

ČELIČNI LIJEV- MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA

Tomić, Nevena

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:128:731130>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



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

ČELIČNI LIJEV- MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA

Tomić, Nevena

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:128:731130>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2023-02-15**



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**

NEVENA TOMIĆ

**ČELIČNI LIJEV-
MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2020.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO**

NEVENA TOMIĆ

**ČELIČNI LIJEV-
MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor :

Viši predavač :

Dr.sc. Tihana Kostadin

KARLOVAC, 2020.

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ja – studentica Nevena Tomić, OIB: 16574392039, matični broj: 0110609024, upisana kao apsolvant akademske godine 2019./2020., radila ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice dr.sc. Tihane Kostadin, i kod eksperimentalnog dijela u laboratorijima Velučilišta u Karlovcu kod Ane Tomašić, struč.spec.ing.mech., te u tvrtci Ljevaonica Karlovac d.o.o. pod vodstvom Irine Bukovac, dipl.ing.met., kojima se ovim putem zahvaljujem. Također, želim se zahvaliti svojim roditeljima Radi i Jadranki na podršci tijekom studiranja.

Nevena Tomić

Karlovac, 18.5.2020.

Naslov: ČELIČNI LIJEV – MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA

SAŽETAK

U radu su analizirana mehanička svojstva čeličnog lijeva i njegova mikrostruktura. Završni rad sastoji se od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu opisane su vrste željeznih ljevova s naglaskom na čeličnom lijevu.

U eksperimentalnom dijelu su dodatno opisana svojstva čeličnog lijeva. Napravljena je kemijska analiza te mehanička i metalografska ispitivanja čeličnog lijeva. Metalografsko ispitivanje i ispitivanje tvrdoće odrađeni su u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu, a ispitivanje vlačne čvrstoće odrađeno je u tvrtci Ljevaonica Karlovac d.o.o.

Nakon odrađenog eksperimentalnog dijela, analizirani su rezultati ispitivanja, te je donesen zaključak na temelju dobivenih rezultata.

Ključne riječi: čelični lijev, mikrostruktura, ispitivanje tvrdoće, ispitivanje vlačne čvrstoće.

Title: CAST STEEL – MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES

SUMMARY

This final work analyses mechanical properties of cast steel and its microstructure. Final work consists of two parts: theoretical and experimental.

The theoretical part describes types of cast iron with an emphasis on cast steel.

The experimental part further describes the properties of cast steel. Chemical analysis, mechanical and metallographic testing of cast steel was performed. Metallographic testing and hardness test were done in the laboratory of Karlovac University of Applied Sciences, and the tensile test was done in Ljevaonica Karlovac d.o.o.

After the experimental part was done, the test results were analysed and a conclusion was reached based on the obtained results.

Keywords: cast steel, microstructure, hardness test, tensile test.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	1
POPIS TABLICA.....	2
POPIS OZNAKA.....	3
1.UVOD.....	4
2.SISTEMATIZACIJA ŽELJEZNIH LJEVOVA.....	5
3.ČELIČNI LIJEV	9
3.1.Toplinska obrada čeličnih odljevaka.....	11
3.2.Primjena čeličnog lijeva.....	13
4.BIJELI TVRDI LIJEV	14
5.SIVI LIJEV.....	15
6.NODULARNI LIJEV	17
7.TEMPER LIJEV	18
7.1.Crni temper lijev.....	19
7.2.Bijeli temper lijev.....	20
8.POSTAVKA ZADATKA	21
9.EKSPERIMENTALNI DIO	22
9.1.Svojstva čeličnog lijeva	22
9.2.Ispitni uzorci	23
9.3.Statički vlačni pokus	26
9.4.Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	29
9.5. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu	30
9.5.1.Rezultati ispitivanja tvrdoće	32
9.6.Metalografija	33
10.ANALIZA REZULTATA	37
11.ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupci dobivanja željeznih ljevova [4].....	5
Slika 2. Dijagram Fe-C za metastabilnu kristalizaciju [5]	7
Slika 3. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:20029 [3]8	
Slika 4. Shema elektrolučne peći [1].....	9
Slika 7. Utjecaj temperature žarenja na sniženje naprezanja uz različite iznose početnih naprezanja [1].....	11
Slika 8. Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja [1]	12
Slika 10. Oblici listića grafita prema ASTM normi u pet tipova [2].....	15
Slika 12. Mikrostruktura feritnog (lijevo) i perlitnog nodularnog lijeva (desno) [2]	17
Slika 13. Mikrostruktura feritnog (lijevo) i perlitnog crnog temper lijeva (desno) [2]..	19
Slika 14. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [2].....	20
Slika 15. Y-proba	24
Slika 16. Epruveta kružnog presijeka [7].....	24
Slika 17. Kidalica	26
Slika 18. Dijagram razvlačenja sila-produljenje [6]	27
Slika 19. Epruvete nakon loma	28
Slika 20. Uređaj za ispitivanje tvrdoće	30
Slika 21. Princip ispitivanja po Brinellu [7]	31
Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje	33
Slika 23. Metalografski mikroskop	34
Slika 24. Odbijanje svjetla pri određivanju kristalnih granica nagrizanjem [9].....	35
Slika 25. Ispitivani materijal u poliranom stanju uvećan 100x.....	35
Slika 27. Ispitivani materijal u nagriženom stanju uvećan 100x.....	36
Slika 28. Ispitivani materijal u nagriženom stanju uvećan 200x.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Utvrđeni i zahtijevani kemijski sastav ispitivanog materijala.....	23
Tablica 2. Standardne dimenzije vlačnih epruveta	25
Tablica 3. Dobivene vrijednosti granice elastičnosti, vlačne čvrstoće i istežljivosti ...	29
Tablica 4. Zajamčena svojstva nelegiranih i niskolegiranih vrsta čeličnog lijeva	29
Tablica 5. Vrijednosti stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala....	32
Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdće.....	32

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
HRN	-	hrvatska norma
d_0	mm	početni promjer epruvete
L_0	mm	početna duljina epruvete
s_0	mm ²	početna površina epruvete
F	N	sila
D	mm	promjer kuglice
d	mm	promjer otiska kuglice
HB	-	tvrdoća po Brinellu
s	mm ²	površina kugline kalote
h	mm	dubina
F_e	N	elastična sila
R_{eh}	N/mm ²	gornja granica proporcionalnosti
F_m	N	maksimalna sila
F_k	N	sila u trenutku loma
R_k	N/mm ²	granica loma
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R_e	N/mm ²	granica elastičnosti
A	%	istezanje
L	mm	ukupno produljenje
L_1	mm	krajnja duljina

1.UVOD

Željezo je najvažniji tehnički materijal u industriji. Čisto je željezo lako oblikovljivo i dobro zavarljivo.

Budući da čisto željezo nije šire uporabljivo u industriji zbog svojih niskih vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja, treba ga legirati drugim elementima, ponajprije ugljikom. Ugljik je najvažniji dodatak željezu jer vrlo jako utječe na čvrstoću, tvrdoću i granicu razvlačenja željeznih legura, osobito čeličnih.

Čeličnim se legurama općenito nazivaju one koje sadrže manje od 2 % ugljika. Ako su nakon skrućivanja i hlađenja ostale u lijevanom stanju, nazivaju se čelični ljevovi, a ako su nakon lijevanja toplo oblikovane, nazivaju se čelicima. Ljevovi s više od 2% ugljika nazivaju se ili bijelim ili sivim ljevovima. [1]

Čelični su ljevovi slabijih mehaničkih svojstava nego čelici odgovarajućih sastava i stanja pa se prvenstveno primjenjuju kada tehnički nije izvedivo ili nije ekonomično oblikovanje na drukčiji način, npr. kovanjem, obradom odvajanjem čestica iz poluproizvoda, zavarivanjem itd. [2] Također, ljevovi su jeftiniji od običnih čelika jer je cijena sirovog željeza za proizvodnju ljevova niža od cijene sirovine za dobivanje čelika. [3]

Ljevana mikrostruktura je grubozrnata i pruža manju mehaničku otpornost od gnječene kao što je to kod čelika.

Kod primjene ljevanih materijala treba još voditi računa o:

- primjeni legura sa moguće približnim eutektičkim sustavom (najniže talište),
- skupljanju – promjeni mjera i volumena,
- izboru pogodnog tehnološkog postupka lijevanja,
- izbjegavanju nakupina velikih masa (nagle promjene dimenzija odljevka).

Uzimajući u obzir ove faktore, mogu se proizvesti i najmanji odljevci vrlo složenih oblika od nekoliko grama pa do teških ljevanih konstrukcija s kompaktnim presjecima. [2]

2.SISTEMATIZACIJA ŽELJEZNIH LJEVOVA

Pojam "ljev" odnosi se na materijale dobivene postupkom lijevanja. U širem smislu, željezni ljevovi se dijele na čelične ljevove (ako je postotak ugljika do 2.03%), i bijele, odnosno sive ljevove (postotak ugljika je više od 2.03%).

