

Utjecaj dodatnog materijala na udarni rad loma zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće

Tandarić, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:467612>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Tandarić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Tandarić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na svim savjetima, kritikama i primjedbama koje su oblikovale ovaj rad.

Zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratorija za strojnu obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također, zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Hvala obitelji na ukazanom povjerenju i strpljivosti tijekom studiranja.

Karlo Tandarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

KARLO TANDARIĆ

Mat. Br.: **0035189514**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ DODATNOG MATERIJALA NA UDARNI RAD LOMA
ZAVARENOG SPOJA ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**INFLUENCE OF FILLER MATERIAL ON IMPACT TOUGHNESS
OF HIGH STRENGTH STEEL WELD JOINT**

Opis zadatka:

Analizirati zavarljivost čelika visoke čvrstoće sa stanovišta primjene za niske temperature. Definirati vrste čelika koji su prikladni za rad na niskim temperaturama te obrazložiti specifičnosti tehnologije zavarivanja. Posebno istražiti utjecaj dodatnog materijala, unosa topline i zaštitnog plina na postizanje optimalnih vrijednosti udarnog rada loma u metalu zavora. Opisati norme za klasifikaciju dodatnih materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je osmisliti plan pokusa za određivanje optimalne kombinacije dodatnog materijala, unosa topline i zaštitnog plina u svrhu postizanja maksimalnih vrijednosti udarnog rada loma pri niskim temperaturama. U obzir uzeti minimalno dvije gradacije dodatnog materijala te mješavine zaštitnih plinova Ar 82%/CO₂18% te Ar 92%/CO₂8%. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma izraditi prema HRN EN ISO 9016. Analizirati rezultate i predložiti optimalne tehnologije zavarivanja čelika visoke čvrstoće za rad pri niskim temperaturama.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

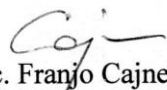
Predvideni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS KRATICA	VIII
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
2. ČELICI ZA RAD PRI NISKIM TEMPERATURAMA	2
2.1. Mikrolegirani sitnozrnati visokočvrsti čelici	3
2.2. Austenitni nehrđajući čelici	3
2.3. Čelici legirani s niklom	4
3. VISOKOČVRSTI ČELICI	5
3.1. TMCP način proizvodnje čelika visoke čvrstoće.....	6
3.2. Zavarljivost sa stanovišta primjene za niske temperature.....	10
3.2.1. Promjene u ZUT-u za vrijeme zagrijavanja.....	10
3.2.2. Promjene u ZUT-u za vrijeme hlađenja.....	13
3.2.3. Mikrostrukturne faze zavarenog spoja mikrolegiranih čelika	14
3.2.4. Hladne pukotine	17
3.2.4.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina	17
3.2.4.2. Utjecaj difuzijskog vodika	18
3.2.4.3. Utjecaj naprezanja.....	18
3.2.4.4. Položaj uključaka u zavaru	18
3.3. Utjecaj parametara zavarivanja na vrijednost udarnog rada loma metala zavara	20
3.3.1. Utjecaj dodatnog materijala	21

3.3.2.	Utjecaj unosa topline.....	22
3.3.3.	Utjecaj zaštitnog plina.....	28
3.3.3.1.	Dvokomponentne plinske mješavine Ar/CO ₂	29
3.3.3.2.	Utjecaj kisika na stvaranje acikularnog ferita.....	30
3.3.3.3.	Utjecaj ekvivalenta kisika na mehanička svojstva zavara.....	33
3.3.4.	Utjecaj predgrijavanja.....	35
3.4.	HRN EN ISO 16834:2013.....	36
3.4.1.	Klasifikacija prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J.....	36
3.4.2.	Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći R_m i udarnom radu loma od 27 J.....	39
4.	AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI.....	41
4.1.	Fizička metalurgija austenitnih nehrđajućih čelika.....	42
4.2.	Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.....	43
4.2.1.	Mikrostrukturne promjene zone taljenja austenitnih nehrđajućih čelika.....	43
4.2.2.	Pojave u zoni utjecaja topline.....	45
4.2.3.	Tople pukotine.....	45
4.3.	Specifičnosti tehnologije zavarivanja.....	47
4.3.1.	Izbor dodatnog materijala.....	48
4.3.2.	Predgrijavanje austenitnih nehrđajućih čelika.....	49
4.3.3.	Zaštitni plinovi.....	49
4.4.	Mehanička svojstva zavara austenitnih nehrđajućih čelika pri niskim temperaturama.....	50
4.5.	Nastanak martenzita pri niskim temperaturama.....	52
5.	ČELICI LEGIRANI S NIKLOM.....	54
5.1.	Metalurgija čelika legiranih niklom.....	55
5.2.	Zavarljivost čelika legiranih niklom.....	57
5.3.	Specifičnosti tehnologije zavarivanja.....	58
5.3.1.	Utjecaj unosa topline i predgrijavanja.....	58
5.4.	Utjecaj sadržaja nikla na prijelaznu temperaturu.....	59

6. EKSPERIMENTALNI RAD	61
6.1. Opis eksperimenta.....	61
6.2. Oblikovanje plana pokusa.....	61
6.3. Oprema za zavarivanje.....	62
6.4. Osnovni materijal.....	65
6.4.1. Priprema ploča za zavarivanje	66
6.4.2. Određivanje temperature predgrijavanja.....	68
6.5. Dodatni materijal.....	68
6.5.1. EZ – SG 100.....	68
6.5.2. EZ – SG 120.....	69
6.6. Zaštitni plin	69
6.7. Parametri zavarivanja.....	70
6.8. Izrada ispitnih uzoraka	72
6.9. Ispitivanje udarnog rada loma.....	76
7. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	78
7.1. Analiza rezultata udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 100.....	78
7.1.1. Analiza prijelomnih površina za stanja pokusa 1-4	79
7.2. Analiza rezultata udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 120.....	82
7.2.1. Analiza prijelomnih površina za stanja pokusa 5-8	83
7.3. Analiza utjecaja zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 100	86
7.4. Analiza utjecaja zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 120	88
7.5. Utjecaj unosa topline na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara.....	89
7.6. Komparativna analiza stanja pokusa 1-8	91
8. ZAKLJUČAK	94
9. POPIS LITERATURE	97

POPIS SLIKA

Slika 1. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi tipičnih vrsta čelika za rad pri niskim temperaturama [1, 2].....	2
Slika 2. Kronološki razvoj čelika API oznake [4].....	5
Slika 3. Shematski prikaz TMCP postupka [6].....	8
Slika 4. TTT dijagram s usporedbama brzina ohlađivanja [4, 6].....	8
Slika 5. Shematski prikaz promjene mikrostrukture tijekom postupka termomehaničkog valjanja i naknadnog ubrzanog hlađenja [6].....	9
Slika 6. ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougličnog feritno-perlitnog čelika s 0,2 %C [6].....	11
Slika 7. a) Primjer izotermičkog TTT dijagrama b) Pripadajući graf tvrdoća-vrijeme ohlađivanja za čelik 0,18 %C, 1,4 %Mn, 0,4 %Si [10].....	14
Slika 8. Shematski prikaz propagacije pukotina u čelicima s različitim mikrostrukturama [12].....	15
Slika 9. Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini [6, 12].....	16
Slika 10. Pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 500x [14].....	19
Slika 11. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja; A – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; B – kutni spoj, pukotina u ZUT-u; C – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; D – sučeljeni spoj, pukotina iz neprovarenog korijena [13].....	20
Slika 12. Utjecaj unosa topline na brzinu ohlađivanja [5, 23].....	23
Slika 13. Ovisnost rezultata statičkog vlačnog ispitivanja o unosu topline u zavar čelika X80 [6].....	24
Slika 14. Utjecaj unosa topline na iznos udarnog rada loma (KV) [25].....	25
Slika 15. Utjecaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na tvrdoću i prijelaznu temperaturu [8].....	27
Slika 16. Utjecaj unosa topline na tvrdoću TMCP čelika [25].....	27
Slika 17. Utjecaj plinske mješavine na širinu i penetraciju zavara [27].....	30
Slika 18. Izotermički TTT dijagram za metal zavara niskougličnog čelika [6, 28, 29].....	31
Slika 19. Utjecaj ekvivalenta kisika na volumni udio acikularnog ferita u metalu zavara [28].....	32
Slika 20. Ovisnost ekvivalenta kisika na iznos prijelazne temperature [28].....	33
Slika 21. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma [30].....	34

Slika 22. Utjecaj zaštitnog plina na iznos tvrdoće metala zavara [30].....	34
Slika 23. Količina izlučene troske za različite plinske mješavine; a) 8 %CO ₂ u Ar; b) 18 %CO ₂ u Ar; c) 28 %CO ₂ u Ar [6].....	35
Slika 24. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika oznake AISI 304; a) Potpuni austenit; b) Austenit i delta ferit [34].....	42
Slika 25. Utjecaj sigma faze na udarni rad loma austenitnih nehrđajućih čelika pri sobnoj temperaturi [34]	43
Slika 26. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni [34]	44
Slika 27. Osjetljivost na pukotine kao funkcija omjera Cr _{eq} /Ni _{eq} [34].....	46
Slika 28. Utjecaj delta-ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara pri -196 °C [37]	48
Slika 29. σ - ϵ dijagram za čelik AISI 304 [37].....	50
Slika 30. Utjecaj sadržaja ferita na udarni rad loma pri -196 °C [37].....	52
Slika 31. Klasifikacija nikla i njegovih legura [42]	54
Slika 32. Utjecaj unosa topline na oblik prijelazne krivulje za čelik legiran s 5 %Ni [46] ...	59
Slika 33. Utjecaj udjela nikla na prijelaznu temperaturu [3, 42].....	59
Slika 34. Izvor struje za zavarivanje WB – P500L	63
Slika 35. Upravljačko sučelje uređaja	63
Slika 36. a) Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002; b) Sastavni dijelovi automata BUG-O Systems 1002 [49]	65
Slika 37. Položaj pištolja, desna tehnika rada	65
Slika 38. Priprema spoja za zavarivanje.....	66
Slika 39. Pozicioniranje ploča i zavarivanje pripoja	67
Slika 40. Stavljanje podloške za zavarivanje	67
Slika 41. Ploča spremna za zavarivanje	67
Slika 42. Mjerenje međuprolazne temperature	68
Slika 43. Provedba postupka zavarivanja.....	71
Slika 44. Izrezivanje ploča plinskim postupkom	72
Slika 45. Postupak rezanja na tračnoj pili	73
Slika 46. Izrezani uzorci za pojedina stanja pokusa.....	73
Slika 47. Pripremljeni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma	75
Slika 48. Charpy-ev bat.....	76
Slika 49. Termostabilna kupka etilnog alkohola i suhog leda.....	76

Slika 50. Postignute vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa 1-4 za dodatni materijal EZ – SG 100 pri temperaturi ispitivanja -60 °C	79
Slika 51. Stereo mikroskop LEICA MZ6.....	80
Slika 52. Postignute vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa 5-8 za dodatni materijal EZ – SG 120 pri temperaturi ispitivanja -60 °C	82
Slika 53. Poroznost u metalu zavara; stanje pokusa 8; KV=24,5 J.....	85
Slika 54. Poroznost u metalu zavara; stanje pokusa 8; KV = 47,5 J.....	85
Slika 55. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 100	87
Slika 56. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 120	88
Slika 57. Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara dodatnog materijala EZ – SG 120	90
Slika 58. Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara dodatnog materijala SG 120	91
Slika 59. Usporedna analiza svih stanja pokusa.....	92

POPIS TABLICA

Tablica 1. Oznake za klasifikaciju dodatnog materijala ovisno o iznosu granice razvlačenja i istezljivosti [32]	36
Tablica 2. Oznake za udarni rad loma metala zavara [32]	37
Tablica 3. Klasifikacija zaštitnih plinova prema normi HRN EN ISO 14175:2008 [26]	37
Tablica 4. Oznaka kemijskog sastava dodatnog materijala [32]	38
Tablica 5. Oznake dodatnog materijala prema iznosu vlačne čvrstoće [32]	39
Tablica 6. Minimalno potrebni iznos feritnog broja za izbjegavanje likvacijskih pukotina u metalu zavara [34]	47
Tablica 7. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika pri različitim temperaturama [41]	51
Tablica 8. Vrijednosti udarnog rada loma za različite vrste austenitnih nehrđajućih čelika pri različitim temperaturama ispitivanja [41]	51
Tablica 9. Razine stanja pokusa	62
Tablica 10. Tehničke karakteristike uređaja [48]	64
Tablica 11. Kemijski sastav čelika prema atestu i zahtjevu norme API 5L	66
Tablica 12. Mehanička svojstva čelika API 5L X80	66
Tablica 13. Mehanička svojstva metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 100	69
Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – SG 100	69
Tablica 15. Mehanička svojstva metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 120	69
Tablica 16. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – SG 120	69
Tablica 17. Parametri zavarivanja prema odgovarajućim stanjima pokusa	70
Tablica 18. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja	71
Tablica 19. Dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma prema HRN EN ISO 148-1:2012 [50]	74
Tablica 20. Shematski prikaz pozicioniranja epruvete i V utora prema HRN EN ISO 9016:2013 [51]	75
Tablica 21. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma	77
Tablica 22. Izgled prijelomnih površina za stanja pokusa 1-4	80
Tablica 23. Izgled prijelomnih površina za stanja pokusa 5-8	83
Tablica 24. Vrijednosti ekvivalenta kisika za sva stanja pokusa	86

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
LNG	Liquified Natural Gas
URL	Udarni rad loma
FCC	Face Centered Cubic
BCC	Body Centered Cubic
TMCP	Thermo Mechanical Controlled Process
FN	Ferrite Number
API	American Petroleum Institute
QT	Quenched and Tempered
DQ	Direct Quenching
TMR	Thermo Mechanical Rolling
AcC	Accelerated Cooling
TTT	Time Temperature Transformation
ZUT	Zona utjecaja topline
OM	Osnovni materijal
EPT	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom troske
F+B	feritno-bainitna struktura
A/F	austenitno-feritna transformacija
GBF	Grain Boundary Ferrite
WF	Widmanstaetten Ferrite
AF	Acicular Ferrite
PF	Polygonal Ferrite
GB	Gornji bainit
DB	Donji bainit
M	Martenzit

Az	Zaostali austenit
P	Perlit
HIC	Hydrogen Induced Cracking
MAG	Metal Active Gas
ppm	Parts per milion
FCAW	Flux Cored Arc Welding
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama
TIG	Tungsten Inert Gas
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
AISI	American Iron and Steel Institute
MIG	Metal Inert Gas
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
HRN	HRvatska Norma

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja	N/mm^2
$t_{8/5}$	Vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C	s
HV5	Mjerenje tvrdoće materijala prema Vickersovoj metodi	-
$\Delta t_{7/3}$	Vrijeme hlađenja od 700 do 300 °C	s
Q	Unos topline	kJ/cm
k	Faktor toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja	-
U	Napon zavarivanja	V
I	Struja zavarivanja	A
v	Brzina zavarivanja	cm/min
KV	udarni rad loma	J
T_P	Prijelazna temperatura	°C
R_e	granica razvlačenja	N/mm^2
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm^2
A	Istezljivost	%
σ	Naprezanje	N/mm^2
ε	Istezanje	mm/mm
M_s	temperatura početka pretvorbe austenita u martenzit	°C
M_d	temperatura početka transformacije metastabilnog austenita u heksagonski ε -martenzit	°C

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je i analizirana problematika utjecaja dodatnog materijala, unosa topline i zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara visokočvrstog čelika API 5L X80.

U uvodnom dijelu rada iznesen je pregled dosadašnjih spoznaja i istraživanja na području postizanja optimalnih vrijednosti udarnog rada loma zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće. Također, opisani su materijali koji se koriste pri niskim temperaturama te su opisane specifičnosti tehnologije zavarivanja istih. Osim toga, opisana je norma HRN EN ISO 16834:2013 koja se koristi za klasifikaciju dodatnih materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je plan provedbe zavarivanja, ispitivanja i analize rezultata. Prema planu pokusa definirane su 3 varijable koje su bile varirane na dvije razine. Za svako stanje pokusa su, iz sučeljeno zavarenih ploča, izrađene epruvete za ispitivanje udarnog rada loma. Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpyjevom batu pri temperaturi -60 °C. Na temelju dobivenih rezultata predložena je optimalna tehnologija zavarivanja čelika visoke čvrstoće za rad pri niskim temperaturama.

Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Ključne riječi: čelici visoke čvrstoće; niske temperature; udarni rad loma; dodatni materijal; metal zavara.

SUMMARY

This thesis deals with influence of filler material, heat input and shielding gas on the value on impact toughness of high strength steel, API 5L X80, weld metal.

The introduction includes detailed literature overview of the field of optimal values on impact toughness of high strength steel weld joint. The materials that are used at low temperatures and specifics of welding technology are also described. In addition, the specification of HRN EN ISO 16834:2013, which is used for classification of filler material of welding high strength steel, is also given.

Experimental part of thesis specifies the complete welding procedure of the workpieces, conduction of the samples testing and finally the analysis of the obtained results. The experiment design consists of 3 factors varied at two levels. For each run of the experiment design a sample from the butt welded joints were prepared in order to conduct the Impact test. Charpy Impact test was conducted at -60 °C. Based on the results, the optimum welding technology of high strength steel is proposed.

Experimental work was conducted in laboratories at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb.

Key words: high strength steel; low temperatures; impact toughness; filler material; weld metal.

1. UVOD

Čelici za rad pri niskim temperaturama obuhvaćaju temperaturno područje od oko $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa sve do apsolutne nule. Zbog toga u ovo specifično tehničko područje ulaze primjeri primjene čeličnih konstrukcija u polarnim područjima, ledolomci, uređaji na zrakoplovima, svemirskim letjelicama itd.

U posljednjih nekoliko godina pojavila se velika potražnja za ukapljenim prirodnim plinom (LNG). Razlog tome leži u cijeni LNG-a koja je niža u odnosu na dizel ili benzin i znatno manjoj količini ispuštenih štetnih plinova u usporedbi s dizelskim ili benzinskim motorima. To se posebno odrazilo na brodograđevnoj industriji uslijed novih nacionalnih i međunarodnih odrebi koje propisuju dozvoljenu količinu emisije štetnih plinova i koje se postupno uvode u neka mora, prije svega na obalna područja SAD-a i Baltičko more. Zbog toga se brodogradilišta okreću izgradnji brodova na LNG pogon kako bi zauzela vodeću poziciju u industriji koja će u narednim godinama tek dosegnuti svoj vrhunac.

Međutim, jedan od ključnih problema u izradi broda na LNG pogon predstavljaju specijalni tankovi za LNG gorivo. Naime, prirodni ukapljeni plin skladišti se u kapljevitom stanju jer kao takav zauzima približno 600 puta manji volumen u odnosu na plinovito stanje. Temperatura ukapljivanja prirodnog plina iznosi $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ te je stoga potrebno odabrati takav materijal spremnika koji će osigurati otpornost prema krhkom lomu pri navedenoj temperaturi.

Također, transport prirodnog plina od nalazišta do potrošača najčešće se obavlja u kapljevitom stanju putem cjevovoda ili pomoću posebnih brodova (tzv. „Metanizera“).

Navedene činjenice govore o važnosti odabira odgovarajućeg materijala koji će osigurati potrebna eksploatacijska svojstva, tehnologiji zavarivanja kojom se spaja odabrani materijal i ogromnom tržišnom potencijalu prirodnog plina kao ekološki najprihvatljivijeg goriva.

2. ČELICI ZA RAD PRI NISKIM TEMPERATURAMA

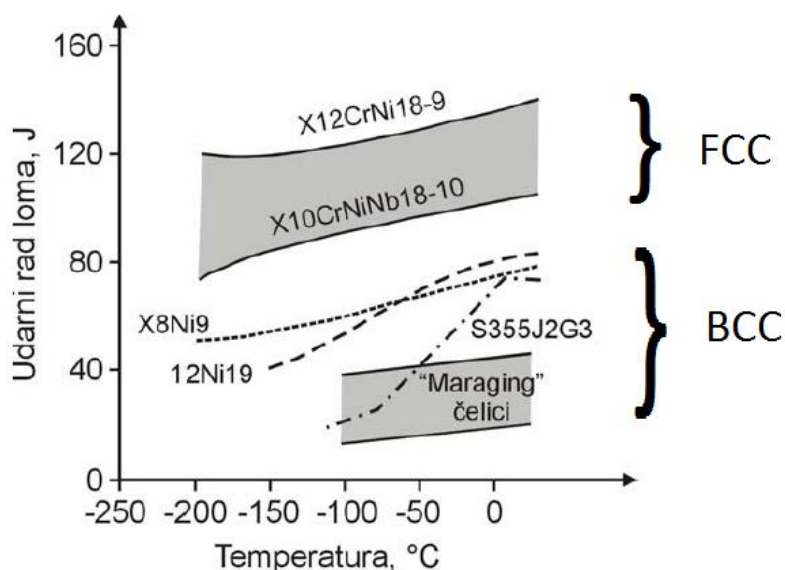
Prilikom odabira materijala koji će se koristiti pri niskim temperaturama potrebno je odabrati takav materijal koji će pri traženoj temperaturi osigurati otpornost prema krhkom lomu.

Osim pada vrijednosti udarnog rada loma (URL), sniženjem temperature padaju vrijednosti: duktilnosti, kontrakcije presjeka, toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i električnog otpora, a rastu: tvrdoća, vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i osjetljivost na zarezno djelovanje [1].

Za postizanje dovoljnog iznosa udarnog rada loma pri niskim temperaturama čelici moraju imati posebno prilagođen kemijski sastav i mikrostrukturu. Prema tome, najčešće korišteni čelici pri niskim temperaturama su [1, 2]:

- niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici u normaliziranom stanju (primjena do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- čelici legirani s niklom (1,5 – 9 %) za poboljšavanje (primjena od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- austenitni Cr-Ni nehrđajući čelici (primjena od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Na slici 1 prikazana je ovisnost udarnog rada loma (KV) o temperaturi za određenu vrstu čelika.



Slika 1. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi tipičnih vrsta čelika za rad pri niskim temperaturama [1, 2]

Iz slike je vidljivo da materijali s FCC kristalnom rešetkom pokazuju najviše vrijednosti udarnog rada loma. Razlog tome leži u gustom i jednoličnom rasporedu atoma u FCC rešetki. Zbog toga neće doći do tolikog otpora klizanju sustava atomnih ravnina kao što će to biti slučaj u rjeđem i nejednoličnom BCC rasporedu.

Visokočvrsti čelici također se primjenjuju pri sniženim temperaturama unatoč BCC kristalnoj rešetki. Razlog zadržavanju žilavosti pri sniženim temperaturama ovih čelika proizlazi iz posebnog načina proizvodnje (TMCP – *Thermo Mechanical Controlled Process*) kojim se dobiva sitnozrnata mikrostruktura.

2.1. Mikrolegirani sitnozrnati visokočvrsti čelici

Dobra svojstva visokočvrstih čelika pri sniženim temperaturama proizlaze iz mikrostrukture čelika koja je dobivena TMCP načinom proizvodnje. Takvim postupkom proizvodnje dobiva se sitnozrnata i homogena struktura igličastog ferita i bainita umjesto klasične feritno-perlitne strukture prisutne kod čelika proizvedenih konvencionalnim postupkom.

Čelici s mikrostrukturom igličastog ferita imaju veću čvrstoću te posjeduju relativno dobar iznos udarnog rada loma. Razlog tome proizlazi iz kaotične kristalografske orijentacije te se nukleacija kristalnog zrna odvija na površini uključaka unutar austenitnog zrna. Zbog toga dolazi do usporavanja propagacije pukotine odnosno povišenja čvrstoće i žilavosti. Također, usitnjenjem zrna snižava se i prijelazna temperatura, te se ovi čelici primjenjuju i pri $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Isto tako, zbog smanjenog sadržaja ugljika navedeni čelici manje su skloni nastanku hladnih pukotina. Osim toga, smanjeni sadržaj ugljika pospješuje zavarljivost. Međutim, unatoč dobroj zavarljivosti potrebno je strogo definirati parametre i tehnologiju zavarivanja jer se vrlo lako može izaći iz granica koje garantiraju homogenu strukturu i mali rizik od pojave pukotina. Kao primjer može se uzeti vrijednost unosa topline. Naime, preveliki unos topline rezultirat će padom čvrstoće, tvrdoće i žilavosti, dok će preniski unos topline povećati opasnost prema nastanku hladnih pukotina, stoga je potrebno naći optimalnu kombinaciju.

2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici primjenjuju se i pri najnižim mogućim temperaturama – praktički do apsolutne nule. Razlog zadržavanju povoljnih svojstava, prije svega udarnog rada loma, i pri tako niskim temperaturama proizlazi iz FCC kristalne rešetke.

Austenitni nehrđajući čelici smatraju se dobro zavarljivima ukoliko se prilikom zavarivanja poštuje određena tehnološka disciplina. Skloni su nastanku toplih pukotina te je prilikom

zavarivanja potrebno odabrati takav dodatni materijal kod kojeg će omjer Cr_{eq}/Ni_{eq} biti veći od 1,5. Takvim odabirom dodatnog materijala omogućuje se metal zavara koji primarno kristalizira u ferit, te se u mikrostrukturi pojavljuje delta-ferit. Iznos delta-ferita u mikrostrukturi kvantificira se kao feritni broj (FN – eng. *Ferrite Number*). Što je niži udio delta-ferita to je veća vrijednost udarnog rada loma. Međutim, postoji ograničenje s obzirom na minimalni iznos delta-ferita. Naime, kako bi se spriječio nastanak toplih pukotina u metalu zavara, potrebno je postići metal zavara s minimalnim iznosom $FN \geq 2$. S obzirom na navedeno, potrebno je naći optimalni iznos FN u odnosu na vrijednost udarnog rada loma i pojavu toplih pukotina. Za kriogene primjene preporuča se sadržaj FN u iznosu između 3 i 6.

S obzirom na iznos udarnog rada loma od 122 J pri $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ za čelik AISI 304, na prvi trenutak moglo bi se reći da će se rješenje problema krhkog loma jednoznačno nalaziti u primjeni austenitnih nehrđajućih čelika. Međutim, treba voditi računa i o negativnim svojstvima navedene skupine čelika od kojih posebnu pažnju valja skrenuti na manje poznate strukturne transformacije do kojih dolazi samo pri niskim temperaturama. Osim toga, navedeni čelici nemaju izrazito visok iznos granice razvlačenja te je u obzir potrebno uzeti i cijenu koja je viša nego kod ostalih materijala koji se primjenjuju pri kriogenim temperaturama.

2.3. Čelici legirani s niklom

Kao i kod austenitnih nehrđajućih čelika, glavno obilježje legura na bazi nikla je FCC kristalna rešetka što znači da sniženjem temperature ne dolazi do prijelaza žilavog u krhki lom.

Izuzetna vrijednost udarnog rada loma čelika legiranih niklom funkcija je tri faktora: prisutnog zaostalog austenita, sniženja prosječnog udjela ugljika u martenzitu te usitnjenja zrna i stvaranja vrlo žilave Fe-Ni strukture u kombinaciji s toplinskom obradom.

Porastom sadržaja nikla u čeliku dolazi do sniženja prijelazne temperature. Tako se čelici legirani s 1,5-2,5 %Ni primjenjuju pri temperaturama do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, čelici legirani s 3,5 %Ni do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, čelici legirani s 5 %Ni do $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ dok se čelici legirani s 9 %Ni primjenjuju sve do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. VISOKOČVRSTI ČELICI

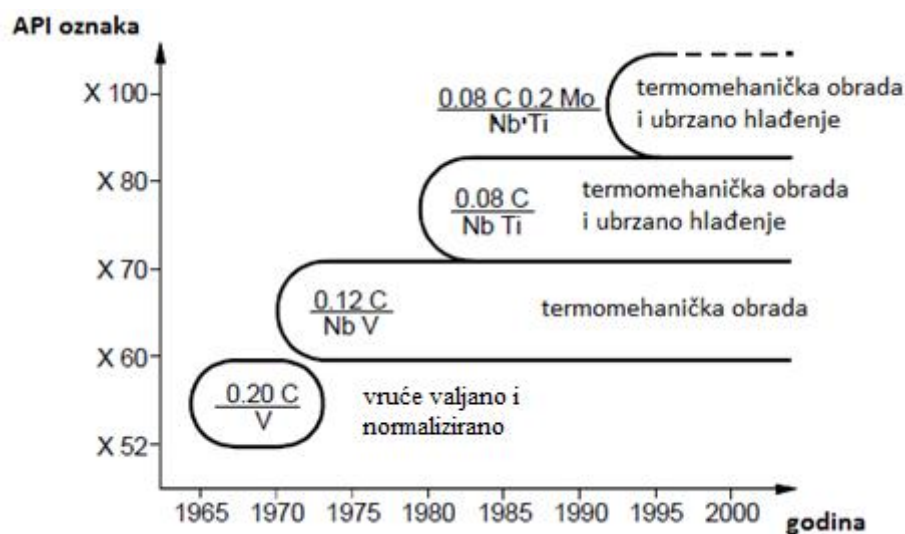
Razvoj visokočvrstih čelika uvjetovan je sve većim tehničkim zahtjevima na konstrukcijske čelike. Ti zahtjevi se prvenstveno odnose na što bolja mehanička svojstva od kojih je najvažnija granica razvlačenja.

Prema vrijednostima granice razvlačenja, razlikuju se tri grupe ovih čelika [3]:

- čelici povišene čvrstoće ($360 < R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$)
- čelici visoke čvrstoće ($500 < R_{p0,2} < 1000 \text{ N/mm}^2$)
- ultračvrsti čelici ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$).

Visokočvrsti čelici nalaze široku primjenu u izgradnji cjevovoda, *off-shore* postrojenja i petrokemijskoj industriji. Za navedena područja primjene danas se najčešće koriste čelici gradacije API (eng. *American Petroleum Institute*) prema američkom sustavu označavanja.

Slika 2 prikazuje kronološki razvoj visokočvrstih čelika.



Slika 2. Kronološki razvoj čelika API oznake [4]

Iz slike 2 vidljivo je postupno smanjenje masenog udjela ugljika kod novijih vrsta čelika. Navedeno smanjenje udjela ugljika nije dovelo do smanjenja granice razvlačenja, udarnog rada loma i slabije zavarljivosti, štoviše dodatkom mikrolegirajućih elemenata (prije svega vanadija i niobija) i TMCP načinom proizvodnje došlo je do porasta navedenih svojstava.

3.1. TMCP način proizvodnje čelika visoke čvrstoće

Postoje tri različita načina proizvodnje visokočvrstih čelika. Prvi i najstariji je QT (gašenje i popuštanje), nakon toga slijedi TMCP (termomehanička obrada i ubrzano hlađenje) te DQ (direktno gašenje) postupak koji se još uvijek istražuje [5].

Zajednički cilj svih spomenutih načina proizvodnje je izrada čelika koji će osigurati visoku granicu razvlačenja i dobru duktilnost. Svi čelici koji su proizvedeni nekom od spomenutih metoda sadrže bainitnu i/ili martenzitnu mikrostrukturu. Povrh toga, čelici proizvedeni TMCP postupkom mogu imati i feritno-bainitnu strukturu. Navedena struktura dobivena je mikrolegiranjem različitim kemijskim elementima (Nb, Ti, V i B) koji stvaraju uključke poput karbida i nitrída. Time se dobiva sitnozrnata mikrostruktura s visokim iznosom čvrstoće unatoč malom udjelu ugljika u čeliku [5].

Kako bi se postigao povoljan omjer čvrstoće i žilavosti, 80-tih godina prošlog stoljeća u Japanu razvijen je termomehanički kontrolirani postupak valjanja, TMCP.

TMCP je postupak termomehaničke obrade uz optimiranje mikrostrukture pomoću kontrole temperature i postupka deformacije za vrijeme vrućeg valjanja te kontrole procesa gašenja nakon vrućeg valjanja [6]. Cilj TMCP postupka je stvoriti sitnozrnatu i homogenu strukturu igličastog ferita umjesto feritno-perlitne strukture prisutne kod konvencionalnih čelika [6, 7].

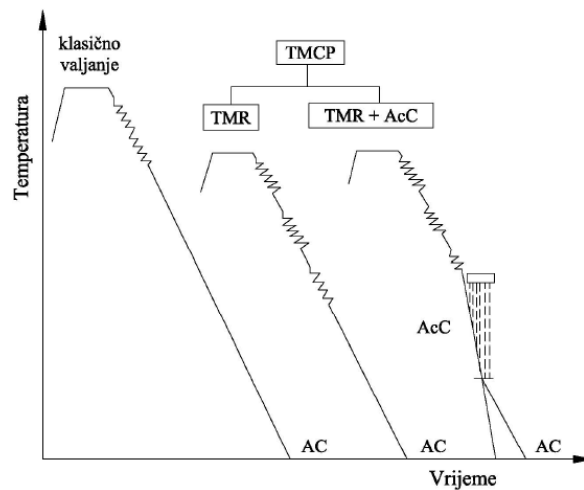
TMCP postupak uključuje: TMR (termomehaničko valjanje – engl. *Thermo Mechanical Rolling*) i AcC (ubrzano hlađenje – engl. *Accelerated Cooling*).

