

MIKROSTRUKTURE ŽELJEZNIH LJEVOVA

Danilović, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:622799>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-05**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO**

LUCIJA DANILOVIĆ

MIKROSTRUKTURE ŽELJEZNIH LJEVOVA

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2019.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO**

LUCIJA DANILOVIĆ

MIKROSTRUKTURE ŽELJEZNIH LJEVOVA

ZAVRŠNI RAD

Mentor :

Viši predavač :

Tihana Kostadin, mag. ing. stroj.

KARLOVAC, 2019.

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Trg J.J.Strossmayera 9 HR - 47000, Karlovac, Croatia Tel. +385 - (0)47 – 843-500 Fax. +385 - (0)47 – 843-503 e-mail: dekanat @ vuka.hr	Klasa: 602-11/18-01/____	 CRS <small>IRN EN ISO9001:2015</small>
	ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA	Ur.broj: 2133-61-04-18-01 Datum:	

Ime i prezime	LUCIJA DANILOVIĆ		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail			
Matični broj studenta			
JMBAG			
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	Xpreddiplomski	specijalistički diplomski	
Naziv studija	STROJARSTVO		
Godina upisa	2016.		
Datum podnošenja molbe			
Vlastoručni potpis studenta/studentice			
Naslov teme na hrvatskom: MIKROSTRUKTURE ŽELJEZNIH LJEVOVA			
Naslov teme na engleskom: MICROSTRUCTURES OF CAST IRONS			
Opis zadatka: Nakon uvoda, u teorijskom dijelu rada opisati željezne ljevove, sa posebnim naglaskom na strukturu, sastav i svojstva sivog i nodularnog lijeva. Također opisati metalografiju, odnosno analizu mikrostrukture materijala. U eksperimentalnom dijelu rada, u suradnju sa tvrtkom Ljevaonica d.o.o. Karlovac, ispitati uzorke sivog i nodularnog lijeva (kemijski sastav, mehanička svojstva, metalografija). Analizirati rezultate sa posebnim naglaskom na analizu mikrostrukture. Na kraju rada napisati zaključak. Rad urediti prema pravilima VUK.			
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:		

IZJAVA :

Izjavljujem da sam ja – studentica Lucija Danilović, OIB: 68551400293, matični broj: 0110616019, upisana kao apsolvant akademske godine 2018./2019., radila ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, mag.ing.stroj. i kod eksperimentalnog dijela u laboratorijima Velučilišta u Karlovcu kod Ane Tomašić, struč.spec.ing.mech. i u tvrtci Ljevaonica Karlovac d.o.o pod vodstvom Zdenka Nazalevića, dipl.ing.str. kojima se ovim putem zahvaljujem.

Lucija Danilović

Karlovac, listopad 2019.

SAŽETAK :

U radu je analizirana mikrostruktura sivog i nodularnog lijeva u poliranom i nagriženom stanju te njihova mehanička svojstva. Završni rad sastoji se od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog.

U općem (teorijskom) dijelu završnog rada ukratko su opisana svojstva i primjena željeznih ljevova, sivog lijeva i nodularnog lijeva.

U eksperimentalnom dijelu ispitana su mehanička svojstva sivog i nodularnog lijeva te je napravljena analiza njihovih mikrostruktura u poliranom i nagriženom stanju. Eksperimentalni dio ispitivanja mikrostrukture sivog i nodularnog lijeva odrađen je u laboratorijima Veleučilišta u Karlovcu, dok su mehanička svojstva ispitana u tvrtci Ljevaonica Karlovac d.o.o..

Nakon odrađenog eksperimentalnog dijela napravljena je analiza rezultata, te je donesen zaključak na temelju dobivenih rezultata.

Ključne riječi :

- Sivi lijev,
- Nodularni lijev,
- Mikrostruktura,
- Metalografija.

MICROSTRUCTURES OF CAST IRONS

SUMMARY

This paper analyzes the microstructure of gray and nodular cast iron before and after the surface impregnation and their mechanical properties. Final work consists of two parts: theoretical and experimental.

In the general (theoretical) part of the final work, the properties and application of iron castings, gray cast iron and nodular cast iron are briefly described.

In the experimental part, the mechanical properties of the gray and nodular cast iron were examined and an analysis of their microstructure was made before and after the surface was crushed.

The experimental part of the microstructure of gray and nodular cast iron was studied at the Polytechnic Laboratory in Karlovac, while the mechanical properties were tested in the Ljevaonica Karlovac d.o.o ..

After the experimental part was carried out, the analysis of the results was made, and it was concluded based on the results obtained.

Key words :

- Gray iron,
- Nodular iron,
- Microstructure,
- Metallography.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	1
POPIS TABLICA	2
POPIS OZNAKA.....	3
1. Uvod	4
2. Čelični lijev	7
3. Bijeli tvrdi lijev	8
4. Temper (kovkasti) lijev.....	9
5. Sivi lijev	11
5.1. Osnovne značajke sivog lijeva	11
5.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva.....	12
5.2.1. Utjecaj stalnih kemijskih elemenata	12
5.2.2. Utjecaj legirajućih elemenata	13
5.2.3. Utjecaj pratećih elemenata	14
5.3. Tip i veličina grafitnih listića	15
5.4. Skrućivanje sivog lijeva	17
6. Nodularni (žilavi) lijev	19
6.1. Osnovne značajke nodularnog (žilavog) lijeva.....	19
6.2. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog (žilavog) lijeva.....	20
6.2.1. Utjecaj stalnih kemijskih elemenata	20
6.2.2. Utjecaj legirajućih elemenata	21
6.2.3. Utjecaj pratećih elemenata	22
6.3. Standardne veličine nodula	23
6.4. Skrućivanje nodularnog (žilavog) lijeva	24
7. Metalografija	26
7.1. Općenito o metalografiji	26
8. Postavka zadatka	27

9. Eksperimentalni dio.....	28
9.1. Sivi lijev.....	28
9.1.1. Kemijski sastav sivog lijeva.....	28
9.1.2. Mehanička svojstva sivog lijeva.....	29
9.1.3. Metalografija sivog lijeva	35
9.1.4. Izračun ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja Sz za sivi lijev (SL20).....	41
9.2. Nodularni lijev.....	42
9.2.1. Kemijski sastav nodularnog lijeva	42
9.2.2. Mehanička svojstva nodularnog lijeva	43
9.2.3. Metalografija nodularnog lijeva	44
9.2.4. Izračun ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja Sz za nodularni lijev (NL40)	47
10. Analiza rezultata sivog i nodularnog lijeva	48
11. Zaključak	49
LITERATURA	50

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Fe-C dijagram stanja [3].....</i>	<i>5</i>
Slika 2. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 [4]	6
Slika 3. Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [4]	7
Slika 4. Struktura bijelog tvrdog lijeva [1]	8
<i>Slika 5. Mikrostruktura crnog temper lijeva [1].....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [2].....</i>	<i>10</i>
Slika 7. Tipovi listićavog grafita prema ASTM A 247: a) tip A, b) tip B, c) tip C, d) tip D, e) tip E [5]	15
Slika 8. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C [7].....	17
Slika 9. Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva [6]	23
Slika 10. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C - 2,5% Si [5].....	24
Slika 11. Epruveta sa dodatkom SL20 prije statičkog vlačnog ispitivanja.....	29
Slika 12. Kidalica za statički vlačni pokus	30
Slika 13. Učvršćena epruveta	31
Slika 14. Epruveta nakon opterećenja	32
Slika 15. Epruveta nakon ispitivanja.....	32
Slika 16. Prikaz Brinellove metode ispitivanja	33
Slika 17. Uređaj za brušenje i poliranje	36
Slika 18. Brusne ploče	36
Slika 19. Svjetlosni metalografski mikroskop.....	37
Slika 20. SL 20 u poliranom stanju-povećanje 100x.....	38
Slika 21. SL 20 u poliranom stanju-povećanje 200x.....	38
Slika 22. SL 20 u nagriženom stanju-povećano 100x.....	39
Slika 23. SL 20 u nagriženom stanju-povećano 200x.....	39
Slika 24. NL40 u poliranom stanju-povećano 100x.....	44
Slika 25. NL40 u poliranom stanju-povećano 200x.....	44
Slika 26. NL 40 u nagriženom stanju-povećano 100x	45
Slika 27. NL 40 u nagriženom stanju-povećano 200x	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zahtjevani i utvrđeni kemijski sastav sivog lijeva (SL20)	28
Tablica 2. Rezultati statičkog vlačnog pokusa sivog lijeva (SL20)	33
Tablica 3. Zahtjevani i utvrđeni kemijski sastav nodularnog lijeva (NL40).....	42
Tablica 4. Rezultati statičkog vlačnog pokusa nodularnog lijeva (NL40).....	43

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
R _m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R _e	N/mm ²	granica razvlačenja
R _k	N/mm ²	granica loma/kidanja
HB		tvrdća prema Brinellu
α, β, γ		kristali (alfa, beta, gama)
δ		delta ferit
s	mm ²	površina poprečnog presjeka
A		austenit
M		martenzit
F		ferit
B		bainit
L		ledeburit
P		perlit
K		karbid
G		grafit
Fe ₃ C		cementit
T		taljevina (faza)
E		eutektik (faza)
E	N/mm ²	modul elastičnosti
CE		ekvivalent ugljika
S _z		stupanj zasićenja
C		ugljik
Si		silicij
Mn		mangan
P		fosfor
S		sumpor
Ni ₂		nital
Mo		molibden
V		vanadij
Cu		bakar
Al		aluminij
Ti		titan
CO ₂		ugljkov-dioksid
Nb		niobij
Mg		magnezij
Sb		antimon
B		bor
Pb		olovo
Fe		željezo

1. Uvod

Lijev je metalna legura koja nakon ulijevanja u kalup i skrućivanja (kristalizacije) nije bila podvrgnuta toplom ili hladnom oblikovanju deformiranjem. [1]

Ljevovi se primjenjuju kada tehnički nije moguće oblikovanje na neki drugačiji način, kao na primjer kovanjem, obradom odvajanja čestica iz poluproizvoda (šipke, ploče, cijevi) i slično. [2] Iz tog razloga se ljevanje koristi za izradu složenih oblika i velikih dimenzija, također valja spomenuti da su ljevovi jeftiniji od običnog čelika, jer je cijena sirovog željeza za proizvodnju ljevova niža od cijene sirovime za dobivanje čelika.

U skupine željeznih ljevova spadaju :

- Čelični lijev (ČL),
- Bijeli tvrdi lijev (BTL),
- Sivi lijev (SL),
- Nodularni-žilavi lijev (NL),
- Temper-kovkasti lijev.

Ljevove možemo podijeliti s obzirom na mehanička svojstva, kemijski sastav i mikrostrukturi.

Mehanička svojstva dobre istezljivosti i žilavosti karakteristika su čeličnog, nodularnog i temper lijeva, dok svojstvo krhkosti karakterizira sivi i bijeli tvrdi lijev.

