetno formiranje zaključka važno je analizirati i djelovanje termodinamičkog ciklusa i količine kisika na formiranje mikrostrukture u metalu zavara. Ako se promatra krivulja hlađenja na slici 121 vidljivo je da se smanjenjem ekvivalenta kisika realizira pomak s lijeve (isprekidane linije) prema sredini (pune linije) i dolazi do većinskog udjela acikularnog ferita koja se ostvaruje hlađenjem prema krivulji hlađenja 3. Međutim ukoliko se nastavi sa smanjivanjem udjela kisika, mikrostrukturna područja u TTT dijagramu se od sredine (pune linije) pomiču na desnu stranu (točkaste linije) gdje više ne prevladava acikularni ferit (za brzinu hlađenja 3).

Ovim je jasno vidljivo da se upravo ekvivalentom kisika može upravljati mikrostrukturom, a time posredno i mehaničkim svojstvima metala zavara. Drugim riječima, za isti unos topline različitim plinskim mješavinama mogu se postići različite mikrostrukture. Dodatni aspekt unosa topline nazire se u boljoj toplinskoj vodljivosti plinskih mješavina s većim udjelom ugljičnog dioksida što utječe na brzinu hlađenja tj. vrijeme $t_{8/5}$.

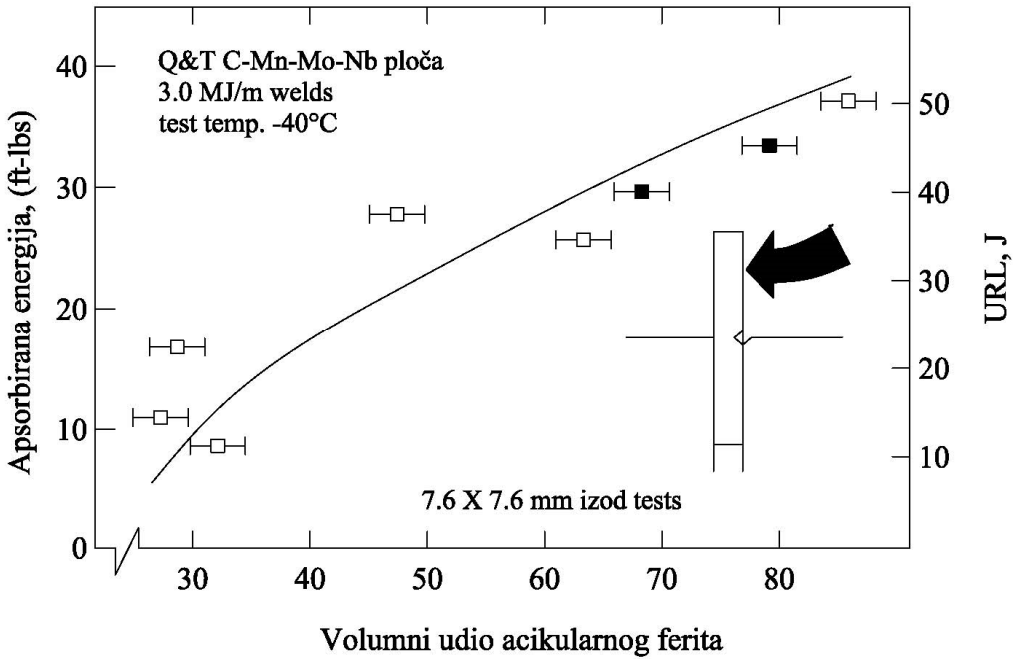
Iz navedenog je vidljivo da je uloga zaštitne mješavine znatno kompleksnija od jednostavne zaštite taline i električnog luka, te je potrebno kritički razmotriti pojedine mehanizme koji se mogu javiti pri zavarivanju MAG postupkom. To naravno zahtjeva bolje poznavanje samog procesa i utjecajnih parametara, a jasno je da je kod čelika povišene čvrstoće moguće uz relativno male promjene u mješavini plina postići značajne promjene mehaničkih svojstava.



Slika 121: Prikaz utjecaja legirnih elemenata, veličine zrna i kisika na mikrostrukturu u TTT dijagramu zavara niskougljičnog čelika [83]

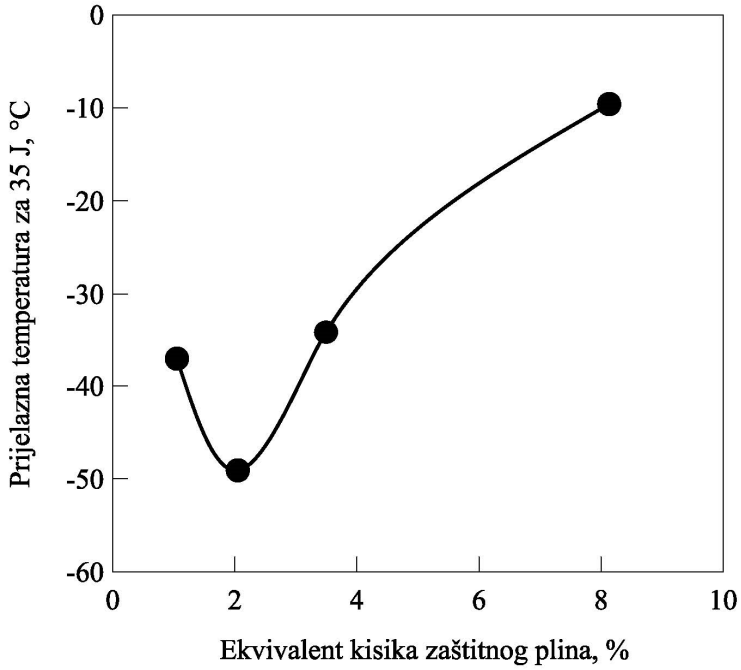
Utjecaj acikularnog ferita u metalu zavara na udarni rad loma

Acikularni ferit predstavlja poželjnu mikrostrukturu jer poboljšava udarni rad loma metala zavara. Prema [86] pri zavarivanju elektrolučnim postupkom pod praškom povećava udarni rad loma metala zavara s porastom udjela acikularnog ferita, slika 122. Acikularni ferit svojim sitnim zrnom predstavlja prepreku otvaranju i širenju pukotine.



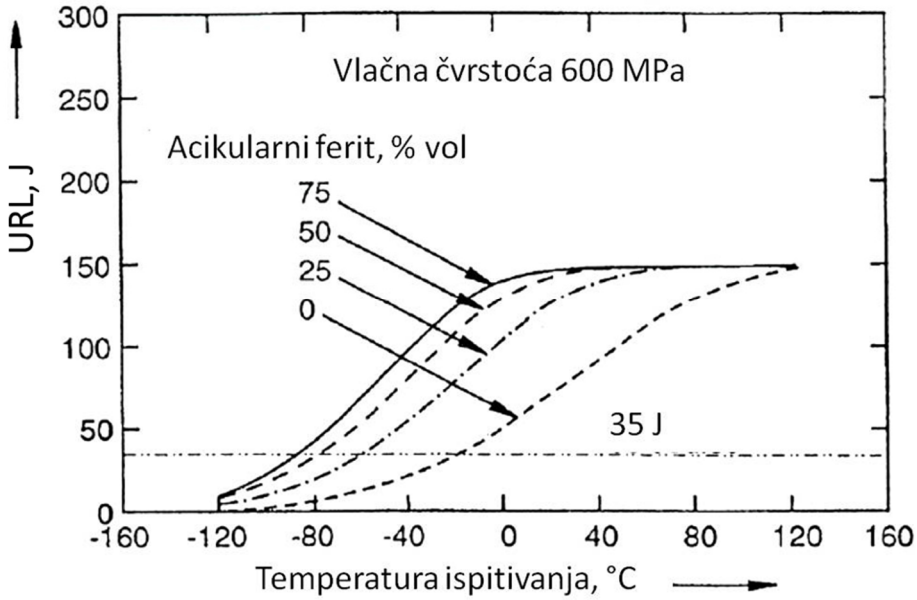
Slika 122: Utjecaj acikularnog ferita na udarni rad loma pri EPP zavarivanju [86]

Stvaranje alotriomorfnog ferita po granicama zrna, pločastog primarnog ferita i gornjeg bainita ima značajan negativni utjecaj na udarni rad loma jer su ove mikrostrukture pogodne za širenje pukotine. U [85] je ispitivan udarni rad loma u metalu zavara kod MAG postupka te je utvrđena ovisnost ekvivalenta kisika na prijelaznu temperaturu Charpy-V udarnog rada loma od 35 J. Na slici 123 vidljivo je da su minimalne prijelazne temperature – 50 °C pri udarnom radu loma od 35 J zabilježene za ekvivalent kisika od približno 2 % što odgovara maksimalnom udjelu acikularnog ferita u metalu zavara, slika 117. To jasno dokazuje pozitivan utjecaj acikularnog ferita na udarni rad loma.



Slika 123: Ovisnost prijelazne temperature o ekvivalentu kisika [85]

Posebno se može i razmatrati mehanizam nastanka acikularnog ferita ovisno o veličini oksidnih uključaka. U metalu zavara intergranularno nastali acikularni ferit može poboljšati udarni rad loma zbog smanjenja graničnog alotriomorfnog ferita, ali uključci promjera većeg od 1 µm - 1,5 µm mogu inicirati nastanak pukotina. Međutim acikularni ferit nastaje prvenstveno na površini uključaka promjera od 0,3 µm do 0,9 µm koji nisu potencijalni inicijatori pukotina. Nema dokaza da titanovi oksidni uključci s promjerom 2 µm – 5 µm utječu na nastanak pukotina dok kalcij aluminatni uključci promjera 2 µm – 3 µm uzrokuju nastanak pukotina što je pokazano CTOD testovima [90, 91]. Analogne trendove u kontekstu utjecaja acikularnog ferita na prijelaznu temperaturu udarnog rada loma kod čelika povišene čvrstoće pokazano je i u [91], slika 124.

