Zavarivanje nodularnog lijeva

Despetović, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:225783

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Hrvoje Despetović

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Hrvoje Despetović

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem profesoru dr.sc. Ivici Garašiću koji mi je svojim stručnim znanjem te ustupljenim podatcima pomogao u izradi ovog završnog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studija.

Hrvoje Despetović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **HRVOJE DESPETOVIĆ** Mat. br.:0035209518

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARIVANJE NODULARNOG LIJEVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDING OF NODULAR CAST IRON**

Opis zadatka:

Proučiti značajke i zavarljivost nodularnog lijeva. Opisati specifičnosti tehnologije zavarivanja nodularnog lijeva te posebno analizirati izbor dodatnih materijala i parametara pri zavarivanju. Razraditi klasifikaciju i označavanje sukladno europskim normama. Dati primjere dijelova koji se zavaruju u svakodnevnoj industrijskoj praksi.
U eksperimentalnom dijelu za lijev EN-GJS-400-18LT debljine 20mm odrediti odgovarajuću tehnologiju navarivanja s ciljem postizanja veće otpornosti na trošenje. Provesti ispitivanja sukladno HRN EN ISO 15614-7 te posebno analizirati promjene u mikrostrukturi zone zavarivanja. U konačnici donijeti zaključke o prikladnosti tehnologije navarivanja za realnu primjenu.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. NODULARNI LIJEV 2
2.1. Svojstva nodularnog lijeva 3
2.2. Solidifikacija i toplinske deformacije 3
2.3. Vrste nodularnog lijeva 4
2.4. Vrste nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563 6
2.5. Dobivanje i metalurgija nodularnog lijeva 8
2.5.1. Oblik i raspored grafita 8
2.5.2. Kontrola kvalitete u proizvodnji 8
2.5.3. Toplinska obrada 8
2.6. Mehanička svojstva 9
2.6.1. Utjecaj sastava 9
2.6.2. Utjecaj oblika grafita 10
2.6.3. Utjecaj veličine presjeka 10
3. REPARATURNO ZAVRIVANJE 11
3.1. Postupci zavarivanja 12
3.1.1. REL postupak 12
3.1.2. Zavarivanje praškom punjenom žicom 14
3.2. Zavarivanje nodularnog lijeva 16
3.2.1. Zavarivanje nodularnog s predgrijavanjem 16
3.2.2. Zavarivanje nodularnog lijeva na hladno 16
4. Norma za ispitivanje zavarenih spojeva; navarivanje 18
4.1. Područje pokrivanja norme HRN EN ISO 15614-7 18
4.2. Ispitni uzorak 18

4.3. Kontrola i ispitivanje ... 20
4.4. Prošireno područje pokrivanja WPS-a ... 23

5. Eksperimentalni dio ... 25
5.1. Određivanje parametara zavarivanja ... 26
5.1.1. Navarivanje REL postupkom ... 26
5.1.2. Navarivanje prahom punjenom žicom ... 29
5.2. Ispitivanje navara ... 30
5.2.1. Vizualno ispitivanje zavara ... 31
5.2.2. Ispitivanje penetrantima ... 32
5.2.3. Ispitivanje makrostrukture ... 33
5.2.4. Ispitivanje mikrostrukture ... 34
5.2.5. Ispitivanje tvrdoće ... 36
5.2.6. Ispitivanje kemijskog sastava ... 38

6. Zaključak ... 40
LITERATURA ... 41
PRILOZI ... 42

POPIS SLIKA

Slika 1 Mikrostruktura nodularnog lijeva [2] 2
Slika 2 Razlika mikrostruktura feritnog i perlitnog nodularnog lijeva [3] 5
Slika 3 Shema ručnog elektrolučnog zavarivanja [5] 12
Slika 4 Oznake položaja zavarivanja [5] 14
Slika 5 Shema postupka zavarivanja prahom punjenom žicom[6] 15
Slika 6 Oblik žlijeba i podloge za zavarivanje na toplo [8] 16
Slika 7 Preporučeni oblik žlijeba za zavarivanje nodularnog lijeva na hladno [8] 17
Slika 8 Obrada kraja pukotine [8] 17
Slika 9 pločasti ispitni uzorak za navarivanje [10] 19
Slika 10 Ispitni uzorak- cijev [10] 20
Slika 11 Položaji ispitnih uzoraka kod navarivanja ploče [10] 22
Slika 12 Položaji ispitnih uzoraka kod navarivanja cijevi [10] 22
Slika 13 Priprema utora za navarivanje 25
Slika 14 Svojstva metala zavara [11] 27
Slika 15 Etiketa pakiranja elektroda 27
Slika 16 Redoslijed zavarivanja 27
Slika 17 Navarivanje nodularnog lijeva REL postupkom 28
Slika 18 Navarivanje nodularnog lijeva PPŽ postupkom 30
Slika 19 Navari zavareni REL postupkom 31
Slika 20 Penetrantsko ispitivanje pukotina 33
Slika 21 Niz tvrdoće za postupak 111 37
Slika 22 Niz tvrdoće za postupak 136 37
Slika 23 Spektar zračenja metala zavara postupkom REL 38
Slika 24 Spektar zračenja za navar izveden postupkom 136 39

POPIS TABLICA

Tablica 1 Približni sastav nelegiranih željeznih lijevova [1] 3
Tablica 2 Volumno skupljanje lijevanih legura [1] 4
Tablica 3 Vrste nodularnog lijeva sa pripadajućim mehaničkim svojstvima [9] 7
Tablica 4 Karakteristike obloga elektroda 13
Tablica 5 Kontrola i ispitivanje ispitnih uzoraka [10] 21
Tablica 6 Područje pokrivanja za debljine osnovnog materijala 23
Tablica 7 Kemijski sastav osnovnog materijala 25
Tablica 8 Mehanička svojstva osnovnog materijala 26
Tablica 9 Pojedinosti postupka zavarivanja; REL 27
Tablica 10 Pojedinosti postupka zavarivanja; PPŽ 29
Tablica 11 Kemijski sastav dodatnog materijala 29
Tablica 12 Očekivana mehanička svojstva metala zavara 29
Tablica 13 Vrsta i opseg ispitivanja 30
Tablica 14 Fotografije zavara za vizualnu kontrolu 32
Tablica 15 Mikrostruktura uzoraka 35
Tablica 16 Tvrdoća uzoraka 36
Tablica 17 Kemijski sastav metala navara za uzorak 111 38
Tablica 18 Kemijski sastav uzorka 136 39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
MZ		Metal zavara
OM		Osnovni materijal
PPŽ		Zavarivanje prahom punjenom žicom
REL		Ručno elektrolučno zavarivanje
WPS		Specifikacija postupka zavarivanja
ZUT		Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Tema završnog rada je „Zavarivanje nodularnog lijeva.“ Prije opisivanja same problematike zavarivanja nodularnog lijeva, bitno je dobro poznavati sami materijal, njegovu strukturu, svojstva, kemijski sastav. U okviru rada su opisani postupci zavarivanja nodularnog lijeva s i bez predgrijavanja, skupa s naputcima za pripremu spoja i tehnikama zavarivanja. U radu je detaljno opisan postupak kvalifikacije postupka zavarivanja za navarivanje metala. Također su navedena i potrebna ispitivanja za dokazivanje kvalitete zavara.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada je prikazan postupak kvalificiranja postupka navarivanja za nodularni lijev EN-GJS-400-18LT u skladu s normom HRN EN ISO 15614-7. detaljno su opisani korišteni dodatni materijali i parametri zavarivanja. Provedena su sva ispitivanja koja norma propisuje uz popratne slike iz laboratorija.

Ključne riječi: nodularni lijev, reparaturno zavarivanje, navarivanje

SUMMARY

The topic of this paper is „ductile iron welding.“ Before describing the problematics of welding ductile iron itself, it is important to know something about material itself, its structure, properties and its chemical composition. The paper describes the welding procedures for welding ductile iron with and without preheating, as well as instructions for joint preparation and welding techniques. The process of welding procedure qualification for overlay welding is described in detail.

In the experimental part of this paper the procedure of qualification of the welding process for ductile iron EN-GJS-400-18LT in accordance with the standard HRN EN ISO 15614-7 is presented. The filler materials used, and welding parameters are described in detail. All tests required by the standard were performed and captured with pictures presented in this paper.

Key words: ductile iron, repair welding, overlay welding

1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju istorodnih materijala taljenjem ili pritiskom uz ili bez dodavanja dodatnog materijala na takav način da se dobije homogeni zavareni spoj.

Spajanje materijala je problem s kojim su se ljudi suočili od samih početaka civilizacije. Ovisno o povijesnim razdobljima i materijalima koji su se koristili, ljudi su spajali predmete pomoću užadi, a kasnije kod izrade složenijih alata raznim drugim spojevima kod kojih bi se sila prenosila oblikom. Od početaka upotrebe metala, dominantni načini spajanja su bili kovačko zavarivanje ili zakovani spojevi. To se mijenja početkom 20. stoljeća i razvojem postupaka zavarivanja.

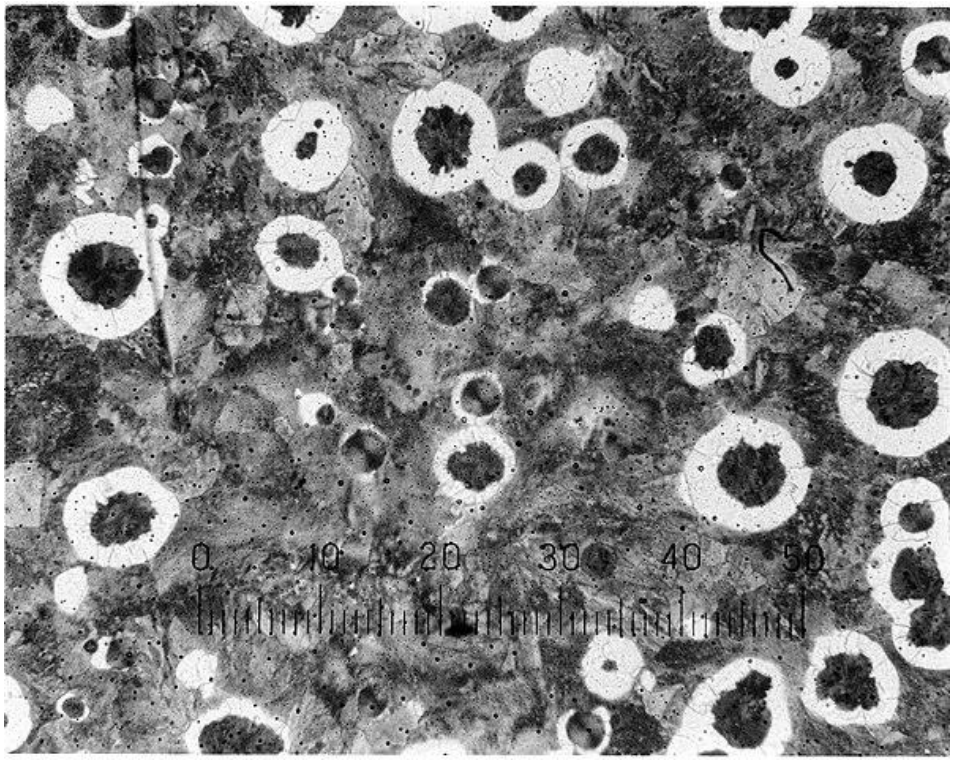
Za zavarivanje se mogu koristiti različiti izvori topline kako bi se rastalio osnovni i dodatni materijal. To mogu biti plamen, električni luk, zračenje (laser), trenje, električni otpor i drugi. Dodatna fleksibilnost je postojanje brojnih postupaka zavarivanja pa stoga zavarivanje možemo izvoditi u radionici, na terenu ili pod vodom.

Zavarivanje je najčešće povezano s proizvodnjom metalnih konstrukcija i dijelova strojeva ili uređaja. Osim zavarivanja u proizvodnji, vrlo je značajno i reparaturno zavarivanje. Neke dijelove, posebno odljevke, nije isplativo kupovati ili proizvoditi pa se oni popravljaju zavarivanjem.

Nodularni lijev je teško zavarljiva legura, no gdje je moguće, takvi se dijelovi ipak popravljaju zavarivanjem. Prilikom zavarivanja nodularnog lijeva potrebno je dobro odrediti parametre zavarivanja i dodatni materijal, što je detaljno opisano u ovom radu.

