

Analiza mikrostrukture zavarenog spoja čelika S690QL1 načinjenog REL postupkom

Mijatović, Mirjam

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:669602>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mirjam Mijatović

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Studentica:

Mirjam Mijatović

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na stručnoj pomoći i susretljivosti te asistentici dr.sc. Maji Remenar na pristupačnosti i savjetima tijekom pisanja ovog rada.

Veliku zahvalu upućujem svojoj obitelji koja mi je bila podrška tijekom cijelog studija.

Mirjam Mijatović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIRJAM MIJATOVIĆ** Mat. br.: 0035209789

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mikrostrukture zavarenog spoja čelika S690QL1 načinjenog REL postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of weld microstructure at S690QL1 steel made by MMAW process**

Opis zadatka:

U teorijskom djelu detaljno analizirati svojstva i zavarljivost čelika S690QL1 te navesti tipične primjere primjene s posebnim naglaskom na cjevovode. Opisati specifičnosti REL postupka kao i odabir dodatnih materijala za čelike visoke čvrstoće te dati osvrt na mogućnost provedbe reparaturnih zavarivanja. Proučiti mehanizme nastanka pukotina kod čelika S690QL1 i posebno istražiti osjetljivost pojedinih mikrostrukturnih faza na pojavu hladnih pukotina.

U eksperimentalnom dijelu na uzorcima materijala S690QL1 na kojima je provedeno reparaturno zavarivanje detaljno analizirati tehnologiju i ispitati makrostrukturu zavara. Odrediti kritična područja te na tim lokacijama provesti analizu mikrostrukture kao i mjerenje mikrotvrdoća. Odrediti prisutnost pojedinih mikrostrukturnih faza i ocijeniti prikladnost provedene tehnologije reparaturnog zavarivanja. Predložiti alternativnu tehnologiju reparaturnog zavarivanja s kojim se minimalizira mogućnost nastanka pukotina te dati smjernice za provedbu u realnim uvjetima.

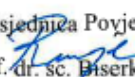
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc.  Ivo Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc.  Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA	5
POPIS KRATICA	6
SAŽETAK.....	7
SUMMARY	8
1. UVOD.....	9
2. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE	10
2.1. Procesi povišenja čvrstoće čelika.....	11
2.2. Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće [7]	13
2.3. Poboļšani sitnozrnati čelici	14
2.3.1. Toplinska obrada poboļšanih sitnozrnatih čelika.....	14
3. SITNOZRNATI POBOLJŠANI ČELIK S690QL1	16
3.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva.....	16
3.2. Mikrostruktura S690QL1 čelika	17
3.2.1. Strukture koje se pojavljuju u S690QL1 čeliku [9,10]	17
4. ZAVARLJIVOST S690QL1 ČELIKA	18
4.1. Mikrostruktura i svojstva u zoni utjecaja topline.....	19
4.1.1. Pojava hladnih pukotina pri zavarivanju sitnozrnatih čelika	20
4.2. Toplinska obrada kod zavarivanja	21
5. REL POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	26
5.1. Prednosti i nedostaci REL zavarivanja	27
5.2. Parametri zavarivanja.....	27
5.3. Dodatni materijal za zavarivanje.....	29
5.4. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće	32
6. EKSPERIMENTALNI DIO	35
6.1. Osnovni i dodatni materijal.....	36
6.2. Korištena oprema za zavarivanje	37
6.3. Postupak zavarivanja radnog komada.....	40
6.4. Simulacija reparaturnih zavarivanja.....	40
6.4.1. Prvi popravak	40
6.4.2. Drugi popravak	42
6.5. Izrezivanje epruveta i mehanička ispitivanja	44
6.5.1. Ispitivanje savijanjem	44
6.5.2. Statičko vlačno ispitivanje	45
6.5.3. Ispitivanje udarnog rada loma.....	46
6.5.4. Makroanaliza.....	47
6.5.5. Ispitivanje tvrdoće.....	48

6.5.6. Ispitivanje mikrotvrdoće	49
6.5.7. Mikroanaliza	50
6.5.8. Mjerenje zaostalih naprezanja.....	54
6.6. Nerazorna ispitivanja	58
6.7. Alternativna tehnologija reparaturnog zavarivanja.....	59
7. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Podjela čelika povišene čvrstoće [7]	10
Slika 2.	Postupak precipitacijskog očvrnuća [7]	12
Slika 3.	Mikrostruktura sitnozrnatog čelika [7]	13
Slika 4.	Dijagram postupka poboljšavanja čelika [5]	15
Slika 5.	Utjecaj unosa topline na strukturu zavara [3]	19
Slika 6.	Hladne pukotine [15]	20
Slika 7.	Zadovoljavajuće udaljenosti materijala koji se zavaruju [16]	21
Slika 8.	Ovisnost unosa topline o debljini materijala [8]	22
Slika 9.	TTT dijagram mikrolegiranog čelika [17]	23
Slika 10.	Utjecaj vremena hlađenja na tvrdoću i prijelaznu temperaturu [17]	24
Slika 11.	Vrijeme $t_{8/5}$ ovisno o promjeni temperature [16]	24
Slika 12.	„Jarak tvrdoće“ čelika S1300 [18]	25
Slika 13.	Shematski prikaz REL zavarivanja – lijevo, realni prikaz – desno [19]	26
Slika 14.	Utjecaj struje zavarivanja na oblik zavara [20]	28
Slika 15.	Duljina električnog luka [20]	29
Slika 16.	Poprečno gibanje elektroda [19]	29
Slika 17.	Obložena elektroda [3]	30
Slika 18.	Upotreba dodatnog materijala za smanjenje pukotina [11]	34
Slika 19.	Shematski prikaz mjesta zavara i popravka	35
Slika 20.	Transpocket 180 [25]	37
Slika 21.	Mosa TS 400 SC/EL [26]	38
Slika 22.	Analogni snimač temperaturnih grafikona [28]	39
Slika 23.	Skica pripreme i detalji zavarivanja	40
Slika 24.	Shematski prikaz prvog popravka	40
Slika 25.	Shematski prikaz drugog popravka	42
Slika 26.	Izgled radnog komada nakon završene simulacije reparaturnih zavarivanja	42
Slika 27.	Epruvete dobivene rezanjem vodenim mlazom	44
Slika 28.	Shematski prikaz savijanja [29]	44
Slika 29.	Kidalica	45
Slika 30.	Ispitivanje udarnog rada loma	46
Slika 31.	Makroizbrusak	47
Slika 32.	Shematski prikaz mjesta ispitivanja tvrdoće	48
Slika 33.	Grafički prikaz izmjerenih tvrdoća	49
Slika 34.	Grafički prikaz izmjerenih mikrotvrdoća	50
Slika 35.	Lokaliteti izmjerenih mikrostruktura	50
Slika 36.	Nagriženo stanje pri povećanju 50x	51
Slika 37.	Nagriženo stanje pri povećanju 500x	51
Slika 38.	Nagriženo stanje pri povećanju 50x	52
Slika 39.	Nagriženo stanje pri povećanju od 500x	52
Slika 40.	Nagriženo stanje pri povećanju od 50x	53
Slika 41.	Nagriženo stanje pri povećanju od 500x	53
Slika 42.	Uređaj za mjerenje zaostalih naprežanja	54
Slika 43.	Shematski prikaz mjesta ispitivanja zračenjem	55
Slika 44.	Shematski prikaz mjesta ispitivanja zračenjem	56
Slika 45.	Grafički prikaz usporedbe zaostalih naprežanja ovisno o smjeru mjerenja	57
Slika 46.	Debye-Scherrer krug	57
Slika 47.	Grafički prikaz izmjerenog zaostalog naprežanja u jednoj točki	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav S690QL1 čelika [1].....	16
Tablica 2. Mehanička svojstva S690QL1 čelika [1]	16
Tablica 3. Udarni rad loma [1]	16
Tablica 4. Vrijednosti maksimalnog kemijskog ekvivalenta ugljika [8].....	18
Tablica 5. Koeficijenti unesene topline ovisno o postupku zavarivanja [11]	23
Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala	36
Tablica 7. Mehanička svojstva osnovnog materijala.....	36
Tablica 8. Udarni rad loma osnovnog materijala	36
Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala.....	37
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala	37
Tablica 11. Karakteristike korištenog uređaja za zavarivanje [25]	38
Tablica 12. Karakteristike korištenog izvora struje [26].....	39
Tablica 13. Parametri zavarivanja prvog popravka.....	41
Tablica 14. Parametri zavarivanja drugog popravka.....	43
Tablica 15. Statičko vlačno i savojno ispitivanje	45
Tablica 16. Ispitivanje udarnog rada loma	46
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoća na popravku zavara	48
Tablica 18. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoća	49
Tablica 19. Izmjerena zaostala naprezanja s obzirom na smjer zračenja i razmještaj mjerenja	55
Tablica 20. Izmjerena zaostala naprezanja s obzirom na smjer zračenja i razmještaj mjerenja	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A₅</i>	%	Istezanje
<i>CE</i>	-	Ekvivalent ugljika
<i>d</i>	mm	Promjer obložene elektrode
<i>k</i>	-	Koeficijent stvarno unesene topline
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>M_s</i>	°C	Temperatura početka martenzitne pretvorbe
<i>Re</i>	MPa	Granica razvlačenja
<i>Re/Rm</i>	MPa	Plastična rezerva
<i>Rm</i>	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>Rp_{0,2}</i>	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>t_{8/5}</i>	-	Vrijeme hlađenja u temperaturnom intervalu 500 - 800 °C
<i>Q</i>	kJ/mm	Unesena toplina u zavar
<i>U</i>	V	Napon zavarivanja
<i>v</i>	mm/s	Brzina zavarivanja

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
Al	Aluminij
B	Bor
C	Ugljik
Cr	Krom
Cu	Bakar
HSLA	Niskolegirani čelik visoke čvrstoće (eng. High Strength Alloyed steel)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučnozavarivanje (eng. Shielded metal arc welding)
S	Sumpor
Si	Silicij
Ti	Titan
TTT	Vrijeme temperatura transformacija, dijagram izotermne pretvorbe (eng. Time Temperature Transformation)
V	Vanadij
Zr	Cirkonij
ZUT	Zona unosa topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada objašnjene su karakteristike poboljšanih sitnoznatih čelika te detaljno analizirana svojstva i zavarljivost čelika S690QL1. Opisane su specifičnosti REL postupka zavarivanja i mogućnosti reparaturnog zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je reparaturno zavarivanje ploča čelika S690QL1. Detaljno je analizirana mikrostruktura zavara te su provedena razorna i nerazorna ispitivanja zavarenog spoja i simulirane pukotine. Detaljno su analizirani rezultati ispitivanja i doneseni zaključci o ispravnosti odabrane tehnologije zavarivanja te je predložena alternativna tehnologija zavarivanja.

Ključne riječi: S690QL1, REL, reparaturno zavarivanje

SUMMARY

The theoretical part of this thesis explains the characteristics of the microalloyed quenched and tempered steels, also detailed characteristics and weldability of the steel S690QL1 are analysed. The characteristics of the MMAW process and the possibility of repair welding are described. In the experimental part of this thesis, repair welding of the steel plate S690QL1 was carried out. The microstructure of weld was analysed, also destructive and non-destructive testing of weld and simulated cracks were performed. The test results and conclusion reached on the integrity of the chosen welding technology were analysed and alternative welding technology was proposed.

Key words: S690QL1, MMAW, repair welding

1. UVOD

Čelik S690QL1 klasificiran je po normi EN 10137-2:2008 Ploče i široke plohe od konstrukcijskih čelika visoke čvrstoće u uvjetima kaljenja, temperiranja ili precipitacijskog očvršćivanja (Uvjeti isporuke kaljenih i temperiranih čelika) i EN 10025-6:2019 Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika (Tehnički uvjeti isporuke za plosnate proizvode od poboljšanih konstrukcijskih čelika s visokom granicom razvlačenja) [1].

Simbol S označava konstrukcijski čelik, minimalna granica razvlačenja Re iznosi 690 MPa pri debljinama materijala manjim od 50 mm, Q označava stanje isporuke u kaljenom stanju, LI označava žilavost 30 J pri temperaturi do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Čelik S690QL1 spada u grupu poboljšanih sitnozrnatih čelika. Glavna karakteristika ovih čelika su povećane vrijednosti žilavosti i čvrstoće koje se postižu mikrolegiranjem. Postupak mikrolegiranja koristi se kod konstrukcijskih čelika za koje je karakteristična dobra zavarljivost i plastičnost, visoka granica razvlačenja te vrlo mala sklonost krhkom lomu [3].

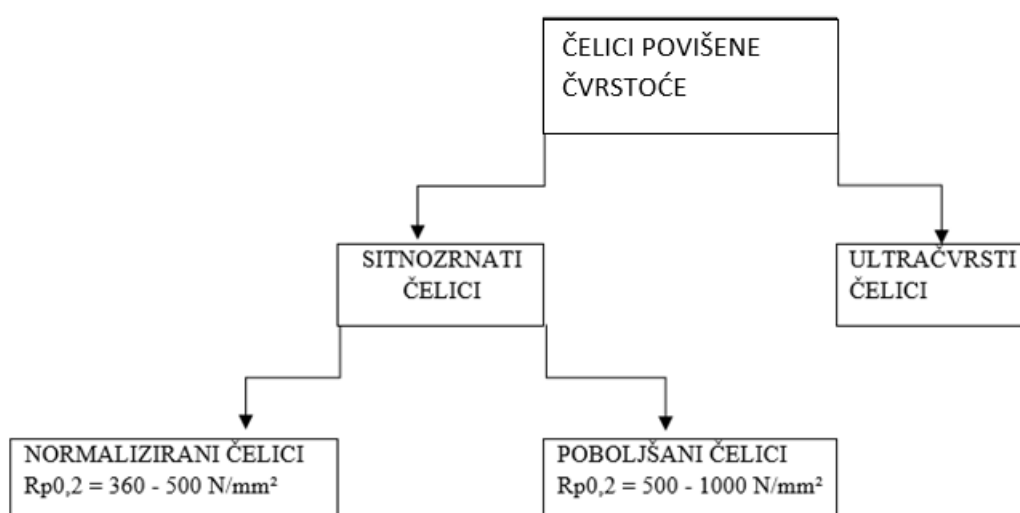
Konstrukcijski čelik S690QL1 primjenjiv je u različitim zavarenim konstrukcijama, npr. čelična konstrukcija mostova, komponente za morske konstrukcije, cijevi elektrane, nosive konstrukcije, transportna vozila, dizalice, oprema za rudarstvo, poljoprivredna oprema i dr. [4]. Mikrostruktura ovog čelika sastoji se od kaljenog martenzita u feritnoj matrici. Nastaje iz precizno definiranih faza i strogo kontroliranog kemijskog sastava čime se postižu iznimno dobra mehanička svojstva. Ova vrsta čelika poznata je pod komercijalnom oznakom WELDOX 700.

2. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE

Čelici povišene čvrstoće pripadaju skupini specijalnih konstrukcijskih čelika, a njihova podjela prikazana je na slici 1. Najčešće se koriste zbog dobrih mehaničkih svojstava i visokih vrijednosti čvrstoće i duktilnosti. Posjeduju i druga bitna svojstva kao što su otpornost na koroziju i postojanost pri povišenim i visokim temperaturama, nisu osjetljivi na umor materijala, potpuno su prokaljivi, imaju nisku prijelaznu temperaturu i zadovoljavajuću zavarljivost zbog niskog udjela ugljika te laku obradljivost odvajanjem čestica i mogućnost toplinske obrade [5].

Čelici povišene čvrstoće dijele se na sitnozrnate i ultračvrste čelike čija je glavna karakteristika visoka vrijednost konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) i homogena sitnozrnata mikrostruktura dobivena posebnim metodama pročišćavanja i pretaljivanja uz termomehaničku i toplinsku obradu [6].

Ovi čelici se razvijaju kako bi se postigle više vrijednosti dopuštenog naprezanja u radu. Visoke vrijednosti vlačne čvrstoće utječu na otpornost krhkom lomu, a postižu se raznim mehanizmima očvrnuća. Zadržavanjem povoljnog omjera R_e/R_m , tj. plastične rezerve, sprječava se iznenadni lom materijala te u slučaju preopterećenja dolazi do plastične deformacije. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci te volumen i masa konstrukcije. Zato se primjenjuju kod konstrukcija koje podnose visoka opterećenja kao što su dijelovi oružja, zrakoplova, vozila, svemirskih letjelica i dr. [5].



Slika 1. Podjela čelika povišene čvrstoće [7]

2.1. Procesi povišenja čvrstoće čelika

Mehanizmi očvršnuća normaliziranih sitnozrnatih čelika su kristalima mješancima, usitnjenjem zrna i dispergiranim česticama. Dok se poboljšani sitnozrnati čelici očvršćuju stvaranjem kristala mješanaca, dispergiranim česticama, usitnjenjem kristalnih zrna i unošenjem novih dislokacija kaljenjem [5].

Procesi povišenja čvrstoće čelika temelje se na otežavanju kretanja dislokacija stvaranjem zapreka. Visokočvrsti čelici mogu se očvrstnuti različitim mehanizmima:

- martenzitnom transformacijom
- precipitacijom
- stvaranjem kristala mješanaca
- hladnom deformacijom
- usitnjenjem kristalnog zrna [5].

