

# Reparaturno zavarivanje sivog lijeva

---

Jurković, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:427930>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Karlo Jurković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Jurković

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem tijekom studija i navedenom literaturom.

Posebno bi se zahvalio svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću i mag. ing. mech. Ivanu Juriću na razumijevanju, podršci i korisnim savjetima pruženim za vrijeme izrade ovog rada.



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: **KARLO JURKOVIĆ**

Mat. br.: **0035192810**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **REPARATURNO ZAVARIVANJE SIVOG LIJEVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **REPAIR WELDING OF GRAY CAST IRON**

Opis zadatka:

Proučiti zavarljivost sivog lijeva i posebno analizirati glavne probleme koji se javljaju pri zavarivanju na hladno i na toplo. Objasniti odabir dodatnih materijala i postupaka zavarivanja pri reparaturnom zavarivanju strojnih dijelova od sivog lijeva. Pojasniti način pripreme žlijeba za zavarivanje i tehniku rada. Opisati neke od primjera reparaturnog zavarivanja primjenjivih u održavanju postrojenja i strojeva.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućem dijelu od sivog lijeva propisati tehnologiju reparaturnog zavarivanja. Definirati postupak, dodatne i pomoćne materijale te parametre zavarivanja. Nakon zavarivanja provesti nerazorna i razorna ispitivanja u svrhu dokazivanja svojstava i kvalitete repariranog dijela. Analizirati tehnološki i ekonomski aspekt provedene reparature te donijeti zaključke o mogućoj primjeni u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

25. travnja 2016.

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.  
3. rok: 17. rujna 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.  
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	IV
SIMBOLI.....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest zavarivanja .....	2
2. SIVI LIJEV .....	3
2.1. Kemijski sastav sivog lijeva.....	4
2.2. Mikrostruktura sivog lijeva .....	6
2.3. Utjecaj brzine hlađenja i debljine stijenke.....	9
2.4. Svojstva sivog lijeva.....	10
3. REPARATURNI ZAVARIVANJE .....	12
3.1. Zavarivanje sivog lijeva .....	14
3.1.1. Zavarivanje sivog lijeva na toplo .....	15
3.1.2. Zavarivanje sivog lijeva na hladno .....	21
3.1.3. Način i priprema žlijeba za zavarivanje sivog lijeva .....	26
3.1.4. Lemljenje sivog lijeva .....	31
3.1.5. Primjeri reparaturnog zavarivanja .....	32
4. EKSPERIMENTALNI RAD .....	34
4.1. Priprema radnog komada .....	34
4.2. Zavarivanje radnog komada .....	37
4.3. Ispitivanje radnog komada .....	47
5. ZAKLJUČAK.....	55
6. LITERATURA .....	56

## POPIS SLIKA

Slika 1. Zavarivanje Sjeverna Dakota 1957. [5] .....	2
Slika 2. Svakodnevni proizvodi od sivog lijeva [6] .....	3
Slika 3. Shematski prikaz feritno-perlitne mikrostrukture [7] .....	6
Slika 4. Tipovi listića grafita u sivom lijevu [7] .....	7
Slika 5. Odnos stupnja zasićenja i debljine stijenke kod sivog lijeva [7] .....	9
Slika 6. Odnos tvrdoće i čvrstoće kod različitih kvaliteta sivog lijeva [7] .....	11
Slika 7. Reparatura zamašnjaka [8] .....	12
Slika 8. Zavareni nosač poluge [10] .....	13
Slika 9. Grana vodovodne instalacije [10] .....	14
Slika 10. Ispušna grana ventila motora zavarena na toplo [10] .....	15
Slika 11. . Dijagram toplog zavarivanja sivog lijeva i toplinska obrada [2] .....	16
Slika 12. Keramička izolacijska vuna [11] .....	17
Slika 13. Elektrode za zavarivanje sivog lijeva na toplo [10] .....	18
Slika 14. Zavarivanje plinskim plamenom tuljka hidranta [15] .....	19
Slika 15. Peć za zagrijavanje malih komada [15] .....	20
Slika 16. Kućište cilindra preše zavarena na hladno [10] .....	21
Slika 17. Držač zavaren na hladno [16] .....	22
Slika 18. Primjeri različitih izvedbi korištenja dodatnog materijala [13] .....	23
Slika 19. Blok motora zavaren na hladno [16] .....	24
Slika 20. Raskivanje zavara čekićem [13] .....	25
Slika 21. Priprema žlijeba za zavarivanje dijelova od sivog lijeva postupkom na toplo [2] .....	26
Slika 22. Klasifikacija i nazivlje V-žlijeba za zavarivanje .....	27
Slika 23. Priprema U-žlijeba koja se preporuča kod zavarivanja sivog lijeva na hladno [2] .....	28
Slika 24. Način pripreme spoja za zavarivanje sivog lijeva na hladno [2] .....	29
Slika 25. Shematski prikaz redoslijeda zavarivanja sivog lijeva [13] .....	30
Slika 26. Lemljenje ispušne grane [17] .....	31
Slika 27. Prikaz glave motora od sivog lijeva [3] .....	32
Slika 28. Reperaturno zavarivanje kućišta diesel motora [3] .....	33
Slika 29. Rezanje radnog komada tračnom pilom .....	34

---

Slika 30. Presjek radnog komada .....	35
Slika 31. V-žlijeb radnog komada .....	35
Slika 32. Priprema žlijeba kutnom brusilicom.....	36
Slika 33. Elektrode Castolin XHD 2230.....	37
Slika 34. Uređaj UNI 350 C .....	38
Slika 35. Radni komad s pripojima .....	39
Slika 36. Infracrveni termometar .....	40
Slika 37. Redoslijed i smjer zavarivanja .....	41
Slika 38. Redoslijed zavarivanja po presjeku .....	41
Slika 39. Raskivanje zavara čekićem .....	42
Slika 40. Čišćenje zavara čeličnom četkom .....	42
Slika 41. Uklanjanje troske kutnom brusilicom.....	43
Slika 42. Pore u zavaru .....	44
Slika 43. Lice zavara.....	45
Slika 44. Korijen zavara .....	46
Slika 45. Odmaščivanje površine.....	47
Slika 46. Penetriranje radnog komada.....	48
Slika 47. Radni komad nakon ispitivanja penetrantskom metodom.....	49
Slika 48. Izrezivanje makroizbruska .....	50
Slika 49. Brušenje makroizbruska na traci .....	51
Slika 50. Uranjane makroizbruska u otopinu nital.....	52
Slika 51. Makroizbrusak nakon uranjanja u nital.....	53
Slika 52. Pogreške u vezivanju .....	54



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Utjecaj primjesnih elemenata u sivom lijevu na njegova svojstva [1] .....	4
Tablica 2. Utjecaj legirnih elemenata u sivom lijevu na njegova svojstva [1] .....	5
Tablica 3. Elektroda Castolin XHD 2230 .....	37
Tablica 4. Uređaj UNI 350 C .....	38

## SIMBOLI

SL – sivi lijev

CO<sub>2</sub>– ugljikov dioksid

C – ugljik

MnS – manganov sulfid

SO<sub>2</sub> – sumporov dioksid

FeS – željezov sulfid

mm - milimetar

HB – tvrdoća po brinellu

ZUT – zona utjecaja topline

°C – stupanj celzijusov

REL – ručno elektrolučno zavarivanje

A - amper

## SAŽETAK

Tema završnog rada je „Reparaturno zavarivanje sivog lijeva“. Prije uvoda u samu problematiku zavarivanja sivog lijeva, vrlo je važno dobro poznavanje samog materijala, odnosno njegovu mikrostrukturu, kemijski sastav i svojstva. U radu su detaljno opisani postupci zavarivanja na toplo i hladno popraćeni dodatnim materijalom, tehnikom rada i pripremom žlijeba. U radu je navedena i priprema sivog lijeva tehnologijom lemljenja. Također su opisani primjeri reparaturnog zavarivanja primjenjivih u održavanju postrojenja i strojeva.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada prikazan je tehnološki postupak i parametri zavarivanja radnog komada od sivog lijeva. Detaljno je prikazan dodatni materijal, uređaji, te alati koji se koriste. Na kraju je provedeno ispitivanje s kojim se dokazala kvaliteta repariranog dijela. Cijeli postupak je popraćen uz obilje izvornih slika iz laboratorija.

**KLJUČNE RIJEČI:** sivi lijev, reparatura, zavarivanje

## SUMMARY

The theme of the dissertation is "Repair welding of cast iron." Prior to introduction into the issue of welding cast iron, it is very important to a good knowledge of the material, and the microstructure, chemical composition and properties. The paper describes welding on hot and cold accompanied by additional material, the technique and the preparation of the groove. The paper listed the preparation of cast iron soldering technology. Also described are examples repair welding applicable in the maintenance of plant and machine.

The experimental part of the dissertation presents the technological process and the welding parameters of the work pieces made of cast iron. There are detailed additional materials, equipment, and tools used. In the end there was conducted test which had to prove the quality of the repaired parts. The whole process is accompanied with plenty of original pictures from the lab.

KEYWORDS: cast iron, repairs, welding

## 1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istorodnih materijala taljenjem ili pritiskom sa ili bez dodavanja dodatnog materijala na način da se dobije homogeni zavareni spoj.

Različiti izvori energije se mogu koristiti za zavarivanje kao što je mlaz vrućih plinova, tok nabijenih čestica, tokovi zračenja (laser), električna struja, trenje, ultrazvuk i sl. Zavarivanje se može obavljati u radionici, na otvorenom prostoru, u vodi ili u svemiru.

Sve do kraja 19. stoljeća jedino poznato bilo je kovačko zavarivanje s kojim su kovači stoljećima spajali željezo i čelik zagrijavanjem i udarcima čekića. Elektrolučno zavarivanje i plinsko zavarivanje bili su među prvim postupcima koji su se razvili u 20. stoljeću. Nakon toga razvili su se mnogi procesi, ali među najzastupljenijima je postalo ručno elektrolučno zavarivanje.

Sivi lijev kao legura je vrlo teško zavarljiv, zbog toga uvijek gdje je moguće primjenjuju se druge tehnologije. Kod reparatura, ekonomičnije je zavariti nego lijevati cijele komade ispočetka. Kako se provodi uspješno zavarivanje sivog lijeva detaljnije je opisano u samom radu.

## 1.1. Povijest zavarivanja

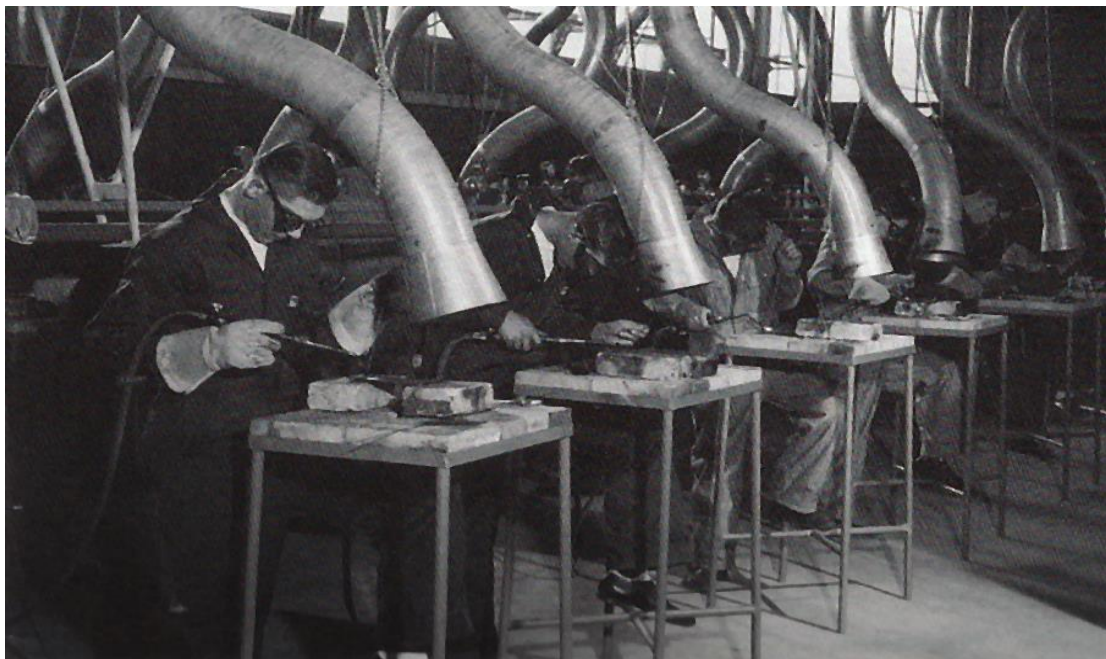
Povijest spajanja metala započela je prije nekoliko tisuća godina, u brončano i željezno doba na prostorima današnje Europe i Bliskog istoka. Spajanje metala razvilo se kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, oružja, posuda, nakita i građevina.