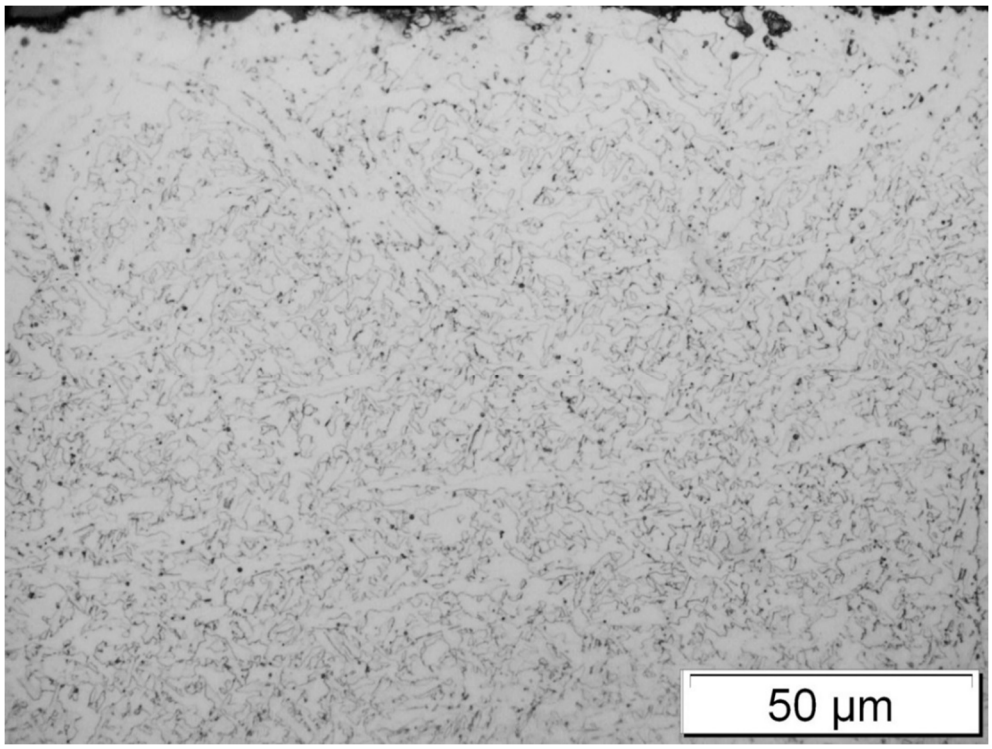


Slika 124: Utjecaj acikularnog ferita u metalu zavara na krivulje prijelazne temperature udarnog rada loma [91]

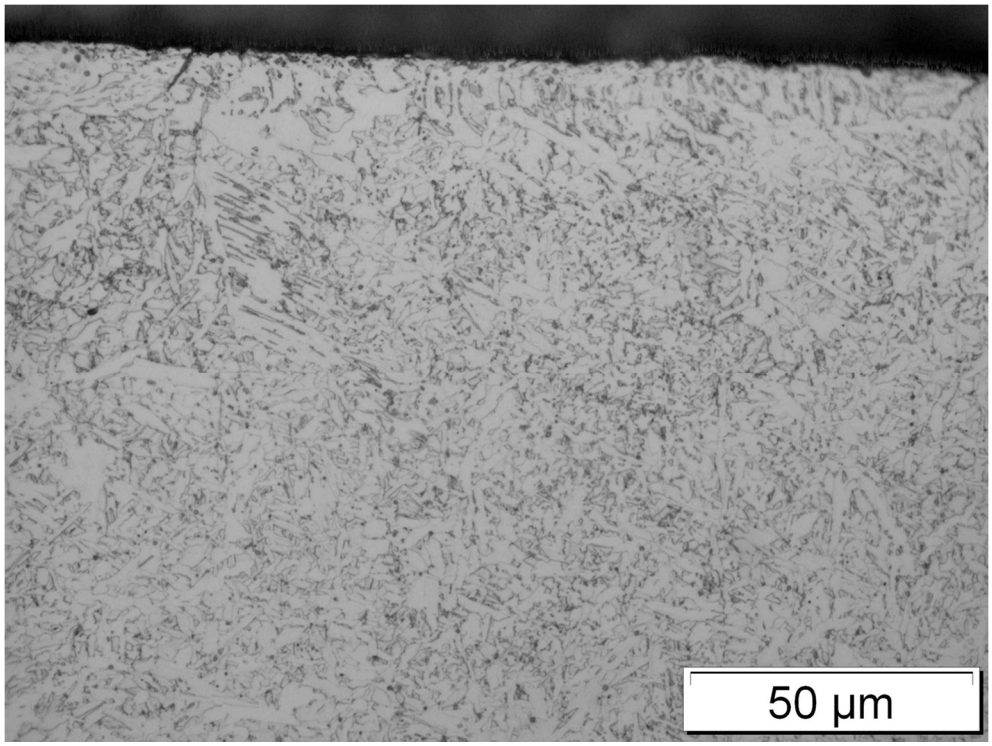
Komentar rezultata udarnog rada loma u metalu zavara

Rezultati ispitivanja udarnog rada loma pokazali su padajući trend s porastom udjela ugljičnog dioksida tj. s porastom ekvivalenta kisika od 3,37 % do 23,78 %. To ukazuje da se za primijenjene razine unosa topline i udjele ugljičnog dioksida u argonu stvoreni uvjeti za formiranje različitih mikrostruktura s promjenjivim udjelom acikularnog ferita. Tipična mikrostruktura u metalu zavara za stanje pokusa 9 prikazana je na slici 125 gdje je vidljiva sitnozrnata mikrostruktura u kojoj prevladava acikularni ferit, dok je na slici 126 prikazana mikrostruktura u metalu zavara za stanje pokusa 10, s maksimalnim ekvivalentom kisika. Na slici 127 su također vidljivi homogeno disperzirani oksidni uključci koji su poslužili kao mjesta nukleacije pri stvaranju acikularnog ferita.

Za stanje pokusa 10 vidljiva je također mikrostruktura s pretežnim udjelom acikularnog ferita, ali s relativno manjim udjelom u odnosu na stanje pokusa 9, što odgovara trendu na slici 117.



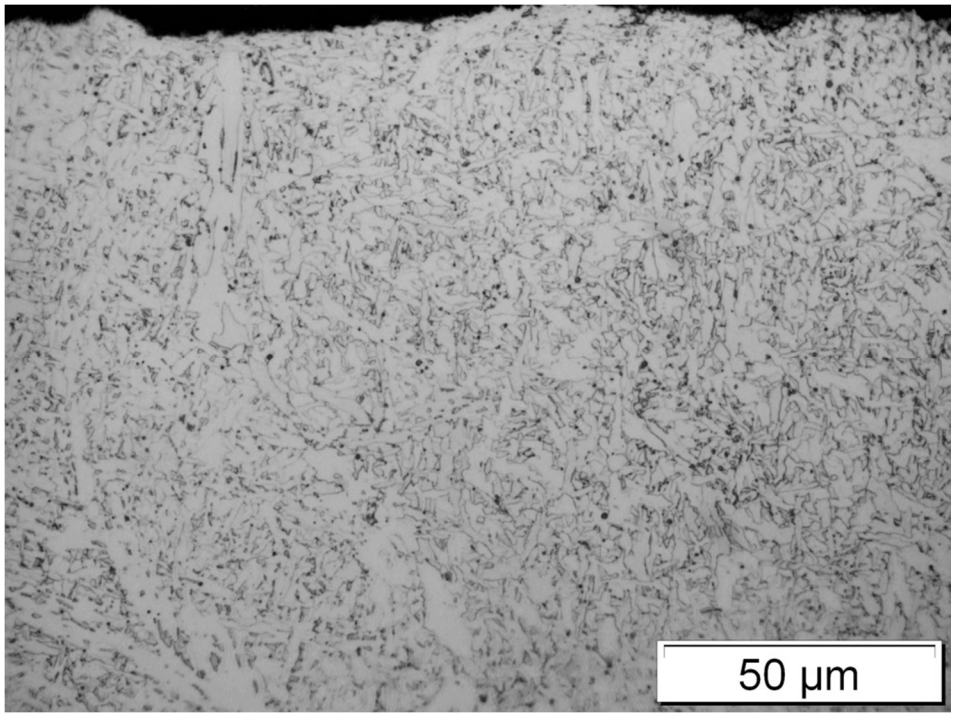
Slika 125: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 9



Slika 126: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 10

Istraživanja [92] su pokazala da za formiranje acikularnog ferita uz postojanje odgovarajućih nukleacijskih mjesta u obliku oksida, brzina hlađenja treba biti relativno visoka. To je u ovom radu i ostvareno, ali se područje formiranja acikularnog ferita u TTT dijagramu (prema slici 121) pomiče ovisno o udjelu kisika u zavaru tako da toplinski uvjeti zavarivanja moraju biti optimirani u skladu s kemijskim sastavom metala zavara. Osim acikularnog ferita, pad udarnog rada loma se također može pripisati gubitku legirnih elemenata prvenstveno Mn i Si, te povećanom udjelu oksidnih uključaka u metalu zavara, što je i dokazano određivanjem kemijskog sastava metala zavara za minimalni i maksimalni ekvivalent kisika, metalografskom analizom na svjetlosnom i skenirajućem elektronskom mikroskopu te EDS analizom. Posljedica toga je da su maksimalne vrijednosti udarnog rada loma za sve razine unosa topline i temperature predgrijavanja postignute za minimalni udio ugljičnog dioksida od 8 % CO_2.