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 presjeku i potpuno otapanje karbida i nitrída mikrolegiranih elemenata. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o vrsti i udjelu mikrolegiranih elemenata u čeliku [6].

- 2) Grubo termomehaničko valjanje – provodi se s ciljem postizanja najfinije moguće austenitne strukture prije postizanja temperature rekristalizacije [6].
- 3) Završno termomehaničko valjanje – akumulira naprezanja pri valjanju u zoni ne-rekristalizacije austenitnog zrna kako bi nastala feritna struktura. U toj temperaturnoj zoni dolazi do precipitacije niobijevih nitrida (NbN) uslijed smanjene topivosti niobija u austenitu [9]. Austenitno zrno se pritom izdužuje te se ovim postupkom u konačnici može dobiti vrlo homogena, sitnozrnata feritna struktura [6].
- 4) Snažna redukcija debljine lima – snažna redukcija (60 – 80 %) za vrijeme kontroliranog procesa termomehaničkog valjanja povećava granicu razvlačenja bez nepovoljnog djelovanja na prijelaznu temperaturu [9].
- 5) Režim hlađenja – vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće jer se hlađenjem kontrolira promjena mikrostrukture, usitnjavanje feritnog zrna i precipitacijsko očvršnuće. Brzina hlađenja utječe na udjele bainita odnosno udjele martenzitno-austenitne mikrostrukture ili pak na pojavu igličastog ferita [6].
- 6) Namatanje ploča – tijekom procesa namatanja ne dolazi do promjene strukture materijala, ali je ova faza vrlo bitna za precipitacijsko očvršnuće čelika. Stoga je bitno strogo kontrolirati temperaturu pri namatanju kako bi se postiglo maksimalno precipitacijsko očvršnuće. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što konačno rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala [6, 9].

Na slici 3 shematski je prikazan TMCP postupak proizvodnje.

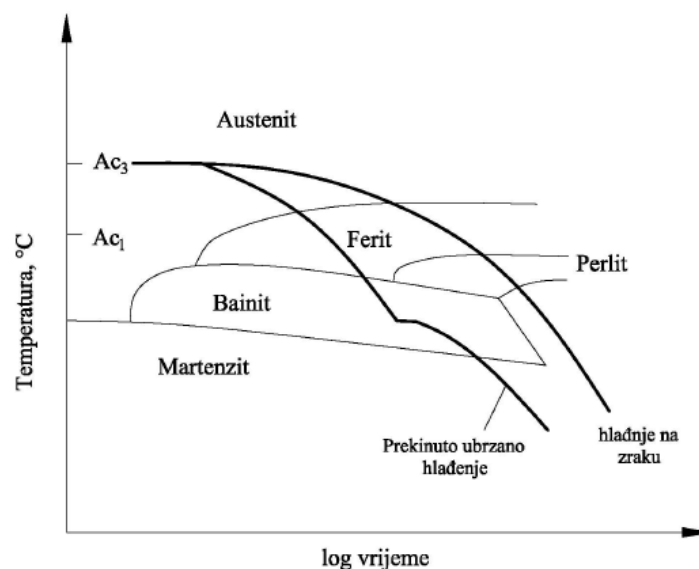


Slika 3. Shematski prikaz TMCP postupka [6]

Proces termomehaničkog valjanja karakterizira obrada deformiranjem u austenitnom području pri temperaturama iznad $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ kojom se može postići redukcija debljine čelika do 80 % uz željeno usitnjenje zrna [6]. 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 [6].

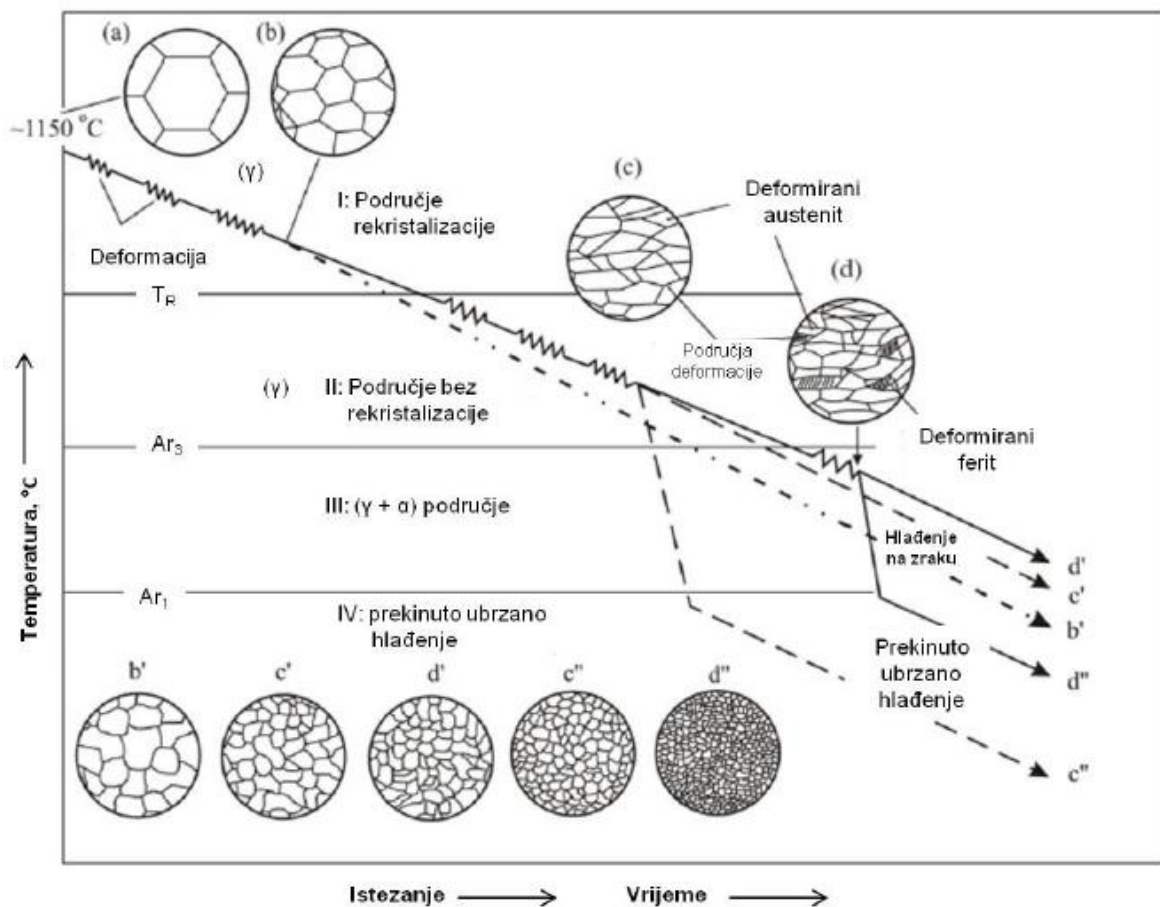
Ubrzanim hlađenjem kod konstrukcijskih čelika postiže se feritno-bainitna mikrostruktura za razliku od feritno-perlitne koja se postiže pri hlađenju na zraku. Ubrzano hlađenje uobičajeno se prekida pri temperaturi od $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ nakon čega se hlađenje nastavlja na zraku [6].

Na slici 4 prikazan je TTT dijagram s usporedbama brzina ohlađivanja.



Slika 4. TTT dijagram s usporedbama brzina ohlađivanja [4, 6]

Na slici 5 shematski je prikazan redosljed promjene mikrostrukture tijekom postupka termomehaničkog valjanja i naknadnog ubrzanog hlađenja.



Slika 5. Shematski prikaz promjene mikrostrukture tijekom postupka termomehaničkog valjanja i naknadnog ubrzanog hlađenja [6]

Kontrola mikrostrukture započinje zagrijavanjem čelika/ploče (stanje (a) na slici 5). U ovom stadiju kontrolira se veličina austenitnog zrna. U praksi se teži sitnom austenitnom zrnju jer ono predodređuje veličinu feritnog zrna. Reguliranje veličine austenitnog zrna je moguće precipitacijom finih čestica u austenitnoj strukturi čime se sprječava porast zrna. U tom smislu djeluje aluminij preko Al-nitrida i V, Nb i Ti preko svojih karbida, nitrida i karbonitrida. Daljnja mogućnost usitnjenja austenitnog zrna je većim stupnjem deformacije i nižom temperaturom završnog valjanja [8]. Sljedeći stadij je vruće valjanje. Kontroliranim valjanjem u ne-rekristalizacijskom stadiju oblikuje se fini austenit (stanje (b)). Nakon završetka vrućeg valjanja slijedi transformacija u igličasti ferit ili gornji bainit u stadiju ubrzanog hlađenja [7]. Dobivena mikrostruktura jednolikog acikularnog i bainitnog ferita daje

materijalu veću čvrstoću i udarni rad loma u odnosu na konvencionalni način proizvodnje. Osim toga, usitnjenjem zrna čelika snižava se i prijelazna temperatura te se ovi čelici primjenjuju pri temperaturama i do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Također, TMCP čelike karakterizira i manja osjetljivost na pojavu hladnih pukotina u zoni utjecaja topline kod zavarivanja zbog načina proizvodnje pri kojem je, smanjenjem udjela ugljika i ekvivalenta ugljika, kontroliran udio karbida [6].

3.2. Zavarljivost sa stanovišta primjene za niske temperature

Osim odličnih mehaničkih svojstava, čelike gradacije X80 prema API 5L standardu karakterizira i vrlo dobra zavarljivost. Rezultat je to razvoja na području metalurgije i termomehaničke obrade. Smanjenje udjela ugljika ispod 0,1 %, mikrolegiranje s Nb, V ili Al u korelaciji s parametrima toplinske obrade rezultiralo je sitnozrnatom strukturom odličnih mehaničkih svojstava. Međutim, potrebno je definirati parametre zavarivanja u uskim područjima kako bi se omogućilo dobivanje zavarenih spojeva zadovoljavajućih mehaničkih svojstava.

3.2.1. Promjene u ZUT-u za vrijeme zagrijavanja

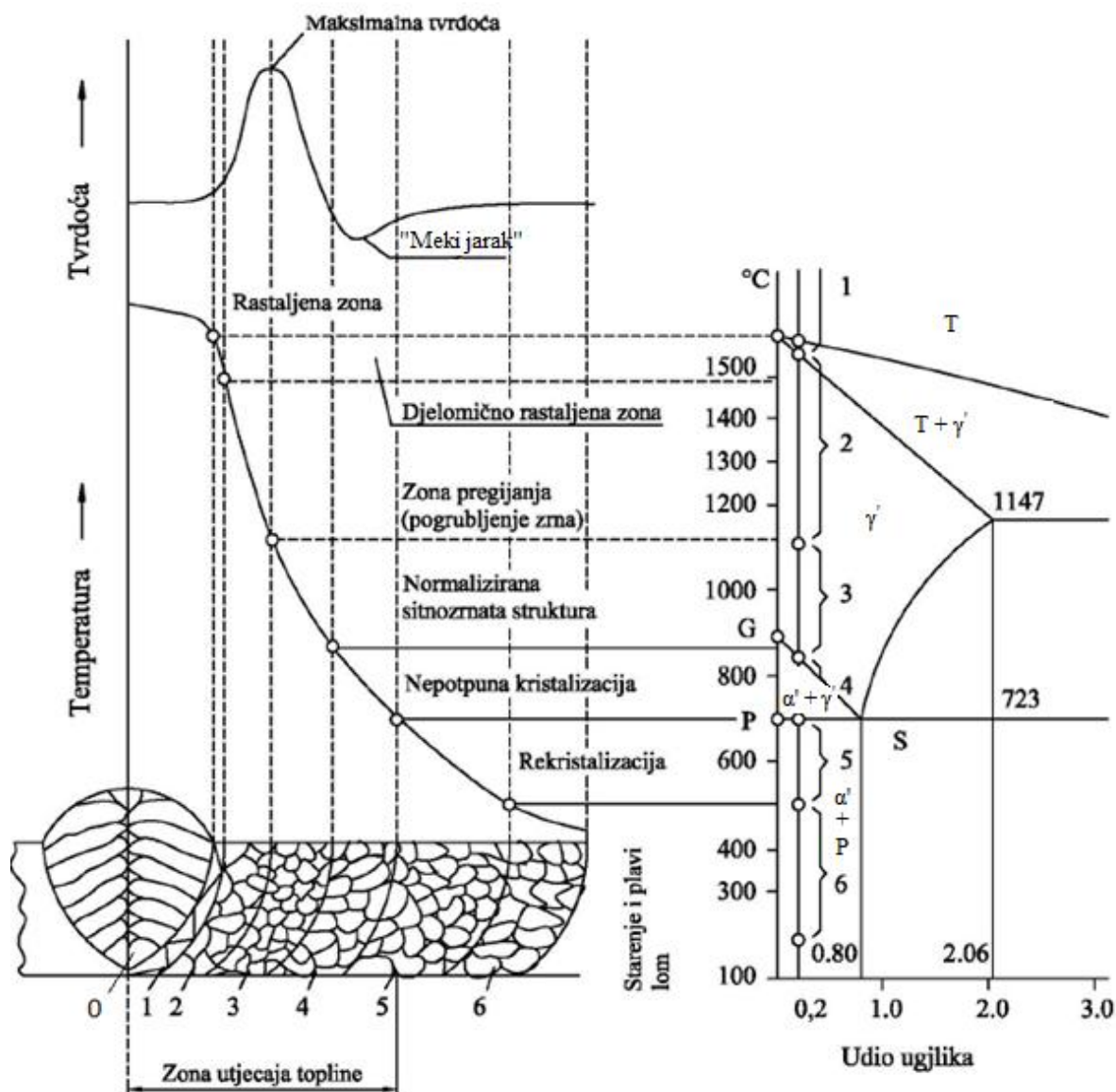
Zona utjecaja topline (ZUT) teorijski obuhvaća područje osnovnog materijala (OM) u kojem nije došlo do taljenja OM tijekom zavarivanja, ali u kojem je došlo do promjene mikrostrukture, a time i mehaničkih, korozivskih i drugih svojstava.

Kod dovoljno sporog ohlađivanja nelegiranih čelika iznad temperature A_1 ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$) dolazi do izrazitih promjena strukture u ZUT-u. Pogleda li se pažljivo zavareni spoj nakon provedenog postupka zavarivanja može se uočiti razliku između ZUT-a i osnovnog materijala. Razlog tome proizlazi iz činjenice što je u ZUT-u došlo do promjene i usmjerenosti veličine zrna što utječe na refleksiju svjetla [6].

Za poboljšane čelike koji se kale i popuštaju pri temperaturama do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ svako grijanje iznad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ uzrokovat će promjene svojstava OM, pa će, stoga ZUT obuhvatiti zonu zagrijavanja u temperaturnom rasponu od $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Širina ZUT-a ovisi o unosu topline odnosno postupku zavarivanja. Tako je kod laserskog i elektrootpornog zavarivanja širina ZUT-a svega nekoliko stotina mikrometara, dok je kod zavarivanja pod troskom (EPT) i do 15 mm [10].

Na slici 6 prikazane su mikrostrukturne promjene u ZUT-u zavarenog spoja nelegiranog niskougličnog konstrukcijskog čelika s feritno-perlitnom strukturom i udjelom ugljika 0,2 %.



Slika 6. ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougličnog feritno-perlitnog čelika s 0,2 % C [6]

Zona taljenja (0) – obuhvaća dio zavarenog spoja koji je bio iznad likvidus linije, tj. koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen. Prilikom ohlađivanja dolazi do kristalizacije pri čemu nastaje struktura različita od strukture osnovnog materijala [6]. Razlog tome je ispravljanje određenih elemenata, reakcija s okolnim medijem te mikrolegiranje s elementima iz dodatnog

materijala [10]. 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 koncentrador naprezanja pri opterećenju [6].

Djelomično rastaljena zona (1) – nalazi se između likvidus i solidus linije te predstavlja vezu između osnovnog materijala i metala zavara. Riječ je dvofaznoj (talina + krutina), vrlo uskoj zoni koja je bogata legirnim elementima i nečistoćama [10]. 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, oksidi i fosfidi) čime dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu što omogućuje pojavu toplih pukotina [6].

Zona pogrubljenja zrna (2) – nalazi se ispod solidus linije, ali značajno iznad temperature A_3 (1100-1450 °C). U ovoj zoni dolazi do pogrubljenja austenitnog zrna koja pri brzom hlađenju prelaze u Widmannstaettenovu strukturu koja je nepoželjno tvrda i krhka. Ponovno postizanje sitnozrnate i žilave feritno-perlitne strukture moguće je normalizacijom [6].

Zona normalizacije (3) – nalazi se neznatno iznad temperature A_3 . U toj zoni nastaje sitnozrnata normalizirana struktura koja obično posjeduje bolja svojstva od osnovnog materijala. Zagrijavanjem je 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 prije svega ovisi o brzini hlađenja i kemijskom sastavu čelika [6]. Izbjegavanje zakaljivanja može se postići predgrijavanjem ili povišenjem unosa topline prilikom zavarivanja.

Naime, kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj odžari, tj. normalizira djelomično prethodni sloj što povoljno djeluje na čvrstoću zavarenog spoja. Zbog toga zavari u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu i lošija mehanička svojstva od višeslojnih [6, 10].

Zona djelomične prekristalizacije (4) – nalazi se u temperaturnom području između temperatura A_1 i A_3 . Za vrijeme hlađenja dolazi do nastajanja klica ferita na granicama ili unutar zrna austenita koje zatim rastu, a kad temperatura padne ispod A_1 , zaostali austenit se pretvara u perlit. Također, ovisno o vrsti čelika i brzini hlađenja, moguća je pretvorba zaostalog austenita u nepoželjni martenzit.

Zona rekristalizacije (5) – nalazi se u temperaturnom području od 500 °C do A_1 temperature. U ovom temperaturnom području zaostali austenit prelazi u perlit [6].

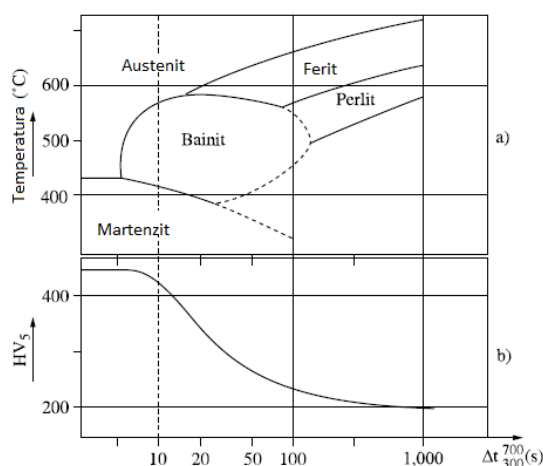
Zona starenja i plavog loma (6) – nalazi se u temperaturnom rasponu od 200 °C do 500 °C . U ovoj zoni ne dolazi do strukturnih promjena (ostaje feritno-perlitna struktura) ni do promjene oblika zrna, ali uslijed starenja može doći do pojave krhkosti [6].

3.2.2. Promjene u ZUT-u za vrijeme hlađenja

Na strukturu, a time i na svojstva zone utjecaja topline i metala zavara, presudan utjecaj ima vrijeme hlađenja između temperatura 800 i 500 °C ($t_{8/5}$). U tom se temperaturnom intervalu odvija većina pretvorbi u čeliku koje bitno utječu na njegova svojstva [8, 10].

U literaturi se često koriste izotermički TTT dijagrami iz kojih se na osnovu poznate vrijednosti $t_{8/5}$ zaključuje o nastaloj strukturi i tvrdoći zavarenog spoja. Pri tome treba naglasiti kako temperatura austenitizacije u zavarenom spoju nije konstantna kao na dijagramu [8]. Naime, za mikrolegirani čelik povišene čvrstoće temperatura austenitizacije na izotermičkom TTT dijagramu iznosi $900 - 950\text{ °C}$, dok je ona u realnim uvjetima zavarenog spoja i preko 1200 °C . Osim toga, u izotermičkom TTT dijagramu trajanje držanja pri temperaturi izotermičke pretvorbe je dugo, dok je kod zavarivanja vrlo kratko. Zbog toga dobivene vrijednosti preko TTT dijagrama treba uzeti kao orijentacijske [10].

Na slici 7 prikazan je izotermički TTT dijagram i ovisnost tvrdoće HV5 s obzirom na parametar $\Delta t_{7/3}$. Parametar $\Delta t_{7/3}$ predstavlja vrijeme potrebno da temperatura zavarenog spoja padne sa 700 na 300 °C .



Slika 7. a) Primjer izotermičkog TTT dijagrama b) Pripadajući graf tvrdoća-vrijeme ohlađivanja za čelik 0,18 %C, 1,4 %Mn, 0,4 %Si [10]

Iz prethodne slike vidljivo je da martenzitna struktura nastaje pri brzinama hlađenja koje su veće od gornje kritične brzine. Također, kao što je i poznato, martenzitnu strukturu karakterizira najveća tvrdoća čiji iznos ovisi o udjelu ugljika. Pri brzinama hlađenja između gornje i donje kritične brzine dolazi do stvaranja bainita.

Do stvaranja bainita dolazi pri temperaturama kod kojih je brzina difuzije atoma ugljika tako mala da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Zbog toga se umjesto lamela ferita i cementita stvaraju samo lamele ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica vidljivih samo pomoću elektronskog mikroskopa [11]. U slučaju bržeg hlađenja, pri nižim temperaturama nastat će donji bainit, dok će u slučaju sporijeg hlađenja pri višim temperaturama nastati gornji bainit. Donji bainit ima veću tvrdoću, ali nižu žilavost od gornjeg bainita [10].

Kao što je naglašeno ranije, visokočvrsti čelici gradacije X80 TMCP postupkom dobivaju F+B strukturu. Kako bi se izbjegli neočekivani i često ozbiljni otkazi u eksploataciji odnosno kako bi se sačuvao integritet konstrukcije, potrebno je u zoni utjecaja topline postići bainitnu strukturu.

3.2.3. Mikrostrukturne faze zavarenog spoja mikrolegiranih čelika

U metalu zavara niskougljičnih mikrolegiranih čelika tijekom procesa hlađenja i A/F transformacije mogu se pojaviti različite mikrostrukturne faze. Njihov nastanak ovisi o brzini hlađenja i kemijskom sastavu materijala. Unutar svakog zrna austenita nakon faze

transformacije austenit-ferit nalaze se po dva ili više različita mikrostrukturna konstituenta [12].

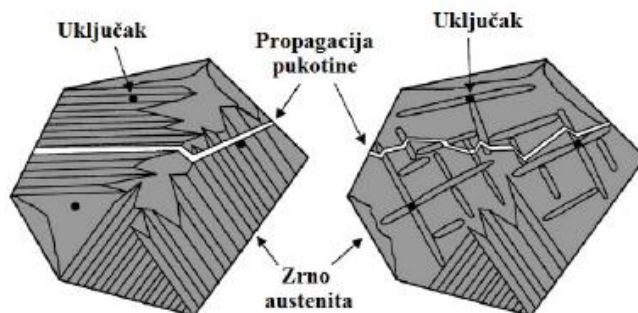
Najčešći oblici koji se javljaju su: alotriomorfni ferit (GBF), Widmanstaettenov ferit (WF), acikularni ili igličasti ferit (AF), poligonalni ferit (PF), gornji i donji bainit (GB i DB), martenzit (M), zaostali austenit (A_z) te novonastali perlit (P) [6, 12].

Acikularni ferit jedan je od mikrostrukturnih konstituenata koji se najčešće uočava u metalu zavara TMCP čelika te se zbog svojeg karakterističnog oblika jednostavno razlikuje od ostalih konstituenata [12]. Nastaje pri brzom hlađenju iz austenitnog područja niskougličnih čelika i na taj način onemogućava nastanak alotriomorfnog i Widmannstaettenovog ferita. Brzina transformacije u acikularni ferit brža je od one u Widmannstaettenov i alotriomorfni ferit, ali ipak sporija od martenzitne pretvorbe [12].

Mikrostrukturno gledano, acikularni ferit se sastoji od nepravilno oblikovanog ferita s manjom količinom dispergiranih karbida što rezultira dobrom kombinacijom mehaničkih svojstava tvrdoće i čvrstoće [12].

Nastajanje Widmannstaettenove strukture u čeliku ovisi o kemijskom sastavu, veličini austenitnih zrna i brzini hlađenja. U zavarenim spojevima Widmannstaettenova struktura može nastati u metalu zavara i u zoni utjecaja topline [6]. Također, uslijed izražene krupnozrnatosti izaziva povećanje krhkosti materijala te je stoga poželjno da udio navedene strukture u zavaru bude što manji. Legirni elementi kao što su mangan, krom i molibden pospješuju stvaranje Widmannstaettenove strukture u čeliku [6].

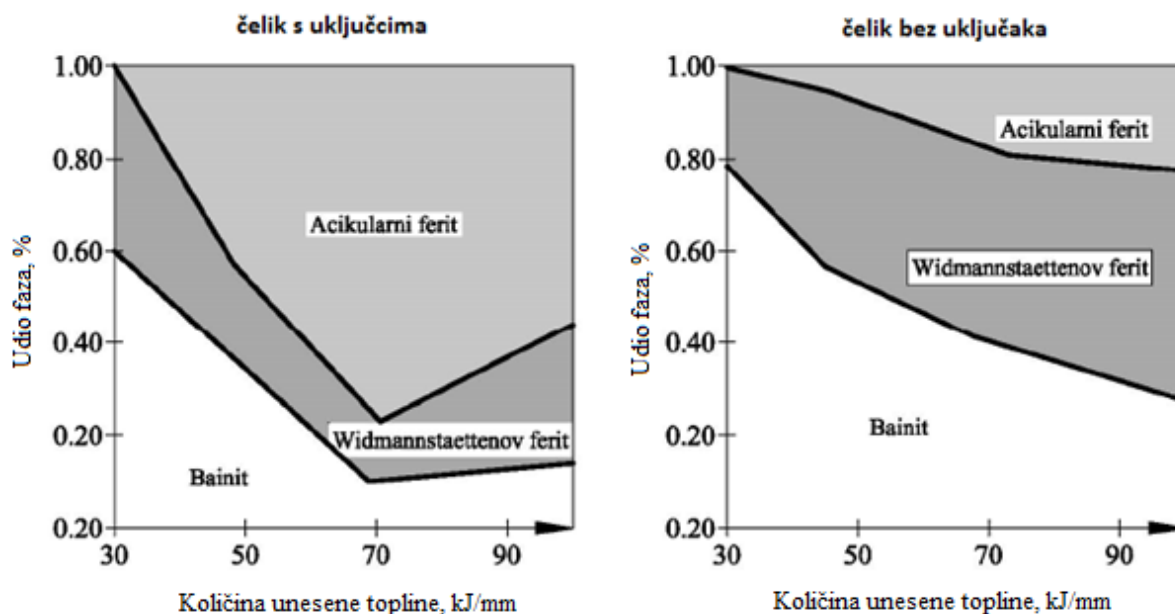
Na slici 8 shematski je prikazana propagacija pukotina u čelicima kao funkcija različitih mikrostrukturnih konstituenata (WF i bainit – lijevo; acikularni ferit – desno).



Slika 8. Shematski prikaz propagacije pukotina u čelicima s različitim mikrostrukturama [12]

Iz slike je vidljivo da se propagacija pukotine prostire nesmetano kroz strukturu koja se sastoji od Widmanstaettenovog ferita i gornjeg bainita što rezultira padom čvrstoće s porastom udjela ovih faza. Razlog tome leži u orijentaciji navedenih konstituenata koja je usmjerena te se kristalna zrna nalaze na rubovima austenitnog zrna [12]. Kod acikularnog ferita kristalna zrna nisu usmjerena, nego kaotično raspoređena te se nukleacija odvija na površini uključaka unutar austenitnog zrna zbog čega dolazi do usporavanja propagacije pukotine [12]. 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-SiO_2 , TiO mogu ujezgriti igličasti ferit u početnoj fazi nukleacije [6].

Pri zavarivanju čelika, u zoni utjecaja topline dolazi do porasta austenitnih zrna, a veličina zrna ovisi o količini unesene topline tijekom provedbe samog postupka. Iz toga proizlazi da prilikom zavarivanja čelika 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 unesene topline. No, pri vrlo velikim količinama unesene topline brzina hlađenja toliko opada da se javljaju veće količine Widmanstaettenovog ferita pri čemu dolazi do odgovarajućeg smanjenja količine igličastog ferita [6]. Opisani proces prikazan je slikom 9.



Slika 9. Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini [6, 12]

3.2.4. Hladne pukotine

Kada je riječ o zavarljivosti visokočvrstih čelika najveći problem predstavljaju hladne pukotine. Hladne pukotine nastaju nakon zavarivanja, pri temperaturi nižoj od 300 °C, a mogu se pojaviti i nekoliko sati poslije zavarivanja, pa su, stoga, dobile i naziv „zakašnjele pukotine“ („*delayed cracking*“). Zbog toga, kontrolu kvalitete metodama bez razaranja potrebno je provoditi 24 – 48 sati nakon zavarivanja. Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavara i u osnovnom materijalu odnosno u zoni utjecaja topline te mogu biti položene uzdužno i poprečno na os zavara.

Kod visokočvrstih čelika ZUT je otporniji na pojavu hladnih pukotina od područja metala zavara. Naime, metal zavara je više legiran i karakterizira ga heterogena mikrostruktura, stoga se ne mogu primijeniti iste smjernice za izbjegavanje hladnih pukotina za ZUT i na područje metala zavara [7].

Glavni uzročnici nastajanja hladnih pukotina su [7, 13, 14]:

- mikrostrukture metala zavara te ZUT-a koje su osjetljive na djelovanje vodika
- prisutnost vodika u zavaru
- djelovanje naprezanja nastalih skupljanjem zavara
- nepovoljan položaj ključaka u zavaru.

3.2.4.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina

Ovisnost mehanizma nastanka hladnih pukotina o kristalnoj strukturi govori o različitoj topljivosti vodika u različitim kristalnim strukturama. Naime, austenitna struktura ima FCC rešetku, dok feritna ima BCC rešetku. Zbog većeg razmaka između atoma BCC kristalne rešetke, vodik se omogućava veća mobilnost. Atomarni vodik ima manju difuznost kroz FCC rešetku, nego kroz BCC. Stoga je veća topljivost vodika u FCC rešetci, nego u BCC rešetci [7].

Ovisnost mehanizma nastajanja hladnih pukotina o mikrostrukturi ukazuje na to da su martenzitni čelici osjetljiviji na pojavu hladnih pukotina od feritnih, ali martenzitna mikrostruktura nije nužan preduvjet za nastanak pukotina [7, 14]. Osim toga, literatura navodi kako feritni čelici pokazuju veću sklonost prema hladnim pukotinama od austenitnih, pogotovo u grubozrnatoj strukturi ZUT-a [7].

3.2.4.2. Utjecaj difuzijskog vodika

Utjecaj vodika može se klasificirati u dvije glavne grupe [7]:

- 1) Kvazi-krhki lom visokočvrstih materijala koji se može pojaviti kod relativno niskih koncentracija vodika; ova pojava se naziva vodikovom krhkosti.
- 2) Pojava mjehurića (engl. *blister*) na površini i unutrašnje pucanje na mjestima uz sulfidne ili ostale uključke.

Dosadašnja istraživanja upućivala su na martenzit kao najosjetljiviju strukturu za pojavu hladnih pukotina u zoni metala zavara. Međutim, visokočvrsti čelici zbog manjeg udjela ugljika neće stvoriti veliku količinu martenzita, a i dalje su osjetljivi na pojavu hladnih pukotina. Stoga se postavlja pitanje djelovanja ostalih mikrostrukturnih konstituenata na zarobljavanje vodika i povećanje sklonosti hladnim pukotinama.

3.2.4.3. Utjecaj naprezanja

Značajna naprezanja za pojavu hladnih pukotina, ovisno o uzorku njihova nastanka, dijele se u tri skupine [7]:

- izravna naprezanja – djeluju neposredno u blizini zavarenog spoja, a rezultat su neravnomjerne raspodjele temperatura i prisutnih strukturnih promjena
- neizravna naprezanja – nastaju radi vanjskih ukrućenja i na njih se može utjecati u fazi konstruiranja
- vanjska naprezanja – javljaju se tijekom izrade i mogu djelovati na zavareni spoj tijekom zavarivanja; uvjetovana su težinom dijelova koji se spajaju, deformacijama u materijalu, itd.

3.2.4.4. Položaj uključaka u zavaru

Uz pojavu vodikovih pukotina veže se pojam tzv. zamki, tj. lokacija na kojima dolazi do skupljanja vodika. Postoji klasifikacija tih zamki prema veličini [14]:

- točkaste (elementi poput Mn, Ti, Cr, Nb)
- linearne (dislokacije)
- planarne ili bidimenzionalne (površine čestica, granice zrna, itd.)
- volumne ili prostorne (šupljine, pukotine, čestice).

Zamke u materijalu dijele se u ovisnosti o energiji vezivanja na: reverzibilne i ireverzibilne. Reverzibilne imaju karakterističnu slabiju energiju vezivanja vodika te vodik može uz njih biti privremeno vezan. Zbog slabe energije vezivanja postoji mogućnost otpuštanja vodika pri znatno nižim energijama što ima za posljedicu ponovnu pokretljivost vodika unutar materijala. Ireverzibilne zamke čvršće vežu vodik i za njihovo odvajanje potrebno je puno više energije. Zbog toga na mehanička svojstva materijala veći utjecaj ima reverzibilno vezan vodik jer će isti ubrzati lom ako se materijal podvrgne opterećenju [7].