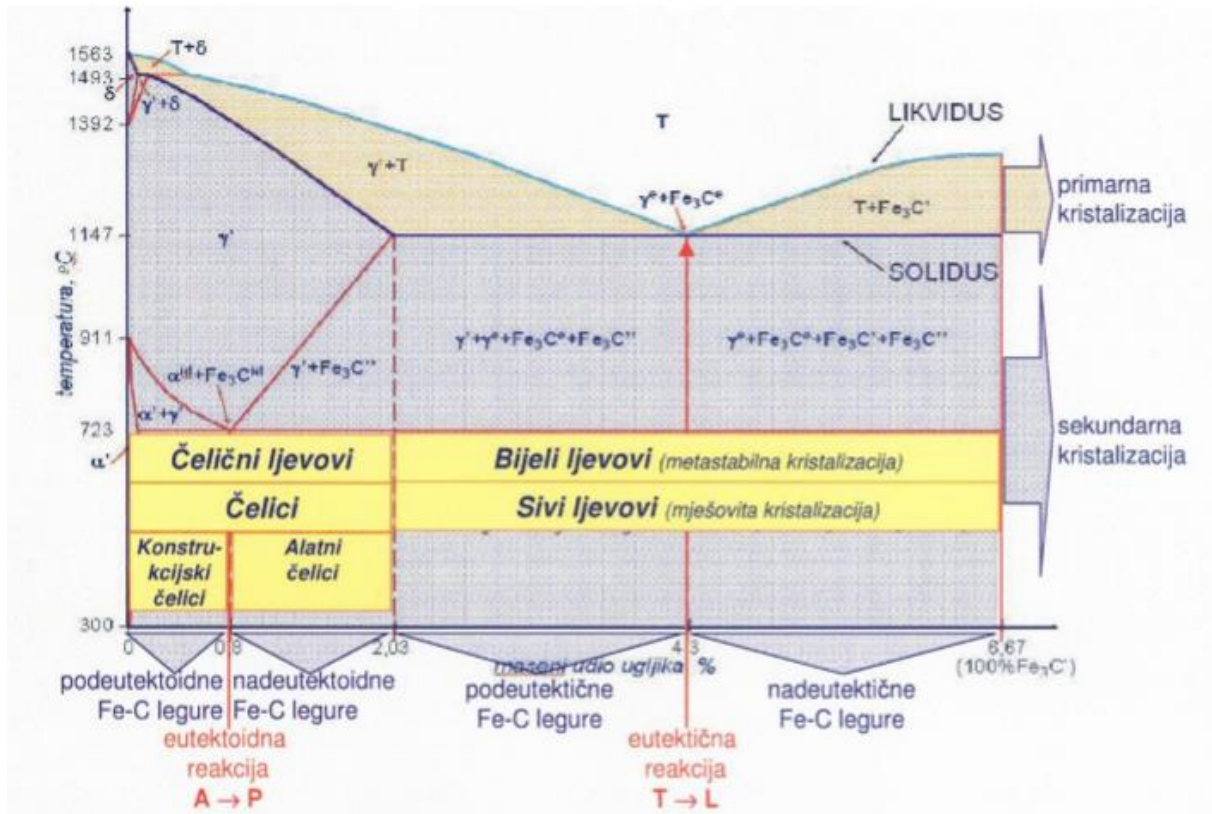
Kod kemijskog sastava ljevova važan je maseni udio ugljika. U skupinu ljevova s niskim masenim udjelom ugljika do 0.5% ugljika spada čelični lijev, dok u skupinu s visokim masenim udjelom ugljika od 2.2% do 4.5% spada temper, bijeli tvrdi, sivi i nodularni lijev.

Podjela legura je slijedeća:

- Legura koja ima 4,3 % C je eutektička legura,
- Legure koje imaju više od 4,3 % C su nadeutektičke legure,
- Legure koje imaju manje od 4,3 % C su podeutektičke legure,
- Eutektoidna koncentracija, odnosno legura je koja ima 0,8 % C, a eutektoidna temperatura je 723° C,
- Legure koje imaju manje od 2,03 % C, a više od 0,8 % C su nadeutektoidne legure,
- Legure koje imaju manje od 0,8 % C su podeutektoidne legure.

Uobičajena je podjela:

- na čelike (legure s manje od 2,03 % C) i
- željezne ljevove (legure s više od 2,03 % C).



Slika 1. Fe-C dijagram stanja [3]

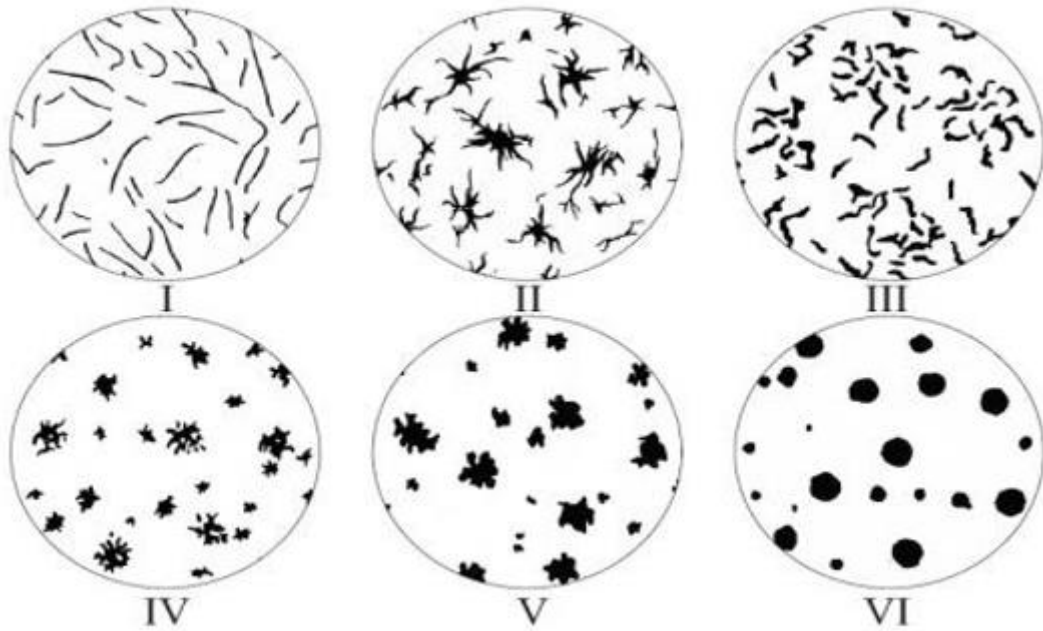
Iz slike 1. možemo iščitati da bijeli ljevovi kristaliziraju metastabilno dok sivi ljevovi kristaliziraju mješovito.

Mikrostruktura ljevova se odnosi na vrstu kristalizacije, gdje se razlikuju tri stanja:

- 1) Metastabilna kristalizacija (ugljik je vezan u cementitu),
- 2) Stabilna kristalizacija (ugljik je u obliku grafita),
- 3) Mješovita kristalizacija (ugljik je i u obliku grafita i u obliku cementita).

Grafit se u lijevu može pojaviti u tri oblika, a to su :

- 1) Listićav ili lamelarni grafit (pojavljuje se kod sivog lijeva),
- 2) Kuglasti grafit (pojavljuje se kod nodularnog lijeva),
- 3) Čvorast (pojavljuje se kod temper lijeva).



Slika 2. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 [4]

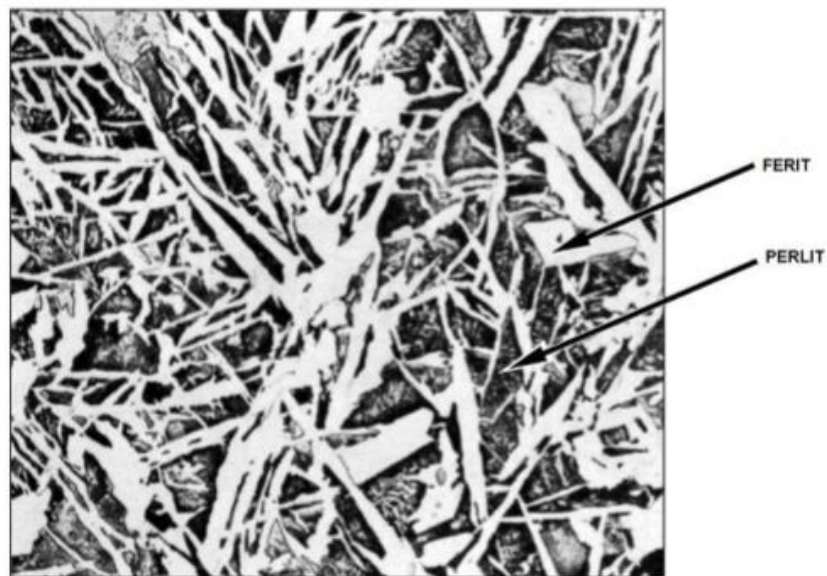
Slika 2. prikazuje normom HRN EN ISO 945:2002 propisanu klasifikaciju oblika grafita. Ista norma propisuje normirane veličine grafitnih nodula. [4]

U nastavku će biti opisana glavna svojstva prethodno navedenih ljevova, dok će nodularni i sivi lijev biti detaljno opisani i ispitati će se mehanička svojstva na probnim epruvetama te izvršiti ispitivanje mikrostrukture prije i poslije nagrizanja površine.

2. Čelični lijev

Čeličnim lijevom naziva se Fe-C legura s manje od 2% ugljika. Čelični lijev razlikuje se od čelika samo po načinu prerade, dovođenje odljevka do konačnog oblika i dimenzije obavlja se naknadno postupcima odvajanjem čestica. Pročišćavanje čeličnog lijeva vrši se u elektrolučnim ili indukcijskim pećima.

Odljevci od čeličnog lijeva vrlo se rijetko koriste odmah nakon lijevanja, jer gruba lijevana Widmannstättenova mikrostruktura (feritno-perlitna), daje nisku istezljivost i žilavost. Ova struktura prikazana je na slici 3. Kako bi se postigla mikrostruktura slična čeličnoj, na lijevu je potrebno provesti toplinsku obradu normalizacije pri čemu dolazi do usitnjavanja lijevane mikrostrukture i izjednačavanja veličine zrna. Ovisno o sadržaju ugljika, dobivaju se nakon normalizacije, vlačne čvrstoće od 370 do 600 Nm/mm².



Slika 3. Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [4]

Mehanička svojstva čeličnih odljevaka lošija su od svojstava gnječanih čeličnih poluproizvoda. Zrno je grublje, postoje zaostala naprezanja od nejednolikog hlađenja, a vjerojatnije su nehomogenosti (pore, kaverne, troska).

3. Bijeli tvrdi lijev

Bijeli lijev nastaje metastabilnim skrućivanjem podeutektičke legure. Ugljik je izlučen samo u obliku cementita i to najviše zbog utjecaja mangana. Mangan kao cementator pospešuje stvaranje karbida te sprječava stvaranje grafita.