U srednjem vijeku razvilo se kovačko zavarivanje pomoću kojega su se dva metala spajala na kovačkoj vatri.

Prvi veći doprinos tehnologiji zavarivanja dao je ruski znanstvenik Vasilij Petrov koji istražuje električni luk za opću primjenu u zavarivanju dok njegov sunarodnjak Nikolaj Benardos 1882. godine prvi koristi električni luk između ugljene elektrode i metala uz dodavanje žice u talinu.

Prije i za vrijeme Drugog svjetskog rata počinje veliki razvoj i primjena zavarivanja. Počinje se razvijati zavarivanje u zaštitnim, inertnim plinovima: TIG i MIG postupak te zavarivanje zaštitnim, aktivnim CO<sub>2</sub> plinom: MAG postupak.

Nakon 1950. razvijaju se mnogi novi postupci kao što su: zavarivanje pod troskom (1951.), zavarivanje trenjem (1956.), zavarivanje snopom elektrona (1957.), zavarivanje ultrazvukom (1960.), zavarivanje laserom (1960.), zavarivanje plazmom (1961.) i drugi.



*Slika 1. Zavarivanje Sjeverna Dakota 1957. [5]*

## 2. SIVI LIJEV

Sivi lijev je krhak materijal koji se odlikuje visokom tlačnom čvrstoćom, umjerenom tvrdoćom i karakterističnom sivom bojom. Ima visoku otpornost na trošenje i koroziju te jednostavan način lijevanja i veliku primjenu u praksi. Sivi lijev nije materijal pogodan za kovanje, a kao legura kristalizira metastabilno i stabilno.

Sivi lijev je legura željeza i ugljika te drugih legirnih elemenata. Dobiva se lijevanjem sirovog željeza u visokim pećima. Postoji nekoliko vrsta sivog lijeva: obični sivi lijev, sivi lijev srednje čvrstoće i sivi lijev visoke čvrstoće. Na strukturu sivog lijeva utječe kemijski sastav i brzina hlađenja lijeva. Mehanička svojstva i kvaliteta sivog lijeva ovise o rasporedu i obliku grafita, debljini stijenke, veličini izlučenih grafitnih lamela te o strukturi metalne osnove. Često se koristi za izradu ventila, kotača, blokova motora, kućišta za pumpe, grijaćih tijela, kanalizacijskih cijevi i dr.



*Slika 2. Svakodnevni proizvodi od sivog lijeva [6]*

## 2.1. Kemijski sastav sivog lijeva

Kemijski sastav sivog lijeva približno se kreće u granicama:

- 2,5 – 4,5 % C
- 0,3 – 1,2 % Mn
- 1 – 4 % Si
- 0,4 – 1,5 % P
- < 0,1 % S

Sivi lijev takvog sastava nije legiran. Si, Mn, P, i S smatraju se primjesama koje se dodaju prilikom proizvodnje sivog lijeva. Njihovim utjecajima dobivaju se svojstva koja su bitna u samoj strukturi sivog lijeva. Utjecaj primjesa na SL se može vidjeti u tablici 1.

Tablica 1. Utjecaj primjesnih elemenata u sivom lijevu [1]

Element	Utjecaj elementa na svojstvo legure
Si (Silicij)	Omogućava veće izlučivanje grafita, pa se ugljik manje veže u cementit. Radi velikog sagorijevanja Si pri zavarivanju, dodatni materijal mora imati veći postotak Si.
Mn (Mangan)	Povećava prekidnu čvrstoću i poboljšava zavarljivost.
P (Fosfor)	Povećava otpornost prema koroziji, ali preveliki sadržaj povećava tvrdoću i krhkost te smanjuje zavarljivost.
S (Sumpor)	Štetna primjesa; više od 0,1 % povećava krhkost i smanjuje zavarljivost.

Osim primjesa u sivom lijevu imamo i legirne elemente koja nam daju određena svojstva. Utjecaj legirnih elemenata može se vidjeti u tablici 2.



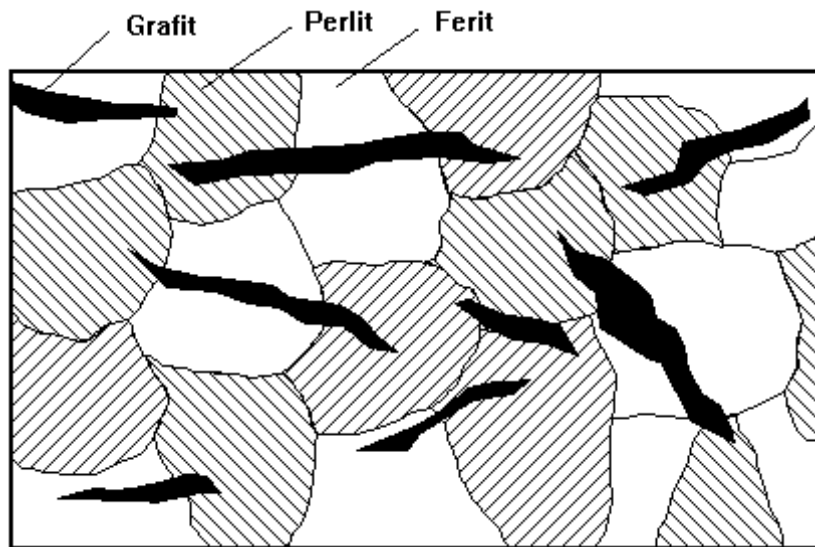
Tablica 2. Utjecaj legirnih elemenata u sivom lijevu [1]

Element	Utjecaj elementa na svojstvo legure
Al (Aluminij)	Jak grafitizator, pomaže u stvaranju ferita i grafita.
Sb (Antimon)	Ima mali utjecaj kao stabilizator perlita.
Bi (Bizmut)	Pomaže u nastajanju karbida i služi kao stabilizator perlita.
B (Bor)	Ako ga ima manje od 0,015 % koristan je kao jak grafitizator, a ako ga ima više od 0,015 % tada je stabilizator karbida i perlita.
Cr (Krom)	Jak karbidotvorac, pomaže u stvaranju perlita.
Cu (Bakar)	Umjereni grafitizator i pomaže u nastajanju perlita.
Mo (Molibden)	Umjereni karbidotvorac, pomaže u stvaranju perlita i bainita.
Ni (Nikal)	Pospješuje stvaranje finostrukture i povećava otpornost prema koroziji, prekidnu čvrstoću, otpornost prema trošenju, zavarljivost.
Te (Telurij)	Pomaže u stvaranju karbida te služi kao stabilizator perlita.
Sn (Kositar)	Pomaže u nastajanju i zadržavanju perlita.
Ti (Titan)	U količinama manjim od 0,25 % koristi se kao grafitizator.
V (Vanadij)	Jak karbidotvorac i pomaže u nastajanju perlita.

## 2.2. Mikrostruktura sivog lijeva

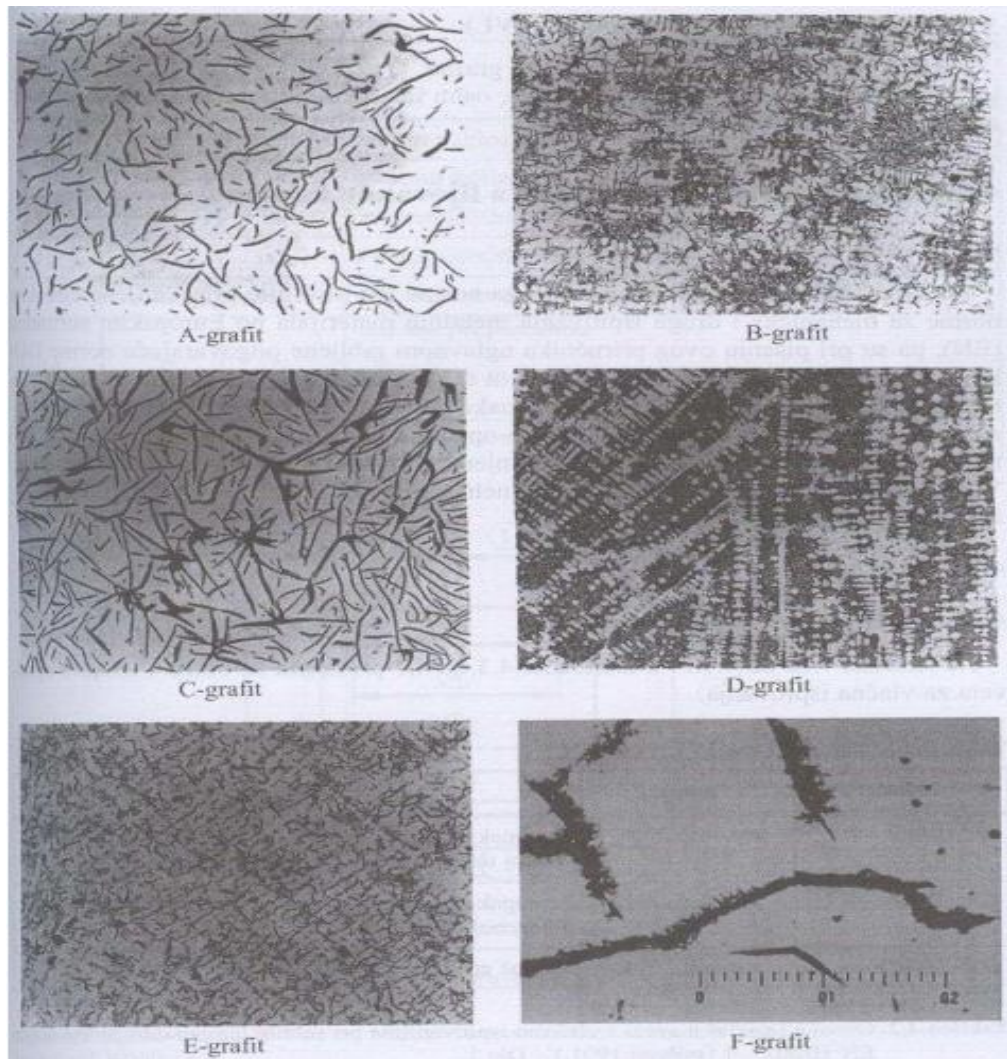
Mikrostruktura sivog lijeva je dvojna i sastoji se od nakupina listića grafita (primarna mikrostruktura) i od željezne osnove koja je feritna, perlitna ili feritno-perlitna, a uz to se još može pojaviti slobodni cementit. Sivi lijev kristalizira stabilno i metastabilno.

Prikaz mikrostrukture sivog lijeva sa izlučenim grafitom u obliku listić je prikazan na slici 3.



*Slika 3. Shematski prikaz feritno-perlitne mikrostrukture [7]*

Grafit se razvrstava prema obliku, rasporedu i veličini. On može imati lisnati (lamelaran), kugličasti i čvorasti oblik. Lisnati grafiti svrstavaju se prema rasporedu u 6 klasa koji se vide na slici 4.



Slika 4. Tipovi listića grafita u sivom lijevu [7]

A-grafit ima ravnomjerno raspoređene grafitne listiće, a nastaje tijekom eutektičkog skrućivanja i najpoželjniji je oblik grafita u sivom lijevu. Daje dobra fizička i mehanička svojstva.

B-grafit nastaje ako je nukleacija eutektika nedovoljna. Skrućivanje se odvija pri nižim temperaturama od ravnotežne temperature skrućivanja. Ima oblik rozete.

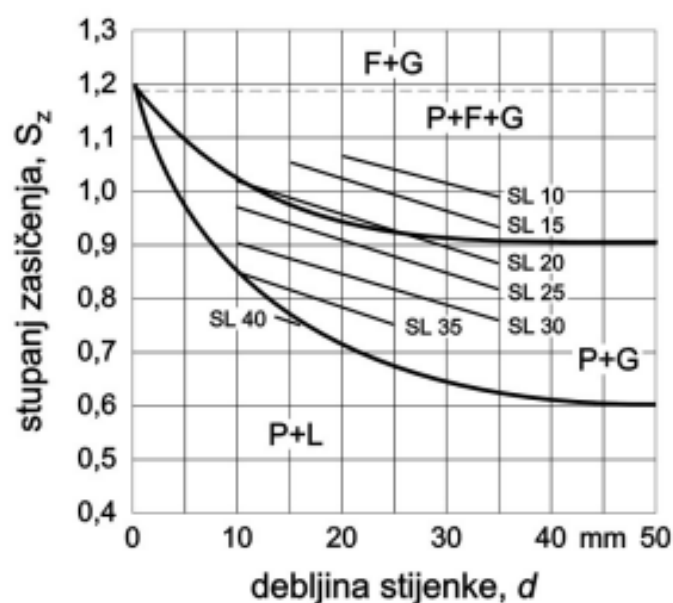
C-grafit nastaje u nadeutektskim sivim ljevovima, gdje je sadržaj ugljika poprilično visok. Smanjuje čvrstoću i tvrdoću, a povećava udarni rad loma i sposobnost prigušivanja vibracija. Naziva se još i pjenasti grafit.