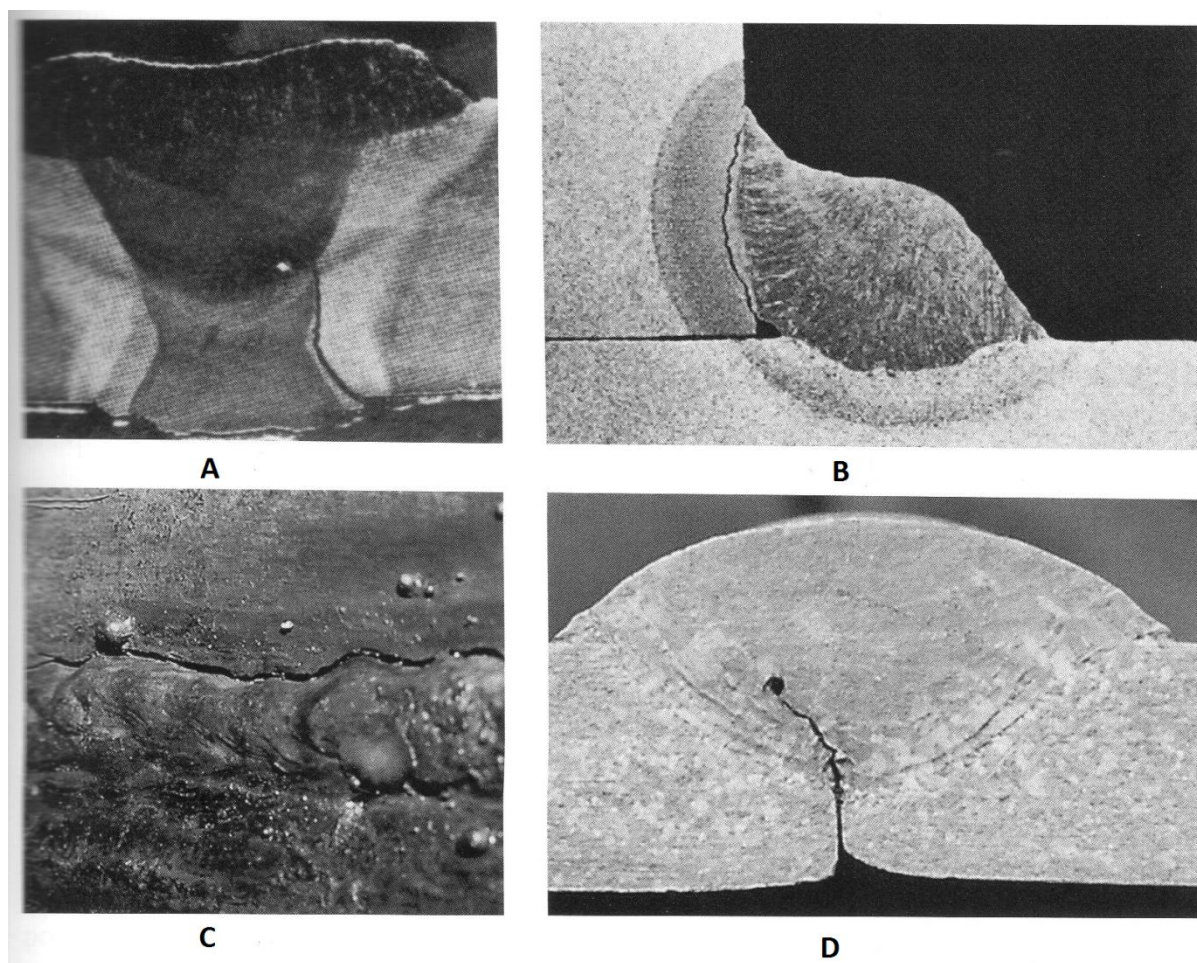
U literaturi [7] se navodi kako čelici s povećanim udjelom zaostalog austenita pokazuju bolju otpornost prema vodikom induciranim pukotinama zbog slabije difuzije vodika kroz austenit. Iako je zaostali austenit zamka i ima mogućnost zadržavanja vodika, u slučaju promjene strukture dolazi do otpuštanja veće količine vodika iz zamke što može negativno djelovati na materijal i stvoriti uvjete za nastanak pukotina.

Također, što je čelik više čvrstoće veća mu je sklonost prema pojavi vodikom uzrokovanih pukotina (HIC – *Hydrogen Induced Cracking*). Međutim, većina provedenih studija upućuje na to kako na pojavu HIC-a više djeluje mikrostruktura nego čvrstoća čelika. Kako navodi literatura [7], mikrostruktura koja ima veći broj zamki za vodik učinkovitija je u smanjenju osjetljivosti čelika prema vodikom induciranim pukotinama, zbog toga što je manje vodika uključeno u mehanizam nastanka HIC-a. Također, navodi se kako je glavni uzrok nastanka HIC-a vodik koji se nalazi u mobilnom stanju. Na slici 10 prikazana je pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 500x.



Slika 10. Pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 500x [14]

Slika 11 prikazuje karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja.



Slika 11. Karakteristične hladne pukotine u području zavarenog spoja; A – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; B – kutni spoj, pukotina u ZUT-u; C – sučeljeni spoj, pukotina u ZUT-u; D – sučeljeni spoj, pukotina iz neprovarenog korijena [13]

3.3. Utjecaj parametara zavarivanja na vrijednost udarnog rada loma metala zavara

Iznos udarnog rada loma metala zavara rezultat je složenih utjecaja nekoliko čimbenika: vrste dodatnog materijala, unosa topline, utjecaja zaštitnog plina, predgrijavanja i toplinske obrade nakon zavarivanja. Imajući na umu međudjelovanje svih navedenih parametara, uopće ne iznenađuje ograničena količina literaturnih podataka o postizanju optimalnih vrijednosti udarnog rada loma metala zavara.

U ovom dijelu rada prikazan je utjecaj navedenih parametara na iznos udarnog rada loma u metalu zavara visokočvrstih čelika.

3.3.1. Utjecaj dodatnog materijala

Prilikom zavarivanja sitnozrnatih visokočvrstih čelika najčešće se odabire dodatni materijal čiji je kemijski sastav sličan kemijskom sastavu osnovnog materijala kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka lokalnih korozivskih oblika [15].

Takav dodatni materijal najčešće je legiran niklom, molibdenom i manganom [16, 17]. Naime, nikal potiče stvaranje acikularnog ferita koji pak povećava otpornost metala zavara prema krhkom lomu [17]. Kao što je već naglašeno, acikularni ferit je poželjna mikrostruktura u metalu zavara zbog male veličine zrna (najčešće 1 – 3 μm) te nasumične orijentacije kristala koja sprječava širenje pukotina [18]. Molibden smanjuje veličinu zrna, povećava udio acikularnog ferita te smanjuje udio gornjeg bainita djelujući tako pozitivno na iznos žilavosti u metalu zavara [17]. Mangan sprječava nastanak poligonalnog ferita te tako doprinosi povoljnom iznosu udarnog rada loma metala zavara [16].

Glavni kriteriji za izbor dodatnog materijala su: naprezanje na granici tečenja, vlačna čvrstoća i vrijednost udarnog rada loma. Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće posebno su osjetljivi na nastanak pukotina te je stoga potrebno odabrati takav dodatni materijal koji će povećati otpornost na nastanak istih. Kemijski elementi koji imaju najveći utjecaj na porast otpornosti metala zavara prema nastanku pukotina su: Mn, Cr, Ni i Mo [19].

Ovisno o iznosu granice razvlačenja u odnosu na osnovni materijal, dodatni materijal se može klasificirati kao [5]:

- tzv. *undermatched* – granica razvlačenja DM je manja od granice razvlačenja OM
- tzv. *matched* – isti iznos granice razvlačenja OM i DM
- tzv. *overmatched* – granica razvlačenja DM je veća od granice razvlačenja OM.

Izbor dodatnog materijala prema tzv. *overmatching* kriteriju štiti metal zavara od negativnog utjecaja pukotina nastalih tijekom zavarivanja. Međutim, korištenje dodatnog materijala po *overmatching* načelu kod visokočvrstih čelika zahtijeva veće predgrijavanje i veću temperaturu između prolaza kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka vodikom induciranih pukotina [15]. Razlog tome proizlazi iz činjenice što dodatni materijal sadrži veću količinu ugljika od osnovnog. Osim toga, *overmatching* DM posjeduje povoljan iznos udarnog rada loma naročito pri niskim temperaturama [15]. Zbog toga dodatni materijal prema

overmatching kriteriju odabire se kod visokih zahtjeva u eksploataciji, odnosno kada je njegova primjena isplativa s ekonomskog stajališta.

Kod čelika visoke čvrstoće, često se koristi kombinacija više dodatnih materijala različitih mehaničkih svojstava. Tako se za zavarivanje koristi *undermatched* dodatni materijal, dok se za popunu koristi *matched* ili *overmatched* DM.

Korištenjem *undermatched* dodatnog materijala za zavarivanje koristi se smanjuje se potreba za predgrijavanjem bez pada vlačne čvrstoće spoja [20]. Osim smanjenja potrebe za predgrijavanjem, primjenom *undermatched* dodatnog materijala dolazi i do smanjenja zaostalih naprezanja [20]. Poznato je da su zaostala naprezanja jedan od glavnih uzročnika nastanka hladnih pukotina, pa se stoga može zaključiti da primjenom ove vrste dodatnog materijala dolazi do smanjenja vjerojatnosti nastanka hladnih pukotina.

Također, potrebno je odabrati dodatni materijal sa što nižim sadržajem difuzijskog vodika. Najmanji sadržaj difuzijskog vodika ima žica bez obloge tzv. puna žica, dok najveći sadržaj difuzijskog vodika ima žica punjena rutilnim praškom. Ako se koristi REL postupak zavarivanja, najčešće se odabire dodatni materijal s bazičnom oblogom koji sadrži < 5 ml $H_2/100$ g zavara. Takve elektrode poznate su pod nazivom „*low hydrogen*“.

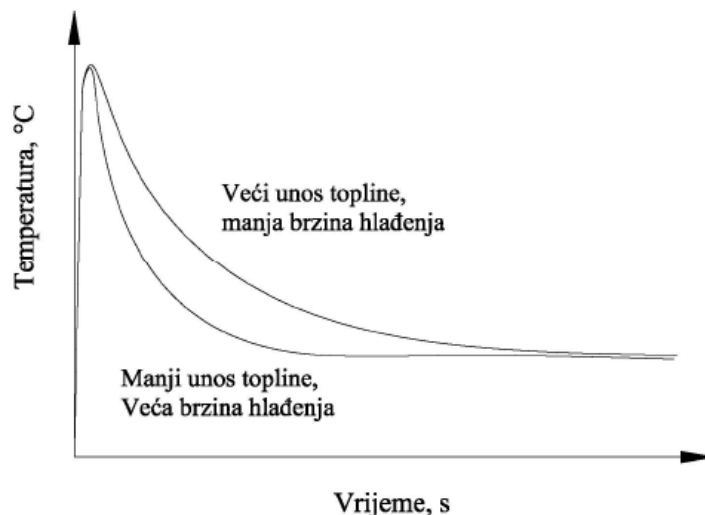
Povećanjem promjera elektrode raste i struja zavarivanja, a time i unos topline što ima za posljedicu smanjenje brzine hlađenja. Negativna strana povećanja promjera dodatnog materijala je pad vrijednosti udarnog rada loma što je posebno primijećeno u eksploataciji pri niskim temperaturama [21].

3.3.2. Utjecaj unosa topline

Unos topline ima veliki utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Najznačajnija karakteristika unosa topline je određivanje brzine hlađenja zavara čime djeluje i na mikrostrukturne promjene u zavaru odnosno ima veliki utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Zbog toga potrebno je strogo kontrolirati unos topline. Naime, preveliki unos topline kao i prevelika temperatura predgrijavanja i prevelika temperatura između prolaza rezultirat će padom čvrstoće, tvrdoće i udarnog rada loma, dok će niski unos topline odnosno niska temperatura predgrijavanja i niska međuprolazna temperatura povećati rizik prema nastanku hladnih pukotina [22].

Na slici 12 kvalitativno je prikazan utjecaj količine unesene topline u zavar na brzinu ohlađivanja. Iz slike je vidljivo kako veća količina unesene topline znači manju brzinu ohlađivanja.



Slika 12. Utjecaj unosa topline na brzinu ohlađivanja [5, 23]

Iznos unosa topline moguće je izračunati prema izrazu [24]:

$$Q = k \frac{U \cdot I}{v} \cdot \frac{60}{1000} \quad \text{kJ/cm} \quad (1)$$

pri čemu je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

k – faktor toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja

U – napon zavarivanja, V

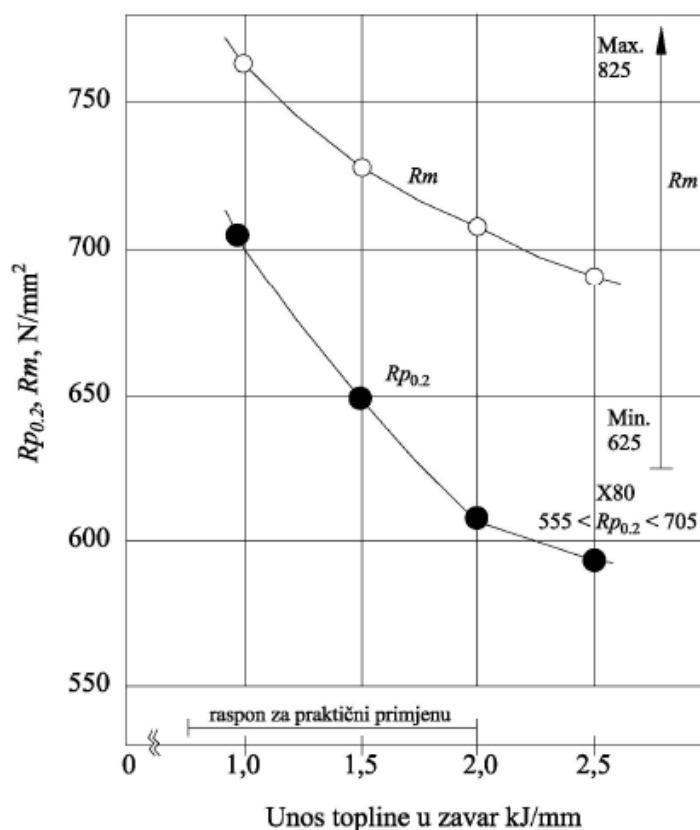
I – jakost struje zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, cm/min.

Osim unosa topline, na promjenu udarnog rada loma metala zavara značajno utječe i širina poprečnog presjeka zavara. Naime, porastom širine zavara, što odgovara većem unosu topline, vrijednost udarnog rada loma pada [21, 23]. Kako bi se spriječio porast širine zavara i dobila bolja vrijednost udarnog rada loma potrebno je odabrati elektrodu manjeg promjera odnosno zavarivati u više prolaza. Naime, kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj odžari, tj.

barem djelomično normalizira sloj ispod što povoljno djeluje na iznos udarnog rada loma. Također, porastom unosa topline dolazi do stvaranja Widmanstaettenovog ferita koji negativno djeluje na udarni rad loma [21]. Iz toga slijedi da se unatoč dobroj zavarljivosti parametri i tehnologija zavarivanja moraju egzaktno definirati jer se može vrlo lako izaći iz granica koje garantiraju homogenu strukturu i mali rizik od pojave pukotina.

Na slici 13 prikazana je ovisnost unosa topline kod zavarivanja čelika API 5L X80 na konvencionalnu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Također, na slici je vidljiv i preporučeni raspon unosa topline za navedenu vrstu čelika. Sa slike se može jasno vidjeti kako porastom unosa topline dolazi do pada čvrstoće.



Slika 13. Ovisnost rezultata statičkog vlačnog ispitivanja o unosu topline u zavar čelika X80 [6]

Kao što je rečeno, kako bi se izbjegla pojava pukotina i degradacija mehaničkih svojstava, prilikom zavarivanja visokočvrstih čelika potrebno je strogo definirati parametre i tehnologiju zavarivanja. Danas se provode brojna istraživanja kako bi se odredili optimalni parametri zavarivanja visokočvrstih čelika. Prilikom zavarivanja poželjno je da unos topline bude što

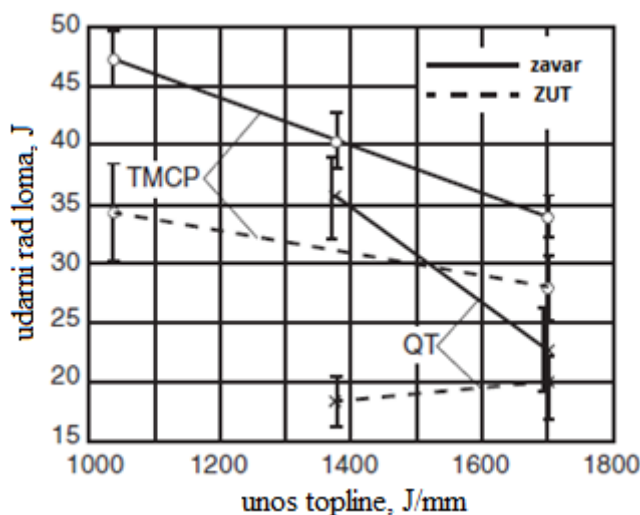
manji, međutim, treba paziti na donju granicu toga iznosa jer postoji mogućnost nastanka hladnih pukotina.

Najosjetljivije područje zavarenog spoja predstavlja zona pogrubljenja zrna. Naime, povećanim unosom topline dolazi do pogrubljenja bainitnog zrna i povećanja udjela krhkog Widmanstaettenovog ferita. Grublje bainitno zrno ima za posljedicu smanjenje gustoća dislokacija što sve zajedno dovodi do pada vrijednosti udarnog rada loma u spomenutom području [5]. Stoga je potrebno zavarivati sa što manjim unosom topline kako bi zona pogrubljenja zrna bila čim manja.

Prijašnja istraživanja ukazivala su da niski unos topline odgovara vrijednostima ispod 2 kJ/mm, međutim danas je taj iznos 0,5 kJ/mm ili čak i manje.

Brojna istraživanja provedena su sa unosom topline od 1 kJ/mm ili više. Tako autori Pirinen M. et al. [25] provode istraživanje na visokočvrstom čeliku debljine 8 mm sa unosom topline 1,0 – 1,7 kJ/mm. Pri zavarivanju koristi se dodatna žica promjera $\varnothing 1,2$ te zaštitni plin 85 %Ar/15 %CO₂. Dodatni materijal je odabran prema tzv. *undermatching* kriteriju. Ispitivanje se provodi na dva čelika proizvedena QT i TMCP postupkom.

Na slici 14 prikazani su dobiveni rezultati udarnog rada loma u ovisnosti o unosu topline. Ispitivanje je provedeno na temperaturi od -40 °C, a položaj V utora nalazi se na liniji staljivanja.



Slika 14. Utjecaj unosa topline na iznos udarnog rada loma (KV) [25]

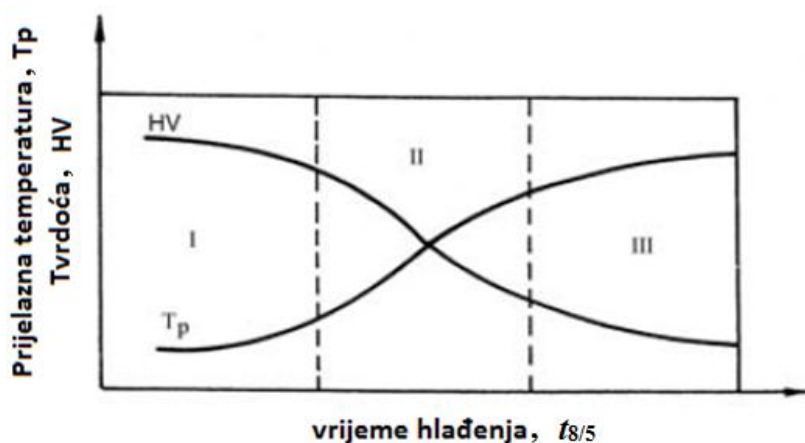
Iz slike je vidljivo da veće vrijednosti udarnog rada loma odgovaraju čeliku proizvedenom TMCP postupkom. Naime, čelik proizveden QT postupkom sadrži više ugljika, a poznato je

da sadržaj ugljika negativno utječe na iznos udarnog rada loma. Također, iz slike je vidljivo da su vrijednosti udarnog rada loma veće u području metala zavara nego u zoni utjecaja topline. Na temelju provedenog istraživanja može se zaključiti da unos topline 1,0 – 1,7 kJ/mm, za čelik debljine 8 mm proizveden TMCP postupkom, daje još uvijek zadovoljavajući iznos udarnog rada loma pri -40 °C.

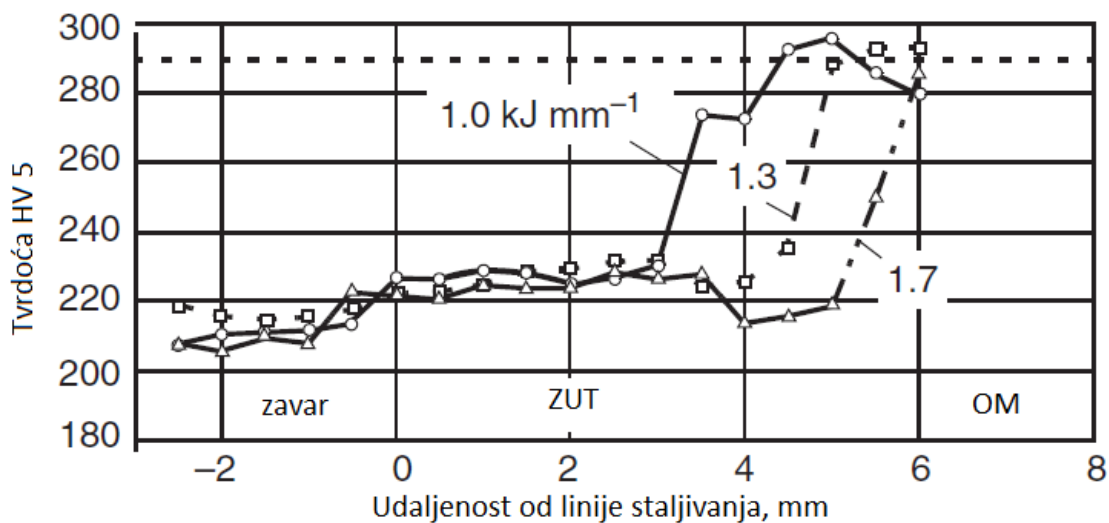
U svom drugom radu Pirinen M. [5] proveo je istraživanje na visokočvrstom čeliku proizvedenom TMCP postupkom sa tri različita unosa topline (1,0; 1,3 i 1,7 kJ/mm). Čelik je također bio debljine 8 mm i dodatni materijal je odabran prema *undermatching* kriteriju. Pri zavarivanju je korišten MAG postupak sa promjerom žice Ø 1,2 i plinskom mješavinom 85 %Ar/15 %CO₂. Prijašnja istraživanja su pokazala da prilikom zavarivanja visokočvrstog čelika sa granicom razvlačenja od 690 MPa, unos topline može biti 1 – 2 kJ/mm. Međutim, ova studija je jasno naznačila da je taj raspon preveliki. Naime, kod zavarivanja visokočvrstog čelika sa granicom razvlačenja od 690 MPa unos topline ne smije biti veći od 1 kJ/mm. Ukoliko je unos topline veći od toga, dolazi do pada žilavosti i čvrstoće te u najgorem slučaju loma konstrukcije zbog pojave krhke faze u ZUT-u. U ovom slučaju (debljina 8 mm) unos topline od 1 kJ/mm odgovara vremenu hlađenja $t_{8/5}$ u iznosu od 21 s. Prema podacima iz literature [8] poželjno je da vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ za mikrolegirane čelike iznosi 10-30 s.

Prema istraživanju Kolednjak D. [6], povećanjem unosa topline i temperature predgrijavanja utvrđen je pad udarnog rada loma u ZUT-u. Naime, za unos topline od 0,8 kJ/mm postignut je maksimalni iznos udarnog rada loma čija vrijednost opada s porastom unosa topline prema 1,5 kJ/mm.

Na slici 15 prikazan je utjecaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na iznos tvrdoće i prijelaznu temperaturu. Kod zavarivanja mikrolegiranih čelika obično se odabire vrijeme hlađenja koje odgovara području II na slici. Time se uklanja opasnost nastanka hladnih pukotina (područje I) te dobivanje niskog iznosa udarnog rada loma (područje III).

Slika 15. Utjecaj vremena hlađenja $t_{8/5}$ na tvrdoću i prijelaznu temperaturu [8]

Čelici proizvedeni TMCP postupkom imaju poprilično ravnu krivulju tvrdoće u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Na slici 16 prikazan je utjecaj unosa topline s obzirom na iznos tvrdoće. Vidljivo je da iznos tvrdoće postupno raste prema osnovnom materijalu.



Slika 16. Utjecaj unosa topline na tvrdoću TMCP čelika [25]

Manje vrijednosti tvrdoće u metalu zavara dobivene su zbog korištenja dodatnog materijala prema tzv. *undermatching* kriteriju. Ukoliko se žele postići veće vrijednosti tvrdoće metala zavara potrebno je odabrati dodatni materijal veće čvrstoće.

3.3.3. Utjecaj zaštitnog plina

Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti materijala i primjeni. Da bi mogli razumjeti ponašanje i utjecaj zaštitnih plinova prilikom zavarivanja, potrebno je poznavati njihova fizikalna svojstva. Najvažnija fizikalna svojstva zaštitnih plinova su [6]:

- a) ionizacijski potencijal – Ionizacijski potencijal predstavlja energiju potrebnu za ionizaciju plina. Pri konstantnim parametrima plina manji ionizacijski potencijal imaju plinovi s većom atomskom masom, te je kod njih potreban manji napon za održavanje električnog luka. Također, zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala značajno olakšavaju uspostavljanje električnog luka i povećavaju stabilnost u radu.
- b) toplinska vodljivost – Zaštitni plinovi s većom toplinskom vodljivošću 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.
- c) disocijacija i rekombinacija zaštitnih plinova – Disocijacija znači razlaganje plinova u atomarno stanje i odvija se pri vrlo visokim temperaturama, dok rekombinacija predstavlja ponovno stvaranje molekule. Do rekombinacije dolazi prilikom kontakta disociranog plina sa znatno hladnijom površinom radnog komada. Tada se oslobađa velika količina energije u obliku topline što zatim utječe na intenzitet taljenja osnovnog materijala. U slučaju korištenja Ar i He nema rekombinacije s obzirom da su navedeni plinovi već u atomarnom stanju zbog čega ne može doći do disocijacije. Iz toga slijedi da će pri jednakoj temperaturi električnog luka generirana topline na radnoj površini biti veća pri upotrebi CO₂, O₂ i H₂ kao zaštitnih plinova nego kod Ar i He.
- d) kemijska reaktivnost zaštitnih plinova – Kemijska reaktivnost odnosi se na sklonost pojedinog plina iz zaštitne atmosfere da na temperaturama električnog luka reagira s elementima prisutnima u talini. Ar i He spadaju u skupinu inertnih plinova i kemijski

ne utječu na zavar, dok u skupinu reaktivnih plinova na bazi kisika, tzv. oksidansa, spadaju CO₂ i O₂.

- e) gustoća plina – Plinovi veće gustoće od gustoće zraka za jednaku zaštitu taline zavara zahtijevaju manji dotok.
- f) čistoća plina – Kako bi se izbjegao nepovoljan utjecaj na brzinu zavarivanja, integritet, izgled i oblik zavara te na nastanak pora, svaki plin koji se primjenjuje kao zaštitni mora zadovoljiti minimalnu čistoću određenu normama.

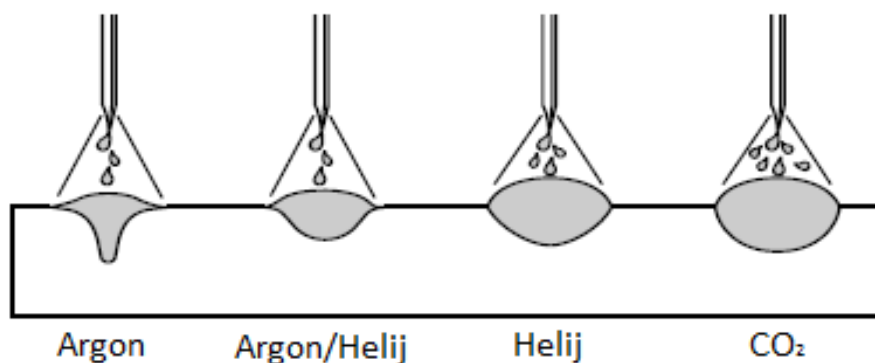
Plinovi koji se koriste kao zaštitna atmosfera kod zavarivanja mogu biti pojedinačni, dvokomponentne, trokomponentne ili četverokomponentne plinske mješavine. U ovom radu razmotrit će se dvokomponentne plinske mješavine argona i ugljičnog dioksida, pošto su iste korištene u eksperimentalnom dijelu rada.

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 [26].

3.3.3.1. Dvokomponentne plinske mješavine Ar/CO₂

Mješavine Ar/CO₂ su najčešće korištene plinske mješavine za MAG zavarivanje nelegiranih čelika te podržavaju sva četiri načina prijenosa metala. Primjenjuju se i kod MAG impulsnog zavarivanja nehrđajućih čelika, ako je udio CO₂ manji od 4 %. Štrcajući luk zahtijeva udio CO₂ manji od 18 %, dok prijenos metala kratkim spojem zahtijeva minimalno 20 %CO₂ u mješavini. Mješavine sa udjelom do 18 %CO₂ pogodne su za impulsni način prijenosa metala [27].

Na slici 17 prikazan je utjecaj plinske mješavine na širinu i penetraciju zavara. Iz slike je vidljivo da argon daje usku zonu jezgre luka, za razliku od CO₂ koji ima veću toplinsku provodnost i prema tome širu jezgru luka što se ujedno odražava i na oblik penetracije u osnovnom materijalu.



Slika 17. Utjecaj plinske mješavine na širinu i penetraciju zavara [27]

U Europi se najčešće koristi mješavina 82 %Ar/18 %CO₂. Navedenom mješavinom moguće je ostvariti sve načine prijenosa metala te se dobiva široki električni luk koji rezultira kvalitetnijim penetracijskim profilom na mjestu spoja. Osim toga, svoju primjenu nalazi i kod STT (eng. *Surface Tension Transfer*) načina zavarivanja [27].

Mješavina 92 %Ar/8 %CO₂ koristi se kod prijenosa metala štrcajućim lukom te kod impulsnog načina zavarivanja. Navedenom mješavinom ostvaruje se manji unos topline spram mješavine 82/18 zbog manjeg udjela CO₂.

3.3.3.2. Utjecaj kisika na stvaranje acikularnog ferita

Sadržaj kisika u metalu zavara uvelike utječe na metalurške promjene u zavaru odnosno na mehanička svojstva samog 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. Prema tome, potrebno je optimirati udio kisika s ciljem postizanja maksimalnog iznosa udarnog rada loma.

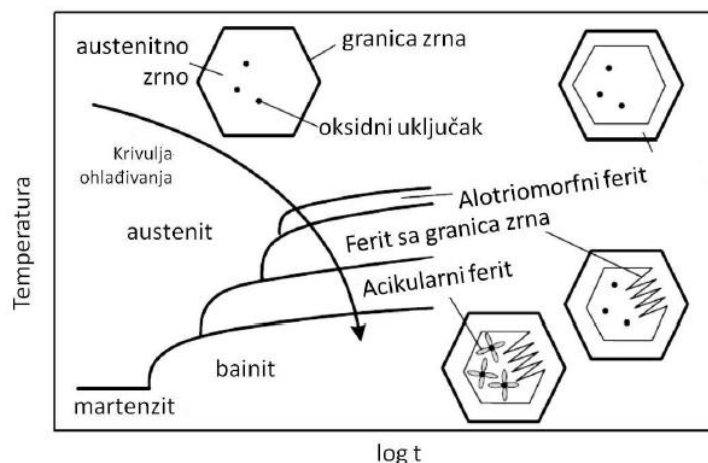
Kod MAG zavarivanja, porastom udjela CO₂ u plinskoj mješavini dolazi do značajnog izvora kisika te njegove apsorpcije u metal zavara [28]. Međutim, samo će se jedan dio kisika iz atmosfere električnog luka povezati s legirajućim elementima u metalu zavara tvoreći tako okside, dok će ostala većina disipirati u okolinu. Nastali oksidi će ili tvoriti trosku, ili postati zarobljeni kao uključci u metalu zavara [28].

Poznato je da se nukleacija acikularnog ferita odvija na površini uključaka unutar austenitnog zrna. Iz toga proizlazi kako nastali uključci uvelike utječu na konačnu mikrostrukturu metala zavara.