2. NODULARNI LIJEV

Nodularni lijev, poznat i kao žilavi lijev je vrsta željeznog lijeva u kojoj je grafit prisutan u obliku malih kuglica (nodula) koje su obavijene slojem perlitne strukture (bijela ovojnica) što se vidi na slici 1. U nodularnom lijevu se eutektički grafit odvaja od taline na način sličan kao kod sivog lijeva. Dapače, zbog dodatka posebnih legirnih elemenata u tekućem stanju prije lijevanja, grafit raste u obliku kuglica. Željezni lijev s kuglastim grafitom ima puno veću čvrstoću i istezljivost u odnosu na sivi ili temper lijev. Može se reći da je to kompozit kojem kuglice grafita daju posebna svojstva. [1]



Slika 1 Mikrostruktura nodularnog lijeva [2]

Uz dobru žilavost, relativno visoka čvrstoća i tvrdoća nodularnog lijeva daju mu prednosti u primjeni s obzirom na sivi i temper lijev za dijelove s velikom opterećenjima. Isto tako, nodularni lijev ne zahtijeva dodatne toplinske obrade poput temper lijeva pa se i unatoč potrebi legiranja taline može s istim usporediti. Osim toga, i iskoristivost taline mu je veća nego ona kod temper lijeva, a učestalost grešaka kod lijevanja je manja.

Zbog svojih povoljnih mehaničkih svojstava se primjenjuje kao zamjena za čelične otkivke srednje i veće masivnosti. Nodularni lijev se koristi za izradu tlačne opreme (ventili, pumpe, spojnice za cijevi), dijelove upravljačkog mehanizma automobila, zupčanike, košuljice cilindara, stapajice i složena vratila.

2.1. Svojstva nodularnog lijeva

U pravilu se sastav nelegiranog nodularnog lijeva razlikuje od sivog i temper lijeva (tablica 1). Sirovina za dobivanje nodularnog lijeva mora biti veće čistoće. Nodularni lijev je kao tekućina vrlo livljiv, ali ima veliku površinsku napetost. Iz tog razloga kalupi i oprema za lijevanje nodularnog lijeva moraju biti čvrsti i imati dobru toplinsku provodnost. [1]

Tablica 1 Približni sastav nelegiranih željeznih lijevova [1]

Vrsta	Sastav, %										
	TC[a]	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Sivi lijev	3.25-3.50	0.50-0.90	1.80-2.30	0.05-0.45	0.05-0.20	0.05-0.10	0.15-0.40	0.12 max	0.15 max	. . .	. . .
Temper lijev	2.45-2.55	0.35-0.55	1.40-1.50	0.04-0.07	0.05-0.30	0.03-0.10	0.03-0.40	0.03 max	0.05-0.07	. . .	. . .
Nodularni lijev	**3.60-3.80**	**0.15-1.00**	**1.80-2.80**	**0.03-0.07**	**0.05-0.20**	**0.01-0.10**	**0.15-1.00**	**0.03 max**	**0.002 max**	**0.005-0.20**	**0.03-0.06**

a) TC- ukupan udio ugljika

Nodularni lijev se obično koristi bez toplinske obrade. Toplinska obrada nodularnog lijeva se uglavnom svodi na žarenja koja smanjuju čvrstoću, i poboljšavaju žilavost. Legiranje nodularnog lijeva niklom, silicijem, kromom ili bakrom poboljšava korozijska svojstva i otpornost na visoke temperature. [1]

2.2. Solidifikacija i toplinske deformacije

Izlučivanje grafita tijekom solidifikacije za posljedicu ima rast volumena, koji nadoknađuje smanjenje volumena uzrokovano faznim prijelazom iz tekućine u krutinu. Nodularni lijev zahtjeva minimalnu upotrebu pojila (šupljine u kalupu koje služe napajanju odljevka talinom kako bi se nadoknadio volumen izgubljen u procesu skrućivanja). Jedino sivi lijev ne zahtijeva napajanje iz pojila i ima veću iskoristivost taline od nodularnog lijeva.

Temper lijev i čelični lijev trebaju intenzivno napajanje i imaju značajno manju iskoristivost taline u odnosu na nodularni lijev. [1]

Konstruktori kalupa često moraju kompenzirati volumno skupljanje željeznih lijevova prilikom solidifikacije i hlađenja tako da kalupe naprave većih dimenzija od ženjenih dimenzija odljevka. Nodularni lijev u pravilu treba manju kompenzaciju nego što je to kod drugih željeznih legura. Uobičajene vrijednosti skupljanja su navedene u tablici 2. [1]

Tablica 2 Volumno skupljanje lijevanih legura [1]

Vrsta lijevanog metala	Skupljanje, %
Nodularni lijev	**0-0.7**
Sivi lijev	**1.0**
Temper lijev	**1.0**
Bijeli lijev	**2.0**
Ugljični čelik	**2.0**
Legirani čelik	**2.5**

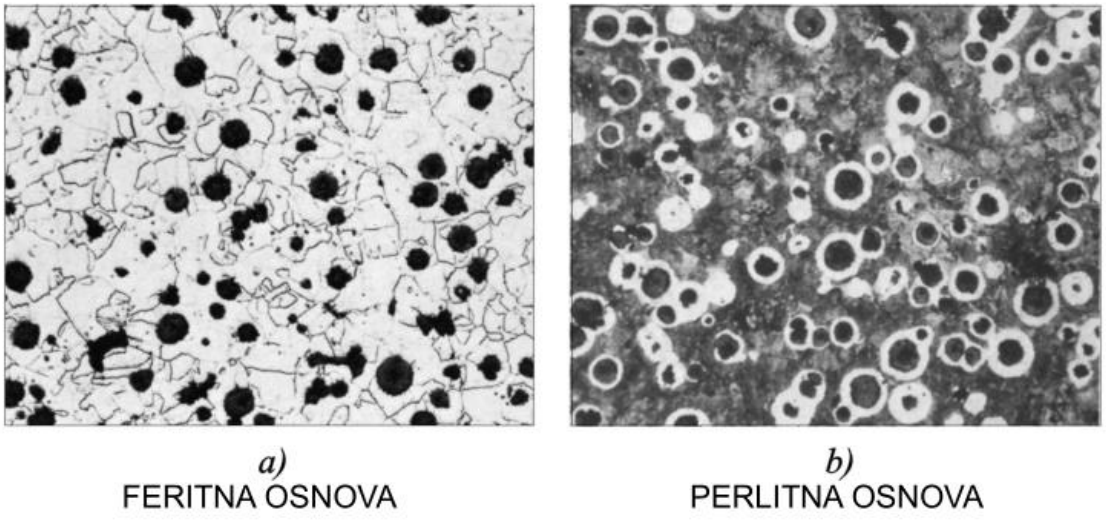
Stvarno sakupljanje može djelomično odstupati od gore navedenih postotaka i često ovisi o smjeru u kalupu zbog ovisnosti tijeka solidifikacije o obliku odljevka. [1]

2.3. Vrste nodularnog lijeva

Osnovna podjela nodularnih ljevova je prema vrsti željezne osnove. Željezna osnova može biti[3]:

- feritna- niža čvrstoća i viša istezljivost
- perlitna- viša čvrstoća i niža istezljivost
- feritno-perlitna
- austenitna- visokolegirane vrste.

Razlika tih mikrostruktura je prikazana na slici 2.



Slika 2 Razlika mikrostruktura feritnog i perlitnog nodularnog lijeva [3]

Osnovna razlika između 2 osnovne skupine, feritnog i perlitnog nodularnog lijeva je boja osnove. Feritni nodularni lijev ima bijelu matricu, dok perlitni ima crnu osnovu i feritne ovojnice oko kuglica grafita.

2.4. Vrste nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563

Prema europskoj normi, različite serije nodularnog lijeva se označavaju vlačnom čvrstoćom i najmanjom garantiranom istezljivosti . Slovna oznaka nodularnog lijeva glasi: EN-GJS. Vrste nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563:2011 prikazane su u tablici 3.

Tablica 3 Vrste nodularnog lijeva sa pripadajućim mehaničkim svojstvima [9]

Označivanje materijala		Debljina relevantne stijenke, t, mm	$R_{p0.2}$, N/mm^2, min.	R_m, N/mm^2, min.	A, %, min.
Oznaka, HRN-	Broj				
EN-GJS-350-22-LT [a)]	5.3100	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	210	330	18
		$60 < t \leq 200$	200	320	15
EN-GJS-350-22-RT [b)]	5.3101	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-350-22	5.3102	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-400-18-LT [a)]	5.3103	$t \leq 30$	240	400	18
		$30 < t \leq 60$	230	380	15
		$60 < t \leq 200$	220	360	12
EN-GJS-400-18-RT [b)]	5.3104	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 60$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-18	5.3105	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 60$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-15	5.3106	$t \leq 30$	250	400	15
		$30 < t \leq 60$	250	390	14
		$60 < t \leq 200$	240	370	11
EN-GJS-450-10	5.3107	$t \leq 30$	310	450	10
		$30 < t \leq 60$	Dogovor između proizvođača i kupca		
		$60 < t \leq 200$	Dogovor između proizvođača i kupca		
EN-GJS-500-7	5.3200	$t \leq 30$	320	500	7
		$30 < t \leq 60$	300	450	7
		$60 < t \leq 200$	290	420	5
EN-GJS-600-3	5.3201	$t \leq 30$	370	600	3
		$30 < t \leq 60$	360	600	2
		$60 < t \leq 200$	340	550	1
EN-GJS-700-2	5.3300	$t \leq 30$	420	700	2
		$30 < t \leq 60$	400	700	2
		$60 < t \leq 200$	380	650	1
EN-GJS-800-2	5.3301	$t \leq 30$	480	800	2
		$30 < t \leq 60$	Dogovor između proizvođača i kupca		
		$60 < t \leq 200$	Dogovor između proizvođača i kupca		
EN-GJS-900-2	5.3302	$t \leq 30$	600	900	2
		$30 < t \leq 60$	Dogovor između proizvođača i kupca		
		$60 < t \leq 200$	Dogovor između proizvođača i kupca		

[a)] LT - (engl. *low temperature*) – niska temperatura
[b)] RT – (engl. *room temperature*) – sobna temperatura

2.5. Dobivanje i metalurgija nodularnog lijeva

U proizvodnji nodularnog lijeva treba posvetiti veću pozornost metalurgiji i kontroli procesa nego što je to kod dobivanja drugih ljevova. Potrebno je učestalo mehaničko, kemijsko i metalurško ispitivanje kako bi se održali željena kvaliteta i svojstva. [1]

Proizvodnja visokokvalitetnog nodularnog lijeva započinje dobrim izborom sirovine koja će dati relativno čistu željeznu talinu bez nepoželjnih nečistoća. Ugljik, magnezij, silicij, fosfor i sumpor se moraju održavati na potrebnim količinama. Magnezij i cerij moraju biti u željenim koncentracijama kako bi se grafit izlučio u željenom obliku. Oni moraju biti dovoljno zastupljeni kako bi potisnuli negativno djelovanje npr. antimona, cirkonija, olova ili titana na nodularizaciju. Gore navedeni elementi s lošim utjecajem na nodularizaciju trebaju biti eliminirani iz taline ili svedeni na najmanju moguću mjeru. [1]

Reduciranje udjela sumpora na ispod 0,02% je nužno prije procesa nodularizacije. To se može osigurati prilikom samog taljenja upotrebom sirovina s niskim udjelom sumpora, ili desumporizacijom taline prije dodavanja globulatora. Ako udio sumpora nije dovoljno nizak, moraju se koristiti veće količine skupih globulatora. [1]

2.5.1. Oblik i raspored grafita

Razlikujemo tri osnovne vrste globulatora, od kojih svaka sadrži magnezij. To su nelegirani magnezij, globulatori na bazi nikla i magnezij-ferosilicijski globulatori. Globulator se može dodati u leguru u raznim oblicima; kao žica, u obliku peleta ili briketa. U bilo kojem obliku, magnezij se dodaje tako da isparava, a njegove pare prolaze kroz talinu. Takvim postupkom se smanjuje sadržaj sumpora u talini i potiče izlučivanje grafita u obliku kuglica. [1]

2.5.2. Kontrola kvalitete u proizvodnji

U procesu dobivanja nodularnog lijeva provode se brojna ispitivanja, počevši od analize sirovine i taline prije i nakon dodavanja globulatora. Koriste se posebni testovi za utvrđivanje udjela ugljika i silicija. Za svaku šaržu odljevaka se lijevaju ispitni uzorci za ispitivanje mikrostrukture, i mehaničkih svojstava. [1]

2.5.3. Toplinska obrada

U većini slučajeva odljevci od nodularnog lijeva ne zahtijevaju toplinsku obradu. Ipak, kada je željene svojstva teško ostvariti samim lijevanjem, provodi se toplinska obrada.