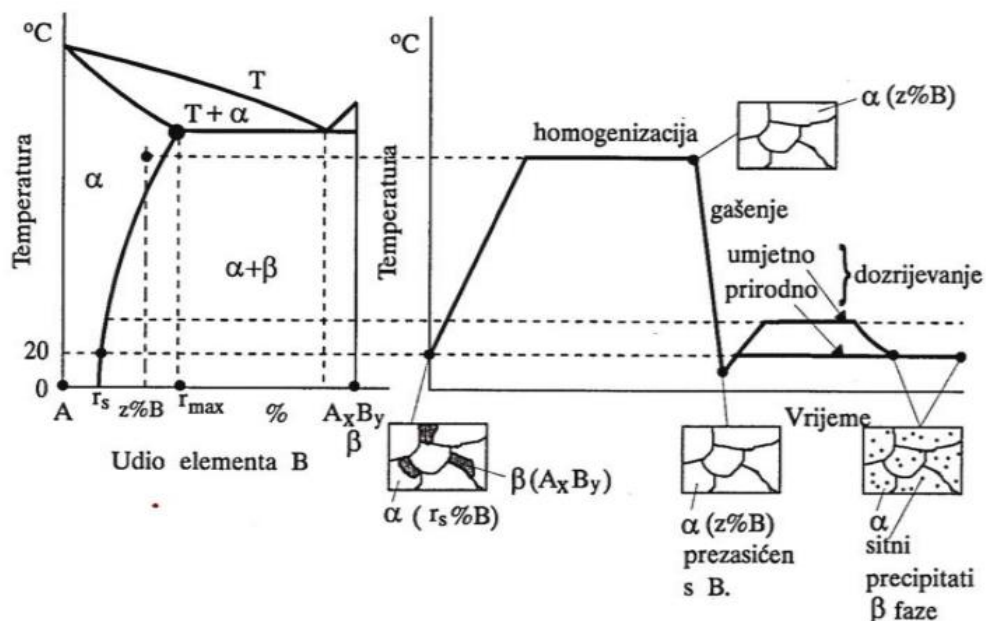
Očvršnuće martenzitnom transformacijom [5]

Kaljenjem dolazi do pretvorbe austenita u martenzit pri čemu rastu vrijednosti čvrstoće i tvrdoće, a padaju vrijednosti istezljivosti i žilavosti. Naknadno se provodi postupak popuštanja kako bi se povisile vrijednosti žilavosti, snizila zaostala naprezanja i postigla dimenzijska postojanost. Stvaraju se točkaste zapreke koje usporavaju kretanje dislokacija.

Očvršnuće precipitacijom [6]

Prostornim zaprekama, karbidnog, nitridnog ili intermetalnog spoja, usporava se kretanje dislokacija. Proces očvršnuća precipitacijom ostvaruje se zagrijavanjem legure na temperaturu homogenizacije, naglim hlađenjem na temperaturu okoliša te dozrijevanjem pri čemu nastaju fino raspršene faze, prikazano na slici 2.

Ovaj mehanizam koristi se kod legura na osnovi aluminijske, titanijске, magnezijске, bakra i dr.



Slika 2. Postupak precipitacijskog očvrnuća [7]

Očvrnuće stvaranjem kristala mješanaca (legiranjem)[5]

Kristali mješanci su kristali legura u kojima atomi otopljenog elementa ulaze u kristalnu rešetku osnovnog materijala. Mogu biti supstitucijski ili intersticijski. Stvaraju se točkaste zapreke kojima se usporava kretanje dislokacija. Ovaj mehanizam je najmanje učinkovit i ekonomski neprihvatljiv zbog velikog udjela legiranih elemenata.

Očvrnuće hladnom deformacijom (unošenjem dislokacija) [5]

Rastom gustoće dislokacija stvaraju se linijske zapreke koje otežavaju kretanje postojećim dislokacijama. Povećanjem gustoće dislokacija smanjuje se žilavost, a raste deformacija i granica elastičnosti.

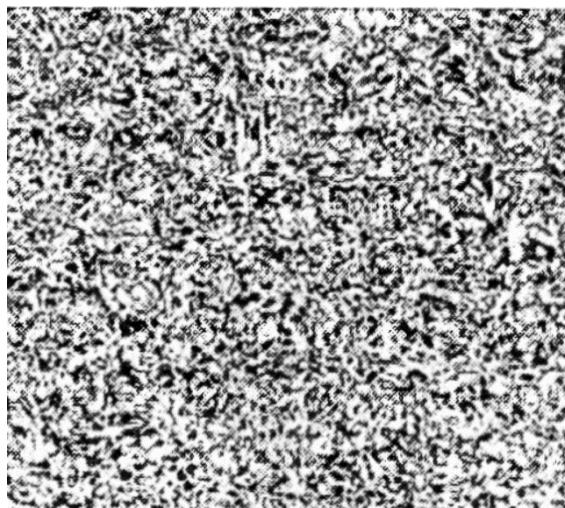
Usitnjenjem kristalnog zrna (granicama zrna)[5]

Ovaj mehanizam najčešće djeluje u kombinaciji s prethodnim mehanizmima. Istovremenim povećavanjem granice elastičnosti i snižavanjem prijelazne temperature stvaraju se površinske zapreke, tj. velikokutne granice zrna, koje kočice gibanje dislokacija. Ovaj mehanizam očvrnuća teži postizanju što sitnijeg zrna.

2.2. Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće [7]

Čelici povišene čvrstoće većinom su mikrolegirani (eng. High Strength Low Alloyed). Normalizirani sitnozrnati čelici umireni su silicijem i aluminijem stoga imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu, prikazano na slici 3. Pojednim kemijskim elementima kao što su titan, vanadij i niobij stvaraju se fino raspršeni karbidi, nitridi i karbonitridi koji usporavaju porast austenitnog zrna te povišuju vrijednosti granice elastičnosti.

Ovi čelici imaju visoku prijelaznu temperaturu, neosjetljivi su na krhki lom i imaju zadovoljavajuću zavarljivost zbog niskog udjela ugljika. Karakteristični su po vrijednostima konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2} = 360 - 500$ MPa). Stoga se primjenjuju kod vijadukta i mostova, postolja vagona, dijelova građevinskih strojeva, rezervoara i spremnika za plin te potpornih platformi za proizvodnju plina i nafte.



Slika 3. Mikrostruktura sitnozrnatog čelika [7]

2.3. Poboljšani sitnozrnati čelici

Poboljšani sitnozrnati čelici sadrže manje od 0,2 % ugljika čime se postižu prihvatljive vrijednosti žilavosti i čvrstoće. Legiraju se kromom, manganom, niklom, molibdenom i kobaltom, a dodatno se još mogu mikrolegirati s borom, cirkonijem, titanom i vanadijem [7].

Postupak mikrolegiranja:

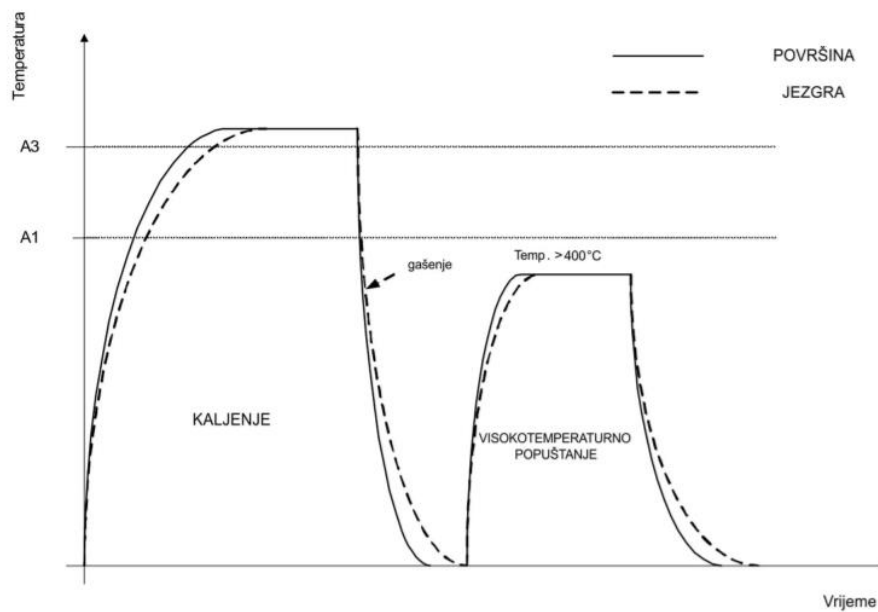
- smanjuje utjecaj debljine čelika što višom prokaljenošću
- nastaje niskougljični martenzit ili donji bainit za vrijeme gašenja
- gašenjem se izbjegava nastanak ferita
- mogućnost nastanka pukotina
- mogućnost snižavanja temperature početka nastanka martenzita i samopopuštanja martenzita
- mogućnost stvaranja sitnijeg zrna [7].

Najčešća primjena ovih čelika su kuglasti spremnici za plinove, brodogradnja (jarbol), izrada mostova, vozila, rotor i kućišta turbina, dizalice, vagoni i dr.

2.3.1. Toplinska obrada poboljšanih sitnozrnatih čelika

Poboljšani sitnozrnati čelici dobivaju se kaljenjem u vodi i dodatnim popuštanjem, prikazano na slici 4. Postupak kaljenja sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja, držanjem na temperaturi austenitizacije te hlađenjem na temperaturu okoliša kako bi se dobila martenzitna mikrostruktura, tj. postigla što veća prokaljenost po presjeku. Naknadno visokotemperaturno popuštanje provodi se na temperaturi 680 – 710 °C kako bi se postigla što veća žilavost. S obzirom na to da je martenzit otporan na krhki lom, temperatura početka njegova nastanka ($M_s \approx 400$ °C) povećava se dodavanjem mikrolegiranih elemenata kako bi se poboljšala žilavost prilikom hlađenja [5].

Cilj je postizanje visokih vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće uz postizanje visokih vrijednosti žilavosti i dinamičke izdržljivosti.



Slika 4. Dijagram postupka poboljšavanja čelika [5]

Razvojem ove vrste čelika potrebno je paziti na:

- dodavanjem dispergiranih čestica dobiva se sitno zrno
- legirnim elementima izbjeći će se prisutnost ferita tijekom hlađenja na zraku
- nakon procesa zavarivanja potrebno je dobiti ista svojstva zone utjecaja topline i osnovnog materijala
- mikrolegiranje omogućuje prokaljivost
- niži udio ugljika poboljšava zavarljivost [5].

3. SITNOZRNATI POBOLJŠANI ČELIK S690QL1

3.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva

Kemijski sastav čelika S690QL1, prema normi EN 10025-6-2004, prikazan je u tablici 1. Sadržaj ugljika ograničen je na 0,20 % kako bi se poboljšala zavarljivost. Dodavanjem malih količina drugih legiranih elemenata poboljšavaju se svojstva čelika, pri čemu treba posebno istaknuti sadržaj niobija i bora koji deoksidiraju čelik i značajno smanjuju veličinu zrna [8].

Tablica 1. Kemijski sastav S690QL1 čelika [1]

C %	Si %	Mn %	Ni %	P %	S %	Cr %	Mo %
0,2 max	0,8 max	1,7 max	2,0 max	0,02 max	0,01 max	1,5 max	0,7 max
V %	N %	Nb %	Ti %	Cu %	Zr %	B %	Al %
0,12 max	0,015 max	0,06 max	0,05 max	0,5 max	0,15 max	0,005 max	0,018 max

Ovisnost mehaničkih svojstava čelika S690QL1 o debljini materijala, prema normi EN 10025 - 6-2004, prikazana je u tablici 2. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi, prema normi EN 10025-6-2004, prikazana je u tablici 3. Glavna karakteristika ovog materijala je pojava visokih vrijednosti udarnog rada loma pri niskim temperaturama.

Tablica 2. Mehanička svojstva S690QL1 čelika [1]

Debljina materijala, mm	Granica razvlačenja R_e , MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje pri lomu A_5 , %
≤ 50	690	770 - 940	14
$> 50 \leq 100$	650	760 - 930	14
$> 100 \leq 150$	630	710 - 900	14

Tablica 3. Udarni rad loma [1]

Pozicija uzorka	0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C
Uzdužno	60 J	50 J	40 J	30 J
Poprečno	40 J	35 J	30 J	27 J

3.2. Mikrostruktura S690QL1 čelika

Mikrostruktura S690QL1 čelika sastoji se od sitnozrnate martenzitno bainitne strukture, a pripada skupini niskolegiranih čelika visoke čvrstoće (engl. High Strength Low Alloyed steel – HSLA) . Prilikom zavarivanja debljih presjeka potrebno je pridržavanje točnih uputa i preporuka za izbor optimalne tehnologije zavarivanja. Ovi čelici pripadaju skupini niskolegiranih čelika i skloni su pojavi hladnih pukotina koje je moguće izbjeći kontroliranim unosom topline [8].

3.2.1. *Strukture koje se pojavljuju u S690QL1 čeliku* [9,10]

Najbitnija struktura koja utječe na zadovoljavajuća svojstva analiziranog čelika je martenzit. Ugrijavanjem materijala na temperaturu austenitizacije, tj. u područje austenita te brzim hlađenjem započinje stvaranje martenzita. Opisana struktura omogućava visoke vrijednosti tvrdoće i čvrstoće materijala, ali nisku duktilnost i krhkost. Građa i oblik kristala martenzitnih struktura ovise o temperaturi i udjelu ugljika.

Pri hlađenju čelika na sobnu temperaturu prestaje martenzitna pretvorba i pojavljuje se zaostali austenit. Količina zaostalog austenita povećava se višim vrijednostima udjela ugljika u osnovnom materijalu, tako će niskougljični čelici imati neznatne vrijednosti zaostalog austenita. Poželjno je postići što manje količine zaostalog austenita jer otežava obradivost brušenjem i smanjuje vrijednosti čvrstoće i tvrdoće.

Druga struktura prisutna u analiziranom čeliku je bainit. Ova struktura postiže se međufaznom transformacijom, a sastoji se od cementita i ferita. Bainitna struktura ima niže tvrdoće od martenzita, ali su joj više vrijednosti tvrdoća od perlita. Mehanička svojstva, tj. postizanje gornjeg ili donjeg bainita ovise o temperaturi pretvorbe. Tako pri višim temperaturama nastaje gornji bainit kojeg karakterizira smanjenje plastičnosti materijala, a pri nižim temperaturama pojavljuje se donji bainit koji utječe na zadovoljavajuća mehanička svojstva žilavost i plastičnost.

4. ZAVARLJIVOST S690QL1 ČELIKA

Zavarljivost je postupak dobivanja homogenog zavara koji ima dobra mehanička svojstva. Kod mikrolegiranih čelika računa se ekvivalent ugljika (CE) prema jednadžbama u tablici 4 gdje se nalaze i maksimalne vrijednosti kemijskog ekvivalenta ugljika. Više vrijednosti ekvivalenta ugljika najčešće zahtijevaju višu temperaturu predgrijavanja i međuprolaznu temperaturu [8,11].

Tablica 4. Vrijednosti maksimalnog kemijskog ekvivalenta ugljika [8]

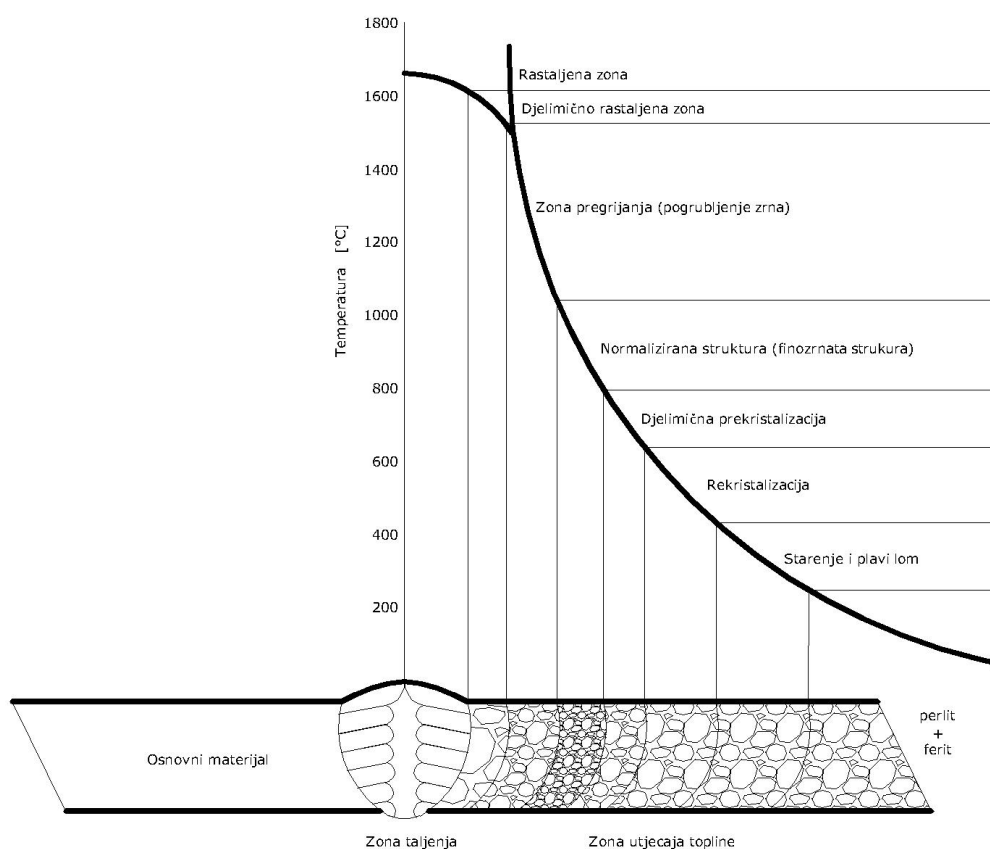
Kemijski ekvivalent ugljika, %		
Debljina materijala, mm	$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$	$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$
8	0,43-0,55	0,29-0,36
20	0,43-0,55	0,29-0,36
30	0,46-0,55	0,31-0,36
60	0,57-0,55	0,35-0,36

Poboljšani sitnozrnati čelici skloni su nastanku hladnih pukotina zato je potrebno posebnu pozornost obratiti na ispravan odabir temperature predgrijavanja i odabir međuprolazne temperature, tj. temperatura hlađenja jednog prolaza i zavarivanja drugog prolaza. Također, potrebno je ispitati mikrostrukture i svojstva u zonama utjecaja topline kako bi se dobila ocjena o zavarljivosti čelika [8].