Prema literaturi [6, 29] veličina uključaka nalazi se u rasponu $0,2 - 2,0 \mu\text{m}$, a prosječna veličina od oko $0,4 \mu\text{m}$ smatra se optimalnom. Također, navodi se minimalno potrebni udio kisika od 200 ppm jer se inače ne stvara dovoljno nukleacijskih mjesta za formiranje acikularnog ferita. S druge strane, ukoliko je koncentracija kisika iznad 300 ppm, dolazi do stvaranja velikog broja oksidnih uključaka manjih od $0,2 \mu\text{m}$. Takvi 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 alotriomornog ferita.

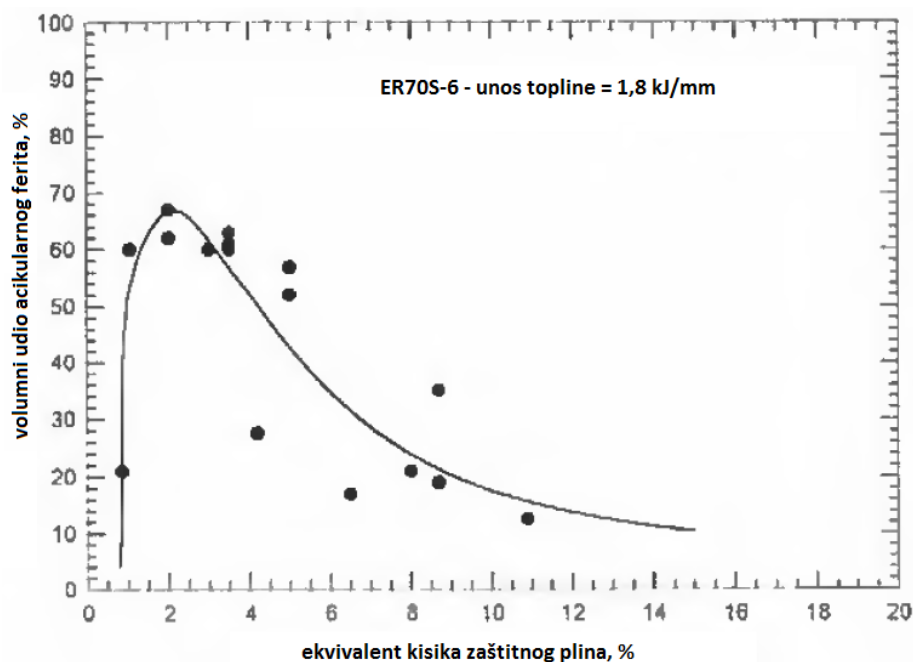
Kako bi se postigla željena struktura acikularnog ferita potrebno je optimirati količinu kisika jer je nužno stvoriti dovoljan broj, dobru disperziju i optimalnu veličinu oksidnih uključaka [6].

Slika 18 prikazuje slijed solidifikacije metala zavara u izotermičkom TTT dijagramu za niskouglični čelik.



Slika 18. Izotermički TTT dijagram za metal zavara niskougličnog čelika [6, 28, 29]

Slika 19 prikazuje utjecaj ekvivalenta kisika na volumni udio acikularnog ferita u metalu zavara. Iz slike je vidljivo da se najveći udio acikularnog ferita dobije za iznos ekvivalenta kisika između 2 i 3.



Slika 19. Utjecaj ekvivalenta kisika na volumni udio acikularnog ferita u metalu zavara [28]

Ekvivalent kisika O_{eq} računa se prema izrazu [6, 28]:

$$O_{eq} = -0,088 + 0,148 [CO_2]^{1,524} + [O_2] \quad (2)$$

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

Prema istraživanju Kolednjak D. [6] dobiveni rezultati su u skladu sa slikom 18. Naime, ekvivalentu kisika O_{eq} u iznosu od 3,4 % koji sadrži 8 % CO_2 u mješavini, odgovara najveći udio acikularnog ferita. Također, porast ekvivalenta kisika od 3,4 % na 23,78 % rezultira smanjenjem udarnog rada loma u metalu zavara.

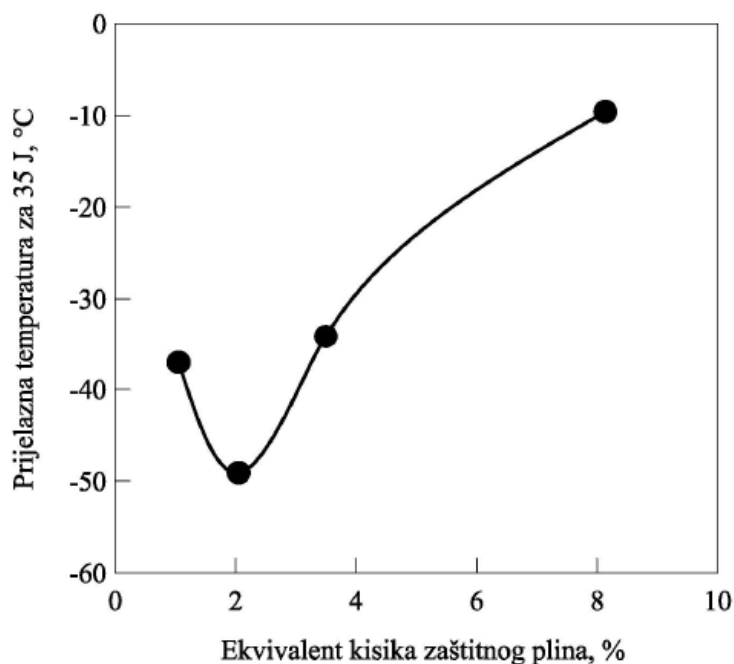
Gadallah R. et al. [30] istraživali su utjecaj plinske mješavine na svojstva zavara kod FCAW (eng. *Flux Cored Arc Welding*) postupka zavarivanja. Najveći udio AF (68,63 %) postignut je uz plin 100 % Ar, dok je najmanji udio AF (52,40 %) postignut uz plin 100 % CO_2 . Mješavinom 82 % Ar/18 % CO_2 dobiveno je 60,10 % AF, dok je mješavina 75 % Ar/25 % CO_2 osigurala 56,81 % acikularnog ferita u mikrostrukturi. Unatoč većem udjelu AF kod mješavine 82/18, mješavina 75/25 pokazala se kao najbolji izbor s ekonomskog stajališta. Također, udio AF od 56,81 % još uvijek je dostatan kad su u pitanju mehanička svojstva materijala.

3.3.3.3. Utjecaj ekvivalenta kisika na mehanička svojstva zavara

Prisutnost kisika pri zavarivanju ima značajan utjecaj na mikrostrukturu metala zavara, a time i na njegova osnovna mehanička svojstva, prije svega na udarni rad loma. Stoga se u zavarivanju uvodi pojam ekvivalenta kisika radi procjene zaštitnog plina na svojstva zavara.

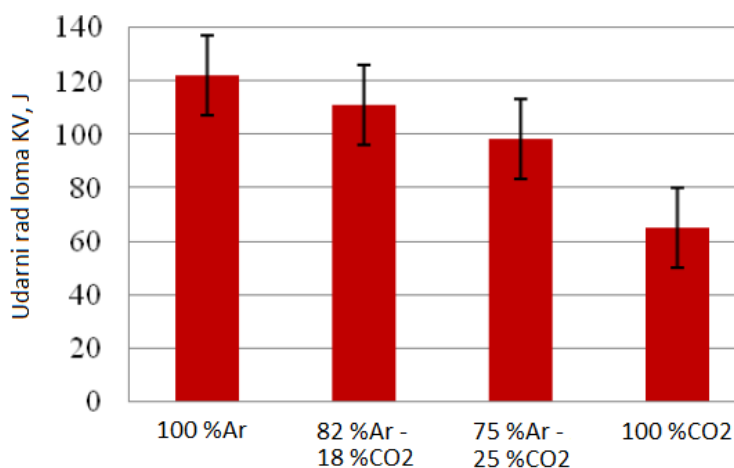
Količina poželjnog mikrokonstituenta, acikularnog ferita, uvelike ovisi o iznosu ekvivalenta kisika. Iz toga proizlazi kako izbor zaštitnog plina ima veliki utjecaj na mehanička svojstva metala zavara.

Slika 20 prikazuje ovisnost ekvivalenta kisika s obzirom na iznos prijelazne temperature za 35 J. Iz slike je jasno vidljivo da se najniža prijelazna temperatura postiže za udio ekvivalenta kisika od 2 % što odgovara maksimalnom udjelu acikularnog ferita u metalu zavara. Time se potvrđuje tvrdnja pozitivnog utjecaja acikularnog ferita na iznos udarnog rada loma.



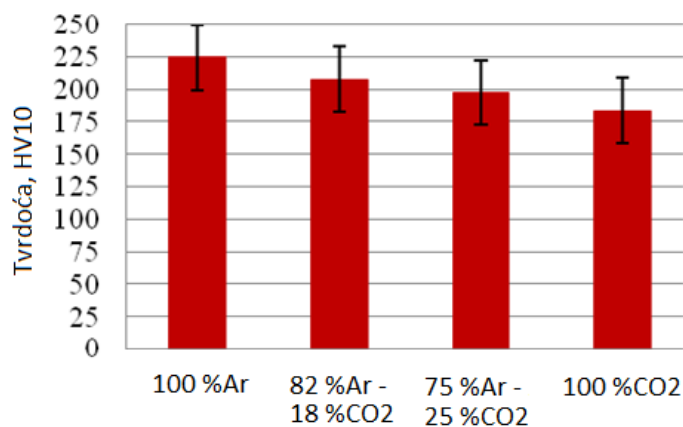
Slika 20. Ovisnost ekvivalenta kisika na iznos prijelazne temperature [28]

Slika 21 prikazuje utjecaj zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara. Iz slike je vidljivo da porastom %CO₂ dolazi do sniženja udarnog rada loma. Također, porastom %CO₂ dolazi i do porasta ekvivalenta kisika. Samim time, porastom ekvivalenta kisika dolazi do pada vrijednosti udarnog rada loma.



Slika 21. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma [30]

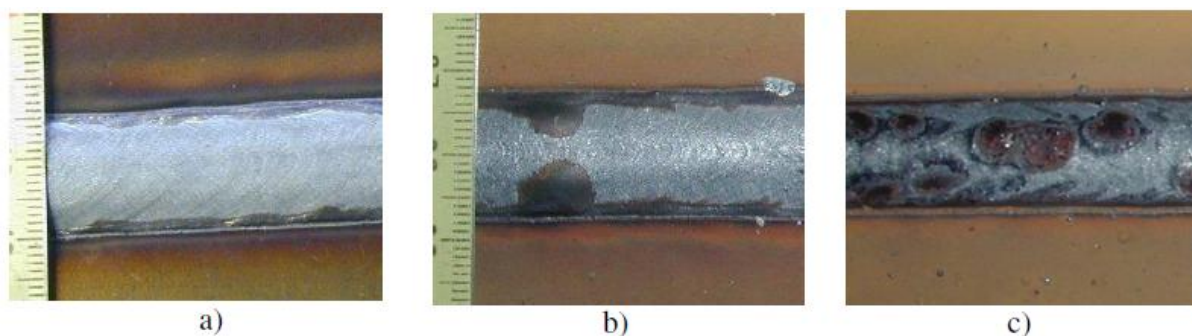
Slika 22 prikazuje utjecaj zaštitnog plina na iznos tvrdoće metala zavara. Iz slike je vidljivo da porastom %CO₂, odnosno ekvivalenta kisika, dolazi do pada tvrdoće.



Slika 22. Utjecaj zaštitnog plina na iznos tvrdoće metala zavara [30]

Porastom %CO₂ u zaštitnoj mješavini dolazi do oksidacije, tj. povezivanja mangana i silicija s kisikom te nastanka manganovih i silicijevih oksida koji se izlučuju na površini zavara u obliku troske [6]. Kako mangan i silicij značajno utječu na čvrstoću zavarenog spoja, može se zaključiti da će porastom %CO₂ doći do smanjenja mehaničkih svojstava zavara.

Slika 23 prikazuje količinu izlučene troske s obzirom na %CO₂. Vidljivo je da se porastom oksidativne atmosfere značajno povećava količina izlučene troske na površini zavara što odgovara većem gubitku legirnih elemenata u metalu zavara [6].



Slika 23. Količina izlučene troske za različite plinske mješavine; a) 8 %CO₂ u Ar; b) 18 %CO₂ u Ar; c) 28 %CO₂ u Ar [6]

3.3.4. Utjecaj predgrijavanja

Prema literaturi [13] utjecaj predgrijavanja razmatra se kroz četiri točke:

- 1) Sušenje površine – Površinska vlaga u obliku vode, snijega, leda ili mraza u električnom luku razlaže se na vodik i kisik. Ugljikovodici poput ulja i maziva također doprinose povećanju vodika u električnom luku. Vodik se otapa u rastaljenom stanju te je uz taj fenomen povezan niz negativnih posljedica.
- 2) Smanjivanje brzine hlađenja – Manja brzina hlađenja rezultira mikrostrukturom niže tvrdoće koja je manje osjetljiva na pojavu hladnih pukotina.
- 3) Podizanje temperature zavara iznad prijelazne temperature žilavog u krhki lom – Time se sprječava nastanak pukotina zbog grešaka vezivanja i lošeg protaljivanja. Martenzitni čelici imaju prijelaznu temperaturu iznad sobne, dok mnogi konstrukcijskih čelici imaju prijelaznu temperaturu ispod -20 °C.
- 4) Smanjivanje zaostalih naprezanja – Predgrijavanjem se smanjuje temperaturna razlika između metala zavara i osnovnog materijala. Samim time smanjuje se razlika u termalnoj kontrakciji te sukladno tome dolazi do manjih iznosa zaostalih naprezanja.

Kod mikrolegiranih visokočvrstih čelika temperatura predgrijavanja se najčešće određuje prema normi HRN EN 1011-2:2002 Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika [31].

3.4. HRN EN ISO 16834:2013

U ovom dijelu rada opisana je norma HRN EN ISO 16834:2013 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom plina za čelike visoke čvrstoće – Razredba [32].

Ovisno o tome uzima li se u obzir granica razvlačenja, R_e ili vlačna čvrstoća, R_m , postoje dvije vrste klasifikacije dodatnog materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće.

3.4.1. Klasifikacija prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J

Klasifikacija prema granici razvlačenja R_e i udarnom radu loma od 47 J je podijeljena u šest dijelova:

- 1) Prvi dio označuje korišteni postupak zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja razlikuju se dvije oznake: **G** za MIG/MAG postupak zavarivanja te **W** za TIG postupak zavarivanja.
- 2) Drugi dio predstavlja oznaku koja ukazuje na vrijednost čvrstoće i istežljivosti metala zavara, što je i prikazano tablicom 1.

Tablica 1. Oznake za klasifikaciju dodatnog materijala ovisno o iznosu granice razvlačenja i istežljivosti [32]

Oznaka	Minimalni iznos granice razvlačenja, R_e , MPa	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	Minimalna istežljivost, A, %
55	550	640-820	18
62	620	700-890	18
69	690	770-940	17
79	790	880-1080	16
89	890	940-1180	15

- 3) Treći dio predstavlja oznaku koja ukazuje na vrijednost udarnog rada loma metala zavara. Oznake u tablici 2 ukazuju na temperaturu pri kojoj je postignut iznos udarnog rada loma od 47 J. Potrebno je provesti tri ispitivanja uzorka, te se samo jedna vrijednost može nalaziti u intervalu 32-47 J, dok ostale moraju biti ≥ 47 J.

Tablica 2. Oznake za udarni rad loma metala zavara [32]

Oznaka	Temperatura na kojoj je osiguran udarni rad loma od 47 J (ili 27 J), °C
Z	nema zahtjeva
A ili Y	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

- 4) Četvrti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na korišteni zaštitni plin. Zaštitni plin označuje se sukladno normi HRN EN ISO 14175:2008 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke.

Tablica 3. Klasifikacija zaštitnih plinova prema normi HRN EN ISO 14175:2008 [26]

Oznaka		Sadržaj pojedinog plina u ukupnom udjelu					
Glavna skupina	Podskupina	CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			ostatak	0,5≤He≤95		
M1	1	0,5≤CO ₂ ≤5		ostatak		0,5≤H ₂ ≤5	
	2	0,5≤CO ₂ ≤5		ostatak			
	3		0,5≤O ₂ ≤3	ostatak			
	4	0,5≤CO ₂ ≤5	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak			
M2	0	5<CO ₂ ≤15		ostatak			
	1	15<CO ₂ ≤25		ostatak			
	2		3<O ₂ ≤10	ostatak			
	3	0,5≤CO ₂ ≤5	3<O ₂ ≤10	ostatak			
	4	5<CO ₂ ≤15	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak			
	5	5<CO ₂ ≤15	3<O ₂ ≤10	ostatak			
	6	15<CO ₂ ≤25	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak			
M3	1	25<CO ₂ ≤50		ostatak			
	2		10<O ₂ ≤15	ostatak			

Tablica 3. Nastavak

Oznaka		Sadržaj pojedinog plina u ukupnom udjelu					
Glavna skupina	Podskupina	CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
M	3	25 < CO ₂ ≤ 50		ostatak			
	4	5 < CO ₂ ≤ 25		ostatak			
	5	25 < CO ₂ ≤ 50		ostatak			
C	1	100					
	2	ostatak	0,5 ≤ O ₂ ≤ 30				
R	1			ostatak		0,5 < H ₂ ≤ 15	
	2			ostatak		15 < H ₂ ≤ 50	
N	1						100
	2			ostatak			0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	3			ostatak			5 < N ₂ ≤ 50
	4			ostatak		0,5 < H ₂ ≤ 10	0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	5					0,5 < H ₂ ≤ 50	ostatak
O	1		100				
Z	Sastav plinskih mješavina nije definiran						

5) Peti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na kemijski sastav dodatnog materijala.

Tablica 4. Oznaka kemijskog sastava dodatnog materijala [32]

Oznaka (ISO 16834)	Kemijski sastav, %										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Ostali elementi
Mn3NiCrMo	0,14	0,60 - 0,80	1,30 - 1,80	0,015	0,018	0,50 - 0,65	0,40 - 0,65	0,15 - 0,30	0,30	0,03	0,25
Mn3Ni1CrMo	0,12	0,40 - 0,70	1,30 - 1,80	0,015	0,018	1,20 - 1,60	0,20 - 0,40	0,20 - 0,30	0,35	0,05 - 0,13	0,25
Mn3Ni1Mo	0,12	0,40 - 0,80	1,30 - 1,90	0,015	0,018	0,80 - 1,30	0,15	0,25 - 0,65	0,30	0,03	0,25
Mn3Ni1,5Mo	0,08	0,20 - 0,60	1,30 - 1,80	0,015	0,018	1,40 - 2,10	0,15	0,25 - 0,55	0,30	0,03	0,25
Mn3Ni1Cu	0,12	0,20 - 0,60	1,20 - 1,80	0,015	0,018	0,80 - 1,25	0,15	0,20	0,30 - 0,65	0,03	0,25
Mn3Ni1MoCu	0,12	0,20 - 0,60	1,20 - 1,80	0,015	0,018	0,80 - 1,25	0,15	0,20 - 0,55	0,30 - 0,65	0,03	0,25
Mn3Ni2,5CrMo	0,12	0,40 - 0,70	1,30 - 1,80	0,015	0,018	2,30 - 2,80	0,20 - 0,60	0,30 - 0,65	0,30	0,03	0,25
Mn4Ni1Mo	0,12	0,50 - 0,80	1,60 - 2,10	0,015	0,018	0,80 - 1,25	0,15	0,20 - 0,55	0,30	0,03	0,25
Mn4Ni2Mo	0,12	0,25 - 0,60	1,60 - 2,10	0,015	0,018	2,00 - 2,60	0,15	0,30 - 0,65	0,30	0,03	0,25
Mn4Ni1,5CrMo	0,12	0,50 - 0,80	1,60 - 2,10	0,015	0,018	1,30 - 1,90	0,15 - 0,40	0,30 - 0,65	0,30	0,03	0,25
Mn4Ni2CrMo	0,12	0,60 - 0,90	1,60 - 2,10	0,015	0,018	1,80 - 2,30	0,20 - 0,45	0,45 - 0,70	0,30	0,03	0,25
Mn4Ni2,5CrMo	0,13	0,50 - 0,80	1,60 - 2,10	0,015	0,018	2,30 - 2,80	0,20 - 0,60	0,30 - 0,65	0,30	0,03	0,25
Z	Sastav koji nije prethodno specificiran										

6) Slovo T stavlja se uz oznaku ako se nakon zavarivanja provodi toplinska obrada.

3.4.2. Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći R_m i udarnom radu loma od 27 J

Klasifikacija prema vlačnoj čvrstoći i udarnom radu loma od 27 J podijeljena je u pet dijelova:

- 1) Kao i u točki 3.4.1., prvi dio označuje korišteni postupak zavarivanja. Tako se koristi oznaka **G** za MIG/MAG postupak, dok se oznaka **W** koristi za TIG postupak zavarivanja.
- 2) Drugi dio predstavlja oznaku koja ukazuje na vrijednost čvrstoće i istezljivosti metala zavara, što je i prikazano tablicom 5.

Tablica 5. Oznake dodatnog materijala prema iznosu vlačne čvrstoće [32]

Oznaka	Minimalni iznos granice razvlačenja, R_e , MPa	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	Minimalna istezljivost, A , %
59X	490	590-790	16
62X	530	620-820	15
69X	600	690-890	14
76X	680	760-960	13
78X	680	780-980	13
83X	745	830-1030	12

- 3) Oznaka iz tablice 2 ukazuje na temperaturu pri kojoj se osigurava udarni rad loma od 27 J. Pri tome je potrebno provesti ispitivanje na pet uzoraka. Najniže i najviše vrijednosti se odbacuju. Dvije od tri ostale epruvete moraju imati vrijednost udarnog rada loma > 27 J, dok vrijednost udarnog rada loma ostale epruvete može biti u rasponu 20-27 J. Prosjek ispitivanih epruveta mora biti minimalno 27 J.
- 4) Četvrti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na korišteni zaštitni plin. Kao što je navedeno, zaštitni plin označuje se sukladno normi HRN EN ISO 14175:2008 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke. U tablici 3 prikazane su sve vrste zaštitnih plinova.

- 5) Peti dio predstavlja oznaku koja ukazuje na kemijski sastav dodatnog materijala. U prilogu je dan izvadak iz norme.

4. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Austenitni nehrđajući čelici spadaju u skupinu visokolegiranih čelika. Potpuno su otporni na opću atmosfersku koroziju pri sobnoj temperaturi, ali su osjetljivi na lokalne oblike korozijskog razaranja poput: interkristalne, rupičaste, napetosne, galvanske, korozije u procjepu i mikrobiološki izazvane korozije. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće prilično su skromne i slične vrijednostima kod niskougljičnih čelika te se ne mogu povisiti strukturnom transformacijom. Veće vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja moguće je postići hladnom deformacijom.

Prema američkom sustavu označavanja (AISI – *American Iron and Steel Institute*) austenitni nehrđajući čelici dijele se u dvije skupine: čelici serije 200 i čelici serije 300.

Austenitni nehrđajući čelici iz serije 200 imaju veći sadržaj ugljika, mangana i dušika, ali i manji sadržaj nikla spram čelika serije 300. Danas se najčešće koriste čelici iz skupine 300.

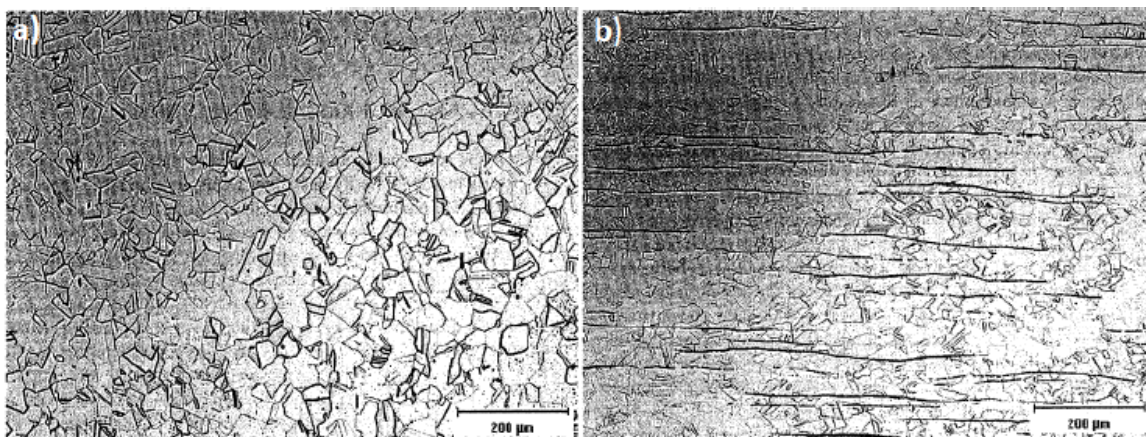
Većina austenitnih čelika razvijena je iz čelika 18-8 (18 %Cr i 8-10 %Ni; oznaka 304 prema AISI), dodavanjem legirnih elemenata i modificiranjem sastava čime su se postigla bolja mehanička i korozijska svojstva [33]. Najčešće primjenjivane vrste austenitnih nehrđajućih čelika su čelici oznake 304, 316, 324 i 347 te njihove varijante [33, 34].

Osim brojevnice oznake, čelik može imati i slovni dodatak. Tako u nazivu čelika oznaka L označava sniženi sadržaj ugljika na vrijednost do 0,03 %. Takve legure imaju poboljšanu otpornost prema interkristalnoj koroziji. Vrste s oznakom H imaju povišeni udio ugljika na vrijednost do 0,1 % i koriste se pri povišenim temperaturama jer porastom sadržaja ugljika rastu vrijednosti čvrstoće. Oznaka N govori da je povećan sadržaj dušika do vrijednosti 0,2 %. Dušik kod austenitnih čelika povoljno djeluje na čvrstoću, otpornost na adheziju i otpornost na rupičastu koroziju [33, 34].

4.1. Fizička metalurgija austenitnih nehrđajućih čelika

Kemijski sastav i termomehanička obrada austenitnih nehrđajućih čelika prilagođavaju se tako da mikrostruktura na sobnoj temperaturi bude austenitna ili austenitna s malim udjelom feritne faze što ovisi o balansu alfa i gama faza i gamagenih legirnih elemenata [34].

Slika 24 prikazuje mikrostrukturu austenitnog nehrđajućeg čelika oznake AISI 304.



Slika 24. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika oznake AISI 304; a) Potpuni austenit; b) Austenit i delta ferit [34]

Trakaste nakupine delta ferita usmjerene su paralelno sa smjerom valjanja. Feritna faza nastaje zbog segregacije alfa faza i gamagenih legirnih elemenata (prije svega kroma) tijekom kristalizacije i naknadne termomehaničke obrade. Volumni udio delta ferita najčešće ne prelazi 2-3 %. Njegova prisutnost u mikrostrukturi nije nužno nepoželjna, iako u određenim uvjetima može smanjiti duktilnost i žilavost austenitnih nehrđajućih čelika [33, 34].

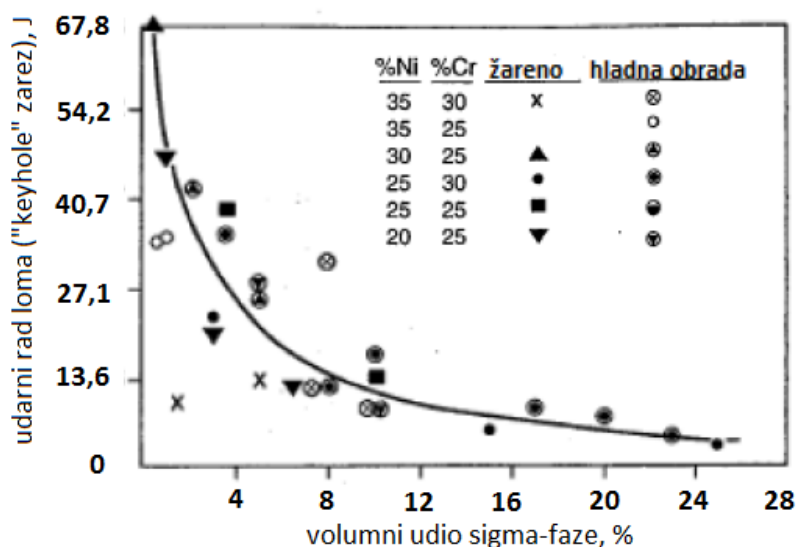
Razlog smanjenju žilavosti su nepoželjne mikrostrukturne faze (karbidi $M_{23}C_6$ i sigma faza) koje se izlučuju uz trakaste nakupine delta ferita.

Izlučeni karbidi $Cr_{23}C_6$ na granici zrna mogu dovesti do interkristalne korozije. Zbog toga se čelik stabilizira kemijskim elementima (titan ili niobij) koji imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma te se tako sprječava nastanak kromovih karbida $Cr_{23}C_6$ po granicama zrna i smanjuje se opasnost nastanka interkristalne korozije. Ova pojava je jače izražena kod austenitnih čelika koji su očvrštnuti deformacijom u hladnom stanju [33].

U austenitnim čelicima koji u mikrostrukturi imaju delta ferita, sigma faza nastaje u vrlo kratkom vremenu. Osim kroma, formiranje sigma faze potiču molibden, niobij, silicij, volfram, vanadij, titan i cirkonij dok ugljik i dušik usporavaju rast precipitata sigma

faze. Sigma faza nastaje na granici ferit-austenit i dalje se širi u ferit. Što je veći udio delta ferita, sigma faza nastaje brže i u većoj količini [33].

Slika 25 prikazuje utjecaj sigma faze na udarni rad loma. Iz slike je jasno vidljivo da je poželjni udio sigma faze u austenitnoj mikrostrukturi čim manji. Naime, samo 5 % sigma faze u austenitnoj mikrostrukturi smanjuje URL više od 50 %.



Slika 25. Utjecaj sigma faze na udarni rad loma austenitnih nehrđajućih čelika pri sobnoj temperaturi [34]

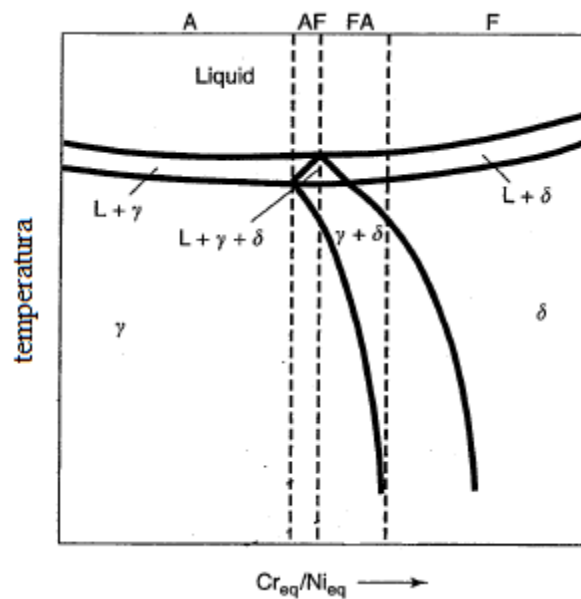
4.2. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelik zavaruje se bez značajnijih poteškoća ukoliko se tijekom zavarivanja poštuje određena tehnološka disciplina. Zbog svojih specifičnih fizikalnih svojstava spram ugljičnog čelika poput: 40 % većeg koeficijenta toplinskog širenja, 3x manje toplinske vodljivost, 4x većeg električnog otpora; iznimno je bitno kontrolirati unos topline kako bi reducirali deformacije i smanjili vjerojatnost nastanka toplih pukotina.

4.2.1. Mikrostrukturne promjene zone taljenja austenitnih nehrđajućih čelika

Ovisno o uvjetima primarne i sekundarne kristalizacije i omjeru Cr_{eq}/Ni_{eq} , postoje četiri različite mikrostrukture metala zavara austenitnih nehrđajućih čelika.

Na slici 26 prikazan je pseudobinarni fazni dijagram sustava Fe-Cr-Ni. Iz dijagrama je vidljivo koje mikrostrukturne faze mogu nastati u primarnoj kristalizaciji legura s različitim udjelima kroma i nikla te što se s njima događa hlađenjem od solidus linije do sobne temperature.



Slika 26. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni [34]

Na lijevoj strani dijagrama (područje A na slici) nalaze se legure koje primarno kristaliziraju kao potpuno austenitne te zadržavaju austenitnu mikrostrukturu hlađenjem do sobne temperature. Ako se nakon primarne austenitne kristalizacije u mikrostrukturi pojavi određeni udio ferita, takva solidifikacija predstavlja područje AF na slici. Do pojave ferita u mikrostrukturi dolazi zbog povećanog udjela kroma i molibdena, α -genih elemenata koji potiču stvaranje ferita.

Vidljivo je da su u AF području, između likvidus i solidus linije, prisutne tri faze (ferit, austenit i talina). Ferit se formira uzduž granica zrna i zadržava do sobne temperature. Desno od trofaznog područja nalaze se legure koje primarno kristaliziraju kao feritne.

Ako se na kraju primarne kristalizacije u mikrostrukturi nalazi udio austenita, takve legure pripast će području FA sa slike. Legurama koje primarno kristaliziraju u ferit, a nalaze se blizu trofaznog područja, hlađenjem do sobne temperature jedan dio ferita prekrystalizira u austenit, a drugi dio ostaje stabilan sve do sobne temperature. Koliki će dio ferita prijeći u austenit ovisi o udjelu legiranih elemenata [35].