Toplinski obrađeni nodularni lijev ima ujednačenija svojstva, posebice ako se radi o odljevcima s velikim rasponom debljina stjenke. [1]

Odljevci od nodularnog lijeva s velikim ili neravnomjernim presjekom se ponekad žare na 540-660°C za popuštanje naprezanja. Takvo žarenje smanjuje vitoperenje i deformacije prilikom naknadne strojne obrade. Mehanička svojstva su nakon takve obrade praktički nepromijenjena. [1]

Kod ljevova s nižom čvrstoćom kod kojih je glavni zahtjev duktilnost, provodi se toplinska obrada u vidu žarenja u svrhu postizanja feritne strukture osnove. Ljevovi većih čvrstoća se provodi zagrijavanje na temperaturu od oko 900°C nakon čega se ovisno o podvrsti lijeva gasi strujom zraka. Takav postupak, uz naknadno popuštanje daje nodularni lijev perlitne strukture. Nodularni ljevovi najvećih čvrstoća se obrađuju na sličan način, ali s većim brzinama ohlađivanja. [1]

2.6. Mehanička svojstva

Većina standardnih vrsta nodularnog lijeva je definirana najmanjom zahtijevanom čvrstoćom i istezljivosti koji se ispituju ljevačkim testovima odlivenih uzoraka. Svojstva uzoraka su dobra približna procjena svojstava gotovih odljevaka. Testiranje takvih uzoraka olakšava usporedbu kvalitete metala između različitih serija i različitih proizvođača nodularnog lijeva. Uzorci se lijevaju tako da imaju jednak režim hlađenja kao i odljevci. Ako je takvo lijevanje ekonomski neisplativo ili nemoguće, stvarna svojstva odljevaka se mogu razlikovati od svojstava uzorka. [1]

2.6.1. Utjecaj sastava

Svojstva nodularnog lijeva prvenstveno ovise o njegovu kemijskom sastavu. Sastav treba biti ujednačen unutar odljevka i između odljevaka iz istok kalupa. Velik broj kemijskih elemenata utječe na svojstva odljevka, a najveći utjecaj imaju oni elementi koji imaju snažan utjecaj na oblik kristalne rešetke ili na oblik i raspodjelu grafitnih kuglica. [1]

Sadržaj ugljika u tekućem metalu utječe na livljivost i na karakteristike toplinskog stezanja metala koji su bitni za konstruiranje kalupa. Udio ugljika također utječe na broj i veličinu grafitnih čestica koje nastaju pri solidifikaciji, na što također utječe postupak globularizacije. [1]

Silicij je snažan grafitizator. U normalnim granicama sastava, povećanje sadržaja silicija daje strukturu s većim udjelom ferita. Povećanje udjela ferita poboljšava istezljivost i malo povisuje granicu tečenja, ali istovremeno uzrokuje sniženje vlačne čvrstoće i tvrdoće. [1]

Od ostalih elemenata koji se koriste za poboljšavanje svojstava nodularnog lijeva, mangan služi kao stabilizator perlita i povisuje čvrstoću, ali smanjuje žilavost. Nikal se koristi za poboljšanje čvrstoće tako da promovira formiranje sitno zrnatog perlita. Uz to nikal još poboljšava toplinsku obradivost. Bakar djeluje kao stabilizator perlita, i time povisuje čvrstoću. Molibden se može dodati za stabilizaciju strukture na povišenim temperaturama, a time se zadržava čvrstoća na temperaturama do 650°C. [1]

2.6.2. Utjecaj oblika grafita

Prijelaz grafita iz listićavog u nodularni oblik, koji se događa zbog dodatka magnezija tekućem željezu, rezultira povećanjem čvrstoće odljevka 5 do 7 puta. Prijelazni oblici između listićavog i kuglastog grafita daju mehanička svojstva lošija od onih kod nodularnog lijeva, ali i dalje bolja od svojstava sivog lijeva sličnog sastava. [1]

2.6.3. Utjecaj veličine presjeka

Brzina hlađenja je parametar najčešće određen veličinom presjeka. O brzini hlađenja ovisi veličina kuglica grafita i mikrostruktura osnove. Što je presjek veći, hlađenje je sporije i veće su kuglice grafita koje nastaju pri solidifikaciji. Kod velikih presjeka postoji opasnost da grafit solidificira u nepravilne oblike što se sprječava dodatkom cerija u leguru. [1]

3. REPARATURNO ZAVRIVANJE

Nakon pojave oštećenja nekog strojnog elementa, dijela postrojenja ili bilo kakvog kvara dolazi do zastoja rada dijela pogona, a velika oštećenja mogu uzrokovati i zaustavljanje rada cijelog proizvodnog sustava te prekid isporuke proizvoda unutar vremenskih rokova. Takve kvarove se teži otkloniti brzim popravcima uz što manje troškove. Takvi popravci se primjenjuju u gotovo svim granama gospodarstva; građevinarstvu, naftnoj industriji, poljoprivredi, pa čak i u kućanstvima.

U slučaju loma ili drugog oštećenja, često zamjena dijela novim nije moguća i tada se traži brzo i što dugotrajnije rješenje. Nerijetko se u praksi odlučuje na reparaturu jer je popravljeni dio jednako kvalitetan i dugotrajan kao i novi, uz značajno manje troškove. Popravci u sferi zavarivanja se mogu podijeliti u 3 skupine[4]:

- Popravci pukotina i lomova te izmjena pojedinih oštećenih dijelova zavarivanjem
- Popravci istrošenih dijelova navarivanjem
- Popravci istrošenih dijelova naštrcavanjem površina.

Osim navedenih tehnologija, u reparaturama se redovito primjenjuju strojna obrada, toplinska obrada, korozivna zaštita... Popravci i sanacije na zavarivanjem su redovito oštećene posude, cjevovodi dizalice i druge konstrukcije. Uglavnom se radi o napuknutim ili slomljenim dijelovima kao što su: blokovi motora, osovine, postolja, alati i drugi strojni dijelovi. Reparature se vrše i na velikim konstrukcijama: dizalicama, kranovima, mostovima, ali i posudama pod tlakom kao što su: kotlovi, kuglasti spremnici, cisterne te na raznim istrošenim mjestima kao na primjer valjcima, ležajnim mjestima, raznim utorima, parnim, plinskim i vodenim turbinama.

Velik dio reparaturnog zavarivanja obuhvaća navarivanje i naštrcavanje istrošenih dijelova. Dijelovi koji se u pravilu navaruju su: osovine, rukavci, klizne površine, vodilice. Naštrcavanje se primjenjuje u slučajevima kada se iz nekog razloga ne smije navarivati. Materijali na kojima se provode takvi popravci su čelici i željezni ljevovi, te ostali metali i njihove legure, no najčešće se radi o čeliku u željeznim ljevovima.

Za izradu strojnih dijelova : osovina, rukavaca, ležajeva, čeljusti i drugih, koriste se nelegirani i legirani čelici koji su podobni za zavarivanje. visoko legirani čelici s velikim

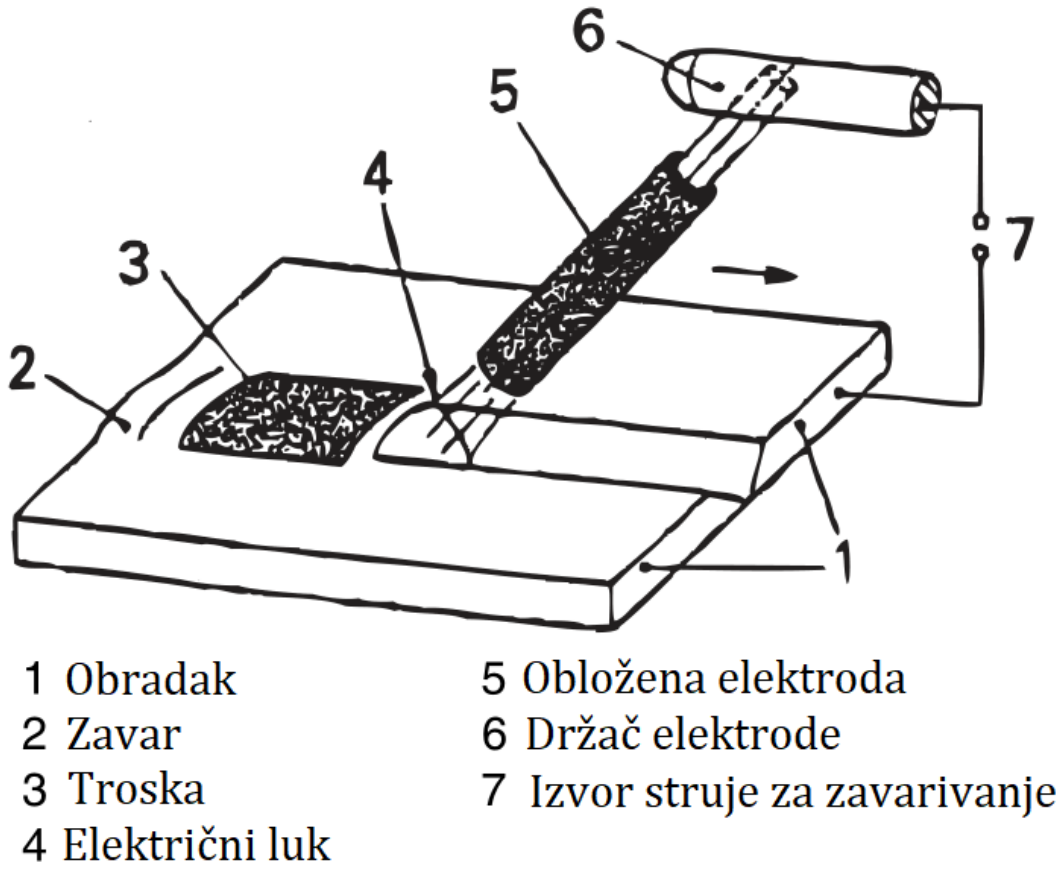
udjelom ugljika, a koji se koriste za izradu strojnih dijelova su slabo zavarljivi, ali se mogu uspješno reparirati navarivanjem ili naštrcavanjem.

3.1. Postupci zavarivanja

U reparaturnom zavarivanju mogu se koristiti svi konvencionalni postupci zavarivanja. Izbor postupka ovisi o vrsti i debljini materijala, kao i o vrsti oštećenja te položaju i pristupačnosti radnog komada. Isto tako, izbor postupka za reparaturu ovisi o mjestu izvođenja, na otvorenom ili u radionici, kao i o opremi koju poduzeće ima na raspolaganju.

3.1.1. REL postupak

Najčešće korišteni postupak u reparaturnom zavarivanju je ručno elektrolučno zavarivanje (REL). To je ujedno i jedan od najstarijih postupaka zavarivanja koji se do danas zadržao u primjeni. Među ostalim postupcima, REL se ističe po niskoj cijeni opreme, a ujedno širokoj sferi primjene. REL postupkom se mogu kvalitetno i uspješno zavarivati brojni materijali, ali je postupak u novije vrijeme istisnut iz proizvodnje drugim postupcima koji se lakše mehaniziraju i robotiziraju.



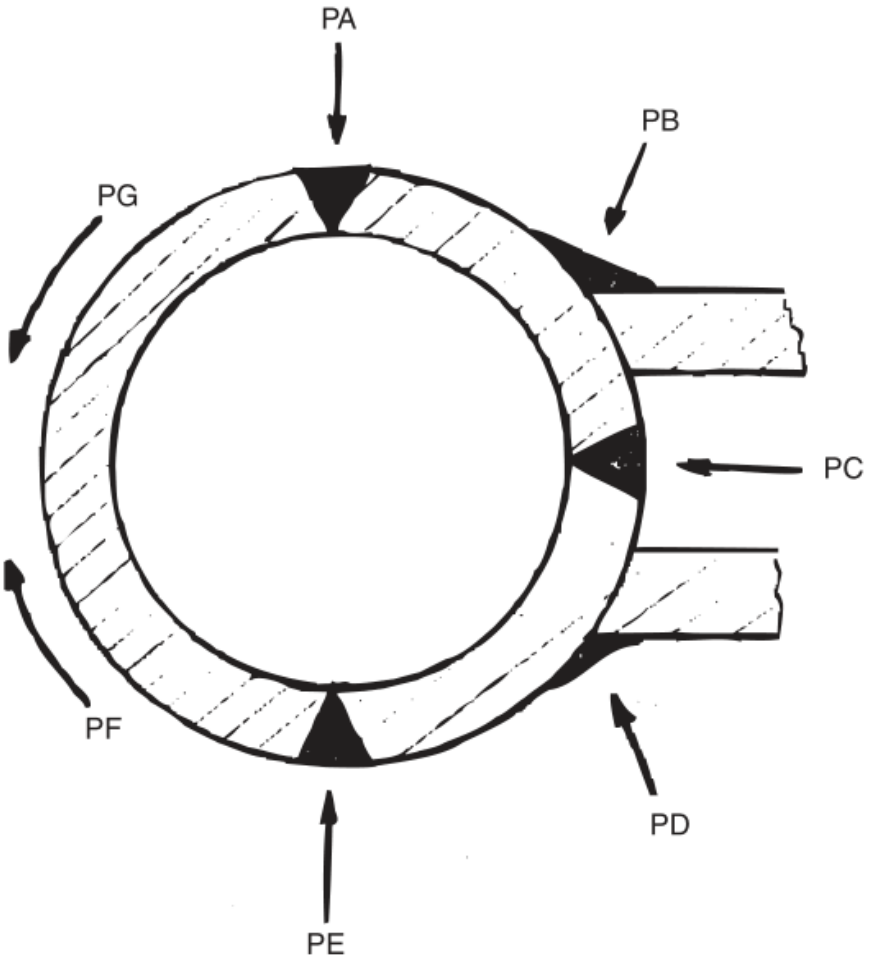
Slika 3 Shema ručnog elektrolučnog zavarivanja [5]

Kod ručnog elektrolučnog zavarivanja nema zaštite taline u vidu dovođenja zaštitnog plina, već se zaštitni plin stvara izgaranjem obloge elektrode. Postoji više vrsta obloga elektroda. 3 najistaknutije su celulozna, rutina i bazična elektroda. Njihove osnovne karakteristike su navedene u tablici 3.

