

# Svojstva željeznih ljevova

---

**Domić, Dino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*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:128:642546>

*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**

**DINO DOMIĆ**

**SVOJSTVA ŽELJEZNIH LJEVOVA**  
**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Predavač:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

**KARLOVAC, 2015.**



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO ; Karlovac, 2015-01-19

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **DINO DOMIĆ**

Matični broj: 0110609015

Naslov: **SVOJSTVA ŽELJEZNIH LJEVOVA**

#### Opis zadatka:

U završnom radu nakon kratkog uvoda, potrebno je u teorijskom dijelu rada obraditi željezne ljevove i njihova svojstva.

Nakon postavke zadatka, u eksperimentalnom dijelu opisati svojstva nodularnog lijeva i napraviti ispitivanje mehaničkih svojstava nodularnog lijeva, kao i analizu rezultata. Na kraju napisati odgovarajući zaključak. Eksperimentalni dio rada odraditi u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu. Završni rad urediti prema Pravilniku o završnim i diplomskim radovima na Veleučilištu u Karlovcu.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

2015-01-19

2015- 04-14

2015-04-29

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – student Dino Domić, OIB:44093989661, matični broj: 0110609015, upisan u VI. semestar akademske godine 2013./2014., radio 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 laboratoriju Ane Fudurić, bacc.ing.mech., kojima se ovim putem zahvaljujem.

Dino Domić

---

## SAŽETAK

U općem (teorijskom) dijelu opisano je općenito o željeznim ljevovima. Napravljena je podjela ljevova s obzirom na kemijski sastav, strukturu, način proizvodnje i svojstva.

Upravo zbog različitih svojstava, ljevovi se dijele na: čelični, bijeli tvrdi, sivi, nodularni i temper ljev. Svaka vrsta ljevova kratko je opisana uz primjere predočene slikama, te je obrađena mikrostruktura svakog lijeva. S obzirom da je naglasak ovog završnog rada na nodularnom lijevu, u eksperimentalnom dijelu detaljno je opisan nodularni ljev. Vršila su se ispitivanja vlačne čvrstoće i udarnog rada loma (žilavosti). Opisana je kidalica Otto Wolpert Werke i Charpyev bat.

Eksperimentalni dio ovog rada odrađen je u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu i opisuje tijek vlačnog pokusa na pet ispitnih uzoraka nodularnog lijeva i pet ispitnih uzoraka za ispitivanje žilavosti na Charpyevu batu.

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

## SUMMARY

In the general (theoretical) section of this paper I have described the basics of iron casts. I have differentiated the casts on the basis of chemical composition, structure, the production method and the properties of the cast itself.

Do to the aforementioned properties of the the casts we have generally categorized them to steal, hard white, grey, nodular and malleable. All of the above mentioned casts in the text have been briefly described with their respective pictures attached, along with the microstructure of every cast. Do to the fact that the main focus of this paper is on the nodular cast, the experimental part is in great detail focused on it and its properties. I have ran experiments on the tensile strength and the bending rupture (toughness) of the cast. In the text you shall also find the description of Otto Wolpert Werke shredder and Charpy's mallet.

The experiments themselves have been executed in the Laboratory for materials and heat treatment Veleučilišta u Karlovcu. Throughout the notes and description of the experiment you will find that there were two experiments conducted on ten samples. All ten of these samples were of a nodular cast and have been put through the tensile test and through the toughness test on the Charpy's mallet.

After the set amount of experiments have been conducted and finished, the analysis has been completed and the conclusion made.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	7
POPIS TABLICA .....	9
POPIS OZNAKA .....	10
POPIS PRILOGA .....	12
1. UVOD.....	13
1.1. OPĆENITO O ŽELJEZNYM LJEVOVIMA .....	13
2. ČELIČNI LIJEV (ČL).....	16
2.1. OPĆENITO O ČELIČNOM LIJEVU.....	16
2.2. SVOJSTVA ČELIČNIH LIJEVOVA.....	19
2.2.1. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	19
2.2.2. FIZIKALNA SVOJSTVA.....	21
2.3. PRIMJERI PRIMJENE ČELIČNIH LIJEVOVA.....	23
3. BIJELI TVRDI LIJEV (BTL).....	25
4. SIVI LIJEV (SL) .....	27
5. NODULARNI (ŽILAVI) LIJEV.....	29
6. TEMPER (KOVKASTI) LIJEV .....	31
7. POSTAVKA ZADATKA.....	33
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	34
8.1. SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA .....	34
8.2. ISPITNI UZORAK.....	37
8.3. STATIČKI VLAČNI POKUS.....	39
8.3.1. REZULTATI ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE .....	44
8.4. ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA (ŽILAVOSTI).....	50
8.4.1. REZULTATI ISPITIVANJA.....	55
9. ANALIZA REZULTATA.....	56
10. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	58
PRILOZI.....	59

## POPIS SLIKA

Slika 1. Fe-C dijagram stanja [2].....	14
Slika 2. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 [8].....	14
Slika 3. Normalizacijsko žarenje [4].....	16
Slika 4. Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [4].....	17
Slika 5. Shematski prikaz promjene vlačne čvrstoće s porastom % C u Fe-Fe <sub>3</sub> C legurama[3] .....	19
Slika 6. Toplinska vodljivost niskougličnog nelegiranog čeličnog lijeva [3].....	21
Slika 7. Toplinska vodljivost nelegiranih čeličnih ljevova pri 20 °C ovisno o sadržaju ugljika [3] .....	22
Slika 8. Ovisnost svojstava na abrazijsko trošenje o tvrdoći čeličnih ljevova[3].....	22
Slika 9. Čelični lijev nakon 12 sati toplinske obrade[5].....	23
Slika 10. Čelični lijev za strojogradnju [5].....	24
Slika 11. Mikrostruktura bijelog tvrdog lijeva [1].....	25
Slika 12. Mikrostruktura sivog lijeva [6].....	27
Slika 13. Primjena sivog lijeva[6].....	28
Slika 14. Mikrostruktura nodularnog lijeva [7].....	29
Slika 15. Mikrostruktura crnog temper lijeva [1].....	31
Slika 16. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [1].....	32
Slika 17. Normirane veličine grafitnih nodula u nodularnom lijevu [8].....	34
Slika 18. Mikrostruktura nodularnog lijeva [7].....	35
Slika 19. Mikrostruktura feritnog nodularnog lijeva [7].....	35
Slika 20. Mikrostruktura perlitnog nodularnog lijeva [7].....	36
Slika 21. Y-proba.....	37
Slika 22. Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće.....	37
Slika 23. Okrugle epruvete s navojnim glavama [8].....	38
Slika 24. Kidalica Otto Wolpert Werke.....	39
Slika 25. Gornja i donja čeljust kidalice.....	40
Slika 26. Učvršćena probna epruveta.....	41
Slika 27. Epruveta nakon opterećenja.....	42
Slika 28. Polomljene epruvete.....	43
Slika 29. Dijagram kidanja za epruvetu 1.....	44
Slika 30. Dijagram kidanja za epruvetu 2.....	45
Slika 31. Dijagram kidanja za epruvetu 3.....	46
Slika 32. Dijagram kidanja za epruvetu 4.....	47
Slika 33. Dijagram kidanja za epruvetu 5.....	48
Slika 34. Charpyev bat.....	50
Slika 35. Oblik i dimenzija epruvete za ispitivanje udarne radnje loma [9].. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Slika 36. Utjecaj temperature ispitivanja na udarni rad loma za različite materijale [1].....	51
Slika 37. Eruveta s "V" utorom.....	52
Slika 38. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma.....	52
Slika 39. Namještanje epruvete.....	53



<i>Slika 40. Namještena epruveta</i> .....	53
<i>Slika 41. Charpyev bat prije ispitivanja</i> .....	54
<i>Slika 42. Očitanje rezultata</i> .....	54
<i>Slika 43. Epruvete nakon pucanja</i> .....	55
<i>Slika 44. Greška u materijalu</i> .....	56

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Ekvivalent ugljika za pojedine vrste ljevova .....	13
Tablica 2. Zajamčena svojstva nelegiranih i niskolegiranih vrsta čeličnog lijeva .....	18
Tablica 3. Izbor iz privremenih domaćih normi za legirane čelične ljevove .....	20
Tablica 4. Kemijski sastav bijelog tvrdog lijeva .....	25
Tablica 5. Kemijski sastav sivog lijeva .....	27
Tablica 6. Kemijski sastav nodularnog lijeva .....	29
Tablica 7. Kemijski sastav crnog i bijelog temper lijeva .....	31
Tablica 8. Standardne dimenzije vlačne epruvete .....	38
Tablica 9. Utvrđeni parametri za epruvete od nodularnog lijeva NL 700-2 i rezultati ispitivanja .....	49
Tablica 10. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma .....	55