U užem smislu, željezne ljevove dijelimo na:

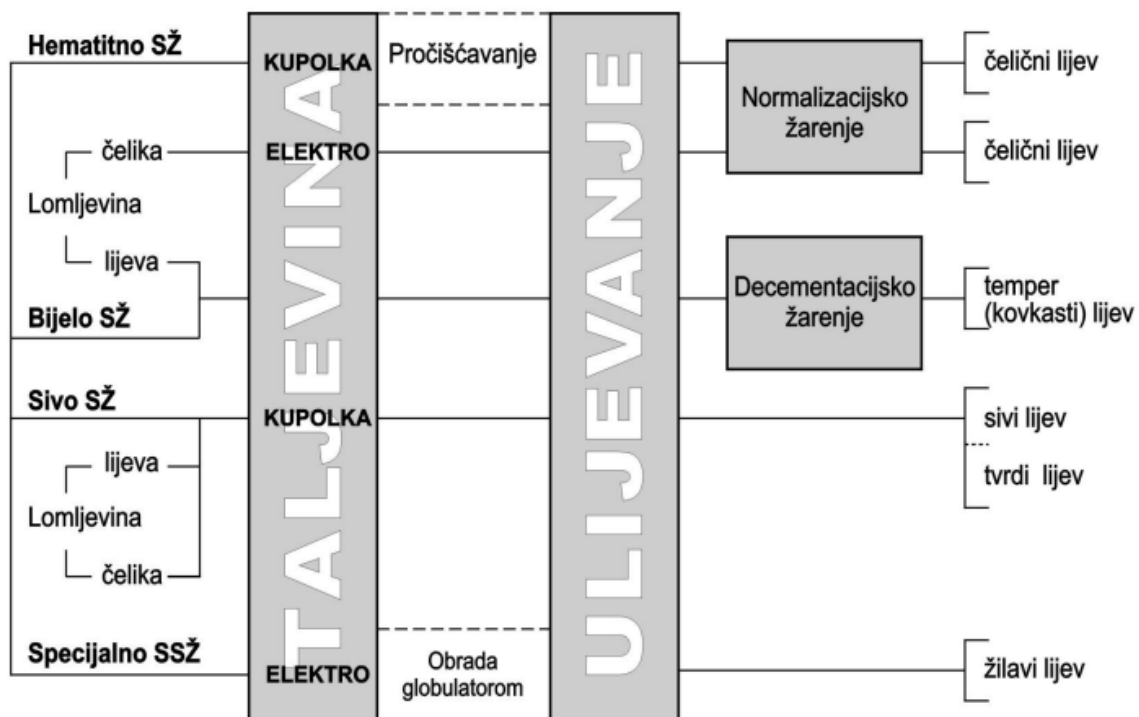
- čelični ljev (ČL),
- bijeli tvrdi ljev (BTL),
- sivi ljev (SL),
- nodularni (žilavi) ljev (NL),
- temper (kovkasti) ljev (CTEL – crni feritni, PTEL – crni perlitni, BTEL – bijeli).

Ljevovi se mogu sistematizirati prema mehaničkim svojstvima, tehnološkim postupku dobivanja, kemijskom sastavu i mikrostrukтури.

Prema mehaničkim svojstvima ljevovi se dijele na:

- ljevove relativno dobre istežljivosti i žilavosti (čelični, temper i nodularni),
- krhke ljevove (sivi i bijeli tvrdi ljev).

Podjela prema tehnološkom postupku dobivanja prikazana je na slici 1.



Slika 1. Postupci dobivanja željeznih ljevova [4]

Što se kemijskog sastava tiče, čelični lijev ubrajamo u skupinu ljevova s malim masenim udjelom ugljika. Temper, bijeli, sivi i nodularni lijev spadaju u skupinu s velikim masenim udjelom ugljika.

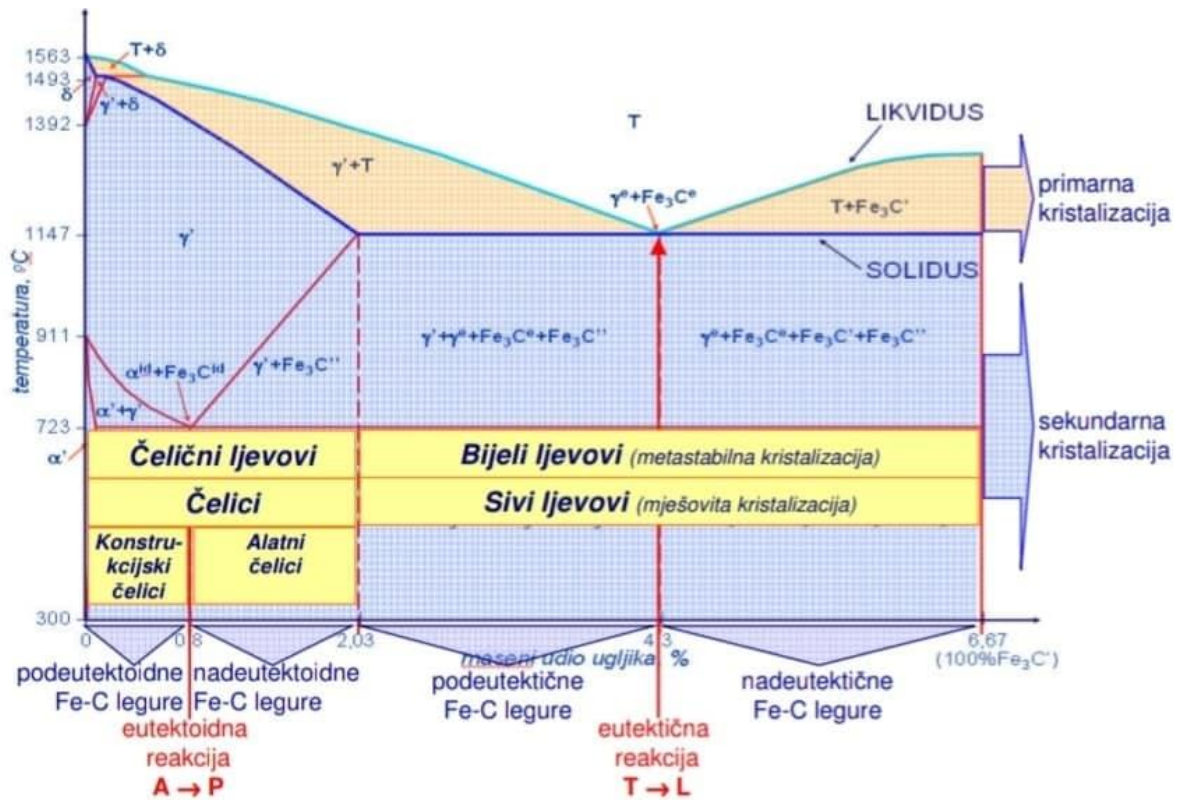
Mikrostruktura se odnosi na vrstu kristalizacije, gdje se razlikuju tri stanja:

- metastabilna kristalizacija, gdje je ugljik vezan u cementitu, odnosno kemijskom spoju željeznom karbidu (Fe_3C),
- stabilna kristalizacija, gdje je ugljik u obliku grafita - stopostotnog heksagonski kristaliziranog ugljika,
- mješovita (stabilna/metastabilna) kristalizacija, gdje je ugljik i u obliku grafita i u obliku cementita. [3][4]

Ako se neka legura Fe-C ohlađuje praktično beskonačno sporo iz rastaljenog stanja, ugljik će se nakon prijelaza odgovarajućih krivulja pretvorbe izlučiti u obliku grafita. Ovaj se oblik skrućivanja naziva stabilnim. Ovakav način kristaliziranja legura Fe-C nema većeg značenja za tehničku praksu, a ovakva se kristalizacija čiste Fe-C legure može stvoriti samo u laboratorijskim uvjetima.

Za tehničku praksu je puno važniji realni sustav kristalizacije, kod kojeg se legura Fe-C hladi umjereno sporo. U tom će se slučaju ugljik spojiti sa željezom u kemijski spoj željezni karbid, tj. cementit. Ovaj željezni karbid kristalizira rompski, a glavna je odlika ove strukturne faze visoka tvrdoća. [1]

Ovakav sustav kristalizacije naziva se metastabilnim, a pripadni ravnotežni dijagram stanja naziva se dijagramom Fe-C za metastabilnu kristalizaciju (Slika 2.)



Slika 2. Dijagram Fe-C za metastabilnu kristalizaciju [5]

Prema slici 2. može se zaključiti da čelčni ljevovi mogu biti podeutektoidnog, odnosno nadeutektoidnog sastava, ovisno o sadržaju ugljika.