4.1. Mikrostruktura i svojstva u zoni utjecaja topline

Rezultat postupka zavarivanja je promjena mikrostrukture i formiranje zone utjecaja topline (ZUT) koja se sastoji od nekoliko podzona, prikazano na slici 5. Svaka podzona ima karakterističnu mikrostrukturu i svojstva [12].

Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi uz zonu taljenja koja je podvrgnuta promjenama svojstava materijala kao rezultat izloženosti visokim temperaturama. Određuju je vrijeme i temperatura tijekom zavarivanja u kombinaciji s kemijskim sastavom i debljinom materijala koji se zavaruje. Veličinu zone utjecaja topline uvjetuje toplinska difuzivnost koja ovisi o toplinskoj vodljivosti, gustoći, toplini tvari i količini topline unesenoj u materijal. Materijali koji imaju visoku razinu toplinske difuzivnosti brže prenose varijacije topline i brže se hlade što rezultira smanjenjem širine ZUT – a. Proširenje ZUT – a ovisi o količini primijenjene topline, vremenu izlaganja toplini i svojstvima samog materijala [13,14].



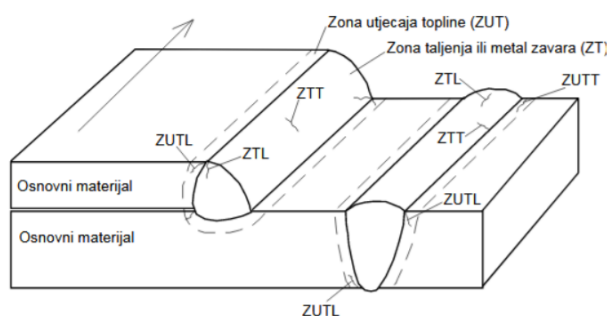
Slika 5. Utjecaj unosa topline na strukturu zavora [3]

4.1.1. Pojava hladnih pukotina pri zavarivanju sitnozrnatih čelika

Hladne pukotine, tj. vodikove pukotine, nastaju pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturi ispod 250 do 200 °C. Dobile su naziv zakašnjele pukotine jer mogu pojaviti i nekoliko dana nakon zavarivanja u zavaru ili zoni utjecaja topline. Na slici 6 prikazane su longitudinalne i transverzalne pukotine kako napreduju dužinom metala zavara ili u zoni utjecaja topline. Teško se otkrivaju stoga ispitivanje penetrantima nije učinkovito već je potrebno koristiti ultrazvučne metode ispitivanja zavara [15].

Hladne pukotine nastaju zbog:

- prisutnosti vodika u zavaru
- djelovanja napreznja
- strukture zavarenog spoja [15].



Slika 6. Hladne pukotine [15]

Rizik od nastanka vodikovih pukotina može se spriječiti smanjenjem sadržaja vodika oko pripremljenog spoja koji se zavaruje i smanjenjem zaostalih napreznja u zavaru [11].

Sadržaj vodika smanjuje se:

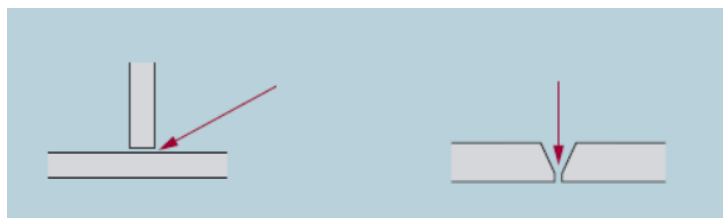
- upotrebom dodatnog materijala s niskom razinom vodika u kemijskom sastavu
- držanjem nečistoća izvan područja zavarivanja
- primjenjivanjem odgovarajuće međuprolazne temperature i temperature predgrijavanja [11].

Interval optimalnih vrijednosti pri odabiru temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature kod upotrebe nelegiranih i niskolegiranih elektroda je između 75 i 100 °C za unos topline 1,7 kJ/mm [11].

Pri zavarivanju istih materijala različitih debljina, materijal s debljom stijenkom određuje temperaturu predgrijavanja i međuprolaznu temperaturu. Kod zavarivanja različitih čelika, temperaturu predgrijavanja i međuprolaznu temperaturu određuje materijal koji zahtjeva veću temperaturu predgrijavanja. Ako je velika prisutnost vlage u zraku ili je temperatura zraka ispod 5 °C, najniže preporučene temperature predgrijavanja povećavaju se za 25 °C [11].

Smanjenje zaostalih naprezanja postiže se:

- upotrebom elektroda koje nemaju veću čvrstoću od propisanih
- paziti na redoslijed zavarivanja
- udaljenost između spoja koji se zavaruje je maksimalno 3 mm, prikazano na slici 7 [11].



Slika 7. Zadovoljavajuće udaljenosti materijala koji se zavaruju [16]

4.2. Toplinska obrada kod zavarivanja

Zavarljivost čelika visoke čvrstoće relativno je dobra. Kako bi se poboljšala zavarljivost potrebne su dodatni postupci kao što su predgrijavanje, kontrolirani unos topline prilikom zavarivanja i naknadna toplinska obrada zavarenog spoja. S obzirom na to da je ova vrsta čelika sklona stvaranju hladnih (vodikovih) pukotina koje nastaju zbog termomehaničke obrade na povišenim temperaturama obavezno se provodi postupak predgrijavanja, pogotovo prilikom zavarivanja debljih presjeka [8].

Temperatura predgrijavanja

Postupak predgrijavanja neophodan je za zavarivanje mikrolegiranih čelika jer produžuje vrijeme hlađenja zone zahvaćene toplinom (ZUT) i uklanja vlagu iz zavarenog spoja. Minimalna temperatura predgrijavanja, po preporuci proizvođača, je 140 °C za debljine presjeka od 10,1 do 20 mm. Temperature iznad 200 °C nisu preporučljive jer mogu utjecati na pogoršanje mehaničkih svojstava [8].

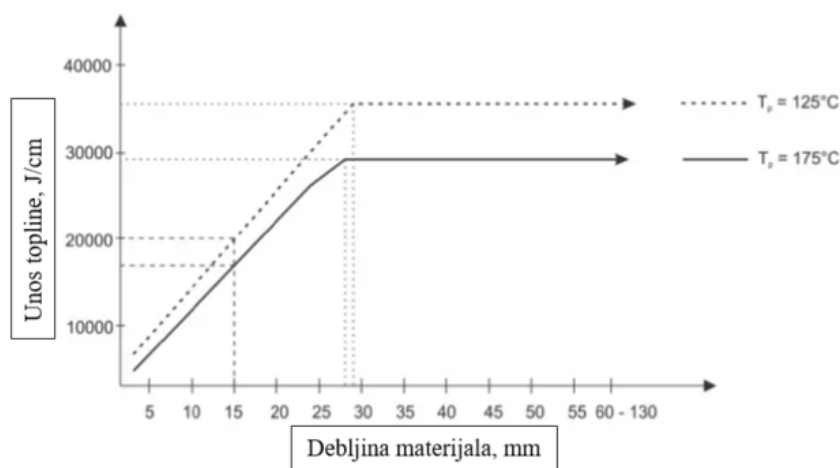
Pri zavarivanju dodatnim materijalima čija konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$ iznosi do 700 MPa, svojstva dodatnog materijala ne utječu na minimalnu temperaturu predgrijavanja.

Zato što je ekvivalent ugljika (CET) osnovnog materijala za 0,03 % veći od zavara metala. Kod elektroda čije vrijednosti $R_{p0,2}$ premašuju 700 MPa treba uzeti u obzir dodatni materijal pri odabiru minimalne temperature predgrijavanja [16].

Postupak predgrijavanja i održavanja međuprolazne temperature postiže se postavljanjem grijaćih elemenata na mjesta oko spoja koji se zavaruje, a iznosi temperatura se prate na monitoru termometra [11].

Unos topline

Unos topline strogo se kontrolira kako bi se očuvala zadovoljavajuća mehanička svojstva, tvrdoća i mikrostruktura pojedinih zona zavarenog spoja. Unos topline ovisi o temperaturi predgrijavanja i debljini presjeka, prikazano na slici 8 [8].



Slika 8. Ovisnost unosa topline o debljini materijala [8]

Optimalna količina unesene topline koja se unosi prilikom zavarivanja računa se pomoću jednadžbe 1:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad (1)$$

gdje je: Q – unesena toplina, kJ/mm

I – jakost struje, A

U – napon, V

v – brzina zavarivanja, mm/min

k – koeficijent stvarno unesene topline [11].

Koeficijenti stvarno unesene topline ovise o postupku zavarivanja te su njihovi iznosi dani u tablici 5. Stupanj iskoristivosti električnog luka određuje se prema normi HRN EN – 1011-1.1998 [11].

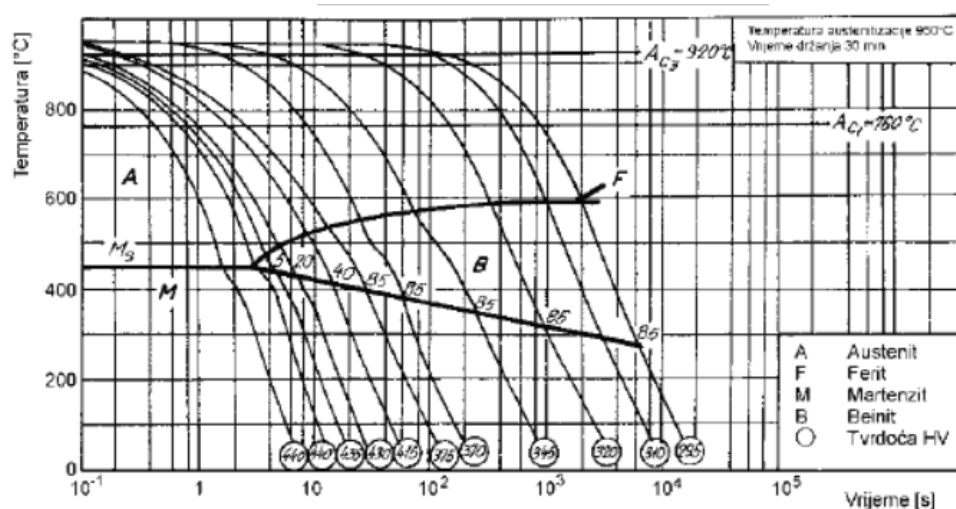
Tablica 5. Koeficijenti unesene topline ovisno o postupku zavarivanja [11]

Postupak zavarivanja	Vrijednosti koeficijenta unesene topline
Podvodno zavarivanje	1,0
REL	0,8
MAG	0,8
TIG	0,6

Povećane vrijednosti unosa topline daju bolju produktivnost kod konvencionalnih metoda zavarivanja. Dok niže vrijednosti unosa topline povećavaju čvrstoću, reduciraju deformaciju materijala, smanjuju zaostala naprezanja, poboljšavaju žilavost i sužavaju područje ZUT [11].

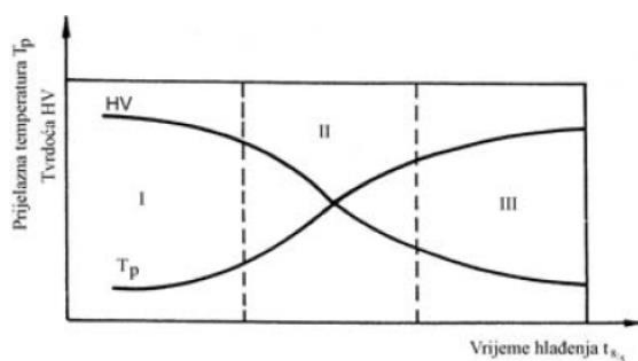
Postupak dodatne toplinske obrade

Kada temperatura predgrijavanja padne ispod 100 °C ponekad je potrebno primijeniti dodatnu toplinsku obradu, tj. sporo hlađenje, kako bi se produžilo vrijeme hlađenja u temperaturnom intervalu od 800 do 500 °C ($t_{8/5}$) gdje većinom dolazi do pretvorbi u čeliku što utječe na svojstva. Vrijednosti $t_{8/5}$ iščitavaju se iz TTT dijagrama, prikazan na slici 9, na temelju kojih se donose zaključci o tvrdoći i strukturi koja nastaje prilikom hlađenja zavara [8,17].



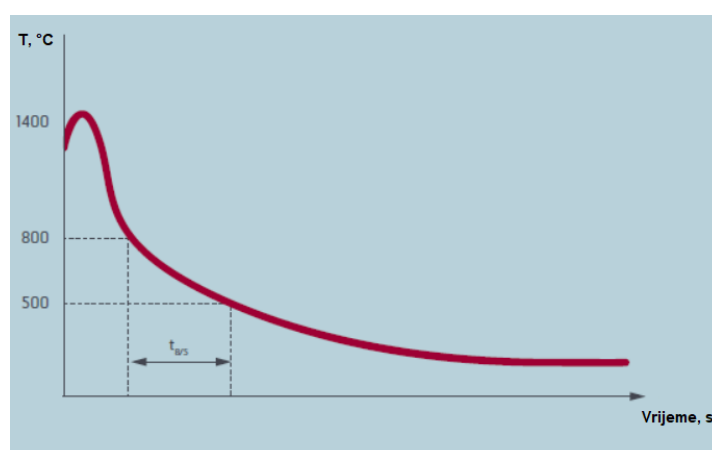
Slika 9. TTT dijagram mikrolegiranog čelika [17]

TTT dijagrami koriste se orijentacijski jer temperatura austenitizacije zavara nije konstantna kao u dijagramu. Postupak dodatne toplinske obrade podrazumijeva držanje zavarenog dijela jedan sat na 150 °C svakih 10 mm debljine presjeka i polako hlađenje. Mikrolegirane čelike potrebno je hladiti 10 – 30 s, tako se smanjuju zaostala naprezanja u zavaru i dobiva se povoljnija mikrostruktura u zoni unosa topline. Vrijeme hlađenja se ograničava kako bi se smanjila žilavost i spriječio nastanak zakaljene strukture, prikazano na slici 10. Odabir vremena hlađenja mikrolegiranog čelika odgovara području II na slici čime se izbjegava nastanak hladnih pukotina (područje I) i niske vrijednosti žilavosti (područje III) [8,17].



Slika 10. Utjecaj vremena hlađenja na tvrdoću i prijelaznu temperaturu [17]

Parametar $t_{8/5}$ konstantan je dok temperatura ne poprimi vrijednosti iznad 900 °C što je vidljivo na slici 11. Vrijeme $t_{8/5}$ kod čelika S690QL1 pri -40 °C i udarnom radu loma od 27 J, iznosi 5 do 20 sekundi [16].

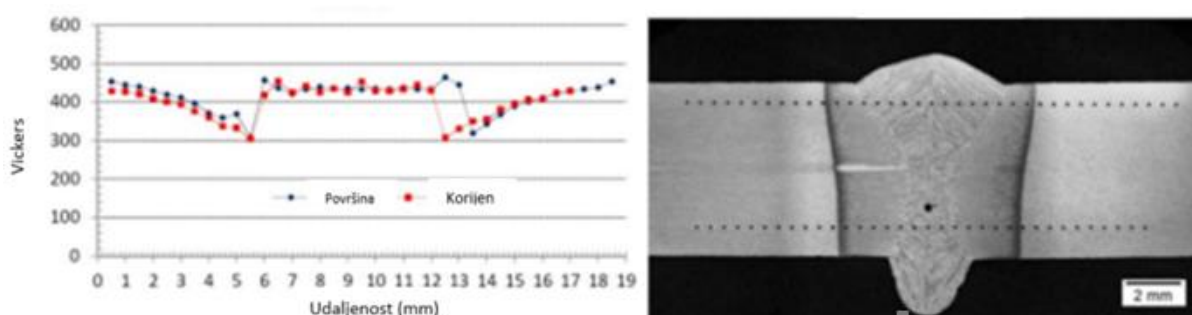


Slika 11. Vrijeme $t_{8/5}$ ovisno o promjeni temperature [16]

Važno je smanjiti neizbježan pad tvrdoće (tzv. jarak tvrdoće) u ZUT-u tako da se:

- spriječi stvaranje krhkih i tvrdih faza što se postiže izbjegavanjem preniskih vrijednosti $t_{8/5}$
- spriječi stvaranje ferita u zavaru koji uzrokuje nastanak pukotina što se postiže previsokim vrijednostima $t_{8/5}$
- smanji pad tvrdoće u ZUT-u koji se u procesu zavarivanja pojavljuje pri temperaturi između temperature A1 i temperature popuštanja (tzv. jarak tvrdoće) [18].