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
CE	%	ekvivalent ugljika
$R_{p0,2}$	$N/mm^2$	konvencionalne granica razvlačenja
HRN	-	hrvatska norma
HV	-	tvrdoća po Vickersu
$d_0$	mm	početni promjer epruvete
$d_1$	-	metrički navoj
h	mm	visina glave epruvete
$L_0$	mm	početna mjerna duljina epruvete
$L_c$	mm	ispitna duljina epruvete
$L_t$	mm	ukupna duljina epruvete
$R_m$	$N/mm^2$	vlačna čvrstoća
$R_e$	$N/mm^2$	granica razvlačenja
A	%	Istezanje
Z	%	kontrakcija
$l_{uk}$	mm	ukupna duljina epruvete nakon opterećenja
$\Delta l$	mm	apsolutno produljenje
$F_e$	N	elastična sila
$F_m$	N	maksimalna sila
$S_0$	$mm^2$	početni poprečni presjek
G	N	težina(bata)
$h_1$	m	visina podizanja bata

$h_2$	m	visina bata pri uzlazu
$E_p$	J	potencijalna energija
KV	J	udarni rad loma (eprovete sa V zarezom)
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
$\lambda$	W/mK	toplinska vodljivost
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
t	s	vrijeme
E	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti

## POPIS PRILOGA

<i>Prilog 1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće .....</i>	60
<i>Prilog 2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma .....</i>	61

## 1. UVOD

### 1.1. OPĆENITO O ŽELJEZNYM LJEVOVIMA

Pojam "lijev" poznat je iz tehnoloških postupaka lijevanja i usko je povezan s pojmom "odljevak". Odljevci odnosno ljevovi primjenjuju se kada nije tehnički moguće oblikovati na drugačiji način, kao na primjer kovanjem, obradom odvajanjem čestica iz poluproizvoda kao što su šipke, cijevi, ploče i slično. [1]

Lijevom smatramo svaku metalnu leguru koja nakon ulijevanja u kalup i kristalizacije nije bila podvrgnuta niti toplom niti hladnom oblikovanju deformiranjem. [3]

Ljevove možemo podijeliti s obzirom na mehanička i kemijska svojstva. Mehanička svojstva kao što su dobra istezljivost i žilavost karakteristika su čeličnog, temper i nodularnog lijeva, dok svojstvo kao što je krhkost, karakteristika je sivog i bijelog tvrdog lijeva. 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. [1]

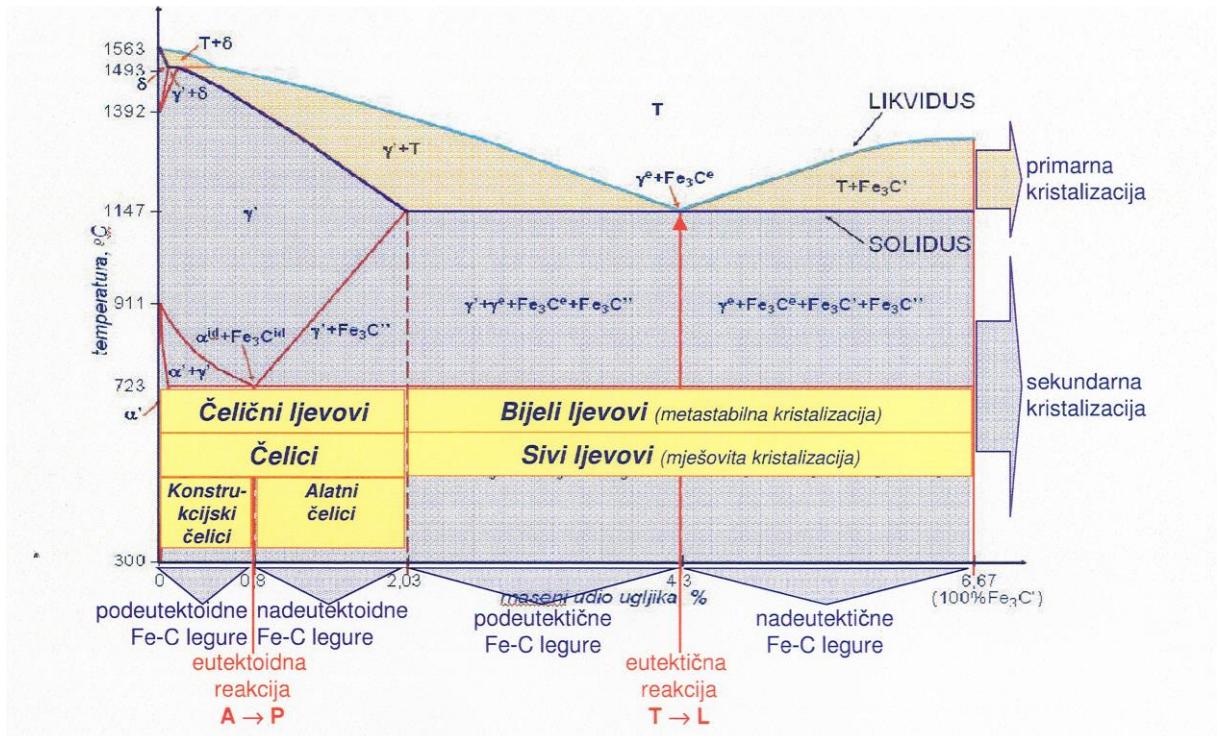
Tablica 1. prikazuje vrijednosti ekvivalenta ugljika za pojedine vrste ljevova. Ekvivalent ugljika izračunava se prema izrazu (1.1) koji nam govori gdje se lijev određenog kemijskog sastava nalazi u odnosu prema eutektičkom sastavu u Fe-C dijagramu.

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (1.1)$$

Tablica 1. Ekvivalent ugljika za pojedine vrste ljevova

ŽELJEZNI LIJEV	IZNOS %
Temper lijev	2,4...3,0
Bijeli lijev	3,0...3,8
Sivi lijev	3,5...4,5
Nodularni lijev	4,5...5,1

Iz slike 1. zaključuje se da su temper i bijeli lijev podeutektičkog sastava, sivi lijev eutektičkog sastava, a nodularni lijev nadeutektičkog sastava.

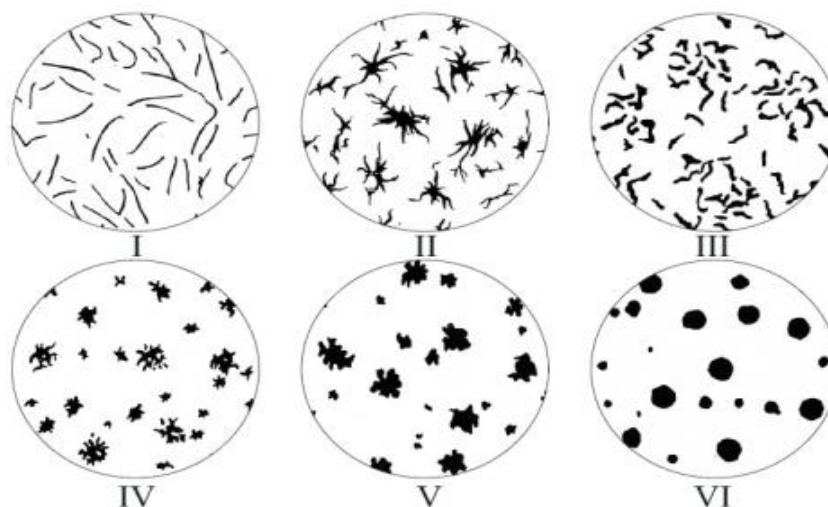


Slika 1. Fe-C dijagram stanja [2]

Kod metastabilne kristalizacije grafit se izlučuje u obliku cementita, a kod stabilne kristalizacije grafit se izlučuje u obliku grafita.

Prema obliku grafita ljevove dijelimo na:

- sivi lijev – ima lističasti ili lamelarni grafit(I),
- nodularni (žilavi) lijev – ima kuglasti grafit(VI),
- temper lijev – ima čvorasti grafit(V).