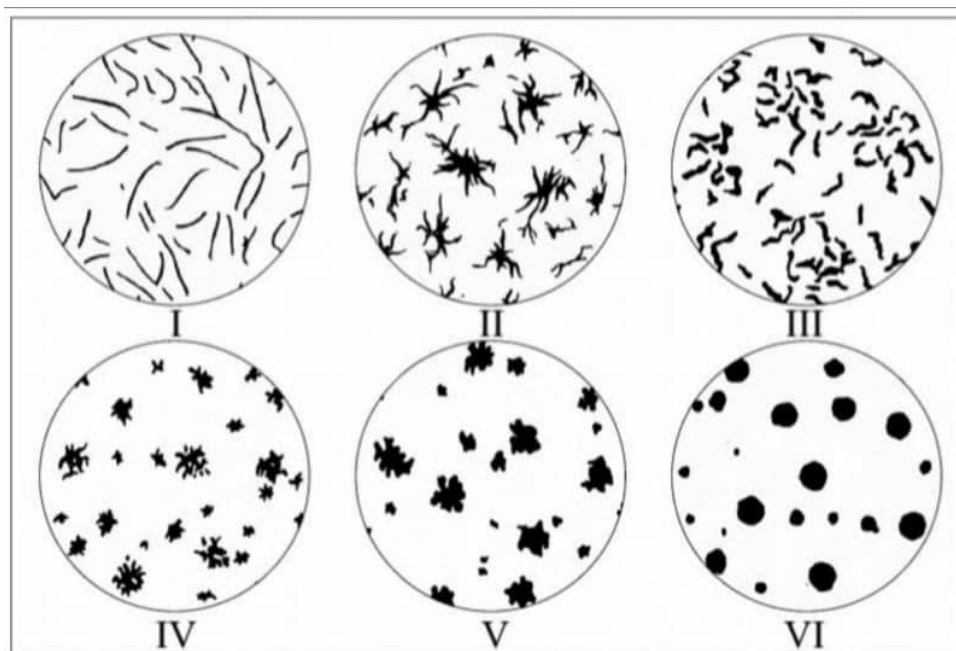
Čelčni i bijeli ljevovi kristaliziraju metastabilno, a sivi ljevovi kristaliziraju mješovito.

Grafit se u željeznim ljevovima pojavljuje u tri osnovna oblika:

- listićav ili lamelaran – kod sivog lijeva,
- kuglast – kod žilavog lijeva,
- čvorast – kod temper lijeva.

Osim ova tri osnovna oblika grafita, u praksi se postiže i poseban oblik listićavog grafita, tzv. „vermikularan“ ili „crvičasti“ grafit.

Slika 3. prikazuje klasifikaciju grafita u željeznim ljevovima prema normi HRN EN ISO 945:20029.

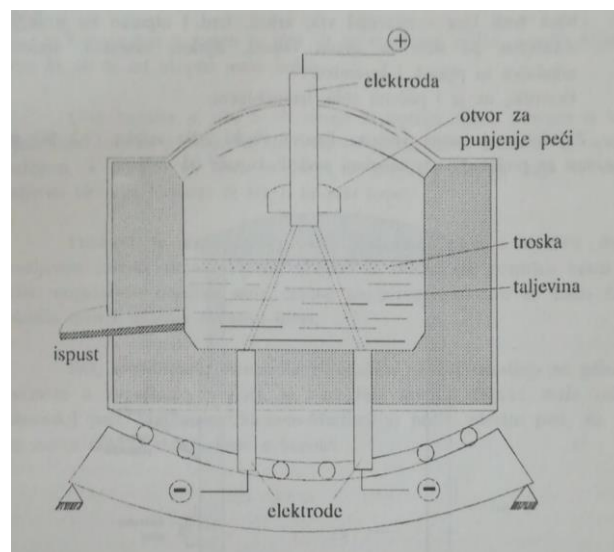


Slika 3. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 [3]

3. ČELIČNI LIJEV

Čelični ljevovi su metastabilno kristalizirane legure koje teorijski sadrže do 2% ugljika, a kod nelegiranih vrsta do 0.5% ugljika. [2]

U današnje vrijeme, čelični ljev se najčešće tali u elektrolučnim ili u indukcijskim pećima. Šarža se sastoji od bijelog sirovog željeza, čelične lomljevine i ferolegura, kojima se regulira sastav čeličnog lijeva. Također se kao dodatak u elektrolučnu peć dodaje vapno. Na slici 4. prikazana je shema elektrolučne peći.



Slika 4. Shema elektrolučne peći [1]

Odljevci od čeličnog lijeva se vrlo rijetko koriste odmah nakon lijevanja, jer gruba lijevana Widmannstättenova mikrostruktura (firitno-perlitna), daje nisku istežljivost i žilavost. Da bi se postiglo sitnije zrno, čelični odljevci se podvrgavaju postupku normalizacije. [3] Widmannstättenova mikrostruktura prikazana je na slici 5.



Slika 5. Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [3]

Nelegirani čelični lijev sadrži manje od:

- 0.5% Si,
- 0.8% Mn,
- 0.1% Al,
- 0.1% Ti,
- 0.25% Cu,
- 0.09% P,
- 0.06% S.

Mehanička svojstva mu pretežno zavise od sadržaja ugljika.

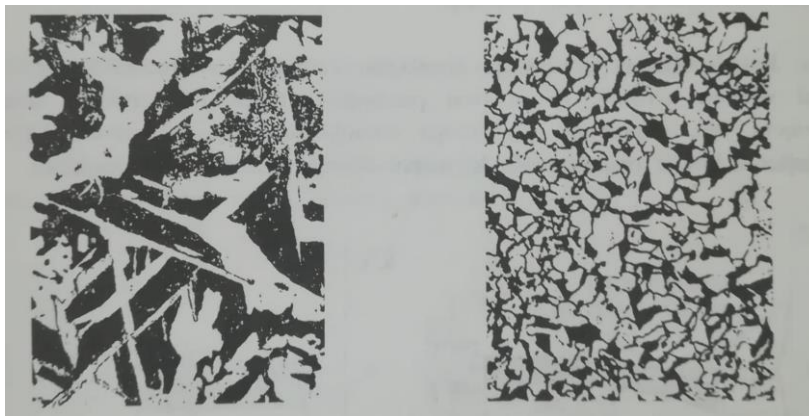
Legirani čelični lijev sadrži obično više od 0.8% mangana te udjele nekih od legirajućih elemenata iz niza: nikal, krom, molibden, vanadij, talij, bakar. Ako lijev sadrži manje od 5% legiranih, on se dogovorno naziva niskolegiranim, a ako ih sadrži više od 5%, naziva se visokolegiranim.

Ukoliko je čelični odljevak namijenjen konačnoj uporabi bez daljnjeg oblikovanja deformiranjem, kao čelični lijev, on će zadržavati obično najviše 0.5% ugljika. Ukoliko je čelični odljevak namijenjen daljnjem oblikovanju deformiranjem, on treba sadržavati onoliko ugljika koliko ga se želi u proizvedenom čeličnom proizvodu (šipki, profilu, ploči itd.) [1]

3.1. Toplinska obrada čeličnih odljevaka

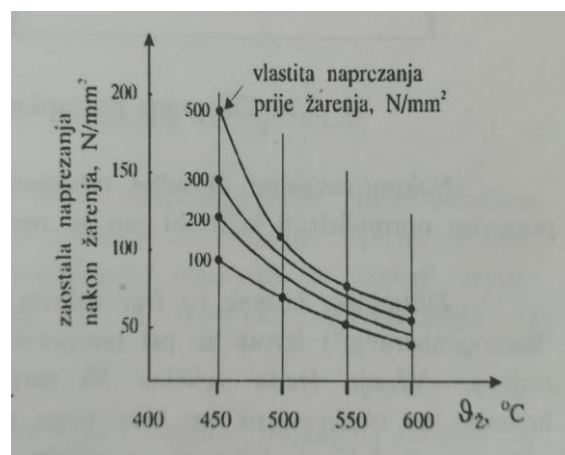
Toplinskom obradom osiguravaju se potrebna svojstva čeličnom odljevku. [3]

Normalizacija je osnovni postupak za mehanički opterećene odljevke, a sastoji se iz austenitiziranja i hlađenja na mirnom zraku. Na taj se način uklanja gruboigličasta Widmannstättenova mikrostruktura i postiže se sitnije feritno-perlitno zрно. Na slici 6. vidi se usporedba mikrostruktura čeličnog odljevka s 0.26% ugljika prije i nakon normalizacije. Normalizacijom se dobiva bolja istezljivost i žilavost.



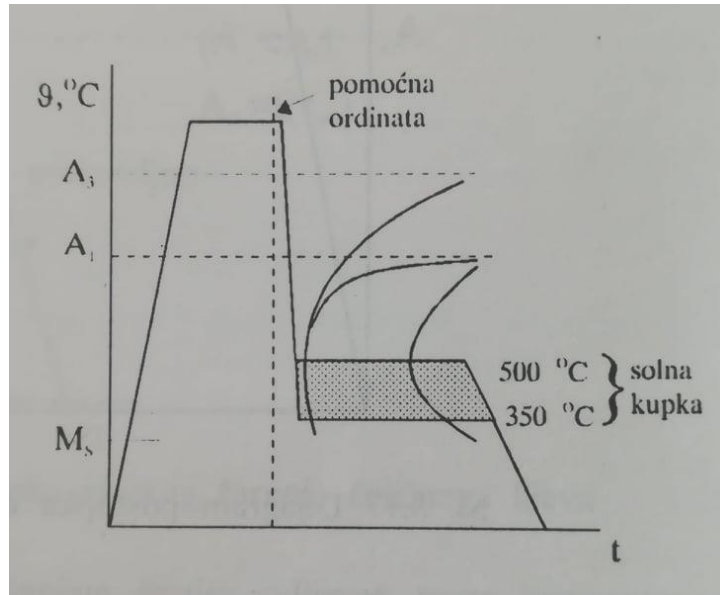
Slika 6. Mikrostruktura čeličnog odljevka prije (lijevo) i nakon normalizacije (desno) [1]

Žarenje je postupak kojim se odljevci podvrgavaju nakon normalizacije kako bi se smanjila zaostala naprezanja u materijalu. Sastoji se od ugrijavanja na temperaturu do 600°C i sporog hlađenja. Na slici 7. prikazan je utjecaj temperature žarenja na sniženje naprezanja uz različite iznose početnih naprezanja.