Legure koje se nalaze uz desni rub dijagrama ostaju 100 % feritne sve do sobne temperature.

4.2.2. Pojave u zoni utjecaja topline

U zoni utjecaja topline kod austenitnih nehrđajućih čelika mogu se pojaviti slijedeće pojave [34]:

- a) Rast zrna: Kod austenitnih nehrđajućih čelika koji se zavaruju u žarenom ili vruće-valjanom stanju porast zrna nije uobičajena pojava, osim ako je unos topline izrazito visok. Ako je osnovni materijal očvrstnut hladom deformacijom, velika je vjerojatnost porasta zrna što ima za posljedicu značajni pad čvrstoće u ZUT-u.
- b) Formiranje ferita: Formiranje ferita u ZUT-u ograničit će rast zrna i smanjiti vjerojatnost nastanka likvacijskih pukotina.
- c) Precipitacija: Kod austenitnih nehrđajućih čelika postoji opasnost izlučivanja $M_{23}C_6$ karbida i Cr_2N nitrida na granici zrna te je stoga potrebno obratiti pozornost na vrijeme zadržavanja u temperaturnom području gdje se izlučuju navedeni karbidi i nitridi.

4.2.3. Tople pukotine

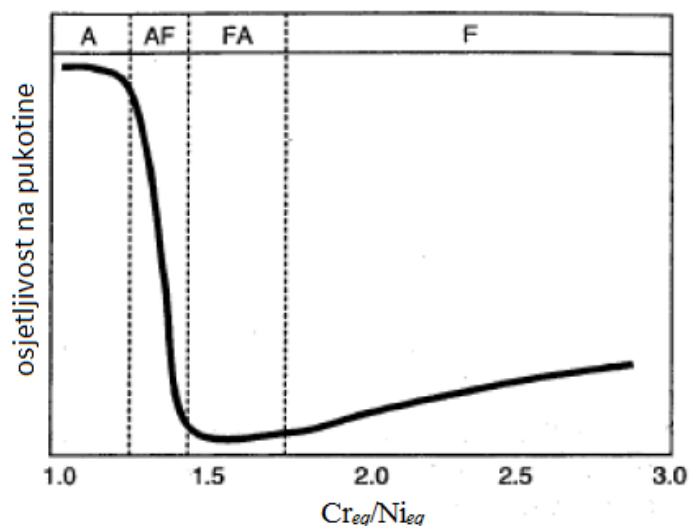
Tople pukotine kod zavarivanja nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama kristalnog zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zvara, ali su moguće i u zoni utjecaja topline [13].

Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zvara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava toplih pukotina posebno je povezana s nečistoćama u materijalu, ali i legiranjem, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žlijeba te, naročito, nepravilnim izborom dodatnog materijala [13].

Ovisno o mjestu nastanka toplih pukotina razlikuju se dvije osnovne vrste [34]:

- a) Kristalizacijske (nastaju u metalu zvara): Osjetljivost materijala prema nastanku kristalizacijskih pukotina prvenstveno ovisi o sastavu metala zvara. Najosjetljiviji je metal zvara koji primarno kristalizira kao austenitni (A i AF područje), dok najveću otpornost prema ovoj vrsti pukotina pokazuje metal zvara koji kristalizira u FA području. Također, čelici s povećanim udjelima nečistoća (S i P) imaju veću osjetljivost prema nastanku kristalizacijskih pukotina. Osim toga, preveliki unos topline i konkavni oblik zvara potiču stvaranje ove vrste pukotina [34].

Slika 27 prikazuje ovisnost nastanka toplih pukotina s obzirom na iznos omjera Cr_{eq}/Ni_{eq} kod austenitnih nehrđajućih čelika. Iz slike je vidljivo da najveću osjetljivost prema toplim pukotinama pokazuju čelici potpuno austenitne strukture, dok najmanju osjetljivost pokazuju čelici koji primarno kristaliziraju u ferit.



Slika 27. Osjetljivost na pukotine kao funkcija omjera Cr_{eq}/Ni_{eq} [34]

- b) Likvacijske: Najčešće nastaju u ZUT-u, a mogu biti uzdužne i poprečne na smjer metala zavara. Također, mogu se pojaviti i u zoni taljenja kod zavarivanja u više prolaza kada zona taljenja postaje ZUT prilikom zavarivanja slijedećeg prolaza. Uzrok nastajanja likvacijskih pukotina je prisutnost kapljevite faze (nečistoća) na granicama zrna pri visokim temperaturama (~ 1250 °C) kada je metal zavara već primarno kristalizirao [10]. Granice zrna ne mogu izdržati naprezanja nastala hlađenjem zavara te dolazi do pukotina likvacijskog tipa.

Također, sadržaj delta-ferita u metalu zavara na sobnoj temperaturi, FN može se koristiti kao indikator otpornosti metala zavara prema vrućim pukotinama [36]. Vrijednost FN za A područje iznosi 0, za AF područje iznosi 0-3, dok za FA područje iznosi između 3 i 20 [34]. Za kriogene primjene preporuča se sadržaj FN u iznosu između 3 i 6 što odgovara austenitno-feritnoj mikrostrukturi ili iznos FN mora biti manji od 0,5 što pak odgovara potpuno austenitnoj strukturi [36].

Također, važno je napomenuti da feritni broj nije jednak volumnom udjelu ferita (%) [36].

Kako bi se spriječio nastanak likvacijskih pukotina u ZUT-u potrebno je odabrati takav osnovni materijal koji će u strukturi imati određeni udio ferita. Također, formiranje ferita na granici zrna ograničava rast zrna što također pozitivno djeluje na smanjivanje opasnosti od likvacijskih pukotina [34].

Kod potpuno austenitnih čelika mogućnost nastanka likvacijskih pukotina moguće je minimizirati smanjenjem nečistoća, kontroliranim unosom topline i smanjenjem veličine zrna [34].

Kako bi se spriječio nastanak likvacijskih pukotina u metalu zavora, potrebno je postići metal zavora sa određenim udjelom ferita. Ovisno o materijalu, iznos feritnog broja (FN) najčešće mora biti između 2 i 6.

Tablica 6. Minimalno potrebni iznos feritnog broja za izbjegavanje likvacijskih pukotina u metalu zavora [34]

Materijal	316	308	316L	308L	309	347
Minimalni FN	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0

4.3. Specifičnosti tehnologije zavarivanja

Osim omjera Cr_{eq}/Ni_{eq} , na formiranje mikrostrukture metala zavora veliki utjecaj ima i unos topline. Kako bi se izbjegla primarna kristalizacija u ferit te tako negativno utjecalo na iznos udarnog rada loma, austenitne nehrđajuće čelike potrebno je zavarivati sa što manjim unosom topline. Prema tome, kao logičan odabir nameće se MIG/MAG zavarivanje kratkim spojem kod kojeg su male vrijednosti napona i struje. Međutim, poznato je da kod takvog prijenosa metala dolazi do rasprskavanja dodatnog materijala što loše utječe na korozivnu postojanost konstrukcije te samim time i povećava troškove naknadne obrade.

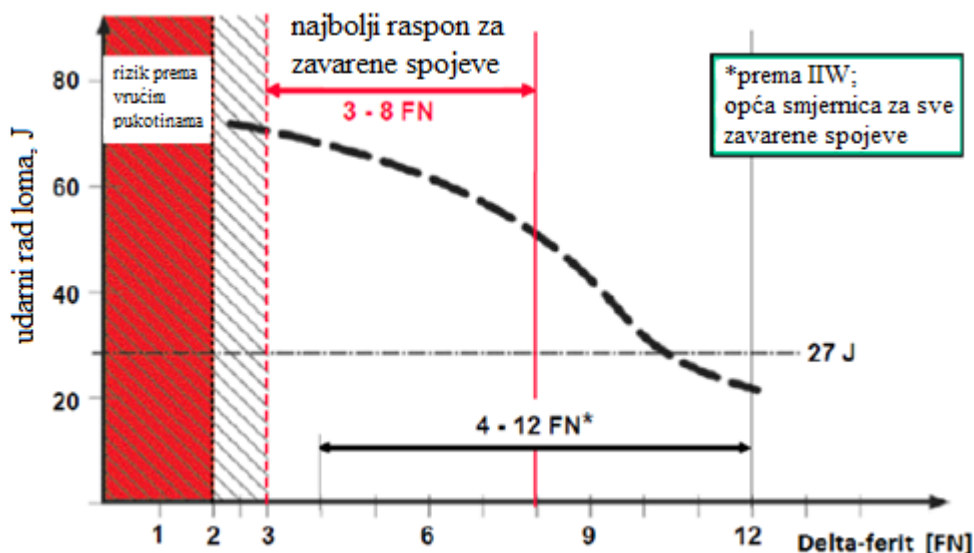
Sa stajališta mirnog prijenosa materijala optimalno bi bilo zavarivanje štrcajućim lukom kod kojeg praktički nema rasprskavanja, ali ovaj način zahtijeva velike struje i napone što često znači veliki unos topline i eventualnu primjenu samo kod debljih materijala. Stoga je austenitne nehrđajuće čelike najbolje zavarivati impulsnim načinom prijenosa materijala.

Također, preporučuje se zavarivanje povlačenjem jer se njihovim unosom veća količina topline u zavar.

4.3.1. Izbor dodatnog materijala

Kako bi se izbjegao značajniji pad žilavosti i duktilnosti, potrebno je odabrati takav dodatni materijal koji će osigurati metal zavara s određenim udjelom delta-ferita. Najčešće se odabire dodatni materijal koji će osigurati FN između 3 i 8.

Slika 28 prikazuje utjecaj delta-ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara.



Slika 28. Utjecaj delta-ferita na iznos udarnog rada loma u metalu zavara pri -196 °C [37]

Iz slike je vidljivo da sadržaj delta-ferita značajno utječe na udarni rad loma, osobito pri niskim temperaturama. Što je niži udio delta-ferita to je veća vrijednost udarnog rada loma. Međutim, iz slike je također vidljivo da postoji ograničenje s obzirom na minimalni iznos delta-ferita. Naime, kako bi se spriječio nastanak likvacijskih pukotina u metalu zavara, potrebno je postići metal zavara s minimalnim iznosom $FN \geq 2$. Prema tome, potrebno je naći optimalni iznos FN s obzirom na željenu vrijednost udarnog rada loma i pojavu vrućih pukotina.

Također, dodatni materijal će sadržavati veći udio kroma u odnosu na osnovni materijal kako bi se kompenzirao gubitak legiranih elemenata tijekom zavarivanja te tako poboljšala korozivna otpornost zavarenog spoja [10].

4.3.2. Predgrijavanje austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitne nehrđajuće čelike nije potrebno predgrijavati niti zagrijavati između prolaza. Naime, predgrijavanjem će se smanjiti brzina ohlađivanja, ali to ima neznatan utjecaj na feritno-austenitnu transformaciju jer se ona odvija pri vrlo visokim temperaturama [34].

Kod čelika gdje postoji opasnost izlučivanja karbida po granicama zrna, međuprolazna temperatura treba biti kontrolirana te držana ispod temperature početka izlučivanja kromovih karbida [34]. Izlučivanje kromovih karbida odvija se u temperaturnom području 450 – 850 °C na granicama zrna. Izlučeni karbidi sprječavaju dislokaciju atoma na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke te time smanjuju istezljivost i žilavost austenitne strukture [38].

Ako je u eksploataciji prisutan agresivni medij, doći će do formiranja Cr_{23}C_6 karbida na granicama zrna. Nastali intermetalni spojevi imaju u sebi visok sadržaj kroma (~ 94 %), a osiromašuju se područja uz granice zrna s kromom, nakon čega ta granična područja više ne ispunjavaju nužne uvjete korozijske postojanosti ($\text{Cr} < 12 \%$) [39].

Toplinska obrada najčešće se provodi kod debelih presjeka kako bi se smanjila zaostala naprezanja, a provodi se u temperaturnom rasponu od 550 °C do 650 °C. Ako se toplinska obrada provodi na temperaturama 650-900 °C, treba je provesti s posebnom pažnjom jer postoji opasnost izlučivanja kromovih karbida i σ -faze [34].

4.3.3. Zaštitni plinovi

Kod MIG/MAG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika koriste se inertni zaštitni plinovi kao i njihove mješavine.

Kod impulsnog MIG zavarivanja, sa stajališta prijenosa materijala kroz električni luk, najbolje bi bilo koristiti čisti argon kao zaštitni plin. Međutim, radi postizanja pravilnijeg izgleda zavara, veće penetracije, manje visine zavara i postizanja veće brzine zavarivanja, koriste se mješavine: $\text{Ar} + 1-3 \%\text{O}_2$ i $\text{Ar} + 2-5 \%\text{CO}_2$ [40].

Kod TIG postupka zavarivanja kao zaštitni plinovi najčešće se koriste: Ar, $\text{Ar} + \text{He}$ i $\text{Ar} + 2-5 \%\text{H}_2$. Također, prilikom zavarivanja elektroda mora biti spojena na minus pol istosmjernog izvora te je potrebno pripremiti vrh elektrode na V oblik.

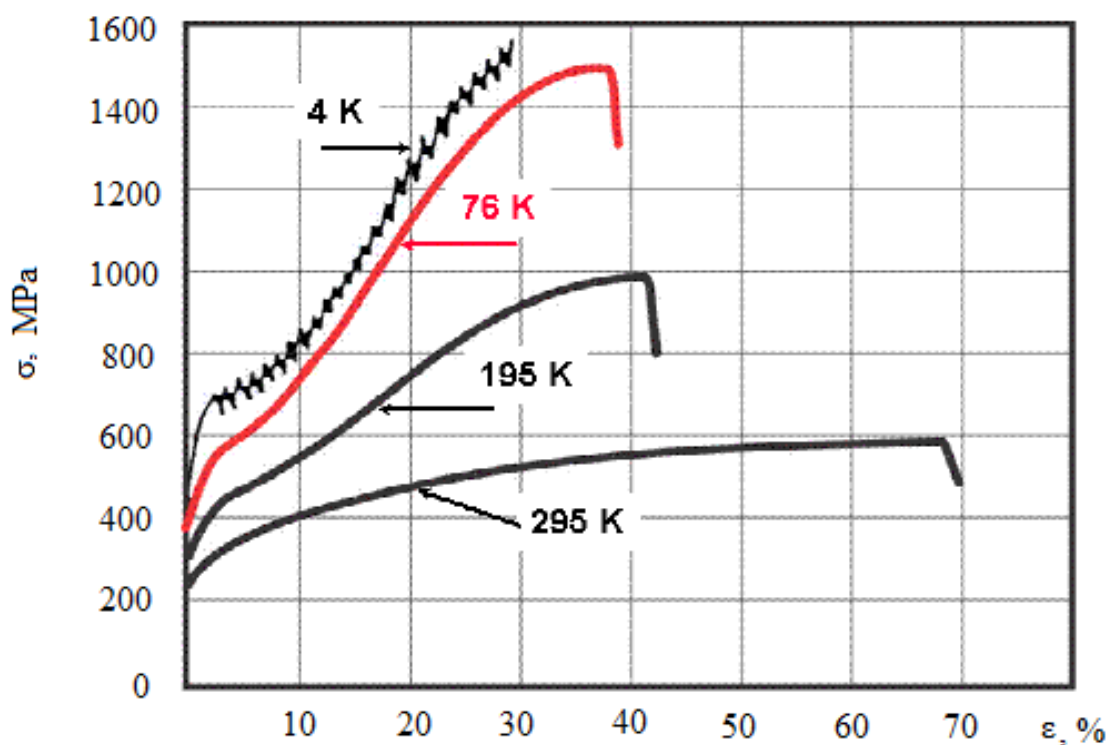
Osim toga, kod zavarivanja nehrđajućih čelika potrebno je štititi korijen spoja kako ne bi došlo do oksidacije i smanjenja korozivne postojanosti konstrukcije. Za zaštitu korijena najčešće se koristi čisti argon.

4.4. Mehanička svojstva zavariva austenitnih nehrđajućih čelika pri niskim temperaturama

Kao što je već spomenuto, austenitni nehrđajući čelici svoju primjenu nalaze i pri ekstremno niskim temperaturama.

Snižanjem temperature ispitivanja dolazi do porasta granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m , dok se istezljivost smanjuje. Vrijednost modula elastičnosti se ne mijenja na što ukazuje nepromijenjeni nagib Hookeova pravca za sve temperature ispitivanja. Također, granica razvlačenja R_e postaje sve izraženija.

Na slici 29 prikazan je σ - ϵ dijagram za čelik AISI 304 nakon provedenog vlačnog ispitivanja iz kojeg su dobro uočljive navedene pojave.



Slika 29. σ - ϵ dijagram za čelik AISI 304 [37]

Tablica 7. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika pri različitim temperaturama [41]

AISI	Temperatura ispitivanja, °C	R_e , MPa	R_m , MPa	Istezljivost	Kontrakcija presjeka, %
304	24	227	586	60	70
304	-195,5	393	1416	43	45
304	-254	439	1685	48	43
304L	24	193	586	60	60
304L	-195,5	241	1340	42	50
304L	-254	233	1516	41	57
310	24	310	658	60	65
310	-195,5	585	1085	54	54
310	-254	796	1223	56	61
347	24	241	620	50	60
347	-195,5	284	1282	40	32
347	-254	313	1450	41	50

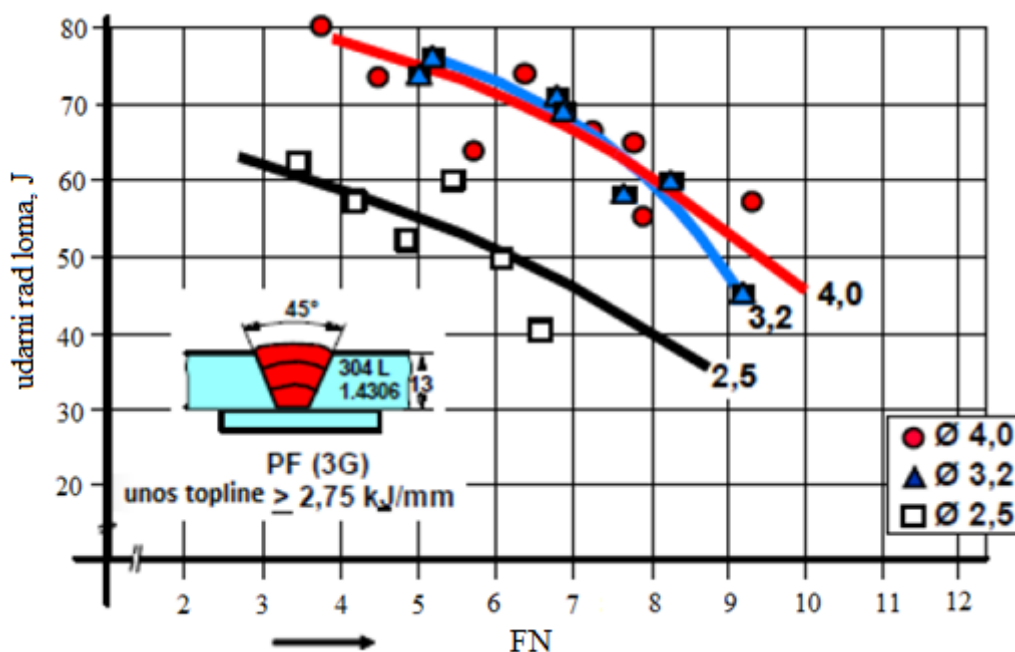
Iz tablice 7 jasno se može vidjeti spomenuta tvrdnja da padom temperature raste granica razvlačenja (R_e). Također, raste i vlačna čvrstoća (R_m) dok je duktilnost (istezljivost i kontrakcija presjeka) i na najnižim temperaturama još uvijek iznimnog iznosa.

Tablica 8. Vrijednosti udarnog rada loma za različite vrste austenitnih nehrđajućih čelika pri različitim temperaturama ispitivanja [41]

KV, J			
AISI	27 °C	-195,5 °C	-254 °C
304	209	118	122
304L	160	91	91
310	192,5	121	117
347	163	89	77

Iz tablice 8 vidljivo je da padom temperature pada i vrijednost udarnog rada loma. Međutim, dobivene vrijednosti pri niskim temperaturama još uvijek su zadovoljavajućeg iznosa.

Također, vrlo veliku ulogu prema iznosu udarnog rada loma ima i sadržaj ferita (FN). Što je viši sadržaj ferita, to je manji udarni rad loma. Dijagramom na slici 30 prikazan je utjecaj sadržaja ferita i promjera elektrode na vrijednosti udarnog rada loma.



Slika 30. Utjecaj sadržaja ferita na udarni rad loma pri -196 °C [37]

4.5. Nastanak martenzita pri niskim temperaturama

Glavni problem koji se može pojaviti u austenitnom čeliku pri nekoj sniženoj temperaturi je transformacija austenita u martenzit. Ta transformacija može biti dvojaka [2, 3]:

- ili se radi o „klasičnoj“ preklapnoj transformaciji austenita u tetragonski α -martenzit pri sniženju temperature ispod M_s (do M_f)
- ili se radi o transformaciji metastabilnog austenita u heksagonski ϵ -martenzit (tzv. deformacijski martenzit) ispod M_d .

Deformacijski martenzit nastaje uz još nedovoljno rastumačene okolnosti kada dio konstrukcije od austenitnog čelika, koji je prethodno hladno oblikovan deformiranjem i nerekrystaliziran, dosegne temperaturu ispod M_d [3].

U literaturi [3] navodi se da će kod čelika s niskim udjelom ugljika te s najviše 16 %Cr i 9 %Ni početi stvarati tetragonski martenzit već prije dostignuća 20 °C. Posve stabilni austenit, koji se uopće neće moći transformirati bilo u α -martenzit, bilo u ϵ -martenzit, morao bi sadržavati barem 28 %Cr i 15 %Ni. Pojava bilo kakve vrste martenzita u austenitnoj strukturi

izrazito snižava udarni rad loma, pa će za tehniku dubokog hlađenja, a posebno za temperature ispod $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, trebati primjenjivati visoko legirane Cr-Ni čelike strukture potpuno stabilnog austenita [3].

Uz očvrnuće putem α - ili ε - martenzita ne treba zaboraviti da će do hladnog očvrnuća doći i onda kada se ono provede iznad temperature M_d . U tom slučaju radi se o očvrnuću uslijed unošenja novih dislokacija i povišenja njihove gustoće. Očvrsnuta hladno oblikovana struktura eliminirat će se odgovarajućim rekristalizacijskim žarenjem [3].

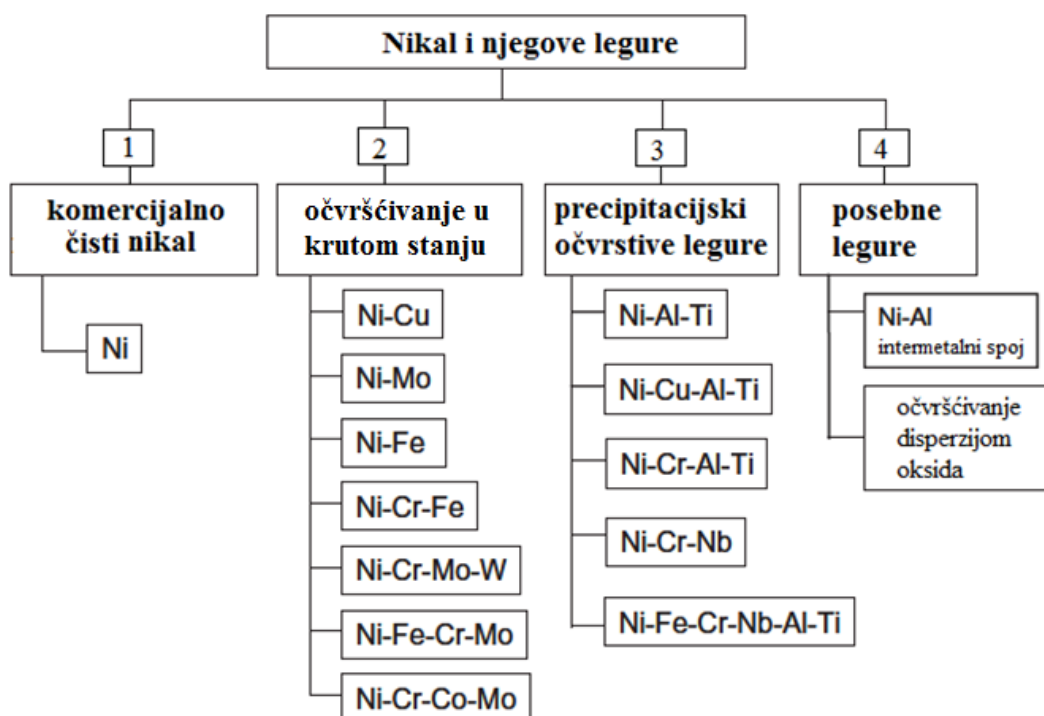
5. ČELICI LEGIRANI S NIKLOM

Glavno obilježje legura na bazi nikla je FCC kristalna rešetka odnosno austenitna struktura. U tehničkoj primjeni to znači da ne dolazi do prijelaza žilavog u krhki lom sa sniženjem temperature, pa se ovi materijali nazivaju žilavim materijalima.

Legure na bazi nikla mogu se koristiti i pri vrlo niskim, tzv. kriogenim, i iznimno visokim temperaturama (do 1200 °C). Razlog takve primjene proizlazi iz činjenice što navedeni materijal ne prolazi strukturne transformacije od temperature solidifikacije do apsolutne nule.

Kod legura na bazi nikla ne postoji sustavna klasifikacija kao što je slučaj kod čelika i aluminija. Iz tog razloga većina legura na bazi nikla poznata je po svom komercijalnom nazivu.

Na slici 31 prikazana je klasifikacija nikla i njegovih legura ovisno o načinu postizanja čvrstoće.



Slika 31. Klasifikacija nikla i njegovih legura [42]

Ovisno o načinu postizanja čvrstoće, legure na bazi nikla mogu se podijeliti u četiri grupe. Prvu grupu čini komercijalno čisti nikal koji sadrži > 99 %Ni. Navedeni materijal ima niski iznos čvrstoće i tvrdoće te se prvenstveno koristi zbog iznimne otpornosti na koroziju [42].

Drugu grupu čine legure koje svoja svojstva postižu legiranjem elementima koji se otapaju u krutom stanju tvoreći s niklom supstitucijske kristale mješance [38]. Te legure imaju veći iznos čvrstoće i vrlo dobru otpornost prema koroziji u morskim uvjetima [42]. Ukoliko se želi postići još veći iznos čvrstoće potrebno je odabrati precipitacijski očvrstive legure, skupina 3. Precipitacijski očvrstive legure na bazi nikla sadrže dodatke titana, aluminijski i/ili niobija koji zajedno s niklom, nakon naknadne toplinske obrade, tvore očvrstive precipitate. Ti precipitati su povezani unutar austenitne matrice te stvaraju dodatna naprezanja te tako povećavaju čvrstoću [42]. Legure iz skupine 4 posjeduju izvrsnu čvrstoću i otpornost prema puzanju, ali se prilikom zavarivanja taljenjem pojavljuje lokalni pad čvrstoće u metalu zavara i ZUT-u [42].

Osim navedenih legura, pri niskim temperaturama najčešće se koriste čelici legirani s 1,5 do 9 %Ni. U ovom radu posebna pozornost je obraćena na navedenu vrstu čelika, dok se za ostale legure zainteresirani čitatelj upućuje na literaturu [42].

5.1. Metalurgija čelika legiranih niklom

Čelici legirani niklom nalaze široku primjenu pri niskim temperaturama. Tako se čelici s 1,5 - 2,5 %Ni primjenjuju pri temperaturama do -60 °C, međutim u posljednje vrijeme pri tim temperaturama sve više se koriste mikrolegirani visokočvrsti čelici.

Čelici koji sadrže 3,5 %Ni spadaju u skupinu niskougljičnih čelika (< 0,15 %C), a osim navedenih elemenata sadrže i do 0,8 %Mn i maksimalno 0,35 %Si. Koriste se za radne temperature do -100 °C.

Osim udjela nikla u strukturi, čelici legirani s 5 %Ni imaju praktički isti kemijski sastav kao i čelici s 3,5 %Ni. Primjenjuju se pri temperaturama do -150 °C, međutim nemaju značajnu primjenu u praksi jer se povećanjem cijene proizvodnje ne postiže željeno poboljšanje mehaničkih svojstava.

Najbolja mehanička svojstva postižu se legiranjem s 9 %Ni. Navedeni čelik karakterizira niski udio ugljika (<0,1 %C) te niski sadržaj nečistoća (S i P). Zbog svojih iznimnih mehaničkih svojstava koriste se pri temperaturama do -196 °C. Razlog iznimnoj žilavosti pri

tako niskim temperaturama proizlazi iz kombinacije sadržaja nikla u mikrostrukturi i toplinske obrade.

Preporučljiv režim toplinske obrade sastoji se od dvostruke normalizacije i popuštanja [42, 43]. Prva normalizacija provodi se na 900 °C, dok se druga provodi na 790 °C s ciljem dobivanja sitnozrnate mikrostrukture. Nakon toga slijedi ponovno zagrijavanje na temperaturu od 565 °C. Metalografska ispitivanja pokazala su da se temperatura od 565 °C nalazi iznad temperature A_1 čime se omogućuje pogodniji raspored karibda u matrici [42]. Razlog sniženja temperature A_1 proizlazi iz činjenice da je nikal gamageni element, a prema literaturi [44] gamageni legirni elementi proširuju γ - područje, tj. porastom udjela gamagenog legirajućeg elementa snižavaju se temperature A_1 i A_3 . Tako nastaje struktura popuštenog Fe-Ni martenzita koji ima dobru čvrstoću i izvrsnu žilavost.

Kasnije je otkriveno da toplinska obrada koja se sastoji od gašenja i popuštanja također osigurava izvrsna mehanička svojstva, s tim da je granica razvlačenja R_e u ovom slučaju još viša spram toplinske obrade koja se sastoji od dvostruke normalizacije [42]. Postupak gašenja i popuštanja sastoji se od austenitizacije na temperaturi 800-925 °C, brzog hlađenja u vodi te popuštanja u temperaturnom rasponu 565-635 °C [42, 43]. Kao što je spomenuto, navedena temperatura popuštanja nalazi se iznad temperature A_1 te rezultira formiranjem stabilnog austenita koji poboljšava vrijednosti udarnog rada loma pri kriogenim temperaturama [42].

Izuzetna vrijednost udarnog rada loma ovih čelika funkcija je tri faktora [42]:

- 1) prisutnosti stabilnog zaostalog austenita (oko 10 % volumnog udjela)
- 2) sniženja prosječnog udjela ugljika u martenzitu
- 3) usitnjenja zrna i stvaranja Fe-Ni strukture.

Mikrostruktura u ZUT-u razlikovat će se od mikrostrukture osnovnog materijala i mijenjat će se ovisno o vršnoj temperaturi i brzini hlađenja [10, 42]. U grubozrnatom ZUT-u očekuje se najveća degradacija mehaničkih svojstava.

U literaturi [42] navodi se kako su vrijednosti udarnog rada loma u ZUT-u i do 50 % manje od onih u osnovnom materijalu. Također se navodi da toplinska obrada nakon zavarivanja na temperautri od 600 °C i brzo hlađenje mogu povećati žilavost ZUT-a.

Autori Nippes E. F. et al. [45] proučavaju pomoću računalne simulacije utjecaj vršne temperature na mikrostrukturu i udarni rad loma. Kao osnovni materijal korišten je čelik legiran s 9 %Ni. Navedeni čelik sadrži oko 10 % zaostalog austenita (A_z), dok povećanjem

vršne temperature dolazi do pada udjela zaostalog austenita, a samim time i pada vrijednosti udarnog rada loma. Također, postizanjem vršne temperature od 1000 °C dolazi do smanjenja veličine zrna, ali i naglog porasta tvrdoće zbog formiranja nepopuštenog martenzita za vrijeme hlađenja što dovodi do naglog pada udarnog rada loma. Ukoliko se postižu još više vršne temperature dolazi do pogrubljenja austenitnog zrna i još značajnijeg pada udarnog rada loma.

Na temelju navedenog, nakon zavarivanja potrebno je provesti popuštanje kako bi se u ZUT-u ponovno postigla zadovoljavajuća žilavost [3, 42].

Iako iznosi udarnog rada loma u ZUT-u kod kriogenih temperatura padaju u odnosu na OM, vrijednosti još uvijek premašuju minimalno potrebne.

5.2. Zavarljivost čelika legiranih niklom

Čelici legirani niklom spadaju u skupinu dobro zavarljivih materijala. Glavni problemi koji se mogu javiti prilikom zavarivanja su:

- a) Tople pukotine: Kao i kod drugih materijala, razlog nastanka toplih pukotina su prisutne nečistoće u materijalu (S, P, Pb, Bi). Kod temperatura >400 °C nikal se veže sa sumporom u sulfid Ni_3S_2 i dolazi do stvaranja eutektika Ni- Ni_3S_2 s talištem 637 °C [38]. Zbog toga je potrebno maksimalno reducirati sadržaj nečistoća u materijalu.
- b) Hladne pukotine: Kod čelika legiranih s 1-3,5 %Ni može doći do nastanka hladnih pukotina u zoni utjecaja topline [43, 46]. Razlog nastanka hladnih pukotina je tvrda martenzitna ili martenzitno-bainitna struktura koja sadrži premali udio stabilnog austenita koji ima ulogu tzv. zamke za vodik [46]. Spriječavanje nastanka hladnih pukotina postiže se predgrijavanjem konstrukcije i odabirom elektroda koje sadrže < 5 ml H_2 /100 g zav.
- c) Poroznost: Uzrok nastanku poroznosti je prisustvo plinova: H, N, O i CO. Kako bi se spriječio nastanak poroznosti potrebno je očistiti rubove spoja prije zavarivanja te zavarivati što kraćim električnim lukom [38].