Slika 2. Klasifikacija grafita u željeznim ljevovima prema HRN EN ISO 945:2002 [8]

Slika 2. prikazuje normom HRN EN ISO 945:2002 propisanu klasifikaciju oblika grafita. Ista norma propisuje normirane veličine grafitnih nodula. [8]

Osim tri osnovna oblika grafita u praksi postoji i posebni oblik listićavog grafita – tzv. vermikularan grafit, gdje se radi o volumenski izoliranim nakupinama grafita.

U željezne ljevove spadaju:

- čelični lijev,
- bijeli tvrdi lijev,
- sivi lijev,
- nodularni lijev,
- temper lijev.

U nastavku će biti opisana glavna svojstva prethodno navedenih ljevova, dok će nodularni lijev biti detaljno opisan i ispitati će se mehanička svojstva na probnim epruvetama.

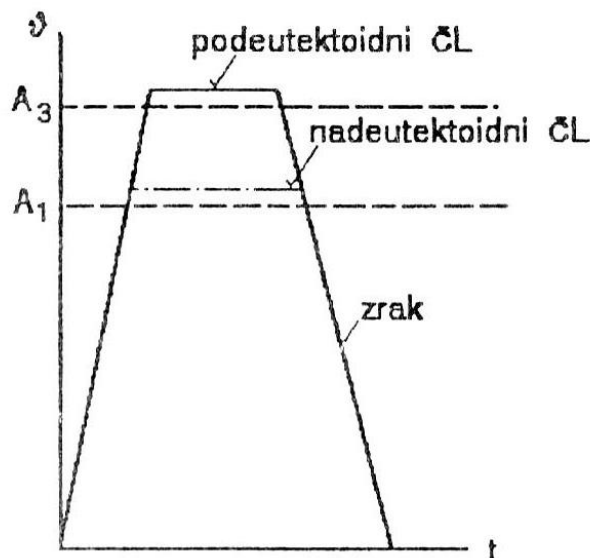


## 2. ČELIČNI LIJEV (ČL)

### 2.1. OPĆENITO O ČELIČNOM LIJEVU

Čeličnim ljevom naziva se Fe-C legura s manje od 2% ugljika. Čelični ljev je zapravo lijevani čelik koji se podvrgava samo obradi odvajanjem čestica. U današnje vrijeme čelični ljev pročišćava se u elektrolučnim ili indukcijskim pećima.

Kako bi se dobila mikrostruktura slična čeličnoj, ljev se najčešće podvrgava toplinskoj obradi normalizacije pri čemu dolazi do usitnjavanja lijevane mikrostrukture i izjednačavanja veličine zrna. Čelični ljev ima grubu lijevanu Widmannstättenovu feritno-perlitnu mikrostrukturu i daje nisku istezljivost i žilavost.



Slika 3. Normalizacijsko žarenje [4]

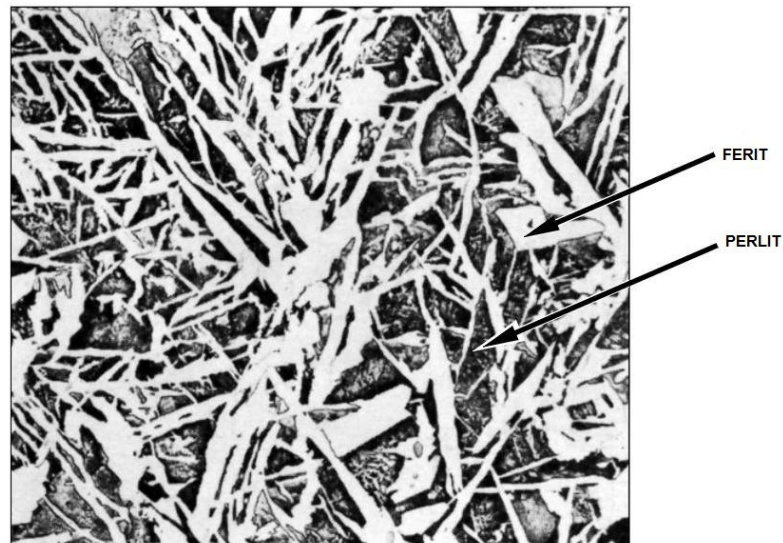
Slika 3. prikazuje postupak normalizacije koja se sastoji od austenitiziranja i hlađenja na mirnom zraku i na taj način uklanja se gruboigličasta Widmannstättenova mikrostruktura i postiže se sitnije feritno-perlitno zrno.

Slika 4. prikazuje Widmannstättenovu mikrostrukturu čeličnog lijeva koja se sastoji od ferita i perlita. Ferit je bijele boje, a perlit crne boje.

Vrlo je važno da li je čelični odljevak namijenjen konačnoj upotrebi bez daljnjeg oblikovanja deformiranjem ili je namijenjen daljnjem oblikovanju deformiranjem. Ako je čelični odljevak namijenjen konačnoj upotrebi bez oblikovanja deformiranjem, na primjer za dijelove strojeva, on će sadržavati najviše 0.5% ugljika. Ako je čelični odljevak napravljen na takav način da će biti namijenjen daljnjem

oblikovanju deformiranjem, što znači da je odliven u željezni kalup u obliku ingota, koji će se valjanjem ili kovanjem preoblikovati u šipke i profile, on treba sadržavati onoliko ugljika koliko ga se želi u proizvedenom čeličnom poluproizvodu .

Prije pedesetak godina smatralo se da kod nelegiranog čeličnog lijeva vlačna čvrstoća nije smjela prijeći  $550 \text{ N/mm}^2$ , dok se danas smatra da se nelegirani odljevci toplinskom obradom poboljšavanja smiju dovesti i na razinu čvrstoće od  $1200 \text{ N/mm}^2$ , a pritom žilavost ne postaje nedopušteno niska.



*Slika 4. Widmannstättenova mikrostruktura čeličnog lijeva [4]*

Tablica 2. prikazuje vrste nelegiranog i niskolegiranog čeličnog lijeva koji se klasificira na temelju vrijednosti vlačne čvrstoće i ostalih mehaničkih svojstava, dok kemijski sastav nije zajamčen. [1]

Tablica 2. Zajamčena svojstva nelegiranih i niskolegiranih vrsta čeličnog lijeva

OZNAKA LIJEVA PREMA		R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.2</sub> N/mm <sup>2</sup>	A Min,%	Z Min,%	KU Min,J	R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub>	% C	Krit.deblj. stijenke,mm
EN	stara HRN								
GS185N	ČL0300	370	185	25	35	-	0.5	<0.25	13.5
GS185KRN	ČL0301					35			
GS225N	ČL0400	440	225	22	30	-	0.5	~0.25	18.5
GS225JRN	ČL0401					28			
GS255N	ČL0500	510	255	18	25	-	0.5	~0.30	27
GS225JRN	ČL0501					21			
GS295N	ČL0600	590	295	15	-	-	0.5	~0.40	39
GS295JRN	ČL0601					14			
GS345J0N	ČL0602	610	345	15	-	-	0.55	~0.40	
GS345J2N	ČL0603					14			
GS410N	ČL0700	690	410	12	-	-	0.6	~0.50	

## 2.2. SVOJSTVA ČELIČNIH LIJEVOVA

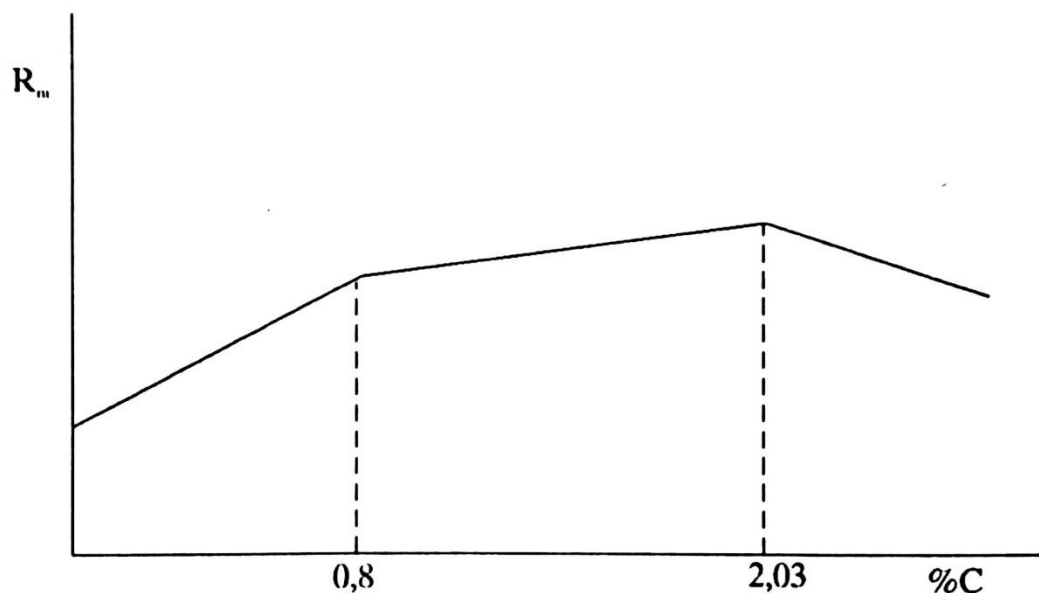
### 2.2.1. MEHANIČKA SVOJSTVA

Od mehaničkih svojstava čeličnih ljevova promatra se:

- modul elastičnosti,
- vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) i konvencionalna granica razvlačenja ( $R_{p0.2}$ )
- vremenska čvrstoća,
- dinamička izdržljivost,
- žilavost.