Slika 7. Utjecaj temperature žarenja na sniženje naprezanja uz različite iznose početnih naprezanja [1]

Poboljšavanje se provodi kod legiranih ljevova od kojih se traži bolja žilavost uz visoku vlačnu čvrstoću, onda kada je to ostvarivo s obzirom na dimenzije odljevaka. Sastoji se od kaljenja i visokog popuštanja. Slika 8. pokazuje dijagram postupka poboljšavanja.



Slika 8. Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja [1]

Gašenje nakon držanja na visokoj temperaturi se podvrgavaju vrste legiranog čeličnog lijeva kod kojih se traži korozijska postojanost. Na taj se način sprječava izlučivanje krupnih karbida kao druge faze u mikrostrukturi čelika.

Potpuno žarenje je postupak kojim se obrađuju vatrootporni odljevci od legiranog čeličnog lijeva koji su namijenjeni radu pri vrlo visokim temperaturama (do 1100°C). Sastoji se od austenitiziranja pri visokoj temperaturi i hlađenja u peći.

Sferoidizaciji se podvrgavaju odljevci kada se želi poboljšati obradljivost odvajanjem čestica. Tim postupkom karbidi poprimaju kuglasti oblik. [2]

3.2.Primjena čeličnog lijeva

Čelični lijev se primjenjuje:

- ako nije dovoljna čvrstoća sivog i temper lijeva,
- za najveće dimenzije i mase,
- ako je nužno koristiti visokouglične, visokolegirane vrste otporne na trošenje koje se zbog slabe oblikovljivosti deformiranjem moraju lijevati.

Dijelovi iz čeličnog lijeva znatno su skuplji nego oni od sivog i temper lijeva, i to zbog:

- visokih zahtjeva na čistoću i točnost sastava litine,
- visokog tališta (oko 1500°C),
- potrebne naknadne toplinske obrade.

K tome dolaze i specifična svojstva koja otežavaju proces lijevanja:

- slabo ispunjavanje kalupa zbog čega je potrebno visoko pregrijavanje taljevine,
- vrlo visoko toplinsko stezanje što uzrokuje visoke napetosti i povećava opasnost od stvaranja šupljina i napuklina. [2]

Ukratko rečeno, čelični lijev se primjenjuje ondje gdje ne bi zadovoljila svojstva sivog ili temper lijeva, te gdje bi oblikovanje nekim drugim postupkom bilo neekonomično ili čak nemoguće.

Primjeri tipične primjene čeličnog lijeva:

- dijelovi preša – stalci, okviri, stolovi,
- rotori toplinskih strojeva,
- veliki zupčanici s grubo odlivenim zubima,
- kućišta ventila, reduktora, većih kartera i mjenjača automobila,
- križne glave brodskih i ostalih motora,
- bubnjevi automobilskih kočnica,
- veći lančanici,
- brodski propeleri,
- kućišta sporohodnih pumpi i kompresora,
- kućišta elektromotora,
- dijelovi lokomotiva, vagona i tramvaja. [1]

4. BIJELI TVRDI LIJEV

Bijeli tvrdi lijev dobiva se metastabilnom kristalizacijom Fe-C legura s više od 2% ugljika. [1] Kako bi se pospješilo stvaranje karbida, a sprječilo stvaranje grafita, treba povisiti maseni udio Mn, te ograničiti maseni udio silicija. Uobičajeni kemijski sastav taljevine je:

- 2.5-3.5% C,
- 3.0-4.0% Mn,
- do 0.6% Si,
- do 0.9% P,
- do 0.25% S.

Slika 9. prikazuje mikrostrukturu bijelog tvrdog lijeva.



Slika 9. Mikrostruktura bijelog tvrdog lijeva [3]

Bijeli tvrdi lijev primjenjuje se za odljevke jednostavnijeg oblika koji trebaju biti tvrdi i otporni na abrazijsko trošenje. Primjeri primjene su:

- valjci u metalnoj, papirnoj ili pekarskoj industriji,
- kotači i papuče kočnica tračnih vozila,
- dijelovi drobilica za kamen, ugljen i sl.,
- žigovi i alati za izvlačenje žice,
- oklopi bubnjeva u industriji cementa,
- kugle u bubnjevima za drobljenje ugljena cementa i sl. [2]

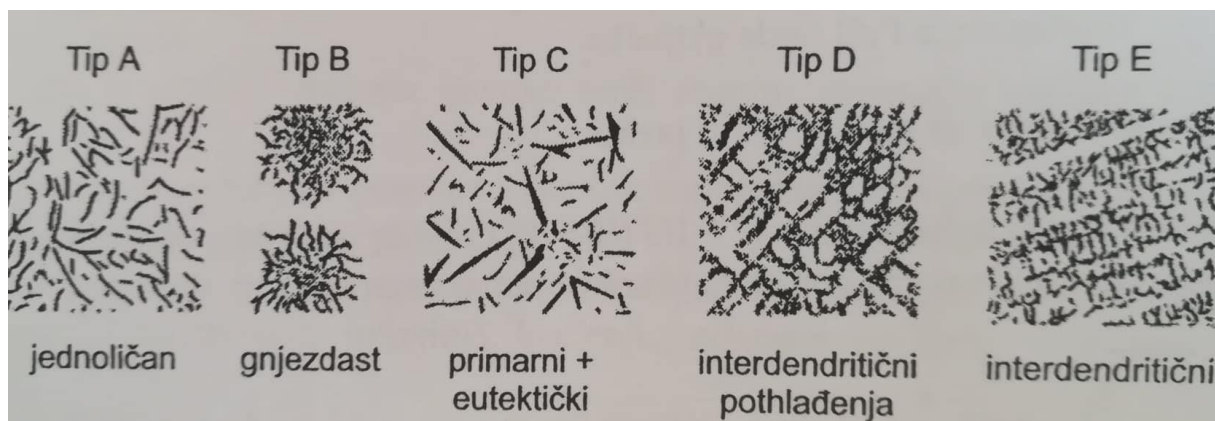
5.SIVI LIJEV

Sivi lijev je Fe-C legura s dodatkom silicija, mangana i fosfora koja je kristalizirala mješovito. Teorijski sadrži više od 2% ugljika, a u praksi 2.5-4.5% ugljika. [1]

Kemijski sastav nije propisan normama i obično uobičajeno iznosi:

- 2.5-4.5% C,
- 0.3-1.2% Mn,
- 1-4% Si,
- 0.4-1.5% P,
- do 0.1% S.

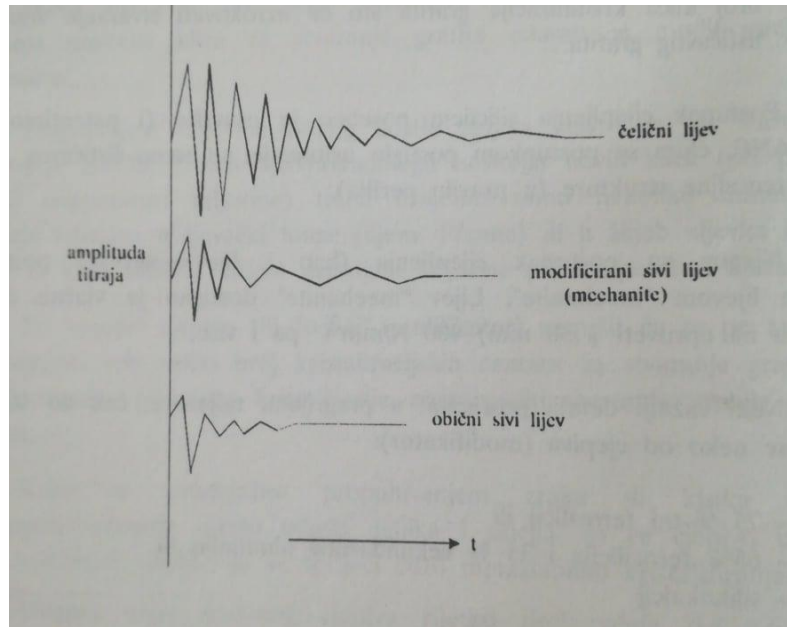
Mikrostruktura mu se sastoji od listića grafita i željezne osnove koja je feritna, perlitna ili feritno-perlitna, a uz to se može pojaviti i slobodni cementit. Na slici 10. prikazani su tipovi listića grafita prema ASTM normi. [2]



Slika 10. Oblici listića grafita prema ASTM normi u pet tipova [2]

Sivi lijev nije najkvalitetniji materijal, ali je vrlo često najekonomičniji. Troškovi proizvodnje su mu razmjerno niski počevši od sirovine, manjeg utroška energije za rastaljivanje, kalupljenja i kalupa, pa sve do lake obradljivosti odvajanjem čestica. Livljivost mu je bolja nego ona čeličnoga lijeva, ukupno linearno stezanje mu snosi samo oko 1%.