Tablica 4 Karakteristike obloga elektroda

Vrsta obloge elektrode	Karakteristike
Bazična	namijenjena za istosmjernu struju, + pol na elektrodi puno bolja žilavost od rutilne i celulozne potrebna dobra vještina zavarivača
Rutilna	za izmjeničnu ili istosmjernu struju, - pol na elektrodi krhki metal zavara lako rukovanje i uklanjanje troske
Celulozna	za istosmjernu struju na oba polariteta velika brzina zavarivanja, za cjevovode potrebna izvrsna vještina zavarivača

Izbor elektrode ovisi o dva osnovna zahtjeva, o tehnologiji i o materijalu koji se zavaruje. Elektrode s celuloznom oblogom svoju primjenu nalaze u zavarivanju vertikalnih spojeva prema dolje (PG položaj, slika 4) kod kružnog zavarivanja cijevi. S takvim elektrodama se već i kod korijenskih zavara mogu koristiti deblje elektrode.



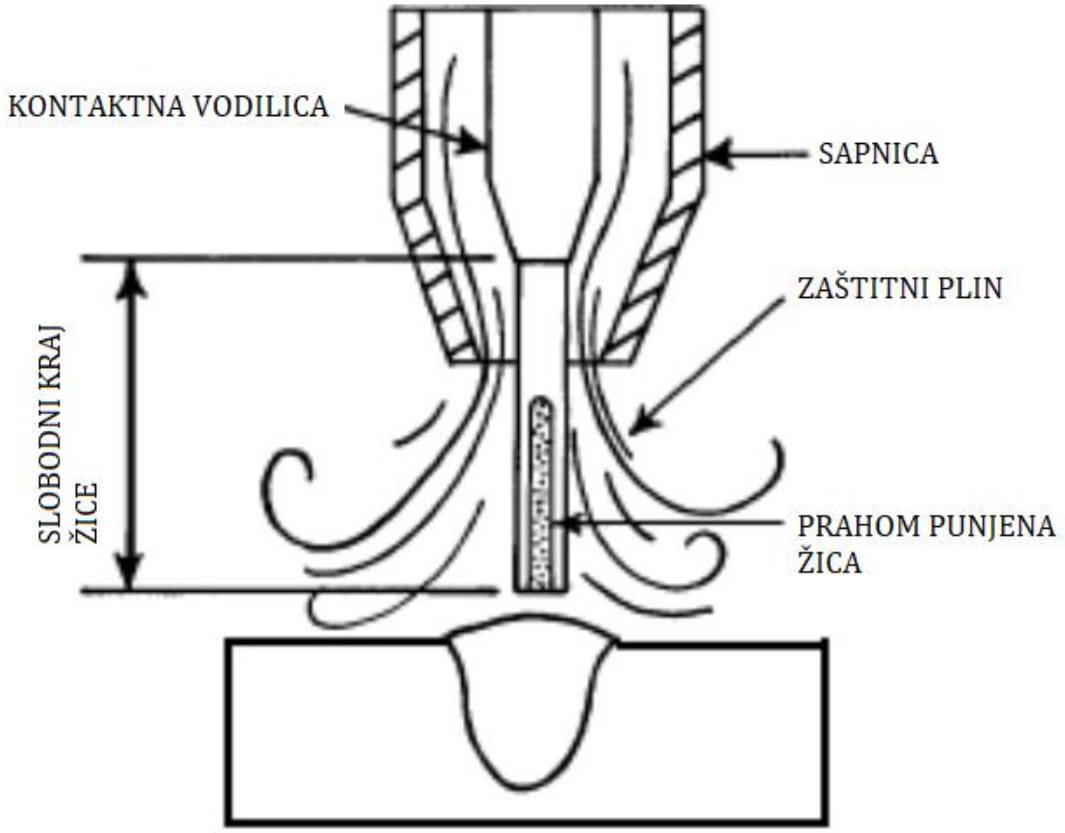
Slika 4 Oznake položaja zavarivanja [5]

Glavna prednost rutilno obloženih elektroda je lako odvajanje troske i ponovno paljenje elektrode. Odvajanje troske je vrlo lako, a zavari dobro izgledaju pa su iz tog razloga ove elektrode vrlo pogodne za zavarivanje manje zahtjevnih spojeva i za neiskusne zavarivače. Bazično obložene elektrode se koriste za zavarivanje u svim položajima. Zavari izgledaju lošije od drugih vrsta elektroda, ali je bolje kvalitete. Prije svega se od drugih elektroda ističe istezljivost zavara i manja sklonost pukotinama. Koriste se za spojeve debljih stijenki i spojeve namijenjene za izlaganje niskim temperaturama. Nizak udio vodika u zavaru čini ove elektrode izrazito pogodnima za zavarivanje čelika visoke čvrstoće. [5]

Drugi kriterij izbora elektrode je materijal. U pravilu svojstva zavara trebaju biti bolja od svojstava osnovnog materijala. Isto tako, kod zavarivanja materijala dobrih korozijskih svojstava, zavar mora biti otporniji na koroziju od osnovnog materijala. [5]

3.1.2. Zavarivanje praškom punjenom žicom

Postupak zavarivanja praškom punjenom žicom je poluautomatski postupak zavarivanja. Dodatni materijal, praškom punjena žica se kontinuirano dodaje u električni luk, odnosno zavar pomoću dodavača žice. Shema postupka zavarivanja je prikazana na slici 5.



Slika 5 Shema postupka zavarivanja prahom punjenom žicom[6]

Ono po čemu se ovaj postupak ističe od drugih je velik depozit tj. velika količina navarenog metala. Ovisno o žici, može se zavarivati bez zaštitnog plina. U odnosu na MIG-MAG postupak, proces zavarivanja je neuredniji i stvara se troska, ali je penetracija bolja i veća je produktivnost. Stoga se ovaj postupak često primjenjuje za zavarivanje debljih komada u proizvodnji.

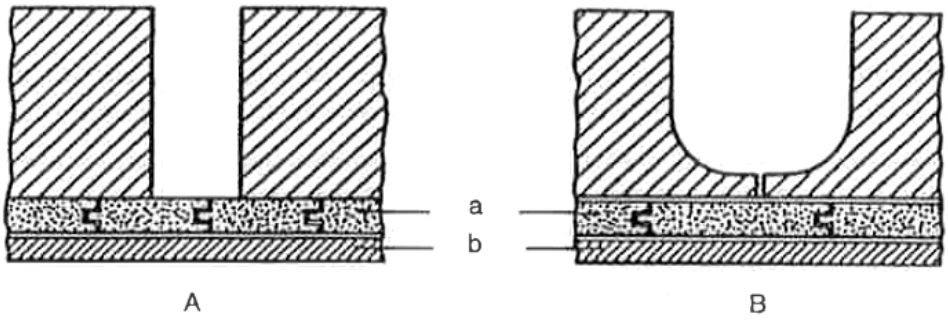
Razlikuju se vrste punjenja žice. Prah može biti rutilni ili bazični kao i kod obloženih elektroda za REL zavarivanje, a osim toga može biti metalni. Jezgra punjene žice omogućuje čišćenje metala zavara, dezoksidaciju, legiranje, bolju stabilnost električnog luka, a troska sprječava oksidaciju metala zavara i usporava hlađenje. Ovaj postupak je povoljan za reparaturno zavarivanje željeznih ljevova u toplom stanju kada je potrebno što brže obaviti zavarivanje. [7]

3.2. Zavarivanje nodularnog lijeva

Kao i kod svih drugih odljevaka, zavarivanju dijelova od nodularnog lijeva treba pristupiti s odgovarajućom pažnjom. Kod zavarivanja nodularnog lijeva općenito vrijede pravila kao i za zavarivanje sivog lijeva. Različito pristupamo zavarivanju sa i bez predgrijavanja.

3.2.1. Zavarivanje nodularnog s predgrijavanjem

Kada se nodularni lijev zavaruje na toplo, radni komad se zagrijava na željenu temperaturu, ovisno o tome koliku tvrdoću treba postići u zoni utjecaja topline (ZUT- u). zagrijavanje se može provoditi ručno plinskim plamenom za, ili u automatskim pećima za komade koji mogu ući u peć. Kod sučeljenih spojeva, odnosno kod zavarivanja lomova i pukotina, treba osigurati da talina ne prolazi kroz spoj pa se postavljaju pločice za pridržavanje taline kao što je prikazano na slici 6.



Priprema žlijeba za zavarivanje dijelova od sivog lijeva postupkom na toplo
A – za zavarivanje plinskim plamenom; B – za zavarivanje REL postupkom;
a – grafitne pločice; b – azbest

Slika 6 Oblik žlijeba i podloge za zavarivanje na toplo [8]

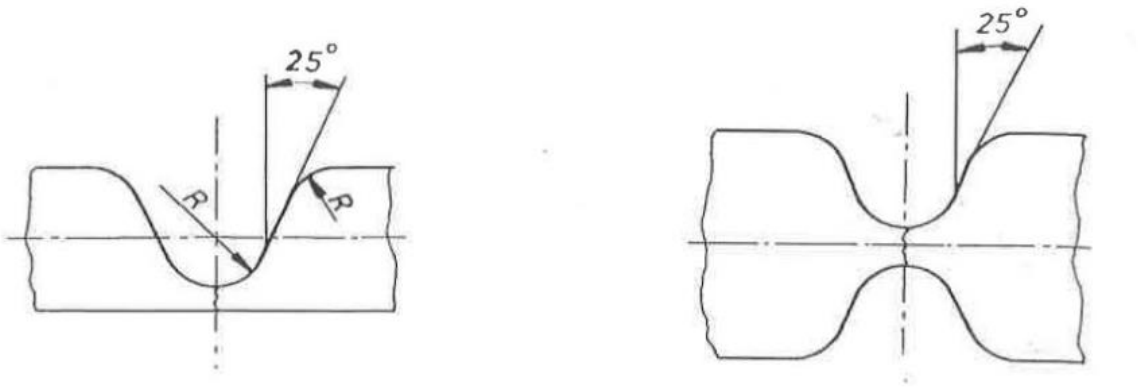
Zavarivanje na toplo, ako se radi o visokim temperaturama predgrijavanja, poželjno je izvoditi bez prekida. Dulji prekidi su rizik za naglo hlađenje i stvaranje pukotina. Kod tako zavarenih spojeva karakterističan je porast tvrdoće u ZUT- u te dodatni porast tvrdoće na području metala zavara.

3.2.2. Zavarivanje nodularnog lijeva na hladno

U praksi postoje slučajevi kada dijelove koje treba zavariti nije moguće demontirati sa stroja. Tada je najjednostavnije dio zavariti bez predgrijavanja. Zavar izveden bez predgrijavanja u pravilu ima lošija svojstva od predgrijanog spoja, ali je trošak popravka znatno niži i postupak jednostavniji. Kako bi se smanjila vjerojatnost nastanka pukotina,

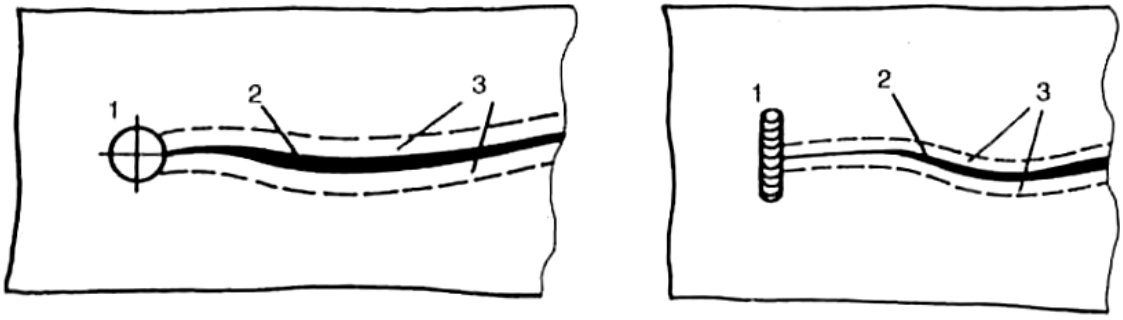
zavarivanje se izvodi od sredine pukotine prema krajevima kratkim zavarima duljine oko 10 promjera elektrode.

Priprema zavara za zavarivanje na hladno je nešto drugačija nego kod zavarivanja na toplo. To treba biti što otvoreniji u žlijeb sa zaobljenim rubovima kao na slici 7.