- d) Oksidni film: Zbog više točke taljenja niklovih oksida spram nikla dolazi do grešaka vezivanja i oksidnih uključaka te je, stoga, potrebno prije zavarivanja ukloniti sloj oksida s površine brušenjem, pjeskarenjem ili kemijskim nagrizanjem kiselinama [8].

5.3. Specifičnosti tehnologije zavarivanja

Čelici legirani niklom najčešće se zavaruju REL, MIG/MAG, TIG i EPP postupkom. Kako bi zavareni spoj bio odgovarajuće kvalitete potrebno se držati slijedećih preporuka:

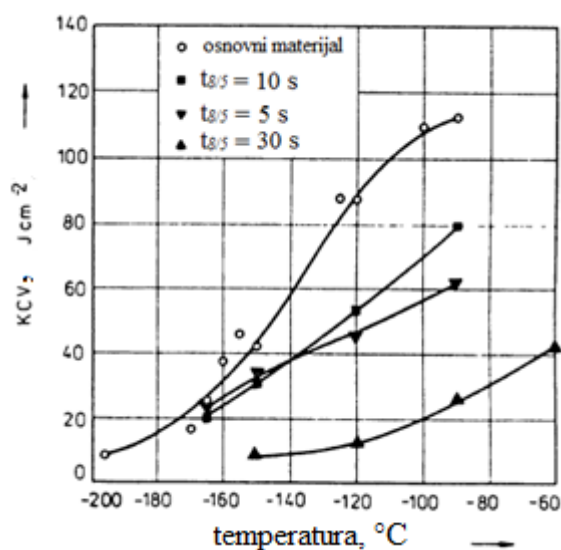
- prije zavarivanja potrebno je temeljito očistiti površinu spoja
- pažljivo očistiti troksu i okside nakon zavarivanja kako ne bi došlo do grešaka vezivanja, nepotpune penetracije ili uključaka
- oksidi se odstranjuju brušenjem ili kemijskim sredstvima; pri tome treba koristiti rotirajuće četke od nehrđajućeg čelika
- prilikom zavarivanja potrebno je štititi i korijensku stranu spoja; zaštita korijena najčešće se provodi argonom.

5.3.1. Utjecaj unosa topline i predgrijavanja

Prema normi HRN EN ISO 1011-2:2002 čelike legirane s 5-9 %Ni nije potrebno predgrijavati što je i navedeno u literaturi [43]. Međutim u literaturi [46] se navodi kako unos topline kod ovih čelika treba biti čim manji kako bi zona utjecaja topline bila što uža. Zonu utjecaja topline karakteriziraju dvije značajke:

- 1) neovisno o unosu topline mikrostruktura ZUT-a je martenzitno-bainitna. U ovom slučaju navedena mikrostrukturalna faza nije osjetljiva na hladne pukotine jer sadrži dovoljnu količinu zaostalog austenita, faze kod koje vodik ima veliku topljivost te tako ostaje zarobljen u austenitu i time eliminira štetno djelovanje vodika.
- 2) porast austenitnog zrna.

Slika 32 prikazuje utjecaj unosa topline na udarni rad loma i oblik prijelazne krivulje kod čelika legiranog s 5 %Ni.

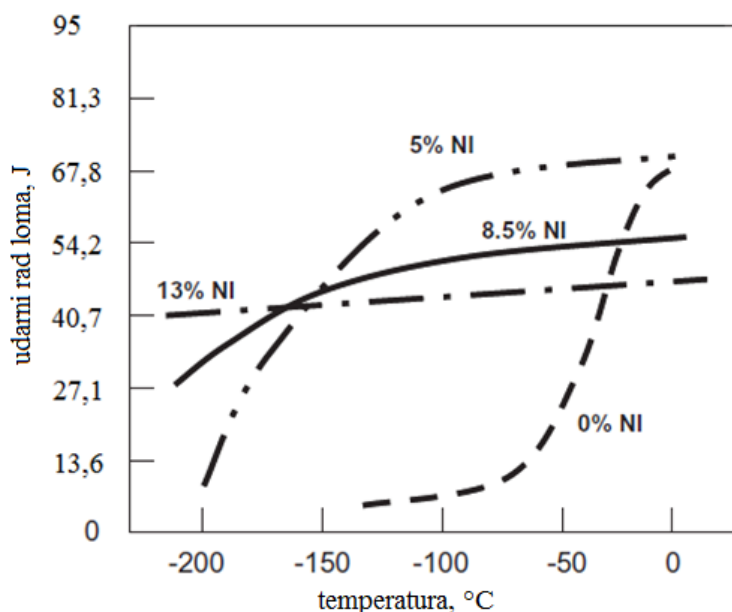


Slika 32. Utjecaj unosa topline na oblik prijelazne krivulje za čelik legiran s 5 %Ni [46]

Iz dijagrama je jasno uočljivo da se najvećim unosom topline postiže najlošija žilavost. U literaturi [43] navodi se kako potrebni iznos vremena $t_{8/5}$ ne smije biti veći od 15 s. Ponovno postizanje tražene žilavosti u ZUT-u moguće je postići žarenjem na 650 °C te brzim hlađenjem.

5.4. Utjecaj sadržaja nikla na prijelaznu temperaturu

Kao što je rečeno, udio nikla ima veliki utjecaj na iznos udarnog rada loma što je i prikazano slikom 33.



Slika 33. Utjecaj udjela nikla na prijelaznu temperaturu [3, 42]

Iz prethodne slike može se jasno vidjeti kako porastom sadržaja nikla u čeliku dolazi do sniženja prijelazne temperature. Osim toga, vidljivo je kako povećanjem udjela nikla dolazi do pada gornje razine udarnog rada loma čelika. Međutim, taj iznos je još uvijek zadovoljavajući te osigurava upotrebu i pri $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, vidljivo je kako čelici s 13 %Ni nemaju definiranu prijelaznu temperaturu te se mogu koristiti i pri temperaturama ispod $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Važno je napomenuti kako sukladno porastu udjela nikla raste i cijena, stoga je važno pronaći optimalnu leguru koja će zadovoljiti zahtjeve konstrukcije s izvedbenog i ekonomskog stajališta.

6. EKSPERIMENTALNI RAD

6.1. Opis eksperimenta

Cilj eksperimentalnog rada je odrediti optimalnu kombinaciju dodatnog materijala, unosa topline i zaštitnog plina u svrhu postizanja maksimalnih vrijednosti udarnog rada loma u metalu zavara visokočvrstog čelika pri niskim temperaturama.

Eksperimentalni rad izveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Prema osmišljenom planu istraživanja, za izradu diplomskog rada planirano je provođenje eksperimenta u 4 glavne faze.

U prvoj fazi potrebno je odrediti unos topline odnosno parametre zavarivanja te provesti probno zavarivanje. Nakon definiranih parametara, u drugoj fazi slijedi zavarivanje ploča i izrada ispitnih uzoraka (epruveta). Treći dio eksperimentalnog rada obuhvaća ispitivanje udarnog rada loma, dok posljednja faza uključuje obradu i analizu dobivenih podataka.

Zavarivanje uzoraka izvedeno je automatiziranim postupkom pomoću automata za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Za postupak zavarivanja odabran je elektrolučni postupak zavarivanja punom žicom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina, MAG (135-P – oznaka prema HRN EN ISO 4063:2012 – Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupka i referentni brojevi). Kao dodatni materijal (kontinuirana elektroda) odabrane su dvije vrste žica komercijalnog naziva: EZ – SG 100 i EZ – SG 120, domaćeg proizvođača „Elektroda Zagreb“. Žice se međusobno razlikuju po kemijskom sastavu, a samim time i mehaničkim svojstvima. Također, odabrane su dvije plinske mješavine: 82 %Ar/18 %CO₂ i 92 %Ar/8 %CO₂. Osim toga, zavarivanje se provodi sa dva različita unosa topline: 10 i 15 kJ/cm. Za određene unose topline odabrani su parametri koji osiguravaju kvalitetan zavar i dovoljnu količinu nataljenog materijala. Parametri su utvrđeni na temelju proučene literature i prethodnog pokusa.

6.2. Oblikovanje plana pokusa

U ovom radu razmatrane su tri ulazne varijable: vrsta dodatnog materijala, zaštitni plin i unos topline. Svaka od njih ima dva nivoa vrijednosti, stoga je moguće načiniti $2^3=8$ stanja pokusa. U tablici 9 su prikazane sve razine stanja pokusa.

Tablica 9. Razine stanja pokusa

API 5L X80		ULAZNE VARIJABLE					
		EZ – SG 100	EZ – SG 120	82 %Ar/18 %CO ₂	92 %Ar/8 %CO ₂	Q ₁ = 10 kJ/cm	Q ₂ = 15 kJ/cm
S T A N J E P O K U S A	1	✓		✓		✓	
	2	✓		✓			✓
	3	✓			✓	✓	
	4	✓			✓		✓
	5		✓	✓		✓	
	6		✓	✓			✓
	7		✓		✓	✓	
	8		✓		✓		✓

6.3. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje ploča izvedeno je automatiziranim MAG postupkom koji je uključivao automat za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 i izvor struje za zavarivanje Welbee P500L (WB – P500L).

Izvor struje za zavarivanje WB – P500L razvila je i proizvela tvrtka OTC Daihen. Riječ je o potpuno digitaliziranom i mikroprocesorski upravljanoj uređaju u koji je ugrađena invertorska tehnologija.

Inverterska tehnologija razvijena je korištenjem energetske poluvodiča kao što su IGBT (eng. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) kako bi bilo moguće napraviti prekidački izvor napajanja koji ima mogućnost podnijeti velika strujna opterećenja izazvana procesom zavarivanja [47]. IGBT inverteri su kontrolirani mikroprocesorom koji na uputu programera ili programatora ima mogućnost promjene parametara zavarivanja tijekom rada u stvarnom vremenu (eng. *real time*) [47].

Na slici 34 prikazan je izvor struje WB – P500L zajedno s rashladnom jedinicom i dodavačem žice, dok slika 35 prikazuje upravljačko sučelje uređaja.



Slika 34. Izvor struje za zavarivanje WB – P500L



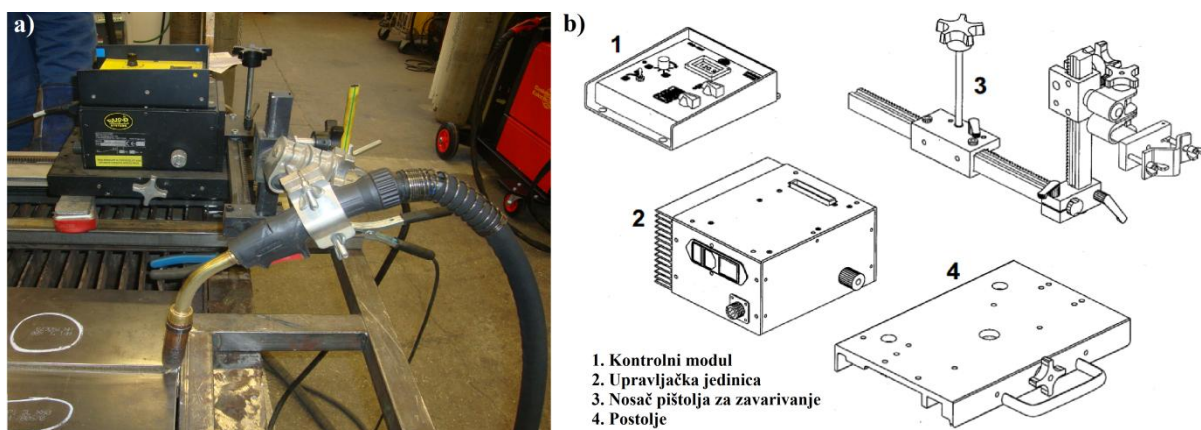
Slika 35. Upravljačko sučelje uređaja

Tablica 10. Tehničke karakteristike uređaja [48]

Vrsta izvora struje	WB – P500L
Priključni napon	3 x 400 V
Tolerancija priključnog napona	± 15%
Frekvencija mreže	50/60 Hz
Nazivna ulazna snaga	25 kVA
Radna snaga	22,9 kW
Raspon struje zavarivanja, DC	30 – 500 A
Raspon struje zavarivanja, impulsno	30 – 400 A
Intermitencija, X, 10 min/40 °C	60%/500 A; 39,0 V
Intermitencija, X, 10 min/40 °C	100%/388 A; 33,4 V
Radni napon	15,5 – 39,0
Napon praznog hoda	80 V
Maksimalni broj spremljenih programa	100
Dimenzije d/š/v, mm	395/710/762
Masa	83 kg
Statička karakteristika	CV

Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002 koristi se za rezanje i zavarivanje na ravnoj podlozi. Automat ima mogućnost uzdužnog gibanja preko zubne letve te mogućnost namještanja željene udaljenosti i nagiba pištolja od radnog komada. Također, moguće je upravljati brzinama zavarivanja što je u ovom slučaju iznimno važno zbog točnog određivanja unosa topline.

Na slici 36 a) prikazan je automat za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 dok slika 36 b) prikazuje sastavne dijelove navedenog automata.



Slika 36. a) Automat za zavarivanje BUG-O System MDS 1002; b) Sastavni dijelovi automata BUG-O Systems 1002 [49]

U eksperimentalnom radu odabrana je blaga desna tehnika rada s nagibom pištolja od $\sim 10^\circ$ od vertikalne osi što je prikazano slikom 37.



Slika 37. Položaj pištolja, desna tehnika rada

6.4. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnom dijelu korišten je mikrolegirani visokočvrsti čelik oznake X80 prema API 5L standardu. Norma API specificira gradaciju čelika za cjevovode. Osnovna gradacija čelika za izradu cjevovoda koristi oznake A i B, međutim čelici s većim iznosom čvrstoće imaju oznaku X s pratećim brojem koji označava granicu razvlačenja izraženu u ksi (*kilopounds per square inch*).

Prema normi HRN EN ISO 10208-2:1996, navedeni čelik nosi oznaku L555MB te spada u skupinu 2.2.

Tablica 11. Kemijski sastav čelika prema atestu i zahtjevu norme API 5L

API 5L X80	Kemijski sastav (maseni udio), %							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
Atest	0,064	0,33	1,94	0,015	0,0006	0,033	0,17	0,18
API 5L	0,22	-	1,94	0,025	0,015	-	-	-
	Mo	Cu	V	Nb	Ti	N	B	Ca
Atest	0,002	0,09	0,001	0,063	0,014	0,0036	0,0002	0,0001
API 5L	-	-	-	-	-	-	-	-

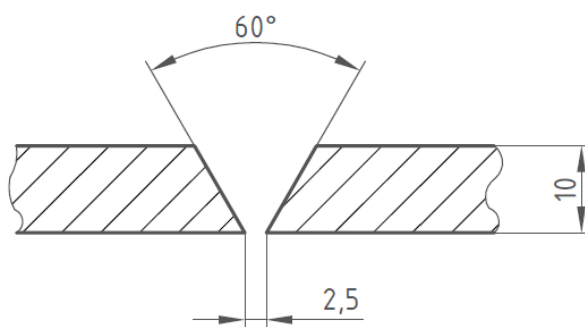
Tablica 12. Mehanička svojstva čelika API 5L X80

Gradacija čelika	Granica razvlačenja, MPa		Vlačna čvrstoća, MPa	
	Min	Max	Min	Max
X80	552	690	621	827
X80 (prema atestu)	557		670	

Dimenzije zavarivanih ploča iznosile su 350x150x10.

6.4.1. Priprema ploča za zavarivanje

Priprema spoja izvedena je kao V-spoj pod kutom od 60°, dok je razmak između ploča iznosio 2,5 mm kako je prikazano slikom 38.



Slika 38. Priprema spoja za zavarivanje

Slika 39 prikazuje pozicioniranje ploče na željeni razmak i zavarivanje pripoja. Nakon zavarivanja pripoja slijedilo je čišćenje površine ploča pomoću etilnog alkohola.



Slika 39. Pozicioniranje ploča i zavarivanje pripoja

Nakon zavarivanja pripoja i čišćenja površine ploča slijedilo je stavljanje podloške za zavarivanje što je prikazano slikom 40.



Slika 40. Stavljanje podloške za zavarivanje

Nakon stavljene podloške ploča je spremna za zavarivanje što je i prikazano slikom 41.



Slika 41. Ploča spremna za zavarivanje

6.4.2. Određivanje temperature predgrijavanja

Prema literaturi [9], za zadanu debljinu 10 mm i MAG postupak zavarivanja, nije potrebno provesti predgrijavanje, stoga je poželjno da i temperatura između prolaza bude što nižih vrijednosti.

Temperatura između prolaza je mjerena beskontaktnim termometrom što se može vidjeti na slici 42.



Slika 42. Mjerenje međuprolazne temperature

6.5. Dodatni materijal

Za MAG zavarivanje čelika API 5L X80 korišteni su dodatni materijali komercijalnog naziva: EZ – SG 100 i EZ SG 120 proizvođača „Elektroda Zagreb“. Riječ je o punima žicama promjera 1,2 mm koje se koriste za zavarivanje visokočvrstih čelika. Specifikacije žica dane su u nastavku.

6.5.1. EZ – SG 100

Prema specifikaciji proizvođača, radi se o pobakrenoj žici legiranoj s manganom, niklom, kromom i molibdenom. Najčešće se koristi se za zavarivanje sitnozrnatih čelika koji posjeduju granicu razvlačenja do 690 MPa te ima specificiran iznos udarnog rada loma od 47 J pri temperaturi od -40 °C.

Prema normi HRN EN ISO 16834:2013 dodatni materijal EZ – SG 100 klasificira se kao:

- G 69 4 M21 Mn3NiCrMo.

Tablica 13. Mehanička svojstva metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 100

Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Istezljivost, %	Udarni rad loma, KV (-40 °C), J
> 690	750 – 940	> 20	> 47

Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – SG 100

Kemijski element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
maseni udio, %	0,12	1,3-1,8	0,4-0,7	0,2-0,4	1,2-1,6	0,2-0,3	<0,3

6.5.2. EZ – SG 120

Prema specifikaciji proizvođača, riječ je o pobakrenoj niskolegiranoj žici za zavarivanje sitnozrnatih čelika koji posjeduju vrijednost granice razvlačenja do 890 N/mm^2 . Zbog dodatka mikrolegiranih elemenata zavar ima iznimnu duktilnost i visoku otpornost prema krhkom lomu unatoč visokoj čvrstoći te posjeduje dobru vrijednost udarnog rada loma pri temperaturama do -60 °C .

Prema normi HRN EN ISO 16834:2013 dodatni materijal EZ – SG 120 klasificira se kao (najbliži ekvivalent):

- G 89 6 M21 Mn4Ni2CrMo.

Tablica 15. Mehanička svojstva metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 120

Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Istezljivost, %	Udarni rad loma, KV (-60°C), J
> 890	940 – 1180	> 20	> 47

Tablica 16. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ – SG 120

Kemijski element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
maseni udio, %	0,1	1,8	0,8	0,35	2,0	0,5

6.6. Zaštitni plin

Budući da se u eksperimentu ispitivao utjecaj zaštitnog plina na svojstva metala zavara visokočvrstog čelika X80, korištene su dvije različite plinske mješavine. Na taj način moguće je analizirati njihov utjecaj na mehanička svojstva zadanog čelika pri niskim temperaturama.

Prilikom zavarivanja, protoci zaštitnog plina iznosili su 18 l/min za sva stanja pokusa i za sve prolaze.

Korištene su slijedeće mješavine zaštitnih plinova:

- 82 %Ar/18 %CO₂ – oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175:2008
- 92 %Ar/8 %CO₂ – oznaka M20 prema normi HRN EN ISO 14175:2008.

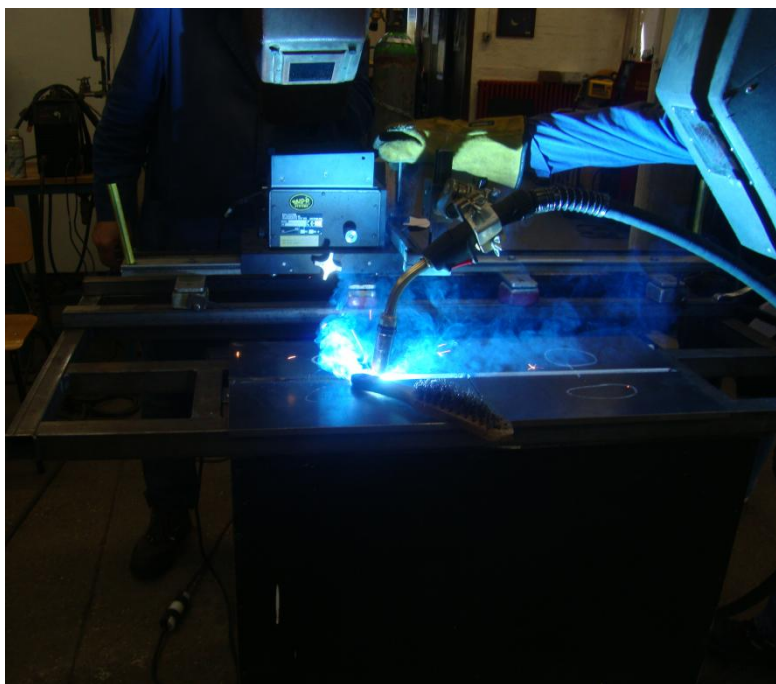
6.7. Parametri zavarivanja

Zavarivanje je provedeno prema određenom (prethodno definiranom) planu pokusa . Pri tome su definirana dva različita unosa topline iznosa $Q_1=10$ kJ/cm i $Q_2=15$ kJ/cm. Kod unosa topline 10 kJ/cm zavarivanje je provedeno u 3 prolaza, dok je kod unosa topline 15 kJ/cm zavarivanje provedeno u 2 prolaza. Parametri zavarivanja određeni su sukladno unosima topline.

Tablica 17. Parametri zavarivanja prema odgovarajućim stanjima pokusa

Stanje pokusa	Prolaz	DM	%CO ₂	I, A	U, V	v _{zav} , cm/min	Q _{izrač.} , kJ/cm
1	korijen	EZ – SG 100	18	130	23,6	15	9,82
	1.			170	25,1	21	9,75
	2.			200	26	25	9,98
2	korijen	EZ – SG 100	18	270	28,8	25	14,93
	1.			270	28,8	25	14,93
3	korijen	EZ – SG 100	8	130	23,6	15	9,82
	1.			170	25,1	21	9,75
	2.			190	27,2	25	9,92
4	korijen	EZ – SG 100	8	270	28,8	25	14,93
	1.			270	28,8	25	14,93
5	korijen	EZ – SG 120	18	130	23,6	15	9,82
	1.			170	25,1	21	9,75
	2.			187	27,6	25	9,91
6	korijen	EZ – SG 120	18	270	28,8	25	14,93
	1.			270	28,8	25	14,93
7	korijen	EZ – SG 120	8	130	23,6	15	9,82
	1.			170	25,1	21	9,75
	2.			180	25,9	22,5	9,95
8	korijen	EZ – SG 120	8	270	28,8	25	14,93
	1.			270	28,8	25	14,93

Nakon definiranih parametara zavarivanja slijedilo je zavarivanje ploča, što je i prikazano slikom 43. Za vrijeme zavarivanja očitani su stvarni parametri te je izračunat stvarni unos topline u materijal. Stvarni parametri zavarivanja i izračunat stvarni unos topline prikazani su tablicom 18.



Slika 43. Provedba postupka zavarivanja

Tablica 18. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja

Stanje pokusa	Prolaz	DM	%CO ₂	Q _{izrač.} , kJ/cm	struja, A	napon, V	brzina zavarivanja, cm/min	stvarni unos topline, kJ/cm
ulazne vrijednosti					stvarni parametri			
1	korijen	EZ – SG 100	18	10	132	23,8	15	10,05
	1.			10	175	25,3	21	10,12
	2.			10	210	26	25	10,48
2	korijen	EZ – SG 100	18	15	255	29,8	25	14,59
	1.			15	275	29,2	25	15,42
3	korijen	EZ – SG 100	8	10	133	23,7	15	10,09
	1.			10	171	25,5	21	9,97
	2.			10	185	27,8	25	9,87
4	korijen	EZ – SG 100	8	15	277	28,6	25	15,21
	1.			15	272	28,5	25	14,88

Tablica 18. Nastavak

Stanje pokusa	Prolaz	DM	%CO ₂	Q _{izrač.} , kJ/cm	struja, A	napon, V	brzina zavarivanja, cm/min	stvarni unos topline, kJ/cm
ulazne vrijednosti					stvarni parametri			
5	korijen	SG 120	18	10	125	24,1	15	9,64
	1.			10	153	26,7	21	9,34
	2.			10	177	28,5	25	9,66
6	korijen	SG 120	18	15	245	30,3	25	14,25
	1.			15	247	30,2	25	14,32
7	korijen	SG 120	8	10	128	24	15	9,83
	1.			10	152	26,8	21	9,31
	2.			10	184	25,8	22,5	10,13
8	korijen	SG 120	8	15	262	29,6	25	14,89
	1.			15	252	30,1	25	14,56

6.8. Izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedenog postupka zavarivanja ploča pristupilo se izradi ispitnih uzoraka. Prvotno su ploče plinskim postupkom izrezane na veće segmente. Za postupak plinskog rezanja korišteni su plinovi acetilen i kisik pri brzini rezanja od 30 cm/min. Postupak je prikazan slikom 44.

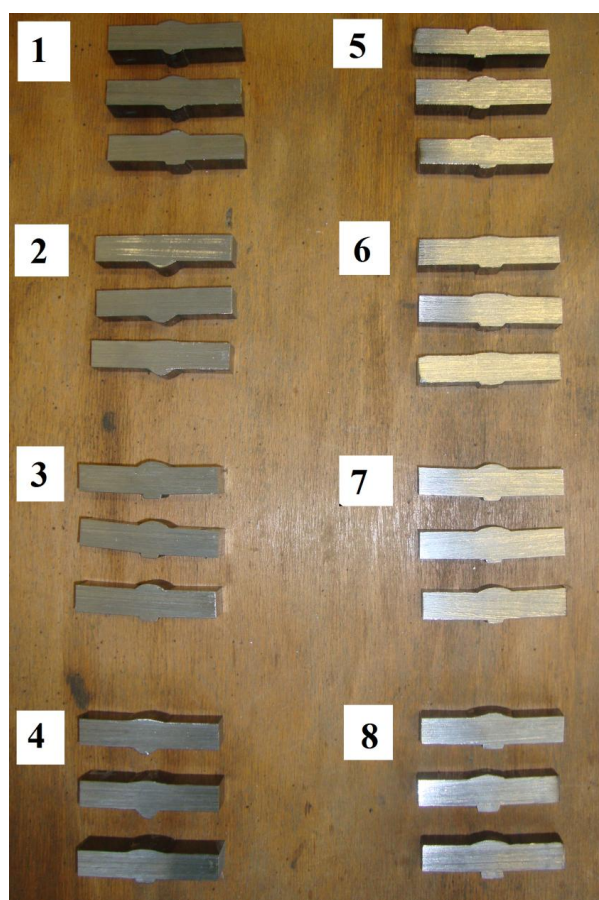


Slika 44. Izrezivanje ploča plinskim postupkom

Nakon izrezivanja ploča slijedilo je rezanje na tračnoj pili. Postupak rezanja prikazan je slikom 45, dok slika 46 prikazuje sve izrezane ispitne uzorke s označenim stanjima pokusa.



Slika 45. Postupak rezanja na tračnoj pili



Slika 46. Izrezani uzorci za pojedina stanja pokusa

Slijedeći korak u pripremi uzoraka je postupak glodanja kojim se dobivaju epruvete konačnih dimenzija. Navedeni postupak izveden je u Laboratoriju za strojnu obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma izrađene su prema normi HRN EN ISO 148-1:2012 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Ispitne metode. Dimenzije epruvete prikazane su tablicom 19.

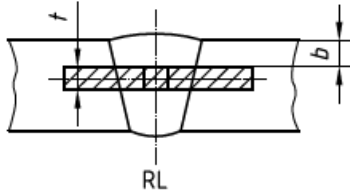
Tablica 19. Dimenzije epruvete za ispitivanje udarnog rada loma prema HRN EN ISO 148-1:2012 [50]

Oznaka	Simbol	V zarez	
		Nominalna dimenzija, mm	Tolerancija, mm
dužina	l	55	$\pm 0,60$
visina	h	10	$\pm 0,075$
standardna širina	w	10	$\pm 0,11$
reducirana širina		7,5	$\pm 0,11$
reducirana širina		5	$\pm 0,06$
reducirana širina		2,5	$\pm 0,05$
Kut zareza	1	45°	$\pm 2^\circ$
Visina ispod zareza	2	8	$\pm 0,075$
Polumjer zakrivljenosti zareza	3	0,25	$\pm 0,025$
Udaljenost zareza od ruba	4	27,5	$\pm 0,42$
Kut između susjednih stranica	5	90°	$\pm 2^\circ$

Zbog deformacija koje su se pojavile tijekom zavarivanja epruvete su napravljene reduciranim dimenzijama širine od 7,5 mm.

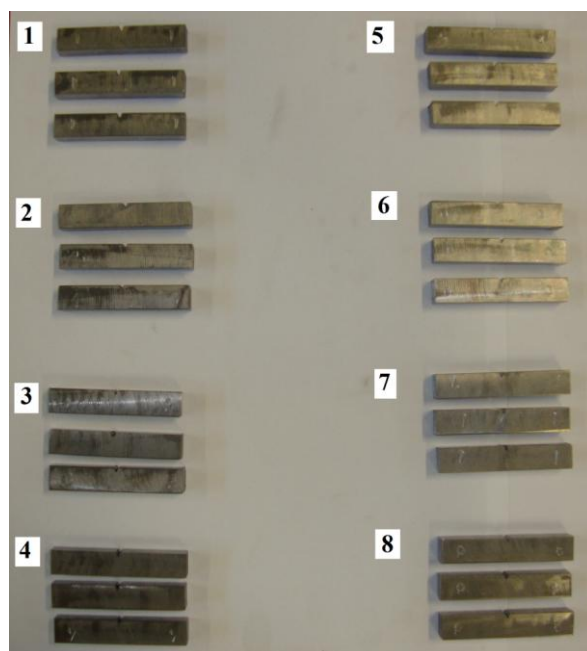
Položaj V-utora određen je normom HRN EN ISO 9016:2013 – Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje udarnog rada loma – Položaj ispitnog uzorka, položaj zarez a i ispitivanje. Za ispitivanje udarnog rada loma metala zavara V-utor nalazi se po sredini zavara te je orijentiran okomito prema površini ispitnog uzorka.

Tablica 20. Shematski prikaz pozicioniranja epruvete i V utora prema HRN EN ISO 9016:2013 [51]

Oznaka	Položaj epruvete i V-utora u odnosu na metal zavara
VWT 0/b	
* RL = referentna linija	

Kao što je vidljivo iz tablice 20 epruvete za ispitivanje udarnog rada loma metala zavara nose oznaku VWT 0/b. Zbog reduciranog poprečnog presjeka, kota t je iznosila 7,5 mm dok je kota b iznosila 1,5 mm.

Nakon završenog postupka glodanja, dobivene su epruvete konačnih dimenzijama prema tablici 19 (slika 47).



Slika 47. Pripremljeni uzorci za ispitivanje udarnog rada loma

6.9. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpyjevom batu maksimalne energije udara 350 J u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 148-1:2012 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Ispitne metode [50].

Ispitivanje je provedeno na $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ispitna temperatura dobivena je kombinacijom etilnog alkohola i suhog leda¹.

Na slici 48 prikazan je Charpyjev bat dok slika 49 prikazuje termostabilnu kupku etilnog alkohola pothlađenog suhim ledom. Uzorci su pothlađeni na temperaturu $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ kako bi se pri ispitivanju temperatura nalazila u granicama $60 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sukladno normi HRN EN ISO 148-1:2012. Pothlađivanje uzoraka trajalo je 20 minuta.



Slika 48. Charpy-ev bat



Slika 49. Termostabilna kupka etilnog alkohola i suhog leda

U tablici 21 prikazani su rezultati ispitivanja udarnog rada loma metala zavara. Za svako stanje pokusa provedena su tri ispitivanja.