Ukoliko se promjene vrijednosti udarnog rada loma promatraju s aspekta unosa topline vidljivo je da s porastom unosa topline dolazi do pada udarnog rada loma, što se može pripisati većem vremenu $t_{8/5}$ i mikrostrukturi metala zavara s većim zrnom. Na slici 127 vidljiva je mikrostruktura metala zavara kao rezultat unosa topline od 15,36 kJ/cm, stanje pokusa 12. Da bi se utvrdili trendovi formiranja udjela acikularnog ferita potrebno bi bilo i dalje reducirati ili povećati vremena $t_{8/5}$ kako bi se dobio širi raspon utjecaja topline.



Slika 127: Mikrostruktura metala zavara uzorka stanja pokusa 12

S druge strane povećanjem temperature predgrijavanja na 140 °C mijenja se trend jer je zabilježen lagani rast udarnog rada loma. Na temelju prethodno iznesenih činjenica moguće je pretpostaviti da se pri višoj temperaturi predgrijavanja povećava količina oksidnih uključaka, prvenstveno spojeva Mn i Si, koji povećavaju udarni rad loma s porastom unosa topline. Uzrok je potrebno tražiti u mehanizmu solidifikacije jer je zbog sporijeg procesa skrućivanja omogućeno ravnomjernije razmještanje oksidnih uključaka. Međutim, ako se prema primijenjenoj metodologiji za 18 % CO_2 u zaštitnom plinu izračuna ekvivalent kisika (12 %) vidljivo je da se ne ostvaruje optimalno područje za postizanje maksimalnog udjela acikularnog ferita u metalu zavara, već da je optimalna mješavina s 8 % CO_2. To ponovo ukazuje na važnost utjecaja brojnosti i oblika oksidnih uključaka na mehanička svojstva zavara. Povećanje udarnog rada loma kod maksimalne temperature predgrijavanja od 140 °C može se također protumačiti mehanizmom toplinske obrade prethodno zavarenih slojeva tj. intenzivnijim temperaturama držanja i sporijim hlađenjem.

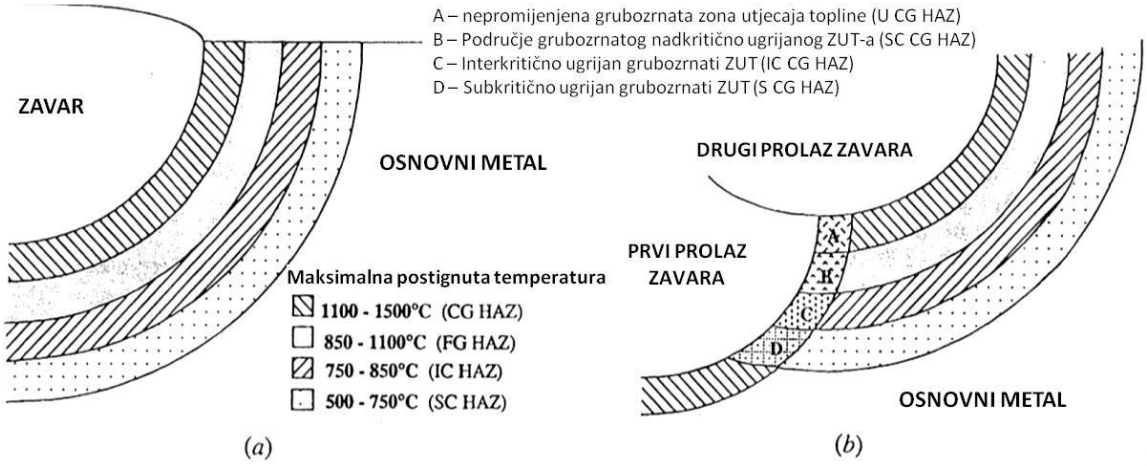
6.2 ANALIZA REZULTATA UDARNOG RADA LOMA ZONE UTJECAJA TOPLINE

Formiranje mikrostrukture u zoni utjecaja topline prvenstveno ovisi o temperaturi ugrijavanja pojedine zone te o brzini hlađenja, koja je određena unosom topline, debljinom materijala i temperaturom predgrijavanja.

Kod višeprolaznog zavarivanja dolazi do kompleksnih termodinamičkih ciklusa koji u pojedinim područjima zone utjecaja topline, ovisno o spomenutim parametrima, oblikuju mikrostrukturu koja je višestruko podvrgnuta različitom intenzitetu ugrijavanja i hlađenja. Grubozrnata mikrostruktura u ZUT-u ili interkritično ponovno zagrijana zona ZUT-a ima najniži udarni rad loma koja opada s porastom topline.

Međutim, novija istraživanja (kod normaliziranih feritno-perlitnih čelika i niskougljičnih TMCP čelika) pokazala su da se minimalni udarni rad loma ostvaruje u interkritičnom ili podkritičnom dijelu ZUT-a kod zavarivanja s niskim unosom topline. Ako se koristi dodatni materijal veće čvrstoće uz niske unose topline dobiva se uži ZUT također veće čvrstoće koji će u interkritičnom i podkritičnom području manje tvrdoće inicirati nastanak pukotina [91, 93].

Pojedina područja zone utjecaja topline prikazane su za slučajeve jednoprolaznog i višeprolaznog zavarivanja na slici 128.



Slika 128: Shematski prikaz mikrostruktura u
a) jednoprolaznom i
b) višeprolaznom zavarivanju [94]

Određivanje vremena $t_{8/5}$

Kako bi se rezultati za različita stanja pokusa mogli komparirati potrebno je utvrditi vrijeme hlađenja, $t_{8/5}$, u temperaturnom rasponu između 800 °C i 500 °C, koje definira dinamiku hlađenja i formiranje mikrostrukture u zoni utjecaja topline.

Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ računa se prema 2D modelu norme HRN EN 1011-2:2002; Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika (EN 1011-2:2001): [95]

$$t_{8/5} = (4300 - 4{,}3 \cdot \vartheta_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500-\vartheta_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800-\vartheta_0}\right)^2\right] \cdot F_2 \qquad (20)$$

Pri čemu su:

- ϑ_0 - temperatura predgrijavanja, °C
- Q - unos topline, kJ/mm
- d - debljina materijala, mm

Rezultati vremena $t_{8/5}$ i srednje brzine hlađenja u temperaturnom intervalu između 800 i 500 °C prikazani su u tablici 32.

Tablica 32: Rezultati vremena $t_{8/5}$ i srednje brzine hlađenja u temperaturnom intervalu između 800 i 500°C za sva stanja pokusa

Stanje pokusa	**Volumni udio, % CO_2**	**Unos topline Q, kJ/mm**	**Temperatura predgrijavanja ϑ_0, °C**	**Vrijeme, $t_{8/5}$, s**	**Srednja brzina hlađenja, °C/s**
1	12	1	45	11,4	26,4
2	24	1	45	11,4	26,4
3	12	1,4	45	22,3	13,5
4	24	1,4	45	22,3	13,5
5	12	1	115	15,8	19,0
6	24	1	115	15,8	19,0
7	12	1,4	115	31,0	9,7
8	24	1,4	115	31,0	9,7
9	8	1,2	80	19,2	15,6
10	28	1,2	80	19,2	15,6
11	18	0,864	80	9,9	30,2
12	18	1,536	80	31,4	9,5
13	18	1,2	20	14,8	20,3
14	18	1,2	140	25,8	11,6
15	18	1,2	80	19,2	15,6
16	18	1,2	80	19,2	15,6
17	18	1,2	80	19,2	15,6

Mikrostruktura čelika X80 u zoni utjecaja topline

Mikrostruktura čelika X80 u zoni utjecaja topline prvenstveno se sastoji od martenzita i pretežno od gornjeg bainita s martenzitno-austenitnim područjima [94, 96 - 98].

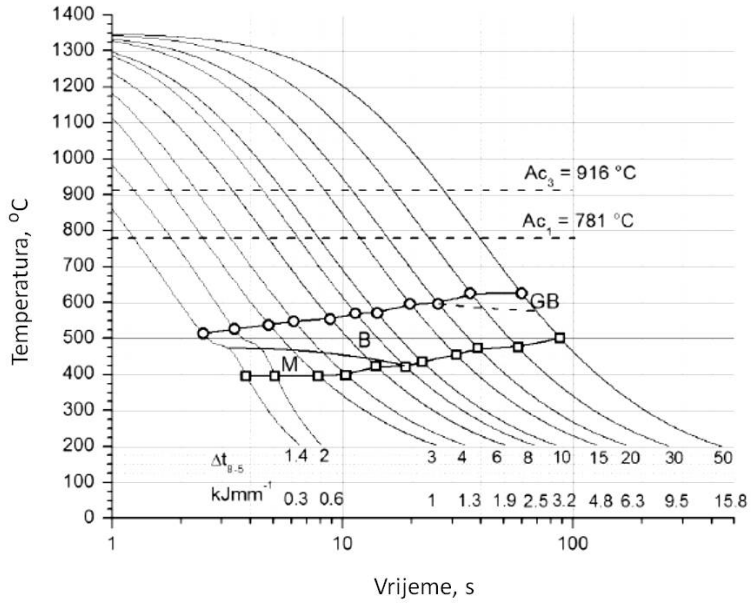
Stvaranje bainitne strukture u grubozrnatom ZUT-u omogućeno je brzim hlađenjem koje je posljedica malog unosa topline. Relativno visoke maksimalne temperature u grubozrnatom ZUT-u dovode do porasta austenitnog zrna zbog smanjenja topivosti na granicama zrna i visoke kinetičke pokretljivosti. I dok acikularni ferit i bainit nastaju istim mehanizmom, bainit nastaje na granicama austenitnog zrna dok acikularni ferit primarno nastaje na intermetalnim uključcima unutar samog zrna [99, 100]. Temperatura pretvorbe je potisnuta redukcijom

veličine austenitnog zrna i ovaj fenomen se pripisuje smanjenju nukleacijskih mjesta nužnih za rast zrna.