Slika 7 Preporučeni oblik žlijeba za zavarivanje nodularnog lijeva na hladno [8]

Kada se radi o zavarivanju pukotina na odljevcima, krajeve pukotina treba izbušiti ili zabrusiti i zavariti. Potrebna obrada kraja pukotine je prikazana na slici 8.



Način pripreme spoja za zavarivanje sivog lijeva na hladno
1 – Rupe ili zavari na krajevima pukotine radi sprečavanja njenog širenja; 2 – Pukotina;
3 – Obrada žlijeba

Slika 8 Obrada kraja pukotine [8]

Kod zavarivanja bez predgrijavanja, ne koristi se dodatni materijal jednak osnovnom. Uglavnom se radi o dodatnom materijalu na bazi nikla ili čistog nikla.

4. Norma za ispitivanje zavarenih spojeva; navarivanje

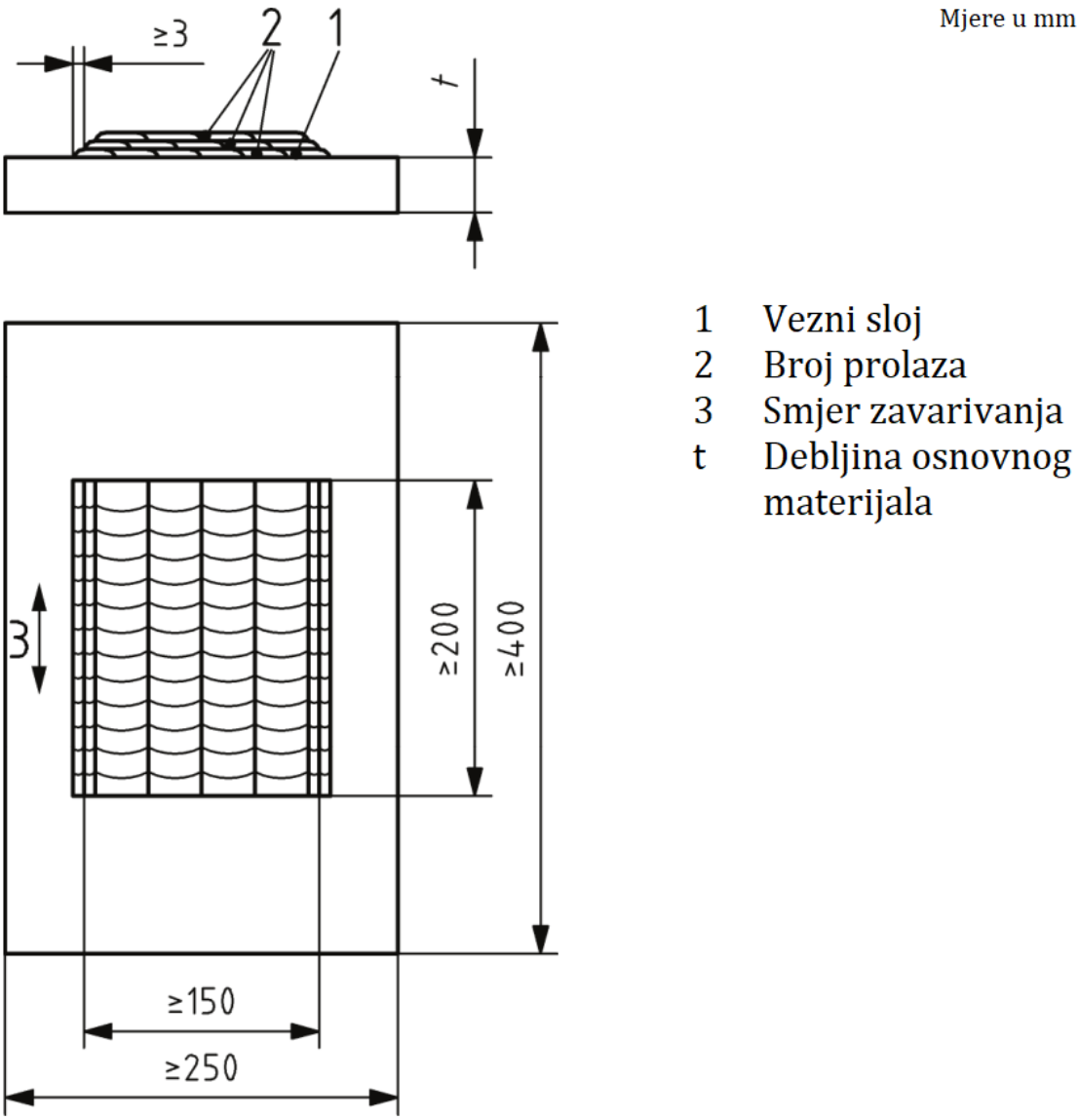
U zavarivanju, kao i ostalim proizvodnim sektorima, vrlo je važno proizvode i postupke izvoditi kako je propisano normama. Time se uvode standardizirani postupci i oznake što omogućuje jasnu komunikaciju inženjera na međunarodnoj razini. Osim toga, izvođenje radova po naputcima norme daje određenu sigurnost u kvalitetu. Tako postoje norme za široki raspon postupaka, a norma HRN EN ISO 15614-7 daje naputke za ispitivanje kvalitete navarenog sloja kod navarivanja metala.

4.1. Područje pokrivanja norme HRN EN ISO 15614-7

Ovaj dio grupe normi HRN EN ISO 15614 sadrži naputke za specifikaciju postupka navarivanja provođenjem analize navara. Norma propisuje uvjete za provođenje ispitivanja i raspon parametara i postupaka za koje vrijedi provedeno ispitivanje. HRN EN ISO 15614-7 je primjenjiva na sve nove postupke zavarivanja. Dapače, specifikacije postupka zavarivanja definirane prema starijim normama ostaju važeće. Ako je pored ispitivanja određenih ovom normom potrebno provesti dodatna ispitivanja, ta ispitivanja moraju biti provedena na uzorcima pripremljenim prema HRN EN ISO 15614-7.

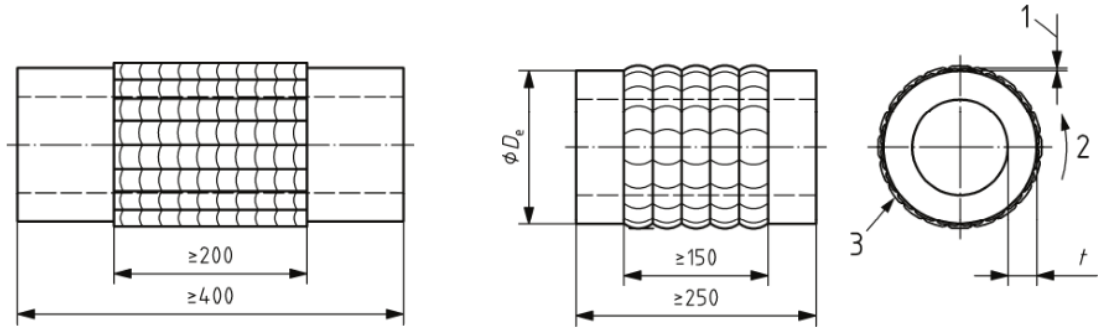
4.2. Ispitni uzorak

Ispitni uzorak treba zavariti istim postupkom ili kombinacijom postupaka koji će se koristiti kasnije u proizvodnji. Isto tako, specifikacija postupka zavarivanja mora biti u skladu s normama. Dimenzije i broj ispitnih uzoraka moraju biti dovoljni da se iz njih mogu napraviti uzorci za potrebna ispitivanja. Debljina i/ili promjer ispitnog uzorka moraju biti unutar granica određenih WPS- om (WPS- specifikacija postupka zavarivanja). Minimalna širina vrha navara mora biti 3 prolaza. Slike 9 i 10 prikazuju propisane oblike ispitnih uzoraka za navarivanje ploča, odnosno cijevi. [10]

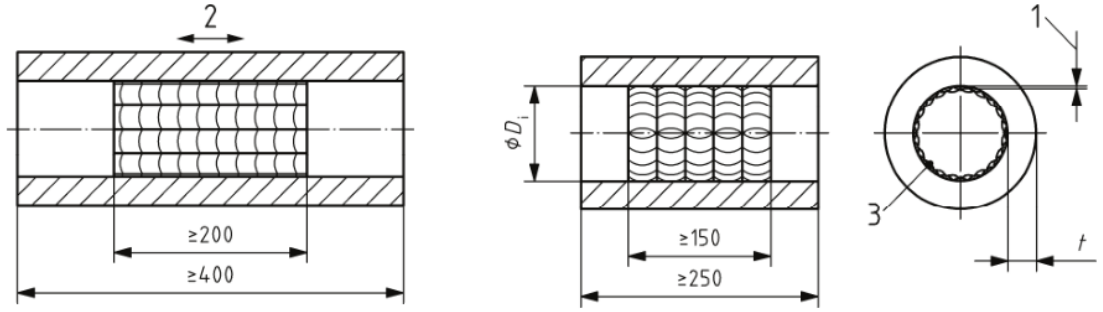


Slika 9 pločasti ispitni uzorak za navarivanje [10]

Mjere u mm



a) Longitudinalno navarivanje, vanjsko **c) Cirkularno navarivanje, vanjsko**



b) Longitudinalno navarivanje, unutarnje **d) Cirkularno navarivanje, unutarnje**

1 Vezni sloj
2 Smjer navarivanja
3 Broj slojeva

D_e Vanjski promjer
D_i Unutarnji promjer
t Debljina osnovnog materijala

Slika 10 Ispitni uzorak- cijev [10]

Priprema i zavarivanje uzoraka trebaju biti provedeni prema WPS-u, a zavarivanje i ispitivanje nadgledano od strane ovlaštenih ispitivača.

4.3. Kontrola i ispitivanje

Ispitivanje navara uključuje nerazorna kao i razorna ispitivanja koja se provode u skladu s tablicom 5.

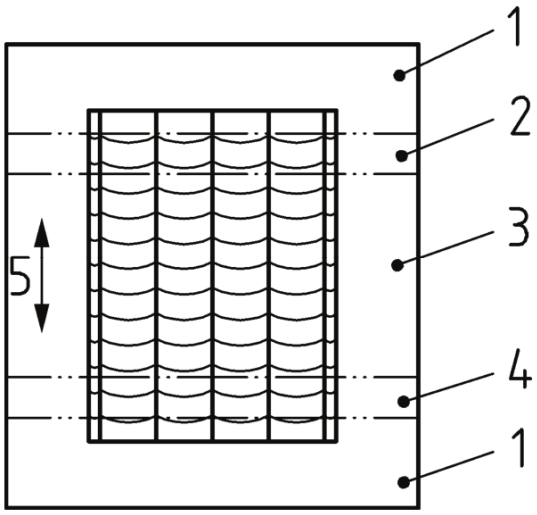
Tablica 5 Kontrola i ispitivanje ispitnih uzoraka [10]

Ispitni uzorak	Vrsta ispitivanja	Opseg ispitivanja	oznaka
Navarivanje (osim otvrdnjavanje površine)	Vizualna kontrola	100%	-
	Ultrazvučno ispitivanje	100%	a
	Ispitivanje penetrantima	100%	b
	Savojno ispitivanje	2 uzorka	c, e
	Ispitivanje makrostrukture	1 uzorak	-
	Ispitivanje mikrostrukture	1 uzorak	d
	Kemijska analiza	1 uzorak	-
	Određivanje udjela δ- ferita	1 uzorak	a
	Ispitivanje tvrdoće	1 niz	d
Otvrdnjavnje površine	Vizualna kontrola	100%	-
	Ispitivanje penetrantima	100%	b
	Ispitivanje makrostrukture	1 uzorak	-
	Ispitivanje mikrostrukture	1 uzorak	d
	Ispitivanje tvrdoće	1 niz	-

a Po potrebi, u skladu s normom
b Za magnetične materijale moguće ispitivanje magnetskim česticama
c Savojno ispitivanje može se zamijeniti ultrazvučnim uz još 2 ispitivanja makrostrukture
d Nije nužno za osnovnu grupu materijala 1.1 i grupu čelika 8 te skupinu 4.x nikla i njegovih legura kao i antikorozivno navarivanje
e Orijentacija savojnog testa treba biti poprečno na smjer navarivanja prvog sloja