Mehanička svojstva odljevaka od sivog lijeva su niska vlačna čvrstoća, visoka tlačna čvrstoća, niska žilavost i niska dinamička izdržljivost. Ovaj lijev ima i vrlo dobru sposobnost prigušenja vibracija što je vidljivo na slici 11.



Slika 11. Shematski prikaz sposobnosti prigušenja triju vrsta ljevova [1]

Primjena sivog lijeva je vrlo proširena u strojogradnji, gdje se koristi za izradu postolja strojeva, postolja i kućišta velikih brodskih motora, dijelova strojeva i uređaja u elektrotehnici, dijelova poljoprivrednih strojeva itd. [1]

6.NODULARNI LIJEV

Nodularni lijev je lijevačka pseudobinarna legura željeza i ugljika, koji se pretežnim dijelom izlučio u obliku kuglastog grafit, po čemu je i dobio ime. Kuglasti grafit se dobiva legiranjem (cijepljenjem) podeutektnog sivog lijeva s 0.5% mangana ili nadeutektnog sivog lijeva s oko 0.5% cerija. U ovom slučaju, mangan i cerij se nazivaju globulatori (cjepiva). Oni se u talinu dodaju tik prije lijevanja. Ovaj je postupak dobivanja složeniji i skuplji nego za ostale ljevove.[1]

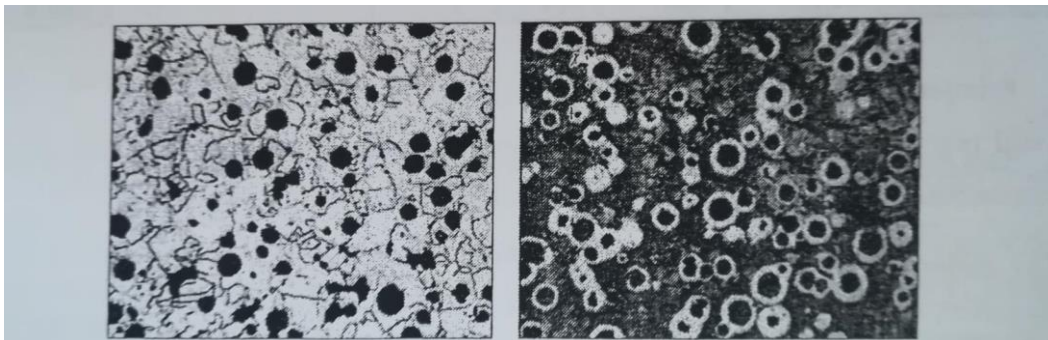
Približni kemijski sastav lijeva iznosi:

- 3.2-3.8% C,
- 2.4-2.8% Si,
- do 0.5% Mn,
- do 0.045% P,
- do 0.01% S.

Mikrostruktura željezne osnove dolazi kao:

- potpuno feritna – niža čvrstoća, viša istezljivost,
- feritno-perlitna,
- perlitna – viša čvrstoća, niža istezljivost,
- austenitna. [2]

Na slici 12. prikazane su mikrostrukture nodularnih ljevova.



Slika 12. Mikrostruktura feritnog (lijevo) i perlitnog nodularnog lijeva (desno) [2]

Cijepljenjem se poboljšavaju mehanička svojstva: vlačna čvrstoća, razvlačenje, a posebno žilavost, zbog čega se ovaj lijev još naziva i žilavi lijev. [1]

Zbog povoljnih mehaničkih svojstava primjenjuje se kao zamjena za čelični lijev ili čelične otkovke srednje i veće masivnosti. Tipični primjeri primjene su koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, stapajice, zupčanici, poklopci kliznih ležajeva, rotori pumpi... [2]

7.TEMPER LIJEV

Temper lijev se dobiva tako da se sirovi bijeli lijev žari „temper postupkom“ pa da time ugljik iz cementita:

- ili kristalizira u obliku tzv. temper-ugljika (heksagonski kristaliziranog ugljika u čvorastim nakupinama) čime se dobiva crni temper lijev,
- ili se većim dijelom ukloni iz lijeva procesom razugljeničenja čime se dobiva bijeli temper lijev.

Postupak dobivanja crnog temper lijeva naziva se crni ili američki, a postupak dobivanja bijelog temper lijeva bijeli ili europski. Nazivi „crni“ i „bijeli“ potječu od izgleda prijeloma odljevka.

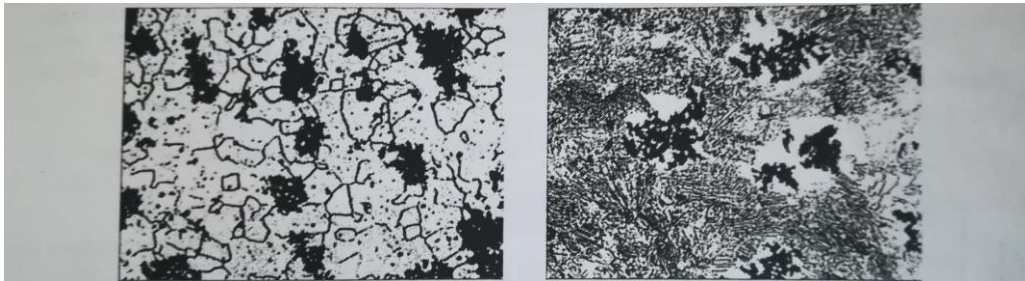
Temper postupkom dobiva se niža tvrdoća, bolja obradljivost odvajanjem čestica, viša žilavost i ograničena kovkost. [1]

7.1. Crni temper lijev

Sastav odljevka bijelog lijeva za crni temper lijev:

- 2.8-3.4% C,
- 0.5-0.8% Si,
- 0.2-0.4 % Mn,
- do 0.1% P,
- 0.1-0.29% S.

Ukoliko se prijelaz područja pretvorbe obavlja sporije, dobiva se feritni crni temper lijev, a ako se prijelaz područja pretvorbe obavlja brže, dobiva se perlitni crni temper lijev. Ove mikrostrukture vidljive su na slici 13.



Slika 13. Mikrostruktura feritnog (lijevo) i perlitnog crnog temper lijeva (desno) [2]

Svojstva crnog temper lijeva:

- zbog visokog udjela ugljika teško se zavaruje, ali dobro lemi,
- perlitni se može zakaliti čime se povisuje tvrdoća i otpornost na trošenje,
- bolje je obradljiv odvajanjem čestica od bijelog.

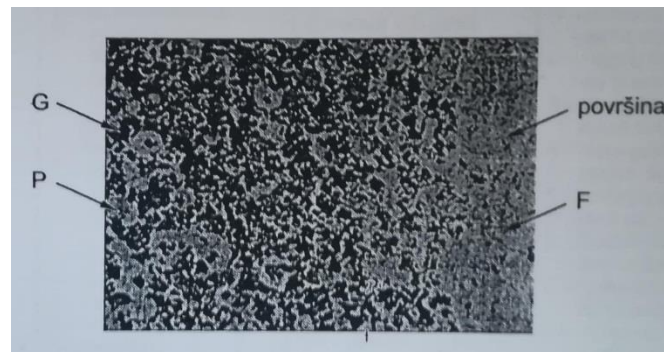
Crni temper lijev koristi se za odljevke male mase kompliciranih oblika kao što su bubnjevi kočnica vozila, držači kočionih čeljusti, vilice i držači vilica u vozilima i strojevima, cijevne spojnice, dijelovi poljoprivrednih strojeva, dijelovi šivaćih, pisaćih i tiskarskih strojeva, dijelovi vaga, ventili i zasuni u brodogradnji, ventili za plin i vodu itd.

7.2. Bijeli temper lijev

Sastav odljevka bijelog lijeva za bijeli temper lijev:

- 2-2.8% C,
- 1.4-1.8% Si,
- 0.2-0.5% Mn,
- do 0.1% P,
- do 0.15% S.

Kod debljih odljevaka razugljičuje se površinski sloj debljine 4-12mm, a ispod tog sloja nalazi se grafit u više ili manje perlitnoj osnovi. Ovo je vidljivo na slici 14. Odljevci tanki do 5mm mogu se razugljičiti preko cijelog presijeka.



Slika 14. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [2]

Bijeli temper lijev primjenjuje se za ručni alat, cijevne spojnice, lance i dr. [2]

8.POSTAVKA ZADATKA

Nakon teorijskog dijela u kojem su opisane vrste željeznih ljevova s naglaskom na čeličnom lijevu, u eksperimentalnom dijelu dodatno će biti opisana svojstva čeličnog lijeva, nakon čega će se provesti mehanička i metalografska ispitivanja čeličnog lijeva ČL1330.