Brojna istraživanja [100, 101] su pokazala i da isti kemijski sastav čelika može rezultirati stvaranjem mikrostrukture bainita ili acikularnog ferita ako se pri hlađenju javlja deformacija. Kada deformacija nema javlja se prvenstveno bainit, što je u kontekstu udarnog rada loma lošija varijanta.

Što se tiče maksimalne temperature u ZUT-u , koja ovisi o unosu topline i predgrijavanju, a u ovom slučaju i udjelu CO_2 (koji poboljšava toplinsku vodljivost) pokazano je da ona znatno utječe na različitost mikrostrukturnih faza. Istraživanja su pokazala da se npr. pri usporedbi hlađenja s vršnih temperatura od 1350 °C i 900 °C mijenja raspon udjela mikrostruktura. Tako npr. kod maksimalne temperature od 1350 °C i za raspon brzina hlađenja $t_{8/5}$ od 1,3 s do 50 s dolazi do formiranja martenzita, bainitna i granularno bainitne mikrostrukture. Za maksimalnu temperaturu od 900 °C formirane su martenzitna, bainitna, poligonalno feritna, perlitna i martenzitno-austenita mikrostruktura, za raspon $t_{8/5}$ između 1 do 10^4 s.

Ako se usporede izračunata vremena $t_{8/5}$ s podacima iz literature i TTT dijagramima čelika sličnog kemijskog sastava i mikrostrukture, vidljivo je da se za raspone $t_{8/5}$ od 10 s do 30 s može očekivati prvenstveno bainitna mikrostruktura u zoni utjecaja topline, slika 129.



Slika 129: TTT dijagram čelika X80, temperatura zagrijavanja 1350 °C [101]

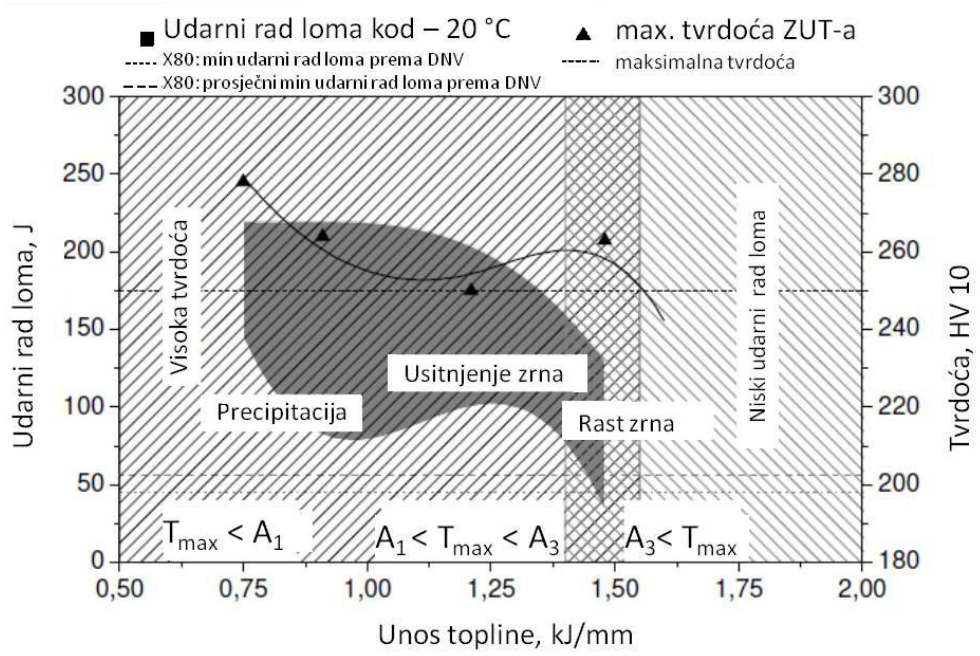
Stvaranje acikularnog ferita pri zavarivanju moguće je u grubozrnatom ZUT-u zbog malih austenitnih zrna, dimenzija 50 µm - 60 µm, kao i prisutnih uključaka, dok se martenzitno-austenitni konstituenti stvaraju pri hlađenju nakon zagrijavanja u rasponu između interkritičnih temperatura A_1 i A_3. Prilikom nukleacije i rasta acikularnog ferita u rasponu između 600 °C – 680 °C poligonalni tip martenzitno/austenitne mikrostrukture nastaje između kristala acikularnog ferita kao rezultat povećanog udjela ugljika [102, 103]. Zbog toga veličina primarnog austenita uzrokovana temperaturom austenitizacije i pogrubljivanje austenitnog zrna prilikom hlađenja ima direktan utjecaj na formiranje M/A konstituenata. Inicijalni grubozrnati ZUT stvoren nakon jednog prolaza sastoji se od gornjeg bainita koji je nastao iz primarno velikog austenitnog zrna, a što je slučaj kod većine niskolegiranih čelika visoke čvrstoće. Pri interkritičnom zagrijavanju kod zavarivanja drugog prolaza novostvoreni austenit prvo raste do granica austenitnih zrna, a zatim se transformira u ferit, bainit i martenzit. Pri hlađenju, novi visokougljični austenit transformira se u bainit ili mješovitu mikrostrukturu visokougljikičnog bainita i M/A konstituenata. Masivni M/A otoci formiraju se na granicama zrna primarnog austenita dok se izduženi M/A konstituenti stvaraju na feritnim, bainitno-feritnim i martenzitnim granicama kristala u interkritičnom grubozrnatom ZUT-u [94, 105].

Prilikom interkritičnog zagrijavanja osnovnog materijala novonastali austenit raste iz perlita, bainita i martenzita koji imaju veći udio ugljika. Ova nova područja visokougljičnog austenita transformiraju se u M/A konstituente između feritnih zrna. Iz toga slijedi da je volumni udio M/A konstituenata u interkritičnom području ZUT-a ovisan o udjelu ugljika ili o udjelu perlita u čeliku [104].

Utjecaj brzine hlađenja na stvaranje acikularnog ferita i otoka M/A konstituenata ovisi o kemijskom sastavu i toplinskom ciklusu zavarivanja. Kod niskougljičnih TMCP čelika acikularni ferit i M/A konstituenti stvaraju se u grubozrnatom području ZUT-a u širokom rasponu brzina hlađenja (acikularni ferit uz $t_{8/5}$ = 5,6 s - 1000 s; M/A konstituenti uz $t_{8/5}$ = 10 s - 1000 s). Maksimalni udio acikularnog ferita i M/A konstitenata u grubozrnatom području ZUT-a postignut je pri $t_{8/5}$ = 30 s. Kako raste $t_{8/5}$, količina M/A konstituenata raste ubrzano u području $t_{8/5}$ do 30 s nakon čega dolazi do zasićenja i laganog pada kod većih vrijednosti $t_{8/5}$ zbog raspada u ferit i karbide kada je $t_{8/5}$ veći od 50 s [90].

Usporedba rezultata s podacima iz literature

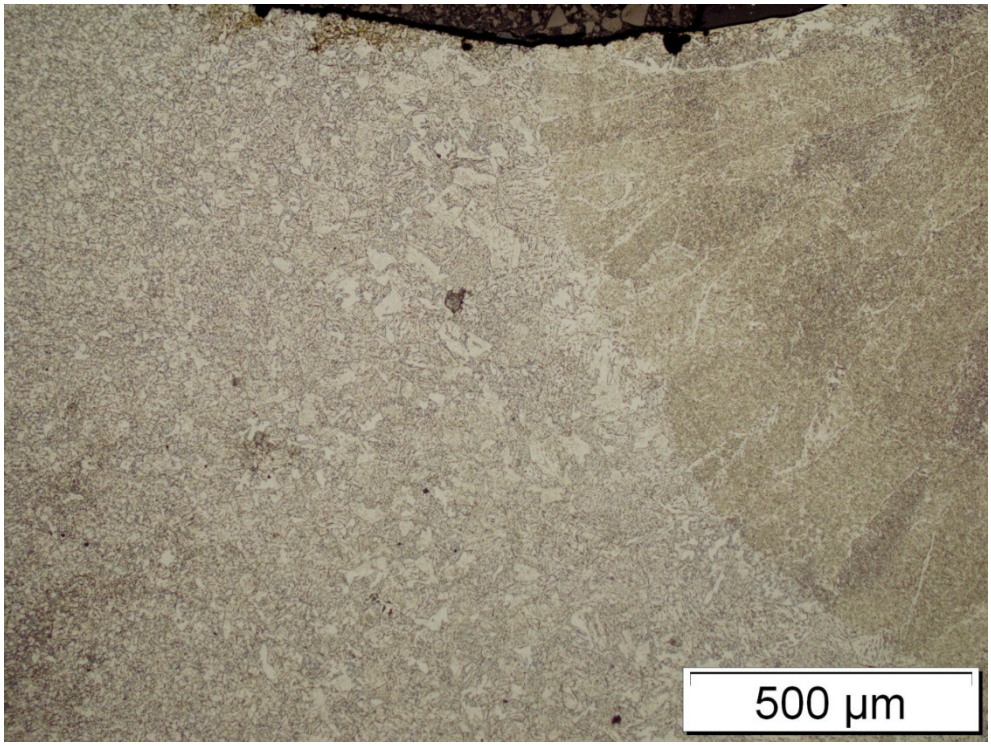
Kod svih stanja pokusa utvrđen je pad udarnog rada loma u ZUT-u s povećanjem unosa topline i temperature predgrijavanja što korelira s provedenim istraživanjima drugih autora [105, 106], slika 130. Upravo je za unos topline od 8 kJ/cm postignut maksimalni udarni rad loma koja se snizuje s porastom unosa topline prema 15 kJ/cm , prema slici 130. To je objašnjeno pomoću tri glavna mehanizma u ZUT-u koja ovise o $t_{8/5}$ tj. precipitaciji, usitnjenju zrna te u konačnici porastu zrna. Ovisno o $t_{8/5}$ regulira se maksimalna temperatura u ZUT-u (ispod A_1, između A_1 i A_3 te iznad A_3) što rezultira i odgovarajućom mikrostrukturom.