Modul elastičnosti čeličnih ljevova ne ovisi o njihovu sastavu i pri temperaturi od 20 °C iznosi oko 210 000 N/mm<sup>2</sup>. Porastom temperature modul elastičnosti smanjuje se linearno i iznosi kod 500 °C oko 165 000 N/mm<sup>2</sup>.

Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) i konvencionalna granica razvlačenja ( $R_{p0.2}$ ) dostižu svoje optimalne vrijednosti tek nakon odgovarajuće toplinske obrade. Velika odstupanja od propisanih vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja treba pripisati nejednoličnoj veličini kristalnih zrna, nejednoličnoj orijentaciji zrna te nastajanju Widmannstättenove strukture. Na mehanička svojstva najviše utječe sadržaj ugljika, što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz promjene vlačne čvrstoće s porastom % C u Fe-Fe<sub>3</sub>C legurama[3]

Vremenska čvrstoća do izražaja dolazi za vrijeme dugotrajnog vlačnog naprezanja pri povišenim temperaturama. Prije loma uslijed dugotrajnog naprezanja

nastupa tzv. puzanje, odnosno trajna deformacija razvlačenja. Prema istraživanjima čelični ljev će se povoljnije ponašati pri povišenim temperaturama nego kod čelika jednakog sastava zahvaljujući upravo grubljem i neorijentiranom kristalnom zrnu.

Dinamička izdržljivost odgovarajućeg čelika povoljnija je nego dinamička izdržljivost čeličnog lijeva.

Žilavost čeličnih ljevova snižava se s porastom udjela ugljika što je glavni razlog ograničenja udjela ugljika u odljevcima.

Padom temperature snižava se žilavost čeličnih odljevaka i zato čelične odljevke s BCC-rešetkom ne treba primjenjivati pri temperaturama nižim od oko -20 °C. Nasuprot tome, čeličnim odljevcima s FCC-rešetkom (npr. austenitnim čeličnim ljevovima ČL4571 i ČL4572 iz tablice 3.) ne ograničava se uporaba pri temperaturama ispod 20°C.

Tablica 3. prikazuje izbor iz privremenih domaćih normi za legirane čelične ljeveve. Uporabu čeličnih ljevova treba svesti samo na najnužniju mjeru, odnosno samo na slučajeve kada nelegirani čelični ljev nikako nemože zadovoljiti zahtjevima. Legirani čelični ljev će potpuno zadovoljiti zahtjevima tek kad je bio potpuno pravilno metalurški obrađen, potpuno pravilno lijevan, prikladno toplinski obrađen, te vrlo brižljivo kontroliran zbog visoke vjerojatnosti pogrešaka pri provođenju osjetljivih proizvodnih operacija. [3]

Tablica 3. Izbor iz privremenih domaćih normi za legirane čelične ljeveve

oznaka prema DIN 17006 (VdEH – oznaka)	oznaka čeličnog lijeva prema HRN	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ , N/mm <sup>2</sup> Min	$A_5$ , % Min	namjena
GS-42 CrMo4	ČL4732 ČL3134	880 780	665 390	9 7	za poboljšanje, za poboljšanje otporan na trošenje
GS-15 CrMo 5	ČL7431	530	450	20	za rad pri povišenim temperaturama
G-X 10 CrNi 18	ČL4571	440	175	20	korozijski
G-X 5 CrNiNb 18 9	ČL4572	440	175	20	postojani
G-X 20 Cr 14	ČL4171	590	440	12	
G-X 35 CrNiSi 25 12	ČL4577	440	-	10	vatrootporni
G-X 120 Mn 12	ČL3160	830	390	42	gašen- otporan na trošenje

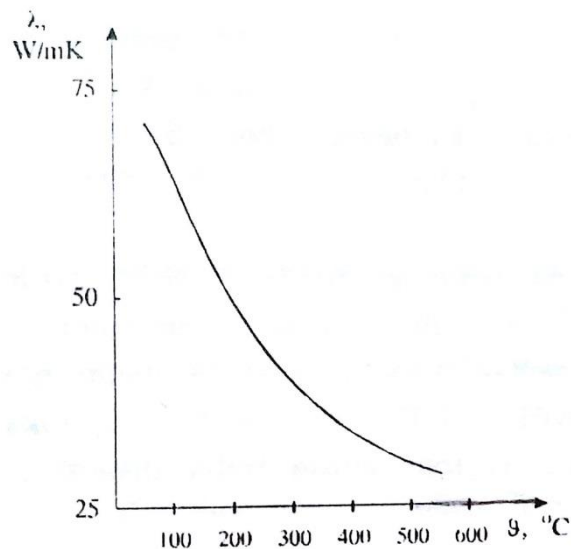
## 2.2.2.FIZIKALNA SVOJSTVA

Od fizikalnih svojstava čeličnih ljevova promatra se:

- gustoća,
- toplinska vodljivost,
- otpornost na trošenje.

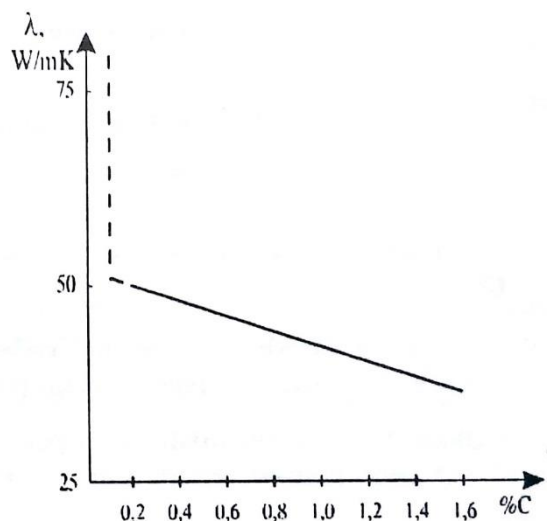
Nelegirani čelični ljev ima gustoću od oko  $7850 \text{ kg/mm}^3$ , dok gustoća legiranih čeličnih ljevova ovisi o vrsti i udjelu legirajućih dodataka.

Toplinska vodljivost nelegiranih čeličnih ljevova ovisi o temperaturi i udjelu ugljika, što je prikazano na slikama 6. i 7.



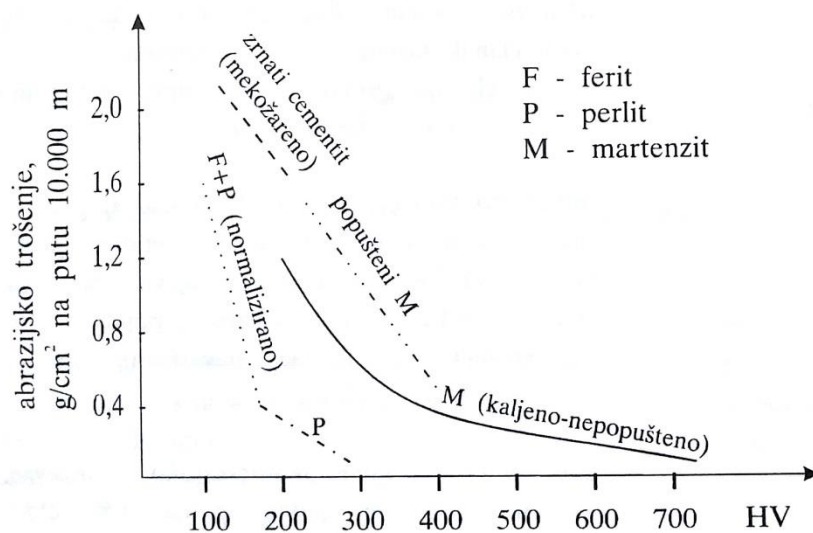
Slika 6. Toplinska vodljivost niskougličnog nelegiranog čeličnog lijeva [3]

Fizikalna svojstva kao što su električna vodljivost, toplinsko rastezanje, specifični toplinski kapacitet, kemijska svojstva kao što su postojanost na elektrokemijsku i kemijsku koroziju, usporediva su s odgovarajućim svojstvima čelika.