D i E grafiti nastaju u sivom lijevu gdje ima previše silicija, pa ne može nastati eutektski karbid, nego lijev s perlitnom strukturom. U toj strukturi dolazi do pada vlačne čvrstoće, ali i značajno bolje strojne obradivosti.

F-grafit, tzv. Widmannstättenow grafit je posljedica velikog udjela olova, a katkada i fosfora u sivom lijevu.

### 2.3. Utjecaj brzine hlađenja i debljine stijenke

Različitim brzinom hlađenja postiže se, pri istom kemijskom sastavu sivog lijeva, različito oblikovanje grafita i osnovna struktura. Pri istom kemijskom sastavu, odljevak s tankim stijenkama brže se hladi, pa će više ugljika biti vezano na cementit, dok se u debelim stijenkama, zbog sporijeg hlađenja, izlučuje više grafita. Događa se da se u istom odljevku, kao posljedica različitih debljina stijenki, pojavljuju različite mikrostrukture, što uzrokuje i različita mehanička svojstva, različito stezanje i unutarnja naprezanja zbog čega se odljevak može deformirati ili čak puknuti.



Slika 5. Odnos stupnja zasićenja i debljine stijenke kod sivog lijeva [7]

## 2.4. Svojstva sivog lijeva

Pri jednakoj količini ugljika i pri jednakom udjelu grafita, sivi lijev može imati različita mehanička i fizička svojstva. Do tih razlika dolazi zbog različitog oblika grafita, njegove raspodjele i veličine. Jedna od odlika sivog lijeva je velika tlačna čvrstoća koja je 3 do 6 puta veća od vlačne čvrstoće. Zato se sivi lijev u prvom redu upotrebljava na mjestima veoma opterećenim na tlak, ali se ne smije opteretiti na savijanje.

### TEHNOLOŠKA SVOJSTVA SIVOG LIJEVA:

- nema ograničenja veličine odljevaka
- jednostavna i jeftina proizvodnja
- nisko talište koje proizlazi iz približno eutektičkog sastava
- dobra obradljivost odvajanjem čestica
- visoka otpornost na trošenje i koroziju
- slaba zavarljivost radi niske istežljivosti i velikog postotka ugljika

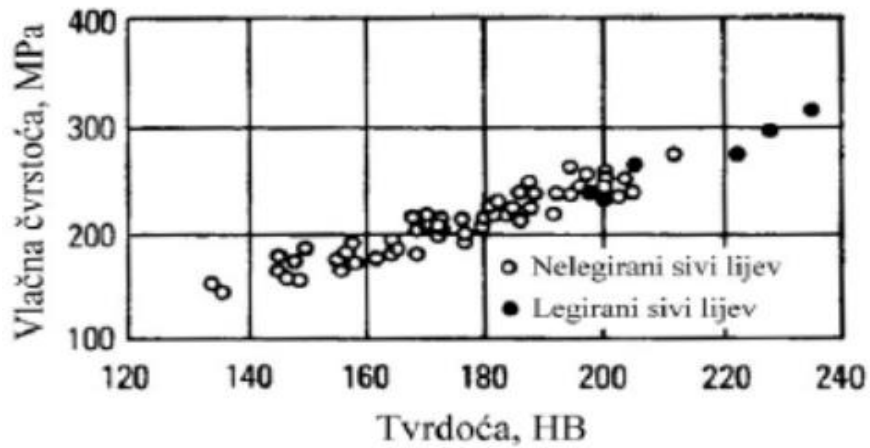
### MEHANIČKA SVOJSTVA:

- relativno niska vlačna čvrstoća
- visoka tlačna čvrstoća
- niska istežljivost <1%
- niska vrijednost udarnog rada loma
- promjenljiv modul elastičnosti

### OSTALA SVOJSTVA:

- dobra antifrikcijska svojstva
- dobra sposobnost prigušivanja vibracija
- dobra otpornost na koroziju
- pri višim temperaturama povećava volumen

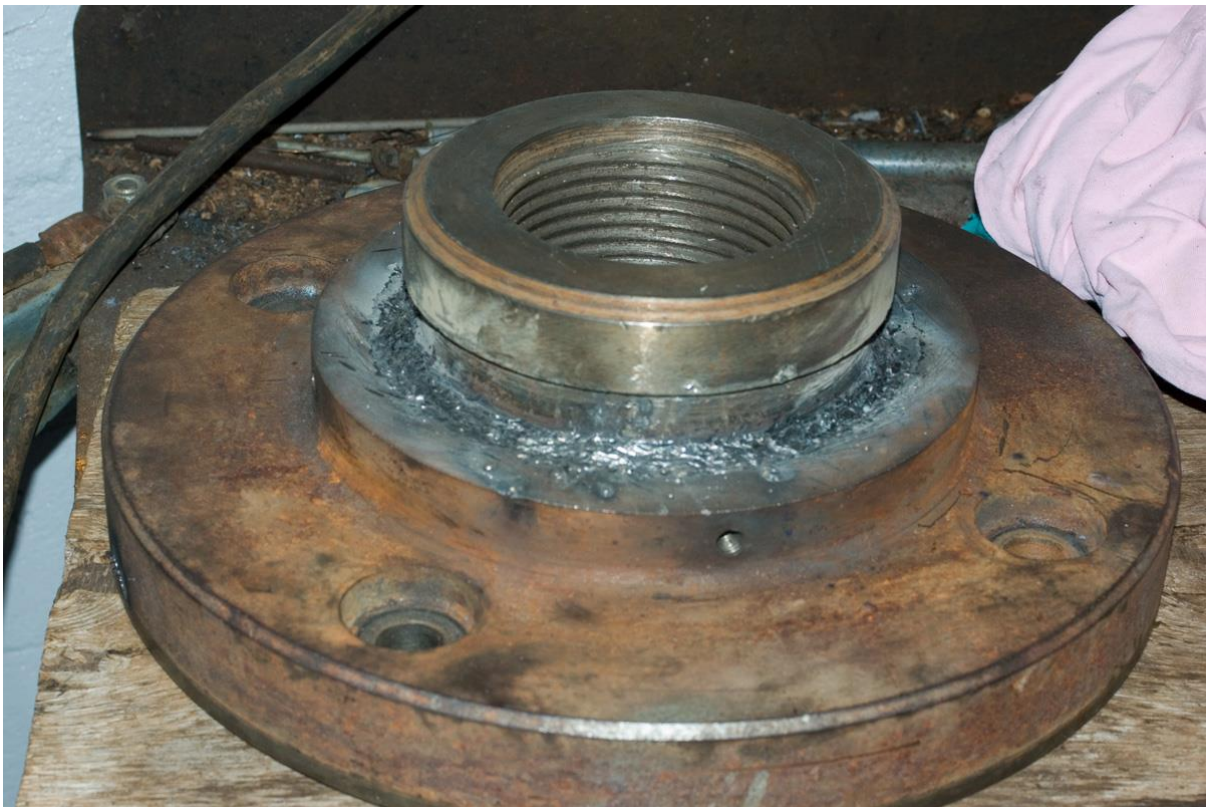
Na tvrdoću sivog lijeva utječe manje oblik grafita, a više kemijski sastav i raspodjela grafita. S povećanjem postotka cementita raste i tvrdoća sivog lijeva. Tvrdoća sivog lijeva se kreće u granicama od 120 do 200 HB, a za kvalitetnije ljevove do 250 HB.



Slika 6. Odnos tvrdoće i čvrstoće kod različitih kvaliteta sivog lijeva [7]

### 3. REPARATURNO ZAVARIVANJE

Reparaturno zavarivanje je kompleksna tehnološka disciplina koja zahtjeva određena specifična znanja i vještine. Reparature se provode u gotovo svim industrijskim granama (strojogradnja, naftna, kemijska i petrokemijska industrija, građevinarstvo, valjaonice itd.). Dijelovi od sivog lijeva izrađuju se lijevanjem, uglavnom u velikoserijskoj industrijskoj proizvodnji. To su najčešće postolja raznih strojeva, razna armatura koja nije izložena većem tlaku i temperaturi kao što su propusni ventili, cijevi, kotači, kućišta motora na automobilima, na traktorima, kućišta radnih strojeva i dr. Pri tom se istodobno produžuje radni vijek postrojenja, stroja, uređaja, ali i ostvaruju ogromne uštede.



*Slika 7. Reparatura zamašnjaka [8]*



Dijelovi od sivog lijeva često doživljavaju havarije u obliku pukotina i lomova. Gotovo u pravilu isplati se popravljjanje takvih havarija, najčešće radi ušteda koje nastaju skraćanjem vremena do ponovnog uključivanja strojnog dijela u rad. Osim toga pojedinačni odljevci su skupi.

Pristup reparaturi može se podijeliti u četiri faze: utvrditi stanje oštećenja (prikupiti sve poznate podatke o oštećenju, materijalu, uvjetima eksploatacije), procijeniti situaciju i donijeti odluku o reparaturi zavarivanjem ili nekom od srodnih tehnologija, u pisanom obliku propisati tehnologiju popravka te provesti popravak i arhivirati dokumentaciju.



*Slika 8. Zavareni nosač poluge [10]*

### 3.1. Zavarivanje sivog lijeva

Sivi lijev ne podnosi unutarnja naprezanja koja se obavezno pojavljuju u procesima zavarivanja zbog uzastopne izmjene faza zagrijavanja i hlađenja. Kako je već rečeno, sivi lijev ima vrlo nisku istezljivost zbog čega najčešće dolazi do pojave pukotina. Uz određene tehnološke mjere i s odgovarajućim dodatnim materijalom, sve uobičajene vrste sivog lijeva, čak i specijalne vrste, mogu se zavarivati. Pri zavarivanju sivog lijeva dolazi do promjene mikrostrukture ZUT-a. Ponekad se u praksi događa da je zavarivanje gotovo nemoguće jer se dodatni materijal pjeni, skuplja u kuglaste forme i odvaja od osnovnog materijala. Najčešće se radi o materijalu koji je bio izložen visokim temperaturama uz djelovanje ulja, kiselina ili para. U tom slučaju dolazi do korozije materijala (selektivna korozija). Smatra se u praksi kako je takav materijal zbog promjene strukture „pregorio“ i nije ga moguće uspješno zavarivati.

Sivi lijev se može zavarivati na toplo i na hladno, a može se i lemiti. Zavarivanje na toplo izvodi se elektroćnim ili plinskim postupkom. Zavarivanje na hladno izvodi se samo rućnim elektroćnim postupkom (REL).



*Slika 9. Grana vodovodne instalacije[10]*

### 3.1.1. Zavarivanje sivog lijeva na toplo

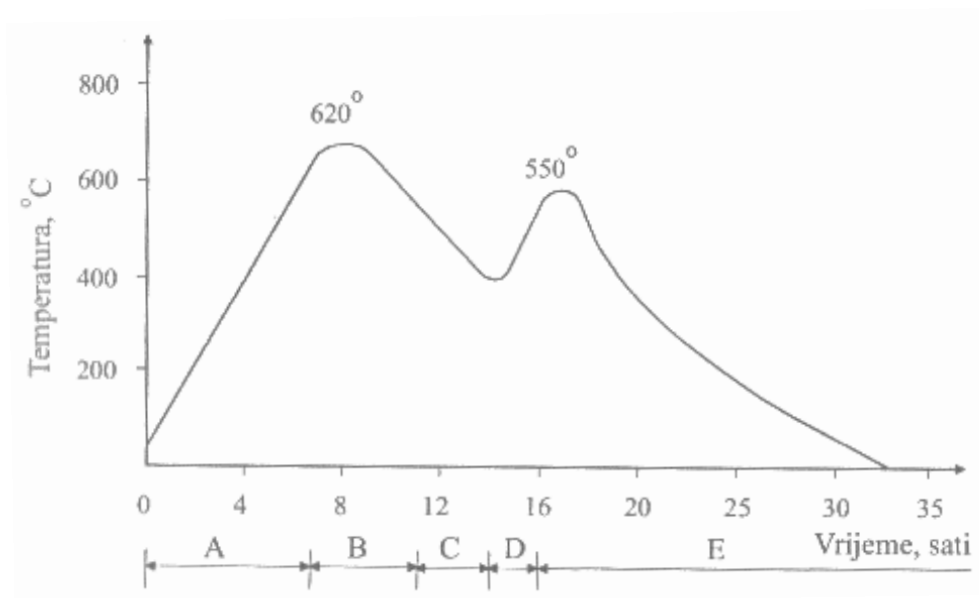
Zavarivanje sivog lijeva na toplo može se izvoditi REL postupkom i plinskim postupkom. Kod tog postupka zavarivanja radni komad mora se zagrijavati na temperaturu od 600 do 650 °C. Temperaturu između 600 i 650 °C potrebno je održavati tijekom cijelog procesa zavarivanja. Kod zavarivanja odljevka i kućišta koja imaju složenu konfiguraciju mora se voditi računa o režimu zagrijavanja jer se naglim i neujednačenim podizanjem temperature mogu izazvati nove pukotine. Kod ovakvih slučajeva preporučuje se zagrijavanje s dinamikom od 15 do 20 °C na sat.