Slika 130: Ovisnost URL i tvrdoće u korijenskom prolazu o unosu topline za čelik X80 [104]

Udarni rad loma ZUT-a ovisi o udjelu strukture koja dominira: grubozrnate, sitnozrnate ili djelomično austenitizirane. Ovisno o položaju utora na epruveti ispitivat će se udarni rad loma te dominantne strukture. Kako je utor smješten na liniju staljivanja onda će definitivno odavati karakteristike grubozrnatog dijela ZUT-a. Porastom unosa topline povećava se i veličina zrna u grubozrnatom ZUT-u zbog veće maksimalne tempereture kao i vremena zadržavanja na maksimalnoj temperature. S većim unosom topline povećava se temperatura držanja pa dolazi do pada udarnog rada loma (iznad A_3) jer se s povećanim unosom topline i većom temperaturom predgrijavanja postiže viši temperaturni maksimum u području ZUT-a.

Na slici 131 prikazana je tipična mikrostruktura u zoni utjecaja topline za stanje pokusa 12, uzorak 121. Vidljiva je grubozrnata bainitna mikrostruktura s relativno malim udjelom martenzitno austenitnih konstituenata što odgovara postignutoj $t_{8/5}$ od 31 s.



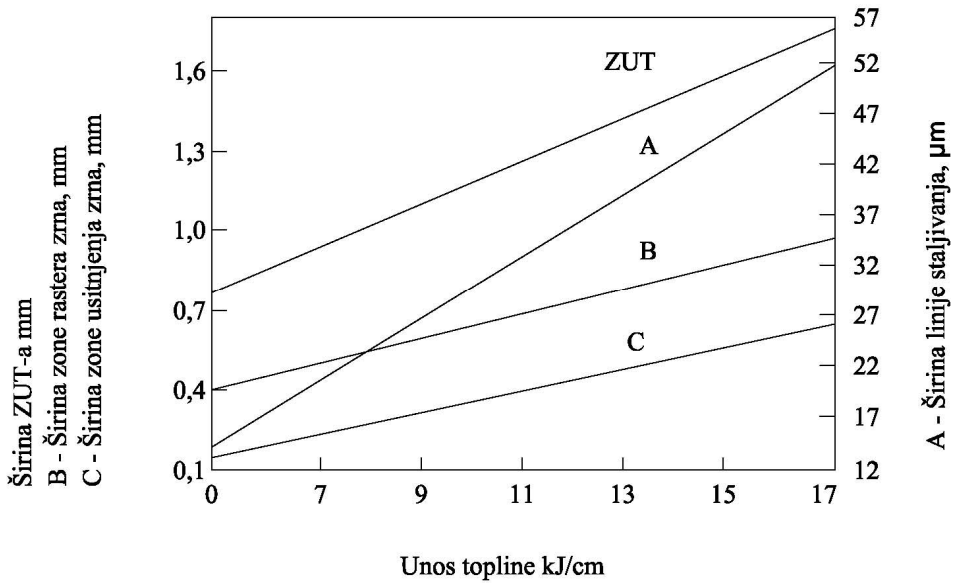
Slika 131: Mikrostruktura u zoni utjecaja topline za uzorak 121

Kako udio CO_2 utječe na bolji prijenos topline, očekuje se dodatno povećanje $t_{8/5}$ pa je također vidljivo da porastom udjela CO_2 dolazi do pada udarnog rada loma. To se može objasniti većom temperaturom u zoni utjecaja topline, ali se mogu očekivati i oksidni uključci u zoni djelomičnog taljenja gdje zbog velike brzine hlađenja na tom dijelu ne dolazi do disperziranja oksidnih uključaka, već je prisutna njihova veća koncentracija u dijelu zone utjecaja topline gdje se javlja i povećanje zrna i povećana tvrdoća. Slijedi da se osim unosa topline, kao utjecajni faktor koji znatno smanjuje udarni rad loma u zoni utjecaja topline mora uzeti i količina ugljičnog dioksida u zaštitnom plinu. Očito postoji isti trend u kontekstu utjecaja udjela ugljičnog dioksida na udarni rad loma u metalu zavara i zoni utjecaja topline, tj. s povećanjem udjela dolazi do smanjenja udarnog rada loma. Zaključno, preporučljivo je da se pri zavarivanju TMCP čelika visoke čvrstoće reducira količina ugljičnog dioksida sa

standardnih 18 % na 8 % ili maksimalno 12 % u argonu kako bi se zadržale sve operativno-tehnološke karakteristike a istovremeno značajno poboljšala mehanička svojstva tj. udarni rad loma.

Osvrt na širinu ZUT-a

Širina zone utjecaja topline opada sa smanjenjem unosa topline i temperature predgrijavanja, što je i logično za očekivati budući da su ta dva faktora dominantna u određivanju unosa topline. Kod najvišeg udjela ugljičnog dioksida od 28 %CO_2 vidljivo je da dolazi do relativizacije utjecaja unosa topline (gotovo linearan odnos) što se sada može protumačiti dodatnim toplinskim unosom nastalim zbog rekombinacije ali i bolje toplinske vodljivosti ugljičnog dioksida. Za niže vrijednosti CO_2 u mješavini termodinamički utjecaj zaštitnog plina nije vidljiv ali porastom koncentracije kompenzira se smanjeni unos topline. Dominantan utjecaj ima temperatura predgrijavanja jer se njome upravlja intenzitetom širenja topline i formiranjem ZUT-a. Rezultati koreliraju s rezultatima prikazanim u [107], slika 132.



Slika 132: Utjecaj unosa topline na širinu pojedinih zona ZUT-a [106]

6.3 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA TVRDOĆE

Usporedbom izmjerenih tvrdoća u ZUT-u s podacima iz literature [105, 106] utvrđena je dobra korelacija rezultata. Pokazalo se da su vrijednosti izmjerene tvrdoće u ZUT-u relativno niske tj. ispod 250 HV10. U metalu zavara su postignute veće tvrdoće zbog odabira dodatnog materijala po tzv. overmatching kriteriju te je moguće smanjenje tvrdoće odabirom dodatnog materijala manje čvrstoće.

To pokazuje da je u području parametara korištenim u ovom radu u ZUT-u postignuta mikrostruktura prikladna za primjenu cjevovoda u tzv. „sour service“ okolišu jer npr. DNV OS 101 Submarine pipeline systems [108] ograničava maksimalnu tvrdoću na 250 HV10, a isto je ograničenje prema normi ISO 15156-2:2009 Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production - Part 3: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons [109] (u korijenskom zavaru). Sa stajališta pojave hladnih pukotina nije dostignuta razina tvrdoće koja bi prelazila dozvoljenih 350 HV10 prema API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities [101] što ukazuje na relativno mali rizik od pojave hladnih pukotina, posebno ako se zavarivanje izvodi postupcima s niskim udjelom vodika (npr. primjena MAG, TIG ili bazično obložene elektrode i prašci).

S druge strane, vremena $t_{8/5}$ prema TTT dijagramu na slici 130 i mikrostrukturi na slici 132 pokazuju da dolazi prvenstveno do stvaranja bainitne mikrostrukture koja ima nešto višu tvrdoću ali kako se radi o višeprolaznom zavarivanju dolazi do popuštanja mikrostrukture ZUT-a i pada tvrdoće. Uz navedeno, važno je naglasiti da nije došlo do intenzivnog pada tvrdoće u zoni utjecaja topline jer bi posljedično došlo do smanjenja čvrstoće cjelovitog zavarenog spoja.

7. ZAKLJUČAK

U svrhu istraživanja utjecaja parametara zavarivanja na strukturu i svojstva TCMP čelika API 5L X80 provedeno je kompleksno istraživanje koje je uključilo planiranje pokusa, izradu ispitnih uzoraka, laboratorijska ispitivanja svojstava, te analize makro i mikrostrukture zavarenih spojeva. Na temelju dobivenih rezultata te rezultata provedene statističke obrade mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- Korištenjem odabranih nivoa parametara zavarivanja, shodno planu pokusa, i normi HRN EN ISO 15614-1 korištenjem robotske jedinice za zavarivanje izrađeni su zavareni spojevi iz ploča čelika API 5L X80. Vizualnom kontrolom zavara i makro uzoraka vidljivo je da u zavaru nema pojave površinskih nepravilnosti i pukotina, te da su postignuta zadovoljavajuća nadvišenja korijenskog zavara bez nehomogenosti u zavarenom spoju i bez neprovara zavarenog spoja. Time su zadovoljeni uvjeti za nastavak istraživanja i daljnja laboratorijska ispitivanja.
- Ispitivanje vlačne čvrstoće, konvencionalne granice razvlačenja, istezanja i kontrakcije zavarenih spojeva provedeno je prema važećoj normi na sobnoj temperaturi. Tijekom ispitivanja kod svih ispitnih uzoraka došlo je do loma u području osnovnog materijala pri opterećenjima koje odgovaraju vrijednostima iz certifikata osnovnog materijala. Neovisno o vrijednostima i kombinacijama korištenih parametara zavarivanja, mjesto zavarenog spoja na ispitnim uzorcima nije predstavljalo mjesto slabijih mehaničkih svojstava od svojstava osnovnog materijala. Ispitivanje udarnog rada loma zavarenog spoja, kao jednog od ključnih svojstava, provedeno je sukladno važećoj normi na temperaturi 0 °C radi mogućnosti usporedbe rezultata s vrijednostima iz certifikata materijala. Ispitan je udarni rad loma materijala zavara te osnovnog materijala u zoni utjecaja topline. Dobivene vrijednosti su značajno niže od vrijednosti udarnog rada loma navedene u certifikatu za korišteni čelik, ali još uvijek iznad minimalnih dozvoljenih vrijednosti za čelik API 5L X80. Mjerenja tvrdoće svih uzoraka u karakterističnim mjestima zavarenog spoja (osnovni materijal, zona utjecaja topline, materijal zavara) rezultirala su vrijednostima koje su ispod maksimalnih vrijednosti propisanih i u API 5L (345 HV10) i u HRN EN ISO 15614-1 (380 HV10). Pomoću analizatora slike analizirana je širina zone utjecaja topline na karakterističnim mjestima zavara svih uzoraka, te je ustanovljena značajna razlika u širini te zone ovisno o korištenim parametrima zavarivanja. Obzirom na značajno niži udarni rad

loma te zone u odnosu na osnovni materijal njezina širina može utjecati na ponašanje zavarenog spoja u eksploataciji.