Tablica 21. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Stanje pokusa	DM	%CO ₂	\bar{Q}_{stvarni} , kJ/cm	KV, J	\bar{x}_{KV} , J
1	EZ – SG 100	18	10,22	58	59,17
				61,5	
				58	
2	EZ – SG 100	18	15,01	71	73,33
				79	
				70	
3	EZ – SG 100	8	9,98	123	100,50
				111	
				67,5	
4	EZ – SG 100	8	15,05	77	74,00
				95	
				50	
5	EZ – SG 120	18	9,55	76	61,17
				52,5	
				55	
6	EZ – SG 100	18	14,29	101	76,50
				73,5	
				55	
7	EZ – SG 100	8	9,76	59	62,83
				63,5	
				66	
8	EZ – SG 100	8	14,73	47,5	68,25
				89	
				24,5*	
*rezultat nije uzet u razmatranje					

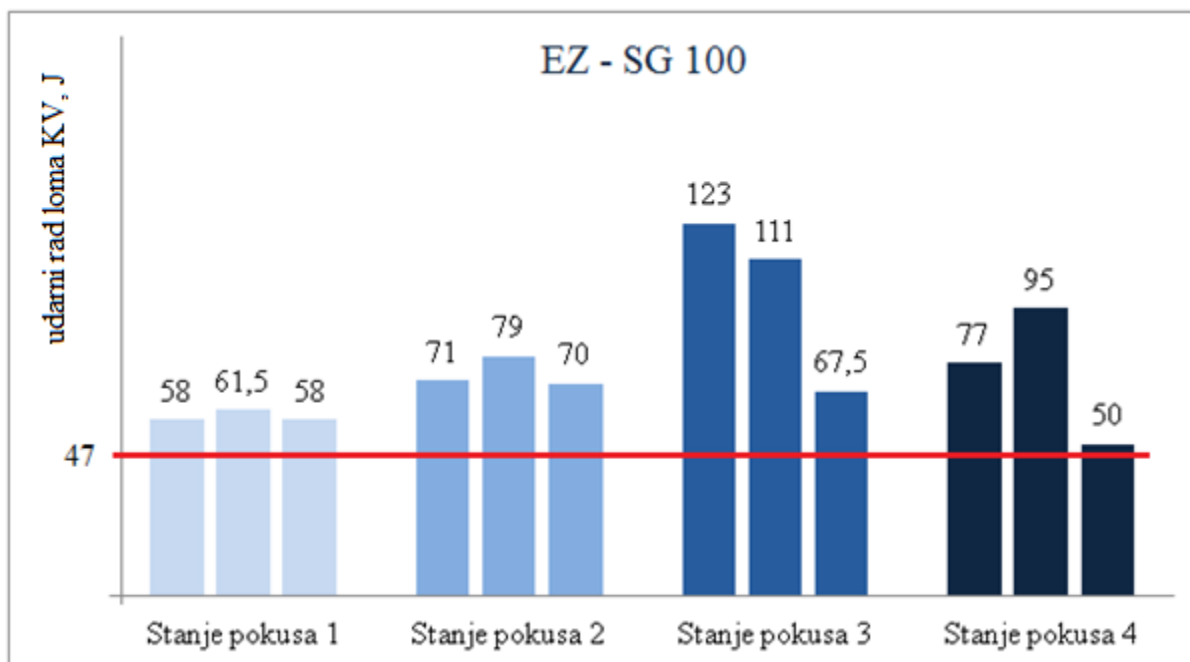
7. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazana je analiza dobivenih rezultata prikazanih tablicom 21 te diskusija o utjecaju pojedinih parametara zavarivanja na iznos udarnog rada loma metala zavara.

7.1. Analiza rezultata udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 100

Dodatni materijal komercijalnog naziva EZ – SG 100 karakterizira granica razvlačenja R_e u iznosu od minimalno 690 MPa. S obzirom da je iznos granice razvlačenja R_e osnovnog materijala (X80) prema atestu 557 MPa očito da je dodatni materijal odabran prema tzv. *overmatching* kriteriju. Iako korištenje dodatnog materijala prema *overmatching* kriteriju zahtijeva veće predgrijavanje i veću temperaturu između prolaza, kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka vodikom induciranih pukotina, u ovom slučaju to nije potrebno jer je debljina osnovnog materijala iznosila 10 mm, a prema literaturi za tu debljinu nije potrebno provesti predgrijavanje. Također, izborom dodatnog materijala prema *overmatching* kriteriju postiže se zadovoljavajuć iznos udarnog rada loma što je ovim eksperimentom i potvrđeno.

Proizvođač dodatnog materijala EZ – SG 100 garantira vrijednost udarnog rada loma u iznosu od 47 J pri temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Provedenim ispitivanjem dokazano je da se vrijednost od 47 J može postići i pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, na svim prijelomnim površinama ispitnih uzoraka vidljivi su tragovi žilavog loma, stoga se može zaključiti da nije dostignuta prijelazna temperatura žilavog u krhki lom. Slika 50 grafički prikazuje postignute vrijednosti udarnog rada loma za pojedina stanja pokusa pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za svako stanje pokusa ispitana su po tri ispitna uzorka (epruvete).



Slika 50. Postignute vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa 1-4 za dodatni materijal EZ – SG 100 pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iz prethodne slike može se vidjeti kako vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa od 1 do 4, pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, premašuju zahtijevanih 47 J. Također, kod stanja pokusa 3 vidljivo je poprilično rasipanje rezultata dok su nešto manje vrijednosti rasipanja zabilježene kod stanja pokusa 4. Unatoč navedenom rasipanju srednje vrijednosti stanja pokusa 3 i 4 premašuju garantiranih 47 J. Srednja vrijednost stanja pokusa 3 iznosi 100,5 J dok za stanje pokusa 4 iznosi 74 J.

7.1.1. Analiza prijelomnih površina za stanja pokusa 1-4

Analiza prijelomnih površina provedena je na stereo mikroskopu LEICA MZ6 u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Stereo mikroskop LEICA MZ6 prikazan je slikom 51 dok tablica 22 prikazuje izgled prijelomnih površina na reprezentativnim uzorcima za stanja pokusa 1-4. Svi uzorci snimljeni su pod povećanjem od 7,88 puta.

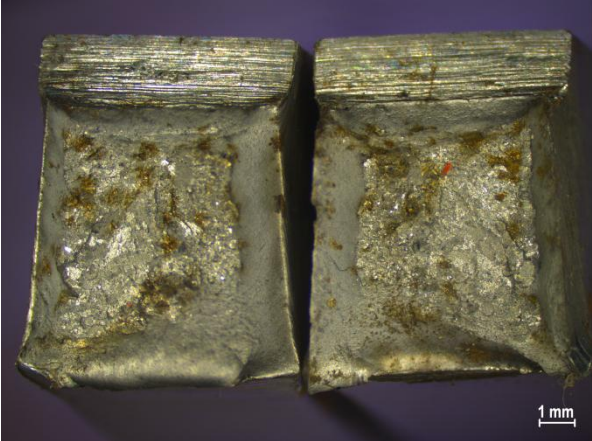
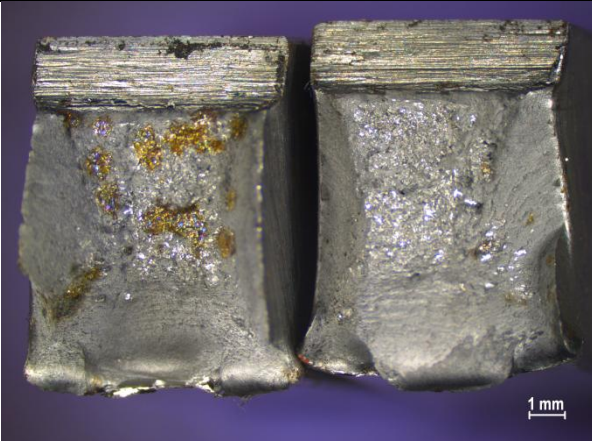


Slika 51. Stereo mikroskop LEICA MZ6

Tablica 22. Izgled prijelomnih površina za stanja pokusa 1-4

Stanje pokusa	Izgled prijelomne površine
1	
2	

Tablica 22. Nastavak

Stanje pokusa	Izgled prijelomne površine
3	
4	

Iako je ispitivanje udarnog rada loma provedeno pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, na svim prijelomnim površinama ispitnih uzoraka za stanja pokusa 1-4, vidljivi su tragovi žilavog loma što se je moglo i očekivati s obzirom na dobivene vrijednosti udarnog rada loma.

S obzirom na mehanizam loma i dobivene vrijednosti udarnog rada loma $>47\text{ J}$, dodatni materijal EZ – SG 100 može se primijeniti ukoliko se u eksploataciji zahtijeva URL $>47\text{ J}$ pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez obzira što je u atestu specificirana vrijednost od 47 J pri temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

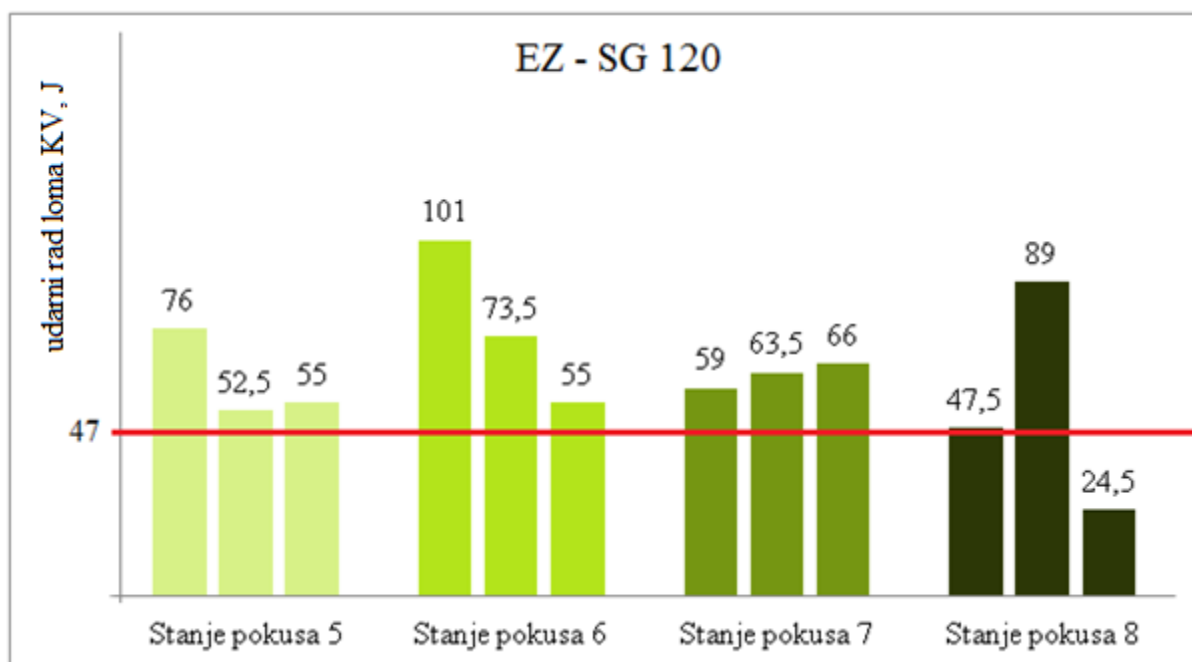
Također, na prijelomnim površinama vidljivi su tragovi korozije. Razlog tome proizlazi iz činjenice što su prijelomne površine uzoraka snimane 3 dana nakon provedenog ispitivanja na Charpyjevom batu.

7.2. Analiza rezultata udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 120

Dodatni materijal komercijalnog naziva EZ – SG 120 karakterizira granica razvlačenja R_e u iznosu od minimalno 890 MPa. U ovom slučaju također se radi o izboru dodatnog materijala prema *overmatching* kriteriju s obzirom na iznos granice razvlačenja osnovnog materijala.

Proizvođač dodatnog materijala EZ – SG 120 garantira vrijednost udarnog rada loma u iznosu od 47 J pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Provedenim ispitivanjem dokazano je da pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ vrijednosti udarnog rada loma premašuju zahtijevanih 47 J, osim kod jedne epruvete stanja pokusa 8. Isto kao i kod dodatnog materijala EZ – SG 100, na svim prijelomnim površinama vidljivi su tragovi žilavog loma.

Slikom 52 prikazane su postignute vrijednosti udarnog rada loma za pojedina stanja pokusa pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, kao i kod dodatnog materijala EZ – SG 100, za svako stanje pokusa ispitana su tri ispitna uzorka.



Slika 52. Postignute vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa 5-8 za dodatni materijal EZ – SG 120 pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Iz slike 52 može se vidjeti kako vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa od 5 do 8, pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, premašuju zahtijevanih 47 J osim kod jedne epruvete stanja pokusa 8. Kod navedene epruvete iznos udarnog rada loma iznosi 24,5 J, a razlog tako niskog


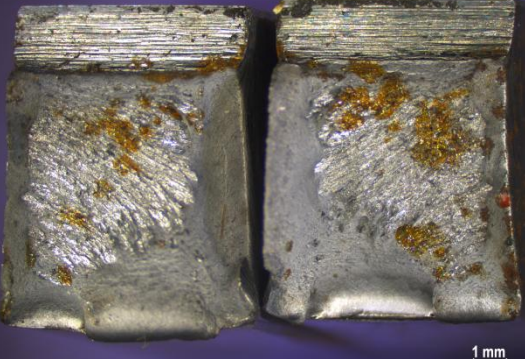
iznosa može se uočiti pogleda li se pažljivo prijelomna površina koja je prikazana slikom 54. Naime, na prijelomnoj površini vidljive su pore čija prisutnost smanjuje nosivi presjek epruvete te tako doprinosi niskoj vrijednosti udarnog rada loma. Zbog poroznosti u zavarenom spoju navedena epruvete bit će eliminirana iz daljnjeg razmatranja.

Što se tiče ostalih vrijednosti udarnog rada loma, vidljivo je poprilično rasipanje u stanjima pokusa 6 i 8. Srednja vrijednost stanja pokusa 6 iznosi 76,5 J dok za stanje pokusa 8 iznosi 68,25 J izostavi li se vrijednost kritične epruvete.

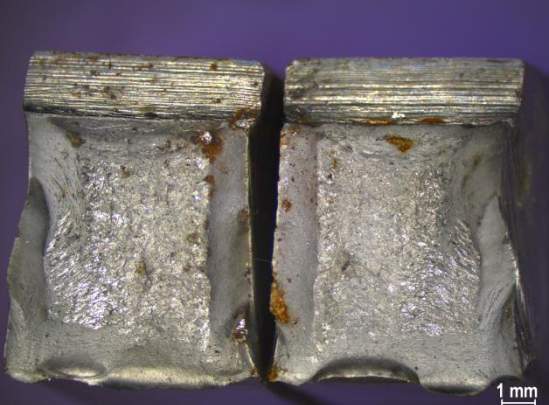
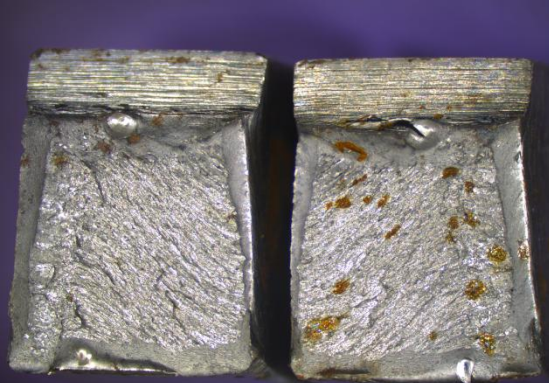
7.2.1. Analiza prijelomnih površina za stanja pokusa 5-8

U tablici 23 prikazane su prijelomne površine za stanja pokusa 5-8 odnosno za korišteni dodatni materijal EZ – SG 120.

Tablica 23. Izgled prijelomnih površina za stanja pokusa 5-8

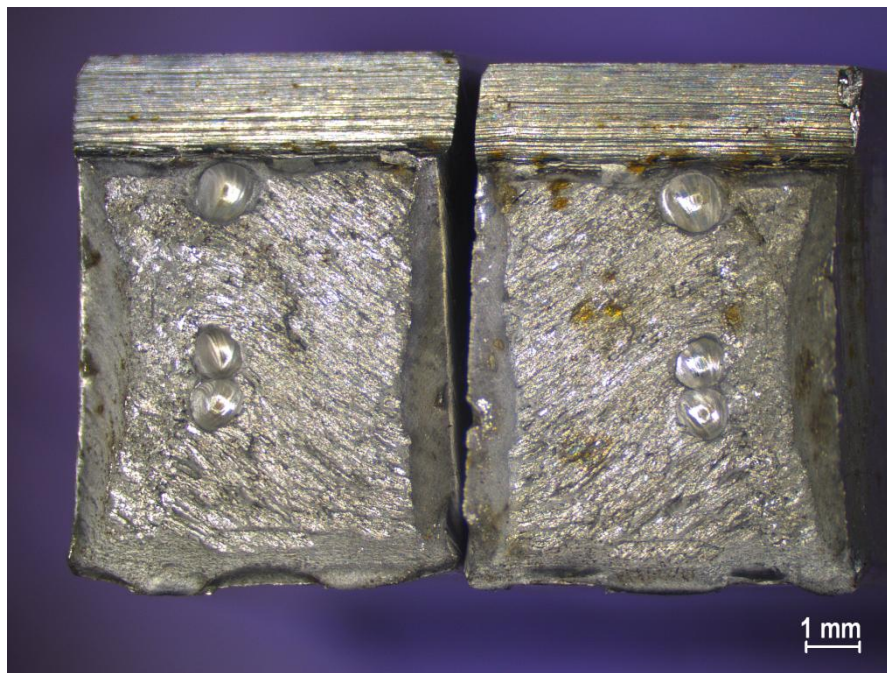
Stanje pokusa	Izgled prijelomne površine	Napomena
5		
6		

Tablica 23. Nastavak

Stanje pokusa	Izgled prijelomne površine	Napomena
7		
8		*vidi sliku 54

Kod dodatnog materijala EZ – SG 120 također su vidljivi tragovi žilavog loma što se je moglo i očekivati s obzirom da, prema podacima proizvođača, navedeni dodatni materijal garantira vrijednost URL od 47 J pri temperaturi ispitivanja $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

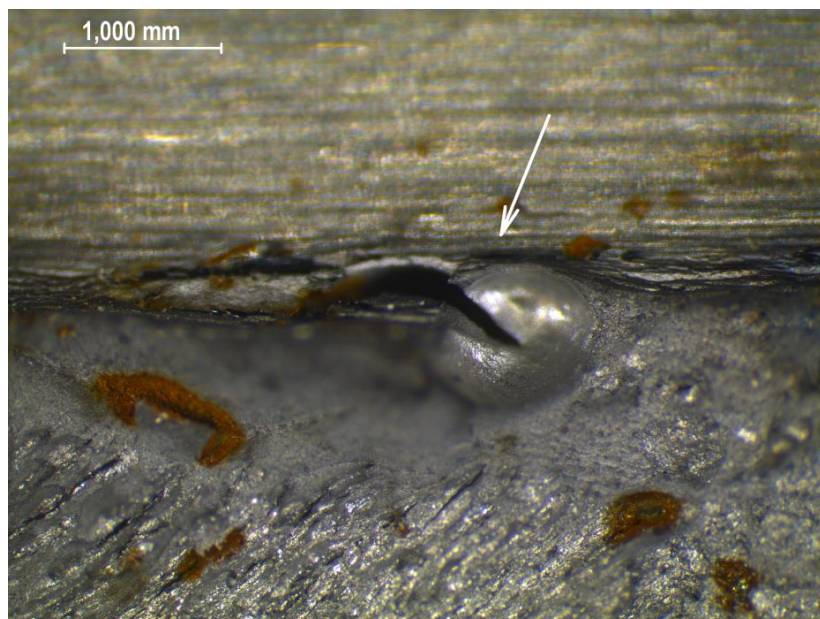
Posebno su zanimljive prijelomne površine epruveta stanja pokusa 8. Iako je kod jedne od epruveta dobivena vrijednost udarnog rada loma od 24,5 J, na epruveti su vidljivi tragovi žilavog loma. Naime, navedena epruveta pukla je zbog pojave poroznosti u metalu zavara što je značajno smanjilo nosivi presjek, a ne zbog dostizanja prijelazne temperature odnosno pojave krhkog loma. Epruveta na kojoj je uočena poroznost prikazana je slikom 54.



Slika 53. Poroznost u metalu zavara; stanje pokusa 8; KV=24,5 J

Također, kod stanja pokusa 8 na jednoj od epruveta dobivena je granična vrijednost udarnog rada loma od 47,5 J, tablica 23. Pogleda li se pažljivo prijelomna površina uočiti će se pora u samoj blizini V utora. Iako je pora smanjila poprečni presjek nosivog dijela, dobivena vrijednost udarnog rada loma od 47,5 J još uvijek je prema specifikaciji materijala.

Na slici 54 prikazan je izgled pore pri povećanju 20 puta.



Slika 54. Poroznost u metalu zavara; stanje pokusa 8; KV = 47,5 J

Komentar pojave poroznosti u stanju pokusa 8

Kod stanja pokusa 8, uz dodatni materijal SG 120 i mješavinu zaštitnog plina 92 %Ar/8 %CO₂, kao ulazni parametar korišten je unos topline prosječnog iznosa 14,73 kJ/cm. Zbog navedenog unosa topline zavarivanje je provedeno u dva prolaza. Prilikom zavarivanja korijena u jednom trenutku došlo je do protaljivanja. Poznato je da nepravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka vrlo lako može dovesti do poroznosti u metalu zavara. U trenutku kada se vrh elektrode dotakne s materijalom koji se zavaruje i zatim odmakne radi uspostavljanja električnog luka, u materijal ulaze štetni plinovi iz okoliša koji zatim bivaju upijeni u talinu što je jedan od mogućih razloga pojave poroznosti u ovom stanju pokusa. Također, ne treba isključiti i utjecaj podloške za zavarivanje koja može sadržavati veće količine nepoželjnih plinova odnosno vlage i tako doprinijeti pojavi poroznosti u metalu zavara.

7.3. Analiza utjecaja zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 100

Kako bi se procijenio utjecaj zaštitnog plina na svojstva metala zavara uvodi se pojam ekvivalenta kisika. Ekvivalent kisika, O_{eq} , računa se prema izrazu (2):

$$O_{eq} = -0,088 + 0,148 [CO_2]^{1,524} + [O_2]$$

Pri čemu [CO₂] i [O₂] predstavljaju volumne udjele pojedinog plina.

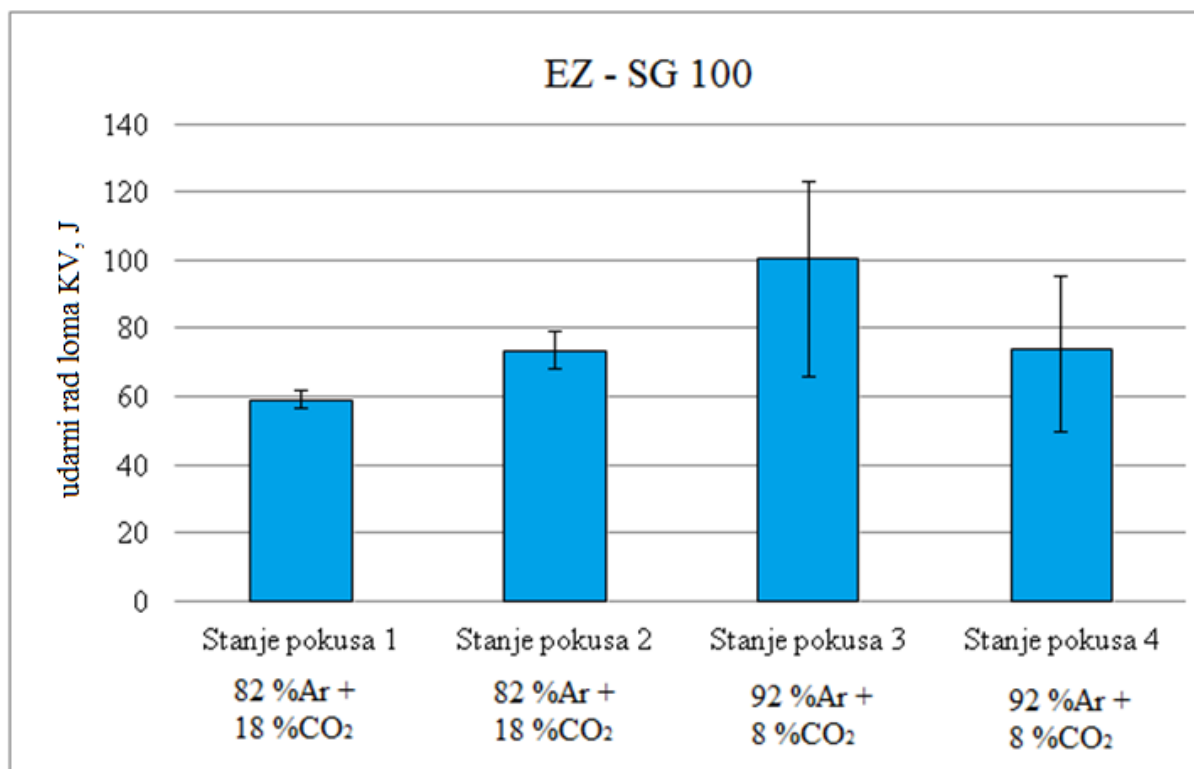
Rezultati izračuna ekvivalenta kisika za sva stanja pokusa prikazani su u tablici 24.

Tablica 24. Vrijednosti ekvivalenta kisika za sva stanja pokusa

Stanje pokusa	%CO ₂ , volumni udio	Ekvivalent kisika O_{eq} , %
1	18	12,0
2	18	12,0
3	8	3,4
4	8	3,4
5	18	12,0
6	18	12,0
7	8	3,4
8	8	3,4

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da ekvivalent kisika, O_{eq} , za stanja pokusa 3, 4, 7 i 8 iznosi 3,4, dok za stanja pokusa 1, 2, 5 i 6 iznosi 12. U literaturi [6, 28, 29, 30] navodi se kako veliku ulogu na postizanje optimalnih vrijednosti udarnog rada loma ima upravo ekvivalent kisika. Razlog tome proizlazi iz činjenice što udio ekvivalenta kisika utječe na stvaranje acikularnog ferita, poželjnog mikrokonstituenta kada se traži dobar iznos udarnog rada loma. Kako bi se postigao što veći udio acikularnog ferita, a samim time i veći iznos udarnog rada loma, poželjno je da iznos ekvivalenta kisika bude između 2 i 3. Također, prema literaturi [28] iznosom ekvivalenta kisika između 2 i 3 postiže se najniža prijelazna temperatura. Porastom ekvivalenta kisika, a samim time i %CO₂ dolazi do smanjenja udjela acikularnog ferita odnosno do pada vrijednosti udarnog rada loma.

U dijagramu na slici 55 prikazane su srednje vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za stanja pokusa 1-4 uz označeno pripadajuće rasipanje. Dobivene vrijednosti odnose se na korišteni zaštitni plin i dodatni materijal SG 100.

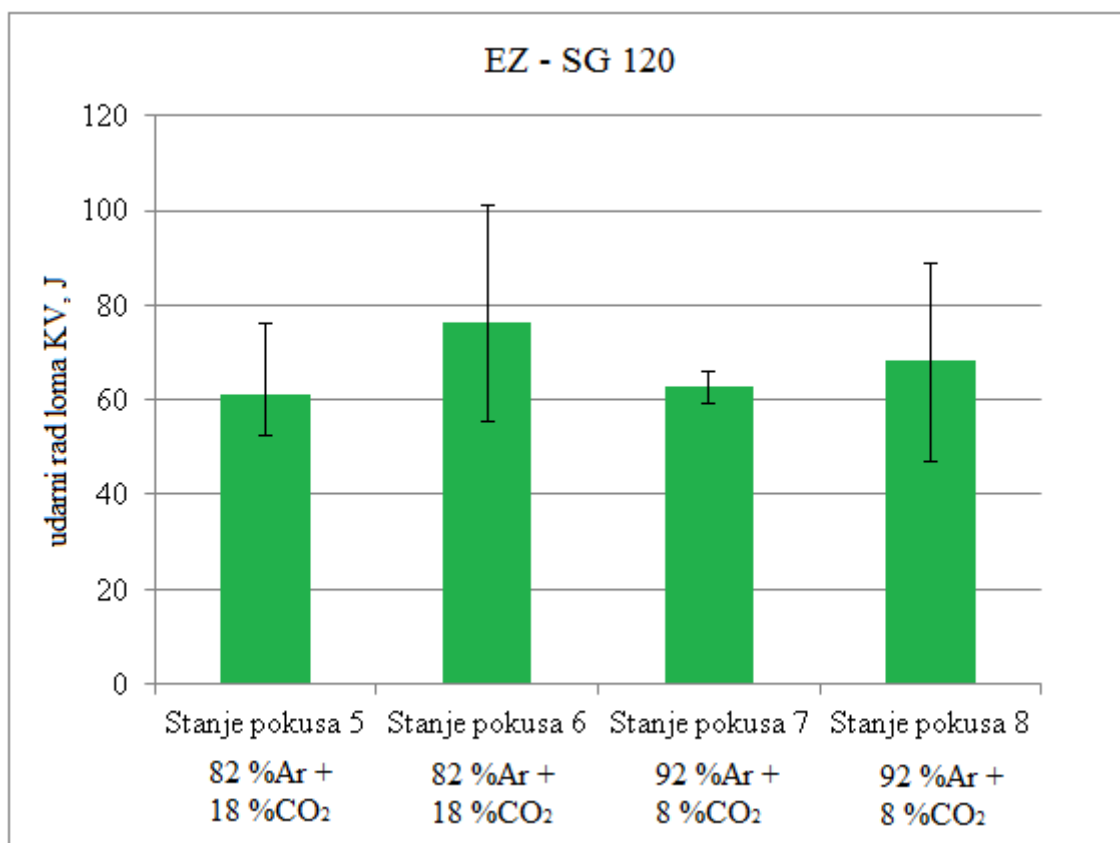


Slika 55. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 100

Iz prethodne slike vidljivo je da s povećanjem udjela CO₂ u mješavini dolazi do pada vrijednosti udarnog rada loma metala zavara što je u skladu s navodima u literaturi [6, 30]. Najveća vrijednost udarnog rada loma postignuta je u stanju pokusa 3 dok je najmanja postignuta u stanju pokusa 1. Gledajući srednju vrijednost ispitivanih epruveta, vrijednosti udarnog rada loma za stanja pokusa 2 i 4 praktički su iste.

7.4. Analiza utjecaja zaštitnog plina na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal SG 120

U dijagramu na slici 56 prikazane su srednje vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za stanja pokusa 5-8 uz označeno pripadajuće rasipanje. Dobivene vrijednosti odnose se na korišteni zaštitni plin i dodatni materijal EZ – SG 120.



Slika 56. Utjecaj zaštitnog plina na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 120

Kod dodatnog materijala EZ – SG 120 smanjenjem udjela CO₂ došlo je do blagog porasta udarnog rada loma u odnosu na stanje pokusa 5. Međutim, stanje pokusa 6 posjeduje najveću prosječnu vrijednost udarnog rada loma. Jedan od mogućih razloga dobivanja najveće

prosječne vrijednosti udarnog rada loma u stanju pokusa 6 je taj što broj ispitivanja nije dovoljno velik da se dobije statistički značajan rezultat.

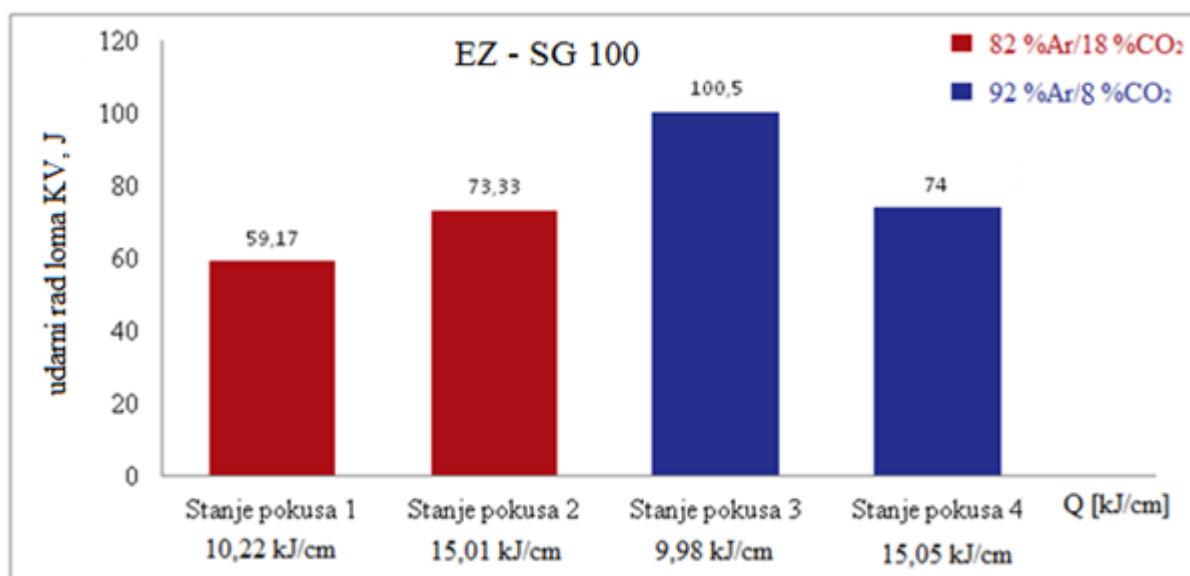
7.5. Utjecaj unosa topline na vrijednosti udarnog rada loma metala zavara

Kao što je spomenuto u teorijskom dijelu rada, preveliki unos topline kao i prevelika temperatura predgrijavanja i prevelika temperatura između prolaza rezultirat će padom čvrstoće, tvrdoće i žilavosti, dok će niski unos topline odnosno niska temperatura predgrijavanja i niska međuprolazna temperatura povećati rizik prema nastanku hladnih pukotina. Zbog toga se parametri i tehnologija zavarivanja moraju egzaktno definirati jer se može vrlo lako izaći iz granica koje garantiraju homogenu strukturu i mali rizik od pojave pukotina.