Slika 10. Ispušna grana ventila motora zavarena na toplo [10]

Potrebno je kod plinskog i kod REL postupka imati mogućnost zamjene i odmora zavarivača jer se ne preporučuje prekidanje procesa reparature. Svaki zastoј može prouzročiti poremećaj i pad temperature te pojavu novih pukotina. Postoje različite mogućnosti kontroliranog zagrijavanja radnih komada: plinsko, indukcijsko, električnim grijačima i sl.

Temperature tijekom zavarivanja treba pratiti i kad je moguće, cijeli dijagram procesa registrirati zapisom. Kod zavarivanja na toplo potrebno je u kontinuitetu odmah poslije završnog zavarivanja obaviti i kratkotrajno žarenje na temperaturi od 550 °C. Nakon odžarivanja mora se osigurati i sporo hlađenje između 50 i 100 °C na sat. Detaljan prikaz toplinske obrade vidi se na sljedećoj slici 11.



Slika 11. . Dijagram toplog zavarivanja sivog lijeva i toplinska obrada [2]

A – predgrijavanje; B – zavarivanje; C – lagano hlađenje; D – kratkotrajno žarenje;

E – sporo hlađenje nakon žarenja

Temperaturni tretman kod REL postupka i kod plinskog postupka provodi se na isti način. Radne komade potrebno je dobro obložiti keramičkom izolacijskom vunom kako bi zavarivači bili što bolje zaštićeni od visokih temperatura i mogli nesmetano raditi.



*Slika 12. Keramička izolacijska vuna [11]*

Vrlo je važno točno utvrditi oblik i rasprostiranje pukotine što često nije moguće prostim okom, pa se preporučuje koristiti ispitivanje penetrantskom metodom.

Kod plinskog postupka zavarivanja sivog lijeva na toplo radni komadi moraju se zagrijati na isti način kao i kod REL postupka, a samo zavarivanje izvodi se kao i kod standardnog plinskog zavarivanja. Plinski plamen je neutralan do laganog pretička acetilena.

### 3.1.1.1. DODATNI MATERIJAL ZA ZAVARIVANJE NA TOPLO

Kod REL postupka zavarivanja sivog lijeva na toplo, dodatni materijal su specijalno obložene elektrode s jezgrom od sivog lijeva. Obično su obložene grafitnom oblogom koja osigurava stabilan i miran električni luk. Orijentacijski kemijski sastav zavara je 3.2% C, 3.1% Si i 0.5% Mn.



Slika 13. Elektrode za zavarivanje sivog lijeva na toplo [10]

Tako zavareni spojevi, uz opisani toplinski tretman, imaju vrlo dobru homogenost i mehanička svojstva jednaka ili čak bolja od osnovnog materijala.

Pri zavarivanju plinskim postupkom kao dodatni se materijali koriste se šipke od sivog lijeva (3-3.5% Si), najčešćeg promjera 8, 10 ili 12 mm. Prilikom zavarivanja stvara se puno žitke taline na kojoj pliva sloj oksida koja ometa zavarivanje. Oksidni sloj treba uklanjati miješanjem i dodavanjem praška dezoksidansa („kalcinirana soda“  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) izravno na talinu ili na vrh užarene šipke dodatnog materijala. Kvaliteta zavarenih spojeva ovim postupkom vrlo je dobra.

### 3.1.1.2. SMJERNICE I TEHNIKA RADA ZA ZAVARIVANJE NA TOPLO

Manje radne komade ekonomično je zavarivati na toplo, plinskim plamenom. Zavarivanje je jednostavno i nije skupo, a zavareni spoj je kvalitetan.



*Slika 14. Zavarivanje plinskim plamenom tuljka hidranta [15]*

Velike strojne dijelove i uopće dijelove s debelim stjenkama kao što su masivna kućišta, postolja, oštećene kokile i dr., ukoliko postoji mogućnost zagrijavanja i sporog hlađenja (u pećima), dobro je zavarivati na toplo REL postupkom velikim jakostima struje zavarivanja.

Priprema zavarenih spojeva kod zavarivanja sivog lijeva na toplo slična je uobičajenoj pripremi za zavarivanje. Najpreciznija metoda za zagrijavanje radnog komada su automatske peći.



*Slika 15. Peć za zagrijavanje malih komada [15]*

Zagrijavanje se također može vršiti ručno, a kao kontrola temperature koriste se termo krede. Zagrijani radni komad postavlja se tako da je na mjestu zavarivanja pristupačan za zavarivanje. Mjesto zavarivanja postavlja se u vodoravni položaj s podlogom za pridržavanje taline. Kod zavarivanja vrši se spiralno gibanje vrha elektrode. Pripremljeni žlijeb za zavarivanje ne smije imati nikakve zazoru i otvore u korijenu ili na krajevima spoja. Vrlo žitka talina može tijekom zavarivanja potpuno iscrpiti iz spoja i cijeli postupak u tom slučaju treba ponavljati. Ukoliko se radni komad iznosi iz peći, valja ga dobro obložiti, omotati izolacijskim materijalom da se ne hladi. Kod REL zavarivanja potrebno je uzeti elektrode što većeg promjera i upotrijebiti velike jakosti struje zavarivanja.



### 3.1.2. Zavarivanje sivog lijeva na hladno

Zavarivanje sivog lijeva na hladno izvodi se uglavnom REL postupkom. Homogenost i kvaliteta tako zavarivanih spojeva niža je od rezultata zavarivanja sivog lijeva na toplo. Ako se zahtijeva da zavareni spojevi moraju biti nepropusni, naročito pri višim radnim tlakovima, onda se ipak preporučuje sivi lijev zavariti na toplo. Postupak zavarivanja sivog lijeva na hladno u usporedbi za zavarivanje na toplo zahtijeva znatno manja ulaganja i daleko je jednostavnije za provedbu. Kod zavarivanja na toplo radni komad mora se demontirati i odvoziti na posebno pripremljena radna mjesta. Kod zavarivanja na hladno postupak je manje složen te se, kad je to moguće, zavarivanje može provoditi bez da se radni komad ne demontira sa strojnog sklopa.



Slika 16. Kućište cilindra preše zavarena na hladno [10]

Tako je strojne dijelove kod kojih se traži točnost dimenzija nakon zavarivanja te dijelove kod kojih je demontaža i montaža zahtjevna i skupa često ekonomičnije zavariti na hladno bez demontaže. Kod zavarivanja na hladno vrlo je važno kvalitetno pripremiti zavareni spoj, očistiti do metalnog sjaja i odmastiti zonu u okolini spoja te točno pozicionirati polomljene dijelove. Kod lociranja i definiranja položaja i pukotina preporučuje se koristiti penetrantsku metodu ispitivanja.

Važno je znati kako je posebno kritično temperaturno područje hlađenja od 150 do 50 °C, kada je najčešća pojava pukotina u zonama zavarenog spoja sivog lijeva. Za uspješno zavarivanje sivog lijeva na hladno izuzetno je važan strpljiv i odgovoran pristup zavarivača koji provodi reparaturu.



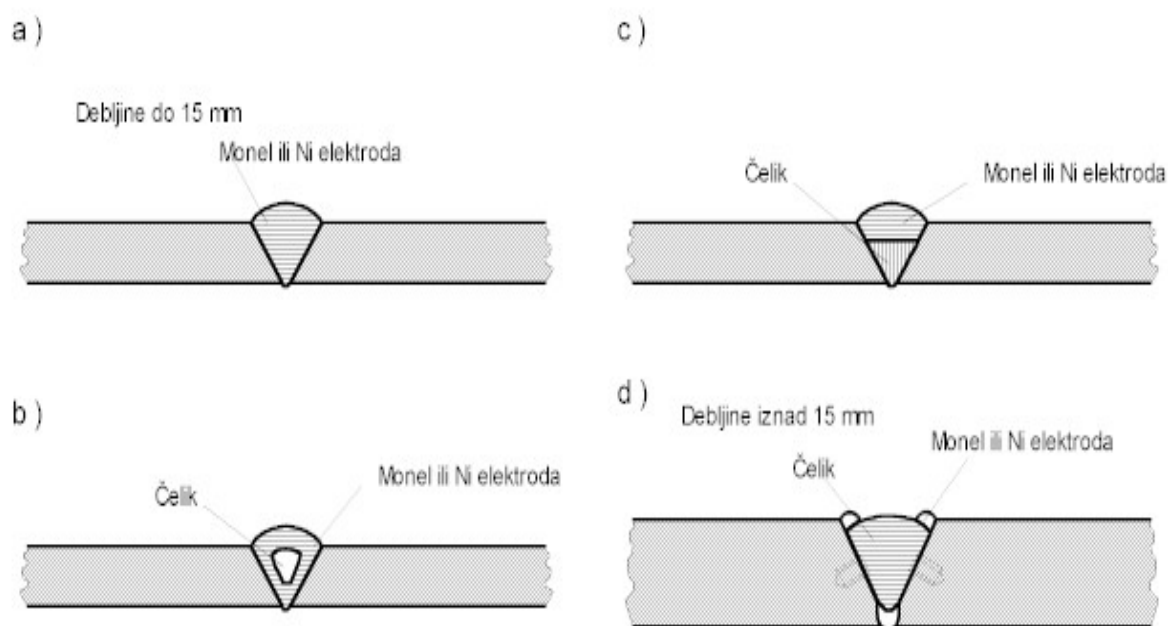
*Slika 17. Držač zavaren na hladno [16]*

### 3.1.2.1. DODATNI MATERIJAL ZA ZAVARIVANJE NA HLADNO

Obložene elektrode za zavarivanje sivog lijeva na hladno REL postupkom po sastavu podijeljene su u tri grupe:

- Obložene elektrode od čistog nikla (96-98% Ni, ostatak Fe). Elektrodama od čistog nikla postiže se najbolji rezultat kod zavarivanja.
- Obložene elektrode nikal-željezo (Ni-Fe) s oko 55% Ni i oko 45% Fe.
- Obložene monel<sup>1</sup> elektrode s oko 70% Ni i oko 30% Cu

Preporuke za izbor dodatnih materijala u dijelovima za reparaturu od sivog lijeva za zavarivanje na hladno može se potražiti u katalogima poznatih proizvođača (npr. Elektroda Zagreb).



Slika 18. Primjeri različitih izvedbi korištenja dodatnog materijala pri hladnom zavarivanju SL [13]

<sup>1</sup> Monel – legura prvenstveno sastavljena od nikla i bakra. Ima visoku tvrdoću i visoku otpornost na koroziju i kiseline.

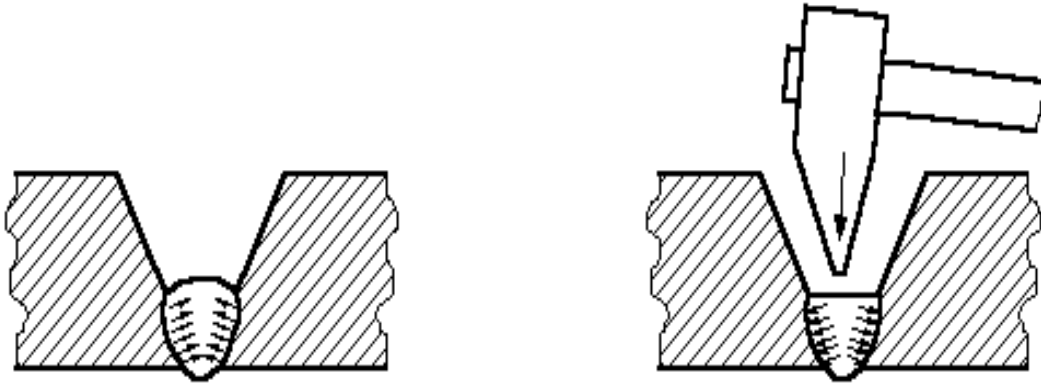
### 3.1.2.2. SMJERNICE I TEHNIKA RADA ZA ZAVARIVANJE NA HLADNO

Strojne dijelove srednjih veličina gdje se ne dopuštaju nikakve deformacije i gdje su demontaža i montaža skupe ekonomičnije je popravljati zavarivanjem na hladno. Kod velikih strojnih dijelova gdje nije moguće provesti demontažu i zagrijavanje te kod vrlo velikih strojnih dijelova, koriste se popravci zavarivanjem na hladno.