Kemijski sastav bijelog tvrdog lijeva je sljedeći : 2,5 – 3,5 % C; **3 – 4 % Mn**; <0,6 %Si; <0,9 % P; < 0,25 % S.



Slika 4. Struktura bijelog tvrdog lijeva [1]

Svojstva bijelog tvrdog lijeva :

- tvrdoća viša od 400 HV,
- slaba duktilnost,
- neobradljivost odvajanjem čestica.

Bijeli tvrdi lijev se primjenjuje za odljevke jednostavnijeg oblika, koji trebaju biti tvrdi i otporni na abrazijsko trošenje.

4. Temper (kovkasti) lijev

Temper lijev se dobiva se na način da se bijelo kristalizirani lijev (bijeli sirovi lijev) žari tzv. „temper postupkom“, pa tako ugljik iz željeznog karbida ili kristalizira u obliku tzv. temper ugljika, ili se većim dijelom ukloni iz lijeva procesom razugljičenja.

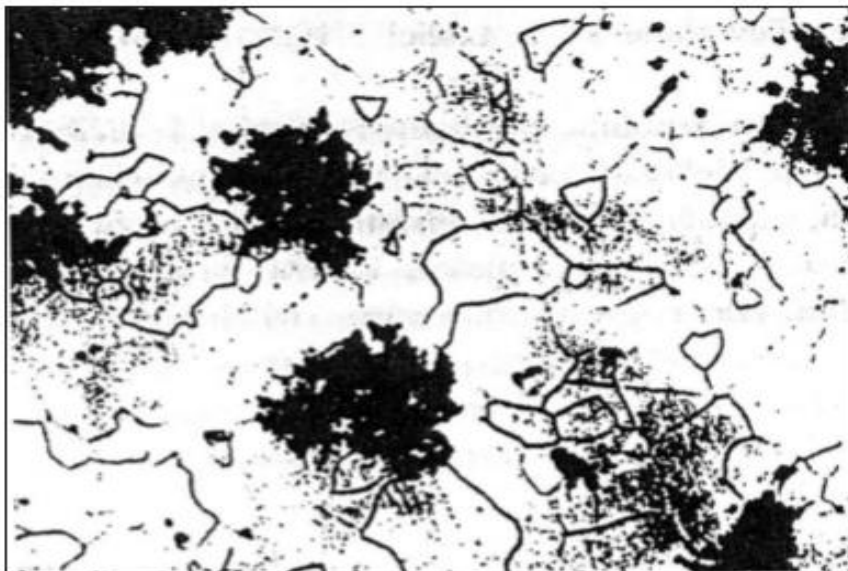
Ovisno o atmosferi u kojoj se provodi žarenje dobiva se :

- Crni temper lijev
- Bijeli temper lijev

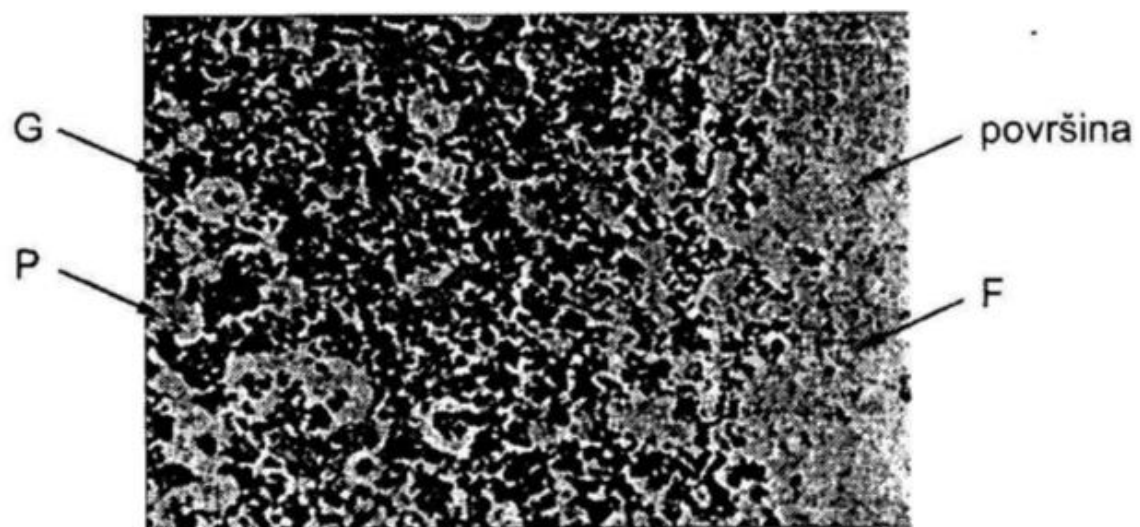
Sirovina za bijeli temper lijev je jeftinija nego za crni.

Crni temper lijev primjenjuje se za odljevke kompliciranih oblika, kao što su bubnjevi kočnica vozila, vilica i držači vilica vozila, tiskarski strojevi, ventili u brodogradnji. Crni temper lijev može biti feritni ili perlitni.

Bijeli temper lijev nema ujednačenu mikrostrukturu po presjeku, pa mehanička svojstva ovise o debljini stijenke, posebno kod debljih odljevaka. Primjenjuje za ručni alat, cijevne spojnice, lance i sl.



Slika 5. Mikrostruktura crnog temper lijeva [1]



Slika 6. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [2]

5. Sivi lijev

5.1. Osnovne značajke sivog lijeva

Sivi lijev spada u skupinu željeznih lijevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Zbog grafitne listićave strukture, sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stjenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove (visoka toplinska vodljivost), izvanredna livljivost, te tlačna čvrstoća i ekonomičnost.

Tipična mikrostruktura sivog lijeva sastoji se od perlitno-feritne metalne osnove i grafitnih listića. Budući da grafitni listići prekidaju kontinuitet metalne osnove, odnosno djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, mehanička svojstva sivog lijeva uvelike ovise o količini, obliku, veličini i raspodjeli grafita.

Tipična područja primjene sivog lijeva su: strojogradnja (postolja i dijelovi strojeva, kućišta), odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesna industrija i energetika, industrija motornih vozila (cilindri, klipni prstenovi, blokovi i glave motora, kočioni diskovi, razni zupčanici, dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja. [2,5,7]

Dobiva se pretaljivanjem sivog sirovog željeza i stare lomljevine čelika i lijeva u kupolci. Što se tiče postupaka toplinske obrade, kod sivog se lijeva primjenjuju: žarenje za redukciju napetosti, meko žarenje, normalizacija, kaljenje i poboljšavanje.

5.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva

Kvaliteta i svojstva sivog lijeva ovise o obliku, raspodjeli i veličini izlučenih grafitnih listića te strukturi metalne osnove. Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita te strukturu metalne osnove. [7]

5.2.1. Utjecaj stalnih kemijskih elemenata

Kemijski sastav sivog lijeva je sljedeći: 2,5 – 4,5 % C; 0,3 – 1,2 % Mn; **1 – 4 %Si**; 0,4 – 1,5 % P; < 0,1 % S. Utjecaj stalnih elemenata u sivom lijevu je sljedeći :

Silicij je element koji forsira grafitizaciju, tj. služi kao grafitizator, koji omogućava stvaranje grafita.

Mangan je jaki cementator, koji je koristan zbog stvaranja neškodljivog spoja MnS. Također sprječava nastajanje željeznog sulfida FeS koji povećava krhkost sivog lijeva jer se izlučuje po granicama eutektičnih zrna.

Fosfor je grafitizator koji uglavnom poboljšava livljivost, odnosno omogućava bolje popunjavanje kalupa, a općenito je štetan, jer smanjuje žilavost.

Sumpor je cementator i kao štetna primjesa dolazi nužno iz koksa i sirovine.

5.2.2. Utjecaj legirajućih lemenata

Obzirom da se legirajući elementi međusobno nadopunjuju u djelovanju, kombinacije pružaju širok spektar dobivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava.

Nikal djeluje kao grafitizirajući element. Ima visoku topivost u tekućem željezu, ali negativno utječe na topljivost ugljika.

Krom je dvostruko učinkovitiji od nikla i bakra u povećanju vlačne čvrstoće sivog lijeva. Krom spada u grupu elemenata s vrlo visokom sklonosti ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju).

Vanadij se obično dodaje u količinama do 0,35 % i značajno povećava tvrdoću i vlačnu čvrstoću sivog lijeva putem usitnjavanja grafita i perlita. Isto tako povisuje prokaljivost.

Molibden povisuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću, tvrdoću te otpornost na trošenje, puzanje i toplinski umor sivog lijeva. Negativna mu je strana sklonost ka stvaranju karbida.

Bakar je grafitizirajući element, povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću sivog lijeva.

Kositar i antimon snažno promoviraju stvaranje perlita, ali ne utječu na njegovo usitnjavanje.
[2,5,7]

5.2.3. Utjecaj pratećih elemenata

Aluminij je grafitizirajući element koji poboljšava nukleacijski potencijal taljevine. Utječe na površinsku napetost taljevine željeznog lijeva, što za posljedicu ima osjetljivost na pojavu grešaka (mjehuravost). Sadržaj se mora osiguravati niskim zbog i to najbolje ispod područja gdje je opasnost za mjehuravost.