Raspodjela tvrdoće u zoni utjecaja topline ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje te unosu topline. Što je viša čvrstoća zavara veće su vrijednosti tvrdoće, a čvrstoća zavara ovisi o korištenoj elektrodi. Nije moguće u potpunosti izbjeći „jarak tvrdoće“, ali se može utjecati na njegovu geometriju. Manjim unosom topline smanjuje se širina „jarka tvrdoće“, a otpornost na popuštanje utječe na smanjenje njegove dubine [18]. Na slici 12 prikazan je „jarak tvrdoće“ na čeliku S1300 koji je nastao zbog preniske vrijednosti $t_{8/5}$.

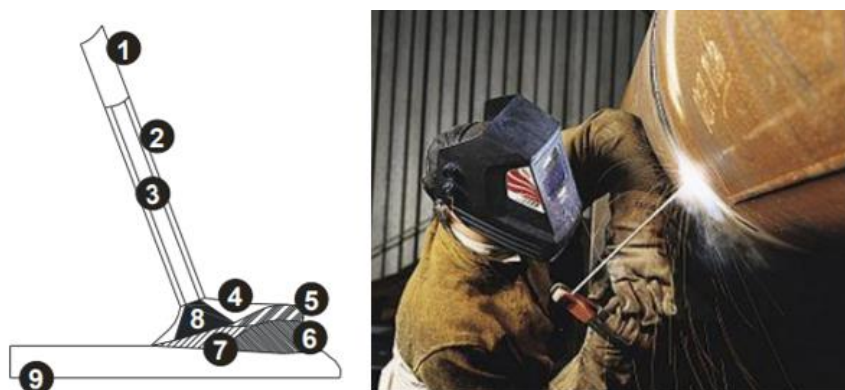


Slika 12. „Jarak tvrdoće“ čelika S1300 [18]

5. REL POSTUPAK ZAVARIVANJA

Ručni elektro-lučni postupak zavarivanja (REL) najstariji je postupak zavarivanja s električnim lukom te ujedno i najznačajniji postupak zavarivanja konstrukcija od čelika. Ovaj postupak zavarivanja koristi se u proizvodnji malih serija, u teškim uvjetima rada, kod reparaturnog zavarivanja i zavarivanja kratkih zavara čija debljina stijenke kod sučeonih zavara ne prelazi 15 mm te kod kutnih spojeva koji ne zahtijevaju dublje prodiranje u korijenu zavara.

Električni luk postiže se uspostavom kratkog spoja između dodatnog materijala, tj. obložene elektrode i osnovnog materijala. Električni luk postiže se električnom energijom dobivenom iz ispravljača, transformatora ili invertera. Prolaskom elektrode kroz električni luk iznad rastaljene kapi elektrode stvara se troska i zaštitni plinovi koji utječu na brzinu hlađenja tekućeg metala elektrode i njegovu kristalizaciju. Rastaljeni dodatni materijal usmjerava se prema osnovnom materijalu vrhom elektrode što omogućuje taljenje obloge elektrode od jezgre prema van. Zavareni spoj nastaje kontinuiranim dodavanjem elektrode, a postupak dobivanja zavarenog spoja REL zavarivanjem shematski je prikazan na slici 13 [19].



Slika 13. Shematski prikaz REL zavarivanja – lijevo, realni prikaz – desno [19]

Gdje je:

- 1 – obložena elektroda
- 2 – obloga
- 3 – žica
- 4 – zaštitni plin
- 5 – troska
- 6 – metal zavara
- 7 – rastaljeni metal
- 8 – električni luk
- 9 – osnovni materijal.

5.1. Prednosti i nedostaci REL zavarivanja

Prednosti zavarivanja REL postupkom:

- pogodan za zavarivanje u svim položajima
- jednostavno rukovanje opremom
- pogodan za terenski rad i teže radne uvjete
- zavareni spoj ima dobra mehanička svojstva
- pogodan za maloserijsku proizvodnju i reparaturna zavarivanja
- veliki izbor dodatnih materijala
- jeftiniji uređaji za zavarivanje u odnosu na druge postupke zavarivanja [19].

Nedostaci zavarivanja REL postupkom:

- zdravlje zavarivača je ugroženo zbog bljeskanja i štetnih plinova koji nastaju prilikom zavarivanja
- ne može se izbjeći otpad elektrode (8 – 10 %)
- mala produktivnost i brzina zavarivanja
- kvaliteta zavarenog spoja ovisi o iskustvu zavarivača koje se stječe godinama
- čišćenje troske usporava proces zavarivanja
- rasprskavanjem se gubi materijal [19].

5.2. Parametri zavarivanja

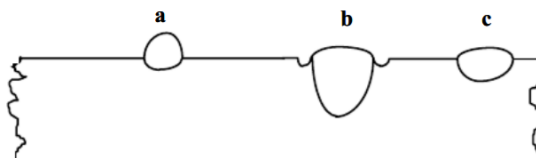
Osnovni parametri REL postupka zavarivanja su: vrsta, jakost i polaritet struje, uspostava, prekid i dužina električnog luka, brzina zavarivanja, nagib i poprečno gibanje obložene elektrode i položaj zavarivanja.

Vrsta i polaritet struje

Ovise o oblozi elektrode. Bazične elektrode zahtijevaju istosmjerni izvor električne struje i priključuju se na (+) pol. Pretežno se istosmjernom strujom, tj. pretvaračima i ispravljačima, dobro zavaruju sve vrste elektroda. U slučaju izmjeničnog izvora struje, tj. transformatora, odabiru se elektrode s kiselom i rutilnom oblogom [19,20].

Jakost struje zavarivanja

Ovisi o tipu i promjeru obložene elektrode, debljini i vrsti osnovnog materijala, položaju zavarivanja i kemijskom sastavu elektrode. Određuje se iskustvom i preporukama proizvođača. Jakost struje moguće je povećati: elektrodama većih dimenzija jer je za njihovo taljenje potrebna veća količina topline ili korištenjem visokoproduktivnih elektroda. Uobičajene vrijednosti jakosti struje kod REL postupka zavarivanja iznose od 30 do 40 A x d, gdje je d promjer obložene elektrode u mm, tj. kod prisilnih položaja zavarivanja vrijednost je 15 do 20 % manja od izračunate. Kod bazičnih elektroda električni luk je kraći zbog teže ionizacije što uzrokuje obloga elektrode. Krivi odabir jakosti struje rezultira promjenom oblika zavara i dubine penetracije. Na slici 14 prikazano je kakav utjecaj struja zavarivanja ima na oblik zavara, gdje je a (premala struja zavarivanja), b (prevelika struja zavarivanja) i c (odgovarajuća struja zavarivanja). U slučaju premale jakosti struje zavar je uzak i ima nadvišen oblik, zbog nedovoljnog zagrijavanja osnovnog materijala penetracija je mala. Prejaka jakost struje uzrokuje preveliku penetraciju i protaljivanje osnovnog materijala pri čemu nastaje širok razliven zavar. Odgovarajućom strujom zavarivanja postiže se blagi prijelaz prema osnovnom materijalu i zadovoljavajuća penetracija s malim nadvišenjem zavarenog spoja [19,20].



Slika 14. Utjecaj struje zavarivanja na oblik zavara [20]

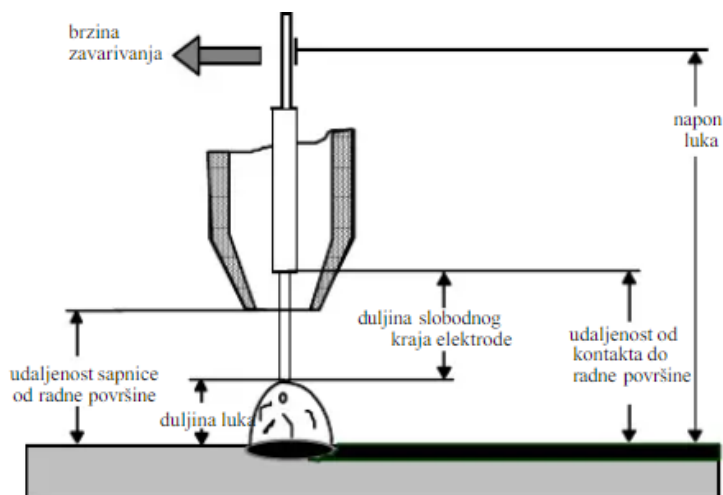
Brzinu zavarivanja

Određuje količina topline koju je dopušteno unijeti u osnovni materijal. Veće brzine zavarivanja postižu se elektrodama s rutilnim i kiselim oblogama [19].

Električni luk

Uspostavlja se kratkim spojem ili povlačenjem elektrode, a prekida se prelaskom elektrode na trosku ili podizanjem elektrode iznad kraja zavara. Duljinu električnog luka određuje napon luka, a ovisi o promjeru elektrode i tipu obloge. Kod elektroda s rutilnim, celuloznim i kiselim oblogama duljina električnog luka približno odgovara promjeru elektrode, dok kod elektroda s bazičnom oblogom duljina približno odgovara polovini promjera elektrode. Veći nagib elektrode povećava električni luk, dok kraći električni luk ima dublje prodiranje i veću snagu.

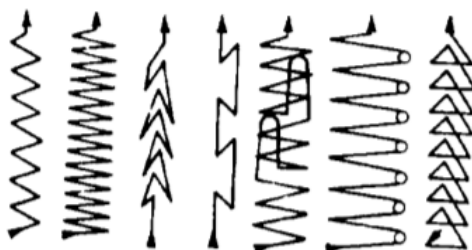
Napon električnog luka pri zavarivanju varira od 18 do 35 V [19,20]. Na slici 15 nalazi se shematski prikaz osnovnih parametara zavarivanja i jasno su prikazani duljina i napon električnog luka.



Slika 15. Duljina električnog luka [20]

Nagib elektrode i poprečno gibanje

Pravilnim nagibom elektrode i poprečnim gibanjem elektrode (gibanje okomito na smjer zavarivanja – njihanje) utječe se na oblik zavara. Moguća poprečna kretanja elektrode prikazana su na slici 16, ovisno o uvjetima rada i zahtjevima zavara [19].



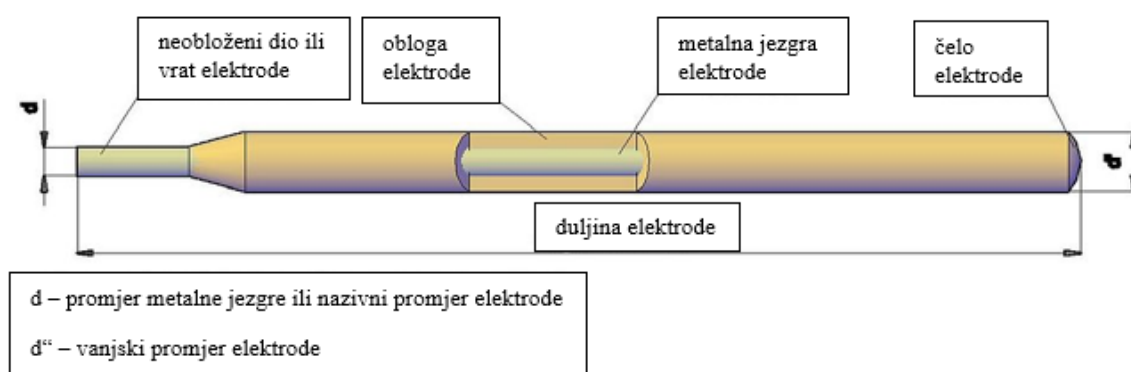
Slika 16. Poprečno gibanje elektroda [19]

5.3. Dodatni materijal za zavarivanje

Glavni kriteriji za odabir dodatnog materijala prilikom zavarivanja su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i udarni rad loma zavara metala. Mikrolegirani čelici povećane čvrstoće osjetljivi su na stvaranje hladnih pukotina stoga dodatni materijal sadrži legirne elemente koji uz poboljšavanje svojstava zavara, smanjuju sklonost nastanku hladnih pukotina. Legirni elementi koji se najčešće koriste su nikal, krom, mangan i molibden [21].

Dodatni materijal za zavarivanje najčešće se bira prema osnovnom materijalu, tj. prema metodi zavarivanja i parametrima zavarivanja te poziciji koju zavarujemo. Preporučljivo je koristiti dodatni materijal s malim udjelom vodika kako bi se izbjegle hladne pukotine. Zatim, predgrijavanje i naknadno zavarivanje spojeva povoljno utječu na kvalitetu spoja koja najviše ovisi o načinu zavarivanja i iskustvu osobe koja zavaruje [22].

Dodatni materijal u postupku ručnog elektroćnog zavarivanja je obložena elektroda koja se sastoji od obloge i metalne jezgre (žica ili šipka), prikazano na slici 17.



Slika 17. Obložena elektroda [3]

Elektrode koje se primjenjuju za zavarivanje visokolegiranih čelika koriste žicu od kemijskog sastava koji odgovara zavarenom spoju, a legiranje iz obloge je minimalno. Elektrode za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika sadrže žicu od niskougličnog čelika ($< 0,1\% \text{ C}$, što manji udio P i S), a sva su legiranja iz obloge elektrode [19].

Obloga elektrode ima više funkcija, a kemijski sastav obloge elektrode sadrži više komponenti:

- kemijski elementi prve i druge grupe periodnog sustava elemenata snižavaju prosječni potencijal ionizacije para metala i tako stabiliziraju električni luk
- elementi koji uzrokuju stvaranje plinova
- elementi koji uzrokuju stvaranje troske za vrijeme taljenja elektrode
- vezivni elementi
- metalne komponente koje omogućuju dezoksidaciju zbog velikog afiniteta spajanja s kisikom pri čemu u trosku odlaze nastali oksidi
- metalne komponente koje zamjenjuju legirne elemente [19].

Podjela funkcije obloge elektrode:

- električna funkcija
- metalurška funkcija
- fizikalna funkcija.

Električna funkcija obloge [19]

Omogućava uspostavu i stabilnost električnog luka koju omogućava ionizirana atmosfera između vrha dodatnog materijala i osnovnog materijala. Izmjenični izvor struje može utjecati na stabilnost električnog luka.

Metalurška funkcija obloge [19]

Služi za rafinaciju, legiranje i otplinjavanje. Taljenjem obloge započinje metalurško djelovanje, a smjer i jakost djelovanja ovise o bazičnosti troske koja se može izračunati te se na temelju tih podataka određuje da li je troska kisela, bazična ili neutralna što ima izravan utjecaj na mehanička svojstva zavara. Bazičnost troske ima povoljan utjecaj na legiranje taline preko obloge, ali legirni elementi se teško vežu s kisikom. S druge strane legirni elementi koji se lako vežu s kisikom teško ulaze u talinu, ali omogućuju proces dezoksidacije (otplinjavanja). Bazičnost troske utječe i na proces rafinacije čija je funkcija uklanjanje fosfora i sumpora iz taline. Većom bazičnošću troske udio ovih primjesa će biti manji, tj. prijeći će u trosku.

Zaštitna funkcija obloge [19]

Taljenjem obloge dodatnog materijala stvara se troska koja obavija kapljice taline i tijekom prolaza kapljice kroz električni luk sprječava kontakt taline s kisikom, vodikom i dušikom iz zraka. Troska stvara zaštitni sloj na talini čime se smanjuje brzina ohlađivanja i povoljno utječe na mehanička svojstva.

Podjela obloženih elektroda za REL zavarivanje:

Prema tipu obloge:

- bazična
- celulozna
- kisela
- oksidna
- rutilna i dr.

Prema namjeni:

- elektrode za navarivanje
- elektrode za zavarivanje
- elektrode za rezanje i žlijebljenje.

Prema tehnološkim svojstvima:

- duboko penetrirajuće elektrode
- visokoproduktivne elektrode
- specijalne elektrode.

Prema vrsti osnovnog materijala:

- elektrode za nelegirane i niskolegirane čelike
- elektrode za visokolegirane čelike
- elektrode za zavarivanje obojenih metala
- elektrode za zavarivanje sivog lijeva.

Prema debljini obloge mogu biti tanko, srednje i debelo obložene te je moguća i podjela prema dimenzijama.

5.4. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće

Kriterij čvrstoće ključan je za odabir dodatnog materijala za zavarivanje i njihovih kombinacija, a oslanjaju se na usklađivanje minimalne specifične vlačne čvrstoće dodatnog materijala s istom vrijednosti osnovnog materijala.

Većinom primjena zavarivanja zahtjeva usklađenost čvrstoće dodatnog i osnovnog materijala, tako da je čvrstoća dodatnog materijala jednaka ili viša od čvrstoće osnovnog materijala.