*Slika 19. Blok motora zavaren na hladno [16]*

Zavarivanje se provodi s kratkim zavarima čija dužina treba biti oko 10 x promjer elektrode sa širinom 2 x promjer elektrode. Nakon tako položenog zavara on se mora odmah, dok je vruć, lagano raskivati zaobljenim vrhom čekića.



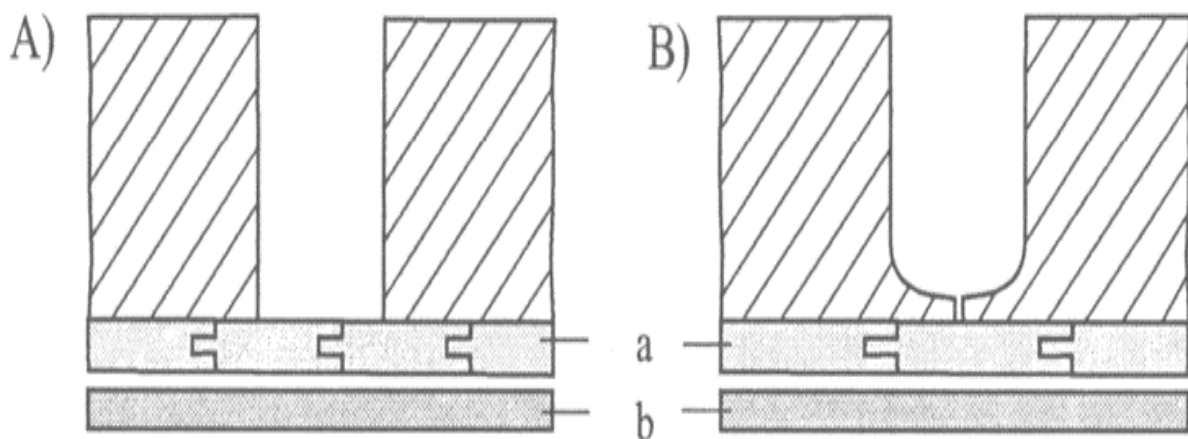
Slika 20. Raskivanje zavara čekićem [13]

Daljnje zavarivanje vrši se kratkim zavarima od 10 do 20 mm nakon čega se odmah radi raskivanje toplog zavara. Nastavak slijedi kad se na zavareno mjesto može položiti dlan ruke bez opasnosti od opekotina (otprilike 50 °C). Vrh elektrode vodimo u obliku spirale male širine i uz što kraći luk. Zavarivanje se izvodi od sredine prema van, a ukoliko kod zavarivanja primijetimo da se prvi sloj dobro ne veže za osnovni materijal ili je porozan, to upućuje na postojanje nečistoća ili je materijal izgubio svojstvo zavarljivosti. U tom slučaju ovaj sloj treba skinuti i ponoviti zavarivanje.

### 3.1.3. Način i priprema žlijeba za zavarivanje sivog lijeva

Kod zavarivanja često koristimo izraz: “priprema je pola posla” te je tako priprema žlijeba jedna od najvažnijih stvari za uspješno zavarivanje. Površinsku nečistoću treba obvezno očistiti uz rub žlijeba do metalnog sjaja. Ovome treba posvetiti posebnu pažnju jer je čistoća žlijeba vrlo važna za kvalitetno izvođenje zavara. Za pripremu žljebova za zavarivanje mogu se koristiti brusilice, bušilice, ručna električna ili pneumatska glodala u kombinaciji s obloženim elektrodama za žlijebljenje ili ugljenim elektrodama za žlijebljenje.

Kod zavarivanja na toplo važno je dobro obraditi žlijeb radi što kvalitetnijeg zavara. Priprema žlijeba se provodi kao što je prikazano na slici 21.

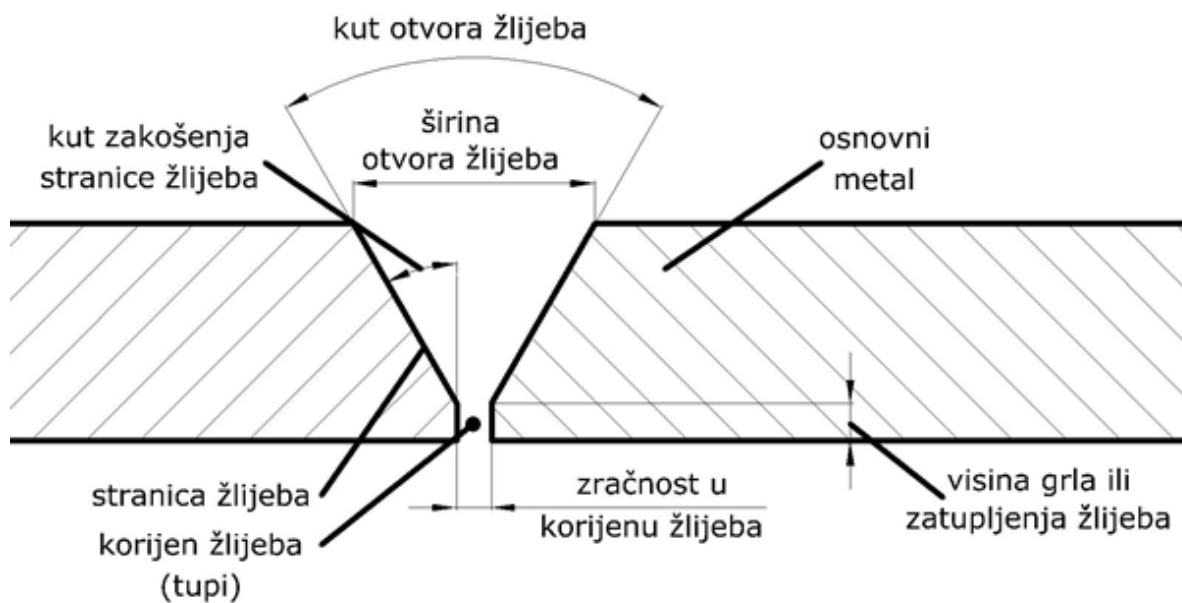


Slika 21. Priprema žlijeba za zavarivanje dijelova od sivog lijeva postupkom na toplo [2]

A – za zavarivanje plinskim plamenom; B – za zavarivanje REL postupkom

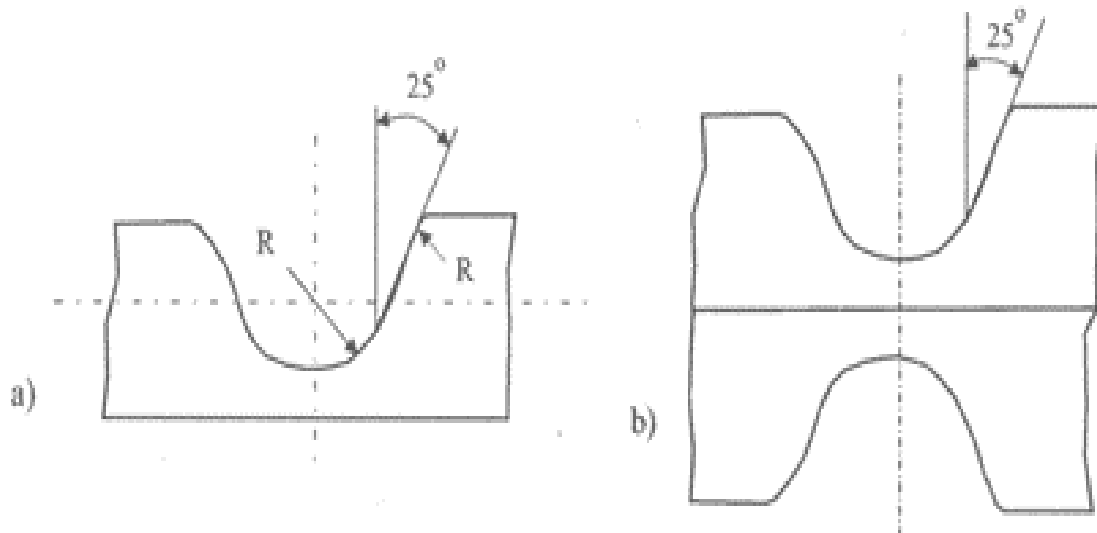
a – grafitne pločice; b - azbest

Kod zavarivanja na hladno također je vrlo važna priprema žlijeba. U svim slučajevima nastoji se pripremiti što otvoreniji U-žlijeb sa zaobljenim gornjim rubovima. Gdje to nije moguće priprema se V-žlijeb s otvorom oko  $70^\circ$ . Izgled i dijelove žlijeba možemo detaljnije vidjeti na slici 22.



Slika 22. Klasifikacija i nazivlje V-žlijeba za zavarivanje

V-žlijeb se koristi kod manjih debljina materijala, a U-žlijeb kod debljih materijala zbog manjeg utroška dodatnog materijala. Ukoliko se zavaruje samo s jedne strane, dovoljna je dubina žlijeba oko dvije trećine do tri četvrtine debljine stijenke, odnosno toliko da ne dođe do protaljivanja pri zavarivanju.

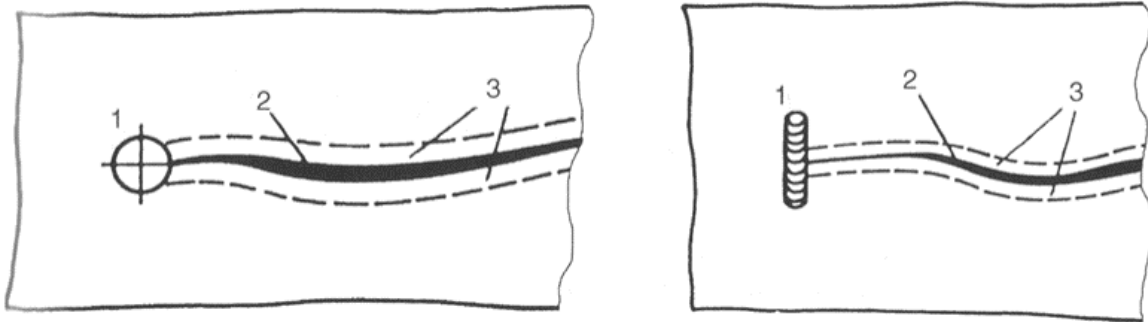


Slika 23. Priprema U-žlijeba koja se preporuča kod zavarivanja sivog lijeva na hladno [2]

Kod manjih debljina materijala (manja od 20 mm) i kraćih pukotina preporuča se obraditi žlijeb ručno, sjekačem ili glodalom. Ako se obrađuje brušenjem, zaostale čestice od brusa potrebno je dobro očistiti. Kod debljih materijala (većih od 20 mm) i većih pukotina, žlijeb se obrađuje brušenjem ili žlijebljenjem ugljenom elektrodom ili obloženom metalnom elektrodom za žlijebljenje. Nakon takvog grubog toplinskog žlijebljenja, žlijeb se dorađuje brušenjem tako da se postigne potreban oblik, poravnaju neravnine i otkloni tvrdi sloj nastao utjecanjem topline kod toplinskog žlijebljenja.



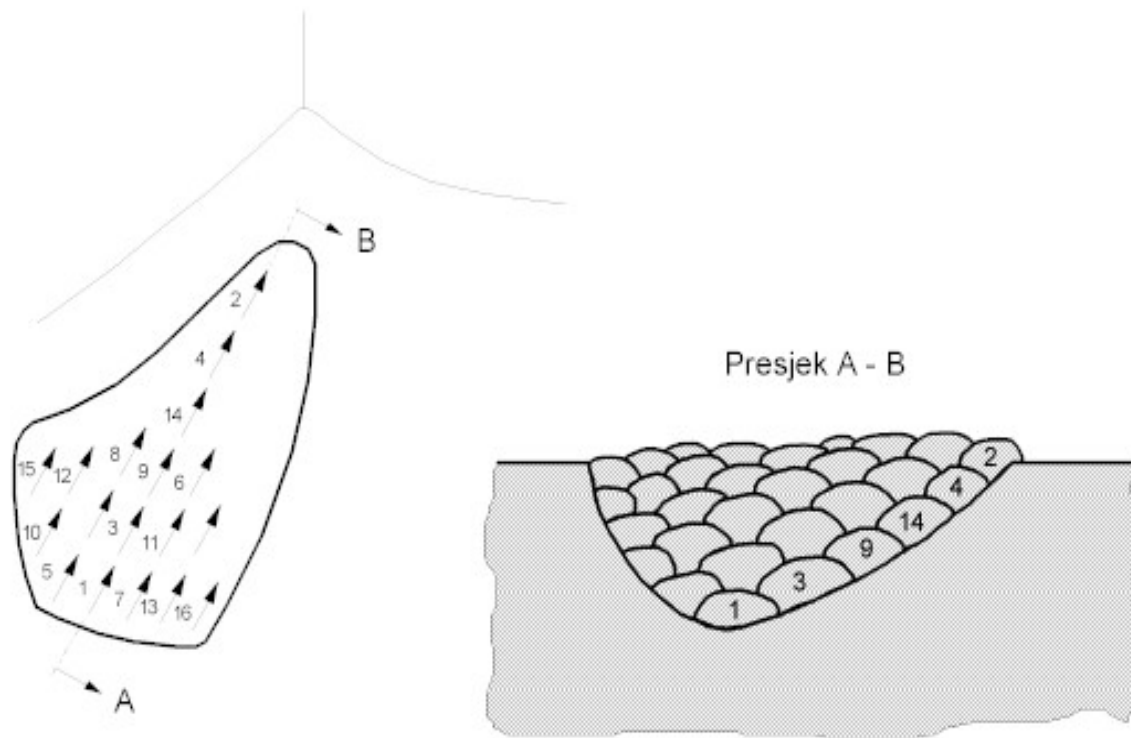
Vrlo je važno točno utvrditi oblik i rasprostiranje pukotine. Duljina i oblik pukotine može se procijeniti penetranskim metodama jer često vizualnim pregledom to nije moguće. Da bi se izbjeglo širenje pukotina potrebno je na njihovim krajevima zabušiti provrte obično promjera 8 mm.