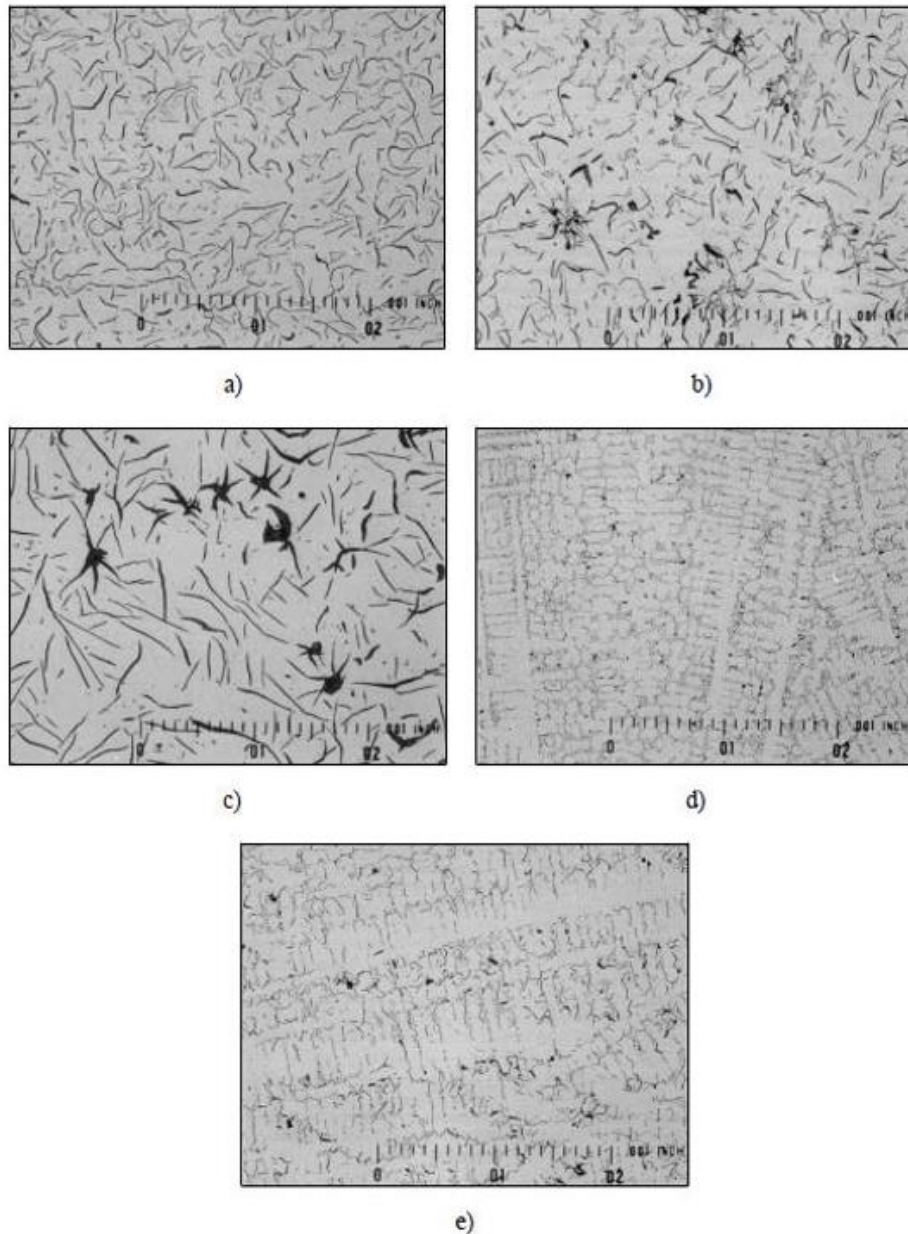
Titan kod malih dodataka djeluje kao grafitizator. Promovira stvaranje tipa D grafitnih listića. Ima visok afinitet prema dušiku tako da može neutralizirati njegovo djelovanje, potrebno je između 0,01 do 0,03%.

Cerij ima negativan utjecaj na mikrostrukutru sivog lijeva. Promovira stvaranje vermikularnog i nodularnog grafita te povećava pothlađenje taljevine.

Olovo ima izrazito nepovoljan utjecaj na svojstva sivog lijeva. Već pri sadržaju 0,0005% olova dolazi do značajnog pada vlačne čvrstoće. [5,7]

5.3. Tip i veličina grafitnih listića

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva jednim dijelom ovise o obliku, veličini, količini i raspodjeli grafitnih listića. Tip i veličina grafitnih listića ovisi o temperaturi i brzini skrućivanja taljevine te nukleacijskom potencijalu taljevine. Prema normi ASTM A 247 listićavi grafiti podijeljeni su u 5 klasa (tipova).



Slika 7. Tipovi listićavog grafitna prema ASTM A 247: a) tip A, b) tip B, c) tip C, d) tip D, e) tip E [5]

Tip A grafitnih listića ima jednako raspodijeljene grafitne listiće. Karakterističan je za taljevine sivog lijeva kada se skrućivanje odvija sporo uz postojanje ravnotežnih uvjeta. Ovaj tip grafita se teško ostvaruje, naročito kod odljevaka različitih debljina stjenki.

Tip B grafitnih listića nastaje kada se skrućivanje odvija pri nižim temperaturama od ravnotežne temperature skrućivanja. Kod iste debljine stjenke i kemijskog sastava, odljevak sivog lijeva B tip će imati manju tvrdoću od odljevka s tipom A grafitnih listića male veličine.

Tip C grafitnih listića se pojavljuje u nadeutektskim sivim ljevovima, posebno gdje je sadržaj ugljika visok. Prisustvo C tipa grafitnih listića u mikrostrukturi značajno smanjuje čvrstoću i tvrdoću odljevka.

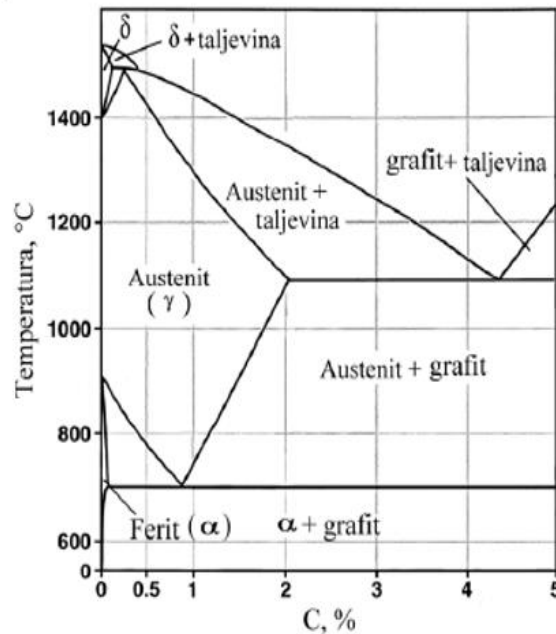
Grafitni listići tipa D i tipa E kad je pothlađenje taljevine dosta visoko, ali ne toliko da dođe do stvaranja karbida. Uz ovakve oblike grafita (izrazito sitni i razgranati listići) pojavljuje se ferit u mikrostrukturi. Zbog nastanka ferita u metalnoj osnovi dolazi do značajnog pada vlačne čvrstoće, ali i znatno poboljšanje strojne obradivosti.

Zbog grafitne listićave strukture, sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stjenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove (visoka toplinska vodljivost), izvanredna livljivost, te tlačna čvrstoća i ekonomičnost.

Tipična područja primjene sivog lijeva su: strojogradnja (postolja i dijelovi strojeva, kućišta), odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesna industrija i energetika, industrija motornih vozila (cilindri, klipni prstenovi, blokovi i glave motora, kočioni diskovi, razni zupčanici, dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja.

5.4. Skrućivanje sivog lijeva

Ravnotežni dijagram Fe-C je osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova s grafitom. Sivi lijev, kao i ostale željezne ljevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije. Slika 8. prikazuje ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C



Slika 8. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C [7]

Od svih prisutnih elemenata u sivom lijevu (osim ugljika), silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1% silicija snižava eutektički sastav za 0,31% ugljika. Zbog toga se uvodi ekvivalent ugljika (CE) ili stupanj zasićenja S_z :

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

$$S_z = \frac{\%C}{4,26 - \frac{1}{3} (\%Si + \%P)} \quad (2)$$

Kada je CE jednak 4,3; govori se o eutektskom sastavu. Ukoliko je vrijednost CE ekvivalenta $<4,3$; radi se o podeutektskom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost $CE > 4,3$; radi se o nadeutektskom sastavu.

Tada je prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja primarni grafit. Kada je $Sz=1$ govori se o eutektskom sastavu. Kada je $Sz < 1$ tada je podeutektski sastav, a kada je $Sz > 1$ radi se o nadeutektskom sastavu. [7, 8]

6. Nodularni (žilavi) ljev

6.1. Osnovne značajke nodularnog (žilavog) lijeva

Nodularni ljev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg je ugljik izlučen u obliku grafitnih nodula (kuglica). Upravo zbog svog specifičnog (nodularnog, kugličastog) oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi ljev), dobra žilavost, livljivost te strojna obradivost.

Svojstva nodularnog lijeva prvenstveno ovise o njegovoj mikrostrukturi, odnosno o obliku, veličini i raspodjeli izlučenog grafita te strukturi metalne osnove. Mikrostruktura ovisi o kemijskom sastavu, ali i brojnim drugim faktorima. Značajnu ulogu ima brzina hlađenja tijekom i nakon završetka skrućivanja te struktura metalnog uložka od kojeg je izrađen nodularni ljev. O brzini hlađenja ovisi oblik i broj grafitnih čestica te pojava karbida u mikrostrukturi.

Primjena nodularnog lijeva je za koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, zupčanike i slično.

Mikrostruktura željezne osnove može biti: potpuno feritna, feritno-perlitna, perlitna ili austenitna. Također treba reći da se mikrostruktura željeznih lijeva promatra u poliranom i nagriženom stanju. U poliranom stanju određuje se oblik, veličina i raspored grafita, dok se nakon nagrizanja vidi mikrostruktura željezne osnove koja okružuje grafit.

6.2. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog (žilavog) lijeva

Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu.

6.2.1. Utjecaj stalnih kemijskih elemenata

Kemijski sastav nodularnog (žilavog) lijeva je sljedeći :

3,2–3,8% C; 2,4–2,8% Si; <0,5% Mn; <0,045% P; < 0,01 % S.

Silicij smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida.

Mangan promovira stvaranje perlita i karbida jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C), ali i metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) .

Sumpor snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe₃C) eutektika, zbog čega doprinosi stvaranja odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan sprječava grafitizaciju.

Fosfor je nepoželjan element u nodularnom lijevu jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim (<0,02 %).

6.2.2. Utjecaj legirajućih elemenata

Bakar je grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida.

Kositar je snažan promotor perlita. Kositar otežava grafitizaciju, ali ne promovira stvaranje karbida. Snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika.

Molibden povisuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću na sobnoj i visokim temperaturama, granicu razvlačenja te otpornost na lom, puzanje i toplinski umor nodularnog lijeva. Negativno utječe na izduženje i udarnu žilvost. Negativna strana molibdena je sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma.

Nikal podiže temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C). Nikal, kao i silicij, proširuje interval između navedenih temperatura i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela i nastanku karbida. Snižava eutektoidnu temperaturu i blago promovira stvaranje perlita.

Krom ima visoku sklonost ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju) jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C).

Vanadij povisuje prokaljivost i ima visoku sklonost ka stvaranju intercelijastih karbida i odbjela, jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) te slabo perlitizirajuće djelovanje.

6.2.3. Utjecaj pratećih elemenata

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, može se postići obradom taljevine cerijem. Kao i magnezij, cerij je snažan dezoksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija, cerij nije lako ispariv (točka isparavanja iznosi 2406 °C).

Lantan u konačnici rezultira većim broju nodula, višoj nodularnosti, manjem udjelu perlita.

Bor je jedan od najsnažnijih karbidotvornih elemenata. Karbidi bora su stabilni i ne mogu se ukloniti žarenjem.

Antimon iznad 0,004 % onemogućuje stvaranje nodularnog grafita, posebno u debelostijenim odljevcima. Antimon spada u grupu koji snažno promoviraju stvaranje perlita.

Bizmut već kod niskih koncentracija pospješuje stvaranje listićavog grafita. Dodatkom bizmuta u vrlo malim koncentracijama (0,005 – 0,01 %) može se značajno povisiti broj nodula/mm² jer bizmut snažno promovira nukleaciju grafita. Prekomjerni dodatci bizmuta imaju negativan učinak na broj nodula/mm².