U ovom radu odabrane su dvije razine unosa topline na temelju proučene literature; 10 kJ/cm te 15 kJ/cm. Ovisno o pojedinim autorima, za zavarivanje visokčvrstih čelika gradacije X80, u literaturi se preporuča unos topline u rasponu od čak 5 kJ/cm, dok se kao gornja granica spominje približno 18 kJ/cm.

Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 100

Na slici 57 prikazan je utjecaj unosa topline na prosječnu vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara za dodatni materijal EZ – SG 100.



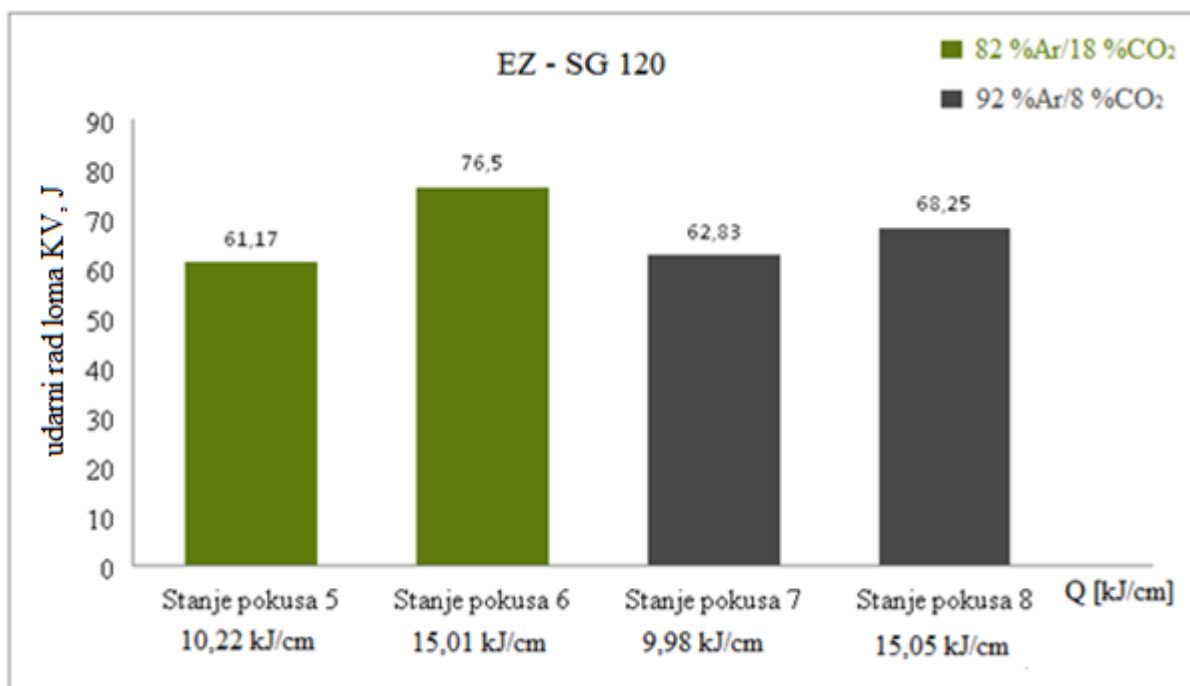
Slika 57. Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara dodatnog materijala EZ – SG 100

Uspoređujući dobivene rezultate stanja pokusa 1 i 2, vidljivo je da je porastom unosa topline došlo do porasta vrijednosti udarnog rada loma u metalu zavara što je suprotno navodima u literaturi. Usporede li se vrijednosti stanja pokusa 3 i 4, vidljivo je da porastom unosa topline dolazi do smanjenja vrijednosti udarnog rada loma što je u skladu s literaturnim navodima.

Uzimajući navedeno u obzir, prema provedenim ispitivanjima pokazalo se kako kod unosa topline od 15 kJ/cm ne dolazi do degradacije mehaničkih svojstava unatoč literaturnim navodima kako se poželjni unos topline, kad su u pitanju čelici visoke čvrstoće, kreće oko ili ispod 10 kJ/cm.

Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma metala zavara za dodatni materijal EZ – SG 120

Na slici 58 prikazan je utjecaj unosa topline na prosječnu vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara za dodatni materijal EZ – SG 120.

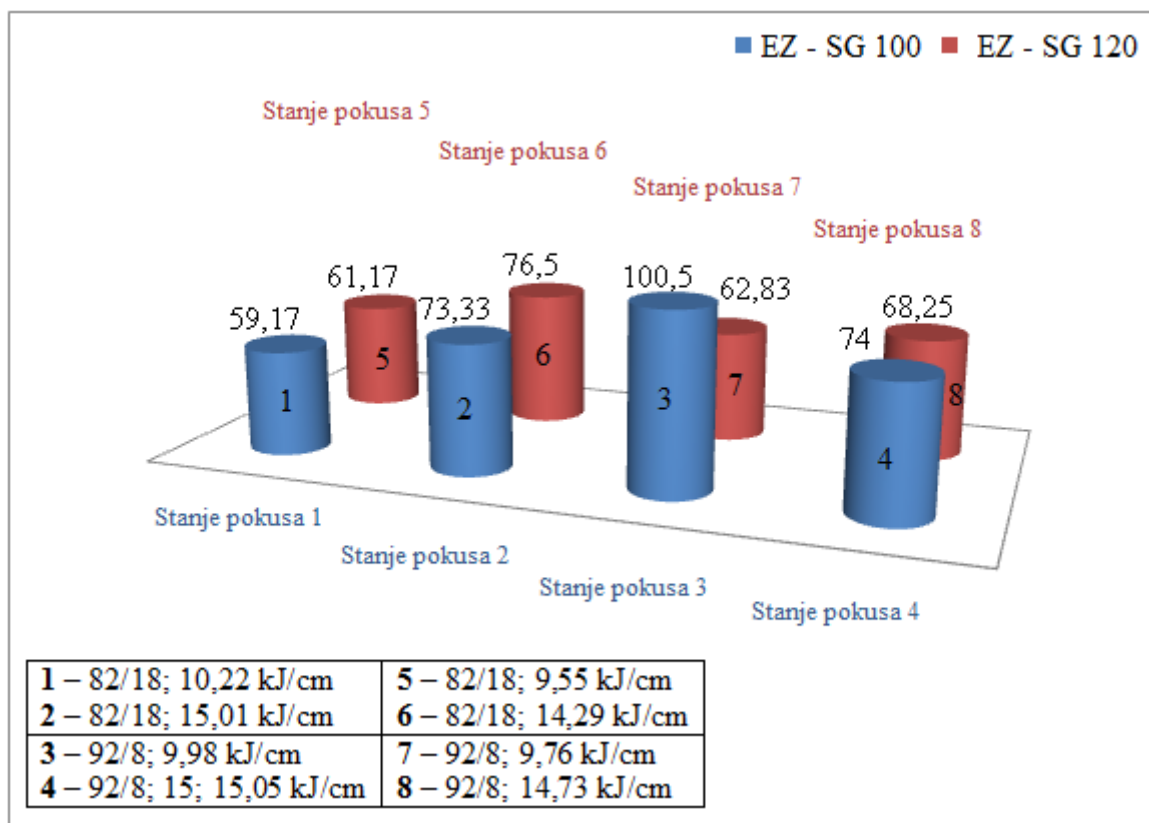


Slika 58. Utjecaj unosa topline na vrijednost udarnog rada loma u metalu zavara dodatnog materijala SG 120

Kod dodatnog materijala SG 120 veće vrijednosti udarnog rada loma postignute su kod većeg unosa topline što nije u skladu s proučenom literaturom. Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako je unos topline u rasponu od 10 kJ/cm do 15 kJ/cm pogodan za zavarivanje visokočvrstih čelika, unatoč navodima u literaturi kako porastom unosa topline dolazi do pada vrijednosti udarnog rada loma.

7.6. Komparativna analiza stanja pokusa 1-8

Na slici 59 prikazana je usporedna analiza svih stanja pokusa.



Slika 59. Usporedna analiza svih stanja pokusa

Pogleda li se pažljivo dijagram s prethodne slike uočit će se pozitivan utjecaj mješavine 92/8 na postizanje vrijednosti udarnog rada loma metala zavara. Naime, uzme li se u obzir dodatni materijal EZ – SG 100, vidljivo je da kod istog unosa topline, veće vrijednosti udarnog rada loma postignute su prilikom korištenja mješavine 92/8. Kod dodatnog materijala EZ –SG 120, za isti unos topline, u stanju pokusa 7 uočen je blagi porast udarnog rada loma u odnosu na stanje pokusa 5. Međutim, usporede li se stanja pokusa 6 i 8, odnosno unosi topline od 15 kJ/cm, vidljivo je da je u stanju pokusa 6 dobiven veći iznos udarnog rada loma unatoč korištenoj mješavini 82/18. Dobivena veća vrijednost udarnog rada loma kod stanja pokusa 6 spram stanja pokusa 8 uopće ne čudi s obzirom da je u stanju pokusa 8 došlo do poroznosti u metalu zavara te zbog toga rezultati stanja pokusa 8 nisu relevantni.

Porastom unosa topline nije došlo do smanjenja udarnog rada loma kao što se je očekivalo, štoviše došlo je do porasta vrijednosti URL što je suprotno navodima u literaturi. Sukladno tome, unos topline u rasponu 10 – 15 kJ/cm pogodan je za zavarivanje visokočvrstog čelika gradacije X80.

Komentar odabira optimalne tehnologije zavarivanja

Prema dobivenim rezultatima vidljiv je pozitivan utjecaj zaštitnog plina 92 %Ar/8 %CO₂ na dobivene vrijednosti udarnog rada loma kod oba dodatna materijala. Sukladno tome, logičan je odabir mješavine 92/8 kada se traži dobar iznos udarnog rada loma pri niskim temperaturama. Što se tiče unosa topline, iako su i s 15 kJ/cm dobivene zadovoljavajuće vrijednosti udarnog rada loma, ipak je poželjnije zavarivati s nižim unosom topline u više prolaza. Naime, kod višeg unosa topline može doći do protaljivanja korijena kao što se dogodilo u stanju pokusa 8 što je izazvalo poroznost u zavarenom spoju.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju proučene literature može se zaključiti sljedeće:

- Visokočvrsti čelici primjenjuju se pri temperaturi do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Razlog zadržavanju povoljnih mehaničkih svojstava, prije svega udarnog rada loma, pri sniženim temperaturama proizlazi iz TMCP načina proizvodnje. Navedenim postupkom proizvodnje dobiva se struktura igličastog ferita i bainita umjesto klasične feritno-perlitne strukture prisutne kod čelika proizvedenih konvencionalnim postupkom. Čelici s mikrostrukturom igličastog ferita posjeduju relativno dobar iznos udarnog rada loma. Razlog tome proizlazi iz kaotične kristalografske orijentacije te se nukleacija kristalnog zrna odvija na površini uključaka unutar austenitnog zrna. Zbog toga dolazi do usporavanja propagacije pukotine odnosno povišenja čvrstoće i žilavosti.

Također, navedenu skupinu čelika karakterizira dobra zavarljivost, ali je potrebno strogo definirati parametre i tehnologiju zavarivanja jer se vrlo lako može izaći iz granica koje garantiraju homogenu strukturu i mali rizik od pojave pukotina.

- Čelici legirani s 1,5-2,5 %Ni primjenjuju se pri temperaturama do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dok se čelici legirani s 9 %Ni primjenjuju pri temperaturama $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Razlog zadržavanju povoljnog iznosa udarnog rada loma pri tako niskim temperaturama proizlazi iz FCC kristalne rešetke nikla.
- Austenitni nehrđajući čelici primjenjuju se i pri najnižim mogućim temperaturama – gotovo do apsolutne nule. Kao i kod nikla, razlog zadržavanju povoljnih svojstava, prije svega udarnog rada loma i pri tako niskim temperaturama proizlazi iz FCC kristalne rešetke. S obzirom na iznos udarnog rada loma od 122 J pri $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ za čelik AISI 304 na prvi trenutak moglo bi se reći da će se rješenje problema krhkog loma jednoznačno nalaziti u primjeni austenitnih nehrđajućih čelika. Međutim, treba voditi računa i o negativnim svojstvima navedene skupine čelika od kojih posebnu pažnju valja skrenuti na manje poznate strukturne transformacije do kojih dolazi pri niskim

temperaturama. Osim toga, navedeni čelici nemaju izrazito visok iznos granice razvlačenja te je u obzir potrebno uzeti i cijenu materijala koja je viša nego kod ostalih čelika koji se primjenjuju pri kriogenim temperaturama.

Na temelju provedenog eksperimenta može se zaključiti sljedeće:

- 1) Iako proizvođač dodatnog materijala EZ – SG 100 garantira vrijednost udarnog rada loma od 47 J pri temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, provedenim ispitivanjem dokazano je da se navedena vrijednost URL može postići i pri $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također, na svim prijelomnim površinama vidljivi su tragovi žilavog loma. Na temelju toga može se zaključiti kako, niti pri temperaturi od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, dodatni materijal EZ – SG 100 nije dosegao svoju prijelaznu temperaturu. Zbog toga moguća je primjena dodatnog materijala EZ – SG 100 i pri $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ unatoč specifikaciji udarnog rada loma od strane proizvođača pri temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2) Proizvođač dodatnog materijala EZ – SG 120 garantira vrijednost udarnog rada loma od 47 J pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ što je ovim eksperimentom i potvrđeno. Međutim, kod jedne epruvete stanja pokusa 8 vrijednost udarnog rada loma ne dostiže traženih 47 J. Razlog tome je pojava poroznosti u metalu zavara. Unatoč tome moguća je primjena dodatnog materijala EZ – SG 120 pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3) Provedenim eksperimentom potvrđen je pozitivan utjecaj plinske mješavine sa smanjenim udjelom CO_2 na dobivenu vrijednost udarnog rada loma. Naime, za isti unos topline kod mješavine 92 %Ar/8 % CO_2 dobivene su veće vrijednosti udarnog rada loma spram mješavine 82 %Ar/18 % CO_2 kod oba dodatna materijala.
- 4) Iako se u literaturi navodi kako porastom unosa topline dolazi do pada vrijednosti udarnog rada loma ovim eksperimentom to nije potvrđeno. Naprotiv, jedino je u stanju pokusa 4 ($Q_4 = 15,05\text{ kJ/cm}$) došlo do pada udarnog rada loma spram stanja pokusa 3 ($Q_3 = 9,98\text{ kJ/cm}$) dok je u ostalim stanjima pokusa, porastom unosa topline, došlo do porasta vrijednosti udarnog rada loma. Uzimajući navedeno u obzir može se zaključiti

kako kod unosa topline od 15 kJ/cm ne dolazi do degradacije mehaničkih svojstava unatoč literaturnim navodima kako se poželjni unos topline, kad su u pitanju čelici visoke čvrstoće, kreće oko ili ispod 10 kJ/cm.

Kako bi se značajnije vidio utjecaj unosa topline potrebno bi bilo provesti ispitivanje s unosom topline >15 kJ/cm. U ovom slučaju to nije bilo izvedivo s obzirom na debljinu osnovnog materijala koja je iznosila 10 mm. Zbog toga se preporuča daljnje istraživanje s unosom topline 15-20 kJ/cm na osnovnom materijalu debljine 20 mm ili više.

9. POPIS LITERATURE

- [1] Filetin T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Kožuh S.: Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu – Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [3] Novosel M., Krumes D.: Posebni čelici, Sveučilište u Osijeku – Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998.
- [4] Hillenbrand H. G., Gräf M., Kalwa C.: Development and production of high strength pipeline steels, Orlando, Florida, USA, 2001.
- [5] Pirinen M.: The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structure, University of Technology – Lappeenranta, 2013.
- [6] Kolednjak D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Sveučilište u Zagrebu – FSB, doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [7] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Sveučilište u Zagrebu – FSB, doktorski rad, Zagreb, 2012.
- [8] Mišina N., Oršulić M., Polajnar I.: Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji, Znanstveni časopis „Naše more“, 2003.
- [9] Tandarić K.: Metode procjene zavarljivosti čelika visoke čvrstoće, Sveučilište u Zagrebu – FSB, Završni rad, Zagreb, 2015.
- [10] Blondeau R.: Metallurgy and Mechanics of Welding, Wiley, USA, 2001.
- [11] Matković T., Matković P.: Fizikalna metalurgija I, Sveučilište u Zagrebu – Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
- [12] Jurica M.: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80, Sveučilište u Zagrebu – FSB, doktorski rad, 2015.
- [13] Juraga I., Ljubić K., Živčić M., Garašić I.: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [14] Garašić I.: Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, Sveučilište u Zagrebu – FSB, doktorski rad, Zagreb, 2008.
- [15] Sampath K. : How to Choose Electrodes for Joining High-Strength Steels, Welding Journal, 86: 26-28, Miami, 2007.
- [16] Kim C. M., Lee J.B., Yoo J. Y.: A Study on the Metallurgical and Mechanical

- Characteristics of the Weld Joint of X80 Steel, International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 2005.
- [17] Rakin M., Bajić., Mrdak M., Veljić D., Arsić M.: Analysis of mechanical and structural properties of microalloyed steel welded joints depending on quality of cored wire, *Tehnički vjesnik* 20, 4(2013), 635-640
- [18] Ramirez J. E.: Characterization of High-Strength Steel Weld Metals: Chemical Composition, Microstructure, and Nonmetallic Inclusions, *Welding research*, 2008., 65-75
- [19] Bajic N., Sijacki-Zeravcic V., Bobic B., Cikara D., Arsic M.: Filler Metal Influence on Weld Metal Structure of Microalloyed Steel, *Supplement to the Welding Journal*, 2011., 55-62
- [20] Umekuni A., Masubuchi K.: Usefulness of Undermatched Welds for High-Strength Steel, 1997., 256-263
- [21] Atta-Agyemang S. A.: Optimization of strength and toughness on the effect of the weldable high strength steels used in offshore structures, Thesis for the Degree of Masters of Science in Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2013.
- [22] Hakansson K.: Weld Metal Properties for Extra High Strength Steels, Doctoral Thesis, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2002.
- [23] Popović O., Prokić-Cvetković R., Burzić M., Milutinović Z.: The effect of heat input on the weld metal toughness of surface welded joint, 14th International Research/Expert Conference, Mediterranean Cruise, 2010.
- [24]: HRN EN ISO 1011-1: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje
- [25] Pirinen M., Martikainen Yu., Layus P.D., Karkhin V. A., Ivanov S. Yu.: Effect of heat input on the mechanical properties of welded joints in high-strength steels, Technical University Lappeenranta, Welding International, Finland, 2015.
- [26] ...: HRN EN ISO 14175:2008: Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke
- [27] Lincoln Electric – Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection
- [28] Onsoien M. I., Liu S., Olson D. L.: Shielding Gas Oxygen Equivalent in Weld Metal Microstructure Optimization, 1996., 216-224
- [29] Kou S.: *Welding Metallurgy*, Wiley, 2002.

- [30] Gadallah R., Fahmy R., Khalifa T., Sadek A.: Influence of Shielding Gas Composition on the properties of Flux-Cored Arc Weld of Plain Carbon Steel, International Journal of Engineering and Technology Innovation, Cairo, Egypt, vol. 2., no.1, 2012., pp. 01-12
- [31]: HRN EN ISO 1011-2: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika
- [32]: HRN EN ISO 16834:2013 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom plina za čelike visoke čvrstoće – Razredba
- [33] Nastavni materijali Zavoda za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [34] Lippold J. C., Kotecki D. J.: Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, Wiley, SAD, 2005.
- [35] Rede V.: Nastavni materijali iz kolegija „Posebni metalni materijali“, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2015.
- [36] <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/A6.pdf> pristupio 11.06.2016.
- [37] Friedrich N.: Welding of austenitic stainless steels for cryogenic LNG applications, Stainless Steel World America 2008 Conference & Expo, Houston, USA, 2008.
- [38] Lukačević Z.: Zavarivanje, Sveučilište u Osijeku – Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998
- [39] Juraga I., Alar V., Stojanović I.: Korozija i zaštita premazima, Sveučilište u Zagrebu – FSB, 2014.
- [40] Rudan M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, Seminar- Čelici otporni na koroziju, Pula, 2007.
- [41] <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=270> pristupio 14.06.2016.
- [42] Dupont J.N., Lippold J. C., Kiser S.D.: Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, Wiley, SAD, 2009.
- [43] Radović N., Grabulov V., Smiljanić M., Antić M.: Čelici legirani niklom za rad na niskim temperaturama, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Beograd, 2003., str. 14-20 .
- [44] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade metala, Sveučilište u Zagrebu –

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

- [45] Nippes E. F., Balaguer J. P.: A Study of the Weld Heat-Affected Zone Toughness of 9 % Nickel Steel, AWS Annual Meeting, Las Vegas, 1985.
- [46] Hrivnak I.: Theory of Weldability of Metals and alloys, Faculty of Metallurgy, Technical University Kosice, Slovakia, 1992.
- [47] Garašić I., Kožuh Z.: „Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje“, Sveučilište u Zagrebu - FSB, Zagreb, 2015.
- [48] http://www.daihen-varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng.html pristupio: 21.06.2016.
- [49] http://www.treatrade.hr/upload/pdf/BUG-O/hr/modularni_sistem_pogona_HR.pdf pristupio 21.06.2016.
- [50]: HRN EN ISO 148-1:2012 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Ispitne metode
- [51]: HRN EN ISO 9016:2013 – Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje udarnog rada loma – Položaj ispitnog uzorka, položaj zareza i ispitivanje

PRILOG

Izvadak iz norme HRN EN ISO 16834:2013 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje sa zaštitom plina za čelike visoke čvrstoće – Razredba.

Table 3B — Symbol for chemical composition
(Classification by tensile strength and 27 J impact energy)

Symbol (ISO 16834-B)	Chemical composition % (by mass) ^{a,b}										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	
2M3	0,12	0,30 to 0,70	0,60 to 1,40	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
3M1	0,05 to 0,15	0,40 to 1,00	1,40 to 2,10	0,025	0,025	—	—	0,10 to 0,45	0,50	—	—
3M1T	0,12	0,40 to 1,00	1,40 to 2,10	0,025	0,025	—	—	0,10 to 0,45	0,50	0,02 to 0,30	—
3M3	0,12	0,60 to 0,90	1,10 to 1,60	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
3M31	0,12	0,30 to 0,90	1,00 to 1,85	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
3M3T	0,12	0,40 to 1,00	1,00 to 1,80	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	0,02 to 0,30	—
4M3	0,12	0,30	1,50 to 2,00	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
4M31	0,07 to 0,12	0,50 to 0,80	1,60 to 2,10	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,60	0,50	—	—
4M3T	0,12	0,50 to 0,80	1,60 to 2,20	0,025	0,025	—	—	0,40 to 0,65	0,50	0,02 to 0,30	—
N1M2T	0,12	0,60 to 1,00	1,70 to 2,30	0,025	0,025	0,40 to 0,80	—	0,20 to 0,60	0,50	0,02 to 0,30	—
N1M3	0,12	0,20 to 0,80	1,00 to 1,80	0,025	0,025	0,30 to 0,90	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
N2M1T	0,12	0,30 to 0,80	1,10 to 1,90	0,025	0,025	0,80 to 1,60	—	0,10 to 0,45	0,50	0,02 to 0,30	—
N2M2T	0,05 to 0,15	0,30 to 0,90	1,00 to 1,80	0,025	0,025	0,70 to 1,20	—	0,20 to 0,60	0,50	0,02 to 0,30	—
N2M3	0,12	0,30	1,10 to 1,60	0,025	0,025	0,80 to 1,20	—	0,40 to 0,65	0,50	—	—
N2M3T	0,05 to 0,15	0,30 to 0,90	1,40 to 2,10	0,025	0,025	0,70 to 1,20	—	0,40 to 0,65	0,50	0,02 to 0,30	—
N2M4T	0,12	0,50 to 1,00	1,70 to 2,30	0,025	0,025	0,80 to 1,30	—	0,55 to 0,85	0,50	0,02 to 0,30	—
N3M2 ^c	0,08	0,20 to 0,55	1,25 to 1,80	0,010	0,010	1,40 to 2,10	0,30	0,25 to 0,55	0,25	0,10	—
N4M2 ^d	0,09	0,20 to 0,55	1,40 to 1,80	0,010	0,010	1,90 to 2,60	0,50	0,25 to 0,55	0,25	0,10	—
N4M3T	0,12	0,45 to 0,90	1,40 to 1,90	0,025	0,025	1,50 to 2,10	—	0,40 to 0,65	0,50	0,01 to 0,30	—
N4M4T	0,12	0,40 to 0,90	1,60 to 2,10	0,025	0,025	1,90 to 2,50	—	0,40 to 0,90	0,50	0,02 to 0,30	—
N5M3 ^e	0,10	0,25 to 0,60	1,40 to 1,80	0,010	0,010	2,00 to 2,80	0,60	0,30 to 0,65	0,25	0,10	—
N5M3T	0,12	0,40 to 0,90	1,40 to 2,00	0,025	0,025	2,40 to 3,10	—	0,40 to 0,70	0,50	0,02 to 0,30	—
N7M4T	0,12	0,30 to 0,70	1,30 to 1,70	0,025	0,025	3,20 to 3,80	0,30	0,60 to 0,90	0,50	0,02 to 0,30	—

Table 3B (continued)

Symbol (ISO 16834-B)	Chemical composition % (by mass) ^{a,b}										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	
C1M1T	0,02 to 0,15	0,50 to 0,90	1,10 to 1,60	0,025	0,025	—	0,30 to 0,60	0,10 to 0,45	0,40	0,02 to 0,30	
N3C1M4T	0,12	0,35 to 0,75	1,25 to 1,70	0,025	0,025	1,30 to 1,80	0,30 to 0,60	0,50 to 0,75	0,50	0,02 to 0,30	
N4CM2T	0,12	0,20 to 0,60	1,30 to 1,80	0,025	0,025	1,50 to 2,10	0,20 to 0,50	0,30 to 0,60	0,50	0,02 to 0,30	
N4CM21T	0,12	0,20 to 0,70	1,10 to 1,70	0,025	0,025	1,80 to 2,30	0,05 to 0,35	0,25 to 0,60	0,50	0,02 to 0,30	
N4CM22T	0,12	0,65 to 0,95	1,90 to 2,40	0,025	0,025	2,00 to 2,30	0,10 to 0,30	0,35 to 0,55	0,50	0,02 to 0,30	
N5CM3T	0,12	0,20 to 0,70	1,10 to 1,70	0,025	0,025	2,40 to 2,90	0,05 to 0,35	0,35 to 0,70	0,50	0,02 to 0,30	
N5C1M3T	0,12	0,40 to 0,90	1,40 to 2,00	0,025	0,025	2,40 to 3,00	0,40 to 0,60	0,40 to 0,70	0,50	0,02 to 0,30	
N6CM2T	0,12	0,30 to 0,60	1,50 to 1,80	0,025	0,025	2,80 to 3,00	0,05 to 0,30	0,25 to 0,50	0,50	0,02 to 0,30	
N6C1M4	0,12	0,25	0,90 to 1,40	0,025	0,025	2,65 to 3,15	0,20 to 0,50	0,55 to 0,85	0,50	—	
N6C2M2T	0,12	0,20 to 0,50	1,50 to 1,90	0,025	0,025	2,50 to 3,10	0,70 to 1,00	0,30 to 0,60	0,50	0,02 to 0,30	
N6C2M4	0,12	0,40 to 0,60	1,80 to 2,00	0,025	0,025	2,80 to 3,00	1,00 to 1,20	0,50 to 0,80	0,50	0,04	
N6CM3T	0,12	0,30 to 0,70	1,20 to 1,50	0,025	0,025	2,70 to 3,30	0,10 to 0,35	0,40 to 0,65	0,50	0,02 to 0,30	
G ^f	Any agreed analysis not specified in this International Standard										

a The filler metal shall be analysed for the specific elements for which values are shown in this table. If the presence of other elements is indicated in the course of this work, the amount of these elements shall be determined to ensure that their total (excluding iron) does not exceed 0,50 % (by mass).

b Single values are maximum values.

c V 0,05 % (by mass), Zr 0,10 % (by mass), Al 0,10 % (by mass).

d V 0,04 % (by mass), Zr 0,10 % (by mass), Al 0,10 % (by mass).

e V 0,03 % (by mass), Zr 0,10 % (by mass), Al 0,10 % (by mass).

f Consumables for which the chemical composition is not listed in this table shall be symbolized similarly and prefixed by the letter G. The chemical composition ranges are not specified and therefore it is possible that two electrodes with the same G classification are not interchangeable.

Certifikat čelika API 5L X80

Page 1 of 2
 Date 08-07-2009
 www.voestalpine.com/grobblech

A02
Inspection certificate
 EN 10204 - 3.1

voestalpine Grobblech GmbH

A03 Document number	Q0346281	A08 Order-No.	9533654	A07 Orderfile	02-06-2009	Date of dispatch	25-06-2009	4D
A06 Customer	Drugi Dan d.o.o. A. Starcevića 5 HR-44000 ŠIBAK	B01 Product	Plate					
A07 OrderNo.	037-2009	B02 Material	X80M PSL2					
A06 Consignee	Drugi Dan d.o.o. A. Starcevića 5 HR-44000 ŠIBAK	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		B08 Piece		B12 Gross		B13 A09 Net disp-No		Sachnummer	
Heat No.	133081/1	Items	10	Thickness	10,00	Width	2000,0	Length	6000	mm	mm	kg	136 42
Sum													978 64037
C70 - Method of steelmaking: pure oxygen blown													978

Chemical composition (Heat analysis)

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

C09 - Supplementary information
 Cae: C+(Mn/6)+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15
 Pcm: C+((Mn+Cu+Cr)/20)+(Si/30)+(Nb/50)+(Mo/15)+(V/10)+(B*5)

Z02 Inspection representative voestalpine Grobblech
 Rainier
voestalpine
 ONE STEP AHEAD.

Atest dodatnog materijala

ELEKTRODA ZAGREB d.d.

Tvornica dodatnih materijala za zavarivanje
 Ruševje 7, 10290 Zaprešić, Hrvatska
 IBAN: HR1323600001101228817, SWIFT Code: ZABHR2X Zagrebačka banka d.d.
 IBAN: HR4225030071100083729, SWIFT Code: VBCRHR22 Sberbank d.d.
 Matični broj: 3218066 OIB: 99516156261



Tvornička svjedodžba Br: 001339

Test report

HRN EN 10204-2.2

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

IVANA LUČIĆA 5
 10000 ZAGREB
 HRVATSKA

Zaprešić: 31/05/2016

Proizvod: ELEKTRODE

Product: ELECTRODES

Otpremnica br.: 001339

Delivery note:

Tehnički uvjeti isporuke: HRN EN ISO 544

Terms of delivery:

Šifra kupca: 10177

M.Br.: 32765463276546

MEHANIČKA SVOJSTVA METALA ZAVARA MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL

Br. Naziv proizvoda	Proizvodnja broj	Oznaka	Granica razvl.	Vlačna čvrst.	Istezanje	Udarni rad loma	Tvrdoća
No. Trade name	Batch No.	Designation	Yield strength	Tensile strengt	Elongation	Impact energy	Hardness
			(N/mm ²)	(N/mm ²)	A ₅ (%)	ISO -V(J)	
01 EZ-SG 100 1,2 S-S ŽIČANI	371386	9 4 M Mn3NiCrM	>690	750-940	>20	>47 (-40°C)	-
02 EZ-SG 120 1,2 S-S ŽIČANI	457756	9 6 M Mn4Ni2Cr	>890	940-1180	>20	>47	-

KEMIJSKI SASTAV CHEMICAL COMPOSITION

Br. Naziv proizvoda	Proizvodnja broj	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Mg	Al	Zn	Ostalo
No. Trade name	Batch No.	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	ther
(%)													
01 EZ-SG 100 1,2 S-S ŽIČANI	371386	0,12	1,3-1,8	0,4-0,7	0,2-0,4	2-1,	2-0,	<0,3	-	-	-	-	-
02 EZ-SG 120 1,2 S-S ŽIČANI	457756	0,1	1,8	0,8	0,35	2,0	0,5	-	-	-	-	-	-

Potvrđujemo da gore navedeni materijal zadovoljava uvjete narudžbe.

We hereby certify that material described above complies with the terms of order.

Ovaj dokument ispostavljen je računalom i vrijedi bez potpisa.

This document is prepared by computer and valid without signature.

Odjel kontrole i razvoja proizvoda
 Quality Control and Development Department

Tel.: +385 1 3477 444; Fax.: +385 1 3477 492 E-mail: elektroda@ezg.hr www.ezg.hr
 Registered in the Commercial court in Zagreb; MBS 080094507; Founding paid-up capital : 25.163.700,00 kn;
 Total number of issued shares 83.879 nominal value 300 kn; CEO: Hrvoje Leinert; Chairman of the Supervisory board: Ružica Vadić