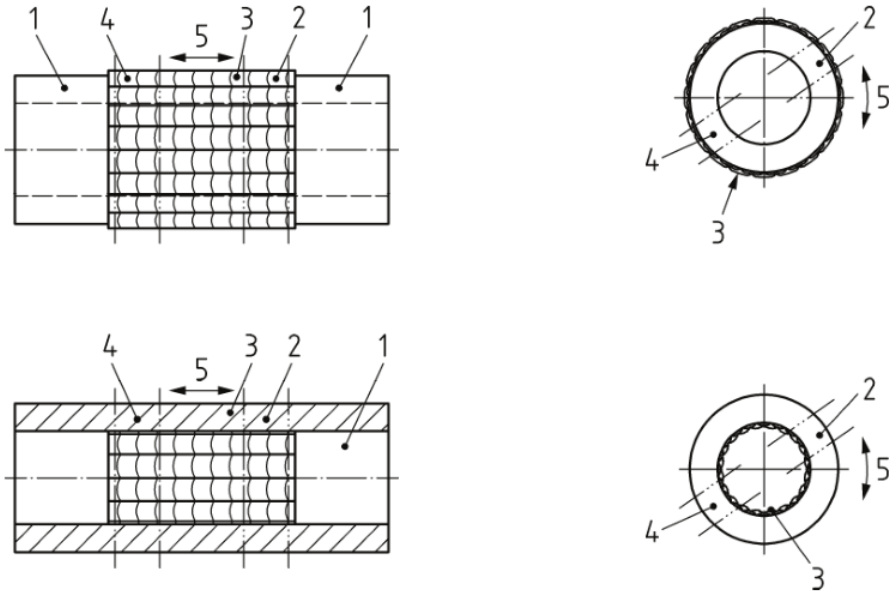
Sva nerazorna ispitivanja ispitnog uzorka prema tablici 5 treba provesti prije rezanja ispitnog uzorka. Bilo kakva toplinska obrada nakon zavarivanja treba biti provedena prije nerazornih ispitivanja. Ovisno o geometriji navara i materijalu, nerazorna ispitivanja treba provesti u skladu s normama ISO 17637 (vizualno ispitivanje), ISO 3452-1 (ispitivanje penetrantima) i ISO 17405 (ultrazvučno ispitivanje). [10]

Ispitni uzorci se izrezuju prema slikama 11 i 12. Uzorci se izrezuju tek nakon provedenih nerazornih ispitivanja i ako navar zadovoljava kriterije nerazornih testova. U praksi je dozvoljeno odstupanje od zadanih položaja rezova kako bi se izbjegle greške u zavarima uočene nerazornim ispitivanjima. [10]



1 Otpad, odbaciti 25mm ili više navara
2 Za savojno ispitivanje
3 Prostor za:
- 1 makroizbrusak
- kemijsku analizu
- 1 uzorak za mjerenje tvrdoće
- ponovnjeni uzorak
4 Za savojno ispitivanje
5 Smjer navarivanja

Slika 11 Položaji ispitnih uzoraka kod navarivanja ploče [10]



a) Longitudinalno navarivanje **b) Kružno navarivanje**

1 Otpad, odbaciti 25mm ili više navara
2 Prostor za savojno ispitivanje
3 Prostor za:
- 1 makroizbrusak
- kemijsku analizu
- 1 uzorak za mjerenje tvrdoće
- ponovljeni uzorak
4 Prostor za savojno ispitivanje
5 Smjer navarivanja

Slika 12 Položaji ispitnih uzoraka kod navarivanja cijevi [10]

Uzorci za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture trebaju biti pripremljeni i nagrizeni u skladu s normom ISO 17639 na jednoj strani kako bi se jasno vidjeli linija staljivanja, zona utjecaja topline (ZUT) i metal zavara. Ispitivanje makrostrukture treba na uzorku pokazivati i dio nepromijenjenog osnovnog materijala i treba napraviti barem jedan uzorak za svaki pokušaj navarivanja. Kada je zahtijevana i kontrola mikrostrukture, radi se analiza mikrostrukture osnovnog materijala, ZUT-a i metala navara. [10]

Za ispitivanje tvrdoće, koriste se metode HV10 i HV5. Otisci za mjerenje tvrdoće se rade na normom predodređenim mjestima. Kada se radi o navarivanju s ciljem povećanja tvrdoće površine, podatci o tvrdoći se uzimaju s rezervom jer ona ovisi o debljini navara.

Uvjeti po kojima zavar zadovoljava ili ne zadovoljava su također definirani normom. Ako zavar nije zadovoljio tražene kriterije, zavarivanje se može ponoviti. Ako i tada imamo zavar nedovoljne kvalitete, postupak zavarivanja smatra se neispravnim. [10]

4.4. Prošireno područje pokrivanja WPS-a

Definiranje WPS- a je postupak koji zahtjeva određeno vrijeme i financijska sredstva za izradu. Kako bi se smanjili troškovi u industriji, gotovi WPS se može primijeniti za zavarivanje i nekih drugih materijala. To ovisi o tome za koji je materijal WPS definiran, a točno međusobno pokrivanje grupa materijala je određeno samom normom. Što se tiče proširene primjene u pogledu debljine osnovnog materijala, vrijedi pokrivanje debljina prema tablici 6. Isto tako, dodatni materijal može se zamijeniti drugim dodatnim materijalom iste oznake ili istog kemijskog sastava. To se najčešće odnosi na dodatne materijale različitih proizvođača. [10]

Tablica 6 Područje pokrivanja za debljine osnovnog materijala

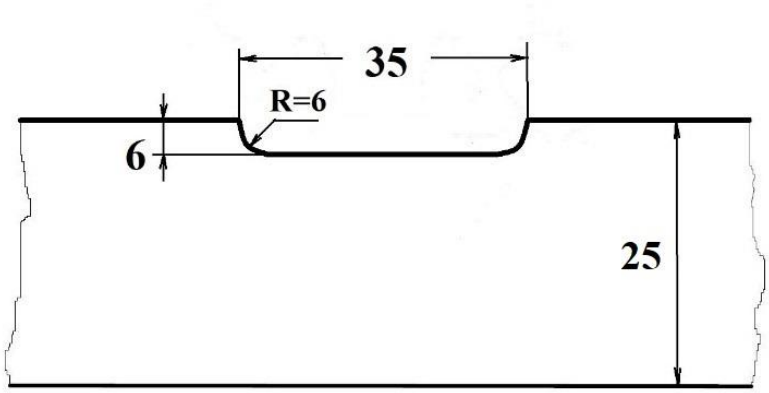
Debljina ispitnog uzorka t	**Raspon kvalifikacije** [a]
$t < 25$ mm [a]	0,5 t do 2 t
$t \geq 25$ mm [a]	25 mm i više
[a] Za zavarivanje laserom uzima se 12mm umjesto 25mm	

Kako bi postupak ispitivanja bio vjerodostojan za druge debljine (i vrste) materijala, većina parametara iz WPS- a ne može se mijenjati. Tako WPS pokriva samo ispitani postupak zavarivanja (npr. REL), uz istu tehniku zavarivanja (kratki ili dugi zavari, njihanje). Također, ne smiju se mijenjati vrsta i polaritet struje, ali je dozvoljeno odstupanje od unosa topline u

iznosu od 25% od vrijednosti definirane WPS- om. Ostali parametri određeni WPS-om kao temperatura predgrijavanja ili međuprolazna temperatura, bilo kakva toplinska obrada, kao i broj slojeva, ne smiju se mijenjati bez izrade novog WPS-a. Dodatno za svaki postupak norma definira dopuštena odstupanja u vidu debljina dodatnih materijala, zaštitnih plinova i drugog. [10]

5. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu ovog rada navarivane su ploče nodularnog lijeva debljine 25 mm. Navarene ploče su potom ispitane po normi HRN EN ISO 15614-7. Ispitne ploče su pripremljene strojnom obradom utora širine 35 mm i dubine 6 mm. Utori napravljeni kao na slici 13 predstavljaju trag trošenja koji se popravlja navarivanjem. Kako se radi o tragu trošenja, zahtjev na tehnologiju je veća tvrdoća zavara u odnosu na osnovni materijal. Zavarivanje se provodilo u uspravnom, PF položaju, REL i PPŽ (prahom punjena žica) postupkom.



Slika 13 Priprema utora za navarivanje

Osnovni materijal je nodularni lijev serije EN-GJS-400-18LT. Njegov sastav i svojstva prikazani su u tablicama 7 i 8. Podatci o osnovnom materijalu dobiveni su od proizvođača, na temelju ispitivanja uzorka iz iste šarže odljevaka Prema normi DIN EN 10204. Iz analize kemijskog sastava osnovnog materijala može se uočiti da stvarni kemijski sastav odljevaka u nekoj mjeri odstupa od teorijski zadanih vrijednosti u usporedbi s tablicom 1.

Tablica 7 Kemijski sastav osnovnog materijala

Element	udio, %
C	3,690
Si	2,080
Mn	0,090
P	0,054
S	0,010

Mg	0,044
Cu	0,028

Tablica 8 Mehanička svojstva osnovnog materijala

Svojstvo	Granica tečenja	Vlačna čvrstoća	Tvrdoća po Brinellu	Istezljivost	Udarni rad loma	Temperatura
Oznaka	Rp 0,2%	Rm	HB	A	KV	t
Mj.jedinica	N/mm^2	N/mm^2		%		°C
Potrebna vrijednost	≥240	≥400	120-175	≥18	12	-20
Izmjerena vrijednost	253	406	140	23,4	14/14/15	-20

Sva mehanička svojstva odgovaraju zahtijevanim vrijednostima.

5.1. Određivanje parametara zavarivanja

Kako bi se izbjegla greška naljepljivanja, empirijski je određena temperatura predgrijavanja od 80°C, a kako ne bi došlo do prevelikog zagrijavanja osnovnog materijala, također empirijski, određena je temperatura međuprolaza od 180°C. Takve temperature svrstavaju ovu tehnologiju u zavarivanje u hladnom stanju.

5.1.1. Navarivanje REL postupkom

Za navarivanje REL postupkom (oznaka 111 prema HRN EN ISO 4063:2012), u skladu sa zahtjevom za većom tvrdoćom površine, izabrana je elektroda EZ-KROM 40 R proizvođača Elektroda Zagreb. To je rutilna elektroda za zavarivanje istovrsnih, sličnih nehrđajućih i raznorodnih čelika. Pogodna je za platiranje nelegiranih i legiranih čelika. Struktura zavara je austenit s delta feritom. Oznaka elektrode prema normi HRN EN ISO 3581-A glasi E 23 12 2 LR12. Mehanička svojstva i orijentacijski kemijski sastav čistog metala zavara navedeni su na slici 14. Navarivalo se je elektrodama debljine 4mm, istosmjernom strujom s elektrodom na + polu. Zavarivalo se najmanjom strujom preporučenom za tu elektrodu, 110A kako bi se minimizirao unos topline i zbog zavarivanja u prisilnom položaju. Zahtjevi tehnologije i broj šarže elektroda navedeni su na etiketi na slici 15. Elektrode su prije zavarivanja sušene 2 sata na 300°C.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

$R_{p0,2}$ N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-20°C) J
> 350	> 550	> 30	> 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA

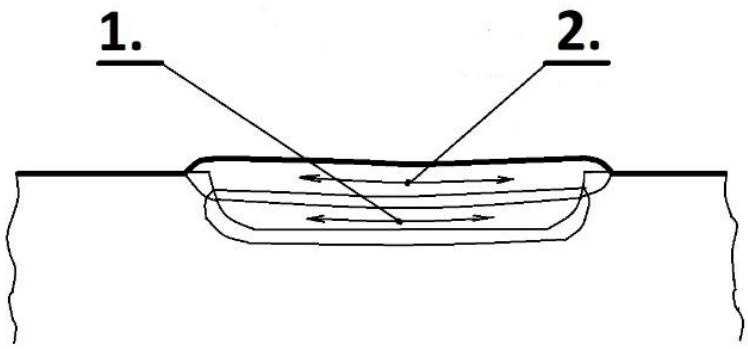
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
%	≤ 0,03	0,9	0,8	22,5	12,5	2,7

Slika 14 Svojstva metala zavara [11]



Slika 15 Etiketa pakiranja elektroda

Da bi osigurali potpuno navarivanje, ukupna debljina zavara je određena 7,5 mm. Zavarivalo se u 2 prolaza s njihanjem do 35 mm (slika 16). Parametri zavarivanja za pojedini prolaz su navedeni u tablici 9. Kut postavljanja elektrode je zadan između 75°i 90°.



Slika 16 Redoslijed zavarivanja

Tablica 9 Pojedinosti postupka zavarivanja; REL

Prolaz	Postupak	Promjer dodatnog materijala mm	Struja A	Napon V	Vrsta struje, polaritet	Brzina zavarivanja cm/min	Unos topline kJ/cm
1	111	4,0	110	26,0-27,0	DC, +	2,4	57,2-59,4
2	111	4,0	110	26,0-27,0	DC, +	3,2	42,9-44,6

Na slici 17 je prikazan sam postupak navarivanja REL postupkom.



Slika 17 Navarivanje nodularnog lijeva REL postupkom

5.1.2. Navarivanje prahom punjenom žicom

Uz navarivanje REL postupkom, navarivanje je provedeno i PPŽ postupkom (oznaka 136 prema HRN EN ISO 4063:2012). Dodatni materijal je bila prahom punjena žica Kobelco Welding DW-316LP promjera 1,2 mm. Prema normi EN ISO 17633-A to je dodatni materijal T 19 12 3 L P CI/M21 1. Navedena žica služi zavarivanju nehrđajućih čelika serija 316 i 316L sa zaštitnim plinom. Zaštitni plin može biti čisti ugljični dioksid, ili mješavina ugljičnog dioksida i argona. Žica je namijenjena za zavarivanje istosmjernom strujom s elektrodom na + polu. Ponovo se zavarivalo u 2 prolaza s njihanjem do 35mm kao što je skicirano na slici 16, ali je za ovaj postupak definirana nešto veća debljina navara, 8,5mm. Parametri za svaki prolaz su prikazani u tablici 10.