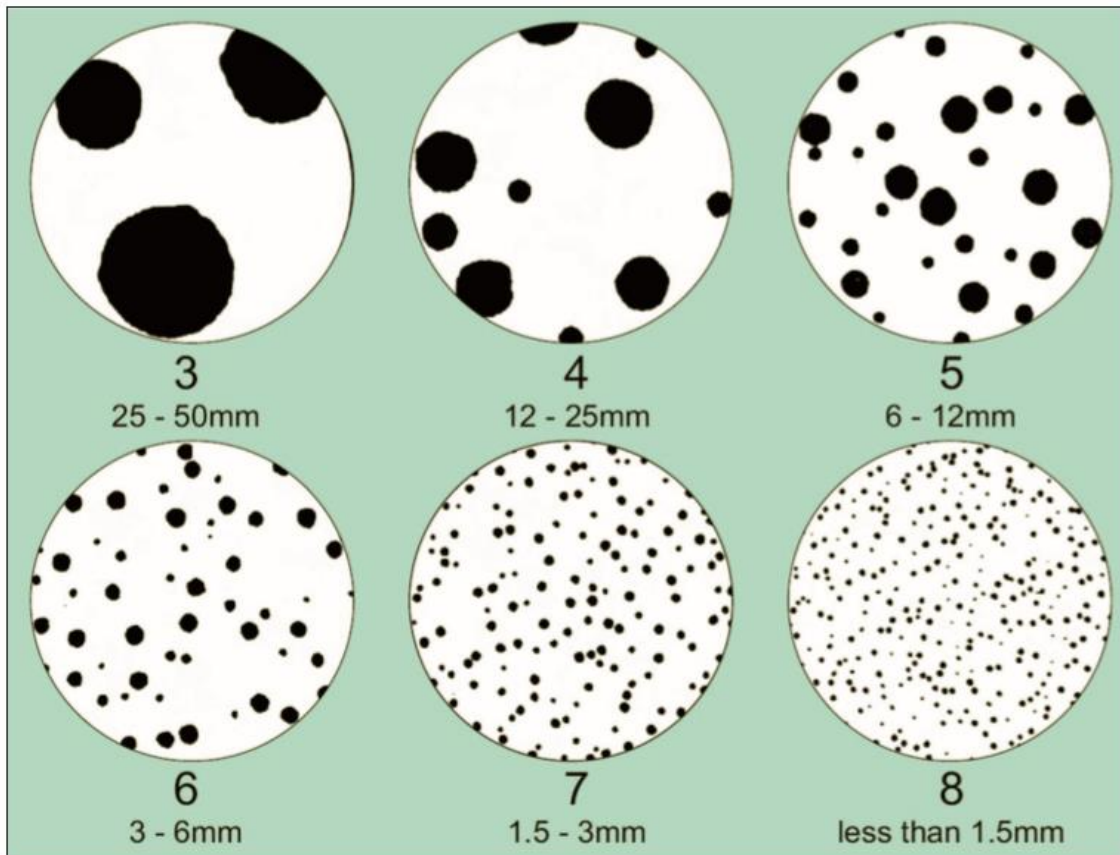
Kadmij potiče stvaranje listićavog grafita, zbog čega se njegov udio u nodularnom lijevu ograničava na < 0,002 %.

Olovo već pri udjelu od 0,002 % može rezultirati nastankom listićavog grafita. Ovaj efekt je izraženiji u debljim stjenkama.

Titan pospješuje stvaranje vermikularnog grafita i sužava područje između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Zbog štetnog utjecaja, udio titana bi trebao biti < 0,035 %. [7]

6.3. Standardne veličine nodula

Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva prikazane su na sljedećoj slici.

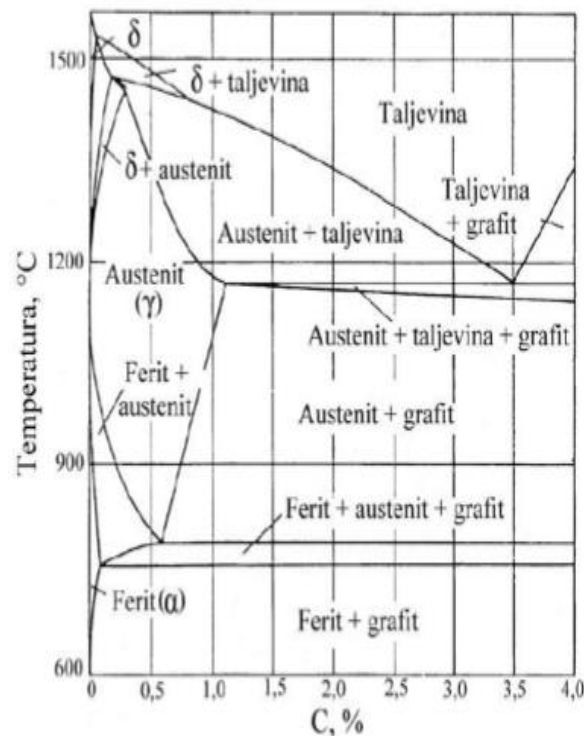


Slika 9. Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva [6]

6.4. Skrućivanje nodularnog (žilavog) lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih lijevova s grafitom je ravnotežni dijagram Fe-C, prikazan na slici 8. Nodularni lijev, kao i ostale željezne lijevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.

Od svih prisutnih elemenata (osim ugljika) u nodularnom lijevu, silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 10.



Slika 10. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C - 2,5% Si [5]

Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1,0 % silicija snižava eutektički sastav za 0,31 % ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja (Sz):

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (3)$$

$$S_z = \frac{\%C}{4,26 - \frac{1}{3} (\%Si + \%P)} \quad (4)$$

Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3; govori se o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika < 4,3; radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijedost ekvivalenta ugljika > 4,3 govori se o nadeutektičkom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičkih sastava je primarni grafit (krupne i grube nodule).

Kada je $S_z = 1$ govori se o eutektičkom sastavu, ukoliko je $S_z < 1$ govori se o podeutektičkom sastavu, a u slučaju $S_z > 1$ o nadeutektičkom sastavu.

7. Metalografija

7.1. Općenito o metalografiji

Metalografija se bavi istraživanjem strukture metala i legura pomoću svjetlosnog (metalografskog) i elektronskog mikroskopa.

Razlikujemo :

- Makrostrukturu - vidljiva golim okom ili uz malo povećanje,
- Mikrostrukturu - zahtijava pomoć mikroskopa.

Metalografska analiza može dati informacije o sastavu materijala, prethodnoj obradi i svojstvima, posebno:

- veličinu zrna,
- prisutne faze,
- kemijsku homogenost,
- raspodjelu faza,
- deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala,
- debljinu i strukturu površinskih prevlaka,
- određivanje pukotine i načina loma.

Priprema uzorka za metalografsku analizu provodi se na sljedeći način, prije početka ispitivanja površina uzorka se mora na adekvatan način pripremiti : izrezivanje uzorka, brušenje, umetanje malih uzoraka u smolu, fino brušenje, poliranje, odmašćivanje, nagrivanje površine uzorka, ispiranje uzorka i sušenje.

8. Postavka zadatka

Nakon teorijskog dijela u kojem su opisana osnovna svojstva željeznih ljevova, u eksperimentalnom dijelu cilj nam je ispitati mehanička svojstva i napraviti metalografsko ispitivanje sivog i nodularnog lijeva u poliranom i nagriženom stanju.

Ispitivanje će se vršiti na epruvetama iz sivog lijeva (SL20) i nodularnog lijeva (NL40). Metalografsko ispitivanje će se vršiti u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu, dok će se ispitivanje mehaničkih svojstva vršiti u Ljevaonici Karlovac.

9. Eksperimentalni dio

9.1. Sivi lijev

9.1.1. Kemijski sastav sivog lijeva

Sljedeća ispitivanja koja će biti opisana u eksperimentalnom dijelu vršit će se na sivom lijevu (SL20). Zahtjevani kemijski sastav i dobiveni kemijski sastav sivog lijeva biti će prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Zahtjevani i utvrđeni kemijski sastav sivog lijeva (SL20)

Zahtjevano		Utvrđeno	
Kemijski element	Maseni udio [%]	Kemijski element	Maseni udio [%]
C	2.86-2.90	C	2.87
Si	2.18-2.22	Si	2.20
Mn	0.82-0.86	Mn	0.84
P	0.032-0.036	P	0.034
S	0.017-0.020	S	0.019
Cr ₃	0.037-0.038	Cr ₃	0.038
Ni ₂	0.068-0.074	Ni ₂	0.071
Mo	0.004-0.005	Mo	0.004
V	0.012-0.013	V	0.012
Cu	0.020-0.022	Cu	0.021
Al	0.000	Al	0.000
Ti	0.000	Ti	0.000
CO ₂	0.012-0.014	CO ₂	0.013
Nb	0.007-0.009	Nb	0.008
Mg	0.002-0.003	Mg	0.003
Sn ₂	0.01	Sn ₂	0.01
Sb	0.01	Sb	0.01
B	0.001	B	0.001
Pb	0.002-0.006	Pb	0.004
Fe	93.9-94.0	Fe	94.0

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja možemo zaključiti da dobiveni kemijski sastav sivog lijeva odgovara zahtjevanom.

9.1.2. Mehanička svojstva sivog lijeva

Ispitivanje se provodi uređajima koji se nazivaju kidalice ili univerzalne ispitivalice, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete. Statičkim vlačnim ispitivanjem na kidalici mogu se dobiti rezultati ispitivanja kao što su vlačna čvrstoća (R_m), granica razvlačenja materijala (R_e), istezljivost (A), kontrakcija (Z).

Ispitivanje se vršilo na standardnim epruvetama (DIN 50 125) okruglog poprečnog presjeka sa navojnim glavama izrađenih od sivog lijeva (SL20) (slika 11.) . Na epruveti se također nalazi dodatak koji će nam kasnije poslužiti za metalografsko ispitivanje.

Statički vlačni pokus odrađen je u Ljevaonici Karlovac na kidalici (slika 12.).



Slika 11. Epruveta sa dodatkom SL20 prije statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 12. Kidalica za statički vlačni pokus

Kidalica se sastoji od gornje i donje čeljusti, pa je prije samog ispitivanja potrebno krajeve epruvete na mjestima navojne glave učvrstiti prvo za gornju, a onda za donju čeljust kidalice.



Slika 13. Učvršćena epruveta

Nakon što je epruveta dobro učvršćena na krajevima (slika 13.), opterećuje se vlačnom silom do njenog pucanja. Vlačna čvrstoća je osnovno mehaničko svojstvo materijala, uz granicu razvlačenja, na osnovu kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti na naprezanje. Vlačna čvrstoća predstavlja omjer maksimalne postignute sile pri vlačnom ispitivanju na kidalici i površine početnog presjeka ispitnog uzorka ili epruvete.

Djelovanjem naprezanja (u ovom slučaju na vlačno naprezanje) u materijalu dolazi do određenih deformacija, tako se i pri statičkom vlačnom pokusu epruveta produlji. Zbog produljenja se tijekom ispitivanja uz vrijednosti sile prate i duljina epruveta nakon opterećenja. Također dolazi do suženje presjeka, odnosno kontrakcije.