Ispitivanja će se izvoditi na epruvetama izrađenim iz čeličnog lijeva ČL1330, od prethodno odlivenih Y-proba. Ispitivanje vlačne čvrstoće i kemijskog sastava izvodit će se u Ljevaonici Karlovac, a ispitivanje tvrdoće i metalografsko ispitivanje u Laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu.

9.EKSPERIMENTALNI DIO

9.1.Svojstva čeličnog lijeva

Modul elastičnosti čeličnih ljevova najviše ovisi o temperaturi. Primjerice, pri 20°C iznosi oko 210000 N/mm², a porastom temperature modul elastičnosti se snizuje gotovo linearno, pa tako pri temperaturi od 500°C iznosi oko 165000 N/mm².

Vlačna čvrstoća i konvencionalna granica razvlačenja svoje optimalne vrijednosti dosežu nakon prikladne toplinske obrade, najčešće normalizacije. Normalizacijom se djelomično uklanja Widmannstättenova mikrostruktura, a kristalna zrna postaju sitnija. Time se dobiva veća čvrstoća i granica razvlačenja. Na čvrstoću i granicu razvlačenja najviše utječe postotak ugljika.

Vremenska čvrstoća dolazi do izražaja pri dugotrajnom vlačnom naprezanju pri povišenim temperaturama. Prije loma uslijed dugotrajnog naprezanja nastupa puzanje, tj. trajna deformacija razvlačenja. Čelični lijev ima višu vremensku čvrstoću nego čelik jednakog sastava zahvaljujući grubljem i neorijentiranom kristalnom zrnu.

Dinamička izdržljivost je lošija kod čeličnih ljevova nego kod odgovarajućih čelika, što se također može pripisati grubom i nejednoličnom zrnu.

Žilavost čeličnih ljevova snizuje se porastom udjela ugljika, pa se zato udio ugljika ograničava u čeličnim odljevcima. Žilavost raste s porastom temperature do oko 400°C, a zatim polagano pada. [1]

9.2. Ispitni uzorci

Za ispitivanje su korišteni normirani (standardizirani uzorci), odnosno epruvete. Ispitne uzorke za ovaj rad ustupila je tvrtka Ljevaonica Karlovac d.o.o. Materijal ispitnih uzoraka je čelični ljev ČL1330. Materijal je u normaliziranom stanju. Ovaj materijal se koristi za proizvodnju kućišta i poklopaca kućišta pumpi.

U ljevaonici je napravljena kemijska analiza uzoraka. Tablica 1. prikazuje utvrđeni i zahtijevani kemijski sastav ispitivanog materijala.

Tablica 1. Utvrđeni i zahtijevani kemijski sastav ispitivanog materijala

Kemijski element	Utvrđeni maseni udio [%]	Zahtijevani maseni udio [%]
C	0.21	0.18-0.23
Si	0.46	≤0.60
Mn	0.89	0.50-1.20
P	0.008	≤0.030
S	0.002	≤0.020
Cr	0.065	≤0.030
Ni ₂	0.149	≤0.40
Mo	0.092	≤0.12
Cu	0.057	≤0.30
Al	0.118	-
Ti	0.005	-
V	0.024	≤0.03
Nb	0.038	-
W	0.030	-
Co ₂	0.019	-
Fe	97.7	-

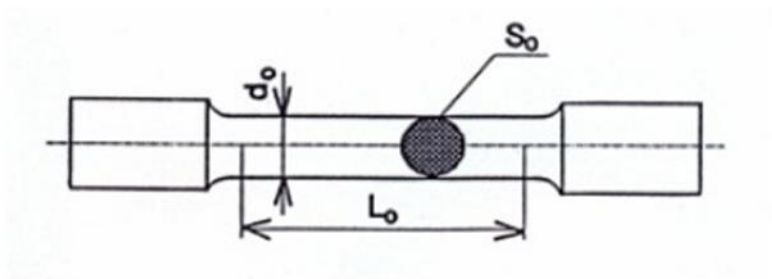
Prema dobivenim rezultatima ispitivanja može se zaključiti da utvrđeni kemijski sastav odgovara zahtijevanom.

Epruvete su dobivene iz y-probe. Y-proba prikazana je na slici 15.



Slika 15. Y-proba

Korištene su kratke epruvete kružnog presjeka napravljene prema standardu DIN50115. Na slici 16. naznačene su osnovne dimenzije epruvete, a u tablici 2. vidljive su standardne dimenzije vlačnih epruveta.



Slika 16. Epruveta kružnog presjeka [7]

Osnovne veličine koje karakteriziraju dimenzije epruvete su sljedeće:

- d_0 - početni promjer epruvete, [mm],
- L_0 - početna duljina epruvete, [mm],
- S_0 - početna površina epruvete, $S_0 = d_0^2 \pi / 4$, [mm²].

Tablica 2. Standardne dimenzije vlačnih epruveta

Promjer epruvete d_0	Metrički navoj d_1	Najmanji polumjer unutarnjeg navoja	Visina glave epruvete h	Početna mjerna duljina epruvete L_0	Probna duljina L_v	Ukupna duljina epruvete L_t
6	M10	7,33	8	30	36	60
8	M12	9,33	10	40	48	75
10	M16	13,00	12	50	60	90
12	M18	14,35	15	60	72	110
14	M20	16,35	17	70	84	125
16	M24	19,70	20	80	96	145
18	M27	22,70	22	90	108	160
20	M30	25,05	24	100	120	175
25	M33	28,05	30	125	150	220

U tablici su podebljanim brojevima prikazane dimenzije epruveta korištenih u ovim ispitivanjima.

9.3. Statički vlačni pokus

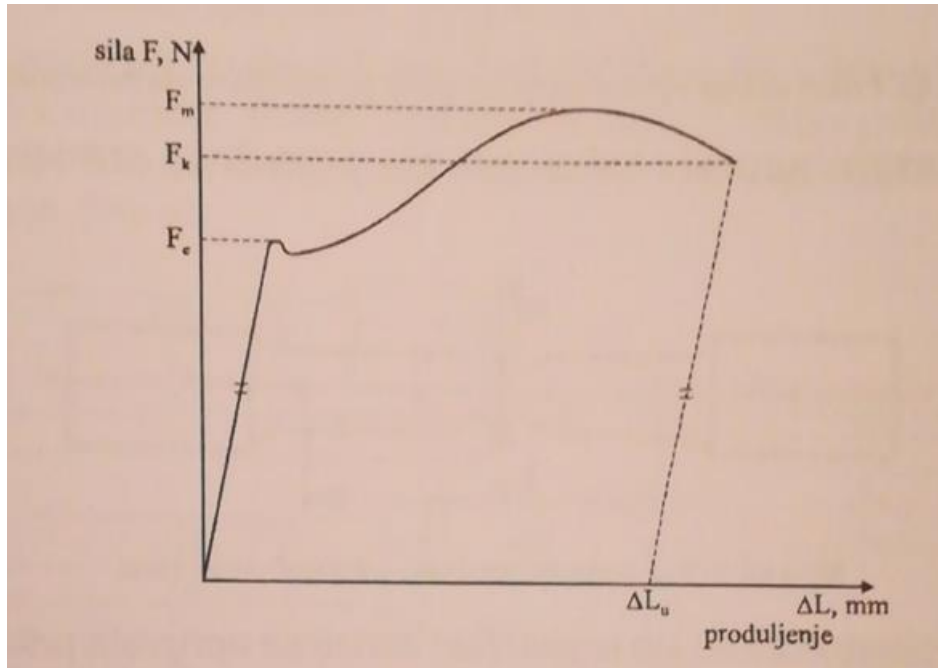
Statičkim vlačnim pokusom ispituje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičnog vlačnog naprezanja. Elastična deformacija je ona koja nakon rasterećenja iščezava, a plastična ostaje i nakon rasterećenja. Ovim se ispitivanjem utvrđuju osnovna mehanička svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, maksimalna vlačna sila, sila loma, istežanje i kontrakcija.

Ispitivanje se izvodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama, na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. [7] Na slici 17. prikazana je kidalica Ljevaonice Karlovac.



Slika 17. Kidalica

Ispitivanje vlačne čvrstoće vrši se tako da se krajevi epruvete učvrste u čeljusti kidalice. Normom se predviđaju oblik i dimenzije epruvete, brzine opterećivanja, temperatura ispitivanja i način prikazivanja rezultata. Epruveta se opterećuje vlačnom silom sve do pojave loma. Tijekom kidanja instrumenti registriraju sile i produljenje, odnosno crtaju dijagram sila-produljenje. [6] Primjer takvog dijagrama vidljiv je na slici 18.



Slika 18. Dijagram razvlačenja sila-produljenje [6]

Sila F_e se nalazi na gornjoj granici proporcionalnosti (R_{eh}), koja označava područje do kojeg vrijedi Hookeov zakon proporcionalnosti. Hookeov zakon kaže da je opterećenjem izazvano naprezanje razmjerno deformaciji.