Slika 24. Način pripreme spoja za zavarivanje sivog lijeva na hladno [2]

- 1 – Provrta ili zavari na krajevima pukotine radi sprečavanja njenog širenja; 2 – Pukotina  
3 – Obrada žlijeba

Najprije se zavaruje tanki prijelazni sloj na stranici žlijeba elektrodom promjera 2 mm, a potom preko zaobljenog gornjeg ruba žlijeba. Redosljed zavarivanja odvija se u pravilu od sredine prema krajevima pripremljenog žlijeba kao što prikazuje slika 25.

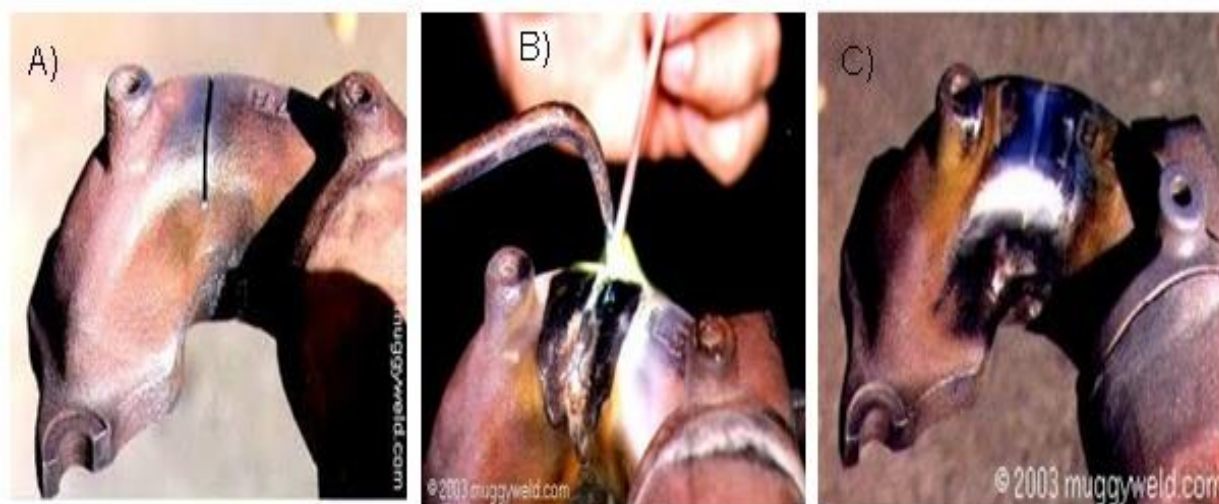


Slika 25. Shematski prikaz redoslijeda zavarivanja sivog lijeva [13]

Važno je dobro navarivanje prelaznog sloja kao osnova za daljnju popunu cijelog žlijeba. Također ne smije se zaboraviti da je nakon svakog prelaznog sloja obavezno raskivanje zaobljenim vrhom čekića kako bi se smanjila zaostala naprezanja u zavaru.

### 3.1.4. Lemljenje sivog lijeva

Postoji mogućnost spajanja sivog lijeva tvrdim lemljenjem, iako se rijetko primjenjuje. Tvrdi lemljenje sivog lijeva izvodi se zagrijavanjem osnovnog materijala na oko 400 °C, a temperatura vezanja je oko 775 °C. Mogućnost pojave unutarnjih napetosti, pukotina i deformacija znatno je smanjena. Čvrstoća je približno kao kod zavarivanja. Kao dodatni materijal se rabe šipke od mjedi (58-62% Cu) ili tzv. Alpska legura (47-54% Cu i 9-11% Ni). Dezoksidant, odnosno talilo, odgovara dodatnom materijalu, a sastoji se od borne kiseline, boraksa i željeznog praška. Veličina plamenika odabire se prema debljini stjenke. Plamen je neutralan, a tehnika rada je lijeva radi što pliće i šireg zavara. Nedostaci u lemljenju sivog lijeva su manja čvrstoća kod povišenih temperatura, slabija otpornost prema koroziji i različita boja metala.



Slika 26. Lemljenje ispušne grane [17]

A – prije lemljenja

B – za vrijeme lemljenja

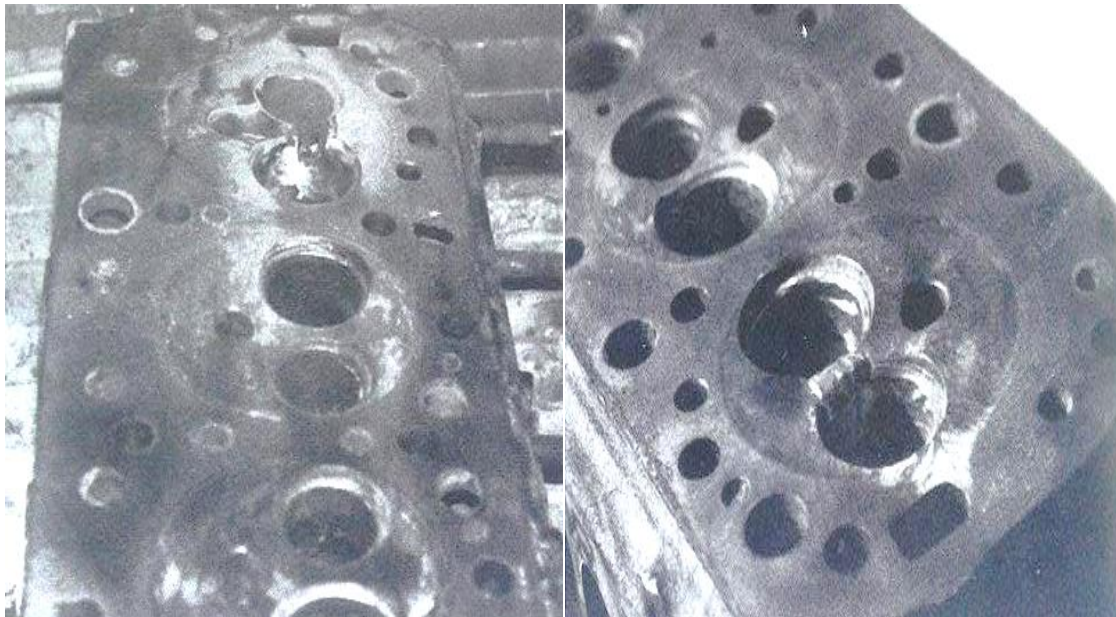
C – poslije lemljenja

### 3.1.5. Primjeri reparaturnog zavarivanja

Navest ćemo dva problema reparaturnog zavarivanja s kojim se danas često možemo susresti:

#### 1. Primjer: Reparaturno zavarivanje glave motora traktora

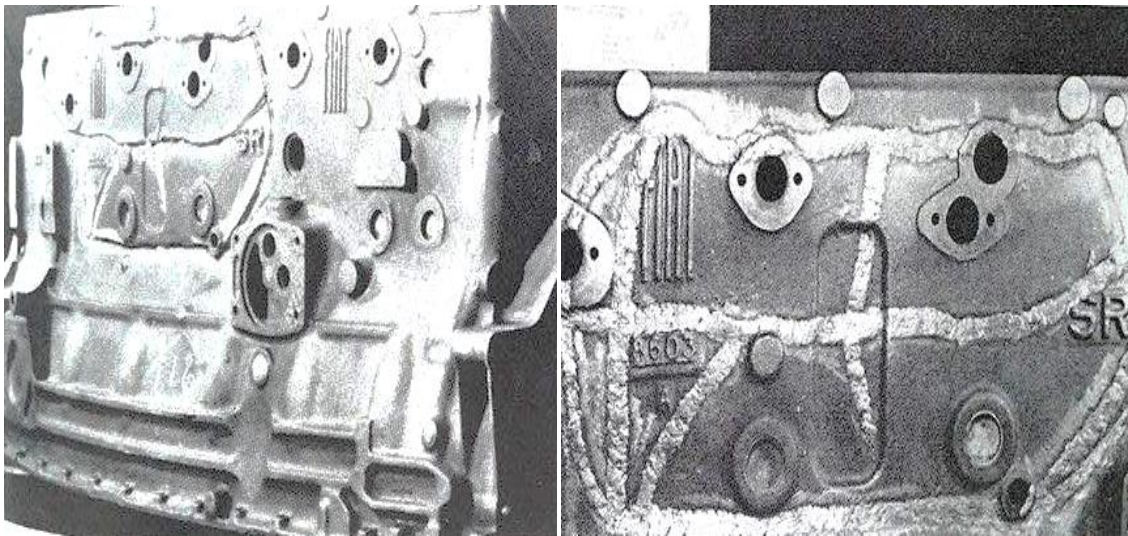
Glava motora traktora načinjena je od sivog lijeva. Na mostiću sjedišta ventila došlo je do pukotine kao što je vidljivo na slici 27. Uzrok pukotine bilo je, najvjerojatnije, slabo hlađenje uslijed začepjenosti kamencem rashladnih kanala za vodu. Pukotina je „izvađena“ brušenjem uz kontrolu penetrantskom metodom. Pripremljeno mjesto zavarivanja je također prikazano na slici 27. Zavarivanje je izvedeno na hladno REL postupkom, elektrodom EZ-Nikal 10, promjera 2,5 mm. Jakost struje zavarivanja bila je 90-110 A. Primijenjeno je raskivanje kratkih zavara.



Slika 27. Prikaz glave motora od sivog lijeva. Lijevo: prije zavarivanja, desno: poslije zavarivanja [3]

## 2. Primjer: Reparturno zavarivanje kućišta diesel motora

Osnovne dimenzije kućišta od sivog lijeva su oko 120/700/400 mm. Pukotine i lomovi, nastali su uslijed smrzavanja rashladne vode u kućištu. Najprije je izvršeno detaljno ispitivanje. Pripremljen je V-žlijeb. Polomljeni dijelovi su spojeni kao što prikazuje slika 28. Zavarivanje je izvedeno elektrodom UTP 8 promjerima 2 i 2,5 mm. Zavarivano je na hladno, kratkim, dobro raskivanim zavarima. Održavana je vrlo niska temperatura mjesta zavarivanja.



Slika 28. Reperturno zavarivanje kućišta diesel motora. Lijevo: priprema prije zavarivanja; Desno: nakon zavarivanja [3]

## 4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provedeno je zavarivanje bubnja kočnice automobilskog kotača. Također je provedeno ispitivanje makroizbruska zavarenog spoja. Osnovni materijal je sivi lijev promjera 200 mm i debljine 5-8 mm. Zavarivanje je izvedeno REL postupkom na hladno. Svrha eksperimenta je odrediti ispitivanje tehnologije reparaturnog zavarivanja sivog lijeva. Zavarivanje kao i samo ispitivanje provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje.

### 4.1. Priprema radnog komada

Kao simulacija pukotine, radni komad je prerezan na dva dijela. Rez je izveden na tračnoj pili. Radni komad se prvo stavio na ploču za stezanje te ravnim i preciznim rezom tračna pila odvaja komade što se vidi na slici 29.