Slika 14. Epruveta nakon opterećenja



Slika 15. Epruveta nakon ispitivanja

Sa slike 15. je vidljivo da je došlo do produljenja i suženja (kontrakcije) epruvete.

U tablici 2. prikazani su rezultati koje smo dobili statičkim vlačnim pokusom.

Tablica 2. Rezultati statičkog vlačnog pokusa sivog lijeva (SL20)

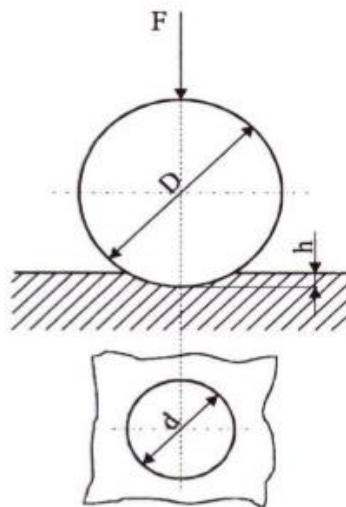
Šarža	R _m , [N/mm ²]	Tvrdoća, HB
135/18 SL 20	270	211

Formula za izračun R_m :

$$R_m = F_m / S_0 ; [N/mm^2]$$

Tvrdoća je utvrđena prema Brinellovoj metodi.

Kod Brinellove metode penetrator je kuglica od kaljenog čelika promjera D, koja se utiskuje silom F u površinske slojeve materijala, kako je prikazano na slijedećoj slici. Na taj način nastaje u ispitivanom materijalu otisak u obliku kugline kalote promjera baze "d" i dubine "h".



Slika 16. Prikaz Brinellove metode ispitivanja

Tvrdoća po Brinellu je, po definiciji, omjer primijenjene sile i površine otiska: $HB = F / 0,102/S$, gdje je F [N] sila, a S [mm²], površina kugline kalote koja se izračunava prema izrazu: $S = \pi Dh$ [mm²]; D = promjer kuglice [mm]; h = dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja [mm].

Budući da se ovom metodom ne mjeri dubina prodiranja kuglice, nego promjer otiska (d), dobiva se izraz za tvrdoću po Brinellu: $HB = F / 0,204/\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]$; $d = (d_1 + d_2)/2$.

Trajanje utiskivanja kuglice u materijal kreće se od 10 do 15 sekundi za Fe-C legure, a do 180 sekundi za najmekše materijale (npr. Bijelu kovinu).

Brinellova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće izmjerene ovom metodom, navodi se dimenzija kuglice, primijenjena sila, te trajanje utiskivanja.

9.1.3. Metalografija sivog lijeva

Metalografska ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izvršena je u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu.

Prije ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izdvojeni uzorci pripremljeni su standardnim postupkom. Standardni postupak pripreme uzoraka:

- brušenje,
- poliranje,
- nagrizanje (3% HNO₃ + etilni alkohol).

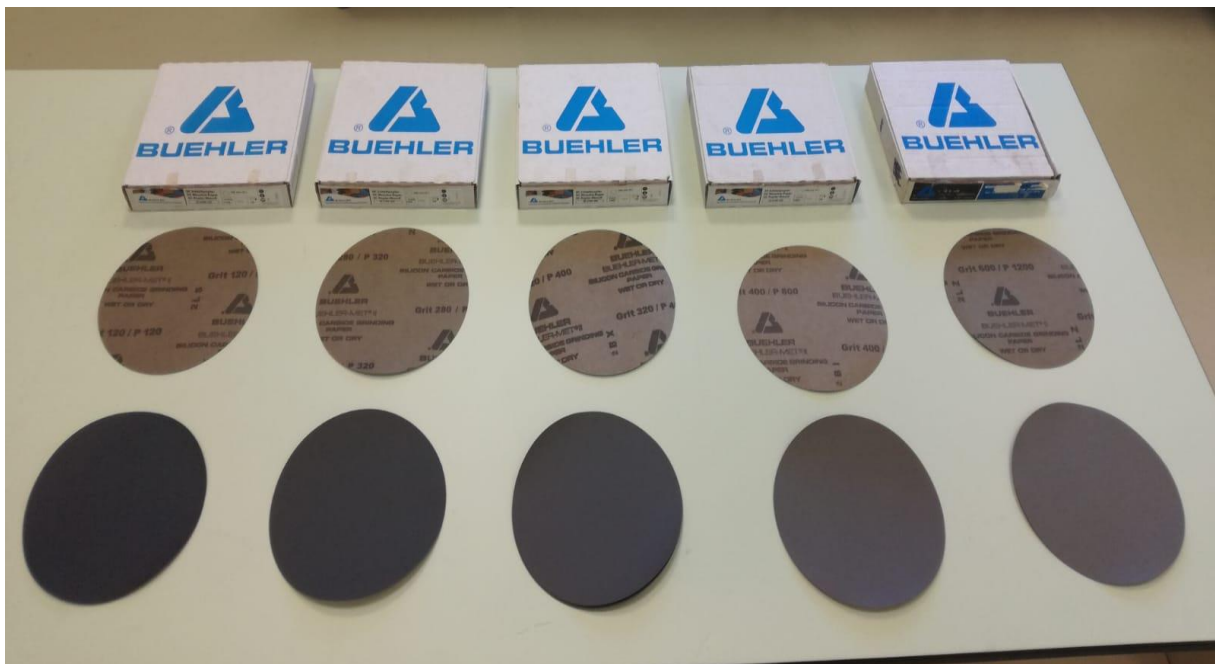
Brušenje uzoraka vršeno je na uređaju za brušenje i poliranje (slika 17.). Brušenje je izvedeno vodootpornim brusnim papirima s brusnim zrnima od silicijevih karbida u četiri koraka s izmjenama granulacija:

- 120,
- 180,
- 320,
- 400.

Nakon svake izmjene papira, uzorci su zakretani za 90° radi uklanjanja tragova prethodnog brušenja. Sljedeći korak bilo je poliranje ispitnih uzoraka koje je napravljeno na istom uređaju kao i za brušenje.

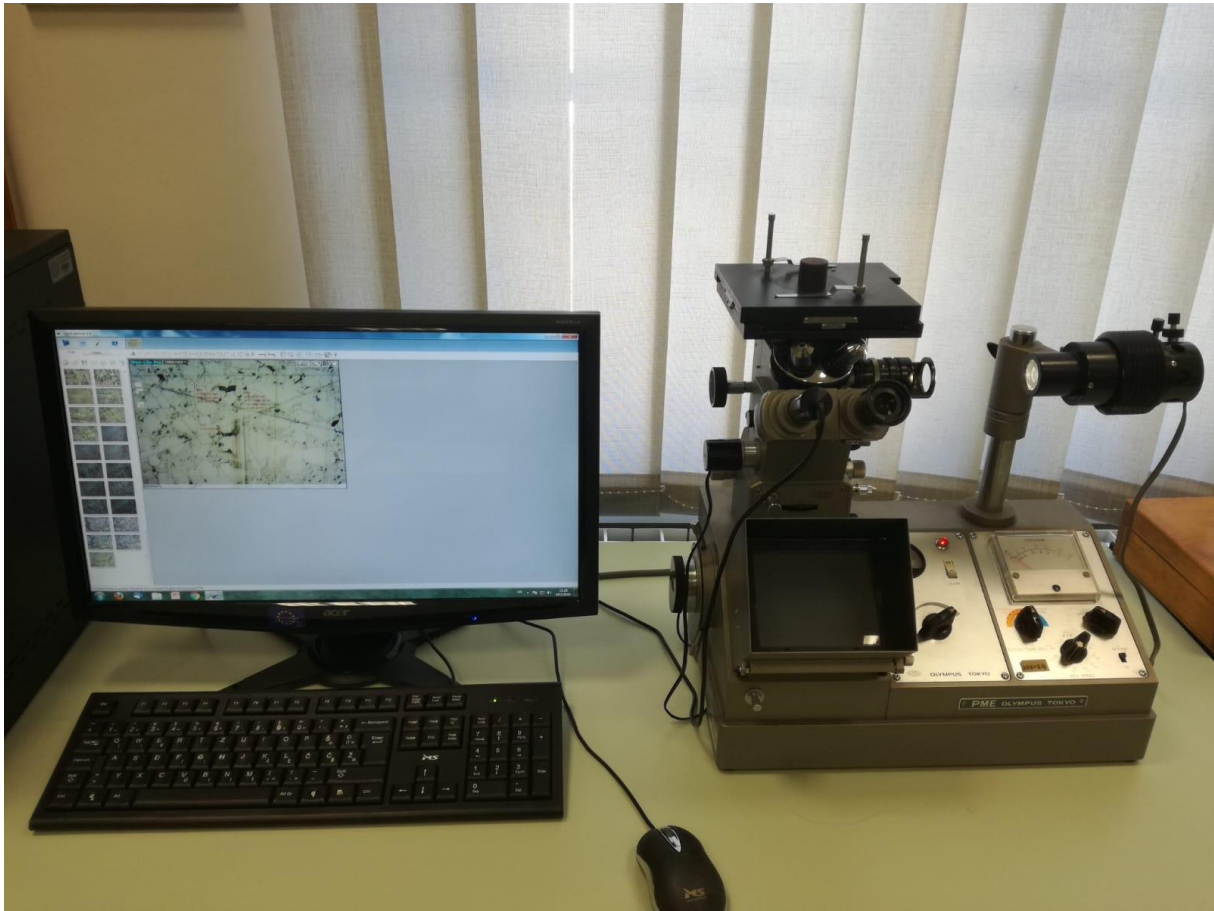


Slika 17. Uređaj za brušenje i poliranje



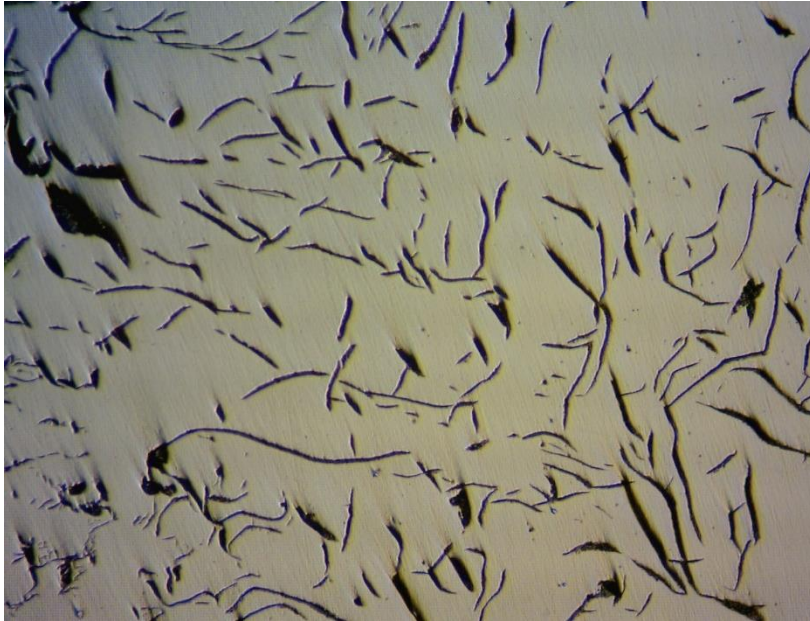
Slika 18. Brusne ploče

Za metalografska ispitivanja uzoraka korišten je svjetlosni mikroskop koji je povezan s računalom.