Maksimalna sila F_m je najveća sila postignuta pri statičnom vlačnom pokusu. U tom trenutku na jednom se mjestu epruveta stanjuje i to je mjesto gdje će kasnije nastati lom. Nakon toga su dovoljne manje sile jer se smanjio presjek epruvete.

Sila F_k nalazi se na granici loma ($R_k = F_k/S_0$, [N/mm²]). To je sila u trenutku loma epruvete.

Vlačna čvrstoća dobiva se iz izraza $R_m = F_m/S_0$, [N/mm²], a granica elastičnosti iz izraza $R_e = F_e/S_0$, [N/mm²]. Za grube proračune može se uzeti da je $R_e \approx 0.55 \times R_m$.

Istezanje se dobiva prema formuli $A = L/L_0$, a izražava se u postocima. Zato je potrebno izračunati i ukupno produljenje prema izrazu $L = L_1 - L_0$, [mm]. Duljina L_0 se izmjeri prije kidanja epruvete. Nakon kidanja pažljivo se sastavi epruveta i izmjeri se razmak između točaka od kojih je mjerena početna mjerna duljina. [6]

Na slici 19. prikazane su epruvete nakon loma.



Slika 19. Epruvete nakon loma

9.4. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Tablica 3. prikazuje dobivenu granicu elastičnosti, vlačnu čvrstoću i istezljivost za epruvete šarže 190/18, 117/16 i 142/16, izračunate srednje vrijednosti, te zahtijevane vrijednosti vlačne čvrstoće i istezljivosti za ČL1330.

Tablica 3. Dobivene vrijednosti granice elastičnosti, vlačne čvrstoće i istezljivosti

Šarža	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A[%]	Re/Rm
190/18	292	496	30.9	0.58
117/16	338	519	24.8	0.65
142/16	299	507	32.6	0.58
Srednja vrijednost	310	507	29.4	0.60
Zahtijevana vrijednost	-	420-600	≥22	-

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da dobivene vrijednosti odgovaraju zahtijevanim vrijednostima vlačne čvrstoće i istezljivosti.

Za usporedbu, tablica 4. prikazuje zajamčena svojstva drugih vrsta čeličnog lijeva.

Tablica 4. Zajamčena svojstva nelegiranih i niskolegiranih vrsta čeličnog lijeva

Oznaka lijeva	R _m [N/mm ²]	A min [%]	Re/R _m	%C
ČL0300, ČL0301	370	25	0.5	<0.25
ČL0400, ČL0401	440	22	0.5	≈0.25
ČL0500, ČL0501	510	18	0.5	≈0.30
ČL0600, ČL0601	590	15	0.5	≈0.40
ČL0602, ČL0603	610	15	0.55	≈0.40
ČL0700	690	12	0.6	≈0.50

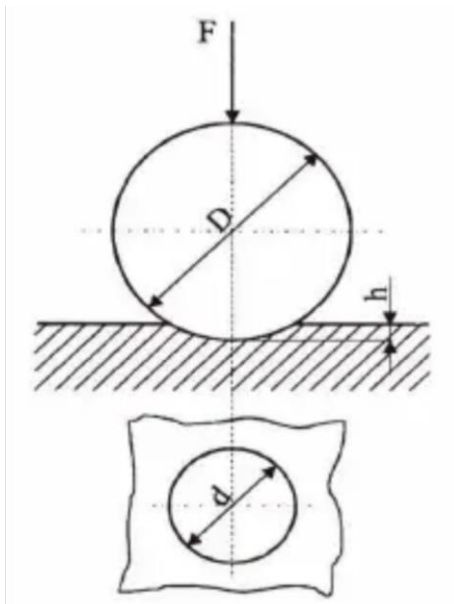
Vidljivo je da čelični ljevovi s većim postotkom ugljika imaju više vrijednosti vlačne čvrstoće, odnosno manju istezljivost.

9.5. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Tvrdoća je otpornost protiv zadiranja u površinu. Ovo ispitivanje se izvodi na uređaju za ispitivanje tvrdoće po Brinellu (slika 20.) tako da se na ravnu i glatku površinu materijala, pod određenim opterećenjem F (N) i u određenom vremenu t utiskuje čelična kaljena kuglica promjera D . Pri tome kuglica ostavi otisak promjera d s dimenzijom koja ovisi o tvrdoći ispitivanog materijala i opterećenju, što je vidljivo na slici 21. [6]



Slika 20. Uređaj za ispitivanje tvrdoće



Slika 21. Princip ispitivanja po Brinellu [7]

Tvrdoća po Brinellu je omjer primjenjene sile i površine otiska:

$$HB = F \times 0.102 / S$$

gdje je F [N] sila, a S [mm²] površina kugline kalote koja se računa prema izrazu:

$$S = \pi d h$$

D = promjer kuglice [mm]

h = dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja [mm]

Ovom metodom se ne mjeri dubina prodiranja kuglice, nego promjer otiska (d), a izraz za tvrdoću po Brinellu glasi:

$$HB = F \times 0.204 / \pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]$$

$$D = (d_1 + d_2) / 2$$

Iznos stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala prikazuje tablica 5.

Tablica 5. Vrijednosti stupnja opterećenja za pojedine grupe metalnih materijala

Stupanj opterećenja	30	10	5	2.5	1.25
Materijal	Fe-C-legure Ti-legure Ni-Co-legure	Cu-legure Ni-legure	Al-legure Mg-legure Zn-legure	Ležajni materijali	Pb Sn Bijela kovina

Iz iznosa stupnja opterećenja za odabrani se promjer kuglice utvrđuje potrebna sila F. Trajanje utiskivanja kuglice u materijal kreće se od 10 do 15 sekundi za Fe-C legure, a do 180 sekundi za najmekše materijale. [7]

9.5.1. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća je ispitana na dva mjesta, a iz rezultata je izračunata srednja vrijednost tvrdoće. Tablica 6. prikazuje rezultate ispitivanja tvrdoće.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja tvrdoće

	Tvrdoća
1. ispitivanje	140.8 HB
2. ispitivanje	141.4 HB
Srednja vrijednost	141.1 HB

9.6. Metalografija

U laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu odrađeno je metalografsko ispitivanje materijala.

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

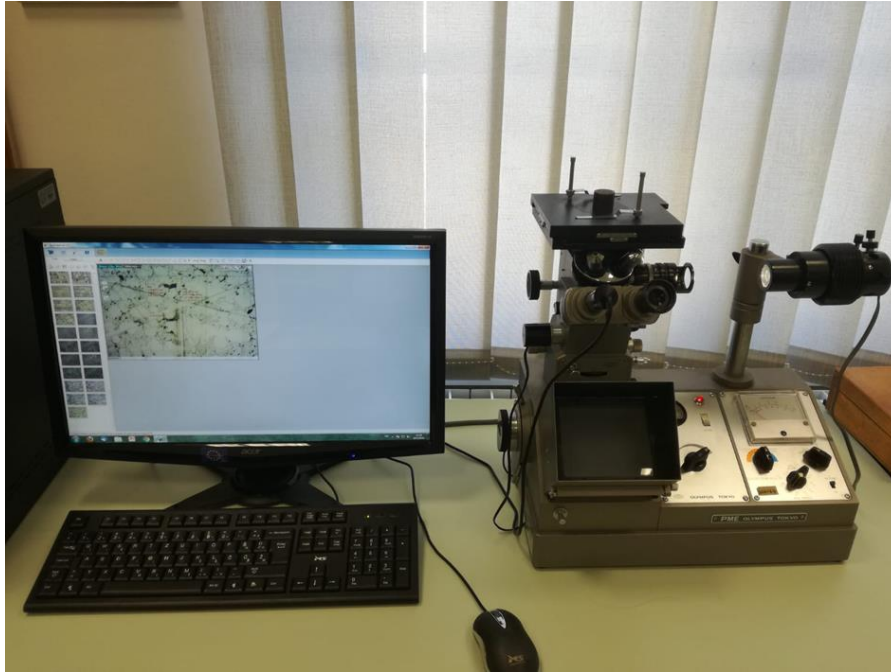
Metalografijom se može gledati:

- makrostruktura – vidljiva golim okom ili uz malo povećanje,
- mikrostruktura – gleda se pomoću mikroskopa.

Za metalografsko ispitivanje potrebno je pripremiti uzorke, što podrazumijeva izrezivanje uzorka, brušenje, umetanje malih uzoraka u smolu, fino brušenje, poliranje, odmaščivanje, nagrizanje površine uzorka, ispiranje uzorka i sušenje. [7] Na slikama 22. i 23. prikazana je oprema za metalografsko ispitivanje.



Slika 22. Uređaj za brušenje i poliranje

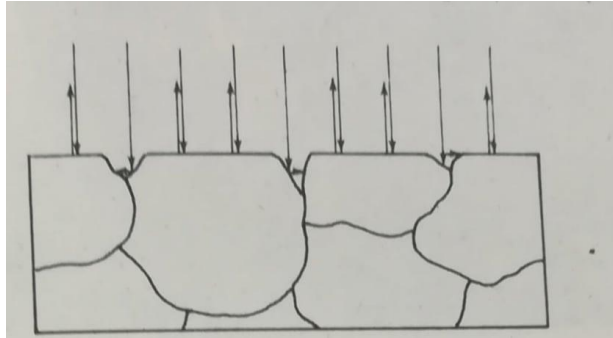


Slika 23. Metalografski mikroskop

Istraživanje pomoću svjetlosnog mikroskopa omogućuje proučavanje faza koje nastaju prilikom skrućivanja i kao posljedica promjena u čvrstom stanju, te uočavanje grešaka mikrostrukture, kao što su granice kristala, mikroporoznosti i mikropukotine, fizikalne nečistoće i dr.