Prilikom zavarivanja čelika visoke čvrstoće, izrade zavara s djelomičnim prodorom i kutnog zavarivanja ekonomičnije je koristiti dodatni materijal čija se čvrstoća ne podudara s osnovnim materijalom, time se poboljšava duktilnost osnovnog metala i smanjuje rizik od pucanja jer se smanjuje koncentracija zaostalih naprezanja u zavaru.

Najbitnije je postići dovoljnu čvrstoću zavara kako bi se osigurao prijenos opterećenja između dva zavarena radna komada.

U pravilu kada se zavaruju različiti metali, čvrstoću dodatnog materijala treba uskladiti s nižom čvrstoćom dvaju osnovnih metala. Na učinkovitost utječe pravilan odabir dodatnog materijala koji ovisi o postupku zavarivanja. Npr. kod MIG/MAG postupka zavarivanja odabir elektrode

kombinira se s odabirom zaštitnog plina, a kod REL postupka zavarivanja veće stope taloženja postižu se elektrodama koje sadrže veliku količinu željeznog praha u premazu [23].

Zahtjevana čvrstoća zavara postiže se jednadžbom. Maksimalno dopušteno opterećenje kod kutnih zavara u obliku T spoja određuje se jednadžbom 2.

$$F = 0,3 \times 0,707 \times \omega \times L \times E_{xx} \quad (2)$$

gdje je: ω – debljina zavara
 E_{xx} – minimalna specifična vlačna čvrstoća dodatnog materijala
 L – duljina zavara
 F – maksimalno dopušteno opterećenje [23].

Primjena elektroda s niskim sadržajem vodika koristi se u slučaju kada je osnovni metal sklon pucanju, pri zavarivanju debelih profila te pri zavarivanju osnovnog materijala koji ima sadržaj legure veći od udjela u mekom čeliku (visokouglični i niskolegirani čelici).

Primjena elektroda s niskim sadržajem vodika preporučuje se:

- kod čelika s lošom zavarljivošću, niskolegiranih čelika, čelika s visokim udjelom ugljika, čelika s visokim udjelom sumpora ili čelika sklonih pucanju
- kada to propisi zahtijevaju
- kada je potrebno visoko taloženje
- pri kompliciranim položajima zavarivanja[24].

Kada se zavaruju čelici visoke čvrstoće s dodatnim materijalom koji se ne podudara u potpunosti s radnim komadom treba paziti da je razina vodika u zavaru prikladna za čelike visoke čvrstoće.

Dodatni materijal klasificiran je oznakama difuzijskog vodika H4, H8, H16, gdje je broj mililitar raspršenog vodika na 100 g zavara (npr. H16 označava 16 ml difuzijskog vodika na 100 g zavara) [24].

Udio vodika treba iznositi 5 ml na 100 g zavarenog metala pri zavarivanju s nelegiranim ili niskolegiranim dodatnim materijalima [11].

Upotrebom dodatnog materijala niske čvrstoće postižu se veće žilavosti zavara i otpornost na pojavu vodikovih pukotina te manja prisutnost zaostalih naprezanja u zavaru. Pri zavarivanju u više prolaza poželjno je koristiti kombinaciju dodatnog materijala različitih tvrdoća. Prvi prolaz i korijen zavaruju se elektrodom s nižom tvrdoćom, a ostatak se zavaruje s elektrodom visoke čvrstoće, prikazano na slici 18. Ovom tehnikom moguće je izbjeći stvaranje zaostalih naprezanja i pojave vodikovih pukotina [11].

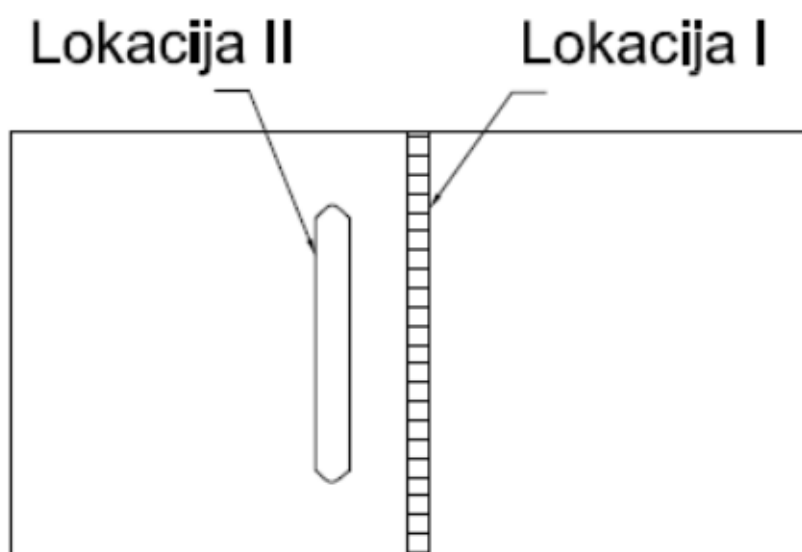


Slika 18. Upotreba dodatnog materijala za smanjenje pukotina [11]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je dvostruko reparaturno zavarivanje osnovnog materijala S690QL1 kako bi se ustanovilo utječe li višestruko zavarivanje na pad mehaničkih svojstava osnovnog materijala i pojavu pukotina nakon zavarivanja.

Ploče dimenzija 700x700x25 mm zavarene su uz V pripremu žlijeba, na lokaciji I. Zatim je dva puta simuliran popravak na lokaciji II, prikazano na slici 19.



Slika 19. Shematski prikaz mjesta zavara i popravka

U eksperimentalnom dijelu opisana su svojstva osnovnog materijala, postupak zavarivanja, ispitivanja provedena na lokaciji I i II te analiza dobivenih rezultata.

6.1. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal na kojem su se provodila reparaturna zavarivanja je poboljšani sitnozrnati čelik S690QL1. Kemijski sastav osnovnog materijala prikazan je u tablici 6, mehanička svojstva opisana su u tablici 7, a udarni rad loma u tablici 8.

Tablica 6. Kemijski sastav osnovnog materijala

C %	Si %	Mn %	Ni %	P %	S %	Cr %	Mo %
0,13	0,29	1,30	0,04	0,011	0,001	0,23	0,21
V %	N %	Nb %	Ti %	Cu %	Zr %	B %	Al %
0,01	0,006	0,02	0,01	0,05	0,002	0,0018	0,058

Tablica 7. Mehanička svojstva osnovnog materijala

Debljina materijala, mm	Granica razvlačenja R_e , MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje pri lomu A_5 , %
25	≥ 690	770 - 940	≥ 14

Tablica 8. Udarni rad loma osnovnog materijala

Pozicija uzorka	0 °C	-20 °C	-40 °C	-60 °C
Uzdužno	60 J	50 J	40 J	30 J
Poprečno	40 J	35 J	30 J	27 J

Pri odabiru dodatnog materijala za zavarivanje potrebno je obratiti pozornost na kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala te uvjete eksploatacije osnovnog materijala. Za reparaturno zavarivanje osnovnog materijala S690QL1 korištena je bazična elektroda EVB 80, proizvođača Elektrode Jesenice, koja se koristi za zavarivanje poboljšanih sitnozrnatih čelika i čelika koji u kemijskom sastavu imaju Cr-Ni-Mo strukturu, visoku čvrstoću i vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) do 785 MPa. Elektroda se prije upotrebe treba sušiti sat vremena na temperaturi 400 °C kako bi se dobili zavari otporni na pojavu pukotina koji su žilavi i pri temperaturama od -60 °C, prikazano u tablici 10.

Korišteni dodatni materijal legiran je niklom, manganom, molibdenom i kromom, a detaljan kemijski sastav prikazan je u tablici 9.

Tablica 9. Kemijski sastav dodatnog materijala

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %
0,05	0,40	1,80	0,40	2,20	0,45

Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A_5 , %	KV, J
> 700	810 – 960	> 17	> 47 (-60 °C)

6.2. Korištena oprema za zavarivanje

Zavarivanje osnovnog materijala i provedena reparaturna zavarivanja izvedena su ručnim elektrolučnim postupkom zavarivanja (REL). Korišten aparat za zavarivanje je Transpocket 180, prikazan na slici 20.

**Slika 20. Transpocket 180 [25]**

Korišteni uređaj izabran je zbog svojih izvrsnih karakteristika koje dolaze do izražaja pri radu u teškim uvjetima na terenu, kao što su mala težina i veličina te stabilan napon, ostale karakteristike opisane su u tablici 11.

Tablica 11. Karakteristike korištenog uređaja za zavarivanje [25]

Transpocket 180	
Struja zavarivanja/Radni ciklus [10 min/40 °C]	180 A/40 %
Struja zavarivanja/Radni ciklus [10 min/40 °C]	160 A/60 %
Struja zavarivanja/Radni ciklus [10 min/40 °C]	120 A/100 %
Radni napon	20,4 V – 27,2 V
Napon praznog hoda	101 V
Mrežna frekvencija	50 – 60 Hz
Mrežni napon	230 V
Mrežni osigurač	16 A
Dimenzija Š/D	160x430 mm
Masa	8,8 kg
Klasa zaštite	IP23

Korišteni izvor struje je prijenosni agregat Mosa TS 400 SC/EL, prikazan na slici 21. Karakteristike izvora struje korištenog u ovom eksperimentalno radu opisane su u tablici 12.

**Slika 21. Mosa TS 400 SC/EL [26]**

Prijenosni agregat za zavarivanje Mosa TS 400 SC/EL ima funkciju dvostrukog raspona i napon otvorenog kruga od 70 V te ugrađena bateriju od 12 V i indikator napunjenosti baterije. Glavna karakteristika je vodom hlađen dizel motor, snage 27,6 KS s potrošnom goriva 4 litre po satu. Opremljen je mnogim funkcijama kao što su termalno isključivanje, automatsko mirovanje, gumb za zaustavljanje u nuždi i beskonačno upravljanje [27].

Tablica 12. Karakteristike korištenog izvora struje [26]

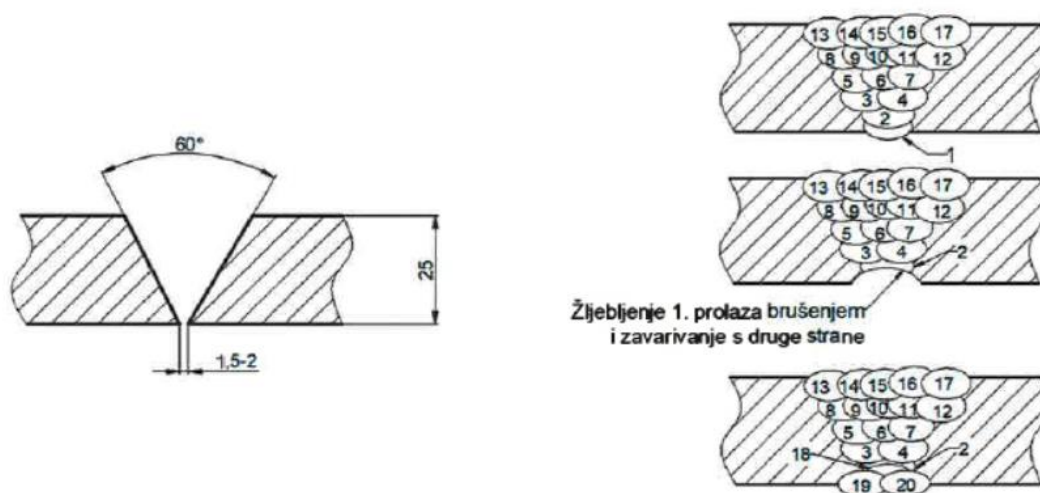
Mosa TS 400 SC/EL	
Jačina struje	18,7 A
Aktivna snaga	10,40 kW
Radni napon	380/220 V
Vrijeme neprekidnog rada	8 h
Dimenzije Š/V/D	1455x880x841 mm
Masa	450 kg
Klasa zaštite	IP23

Za praćenje temperature prilikom zavarivanja korišten je šest-kanalni autonomni pisač Chino proizvođača Globe Heat Treatment, prikazan na slici 22. Analogni snimač bilježi procese toplinske obrade prije i nakon zavarivanja do 1200 °C, a napon pri izmjeničnoj struji iznosi 100 do 240 V te razina točnosti je $\pm 0,5\%$ [28].

**Slika 22. Analogni snimač temperaturnih grafikona [28]**

6.3. Postupak zavarivanja radnog komada

Ploče debljine 25 mm zavarene su REL postupkom uz V pripremu žlijeba, prikazano na slici 23. Zavarivanje je provedeno u položaju najvećeg unosa energije (PF) uz plinsko predgrijavanje (propan/butan-kisik) na 130 °C i kontinuirano praćenje unosa topline. Radni komad je predeformiran za 14° kako bi se izbjegle naknadne neizbježne deformacije materijala. Jakost istosmjerne struje zavarivanja iznosila je 99 do 110 A pri vrijednostima napona 21 do 24 V, temperaturi predgrijavanja od 131 do 146 °C, brzini zavarivanja od 5,28 do 17,22 cm/min te unosu topline između 0,07 i 0,234 kJ/cm.



Slika 23. Skica pripreme i detalji zavarivanja

6.4. Simulacija reparaturnih zavarivanja

6.4.1. Prvi popravak

Simulacija reparaturnih zavarivanja provedena je na zavarenom radnom komadu. Popravak je simuliran dva puta lijevo od osnovnog zvara. Priprema simulacije pukotine prikazana na slici 24.



Slika 24. Shematski prikaz prvog popravka

Brusilicom je žlijebljen osnovni materijal na dubinu 15 mm od površine. Mjesto na kojem su simulirana reparaturna zavarivanja udaljeno je 15 mm od osnovnog zavara. Korišten je REL postupak zavarivanja, a parametri zavarivanja opisani su u tablici 13.

Tablica 13. Parametri zavarivanja prvog popravka

Prolaz br.	Polaritet struje	Struja, A	Napon, V	Duljina zavara, cm	Vrijeme zavarivanja, min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm	Temperatura predgrijavanja, °C
1	DC (+)	114-115	21,7-22,8	60	5,50	10,91	0,112	130
2	DC (+)	114-115	21,4-23,0	62	6,57	9,44	0,130	139
3	DC (+)	114-115	22,1-23,2	62	4,92	12,60	0,098	133
4	DC (+)	114-115	21,8-23,1	62	6,65	9,32	0,132	136
5	DC (+)	114-115	21,5-22,8	62	5,53	11,21	0,109	133
6	DC (+)	114-115	21,3-22,9	62	7,23	8,58	0,142	139
7	DC (+)	114-115	21,5-23,1	62	5,47	11,33	0,108	135
8	DC (+)	114-115	21,4-22,8	59	5,20	11,35	0,107	138
9	DC (+)	114-115	21,2-23,0	64	6,45	9,92	0,122	136
10	DC (+)	114-115	21,3-22,8	64	7,23	8,85	0,138	138
11	DC (+)	114-115	21,2-23,2	64	7,50	8,53	0,143	145
12	DC (+)	104-105	21,3-23,2	64	3,17	20,19	0,055	136

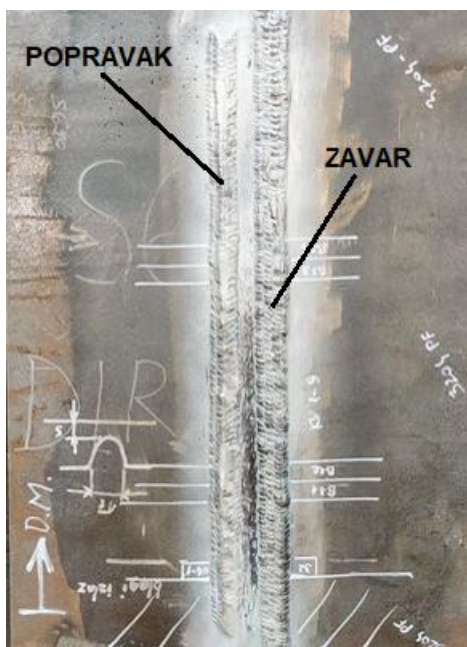
6.4.2. Drugi popravak

Nakon uspješno provedenog postupka zavarivanja prve simulirane pukotine, zavar je izvađen brusilicom i ponovljen je postupak zavarivanja. Na slici 25 prikazan je postupak simulacije drugog popravka, a parametri zavarivanja opisani su u tablici 14.



Slika 25. Shematski prikaz drugog popravka

Drugi popravak je zavaren u 16 prolaza ručnim elektrolučnim zavarivanjem. Realni prikaz zavara i završene simulacije nakon dva popravka vidljiv je na slici 26.