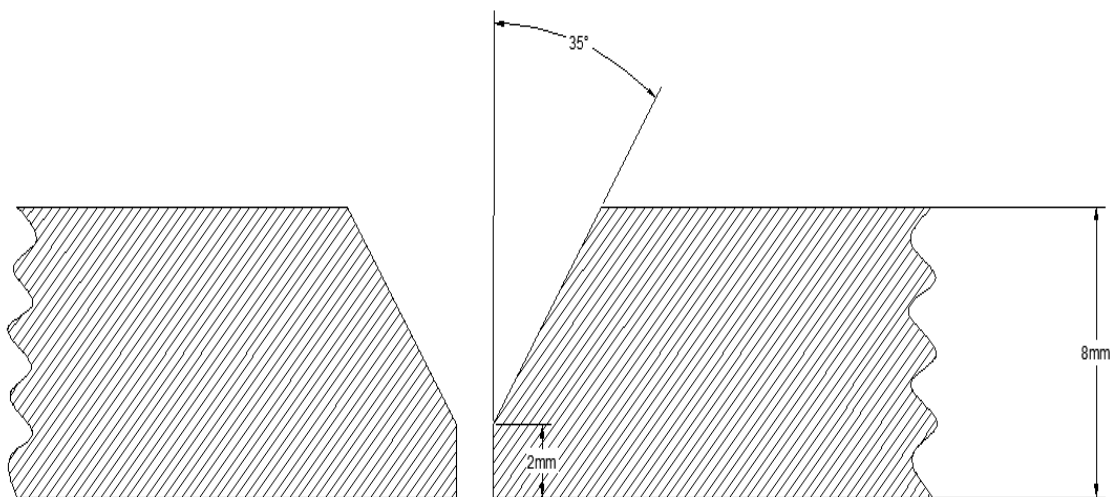


*Slika 29. Rezanje radnog komada tračnom pilom*



Slika 30. Presjek radnog komada

Sljedeće na što treba obratiti pozornost je priprema žlijeba. U teorijskom dijelu bilo je dosta govora o pripremi žlijeba tako da se može naslutiti da je priprema žlijeba vrlo važna za uspješno zavarivanje. Kako radni komad spada u manje debljine (manje od 20 mm) izrađen je V-žlijeb s otvorom oko  $70^\circ$ . Dubina žlijeba bila je oko tri četvrtine debljine stijenke.



Slika 31. V-žlijeb radnog komada

Žlijeb se radi pomoću kutne brusilice, brusnom pločom.



*Slika 32. Priprema žlijeba kutnom brusilicom*

Zaostale čestice od brušenja važno je dobro očistiti. Takva priprema žlijeba je spremna za daljnji tijek zavarivanja.



## 4.2. Zavarivanje radnog komada

Zavarivanje radnog komada provedeno je REL tehnologijom zavarivanja na hladno. Korištene su REL elektrode Castolin XHD 2230 od Ni-Fe. Osnovni podaci o elektrodi navedeni su u tablici 3.

Tablica 3. Elektroda Castolin XHD 2230

<b>Vlačna čvrstoća</b>	470-550 N/mm <sup>2</sup>
<b>Tvrdoća</b>	130-170 HV30
<b>Polaritet</b>	+/-
<b>Struja</b>	60-90 A
<b>Dimenzija</b>	Φ 2.5 mm x 250 mm
<b>Sušenje</b>	120 °C / 1h
<b>Obloga</b>	Bazična

Na slici 33. prikazane su REL elektrode Castolin XHD 2230.



Slika 33. Elektrode Castolin XHD 2230

Uređaj kojim je izvršeno zavarivanje naziva se UNI 350 C. Tehnički podaci uređaja navedeni su u tablici 4.

Tablica 4. Uređaj UNI 350 C

<b>Priključni napon</b>	3~ 400 V, 50 Hz
<b>Opseg regulacije</b>	20-350 A
<b>Dozvoljeno opterećenje kod 60% intermitencije</b>	350 A
<b>Dozvoljeno opterećenje kod 100% intermitencije</b>	280 A
<b>Napon praznog hoda</b>	65 V
<b>Masa</b>	40 kg
<b>Dimenzije (DxŠxV)</b>	560 mm x 420 mm x390 mm

Na slici 34. prikazan je uređaj za zavarivanje UNI 350 C.



Slika 34. Uređaj UNI 350 C

Zavarivanje je započelo pripajanjem. Elektroda je priključena na pozitivan pol istosmjerne struje. Kod pripajanja, jakost struje postavljena je na 90 A. Na slici 35. jasno vidimo pripoje na radnom komadu.



*Slika 35. Radni komad s pripojima*

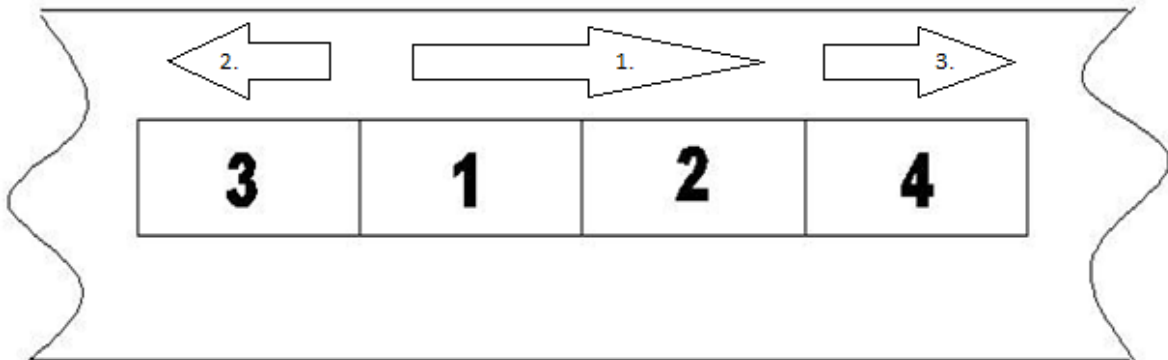
Nakon svakog pripajanja važno je dobro raskivati zavar kako bi smanjili naprezanja. Temperatura zavarivanja također je vrlo važna. Uređaj kojim je mjerena temperatura je infracrveni termometar koji je prikazan na slici 36.



*Slika 36. Infracrveni termometar*

Prema tehnologiji zavarivanja SL, zavarivanje je moguće nastaviti tek kad se temperatura spusti ispod 50 °C.

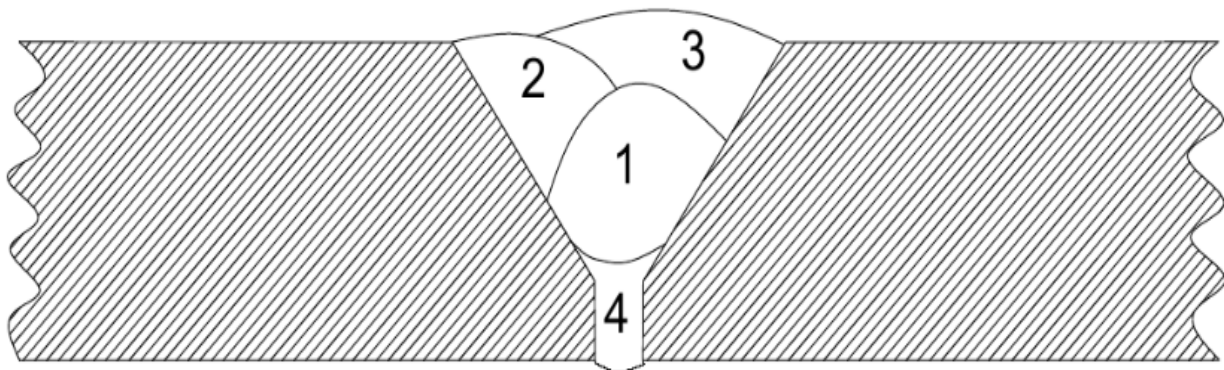
Tehnika rada koja se primjenjuje su kratki zavari (maksimalne duljine 20 mm), a zavarivanje se vrši iznutra prema van kao što je prikazano na slici 37.



Slika 37. Redoslijed i smjer zavarivanja

Zavarivanje kreće iz broja 1, a završava na broju 4.

Radni komad je zavaren u četiri prolaza. Tri prolaza nalaze se s gornje strane (lice zavara), a jedan prolaz sa stražnje strane (korijen zavara). Detaljan redoslijed zavarivanja po slojevima možemo vidjeti na slici 38.



Slika 38. Redoslijed zavarivanja po presjeku

Promjer elektrode je 2,5 mm, a jakost struje ćemo spustiti na 80 A. Po formuli kod REL-a jakost struje se određuje po promjeru elektrode, odnosno, za 1 mm promjera elektrode jakost struje treba iznositi 30-40 A. Nakon svakog zavarivanja vrlo je važno da se zavar odmah raskiva dok je još vruć i očisti od troske čeličnom četkom.



*Slika 39. Raskivanje zavara čekićem*



*Slika 40. Čišćenje zavara čeličnom četkom*

Kad se temperatura spusti ispod 50°C može uslijediti izvođenje sljedećeg zavara. Temperatura se jako sporo spušta jer je radni komad vrlo malen. To zahtijeva vrlo strpljiv i odgovoran pristup zavarivača.

Nakon završetka prvog sloja važno je dobro pregledati zavar zbog intervencije u slučaju nepravilnosti. Troska je uobičajena na površini zavara kod REL postupka zavarivanja. Problem nastaje ako se troska ne ukloni te u sljedećem prolazu ostane zarobljena unutar metala zavara. Tada se ona naziva „zarobljena troska“ te, kao takva, predstavlja nepravilnost u zavaru. Brušenje je izvođeno kako bi se uklonila troska na površini zavara koju nije bilo moguće ukloniti četkom.



*Slika 41. Uklanjanje troske kutnom brusilicom*

Brušenjem su pore „isplivale“ na površinu pa ih možemo vidjeti na slici 42. Najčešći uzrok pojave pora je vodik, no ne i jedini. Nepravilnosti na slici nisu sve uzrokovane porama, nego ima i drugih vrsta nepravilnosti: neprovara, nepotpunog staljivanja, nepravilne geometrije zavara.



*Slika 42. Pore u zavaru*

Kad se temperatura spusti na temperaturu pogodnu za nastavak zavarivanja (ispod 50 °C), može se krenuti s zavarivanjem drugog sloja. Za drugi sloj vrijede ista pravila kao i za prethodni. Tehnika rada i dalje su kratki zavari (maks. duljina 20 mm) te raskivanje nakon svakog zavara.



Kako izgleda konačno lice zavara može se vidjeti na sljedećoj slici 43.



*Slika 43. Lice zavara*

U samoj reparaturi bi bilo potrebno zavarivati i bočne strane, no pošto radni komad ne ide ponovno u eksploataciju nego služi samo za ispitivanje tehnologije zavarivanja, nema potrebe za daljnjom reparaturom.

Nakon uspješno zavarenog lica, sa stražnje strane zavarili smo korijen zavara što se vidi na slici 44. Prije zavarivanja donja strana izbrusila se kutnom brusilicom te se očistile nečistoće. Za korijen zavara vrijede ista pravila kao i za zavarivanje lica.



*Slika 44. Korijen zavara*

I na ovakav mali komad uloženo je dosta vremena i truda. Sve to govori da zavarivanje sivog lijeva nije nimalo jednostavan postupak te zahtijeva veliku disciplinu i zalaganje samog zavarivača, a i tehnologa.

### 4.3. Ispitivanje radnog komada

Poslije zavarivanja slijedi kontrola homogenosti zavara. Prvo se radi s penetrantskim ispitivanjem. Penetrantsko ispitivanje često se primjenjuje kod ispitivanja zavarenih spojeva na konstrukcijama kao ispitivanje bez razaranja. Prije nanosa penetranta važno je očistiti površinu (npr. čeličnom četkom) te odmašćivačem odmastiti površinu.



Slika 45. Odmašćivanje površine

Nakon dobro pripremljene površine slijedi nanošenje penetranta na lice i korijen zavora. Vrijeme penetriranja, tj. prodiranja u pukotine ovisi o vrsti penetranta i o dimenzijama pukotine, ali se približno uzima 10 do 15 minuta.



*Slika 46. Penetriranje radnog komada*

Nakon 15 minuta penetrant se uklanja vodom. Kod penetranta koji se uklanjaju vodom treba biti pažljiv i mlaz vode usmjeriti paralelno s površinom radnog komada kako mlaz vode ne bi istisnuo penetrant iz pukotine. Nakon sušenja i brisanja površine suhom krpom, nanosi se razvijatelj, koji izvlači penetrant. Vrijeme djelovanja razvijatelja je tek nekoliko minuta. Ako postoji pukotina na zavaru, tada će razvijatelj izvući penetrant na površinu, što će se otkriti kao lako uočljiva crvena crta.