Tablica 10 Pojedinosti postupka zavarivanja; PPŽ

Prolaz	Postupak	Promjer dodatnog materijala mm	Struja A	Napon V	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice m/min	Brzina zavarivanja cm/min	Unos topline kJ/cm
1	136	1,2	145	21,0	DC, +	5,5	6,4	22,84
2	136	1,2	150	21,7	DC, +	5,6	5,2	30,05

Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan u tablici 11 trebao bi dati austenitnu strukturu metala zavara s određenim udjelom ferita. Mehanička svojstva za korištenu šaržu dodatnog materijala ispitana prema normi ISO 17633 navedena su u tablici 12.

Tablica 11 Kemijski sastav dodatnog materijala

ELEMENT	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N
%	0.028	0.56	1.41	0.022	0.004	0.04	12.31	18.41	2.81	0.013

Tablica 12 Očekivana mehanička svojstva metala zavara

Granica tečenja, Rp 0,2% N/mm^2	Vlačna čvrstoća, Rm N/mm^2	Istezljivost, A %
394	544	45

Korišten je zaštitni plin M12 (97,5%Ar/2,5%CO_2) prema normi HRN EN ISO 14175 sa protokom 15 L/min. Udaljenost kontaktne sapnice je bila 15-20 mm, a kut postavljanja pištolja 80°. Zavarivalo se manjom jačinom struje kako bi se smanjio unos topline u zavar i zbog zavarivanja u prisilnom položaju. Sam proces navarivanja prikazan je na slici 18.



Slika 18 Navarivanje nodularnog lijeva PPŽ postupkom

5.2. Ispitivanje navara

Ispitivanje navara se provodilo prema normi HRN EN ISO 15614-7:2016. Provedena su ispitivanja propisana za ispitivanje navarivanja u svrhu otvrdnjivanja površine te je dodatno provedena analiza kemijskog sastava. Vrste i opseg ispitivanja su dani u tablici 13.

Tablica 13 Vrsta i opseg ispitivanja

Vrsta ispitivanja	opseg
Vizualno ispitivanje	100%
Ispitivanje penetrantima	100%
Ispitivanje makrostrukture	1 uzorak
Ispitivanje mikrostrukture	1 uzorak
Ispitivanje tvrdoće	1 niz
Kemijska analiza	Metal navara

Slika 19 prikazuje ploču s napravljenim navarima prije čišćenja.



Slika 19 Navari zavareni REL postupkom

5.2.1. Vizualno ispitivanje zavara

Kod vizualne kontrole zavara gleda se eventualna prisutnost pukotina ili drugih nepravilnosti zavara. Kod navarivanja za veću tvrdoću površine nisu prihvatljive nikakve greške ili pukotine u zavaru. U tablici 14 su slike oba zavara nakon čišćenja.

Tablica 14 Fotografije zavara za vizualnu kontrolu

	
REL	PPŽ

Na fotografijama zavara nema nikakvih vidljivih grešaka i nepravilnosti, debljina i širina zavara su ujednačeni, nema vidljivih ugorina ili pukotina. Zaključuje se da su oba zavara valjana.

5.2.2. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima je nerazorna metoda ispitivanja zavara i često se primjenjuje na konstrukcijama zbog jednostavnosti. Prije nanošenja penetranta, površinu zavara je potrebno očistiti i odmastiti. Tada se nanosi penetrant i ostavlja se da djeluje određeno vrijeme propisano od strane proizvođača nakon čega se uklanja čistačem. Potom se nanosi razvijač koji reagira s penetrantom u pukotinama i lako je uočljiv. Na slici 20 je penetrantsko ispitivanje jednog od prvih uzoraka. Jasno se vide mjesta pukotina na spojevima dodatnog i osnovnog materijala. Pojava pukotina nije rijetkost u početku razvoja tehnologije zavarivanja i sugerira promjenu parametara. Uzorci zavareni prema konačno određenim parametrima nisu imali pukotina penetrantskom ispitivanju. Korišten je crveni penetrant MAGNAFLUX SKL-WP2, čistač MAGNAFLUX SKC-S i razvijač MAGNAFLUX SKD-S2.



Slika 20 Penetrantsko ispitivanje pukotina

5.2.3. Ispitivanje makrostrukture

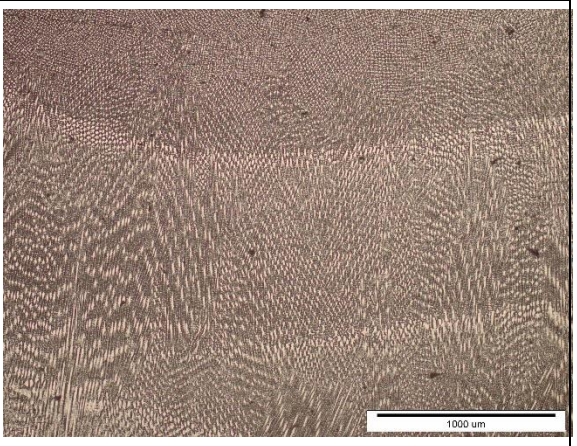
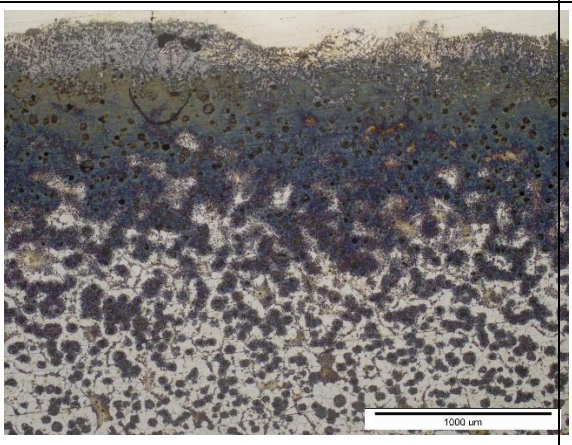
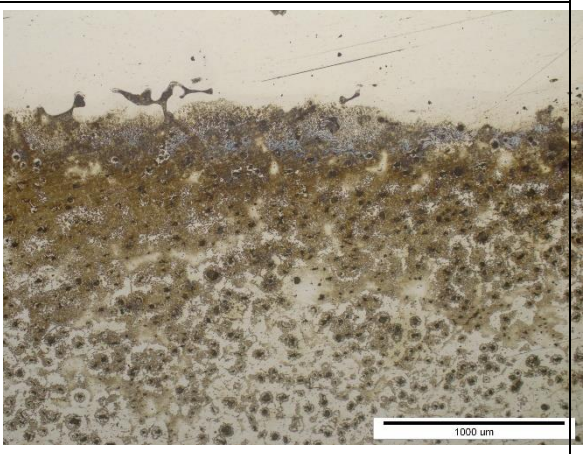
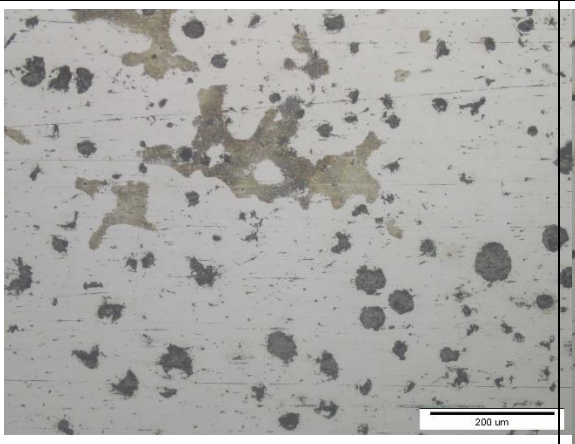
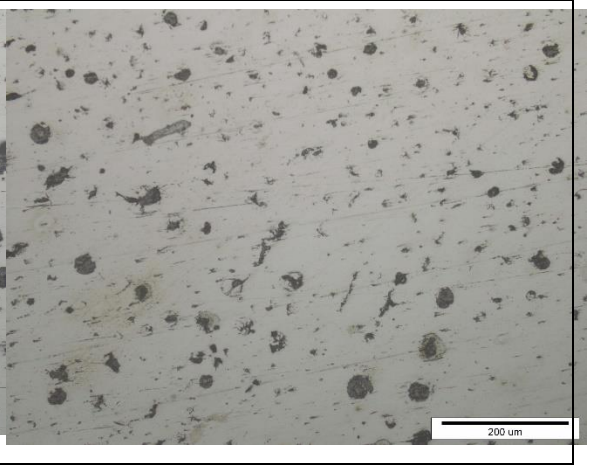
Izrada makroizbrusaka je prvo od razornih ispitivanja. Kod ispitivanja makrostrukture traže se greške u vezivanju osnovnog i dodatnog materijala, pore ili uključine. Prema HRN EN ISO 15614-7 prihvatljive su pojedinačne pore veličine do 2 mm. Fotografije makroizbrusaka su prikazane u tablici 15. za nagrizanje je korištena otopina 10 g kromove kiseline u 100 mL vode. Povećanje na fotografijama je 3x. Na oba uzorka je vezivanje dobro, a na uzorku zavarenom REL postupkom vidimo nedovoljno popunjavanje žlijeba.

Makroizbrusak	Postupak
	111
	136

5.2.4. Ispitivanje mikrostrukture

Analiza mikrostrukture, osim što može pokazati mikro pukotine, pokazuje strukturne promjene koje nastaju prilikom zavarivanja.

Tablica 15 Mikrostruktura uzoraka

Uzo-rak	111	136
MZ		
ZUT		
OM		

MZ- metal zavara

ZUT- zona utjecaja topline

OM- osnovni materijal

Metal zavara je kod oba uzorka pretežito austenitne strukture zbog kroma u dodatnom materijalu. Takva struktura daje navaru korozijsku postojanost i veći tvrdoću što daje bolju otpornost nove površine na trošenje.

U ZUT-u , na prijelazu dodatnog i osnovnog materijala javlja se crna struktura. To je struktura s velikim udjelom perlita. Vidljiva je velika razlika u širini perlitnog pojasa za različite postupke zavarivanja. Kod uzorka zavarenog REL postupkom, unos topline je okvirno dvostruko veći, pa je zato i značajnija promjena strukture u ZUT-u. Perlitna struktura ima veću čvrstoću od bijele feritne, ali ima manju istezljivost što predstavlja opasnost od pojave pukotina prilikom deformacija. Na obje fotografije je jasno vidljiva razlika između perlitne, crne i feritne, bijele osnove nodularnog lijeva.

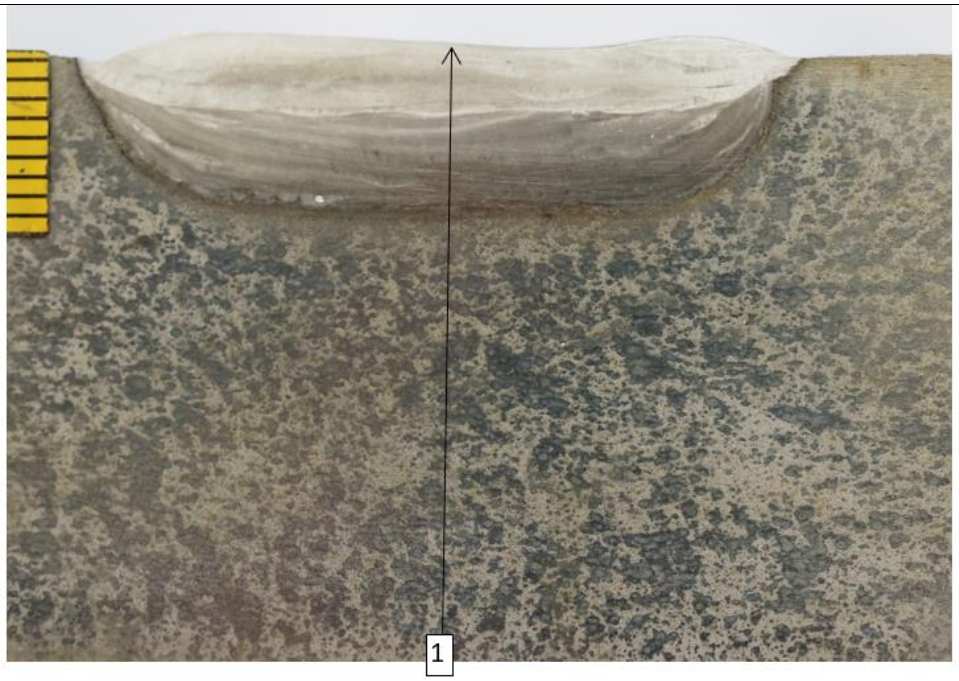
Na fotografijama mikrostrukture uzoraka vidi se da je osnova nodularnog lijeva EN-GJS-400-18LT feritna. Takva osnova nodularnog lijeva daje najveće istezljivosti uz nešto manju čvrstoću. Također, na uzorcima je vidljivo da mikrostruktura nodularnog lijeva nije savršena, to jest da nije sav grafit u obliku kuglica, već ga je jedan dio izlučen u nepravilnim oblicima.