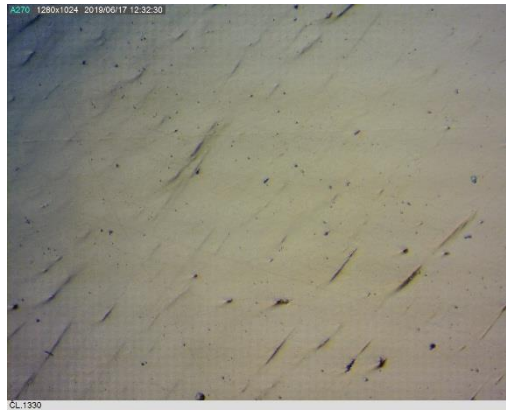
Brušenjem i naknadnim mehaničkim poliranjem potrebno je pripremiti izbrusak ravne površine i visokog metalnog sjaja. Nečistoće u čeliku i grafit imaju manju sposobnost refleksije pa se mogu promatrati na poliranom izbrusku bez nagrivanja.

Međutim, za razvijanje mikrostrukture, potrebno je nagrivanje koje će uzrokovati specifične promjene površine izbruska. Sredstva za nagrivanje jače napadaju granice nego površine kristala, stvarajući tako udubljenja na mjestima granica. Ta je pojava često pojačana zbog prisutnosti nečistoća koje se koncentriraju na granicama kristala. Zrake svjetla koje padaju na takva udubljenja više se ne odbijaju pod pravim kutom kao kod nenagriženih površina, što je vidljivo na slici 24. [8]

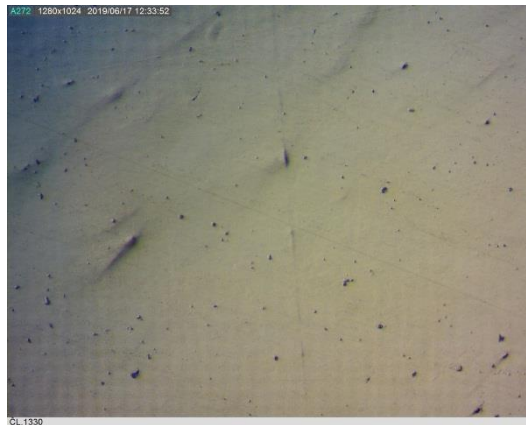


Slika 24. Odbijanje svjetla pri određivanju kristalnih granica nagrivanjem [9]

Na slikama 25. i 26. vidljiva je površina ispitivanog materijala u poliranom stanju.

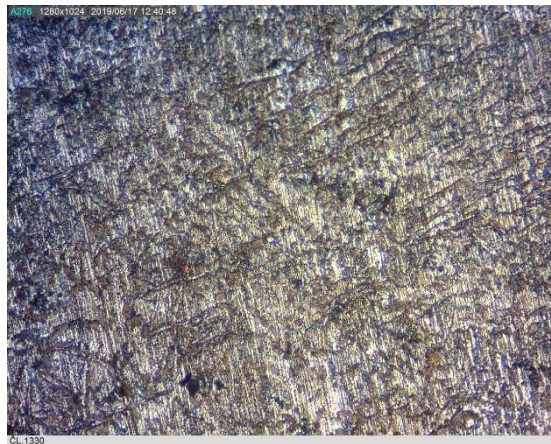


Slika 25. Ispitivani materijal u poliranom stanju uvećan 100x

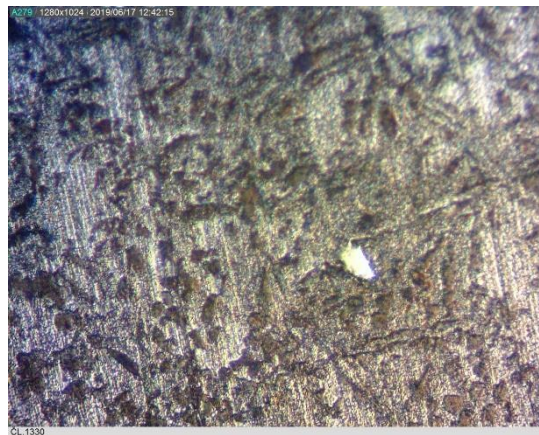


Slika 26. Ispitivani materijal u poliranom stanju uvećan 200x

Na slikama 27. i 28. vidljiva je površina ispitivanog materijala u nagriženom stanju.



Slika 27. Ispitivani materijal u nagriženom stanju uvećan 100x



Slika 28. Ispitivani materijal u nagriženom stanju uvećan 200x

Na slikama je vidljiva feritno-perlitna struktura čeličnog lijeva.

10. ANALIZA REZULTATA

U radu je napravljena kemijska analiza, te su provedeni statički vlačni pokus, ispitivanje tvrdoće i metalografsko ispitivanje čeličnog lijeva ČL1330.

Kemijskom analizom zaključeno je da dobiveni rezultat kemijskog sastava odgovara zahtijevanom.

Statički vlačni pokus proveden je na tri epruvete različitih šarži, a izračunate srednje vrijednosti dobivenih rezultata iznose: $R_e=310 \text{ N/mm}^2$, $R_m=507 \text{ N/mm}^2$, $A=29.4\%$. Utvrđeno je da dobivene vrijednosti odgovaraju zahtijevanim vrijednostima vlačne čvrstoće i istezljivosti.

Ispitivani materijal ČL1330 je u normaliziranom stanju, čime je postignuto sitnije feritno-perlitno zrnno, a time i bolja vlačna čvrstoća i istezljivost. Budući da istezljivost i vlačna čvrstoća ovise o udjelu ugljika, u usporedbi sa zajamčenim svojstvima čeličnih ljevova s većim postotkom ugljika, ČL1330 ima nižu vlačnu čvrstoću i višu istezljivost.

Ispitivanjem tvrdoće Brinellovom metodom utvrđeno je da tvrdoća ispitivanog materijala iznosi 141.1HB.

Metalografskim ispitivanjem mogla se vidjeti feritno-perlitna struktura čeličnog lijeva.

11.ZAKLJUČAK

Čelični ljevovi su metastabilno kristalizirane legure sa do 2%C, a najčešće do 0.5%C. Odljevci od čeličnog lijeva se vrlo rijetko koriste odmah nakon lijevanja jer gruba lijevana Widmannstättenova mikrostruktura (feritno-perlitna), daje nisku istezljivost i žilavost. Toplinskom obradom osiguravaju se potrebna svojstva čeličnom odljevku.

Normalizacija je osnovni postupak za mehanički opterećene odljevke, a sastoji se iz austenitiziranja i hlađenja na mirnom zraku. Na taj se način uklanja gruboigličasta Widmannstättenova mikrostruktura i postiže se sitnije feritno-perlitno zrno, a time i bolja istezljivost i žilavost.

Čelični ljev se primjenjuje ondje gdje ne bi zadovoljila svojstva sivog ili temper lijeva, te gdje bi oblikovanje nekim drugim postupkom bilo neekonomično ili nemoguće.

Primjeri tipične primjene čeličnog lijeva su dijelovi preša, rotor toplinskih strojeva, veliki zupčanici s grubo odlivenim zubima, kućišta ventila, reduktora, većih kartera i mjenjača automobila, križne glave brodskih i ostalih motora, bubnjevi automobilskih kočnica, veći lančanici, brodski propeleri, kućišta sporohodnih pumpi i kompresora, kućišta elektromotora, te dijelovi lokomotiva, vagona i tramvaja.

U eksperimentalnom dijelu zaključeno je da ispitivani materijal ČL1330 ima zadovoljavajuće vrijednosti vlačne čvrstoće, a u usporedbi s čeličnim ljevovima s većim udjelom ugljika ima nižu vlačnu čvrstoću.

Cilj ovog rada bio je obraditi čelične ljevove i njihova svojstva, sa konkretnim ispitivanjem, što je i učinjeno.

LITERATURA

- [1] Novosel, M., Krumes, D.: Željezni materijali (metalografske osnove i tehnička primjena željeznih ljevova), Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom 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] Kostadin, T.: Čelici i željezni ljevovi, Materijali II, Interna skripta, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [4] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1396606171-0-fe-ljevovi_2012.pdf
- [5] http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Uvod_Metastabilni%20Fe-C%20dijagram.pdf
- [6] Sonički, N.: Tehnički materijali, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [7] Kostadin, T.: Ispitivanje materijala, interna skripta
- [8] Tehnička enciklopedija, Knj. 8 : Meh-Mos. 1982., Izdanje i naklada Jugoslavenskog leksikografskog zavoda, Zagreb, 1963-1997.