- Pomoću centralno kompozitnog plana pokusa istraživana je značajnost utjecaja varijabilnih faktora pokusa te njihovih interakcija na svojstva zavara. Obzirom da su tijekom statičkog vlačnog ispitivanja sve epruvete pukle u području osnovnog materijala nije se istraživao utjecaj korištenih parametara zavarivanja na svojstva koja se ispituju tim ispitivanjem. Centralno kompozitni plan pokusa pokazao da ne postoji značajan utjecaj primijenjenih parametara zavarivanja na tvrdoću zavarenog spoja. Međutim obrada rezultata dobivenih eksperimentom pokazala je da postoji značajan utjecaj parametara zavarivanja na udarni rad loma zavara, te na udarni rad loma i širinu zone utjecaja topline. Najveći utjecaj na udarni rad loma zavara ima unos topline, zatim udio CO_2 u Ar, a najmanji utjecaj ima temperatura predgrijavanja. Na udarni rad loma zone utjecaja topline također najveći utjecaj ima unos topline, zatim udio CO_2 u Ar, a najmanji utjecaj ima iznos temperature predgrijavanja. Ista zakonitost se pojavljuje i kod širine zone utjecaja topline: najveći utjecaj ima unos topline, zatim udio CO_2 u Ar, a najmanje utjecajan je iznos temperature predgrijavanja. Detaljnim analizama mikrostrukture materijala te analizama termodinamičkih procesa u karakterističnim područjima zavarenog spoja a uslijed različitih parametara zavarivanja objašnjeni su dobiveni rezultati.
- U radu su izrađeni modeli koji doprinose razumijevanju utjecaja korištenih parametara zavarivanja na ispitivana svojstva zavarenog spoja, a posredno omogućuju i njihovo optimiranje. Njihovim korištenjem moguće je predvidjeti, tj. izračunati svojstva zavarenog spoja čelika API 5L X80 uz poznavanje korištenih parametara zavarivanja. Koeficijenti determinacije izrađenih modela pokazuju da su dobiveni modeli vrlo kvalitetni te da dobro prezentiraju realne uvjete.

Time se može zaključiti da je cilj istraživanja ostvaren, tj. da su istraživanjem dobiveni rezultati koji značajno doprinose razumijevanju utjecaja istraživanih parametara zavarivanja na strukturu i svojstva API 5L X80 čelika. Taj je cilj ostvaren kroz potvrđivanje pretpostavljenih hipoteza, tj. da je laboratorijskim ispitivanjima i karakterizacijom materijala moguće utvrditi promjene i povezanost strukture i svojstva API 5L X80 čelika u ovisnosti o korištenim parametrima zavarivanja te da je primjenom centralno kompozitnog plana pokusa

moguće odrediti značajnost parametara zavarivanja na strukturu i svojstva API 5L X80 čelika, veličine njihovog djelovanja i interakciju.

Na osnovi provedenog istraživanja i dobivenih rezultata otvaraju se i nova područja za daljnja istraživanja. Njih treba prvenstveno usmjeriti na određivanje parametara zavarivanja kojima je moguće dobiti istovremeno što bolje vrijednosti svojstava zavarenog spoja (određivanje globalnog optimuma). Nastavak istraživanja uključuje i istraživanje utjecaja proširenih vrijednosti nivoa korištenih parametara zavarivanja čime bi se ujedno i pomoglo u sagledavanju svih opcija koje su moguće u realnim sustavima.

8. LITERATURA

[1] Felber, S.: Pipeline Engineering, OEGS, Beč, Austrija, 2009.

[2] Palmer, A.C.: King, R.A.: Subsea pipeline engineering, USA, 2008.

[3] API 5L, Specification for Line Pipe, 44th edition, 2007. ; ISO 3183:2007: Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems

[4] HRN EN 10208-2:2009 - Čelične cijevi za cjevovode zapaljivih medija - Tehnički uvjeti isporuke - 2. dio: Cijevi razreda B.

[5] Ouchi, Ch.: Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes, ISIJ International, Vol.41, 2001. No.6. P. 542–553

[6] Bedokthi, B.: Dolati, A.; Koukabi, A.H.: Effects of alloying elements and microstructure on the susceptibility of welded HSLA steel to hydrogen induced cracking and sulfide stress cracking, Materials Science and Engineering A Volume 507, Issues 1–2, 15 May 2009, Pages 167–173 507.

[7] Garašić, I.: Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2008.

[8] Kralj, S.; Dunđer, M.: Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25 CrMo4 i Ck 45 prema nastajanju hladnih pukotina, Zavarivanje (0044-1902) 43 (2000), 1/2; 5-16 43.

[9] Kralj, S.; Kožuh, Z.; Garašić, I.; Dorn, L.: Investigation into cold cracking in underwater wet welding of API 5L X70 steel, Transactions of FAMENA (1333-1124) 33 (2009), 3; 25-34.

[10] Vručinić, G.: Osjetljivost čelika na pojavu hladnih pukotina – metoda ispitivanja implant testom, Zavarivanje 29, 1986.

[11] Malina, J.; Malina, M.; Vručinić, G.: Otpornost zavarenih spojeva TMCP čelika prema vodikovoj krhkosti, Zavarivanje (0044-1902) 52 (2009), 3/4; 81-86.

[12] Huang, F.; Li, X.G.;Liu, J.; Qu, Y.M.; Jia, J.; Du, C.W.: Hydrogen-induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of different microstructure X80 pipeline steel, Journal of Materials Science February 2011, Volume 46, Issue 3, pp 715-722

[13] Hardie, D.; Charlies, E.A.; Lopez, A.H.: Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels; Corrosion Science 48, 2006, 4378-4385.

[14] Malina, J.; Begić Hadžipašić, A.; Malina, M.: Utjecaj mikrostrukture na difuzijska svojstva vodika u niskolegiranim čelicima, MATRIB, 2006.

[15] Begić Hadžipašić, A.: Utjecaj mikrostrukture na difuziju vodika i krhkost višefaznih sitnozrnatih čelika povećane plastičnosti i čvrstoće, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet u Sisku, Sisak, 2010.

[16] Cwiek, J.: Hydrogen assisted cracking of high strength weldable steels in sea-water, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 164–165, 15 May 2005, Pages 1007–1013.

[17] Pitrun, M.: The effect of welding parameters on levels of diffusible hydrogen in weld metal deposited using gas shielded rutile flux cored wires, PhD Thessis, University of Wollongong, 2004.

[18] Nevasmaa, P.: Predictive model for prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength multipass welds, Academic Dissertation, Oulu, 2003.

[19] Swieczko-Zurek, B.; Sobieszczyk, S.; Cwiek, J.; Zielinski, A.: Evaluation of susceptibility of high-strength steels to hydrogen delayed cracking, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 18, Issue 1-2, 2006.

[20] Law, M.; Nolan, D.; Holdstock, R.: Method for the quantitative assessment of transverse weld metal hydrogen cracking, Materials Characterization Volume 59, Issue 8, August 2008, Pages 991–997.

[21] Malina, J.; Malina, M.; Begić Hadžipašić, A.: Otpornost zavarenih TMCP čelika na koroziju u H2S mediju, Zbornik radova, 3. Međunarodno savjetovanje: Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarivanju i srodnim postupcima / Kožuh, Zoran (ur.). - Zadar : Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja , 2005. 119-126.

[22] ASM Handbook Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering, SAD, 1993.

[23] Cooper, R.; Silva, J.H.F.; Trevisan, R.E.: Influence of preheating on API –X80 pipeline joint welding with self-shielded flux cored wire; Welding International 2005 Volume 19, Issue 11, 2005.

[24] Felber, S.: Pipeline Engineering, OEGS, Vienna, Austria, ÖGS, 2009, ISBN 978-3-9501528-2-1

[25] Imai, I.: General Properties of TMCP Steels, Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26–31, 2002, pp. 392 – 396

[26] Tomić Kovačević, T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[27] Adamczyk, J.: Development of the microalloyed constructional steels, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 14, Issue 1—2, 2006, pp. 9-20

[28] Henderieck, G.: Steel weldability, Gietech BV, January 2009, pp. 1 – 31

[29] Willms, R.: High strength steel for steel constructions, NSCC, 2009, pp. 597 - 604

[30] Sellars, C.M.; Davies, G.J.: Hot Working and Forming Processes, Ed. TMS, London, 1979, p. 3-15.

[31] Müschenborn, W. et al.: Proc. Int. Conf. Microalloying '95, Iron and Steel Soc., Pittsburgh PA, 1995, p. 35.

[32] Tanaka, T.: Proc. Int. Conf. Microalloying '95, Iron and Steel Soc., Pittsburg PA, 1995, p. 165.

[33] Kou, S.: Welding Metallurgy Handbook, 2nd ed. New York, USA: John Wiley and Sons, 2002.