5.2.5. Ispitivanje tvrdoće

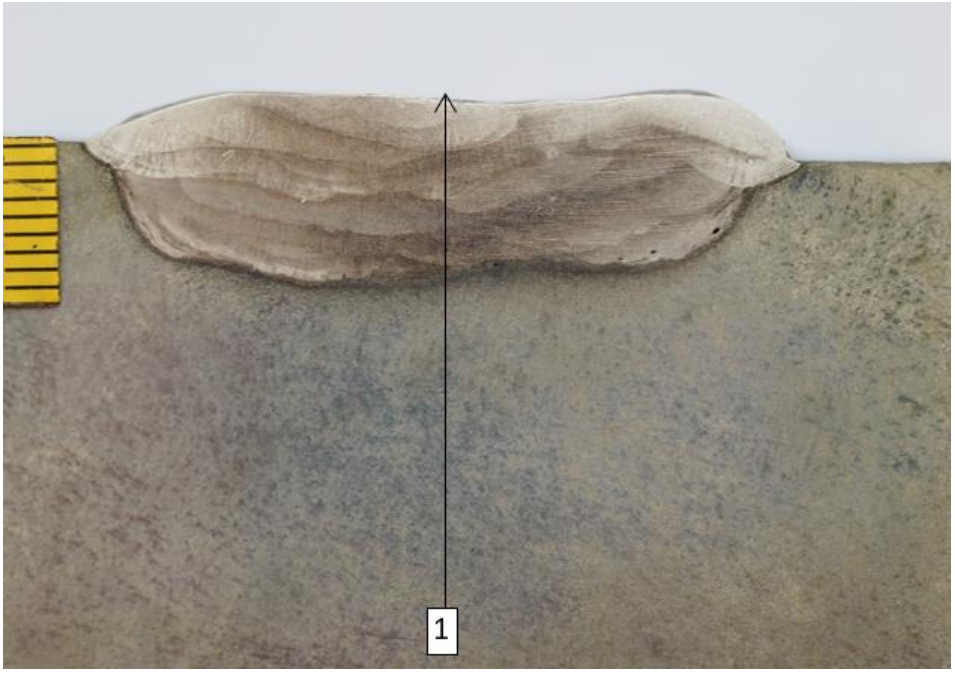
Povišenje tvrdoće u ZUT-u je posljedica naglog hlađenja zbog jakog odvođenja topline u ispitni uzorak. U pravilu čvrstoća i tvrdoća zavara trebaju biti nešto viši od osnovnog materijala, prevelik porast tvrdoće predstavlja velik rizik od krhkog loma. U normi HRN EN ISO 15614-7 navedene su najveće dopuštene tvrdoće za pojedine skupine materijala. Na ispitnim uzorcima napravljen je po jedan niz tvrdoće, i oba zadovoljavaju kriterije norme. Tvrdoća metala zavara je veća od tvrdoće osnovnog materijala, što znači da je ostvaren zahtjev za većom otpornosti na trošenje. Vrijednosti tvrdoća , kao i položaji mjerenja su prikazani u tablici 16. Slike 21 i 22 prikazuju smjer mjerenja tvrdoće.

Tablica 16 Tvrdoća uzoraka

Uzorak	Niz	OM	ZUT	MZ
REL	1	167	265	319
		160	322	343
		170	366	274
PPŽ	1	167	206	206
		167	268	254
		160	351	271



Slika 21 Niz tvrdoće za postupak 111

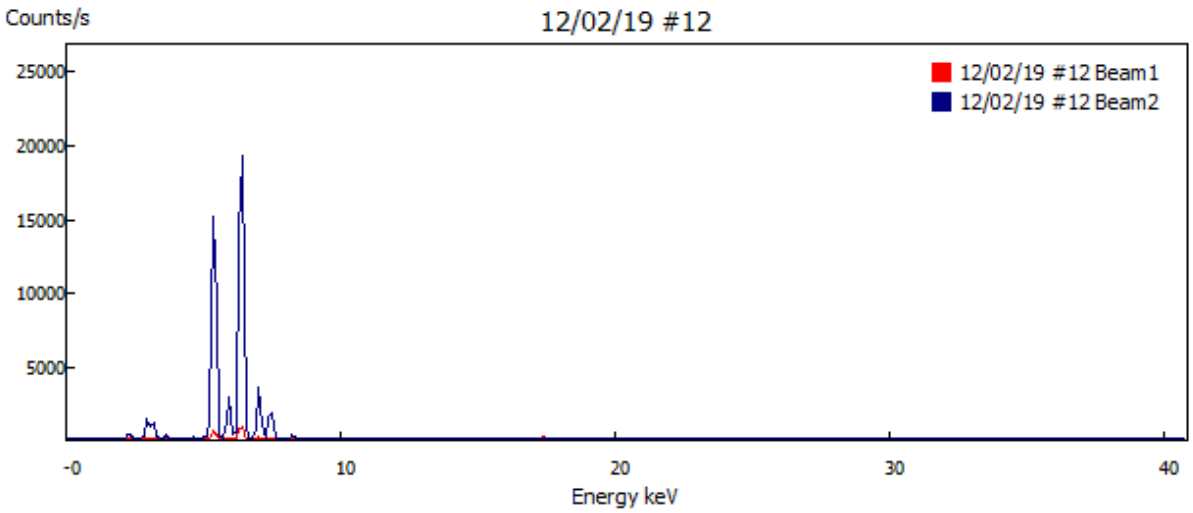


Slika 22 Niz tvrdoće za postupak 136

Vrijednosti u tablici izražavaju tvrdoću prema metodi ispitivanja HV10. vidljivo je da su vrijednosti tvrdoće za navarivanje REL postupkom nešto veće što je također posljedica značajno većeg unosa topline.

5.2.6. Ispitivanje kemijskog sastava

Ispitivanjem mikrostrukture metala zavara mogu se predvidjeti mehanička, ali ponajprije korozijska svojstva nanesenog sloja metala. Ujedno, može se vidjeti u kojoj mjeri sastav metala zavara odgovara onomu kojeg propisuje proizvođač. Slika 23 prikazuje spektar dobiven XRF- X ray Flouresence metodom za metal navara REL postupkom.



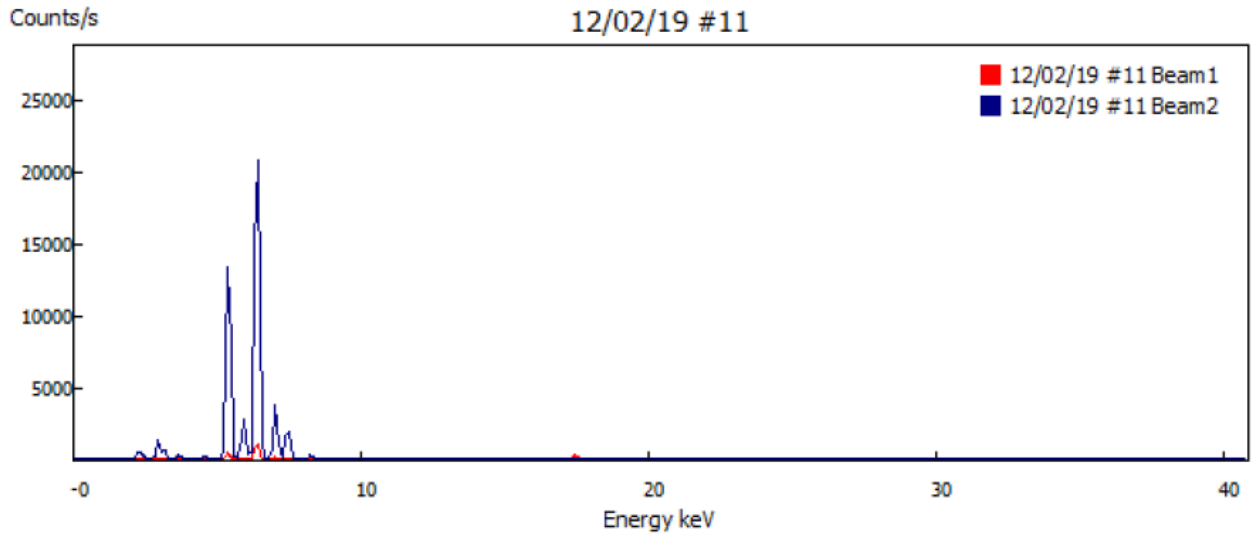
Slika 23 Spektar zračenja metala zavara postupkom REL

Tablica 17 Kemijski sastav metala navara za uzorak 111

Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	C
0,17	0,012	0,38	22,45	0,49	63,07	11,15	2,28	≤0,03

Kada se usporede rezultate ispitivanja kemijskog sastava s očekivanim vrijednostima sa slike 14, zaključuje se da je udio ugljika, mangana, kroma i nikla sukladan očekivanim vrijednostima, dok su nepoželjni sumpor i fosfor u nešto višim odjelima od onih u osnovnom materijalu.

Spektar zračenja i kemijski sastav za uzorak navaren prahom punjenom žicom dani su na slici 24 i tablici 18.



Slika 24 Spektar zračenja za navar izveden postupkom 136

Tablica 18 Kemijski sastav uzorka 136

Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	C
0,63	0,025	1,03	19,01	1,09	63,35	11,77	2,83	≤0,03

Podatci iz tablice 18 uspoređuju se s vrijednostima iz tablice 11. U ovom slučaju, kemijski sastav metala zavara nešto je bliži kemijskom sastavu dodatnog materijala. To je djelomično očekivano, jer su podatci za dodatni materijal iz tablice važeći konkretno za korištenu šaržu dodatno materijala, a kod obloženih elektroda općenito za sve šarže. Ponovo je vidljiv značajno veći udio sumpora u metalu zavara u odnosu na dodatni materijal.

6. Zaključak

Iz završnog rada je zaključeno kako je definiranje tehnologije jako opsežan postupak. Određivanje tehnologije je još teže za teže zavarljive materijale koji se u praksi rijetko zavaruju. Nodularni lijev je jedan od materijala koji se najčešće zavaruju u kontekstu reparatura, kada nije točno poznat sastav osnovnog materijala, pristupačnost je ograničena, a sama priprema zavara otežana. Kod takvih uvjeta, posebice za velike dijelova, izbjegava se predgrijavanje na visoke temperature i zavaruje se u hladnom stanju. Takvo zavarivanje treba provoditi vrlo oprezno zbog velike opasnosti od stvaranja pukotina. Kod definiranja postupka zavarivanja za reparature, posebno je važno definirati kvalitetnu tehnologiju jer dio koji se popravlja valja zavariti bez grešaka u prvom pokušaju. Da bi zavar bio kvalitetan, potrebno je specifikaciju postupka zavarivanja napraviti prema propisanoj normi. Norme definiraju jasne uvijete i postupke, kao i granice prihvatljivosti za svako ispitivanje koje se izvodi. Iako je kvalificiranje postupka zavarivanja prema normama dugotrajan proces i iziskuje značajna financijska sredstva, kvalitetna specifikacija postupka jamči kvalitetu i ispravnost zavara. Kako bi se troškovi smanjili, svaka kvalifikacija postupka ima prošireno područje važenja, tako da se postupak kvalifikacije ne mora ponavljati za slične dimenzije osnovnog materijala.

LITERATURA

[1] J. R. Davis; Metals Handbook Desk Edition 2nd Edition, ASM, SAD, 1998.

[2] https://www.guntermann-guss.de/gusseisen-mit-kugelgraphit-ggg-globularer-grauguss-oder-sphaeroguss-genannt/ dostupno 1.9.2020.

[3] Grilec K. Predavanja iz Materijala 2; FSB, Zagreb, 2017.g.

[4] [Javor, F. ; Reparatura – primjena tehnologije zavarivanja i srodnih postupaka (treći dio), Zavarivanje 53, 2010, 5/6

[5] EWM-SCHWEISSLEXIKON; EWM Hightec Welding GmbH, Mündersbach, Germany, 2002.

[6] https://www.esabna.com/euweb/awtc/lesson2_27.htm dostupmo 10.9.2020.

[7] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Metalne punjene žice, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2009), s. 112-118

[8] Juraga I., Živčić M., Gracin M.: Reparaturno zavarivanje, Zagreb, 1994

[9] HRN EN 1563:2011 - Ljevarstvo -- Nodularni lijevovi

[10] HRN EN ISO 15614-7 - Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -- Ispitivanje postupka zavarivanja -- 7. dio: Navarivanje

[11] Elektroda Zagreb: Katalog 2018,Zagreb, 2018.

PRILOZI

I. CD-R disc