Slika 7. Toplinska vodljivost nelegiranih čeličnih ljevova pri 20 °C ovisno o sadržaju ugljika [3]

Glavni oblici trošenja su abrazijsko, adhezijsko, kombinirano adhezijsko-abrazijsko, kotrljajuće, erozijsko i kavitacijsko trošenje. Otpornost na trošenje ovisi o visini tvrdoće i moglo bi se ocijeniti pravilnim samo ako se radi o trošenju abrazijom, ali s obzirom da istodobno djeluje nekoliko mehanizama trošenja, može se utvrditi da će tvrdoća biti samo nužan, ali nikako i dovoljan uvjet otpornosti na trošenje, što je prikazano slikom 8.



Slika 8. Ovisnost svojstava na abrazijsko trošenje o tvrdoći čeličnih ljevova[3]

## 2.3. PRIMJERI PRIMJENE ČELIČNIH LJEVOVA

" Upotrijebiti ga samo tamo, gdje se ne bi zadovoljila svojstva sivog ili nodularnog lijeva, te gdje bi oblikovanje nekim drugim postupkom bilo neekonomično ili čak nemoguće", opće je načelo kojim se treba nositi u primjeni čeličnog lijeva. [3]

Nekoliko tipičnih primjena čeličnih ljevova su:

- dijelovi preša,
- kućišta diferencijala kamiona i autobusa,
- rotor toplinskih strojeva
- veliki zupčanici s grubo odlivenim zubima,
- bubnjevi automobilskih kočnica,
- dijelovi lokomotiva, vagona i tramvaja. [3]



Slika 9. Čelični lijev nakon 12 sati toplinske obrade[5]





*Slika 10. Čelični lijev za strojogradnju [5]*

Slika 9. prikazuje čelični lijev nakon 12 sati toplinske obrade na temperaturi od 1200 °C, dok slika 10. prikazuje dio kotača lokomotive koji je izrađen iz čeličnog lijeva.

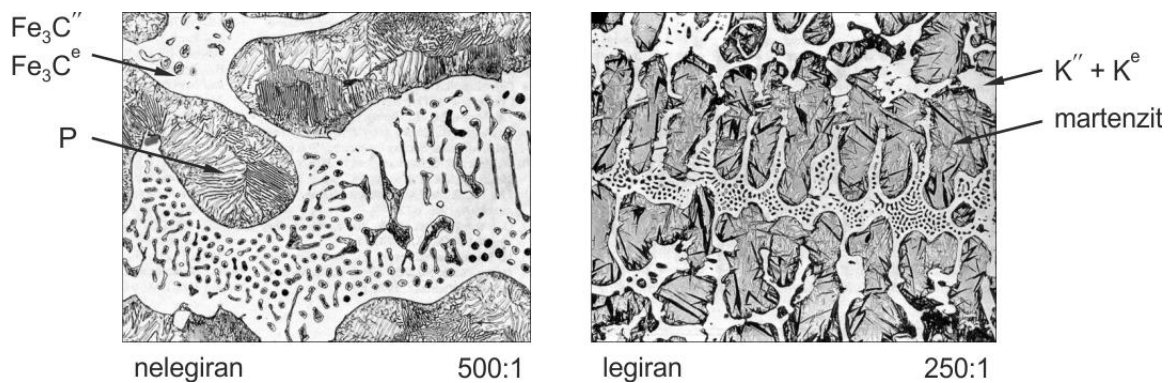
### 3. BIJELI TVRDI LIJEV (BTL)

Bijeli tvrdi lijev dobiven je forsiranjem metastabilne kristalizacije u metalnoj kokili ili u mokrom pješčanom kalupu. Kemijski sastav taljevine prikazan je u tablici 4.

Tablica 4. Kemijski sastav bijelog tvrdog lijeva

KEMIJSKI ELEMENT	POSTOTAK %
ugljik	2,5...3,5
silicij	<0,6
<b>mangan</b>	<b>3,0...4,0</b>
fosfor	<0,9
sumpor	<0,25

Iz tablice 4. može se zaključiti kako bijeli tvrdi lijev ima povišeni udio mangana koji kao cementator pospješuje stvaranje karbida, sprječava stvaranje grafita, a ograničen je maseni udio silicija kao grafitizatora.



Slika 11. Mikrostruktura bijelog tvrdog lijeva [1]

Slika 11. prikazuje mikrostrukturu bijelog tvrdog lijeva, pa po presjeku razlikujemo potpuno metastabilno kristaliziranu mikrostrukturu po cijelom presjeku  $P+Fe_3C'' + Fe_3C^e$  i mješovito kristaliziranu mikrostrukturu kod koje su samo površinski slojevi do određene dubine metastabilno kristalizirali, dok je sredina stabilno ili mješovito kristalizirala.[1]

Svojstva bijelog tvrdog lijeva su:

- tvrdoća viša od 400 HV,
- visoka otpornost na abrazijsko trošenje zahvaljujući prisutnosti  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,
- slaba duktilnost,
- neobradljivost odvajanjem čestica.

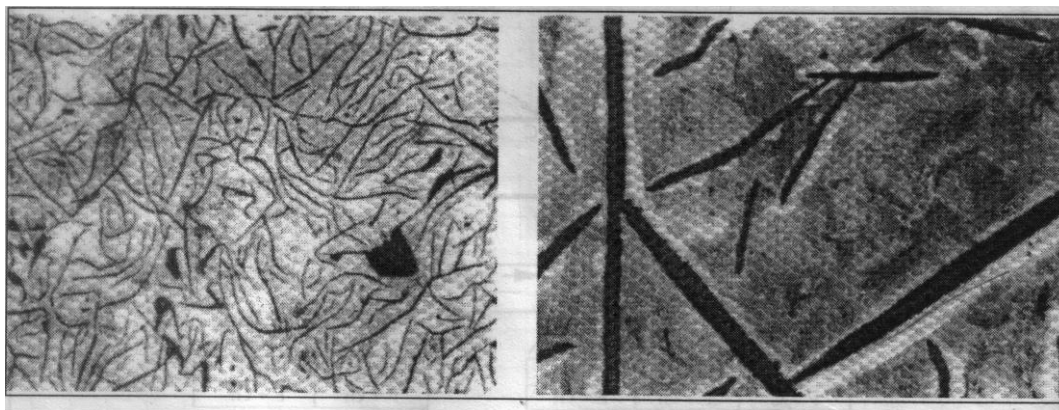
Bijeli tvrdi lijev ima i nekoliko posebnih vrsta kao što su perlitni tvrdi lijev, tvrdi lijev za valjke i krom-karbidni tvrdi lijev.

Primjena bijelog tvrdog lijeva:

- valjci u metalnoj, papirnoj ili pekarskoj industriji,
- kotači i papuče kočnica tračnih vozila,
- dijelovi drobilica za kamen, ugljen,
- žigovi i alati za izvlačenje žice,
- oklopi bubnjeva u industriji cementa.

## 4. SIVI LIJEV (SL)

Sivi lijev je legura željeza i ugljika s dodatkom silicija, mangana i fosfora.[1] Veći dio ugljika izdvaja se u obliku listića (lamela) grafita, prikazano na slici 12.



Slika 12. Mikrostruktura sivog lijeva [6]

Tablica 5. Kemijski sastav sivog lijeva

KEMIJSKI ELEMENT	POSTOTAK %
ugljik	2,5...4,5
mangan	0,3...1,2
<b>silicij</b>	<b>1...4</b>
fosfor	0,4...1,5
sumpor	< 0,1

Kemijski sastav sivog lijeva prikazan je u tablici 5. Sivi lijev prethodno navedenog sastava nije legiran, a Si, Mn, P i S smatraju se primjesama.

Svojstva sivog lijeva su:

- tehnološka svojstva,
- mehanička svojstva.