[34] Kasuya, T; Yurioka, N.: Carbon Equivalent and Multiplying Factor for Hardenability of Steel, The Welding Journal, Vol 6, 1993, pp. 263 – 268

[35] Bailey, N.: Welding Steels without Hydrogen Cracking, Cambridge: Woodhead Publishing, 1993, p. 11-12, 35-36

[36] Kelkar, G.: Weld cracks, WJM Technologies, excellence in material joining, pp. 1-5

[37] Weld defects, ISF Aachen, 2009

[38] Bhadeshia, H.K.D.H.; Weld microstructures; Graduate Institute of Ferrous Technology, Korea

[39] Bhadeshia, H.K.D.H.: Bainite in steels, Transformations, Microstructure and Properties, second edition, IOM Communications, London, 2001.

[40] Evans, G.M.; Bailey, N.: Metallurgy of basic weld metal. Abington, Cambridge, England: Abington Publishing; 1997.

[41] Babu, S.: The mechanism of acicular ferrite in weld deposits, Current Opinion in Solid State and Materials Science 8 (2004) 267–278

[42] Babu, S.S.; Bhadeshia HKDH: Transition from bainite to acicular ferrite in reheated Fe-Cr–C weld deposits. Mater Sci Technol 1990;6:1005–20.

[43] Prokić – Cvetković, R.; Milosavljević, A.; Popović, O.; Kovačević, K.: Acikularni ferit u metalu šava niskougljičnih čelika; Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.

[44] Diaz-Fuentes, M.; Iza-Mendia, A.; Gutierrez, I.: Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by electron backscattered diffraction: study of their toughness behavior. Metall Mater Trans A 2003;34A:2505–16.

[45] Babu, S. S.: Acicular ferrite and bainite in Fe–Cr–C weld deposits. Ph.D. Thesis. University of Cambridge, UK; 1992.

[46] Yang, J.R.; Bhadeshia, H. K. D. H.: Thermodynamics of acicular ferrite transformation in alloy steel weld deposits. In: David SA, editor. Proceedings of the conference on advances in welding science and technology. Ohio: ASM International; 1987. p. 209–13.

[47] Babu S.S.; Bhadeshia, H.: Mechanism of the Transition from Bainite to Acicular Ferrite, Materials Tansactions Jim, vol. 32, pp. 679-688, Aug 1991.

[48] Harrison, P.L., Farrar, R.A.: Influence of oxygen-rich inclusions on the c to a transformation in high strength low alloy (HSLA) steel weld metals. J Mater Sci 1981;16:2218–26.

[49] ISF – AACHEN: Chapter 8. – Technical Heat Treatment - http://shbox.de, 2013

[50] Streisselberger, A.; Schwinn, V.; Hugo, R.; AG der Dillinger Huettenwerke: Microalloyed Structural Plate Rolling Heat Treatment And Applications

[51] Grubić, K.; Physical relationship between the shielding gas and process stability at MAG welding, EUROJOIN 3, 759-767, Bern, 30.03.- 01.04.2000.

[52] http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/c4200.pdf

[53] Juraga, K., Ljubić, M.; Živčić; Pogreške u zavarenim spojevima, treće izdanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007.

[54] Panić, V.; Utjecaj plinova pri zavarivanju na svojstva zavara; Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

[55] Suban, M., Tušek, J.: Osnovne značilnosti zaščitnih plinov in njihovih mešanic za MIG/MAG varjenje 1.del, Varilna tehnika, (1997) 1, 11-17

[56] Suban, M.; Tušek, J..; Vpliv zaščitnih plinov in njihovih mešanic za MIG/MAG varjenje na metalurške in mehanske lastnosti 3.del, Varilna tehnika, (1997) 3, 75-79

[57] http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig4_10.htm, 22.3.2012.

[58] http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handabook/592mig4_11.htm, 22.3.2012.

[59] Gadallah, R.; Fahmy, R.; Khalifa, T.; Sadek, A.: Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel, International Journal of Engineering and Technology Innovation, vol. 2, no. 1, 2012, pp. 01-12

[60] Huan, J.; Du, L.-X.; Wang, J.-J.; Gao, C.–R.: Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V–N high strength steel, Materials Science&EngineeringA577(2013)161–168

[61] Popović, O.; Burzić, M.; Prokić – Cvetković, R.; Milutinović, Z.: The Effect Of Heat Input On The Weld Metal Toughness Of Surface Welded Joint; 14th International Research/Expert Conference, TMT 2010, Mediterranean Cruise, 11-18 September 2010

[62] Hana, Y.D.; Jing, H.Y., Xu, L.Y.: Welding heat input effect on the hydrogen permeation in the X80 steel welded joints, Materials Chemistry and Physics 132 (2012) 216– 222

[63] Miller, D. K.: Preheat and Interpass Temperature, STRUCTURE, April 2003, pp. 14 – 15

[64] Hinton, R. W.; Wiswesser, R. K.: Estimating Welding Preheat Requirements for Unknown Grades of Carbon and Low-Alloy Steels, Welding Journal, november 2008, pp. 273 - 278

[65] Felber, S.; Loibnegger, F.: The Pipeline-Steels X100 and X120, International Institute of Welding; XI-929-09, pp. 1-24

[66] Del Vecchio, R. J.: Understanding Design of Experiments: A Primer for Technologists, Carl Hanser Verlag, Munich, 1997.

[67 Box, G.; Wilson, K. B. (1951): On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, Journal of Royal Statistical Society, Series B, 13, str. 1-38

[68] Alvarez, L. F.: Design optimization based on genetic programming, University of Bradford, UK, 2000.

[69] Statistica for Windows (Volume IV): Industrial Statistics, StatSoft, Inc., 1995.

[70] Stress crack prevention in PET carbonated soft drink bottles, International Society of Beverage Technologists, July 2000, http://www.bevtech.org/stress_crackpaper.htm, 21. 1. 2002.

[71] Myers, R. H.; Montgomery, D. C.: Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[72] Pirinen, M.: The Effects Of Welding Heat Input On The Usability Of High Strength Steels In Welded Structures; PhD thesis, University of Technology, Lappeenranta, Finland, May 2013 (in English)

[73] Qingyun S.; Dahang Li: Microstructure, mechanical properties and hydrogen induced cracking susceptibility of X80 pipeline steel with reduced Mn content, Materials Science & Engineering A 585, 2013, pp. 214–221

[74] HRN EN ISO 14175: 2008; Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008)

[75] HRN EN ISO 148-1:2012: Metalni materijali - Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom - 1. dio: Metoda ispitivanja (ISO 148-1:2009; EN ISO 148-1:2010)

[76] HRN EN ISO 15614-1; Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale - Ispitivanje postupka zavarivanja - 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla (ISO 15614-1:2004; EN ISO 15614-1:2004)

[77] HRN EN 876: 1999 Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Uzdužno vlačno ispitivanje zavara nastalih taljenjem (EN 876:1995)

[78] HRN EN ISO 6507-1:2008, Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu - 1. dio: Ispitna metoda (ISO 6507-1:2005; EN ISO 6507-1:2005)

[79] DESIGN EXPERT 7: http://www.statease.com/de70_man.html, 3.4.2013.

[80] Bauer, B.: Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.

[81] Del Vecchio, R.J.: Understanding Design of Experiments: A Primer for Technologists, Hanser Gardner Publications, January 1, 1997, ISBN-13: 978-1569902226

[82] Montgomery, D.C.; Design and analysis if experiments, 5th ed, New York, John Wiley & Sons, 2000.

[83] Kou, S.: Welding metallurgy 2nd ed., A Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-43491-4, New Jersey, 2003,

[84] Seferian , D.: Metalurgija zavarivanja, Građevinska knjiga, Beograd, 1969.

[85] Onsøien, M.I.; Liu, S.; Olson, L.D.: Shielding gas oxygen equivalent in weld metal microstructure optimization, Welding Journal, July 1996, pp. 216 - 224.

[86] Fleck, N. A.; Grong, Ø.; Edwards, G. R.; Matlock, D. K.,: 1986, The role of filler metal wire and flux composition in submerged arc weld metal transformation kinetics, Welding Journal 1986, 65 (5) pp. 113 - 121

[87] Liu, S.; Olson: D. L.: The Role of Inclusions in Controlling HSLA Steel Weld Microstructures, 1986 139s-149s

[88] Bhadeshia, H.K.D.H.; Svensson, L. E.: Mathematical Modelling of Weld Phenomena, Eitors. H. Cerjak and K. Easterling, Institute of Materials, 1993.

[89] Fox, A. G.; Eakes, M.W.; Franke, G. L., Weld. J.: The Effect of Small Changes in Flux Basicity on the Acicular Ferrite Content and Mechanical Properties of Submerged Arc Weld Metal of Navy HY-100 Steel, vol 76, 1996, pp. 330 - 342

[90] Laitinen, R.: Improvement of weld HAZ toughness at low heat input by controlling the distribution of M-A constituents,, Doctoral Thesis, Faculty of Technology, Department of mechanical engineering, University of Oulu, 2006.

[91] Grong, Ø.: Metallurgical modeling of welding, Materials modeling Series, The Institute of Materials, Cambridge 1994, pp. 581.

[92] Babu, S. S.: The mechanism of acicular ferrite in weld deposits, Solid State and Materials Science, vol. 8, 2004, pp. 267–278

[93] Robertson - Goodall, G.; Welding High Strength Modern Line Pipe Steel, Doctoral Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University Montreal, Quebec, Canada, 2011.

[94] Davis, C.L.; King, J.E.: Cleavage initiation in intercritically reheated coarse-grained heataffected zone: Part I. Fractographic evidence, Metallurgical and Materials Transactions A 25A March, 1994, pp. 563–573.

[95] HRN EN 1011-2:2002; Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika (EN 1011-2:2001)

[96] Motohashi, H.; Hagiwara, N.; Masuda, T.: Tensile properties and microstructure of weld metal of X80 linepipe steel, International Institute of Welding, Doc XI-822-04, 2004

[97] Shin, S. Y.; Hwang, B.; Lee, S.; Kim, N. J.; Ahn, S. S.: Correlation of Microstructure and Charpy Impact Properties in Api X70 and X80 Line-Pipe Steels, Materials Science and Engineering: A, vol. 458, pp. 281-289, 2007.