Slika 26. Izgled radnog komada nakon završene simulacije reparaturnih zavarivanja

Tablica 14. Parametri zavarivanja drugog popravka

Prolaz br.	Polaritet struje	Struja, A	Napon, V	Duljina zavara, cm	Vrijeme zavarivanja, min	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm	Temperatura predgrijavanja, °C
1	DC (+)	105-106	21,0-22,6	60	2,95	20,34	0,054	130
2	DC (+)	110-111	21,4-23,0	60	4,10	14,63	0,081	132
3	DC (+)	110-111	21,6-23,3	60	5,85	10,26	0,116	137
4	DC (+)	115-116	21,4-23,4	61	7,72	7,90	0,157	143
5	DC (+)	115-116	21,3-23,2	63	5,50	11,45	0,108	135
6	DC (+)	115-116	21,8-23,5	63	8,48	7,43	0,169	138
7	DC (+)	116-117	22,0-24,2	64	4,23	15,13	0,086	140
8	DC (+)	116-117	21,3-23,4	64	5,52	11,59	0,108	142
9	DC (+)	116-117	21,2-24,0	64	6,43	9,95	0,127	147
10	DC (+)	116-117	20,8-24,1	64	5,83	10,98	0,114	133
11	DC (+)	116-117	21,7-23,8	64	6,97	9,18	0,138	140
12	DC (+)	104-105	21,6-23,5	64	8,18	7,82	0,162	144
13	DC (+)	116-117	21,0-23,0	66	9,90	6,67	0,185	146
14	DC (+)	116-117	21,3-23,4	66	7,92	8,33	0,150	134
15	DC (+)	116-117	21,2-23,2	66	6,82	9,68	0,128	147
16	DC (+)	104-105	21,3-22,9	66	3,92	16,84	0,066	137

6.5. Izrezivanje epruveta i mehanička ispitivanja

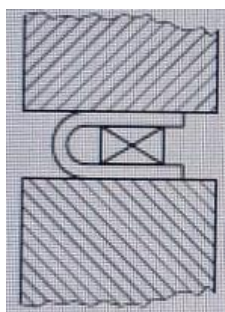
Epruvete su izrezane iz zavarenih ploča vodenim mlazom. Za potrebe mehaničkih ispitivanja izrezano je 15 epruveta koje su naknadno mehanički obrađene, prikazano na slici 27. Četiri epruvete namijenjene su ispitivanju savijanjem, dvije vlačnom testu, jedna epruveta iskoristila se za naknadni makro izbrusak, a preostalih devet epruveta koje nisu prikazane na slici iskorišteno je za potrebe ispitivanja udarnog rada loma.



Slika 27. Epruvete dobivene rezanjem vodenim mlazom

6.5.1. Ispitivanje savijanjem

S obzirom na sklonost čelika S690QL1 nastanku pukotina, od velike je važnosti ispitivanje epruveta na savijanje jer ono ukazuje na maksimalni kut pri kojem se javljaju pukotine u zavaru. Epruvete su izrezane prema normi HRN EN ISO 7438:2020, dimenzija 25x10 mm. Promjer trna iznosio je 60 mm, a razmak između valjaka 90 mm. Epruvete su savijane bočno po presjeku kako bi se manje opteretio stroj kojim su se vršila ispitivanja zbog debljine materijala veće od 8 mm. Epruvete su izdržale savijanje prema metodi 8.2 b) koja je prikazana na slici 28, rezultati su opisani u tablici 15. Ako u metalu zavara nije postignuto miješanje između dodatnog i osnovnog materijala u postupku ispitivanja savijanjem se na tom mjestu odljepljuje dodatni materijala od osnovnog što u ovom eksperimentalnom radu nije bio slučaj.



Slika 28. Shematski prikaz savijanja [29]

6.5.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačna ispitivanja provedena su na kidalici prikazanoj na slici 29. Primijenjena sila iznosila je oko 480 kN. Vrijednosti ispitivanja na dvije epruvete prikazane u tablici 15 ukazuju na vrijednosti vlačne čvrstoće metala zavara koje su u oba slučaja veće od vrijednosti osnovnog materijala pa se može zaključiti da su zavar i popravak pravilno izvedeni.



Slika 29. Kidalica

Tablica 15. Statičko vlačno i savojno ispitivanje

Oznaka epruvete	Presjek, mm	Pov. Presjeka, mm ²	Max sila, N	Vlačna čvrstoća, MPa	Savijanje		Ispitna temp. °C
					Razmak	Kut savijanja	
TT – Č1	24,5x23,3	570,9	477500	836			23
TT – Č2	24,6x23,0	565,8	482500	853			23
SBB – BS1	25x10				60/90	Metoda 8.2 b)	18
SBB – BS2	25x10				60/90	Metoda 8.2 b)	18
SBB – BS3	25x10				60/90	Metoda 8.2 b)	18
SBB – BS4	25x10				60/90	Metoda 8.2 b)	18

6.5.3. Ispitivanje udarnog rada loma

Devet epruveta podvrgnuto je ispitivanju udarnog rada loma kako bi se ispitala žilavost zavarenog spoja. Epruvete, dimenzije presjeka 10x8 mm, držale su se u kapljevitom dušiku kako bi se postigla ispitna temperatura od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ispitivanja su provedena prema normi HRN EN ISO 148-1, a na slici 30 prikazan je Charpyjev bat kojim su se provodila ispitivanja.



Slika 30. Ispitivanje udarnog rada loma

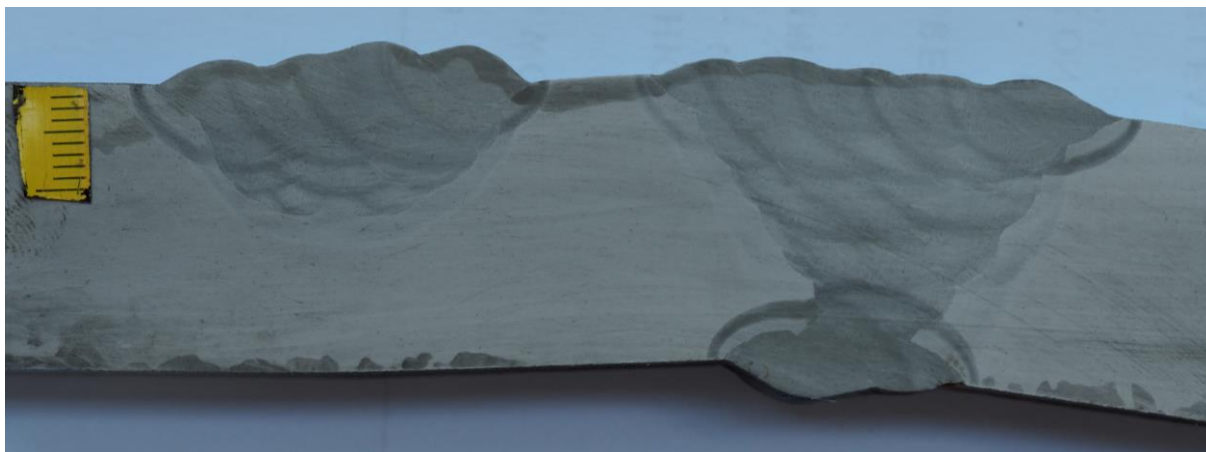
Rezultati iz tablice 16 ukazuju na pravilno izvedene zavare jer su vrijednosti udarnog rada loma veće od minimalne vrijednosti koja iznosi 40 J pri ispitnoj temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, prema normi EN 10025-6:2004 (E).

Tablica 16. Ispitivanje udarnog rada loma

Oznaka epruvete	Presjek, mm	Ispitna temp. $^{\circ}\text{C}$	Udarni rad loma, J	Napomena
			Vrsta probe 10x10x55 mm	
VWT 0/2 - 1	10x8	-40	42	*centar popravka zavara
VWT 0/2 - 2	10x8	-40	57	*centar popravka zavara
VWT 0/2 - 3	10x8	-40	53	*centar popravka zavara
VHT 2/2 _L - 4	10x8	-40	78	*ZUT _L
VHT 2/2 _L - 5	10x8	-40	55	*ZUT _L
VHT 2/2 _L - 6	10x8	-40	98	*ZUT _L
VHT 2/2 _R - 7	10x8	-40	117	*ZUT _R
VHT 2/2 _R - 8	10x8	-40	85	*ZUT _R
VHT 2/2 _R - 9	10x8	-40	94	*ZUT _R

6.5.4. Makroanaliza

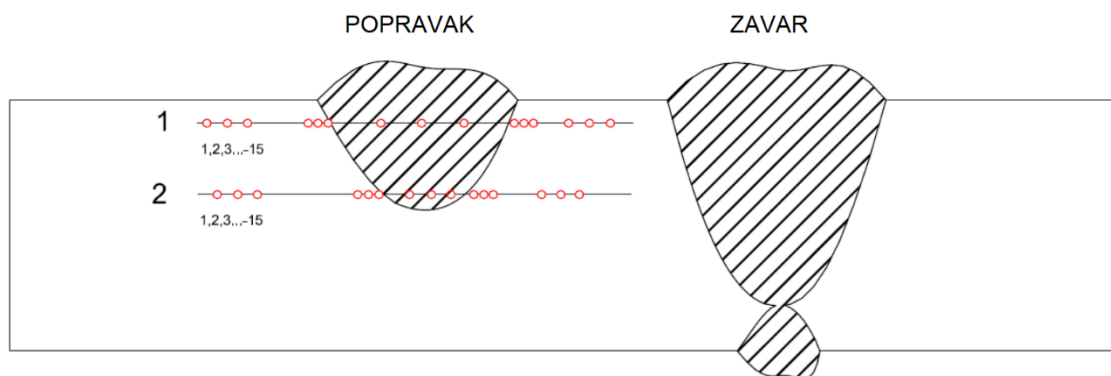
Metalografska priprema uzoraka, za potrebe analize zone utjecaja topline, broja prolaza u metalu zavara i linije stavljanja, sastojala se od izrezivanja makro izbrusaka, brušenja, poliranja i nagrivanja. Uzorak je kemijski nagriven u 5 % otopini dušične kiseline u alkoholu (5 % NITAL). Makroizbrusak prikazan je na slici 31.



Slika 31. Makroizbrusak

6.5.5. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanja tvrdoće izvedena su prema normama HRN EN ISO 6507-1:2018 i HRN EN ISO 9015-1:2012. Nakon utiskivanja intendorora pod opterećenjem HV 10, veličine otisaka izmjerene su mikroskopom, a očitane vrijednosti tvrdoće prikazane u tablici 13. Razmještaj otisaka na uzorku prikazan je na slici 32.



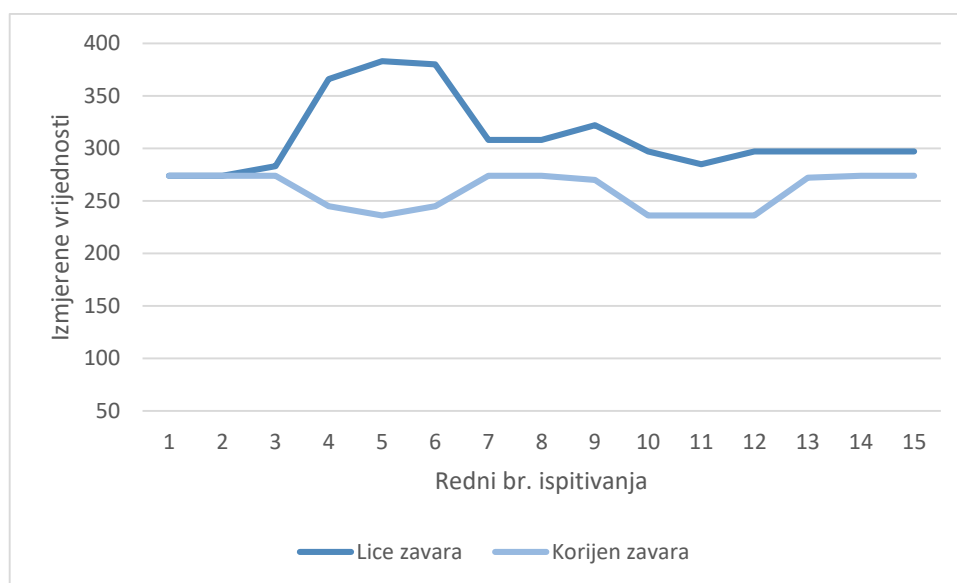
Slika 32. Shematski prikaz mjesta ispitivanja tvrdoće

Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoća na popravku zavara

		1	2
Osnovni materijal	1	274	274
	2	274	274
	3	283	274
Zona utjecaja topline	4	366	245
	5	383	236
	6	380	245
Metal zavara	7	308	274
	8	308	274
	9	322	270
Zona utjecaja topline	10	297	236
	11	285	236
	12	297	236
Osnovni materijal	13	297	272
	14	297	274
	15	297	274

Iz grafičkog prikaza na slici 33 vidljivo je da su vrijednosti otisaka na korijenu zavara većinom niže što se u teoriji i zahtjeva. Zadovoljen je standard EN ISO 15614-1:2017 jer vrijednosti tvrdoća ne prelaze najveću dopuštenu vrijednost 380 HV10. Jedan otisak iznosi 383 HV10, ali to nije veliko odstupanje pa se zanemaruje. Može se zaključiti da se svojstva materijala i nakon

drugog popravka zavara ne gube zbog prikladno odabrane metode i parametara zavarivanja te dodatnog materijala.



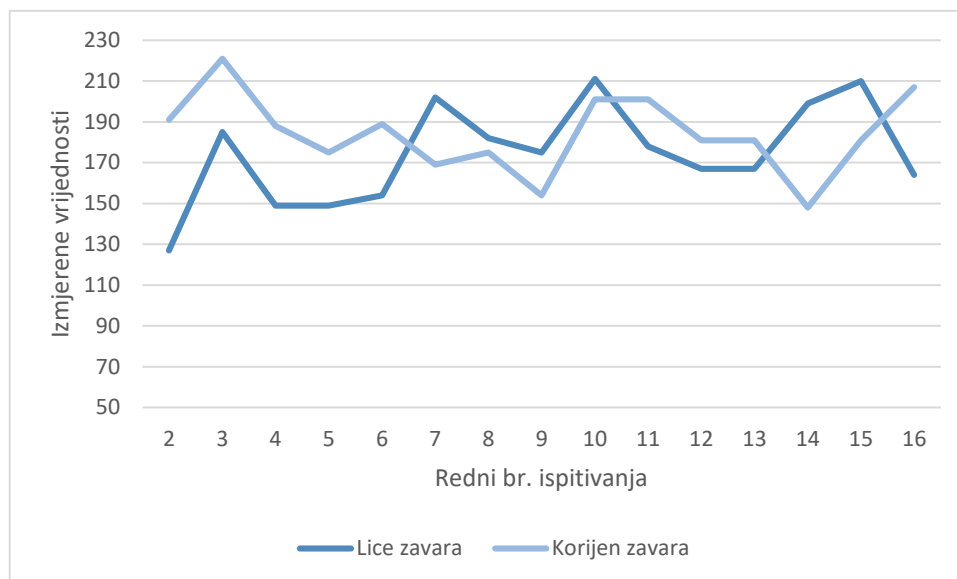
Slika 33. Grafički prikaz izmjerenih tvrdoća

6.5.6. Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanja mikrotvrdoće provedena su pri opterećenju od HV 0,2. Nakon utiskivanja intendora mikroskopom su izmjerene vrijednosti mikrotvrdoća. Razmještaj otisaka na uzorku isti je kao kod ispitivanja tvrdoće (slika 32), a rezultati su dani u tablici 18.

Tablica 18. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoća

		1	2
Osnovni materijal	1	127	191
	2	185	221
	3	149	188
Zona utjecaja topline	4	149	175
	5	154	189
	6	202	169
Metal zavara	7	182	175
	8	175	154
	9	211	201
Zona utjecaja topline	10	178	201
	11	167	181
	12	167	181
Osnovni materijal	13	199	148
	14	210	181
	15	164	207



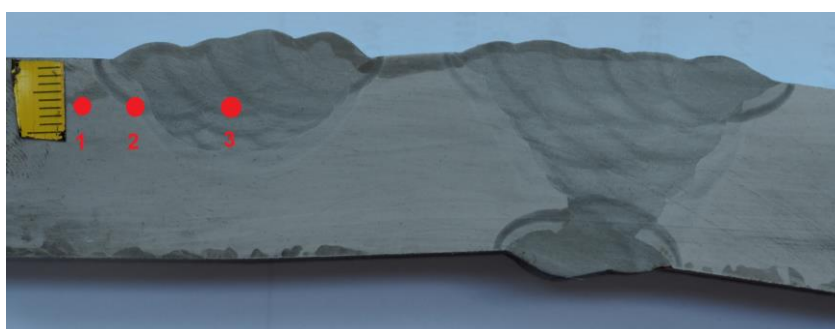
Slika 34. Grafički prikaz izmjerenih mikrotvrdoća

Iz grafičkog prikaza na slici 34 mjestimično se pojavljuju više tvrdoće u korijenu zavara nego na licu što u teoriji nije slučaj. S obzirom na to da se pri mjerenju mikrotvrdoća koriste jako mala opterećenja ovakva odstupanja su prihvatljiva te se pripisuju greškama pri očitavanju mjerne skale i općenito malom rasponu udaljenosti između dijagonala.

6.5.7. Mikroanaliza

Na makro izbrusku provedena je metalografska analiza pod povećanjem od 50x i 500x. Analiza mikrostrukture provedena je na sljedećim lokalitetima:

- lokalitet 1 – osnovni materijal
- lokalitet 2 – zona utjecaja topline
- lokalitet 3 – metal zavara, prikazano na slici 35.