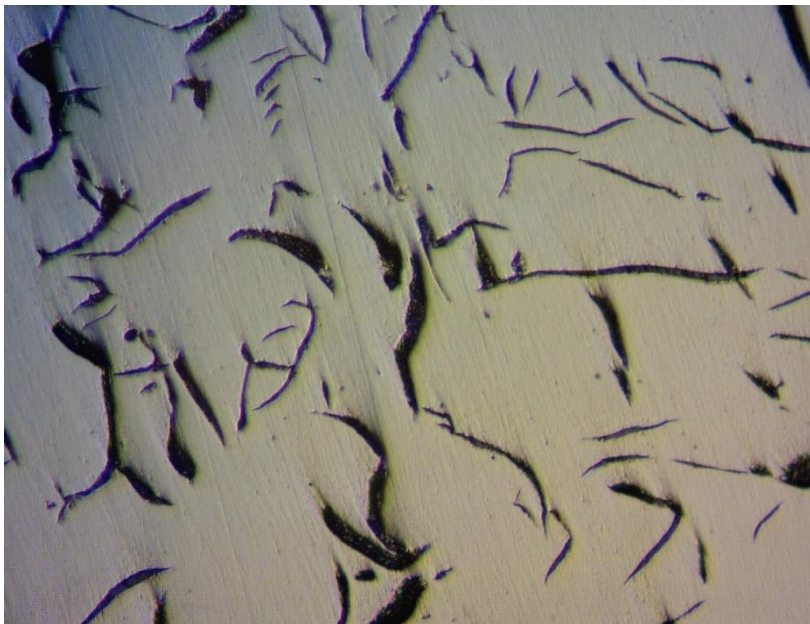


Slika 19. Svjetlosni metalografski mikroskop

Na sljedećim slikama bit će prikazane mikrostrukture sivog lijeva (SL20) u poliranom stanju s povećanjima od 100 i 200 puta.



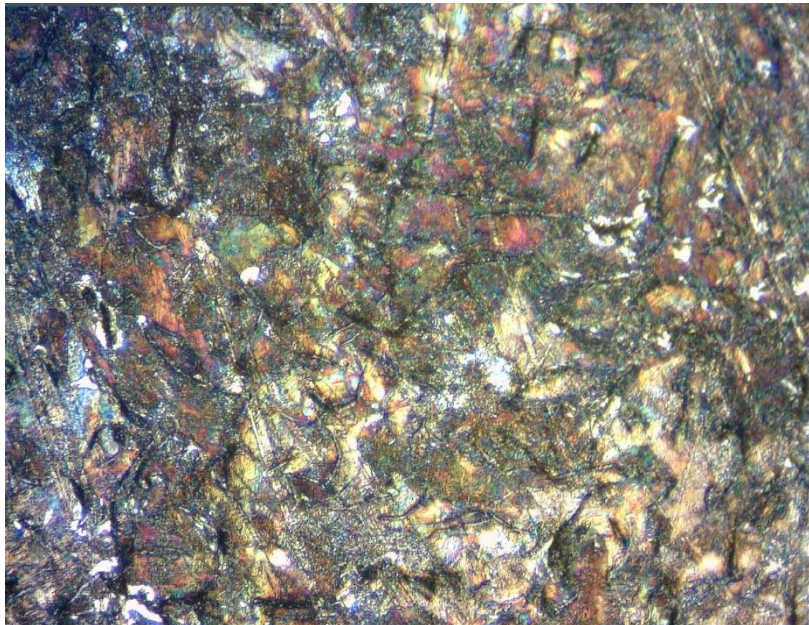
Slika 20. SL 20 u poliranom stanju-povećanje 100x



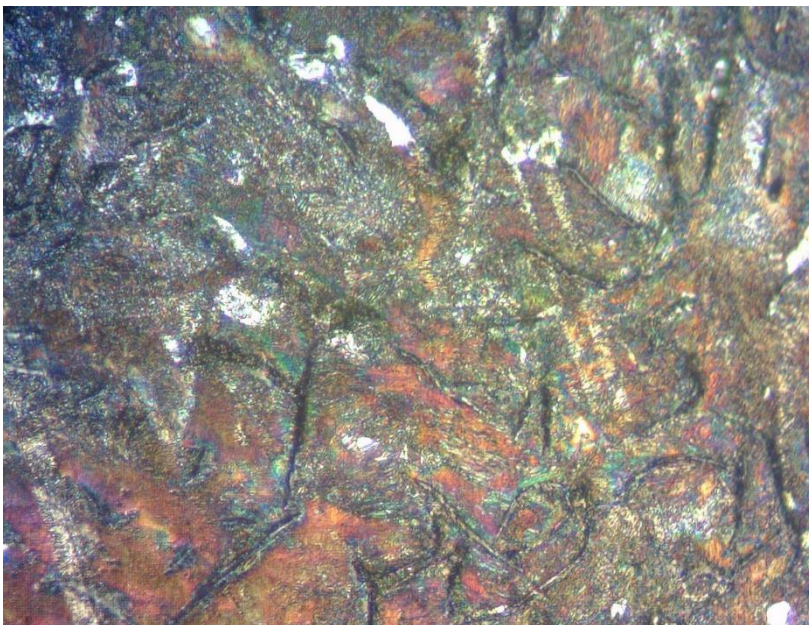
Slika 21. SL 20 u poliranom stanju-povećanje 200x

Ovim ispitivanjem mikrostrukture utvrdili smo da je kod SL 20 u poliranom stanju pretežito A tip listića, djelomično i E tip listića (slika 7. Tipovi listićavog grafita) .

Sljedeći korak bilo je nagrivanje ispitnog uzorka nitalom te provjera mikrostrukture u nagrivenom stanju. Na sljedećim slikama bit će prikazane mikrostrukture sivog lijeva (SL20) u nagrivenom stanju s povećanjima od 100 i 200 puta.



Slika 22. SL 20 u nagrivenom stanju-povećano 100x



Slika 23. SL 20 u nagrivenom stanju-povećano 200x

U nagriženom stanju vidimo bijele nakupine što nam predstavlja izlučeni ferit. Ovim ispitivanjem smo utvrdili da je sivi lijev (SL20) feritno -perlitne strukture, što je vidljivo nakon nagrivanja površine (slike 22. i 23.).

9.1.4. Izračun ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja Sz za sivi lijev (SL20)

Ekvivalent ugljika (CE) ili stupanj zasićenja Sz:

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} = 2,87 + \frac{2,2 + 0,034}{3} = 3,6$$

Izračunom smo dobili da ekvivalent ugljika (CE) za sivi lijev (SL20) iznosi 3,6. Što pokazuje da je sastav podeutekličan jer kad je vrijednost ekvivalenta ugljika < 4,3; radi se o podeutekličkom sastavu.

$$S_z = \frac{\%C}{4,26 - \frac{1}{3} (\%Si + \%P)} = \frac{2,87}{4,26 - \frac{1}{3} (2,2 + 0,034)} = 0,81$$

Izračunom smo dobili da stupanj zasićenja (Sz) iznosi 0,81. Kada je Sz < 1 govori se o podeutekličkom sastavu.

9.2. Nodularni lijev

9.2.1. Kemijski sastav nodularnog lijeva

Zahtjevani kemijski sastav i dobiveni kemijski sastav nodularnog lijeva biti će prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Zahtjevani i utvrđeni kemijski sastav nodularnog lijeva (NL40)

Zahtjevano		Utvrđeno	
Kemijski element	Maseni udio [%]	Kemijski element	Maseni udio [%]
C	3.64-3.71	C	3.67
Si	2.73-2.78	Si	2.76
Mn	0.21-0.22	Mn	0.22
P	0.023-0.025	P	0.024
S	0.010-0.015	S	0.012
Cr ₃	0.131-0.132	Cr ₃	0.132
Ni ₂	0.000	Ni ₂	0.000
Mo	0.013-0.015	Mo	0.014
V	0.023-0.024	V	0.024
Cu	0.020-0.022	Cu	0.021
Al	0.000	Al	0.000
Ti	0.000	Ti	0.000
Co ₂	0.032-0.034	Co ₂	0.033
Nb	0.000	Nb	0.000
Mg	0.034-0.038	Mg	0.036
Sn ₂	0.00-0.01	Sn ₂	0.01
Sb	0.000	Sb	0.000
B	0.000	B	0.000
Pb	0.004-0.008	Pb	0.006
Fe	93.0	Fe	93.0

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja možemo zaključiti da dobiveni kemijski sastav nodularnog lijeva odgovara zahtjevanom.

9.2.2. Mehanička svojstva nodularnog lijeva

Ispitivanje se vršilo na standardnim epruvetama okruglog poprečnog presjeka sa navojnim glavama izrađenih od nodularnog lijeva (NL40). Na epruveti se također nalazi dodatak koji će nam kasnije poslužiti za ispitivanje mikrostrukture.

Statički vlačni pokus odrađen je u Ljevaonici Karlovac na kidalici.

U tablici 4. prikazani su rezultati koje smo dobili statičkim vlačnim pokusom.