Karakteristična tehnološka svojstva su: mogu se ljevati odljevci svih masivnosti, jednostavnija i jeftinija proizvodnja od drugih odljevaka, dobra rezljivost i slaba zavarljivost radi male istežljivosti i visokog postotka ugljika.

Mehanička svojstva sivog lijeva su relativno niska vlačna čvrstoća, visoka tlačna čvrstoća i slaba žilavost.



Primjena sivog lijeva:

- postolja alatnih strojeva,
- kućišta motora i reduktora,
- košuljice cilindara,
- klizni ležajevi,
- radijatorski članci,
- kalupi za staklo.



*Slika 13. Primjena sivog lijeva[6]*

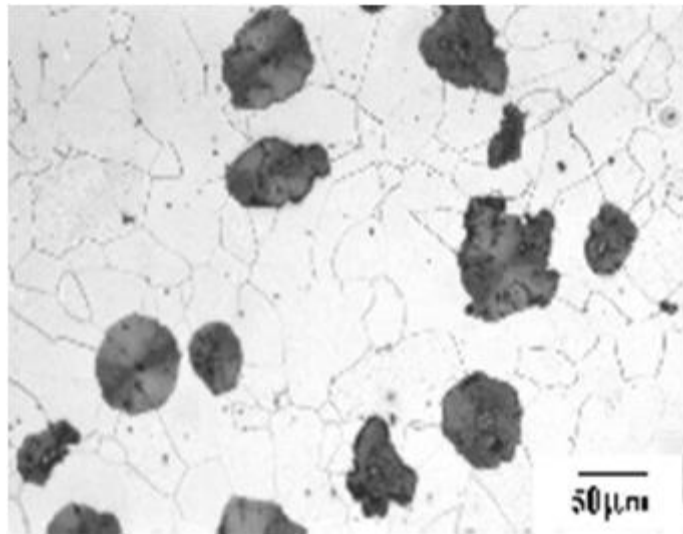
Slika 13. prikazuje proizvode od sivog lijeva kao što su ploče od klavira, tava, reljef i stara peć.

## 5. NODULARNI (ŽILAVI) LIJEV

Većina normi prihvatila je definiciju:

*"Nodularni lijev je lijevačka pseudobinarna legura željeza i ugljika, koji se pretežnim dijelom izlučio u obliku kuglastoga grafita." [3]*

Nodularni lijev je vrsta lijevanog željeza s kuglastim grafitom, prikazano na slici 14.



Slika 14. Mikrostruktura nodularnog lijeva [7]

Mikrostruktura željezne osnove je potpuno feritna, feritno – perlitna, perlitna i austenitna.

Kemijski sastav nodularnog lijeva prikazan je u tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastav nodularnog lijeva

KEMIJSKI ELEMENT	POSTOTAK %
ugljik	3,2...3,8
silicij	2,4...2,8
mangan	< 0,5
fosfor	< 0,045
sumpor	< 0,01

Svojstav nodularnog lijeva:

- visoka dinamička izdržljivost,
- visoki modul elastičnosti,
- dobra obradivost odvajanjem čestica,
- može se zavarivati,
- dobra ležišna svojstva.

Primjena nodularnog lijeva:

- koljenaste i bregaste osovine motora,
- košuljice cilindara motora i kompresora,
- stapajice,
- zupčanici,
- poklopci kliznih ležaja,
- rotori pumpa.

## 6. TEMPER (KOVKASTI) LIJEV

Kovkasti lijev ili temper lijev je vrsta lijevanog željeza, a to je takva legura željeza i ugljika koja u sirovom odljevenom obliku ima bijeli prijelom.

Ovisno o atmosferi u kojoj se provodi žarenje dobiva se:

- crni temper lijev,
- bijeli temper lijev.

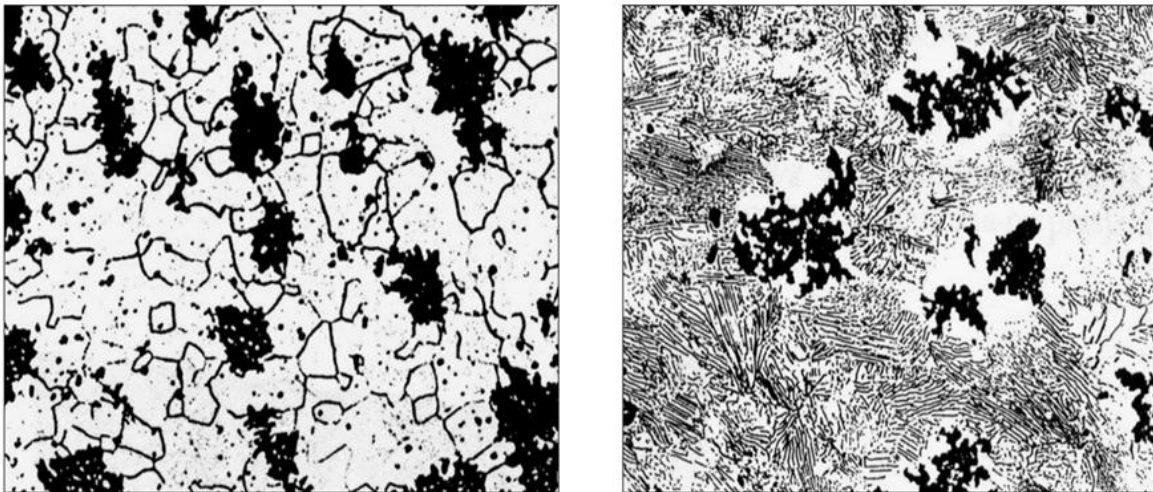
Tablica 7. prikazuje kemijski sastav crnog i bijelog temper lijeva.

Sirovina za bijeli temper lijev je jeftinija nego za crni.

Tablica 7. Kemijski sastav crnog i bijelog temper lijeva

VRSTA LIJEVA	POSTOTAK %				
	UGLJIK	SILICIJ	MANGAN	FOFOR	SUMPOR
Crni temper lijev	2,8...3,4	0,5...0,8	0,2...0,4	< 0,1	0,1...0,29
Bijeli temper lijev	2,0...2,8	1,4...1,8	0,2...0,5	< 0,1	< 0,15

Slika 15. prikazuje mikrostrukturu crnog temper lijeva, koja nam govori da ova vrsta lijeva ima višu čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje.

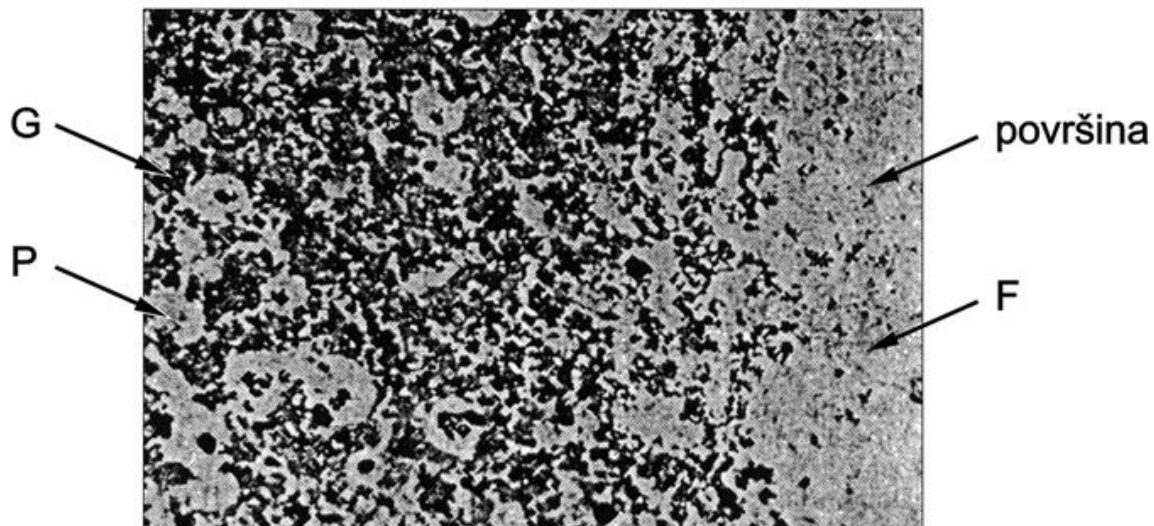


Slika 15. Mikrostruktura crnog temper lijeva [1]

Crni temper lijev primjenjuje se za odljevke kompliciranih oblika, kao što su bubnjevi kočnica vozila, vilica i držači vilica vozila, tiskarski strojevi, dijelovi vaga, ventili u brodogradnji.