Slika 35. Lokaliteti izmjerenih mikrostruktura

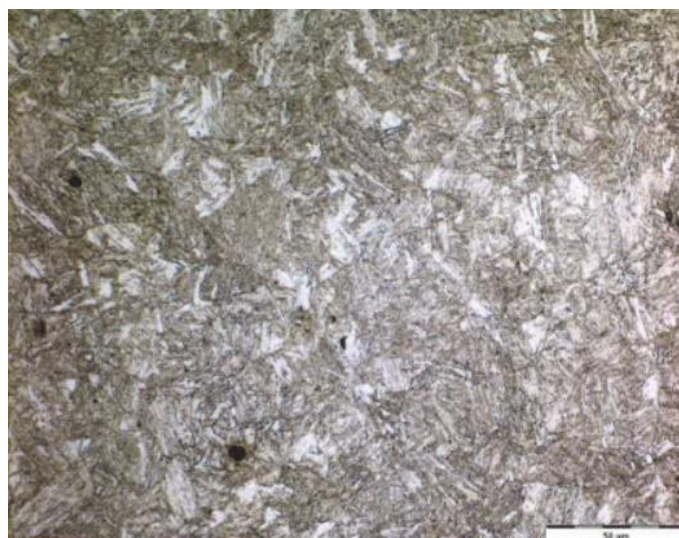
Analiza mikrostrukture u osnovnom materijalu na lokalitetu br.1

Mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se od popuštenog martenzita i bainita, prikazano na slici 36. Uočeni su ravnomjerno raspoređeni nemetalni uključci.



Slika 36. Nagriženo stanje pri povećanju 50x

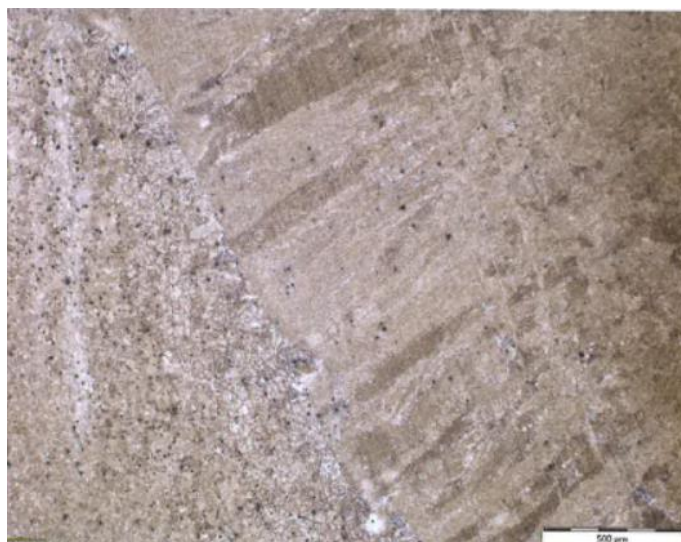
Na slici 36 prikazana je mikrostruktura u nagriženom stanju pri povećanju na elektronskom mikroskopu od 50 puta, a na slici 37 nalazi se izgled mikrostrukture pri povećanju na elektronskom mikroskopu od 500 puta.



Slika 37. Nagriženo stanje pri povećanju 500x

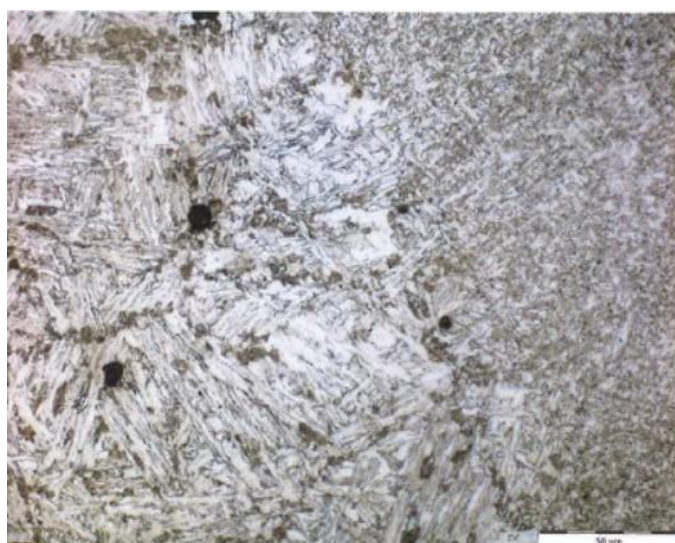
Analiza mikrostrukture u zoni utjecaja topline na lokalitetu br.2

U mikrostrukтури zone utjecaja topline vidljivi su ravnomjerno raspoređeni nemetalni uključci. Nagrizanjem u 5 % nitalovoj otopini pojavljuje se porast veličine zrna. Na slici 38 prikazana je mikrostruktura u nagriženom stanju snimljena elektronskim mikroskopom pod povećanjem od 50 puta.



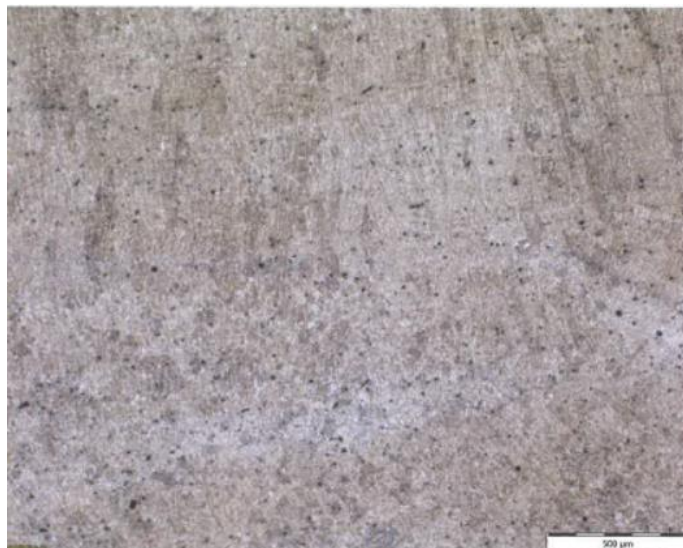
Slika 38. Nagriženo stanje pri povećanju 50x

Metalna osnova sastoji se od grubog pločastog martenzita, globularnog bainita i zaostalog austenita, vidljivo iz slike 39 na kojoj je snimak nagriženog stanja mikrostrukture pri povećanju od 500 puta.



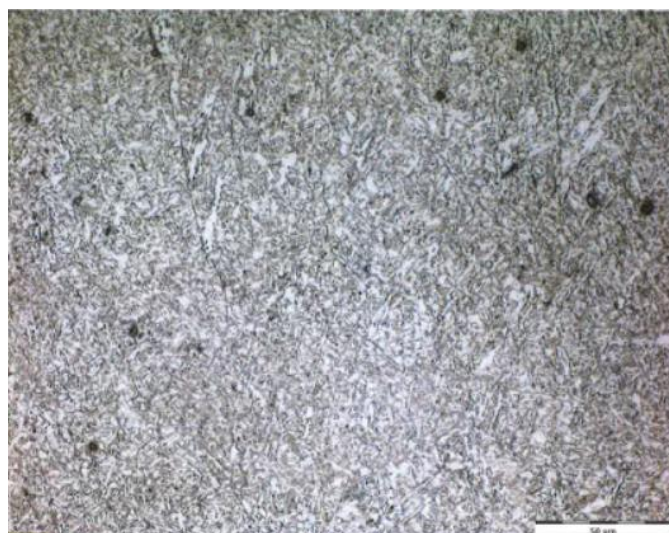
Slika 39. Nagriženo stanje pri povećanju od 500x

U mikrostrukтури zavara ravnomjerno su raspoređeni nemetalni uključci. Metalna osnova zavara ima sitnozrnatu mikrostrukтуру i mjestimično je usmjerena, vidljivo na slici 40. Rast zrna usmjerene strukture suprotan je smjeru odvođenja topline.



Slika 40. Nagriženo stanje pri povećanju od 50x

U metalnoj osnovi prisutni su igličasti martenzit te pločasti i globularni bainit što je vidljivo iz slike 41 na kojoj je prikazana mikrostrukтура u nagriženom stanju pri povećanju od 500 puta.



Slika 41. Nagriženo stanje pri povećanju od 500x

6.5.8. Mjerenje zaostalih naprezanja

Ispitivanja zaostalih naprezanja na makro izbrusku provodila su se pomoću rendgenskog analizatora zaostalih naprezanja $\mu - X360$ s, prikazan na slici 42. Rad uređaja temelji se na $\cos\alpha$ metodi gdje se jedna rendgenska zraka detektira korištenjem dvodimenzionalnog senzora, a naprezanje se određuje pomoću Debye-Scherrer kruga, prikazan na slici 46. Najveća prednost ove metode mjerenja zaostalih naprezanja su brzina i nisko rendgensko zračenje [30].



Slika 42. Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja

Kako uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja funkcionira:

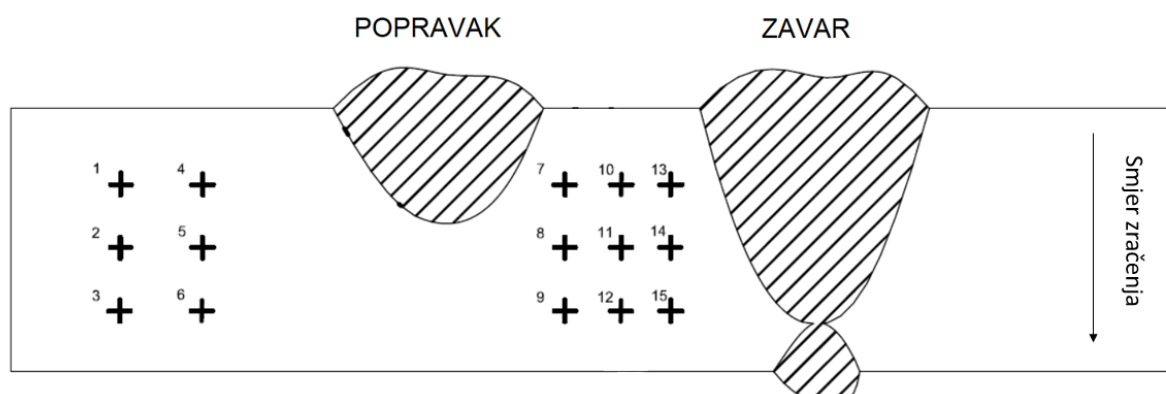
- uzorak se postavlja ispod senzora
- pokreće se program na monitoru
- podešava se kut nagiba, radna udaljenost i mjesto mjerenja
- zatvaranjem zaštitnih vrata započinje proces mjerenja
- rezultati se prikazuju na monitoru nakon 90 sekundi [30].

Područja mjerenja uređaja $\mu - X360$ s:

- mjerenja zaostalih naprezanja
- mjerenja zaostalog austenita
- mjerenja širine oblika krivulje na polovici njezine maksimalne amplitude (FWHM) [30].

Mjerenja su provedena zračenjem u dva smjera, shematski prikazano na slikama 43 i 44. Zaostala naprezanja izmjerena u smjeru zračenja prikazanom na slici 43. imaju zadovoljavajuće vrijednosti. Negativan predznak označava da se u tom području ispitivanja nalaze tlačna

naprezanja. Kao što je vidljivo iz tablice 19 iznosi standardnog odstupanja su mali što označava visoku točnost izmjerenih rezultata. Također, nije uočena velika razlika u zaostalim napreznjima u osnovnom materijalu lijevo od popravka u odnosu na osnovni materijal između metala zavara i popravka što znači da je odabrana prihvatljiva udaljenost položaja popravka u odnosu na zavar s obzirom na to da ne utječe na svojstva.

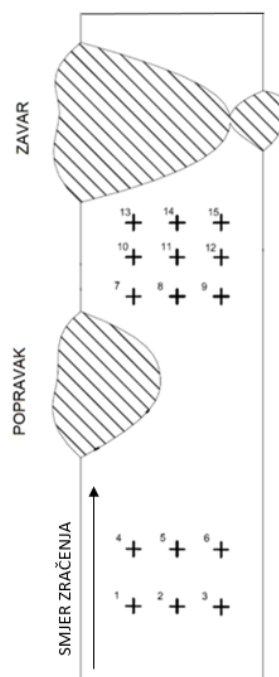


Slika 43. Shematski prikaz mjesta ispitivanja zračenjem

Tablica 19. Izmjerena zaostala napreznja s obzirom na smjer zračenja i razmještaj mjerenja

	Zaostala napreznja (σ_x), MPa	Standardna devijacija, MPa
1	-281	9
2	-206	4
3	-199	5
4	-234	5
5	-263	6
6	-250	5
7	-298	3
8	-308	4
9	-323	5
10	-282	5
11	-281	4
12	-331	4
13	-300	4
14	-290	4
15	-327	4

Slika 44 prikazuje ponovljeni postupak mjerenja, ali drugi smjer zračenja. Izmjerene vrijednosti mjestimično su niže od onih izmjerenih na istom mjestu u prethodnom ispitivanju. Vrijednosti standardnog odstupanja nisu velike što označava visoku točnost rezultata.



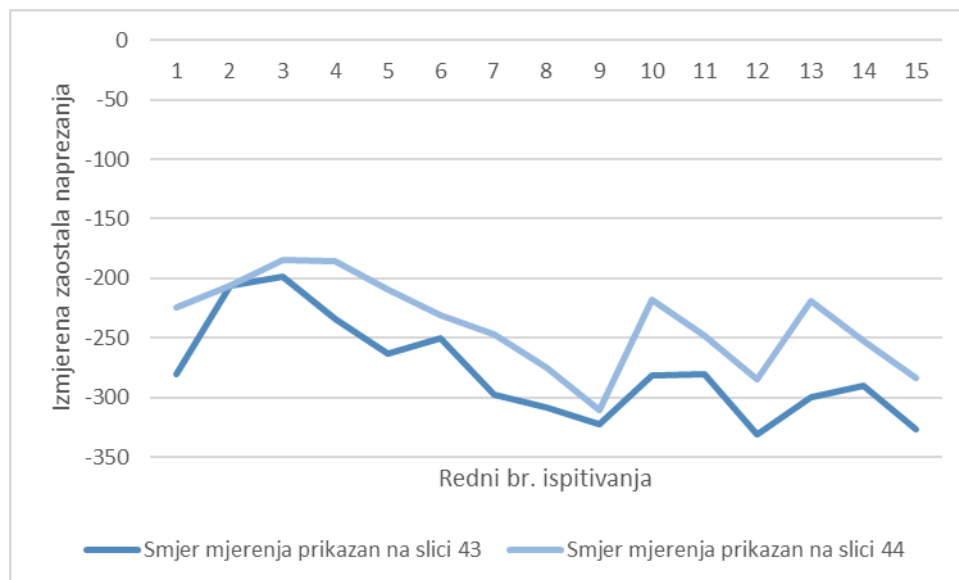
Slika 44. Shematski prikaz mjesta ispitivanja zračenjem

Primjećuju se razlike u vrijednostima zaostalih napreznja u osnovnom materijalu lijevo od popravka u odnosu vrijednosti zaostalih napreznja na mjestu između zavara i popravka, ali i dalje osnovni materijal ima zadovoljavajuća svojstva jer te razlike nisu velike.

Tablica 20. Izmjerena zaostala napreznja s obzirom na smjer zračenja i razmještaj mjerenja

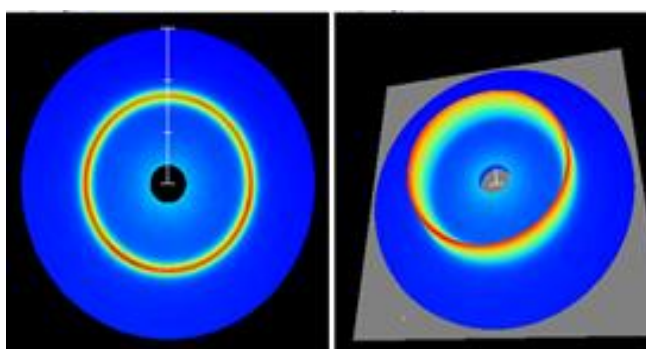
	Zaostala napreznja (σ_x), MPa	Standardna devijacija, MPa
1	-225	5
2	-206	5
3	-185	7
4	-186	5
5	-209	4
6	-231	6
7	-247	5
8	-275	7
9	-311	7
10	-218	4
11	-248	6
12	-285	3
13	-219	6
14	-252	3
15	-284	5

Usporedbom vrijednosti zaostalih naprezanja koje su dobivene ispitivanjem zračenjem u različitim smjerovima može se zaključiti da nema značajnih odstupanja, vidljivo iz grafičkog prikaza na slici 45.



Slika 45. Grafički prikaz usporedbe zaostalih naprezanja ovisno o smjeru mjerenja

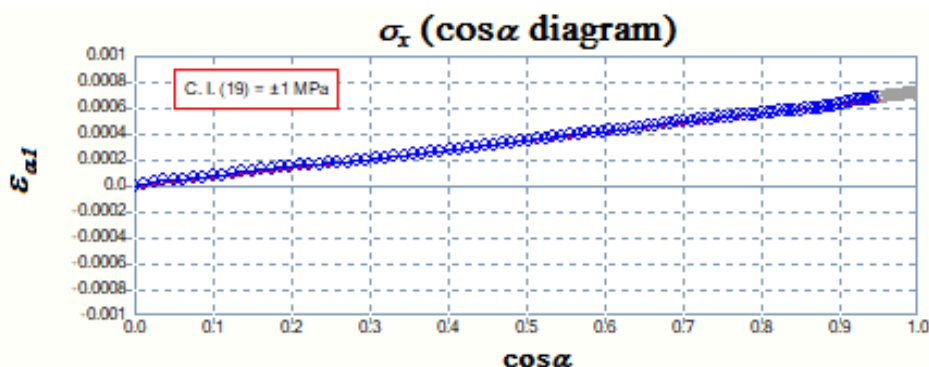
Pri mjerenjima naprezanje se određuje pomoću Debye-Scherrer kruga stoga je potrebno pratiti izgled toga kruga. U provedenim mjerenjima sve izračunate vrijednosti imale su idealan oblik kruga kao što je prikazano na slici 46.