Tablica 4. Rezultati statičkog vlačnog pokusa nodularnog lijeva (NL40)

Šarža	Re, [N/mm ²]	Rm, [N/mm ²]	A, [%]	Tvrdoća, HB
133/17 NL40	233	416	21.6	150

Formula za izračun Re, Rm i A :

$$R_e = F_e / S_0 ; [N/mm^2]$$

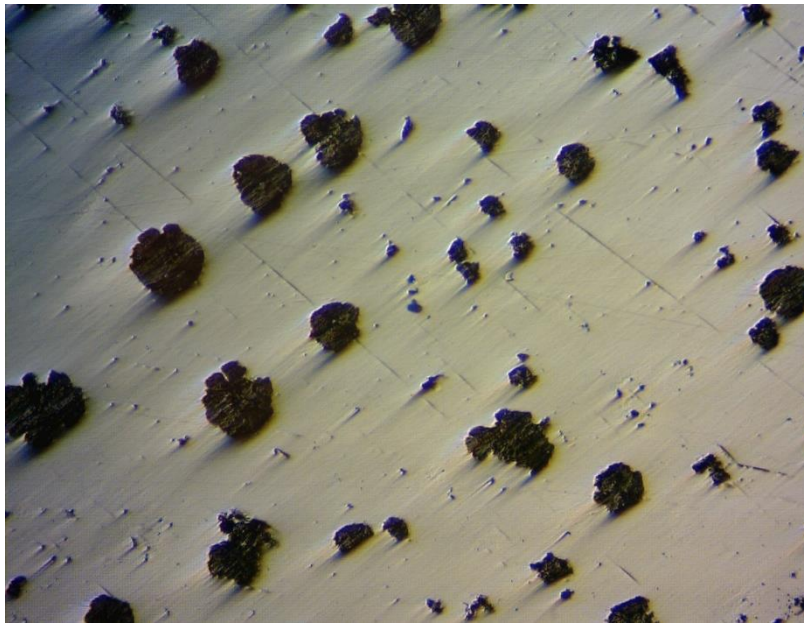
$$R_m = F_m / S_0 ; [N/mm^2]$$

$$A = \epsilon_u \cdot 100 ; [%]$$

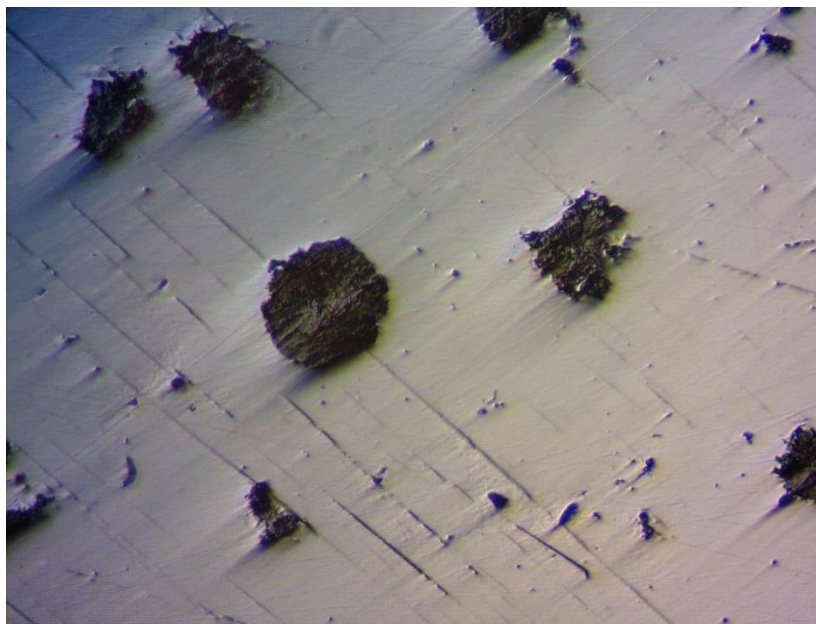
9.2.3. Metalografija nodularnog lijeva

Metalografsko ispitivanje nodularnog lijeva također je izvršeno u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu. Prije samog ispitivanja ispitni uzorci pripremljeni su na isti način kao i sivi nodularni lijev (SL20), čiji je postupak prethodno opisan pod točkom 4.1.3..

Na sljedećim slikama bit će prikazane mikrostrukture nodularnog lijeva (NL40) u poliranom stanju s povećanjima od 100 i 200 puta.

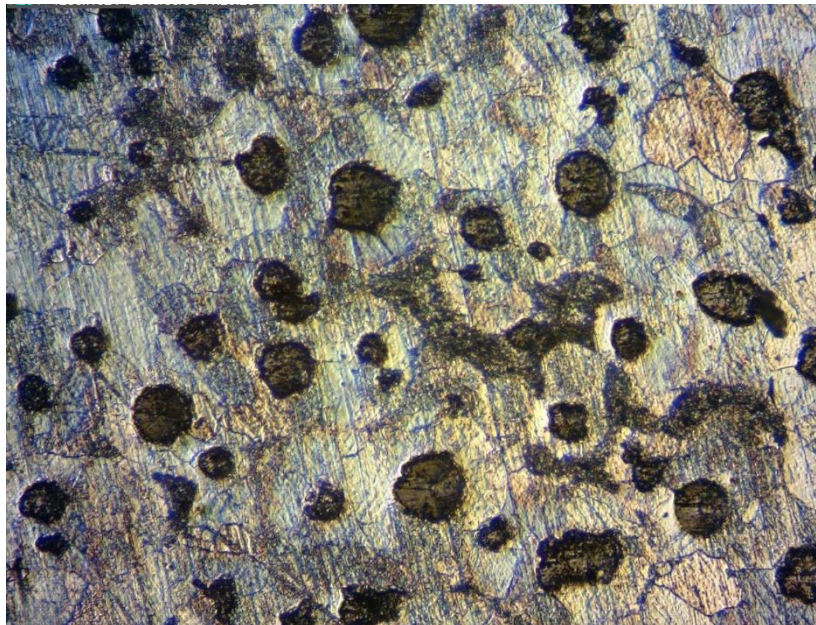


Slika 24. NL40 u poliranom stanju-povećano 100x

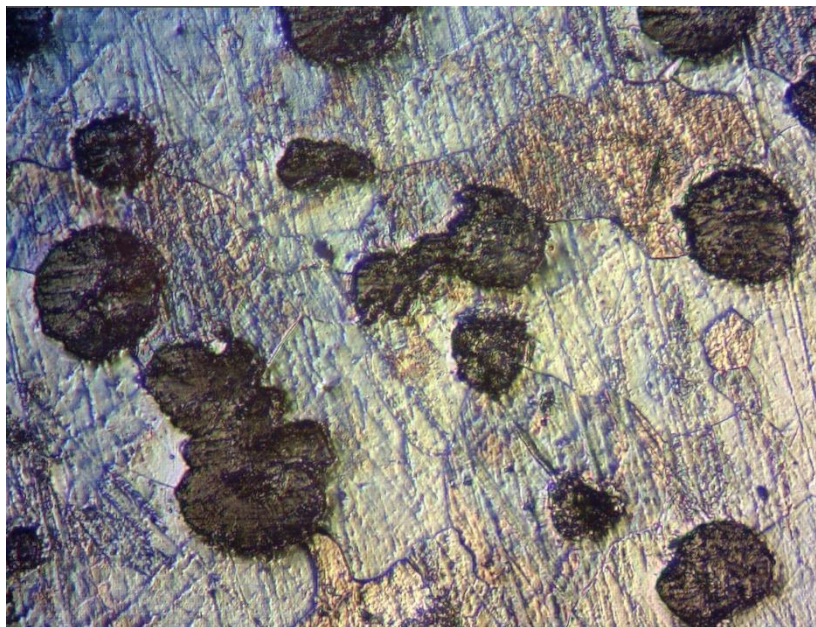


Slika 25. NL40 u poliranom stanju-povećano 200x

Na sljedećim slikama bit će prikazane mikrostrukture nodularnog lijeva (NL40) u nagriženom stanju s povećanjima od 100 i 200 puta.



Slika 26. NL 40 u nagriženom stanju-povećano 100x



Slika 27. NL 40 u nagriženom stanju-povećano 200x

Nakon nagrivanja možemo uočiti mikrostrukturu željezne osnove koja okružuje grafit. Ovim ispitivanjem smo utvrdili da je nodularni lijev (NL40) feritno -perlitne strukture, što je vidljivo samo nakon nagrivanja površine. Pretežita veličina nodula je 4 (slika 9. Standardne veličine nodula kod nodularnog lijeva).

9.2.4. Izračun ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja S_z za nodularni lijev (NL40)

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} = 3,67 + \frac{2,76 + 0,024}{3} = 4,6$$

Izračunom smo dobili da ekvivalent ugljika (CE) za nodularni lijev (NL20) iznosi 4,6. Kada je vrijedost ekvivalenta ugljika $> 4,3$ govori se o nadeutektskom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektskih sastava je primarni grafit (krupne i grube nodule).

$$S_z = \frac{\%C}{4,26 - \frac{1}{3} (\%Si + \%P)} = \frac{3,67}{4,26 - \frac{1}{3} (2,76 + 0,024)} = 1,1$$

Izračunom smo dobili da stupanj zasićenja S_z za nodularni lijev (NL20) iznosi 1,1. Kada je $S_z > 1$ govori se o nadeutektskom sastavu.

10. Analiza rezultata sivog i nodularnog lijeva

U radu je proveden statički vlačni pokus i metalografsko ispitivanje sivog lijeva (SL20) i nodularnog lijeva (NL40).

Rezultati mehaničkih svojstva kod sivog lijeva (SL20) iznose : $R_m = 270 \text{ N/mm}^2$ i tvrdoća 211 HB. Rezultati dobiveni kod nodularnog lijeva (NL 40) iznose : $R_m = 416 \text{ N/mm}^2$, $R_e = 233 \text{ N/mm}^2$ i tvrdoća 150 HB. Iz rezultata ispitivanja mehaničkih svojstva vidljivo je da su vrijednosti vlačne čvrstoće sivog lijeva manje od dobivene vrijednosti nodularnog lijeva te da kod sivog lijeva nema izražene granice razvlačenja, dok je kod nodularnog lijeva ona prisutna. Ovim rezultatima ispitivanja utvrdili smo da kod sivog lijeva dolazi do krhkog loma. Dobivenim rezultatima ispitivanja tvrdoće vidljivo je da su veće vrijednosti tvrdoće prisutne kod sivog lijeva.

Metalografskim ispitivanjem sivog lijeva u poliranom stanju utvrdili smo da pretežito imamo A tip listića, djelomično i E tip listića. Metalografskim ispitivanjem nodularnog lijeva utvrdili smo da je pretežita veličina nodula 4.

Nakon metalografskog ispitivanja površina sivog i nodularnog lijeva u nagriženom stanju utvrdili smo da oba lijeva imaju feritno-perlitnu strukturu.

11. Zaključak

Sivi lijev pripada skupini željeznih lijevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Zbog grafitne listićave strukture ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stjenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove, izvanredna livljivost te tlačna čvrstoća i ekonomičnost. Područja primjene sivog lijeva su: strojogradnja, odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesna industrija i energetika, industrija motornih vozila, odljevci, itd.

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg je ugljik izlučen u obliku grafitnih nodula. Upravo zbog specifičnog (nodularnog, kugličastog) oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na razini vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva. Primjena nodularnog lijeva je za koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, zupčanike i slično.

Iz eksperimentalnog dijela završnog rada dobivenim rezultatima ispitivanja ustanovili smo da sivi lijev ima manje dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće od nodularnog lijeva. Dok su vrijednosti tvrdoće veći kod sivog lijeva. Granica razvlačenja nije prisutna kod sivog lijeva i iz tog razloga kod sivog lijeva dolazi do krhkog loma.

LITERATURA

- [1] Novosel, M., Krumes, D.: Željezni materijali (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova), Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1997.
- [2] Filetin, T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [3] http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Uvod_Metastabilni%20Fe-C%20dijagram.pdf
- [4] Irena Žmak: Modeliranje strukture i svojstva nodularnog lijeva neuronskim mrežama, doktorski rad.
- [4] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1396606171-0-fe-ljevovi_2012.pdf
- [5] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [6] HRN EN ISO 945:2002 – Hrvatski normativni dokument.
- [7] Unkić, F; Glavaš Z.: Lijevanje željeznih legura, Sisak, 2008.
- [8] Zeljko S.: Utjecaj kemijskog sastava na temperaturu stabilnost sivog lijeva, Sisak, 2011.