Kod bijelog temper lijeva mikrostruktura nije ujednačena po presjeku, pa mehanička svojstva ovise o debljini stijenke, posebno kod debljih odljevaka. Na slici 16. prikazana je mikrostruktura bijelog temper lijeva kod kojeg nije ujednačena mikrostruktura.



Slika 16. Mikrostruktura bijelog temper lijeva [1]

## 7. POSTAVKA ZADATKA

Nakon teorijskog dijela u kojem su opisana osnovna svojstva željeznih ljevova, u eksperimentalnom dijelu detaljnije je opisan nodularni lijev nakon čega se provodi ispitivanje mehaničkih svojstava nodularnog lijeva NL 700.

Napravit će se ispitivanje vlačne čvrstoće i ispitivanje udarnog rada loma, te će se dobiveni rezultati usporediti sa očekivanim. Ispitivanje će se vršiti na epruvetama iz nodularnog lijeva NL 700 koje su izrađene od prethodno odlivenih Y-proba. Ispitivanja će se vršiti u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu.

## 8. EKSPERIMENTALNI DIO

### 8.1. SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA

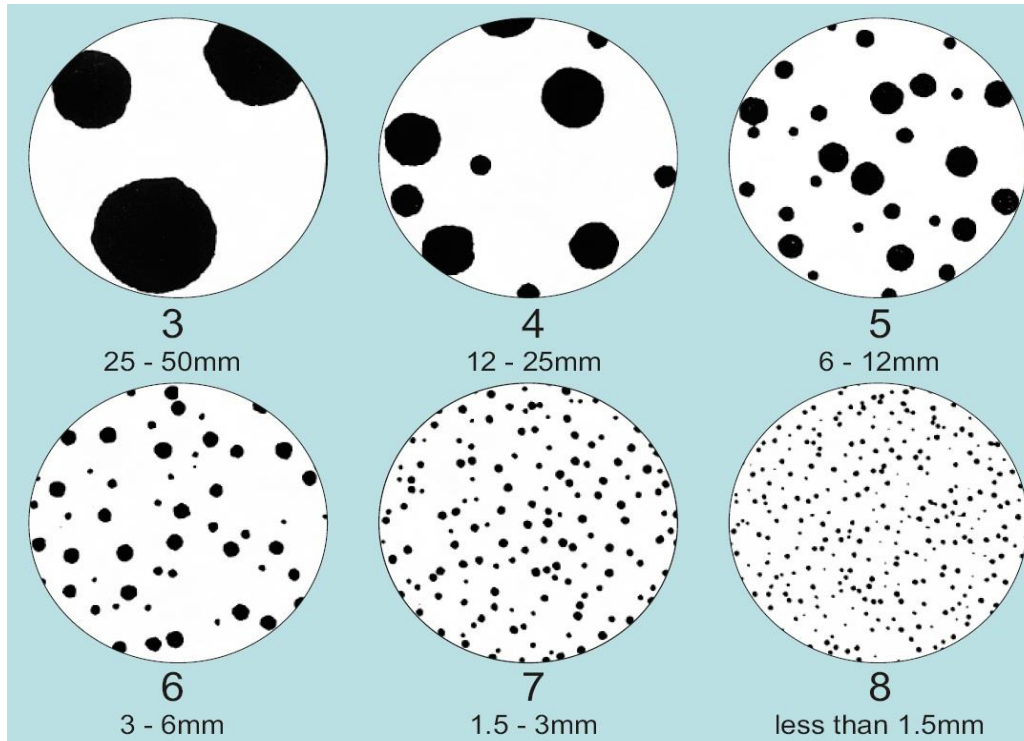
Svojstva nodularnog lijeva nalaze se između svojstava čeličnog i sivog lijeva, s time da se nodularni lijev može oblikovati toplo i hladno. Uvjeti za postizanje kvalitetnog nodularnog lijeva su:

- odsutnost Ti, Al, Pb, Sb, Sn,As;
- niski % S;
- niski % Si;
- niski % Mn;
- niski % P.

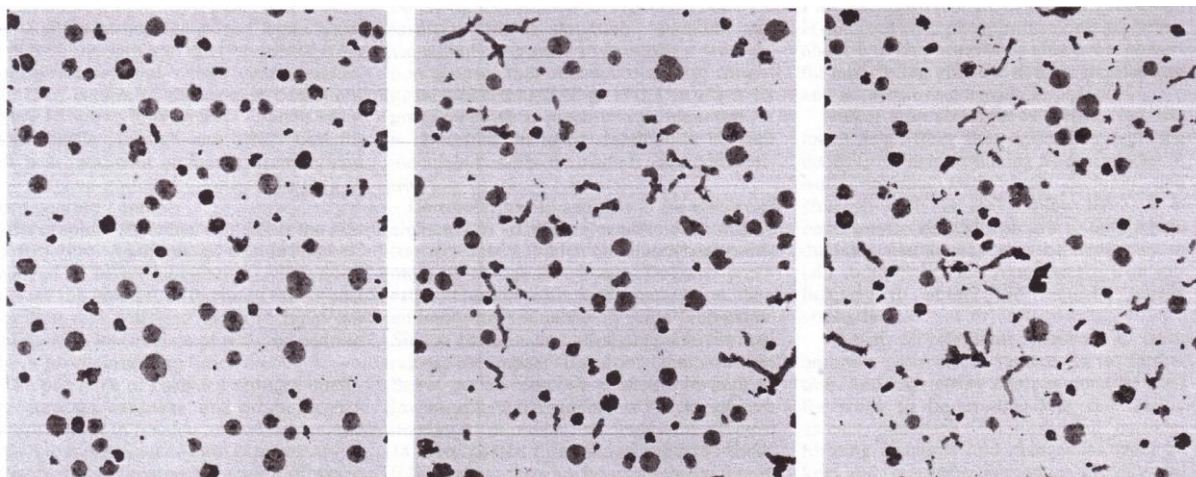
Prema strukturi nodularne lijevove dijelimo na:

- feritni;
- feritno-perlitni odnosno perlitno-feritni;
- perlitni;
- austenitni.

Slika 17. prikazuje pojedine veličine grafitnih nodula.

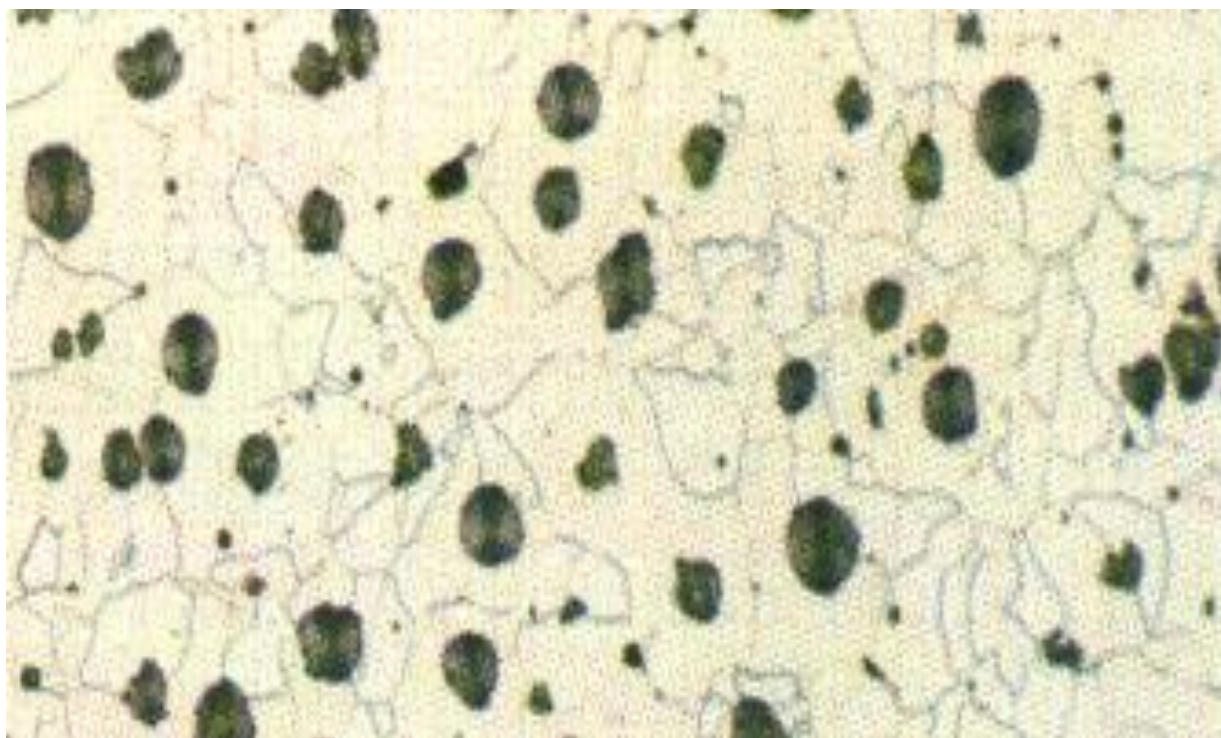


Slika 17. Normirane veličine grafitnih nodula u nodularnom lijevu [8]



*Slika 18. Mikrostruktura nodularnog lijeva [7]*

Ako nam je potrebna maksimalna moguća žilavost, teži se feritnoj matrici odljevaka od nodularnog lijeva. Mikrostruktura nodularnog lijeva s različitom nodularnošću prikazana je na slici 18., mikrostruktura feritnog nodularnog lijeva prikazana je slikom 19.