[98] Han, S. Y.; Shin, S. Y.; Seo, C. H.; Lee, H.; Bae, J. H.; Kim, K.; Lee, S.; Kim, N. J.: Effects of Mo, Cr, and V Additions on Tensile and Charpy Impact Properties of Api X80 Pipeline Steels, Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, vol. 40A, pp. 1851-1862, 2009.

[99] Yang, J. R.; Bhadeshia, H.: Acicular Ferrite Transformation in Alloy-Steel Weld Metals, Journal of Materials Science, vol. 26, pp. 839-845, Feb 1991.

[100] Lee, C. H.; Bhadeshia, H.K.D.H.; Lee, H.C.F: Effect of Plastic Deformation on the Formation of Acicular Ferrite, Materials Science and Engineering A, vol. 360, pp. 249- 257, 2003.

[101] Tang Z. H.; Stumpf, W.: The Role of Molybdenum Additions and Prior Deformation on Acicular Ferrite Formation in Microalloyed Nb-Ti Low-Carbon Line-Pipe Steels, Materials Characterization, vol. 59, pp. 717-728, Jun 2008.

[102] Verrier, P.; Maurickx, T.; Taillard, R.; Garrigues, G.: (1989) Effect of HAZ microstructure on fracture toughness of offshore microalloyed structural steels. Proc. The 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hague, 19–23 March 1989, pp. 641–647.

[103] Yamamoto, K.; Matsuda, S.; Haze, T., Chijiiwa, R.; Mimura, H.: A new developed Ti-oxide bearing steel having high HAZ toughness. Proc. Symposium on Residual and Unspecified Elements in Steel, ASTM STP 1042, Philadelphia 1989. Eds. Melilli A.S. & Nisbett E.G. American Society for Testing and Materials, 1989, pp. 266–284.

[104] Akselsen, O.M.; Solberg, J.K.; Grong: Effect of martensite-austenite (M-A) islands on intercritical heat-affected zone toughness of low carbon microalloyed steels. Scandinavian Journal of Metallurgy 17, 1988, pp. 194–200.

[105] Wiebe, J.; Scheller, W.; Bruns, C.; Schmidt, T.: Influence of Heat Input during GMAW on the Mechanical Properties of Seamless Line Pipe Steels up to X80, Proceedings of the Twenty-first, International Offshore and Polar Engineering Conference Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011

[106] Wiebe, J.; Scheller, W.; Bruns, C.; Schmidt, T.: Impact of FCAW on the Mechanical Properties of Seamless Line Pipe Steels of Grades X65 and X80, Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011

[107] Gunaraj, V., Murugan, N.: Prediction of Heat-Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes, Welding Journal, January 2002, pp. 94 – 98

[108] Offshore standard Det Norske Veritas DNV-OS-F101 Submarine pipeline systems, October 2010

[109] ISO 15156-2:2009 Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H2S-containing environments in oil and gas production - Part 3: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons

[110] API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities, Twenty-first Edition, September 2013

Prilog I

Certifikat čelika API 5L X80

voestalpine Grobblech GmbH

A02
Inspection certificate
EN 10204 - 3.1

Page 1 of 2
Z02 Date 08-07-2009

voestalpine-Straße 3
4020 Linz, Austria
www.voestalpine.com/grobblech

A03 Document number	Q0346281	A08 Order-No.:	9533654	A07 OrderDat.	02-06-2009
Date of dispatch	25-06-2009	4D			

A06 Customer	Drugi Dan d.o.o. A. Starrcevica 5 HR-44000 SISAK	B01 Product	Plate		
A07 OrderNo.	037-2009	B02 Material	X80M PSL2	B03 Standard	API 5L, 44TH EDITION : 2008
A06 Consignee	Drugi Dan d.o.o. A. Starrcevica 5 HR-44000 SISAK	B04 Delivery condition	thermomechanical rolled + accelerated cooled		

Z01 - Visual Examination and dimensional checking: satisfactory. The results of tests performed are in compliance with the requirements.

Detail of supply

B07 Heat No.	B06 Plate No	Dimensions Item	B09 Thickness mm	B10 Width mm	B11 Length mm	B08 Piece	B12 Gross kg	B13 Net kg	A09 Disp-No 130 42	Sachnummer
780670	133081/1	10	10,00	2000,0	6000	1		978	64037	
	Sum					1		978		

C70 - Method of steelmaking: pure oxygen blown

Chemical composition (Heat analysis)

B07 Heat No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	V %	Nb %	Ti %	N %	B %	Cae %	Pcm %
780670	.065	.330	1.970	.015	.0004	.034	.170	.018	.002	.009	.001	.062	.014	.0037	.0003	.43	.19

C99 - Supplementary information
Cae: C+(Mn/6)+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15
Pcm: C+((Mn+Cu+Cr)/20)+(Si/30)+(Ni/60)+(Mo/15)+(V/10)+(B*5)

A04
Symbol of the manufacturer's work

voestalpine

Z02
Inspection representative voestalpine Grobblech
Rainer

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

A03 Document number **Q0346281** A08 Order-No.: **9533654** Z02 Date 08-07-2009 Page 2 of 2

Test results: C10-C29 Tensile Test acc. ASTM/ASME

B07 Heat No.	C41 Width mm	SpThickn mm	C01 loc.	C02 Dir	Rt0,5 MPa	C12 Rm MPa	L0	C13 E %	Y/T Rt05 %
780670	38,0	10.81	F	T	557	670	L2"	28.0	83.16

Test results: C40-C49 Impact Test acc. ASTM/ASME

B07 Heat No.	C01 loc.	C02 Dir	C03 temp °C	C42 SV J	C42 SV J	C42 SV J	C43 AV J
780670	F	T	0	361	372	359	364

Chemical composition (Product analysis)

B07 Heat No.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	V %	Nb %	Ti %	N %	B %	Ca %
780670	.064	.330	1.940	.015	.0006	.033	.170	.018	.002	.009	.001	.063	.014	.0036	.0002	.0001

Remarks

We confirm that the delivery specified above corresponds to the order (and standard).

The signature of the inspector is substituted, because the certificates of VOEST ALPINE STAHL LINZ GmbH are prepared by a suitable data processing system (EN 10204, Pt.5).

Z02
Inspection representative voestalpine
Grobblech
Rainer

voestalpine

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

Prilog II

Certifikat žice za zavarivanje

LNM MoNi

Low alloy solid wire

Classification

AWS A5.28 : ER100S-G
EN ISO 16834 : G 62 4 M Mn3NiCrMo

General description

Solid wire for welding high strength steels with a yield up to 620 Mpa
Good impact values at -40 °C

Shielding gases (acc. ISO 14175)

M21 Mixed gas Ar+ >15-25% CO_2
C1 Active gas 100% CO_2

Chemical composition (w%) typical wire

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
0.10	1.65	0.75	0.55	0.60	0.30	0.08

Mechanical properties, typical, all weld metal

	Shielding gas	Condition	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Impact ISO-V(J) -20 °C	-40 °C	-60°C
Typical values	M21	AW	635	770	19	100	90	70

Materials to be welded

Steel grades	Standard	Type
Pipe material	API-5LX	X60, X65, X70, X80
	EN 10208-2	L480, L550
Fine grained steel	EN 10025 part 6	S460, S500, S550, S620

Packaging and available sizes

Unit type	Diameter (mm) 0.8	1.0	1.2
15 kg spool B300	X	X	X

Other sizes and packaging on request

GMAW/GTAW

LNM MoNi: rev. EN 22

Liability All information in this data sheet is based on the best available knowledge, is subject to change without notice and can only be considered as suitable for general guidance **Fumes** Consult information on Welding Safety Sheet, available upon request

LINCOLN ELECTRIC

337

www.lincolnelectric.eu

ŽIVOTOPIS

Davor Kolednjak rođen je u Zagrebu 12. ožujka 1964. godine, gdje završava osnovnu i srednju školu. Nakon završenog vojnog roka, 1984. godine započinje studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu gdje je i diplomirao je 1989. godine na smjeru Proizvodno strojarstvo, usmjerenju Materijali s temom „Provjera valjanosti indeksa otpornosti abraziji“ pod mentorstvom prof.dr.sc. Vinka Ivušića i stekao zvanje diplomiranog inženjera strojarstva.

Nakon završetka studija od 1990. do 1996. godine radi u tvrtkama Montmontaža i Monter. Od 1996. do danas zaposlen je u tvrtci Inženjering za naftu i plin kao projektant industrijskih procesnih postrojenja.

Poslijediplomski doktorski studij upisao je 2005. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na smjeru materijali.

Član je Hrvatske komore inženjera strojarstva.

Kao autor ili koautor objavio je nekoliko znanstvenih i stručnih radova u znanstvenim časopisima i zbornicima znanstvenih i stručnih skupova.

Govori engleski i njemački jezik.

Oženjen je i otac je dvoje djece.

BIOGRAPHY

Davor Kolednjak was born in Zagreb on 12 March 1964 where he completed his primary and secondary education. After finishing military service, he enrolled the Mechanical Engineering and Naval Architecture in 1984. He graduated in 1989, department of Production Engineering, specializing in materials, and acquired a title of Mechanical engineer. Subject of his master thesis was „Abrasion resistant index resistance" under the mentorship of prof.dr.sc. Vinko Ivušić.

In the period from 1990 to 1996 he was employed in Montmontaža and Monter. As of 1996 he is employed in Oil & Gas Engineering at the position of processing facilities designer.

He enrolled a postgraduate doctoral study of Mechanical Engineering and Naval Architecture in 2005, specialization in materials.

He is a member of Croatian Chamber of Mechanical Engineers.

He published certain scientific and expert papers in scientific magazines and in conference proceedings.

He speaks English and German.

He is married and father of two children.