Slika 46. Debye-Scherrer krug

Također, vrlo je bitno da vrijednosti standardne devijacije nisu previsoke jer je u tom slučaju točnost metode mjerenja upitna. Zadnji parametar koji je potrebno pratiti je grafički prikaz

vidljiv iz slike 47. Sva mjerenja koja su provedena bilježila su linearan rast što se i zahtjeva kako bi rezultati mjerenja bili prihvaćeni.



Slika 47. Grafički prikaz izmjerene zaostalosti naprezanja u jednoj točki

6.6. Nerazorna ispitivanja

Prije izrezivanja ispitnih uzoraka provode se nerazorna ispitivanja koja moraju biti zadovoljavajuća kako bi se provodila daljnja ispitivanja. U ovom eksperimentalnom radu na mjestu popravka zavara provedeno je:

- vizualno ispitivanje
- ispitivanje penetrantima
- ispitivanje magnetima
- ispitivanje prozračivanjem
- ultrazvučno ispitivanje.

Vizualna ispitivanja provedena su prema normi HRN EN ISO 17637:2017, a kriterij prihvatljivosti odabran je prema normi HRN EN ISO 5817:2014(B). Ispitna površina bila je očišćena i pobrušena, a izvor svjetlosti baterijska lampa. Jačina osvjetljenja postignuta je Luxmetrom UNI-T UT 381. Oba popravka zavara zadovoljila su vizualnu kontrolu ispitivanja.

Ispitivanje penetrantima provedeno je prema normi HRN EN ISO 3452-1:2013, a razina prihvatljivosti je 1 prema normi HRN EN ISO 23277:2015. Postupak započinje nanošenjem penetranta, MAGNAFLUX-SKL-WP2 200211, sprejem 20 min. Zatim se sprejem nanosi razvijajući, MAGNAFLUX-SKD-S2 200106, na 20 min. Završno se sprejem nanosi čistač,

MAGNAFLUX-SKS-S 200201 i prebriše krpom. Osvjetljenje pri ispitivanju bilo je dnevno svjetlo > 500 luxa. Oba popravka zavara zadovoljila su ispitivanja penetrantima.

Ispitivanje magnetima provedeno je prema normi HRN EN ISO 17638:2016, a razina prihvatljivosti je 2X prema normi HRN EN ISO 23278:2015. Ispitivanja su provedena pri izmjeničnoj struji od 12 A i jakosti magnetskog polja $\geq 2,4$ kA/m. Korištene su crne magnetske čestice MAGNAFLUX 7HF veličine $1 \mu\text{m}$ i podložna kontrastna boja MAGNAFLUX WCP2. Ispitivanja su se provodila na uređaju TIDE AC230 V3 pod baterijskom lampom jačine ≥ 500 lux. Dozvoljena debljina prevlake je $\leq 50 \mu\text{m}$, a razmak između polova 140 mm. Oba popravka zavara zadovoljila su ispitivanja magnetima.

Ispitivanja prozračivanjem provedena su prema normi HRN EN ISO 17636-1:2014, a kriterij prihvatljivosti HRN EN ISO 5817:2014 (B). Korišten je iluminator LH-25(LED) i denzitometar KOWOLUX Densorapid D. Oba popravka zavara zadovoljila su ispitivanja prozračivanjem.

Ultrazvučna ispitivanja provedena su prema normi HRN EN ISO 13588:2019, a kriterij prihvatljivosti prema normi HRN EN ISO 5817:2014. Ultrazvučna oprema kojom su se provodila ispitivanja je OLYMPUS OMMNISCAN SX, a kontaktno sredstvo GEL FyP. Nominalna frekvencija iznosila je 5 MHz. Oba popravka zavara zadovoljila su ultrazvučna ispitivanja.

6.7. Alternativna tehnologija reparaturnog zavarivanja

U slučaju neuspješne izvedbe reparaturnog zavarivanja jedno od rješenja je da se oštećeni dio cjevovoda izvadi i ubaci novi komad. Korištena tehnologija zavarivanja u eksperimentalnom dijelu rada mogla bi se iskoristiti u ovom slučaju.

Druga alternativna tehnologija reparaturnog zavarivanja kojom se minimizira mogućnost nastanka pukotina je upotrebom elektrode CARBOWELD 82 B ($\text{Ø}3,25$ mm; $\text{Ø}4$ mm), EN ISO 14172: E Ni 6082 (NiCR10Mn3Nb). Ova elektroda ima veću istežljivost materijala pa je pojava pukotina manja, ali vlačna čvrstoća elektrode manja je od vlačne čvrstoće osnovnog materijala. Zato je u eksperimentalnom dijelu rada odabrana elektroda za zavarivanje Jesenice EVB 80. Certificirani elektroda dani su u prilogu.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je detaljno analizirati svojstva i zavarljivost poboljšanog sitnozrnatog čelika S690QL1. Glavni nedostatak ovog materijala je osjetljivost na pojavu hladnih pukotina stoga su u eksperimentalnom dijelu rada provedena opsežna ispitivanja mehaničkih svojstava i detaljna analiza mikrostrukture na temelju čega su doneseni zaključci o prikladnosti, odabrane tehnologije zavarivanja, kod reparaturnih zavarivanja na cjevovodima.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je postupak zavarivanja dva radna komada, čelik S690QL1, debljine stijenke 25 mm. Uz zavareni spoj, na udaljenosti 15 mm od zavora, simulirana su dva popravka zavora, tako da je osnovni materijal žlijebljen brusilicom zatim zavarivan te je postupak ponovljen na istom mjestu.

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja iznosili su 836 MPa i 853 MPa što je više od osnovnog materijala te su rezultati zadovoljili kriterij prihvatljivosti. Ispitivanja udarnog rada loma provodila su se pri temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dobivene vrijednosti bile su u rasponu od 42 J do 117 J što je više od minimalne dopuštene vrijednosti koja prema normi EN 10025-6:2004 (E) iznosi 40 J. Mikroanalizom provedenom na makroizbrusku nisu uočena značajna odstupanja u strukturi.

Mjerenje tvrdoće provedeno je pod opterećenjem HV10, a rezultati nisu prelazili najveću dopuštenu vrijednost koja, prema normi EN ISO 15614-1:2017, iznosi 380 HV10. Nadalje, mjerenjem mikrotvrdoća pri opterećenju HV0,2, mjestimično su se pojavile više vrijednosti tvrdoća u korijenu zavora nego na licu. Odstupanja su prihvaćena i pripisana greški pri očitavanju mjerne skale. Ispitivanje zaostalih naprezanja provedeno je u dva smjera uz pomoć rendgenskog analizatora μ - X360s. Sva mjerenja imala su pravilan izgled Debye-Scherrer kruga i linearan rast izmjerenih vrijednosti zaostalih naprezanja u jednoj točki. Izmjerena zaostala naprezanja u svakoj točki imala su negativan predznak pri čemu je zaključeno da su u području ispitivanja prisutna tlačna naprezanja. Vrijednosti zaostalih naprezanja varirala su između -185 MPa i -331 MPa . S obzirom na to da vrijednosti standardnih odstupanja nisu bile velike, od 3 MPa do 9 MPa, te nije uočena velika razlika u zaostalim naprezanjima u osnovnom materijalu lijevo od popravka u odnosu na osnovni materijal između metala zavora i popravka, zaključeno je da je odabrana prihvatljiva udaljenost položaja popravka zavora u odnosu na zavor.

Popravak zavora zadovoljio je sva provedena ispitivanja prema kriterijima prihvatljivosti koji su dani u normama te se može zaključiti da je odabrana prikladna tehnologija zavarivanja i pravilno izvršen postupak zavarivanja osnovnog zavora i simuliranih reparaturnih zavarivanja.

LITERATURA

- [1] SteelNumber http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=53
[Pristupljeno: 30.04.2022.]
- [2] Steel Material Supplier <https://gangsteel.com/en10025-6-s690ql1-quenched-and-tempered-steel-plate-supplier/> [Pristupljeno: 30.04.2022.]
- [3] Wikipedia <https://hr.wikipedia.org/> [Pristupljeno: 30.04.2022.]
- [4] A.J.Marshall <https://ajmarshall.com/wp-content/uploads/2017/07/S690.pdf> [Pristupljeno: 30.04.2022.]
- [5] Kostadin Tihana. Čelici i željezni ljevovi. Karlovac; 2017. [Pristupljeno: 02.05.2022.]
- [6] Golubić Stjepan. Tehnički materijali, 1. dio: Metalni materijali. 2019.
[Pristupljeno: 02.05.2022.]
- [7] Kožuh Stjepan. Specijalni čelici. Sisak; 2010. [Pristupljeno: 04.05.2022.]
- [8] Nikolić Ružica R., Lazić Vukić, Arsić Dušan. Application of the S690QL Class Steel in Responsible Welded Structures. Materials Engineering. 2013;174–83.
[Pristupljeno: 05.05.2022.]
- [9] Ivušić Vinko, Franz Mladen, Španiček Đurđica, Ćurković Lidija. Materijali 1.
[Pristupljeno: 10.05.2022.]
- [10] Toplinska obrada čelika https://ag2019-2020.e-ucenje.unipu.hr/pluginfile.php/106117/mod_folder/content/0/Predavanja/10%20Toplinska%20Obrada%20C4%8Delika.pdf?forcedownload=1 [Pristupljeno: 10.05.2022.]
- [11] SSAB. Welding Hardox and Weldox
https://www.aemach.com/hardox/pdf/011_SSAB_plate_welding_UK.pdf
[Pristupljeno: 10.05.2022.]
- [12] Mayr Peter. Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels . [Graz]: Faculty of Mechanical Engineering; 2007.
[Pristupljeno: 30.04.2022.]
- [13] Hansson Per. Control of weldability . [Stockholm]: Royal Institute of Technology; 2004.
[Pristupljeno: 13.05.2022.]
- [14] TWI <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-the-heat-affected-zone>
[Pristupljeno: 13.05.2022.]
- [15] Ibrahimspahić Adis. Hladne pukotine - uzroci nastanka i tehnološke mjere za izbjegavanje. Sarajevo; 2015. [Pristupljeno: 14.05.2022.]
- [16] SSAB. Welding of Strenx
<https://www.oxycoupage.com/FichiersPDF/Ssab/English/Strenx/Welding%20Strenx%20700%20MC.pdf> [Pristupljeno: 16.05.2022.]
- [17] Mišina Nedjeljko, Oršulić Marijo, Polajnar Ivan. Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji. Naše more. 2003;50.
[Pristupljeno: 14.05.2022.]
- [18] Horvat Marko, Samardžić Ivan, Kondić Veljko, Kondić Živko. STRENX®1300 – Analiza parametara zavarivanja. Društvo za tehniku zavarivanja. 2019;283–93.
[Pristupljeno: 18.05.2022.]
- [19] Horvat Marko, Bilić Marijan, Kondić Veljko. Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija. Technical journal. 2013;132–7.
[Pristupljeno: 18.05.2022.]
- [20] Mujić Nedim. Osnovni parametarni REL zavarivanja. [Pristupljeno: 20.05.2022.]
- [21] Bajić N, Sijački - Zeravčić V, Bobić B, Čikara D, Arsić M. Filler Metal Influence on Weld Metal Structure of Microalloyed Steel. Welding Journal. 2011;
[Pristupljeno: 25.05.2022.]

- [22] Kah P, Pirinen M, Suoranta R, Martikainen J. Welding of Ultra High Strength Steels. *Advanced Materials Research*. 2013 Nov;849:357–65. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.849.357 [Pristupljeno: 26.05.2022.]
- [23] Duane K. Miller. Use Undermatching Weld Metal Where Advantageous. *Welding Innovation*. 1997;14. [Pristupljeno: 26.05.2022.]
- [24] Infosolda https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/EN-007-Use-Undermatching-Weld.pdf [Pristupljeno: 06.06.2022.]
- [25] Eurotehnika <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/transpocket-180-set/> [Pristupljeno: 06.06.2022.]
- [26] Specsán <http://specsán.com/electric-generator-mosa/mosa-ts-400-sc-el/> [Pristupljeno: 06.06.2022.]
- [27] TBWS <https://tbws.co.uk/shop/mosa-ts-400-psel-diesel-engine-driven-welder-generator/> [Pristupljeno: 10.06.2022.]
- [28] Indiamart <https://www.indiamart.com/proddetail/6-point-chino-chart-recorder-22571114462.html> [Pristupljeno: 10.06.2022.]
- [29] HRN EN ISO 7438:2020; Metalni materijali - Ispitivanje savijanjem. [Pristupljeno: 12.06.2022.]
- [30] Pulstec https://www.pulstec.net/wp-content/uploads/2022/03/Flier-micro-X360s_rev3.pdf [Pristupljeno: 12.06.2022.]

PRILOZI

I. Certifikati elektroda

Naročnik / Besteller / Purchaser:	Prevzemni certifikat Abnahmeprüfzeugnis Inspection certificate	
	Št. / Nr. / No. 2021 121	Datum/Datum/Date 20.8.2021
	Naročilno št. / Bestellung Nr. / Order No.	Dobavni list / Lieferschein / Delivery note
Znak Izvedenca Zeichen des Sachverständigen Inspector's stamp	Izdelek / Erzeugnis / Product VARILNE ELEKTRODE	

Pos.	Dobavno prevzemni pogoji / Lieferbedingungen / Terms of delivery
1	AWS A-5.5 : E 11018-G ; EN ISO 18275-A ; ~ E 69 6Mn2NiCrMo B 42 HS

Kemična analiza / Chemische Zusammensetzung / Chemical Composition													EN 10204-2.2				
Poz.	Št. sarže Schmelzen Nr. Cast No.	Kvaliteta Werkstoff Quality	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Ti	Al	Sn	Fe
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	041310	EVB 80	0,050	0,400	1,800			0,400	2,200		0,450						

Mehanske lastnosti / Mechanische Eigenschaften / Mechanical properties										EN 10204-2.2	
Poz.	Št. sarže Schmelzen Nr. Cast No.	Tela Gewicht Weight	Kvaliteta Werkstoff Quality	Dimenzija Abmessung Dimension	Napetost tečenja Streckgrenze Yield strength	Natezna trdnost Zugfestigkeit Tensile strength	Raztezek Bruchdehnung Elongation	Žilavost (ISO-V) Kerbschlagarbeit Impact test	Temperatura Temperatur Temperature		
		kg		mm	MPa	MPa	%	J	(°C)		
1	041310	20,00	EVB 80	3,25	>700	810-960	>17	>47	-60		



CARBO-WELD GmbH Im Hasseldamm 21 D-41352 Korschenbroich

INSTRUMENTACIJA ELIMP d.o.o.

STROJARSKA 8

HR - 10000 ZAGREB

Kroatien

WORKS CERTIFICATE : 2.2

according to EN 10204-2.2

Certificate No. 140002

Order No.	Order Igor	date 10.05.2021								
our Order-No.	211993									
Trade Name	CARBOWELD 82 B									
Standard Designation	EN ISO 14172 : E Ni 6082 (NiCr20Mn3Nb) AWS A5.11 : ENiCrFe-2 / MOD.									
Material No.	2.4648									
Dimension	3,2 X 350 mm									
Heat No.	04824844									
Quantity	10 KG									
Chemical composition in % - DIN EN ISO 6847										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe	
0,018	0,404	4,150	0,008	0,003	20,270	0,850	Basis	2,280	2,610	
Tensile Test					according to DIN EN ISO 6892-1			Specimen preparation		DIN EN ISO 5178
Hardness		T Test temp. °C		Rp Yield strength 0.2% MPa		Rm Tensile strength MPa		A Elongation % Lo=5d		
				420		780		42		
Impact Test					according to DIN EN ISO 148-1			Specimen preparation		DIN EN ISO 9016
T Test temp. °C		KV Absorbed energy minimum values J								
-196		96								

Town / Town date / Date
Korschenbroich 30.06.2021

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und gilt ohne Unterschrift.
This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

Abnahmebeauftragter
Authorized representative
Andreas van Dyk

Carbo-Weld Schweißmaterialien GmbH
Im Hasseldamm 21
D-41352 Korschenbroich
VAT ID/Ust.Jd.Nr. DE120144606

info@carbowed.de
www.carbowed.de
Amtsgericht Neuss HRB 13445

fon +49 2161 564 83 - 0
fax +49 2161 564 83 - 10
Geschäftsführung:
Carsten van Sambeck

Sparkasse Düsseldorf
Deutsche Bank Krefeld

IBAN DE71 3005 0110 1007 8799 58
IBAN DE71 3207 0080 0035 9656 00

BIC DUSS DE 3300
BIC DEUT DE 3300