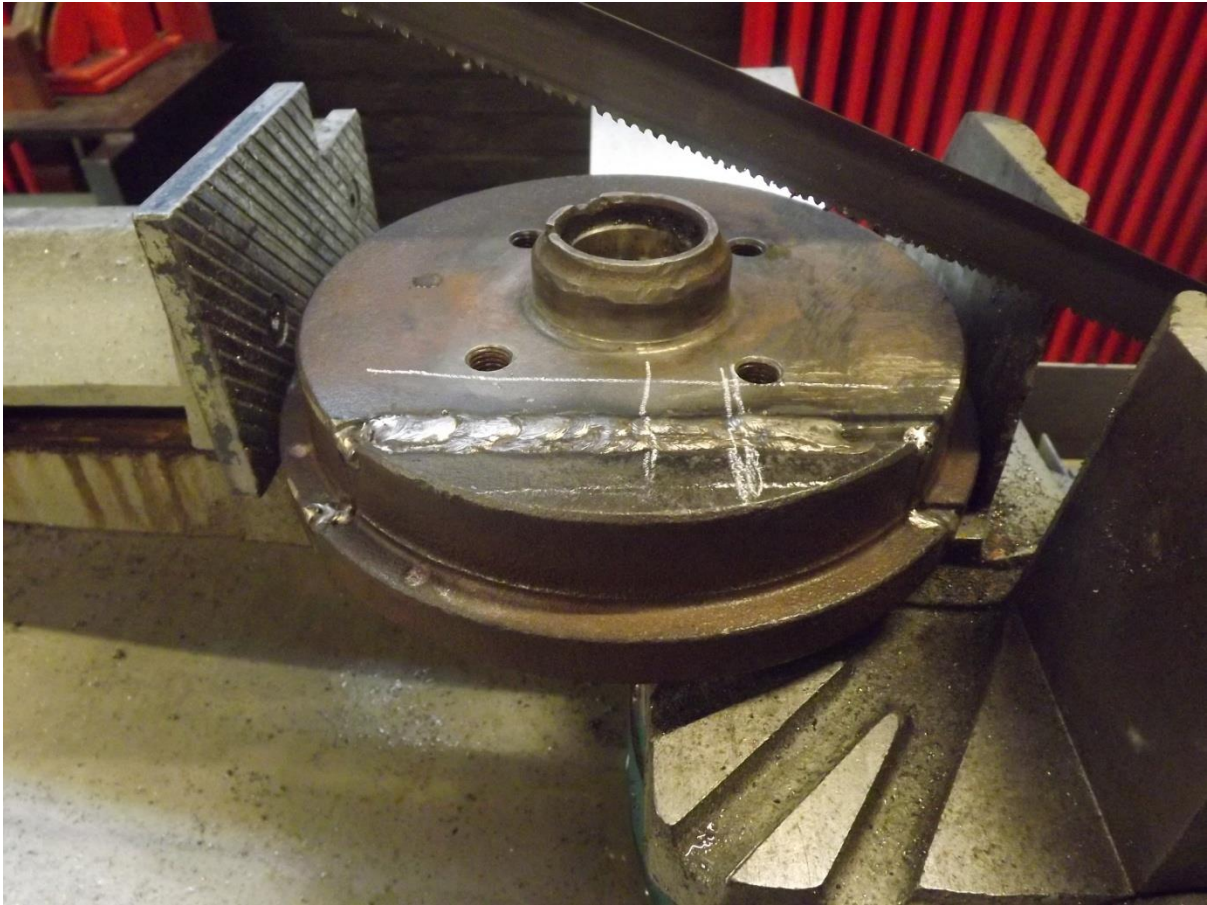
Na slici 47. su jasno definirane indikacije koje su zaokružene crnom bojom.



*Slika 47. Radni komad nakon ispitivanja penetrantskom metodom*

Penetrantskom metodom moguće je otkrivanje pukotina koje su veće duljine od 0,1 mm i širine od 0,03 mm. Za otkrivanje manjih pukotina koristi se ispitivanje ultrazvukom, rendgenografijom, gamagrafijom itd.

Nakon uspješno provedenog ispitivanja uslijedilo je rezanje makroizbruska. Rezanje makroizbruska izvršeno je na tračnoj pili. Dimenzije makroizbruska su 50 mm X 20 mm.



*Slika 48. Izrezivanje makroizbruska*

Makroizbrusak se dalje brusio kako bi se dobila što kvalitetnija površina. Brušenje se izvodi na strojnoj brusilici (traka). Granulat brusnog papira je 100.



*Slika 49. Brušenje makroizbruska na traci*

Poslije toga izvodilo se ručno brušenje na brusnom papiru. Granulat brusnog zrna je 300.

Za kraj, najfinija obrada vršila se također ručnim brušenjem na brusnom papiru, samo s granulatom brusnog zrna 600.

Takav makroizbrusak je spreman za daljnju analizu koja se vršila pomoću 5% otopine nitala.

Nital je otopina alkohola i dušične kiseline koja se obično koristi za gravuru metala. Posebno je pogodna za otkrivanje mikrostruktura ugljičnih čelika. Nital djeluje tako da nagriza površinu materijala. Alkohol može biti metanol, etanol ili metilirani alkohol.

Dobro pripremljeni makroizbrusak uranjamo u 5 % otopinu nitala i tako držimo par minuta.



*Slika 50. Uranjane makroizbruska u otopinu nital*



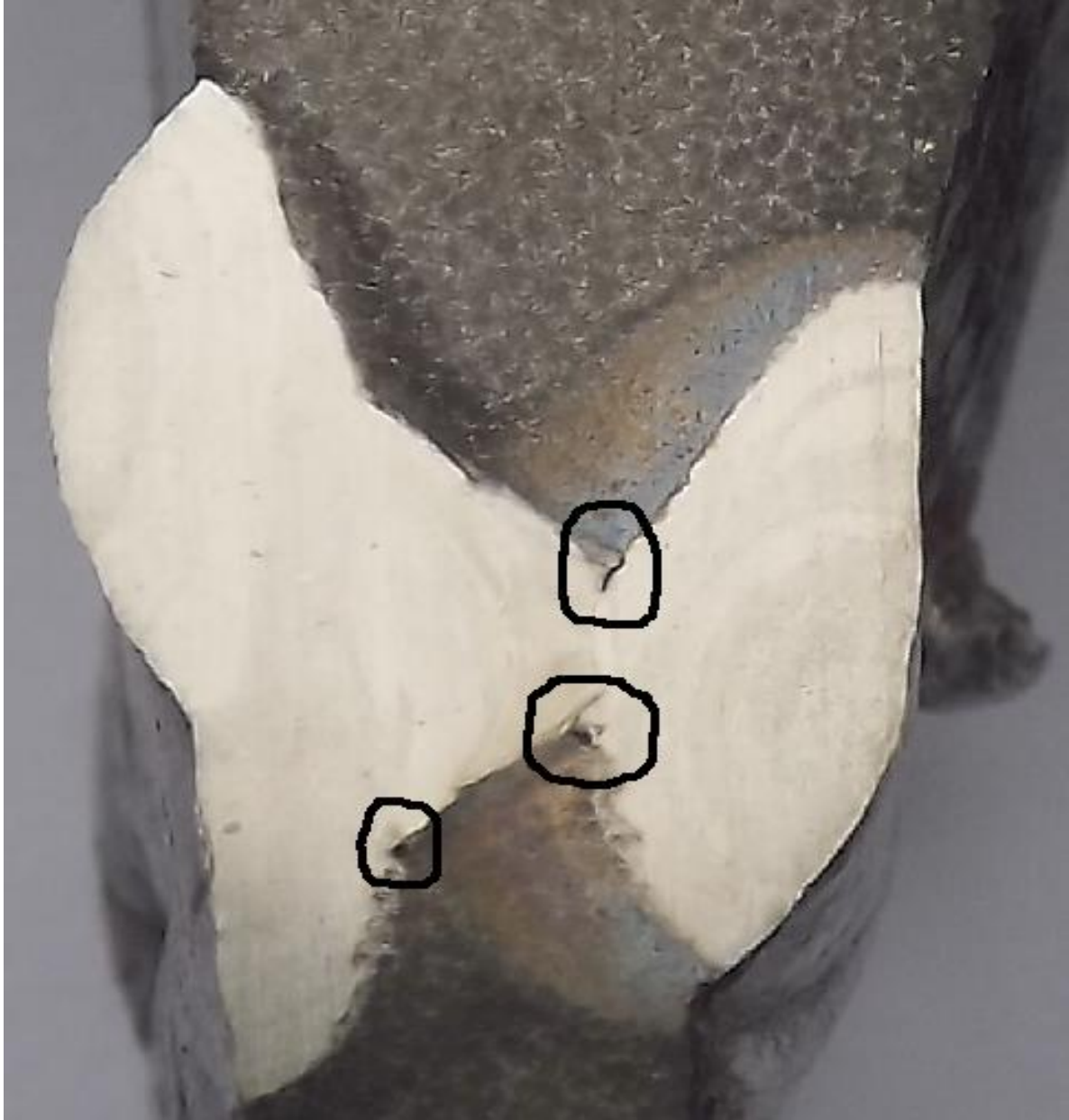
Posljedice koje su se dogodile nagrizanjem nitala najbolje možemo vidjeti na slici 51.



*Slika 51. Makroizbrusak nakon uranjanja u nital*

Na slici se uočava kako je nital nagrizao sivi lijev, a zavar čiji je kemijski sastav uglavnom sastavljen od nikla, ostao je netaknut. Također jasno se vidi iz slike zona utjecaja topline (ZUT).

Na makroizbrusku su vidljive greške u vezivanju, nastale zbog nepostojane veze između istopljenog dodatnog materijala i osnovnog materijala. Na slici 53. jasnije se vide nepravilnosti koje su zaokružene crnom bojom.



*Slika 52. Pogreške u vezivanju*

Ovakve nepravilnosti mogu biti koncentratori naprezanja koji mogu uzrokovati propagaciju pukotine što može rezultirati puknućem cijelog radnog komada. Cijeli ovaj postupak još jednom nam govori kako je SL jako teško zavarivati i svaka mala neopreznost što zavarivača, što tehnologa, može imati katastrofalne posljedice.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz završnog rada zaključeno je kako je reparaturno zavarivanje vrlo kompleksan proces. Za zavarivanje sivog lijeva važno je dobro poznavati sivi lijev, odnosno njegovu strukturu, kemijski sastav te svojstva. Tek nakon toga može se usredotočiti u samu problematiku zavarivanja sivog lijeva. Sivi lijev se može zavarivati na toplo i na hladno, a može se i lemiti. Zavarivanje na toplo izvodi se elektrolučnim ili plinskim postupkom, a zavarivanje na hladno izvodi se samo ručnim elektrolučnim postupkom (REL). Kao dodatni materijal koriste se uglavnom bazične elektrode s najvećim udjelom nikla, a tehnika rada su kratki zavari (maks. duljine 20 mm) te raskivanje nakon svakog zavara. Izrada žlijeba ovisi o debljini materijala, a najčešće se radi pomoću kutne brusilice. Penetranti u kratkom vremenu daju jasnu sliku samog zavara, te se lako mogu definirati indikacije. Pošto je zavarivanje sivog lijeva vrlo dugotrajan proces važna je dobra pripremljenost zavarivača, te kod dužeg zavarivanja, česta je pojava pada koncentracije tako da je potrebno osigurati zamjene za odmor zavarivača.

Makar je sivi lijev vrlo teško zavarljiv, ta tehnologija zavarivanja se jako puno koristi. Najviše se koristi kod samog remonta u postrojenju te se na taj način iz ekonomskog aspekta može puno uštedjeti i na vremenu i novčano, te će se u budućnosti ova tehnologija još više koristiti i unaprjeđivati.

## 6. LITERATURA

- [1] M. Živčić, I. Remenar: ZAVARIVANJE, Zagreb 1972.
- [2] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak 2003.
- [3] I. Juraga, M. Živčić, M. Gracin: Reperaturno zavarivanje, Zagreb 1994.
- [4] Franjo Javor: Časopisi za zavarivanje i srodne tehnologije. Zavarivanje 58 (2015) ¾. Reparturna zavarivanja u popravcima pukotina i lomova na strojnim dijelovima i konstrukcijama (sedamnaesti dio).
- [5] [www.ndscs.edu](http://www.ndscs.edu) (20.07.2016.)
- [6] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarljivost> (25.07.2016.)
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Sivi\\_lijev](https://hr.wikipedia.org/wiki/Sivi_lijev) (25.07.2016.)
- [8] [www.hudek-zagreb.hr](http://www.hudek-zagreb.hr) (28.07.2016.)
- [9] [www.metals-china.com](http://www.metals-china.com) (28.07.2016.)
- [10] Dokvel specijalna zavarivanja, <https://www.facebook.com/specijalnazavarivanja.hrgic>
- [11] [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/57866-9035863.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/57866-9035863.jpg) (05.08.2016.)
- [12] [www.mtfca.com](http://www.mtfca.com) (05.08.2016.)
- [13] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/sl.html> (16.08.2016.)
- [14] M. Faroević: Problematika zavarivanja sivog lijeva, Zagreb 2007.
- [15] [www.nabertherm.com](http://www.nabertherm.com) (18.08.2016.)
- [16] [www.siempelkamp.com](http://www.siempelkamp.com) (21.08.2016.)
- [17] [muggyweld.com](http://muggyweld.com) (25.08.2016.)
- [18] Bojan Kraut: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb 2009.
- [19] Hrvoje Požar (glavni urednik): Tehnička enciklopedija, Grafički zavod Hrvatske, 1987.