*Slika 19. Mikrostruktura feritnog nodularnog lijeva [7]*

Mikrostruktura perlitnog nodularnog lijeva prikazana je na slici 20.





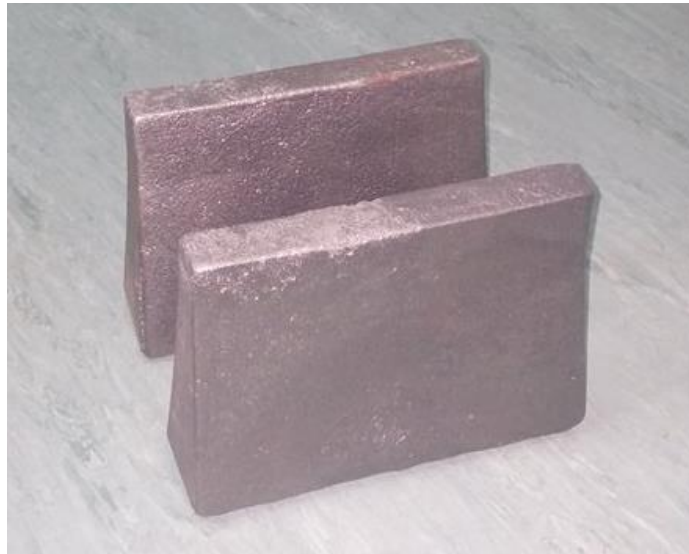
*Slika 20. Mikrostruktura perlitnog nodularnog lijeva [7]*

Pretežno perlitna struktura postiže se sadržajem ugljika i silicija. Ako se zahtjeva potpuno perlitna struktura, to se može postići toplinskom obradom ili legiranjem. Mangan je prikladan za stabilizaciju perlita, pa je npr. za potpuno perlitnu strukturu potreban je sadržaj oko 1,5% Mn. [3]

Ako se legira kromom ili niklom može se postići austenitna struktura nodularnog lijeva. Najveći broj austenitnih lijevova sadrži krom, pa te kvalitete nodularnog lijeva obično sadrže malo karbida. Kako je osnovna metalna masa austenitna, ovi se materijali razmjerno lako strojno obrađuju. [3]

## 8.2. ISPITNI UZORAK

Ispitivanje se vršilo na epruvetama od nodularnog lijeva NL 700 koja je prikazana na slici 2.2., dok slika 21. prikazuje Y-probu od koju su se prethodno navedene epruvete radile.

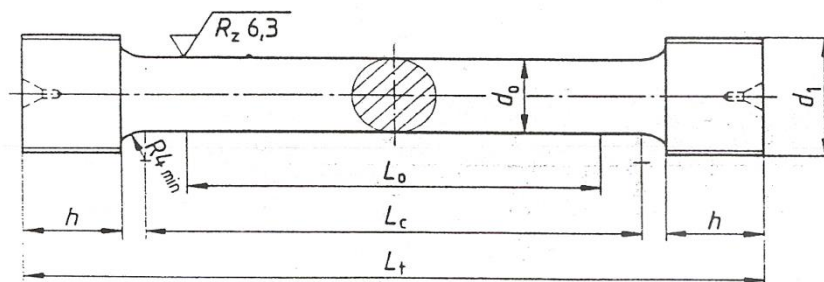


*Slika 21. Y-proba*



*Slika 22. Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće*

Epruvete prikazane slikom 22. napravljene su prema standardu DIN 50 125 koji je namijenjen za izradu okruglih epruveta s navojnim glavama (slika 23).



Slika 23. Okrugle epruvete s navojnim glavama [8]

- $d_0$  - Promjer epruvete, mm
- $d_1$  – Metrički navoj - ISO
- $h$  – Visina glave epruvete, mm
- $L_0$  – Početna mjerna duljina epruvete ( $L_0 = 5 d_0$ ), mm
- $L_c$  – Ispitna duljina epruvete ( $L_c \geq L_0 + d_0$ ), mm
- $L_t$  – Ukupna duljina epruvete, mm

Iz tablice 8. za standardne dimenzije vlačne epruvete oblika B s promjerom epruvete  $d_0 = 14$  mm i početnom mjernom duljinom epruvete  $L_0 = 70$  mm mogu se očitati i podaci kao što su:

- metrički navoj  $d_1$  je M20;
- visina glave epruvete  $h$  iznosi minimalno 17 mm;
- ispitna duljina epruvete  $L_c$  iznosi najmanje 84 mm;
- ukupna duljina epruvete  $L_t$  iznosi najmanje 125 mm.

Tablica 8. Standardne dimenzije vlačne epruvete

$d_0$	$L_0$	$d_1$	$h$ min.	$L_c$ min.	$L_t$ min.
4	20	M6	6	24	40
5	25	M8	7	30	50
6	30	M10	8	36	60
8	40	M12	10	48	75
10	50	M16	12	60	90
12	60	M18	15	72	110
14	70	M20	17	84	125
16	80	M24	20	96	145
18	90	M27	22	108	160
20	100	M30	24	120	175
25	125	M33	30	150	220

### 8.3. STATIČKI VLAČNI POKUS

Statički vlačni pokus odrađen je u Laboratoriju za materijale i toplinsku obradu Veleučilišta u Karlovcu. Statički vlačni pokus izvodi se na kidalici (slika 24.). Mjerno područje je do 600 kN. Statičkim vlačnim ispitivanjem na kidalici mogu se dobiti rezultati ispitivanja kao što su vlačna čvrstoća ( $R_m$ ), granica razvlačenja materijala ( $R_e$ ), istežljivost (A), kontrakcija (Z). Ispitivanje se provodilo na 5 epruveta.



Slika 24. Kidalica Otto Wolpert Werke



Kidalica se sastoji od gornje i donje čeljusti kako je prikazano na slici 25., pa je prije samog ispitivanja potrebno krajeve epruvete na mjestima navojne glave učvrstiti prvo za gornju, a onda za donju čeljust kidalice.



*Slika 25. Gornja i donja čeljust kidalice*

Nakon što je epruveta dobro učvršćena na krajevima (slika 26.), 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.



*Slika 26. Učvršćena probna epruveta*

Djelovanjem naprezanja (u ovom slučaju na vlak) 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 27. Epruveta nakon opterećenja*

Za vrijeme ispitivanja očitavaju se sile  $F_e$  i  $F_m$  i mjeri se produljenje epruvete nakon loma, te se na temelju tih parametara crtaju dijagrami sila – produljenje, koji se

nazivaju i dijagramima kidanja. Na temelju očitanih parametara koriste se slijedeće formule:

- $S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4}$ , početni poprečni presjek;
- $\Delta l = l_{uk} - l_0$ , apsolutno produljenje;
- $R_e = \frac{F_e}{S_0}$ , granica razvlačenja;
- $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ , vlačna čvrstoća;
- $A = \frac{l_{uk} - l_0}{l_0} \cdot 100\%$ , istežanje.



*Slika 28. Polomljene epruvete*

Slika 28. prikazuje epruvete nakon loma.

### 8.3.1. REZULTATI ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE

Za **prvu** epruvetu su očitani i izmjereni slijedeći rezultati:

$$F_e = 96\,000 \text{ N}$$

$$F_m = 112\,500 \text{ N}$$

$$l_{uk} = 74 \text{ mm}$$

Pomoću prethodno očitanih rezultata izračunati su ostali parametri, te je nacrtan dijagram  $F/\Delta l$ :

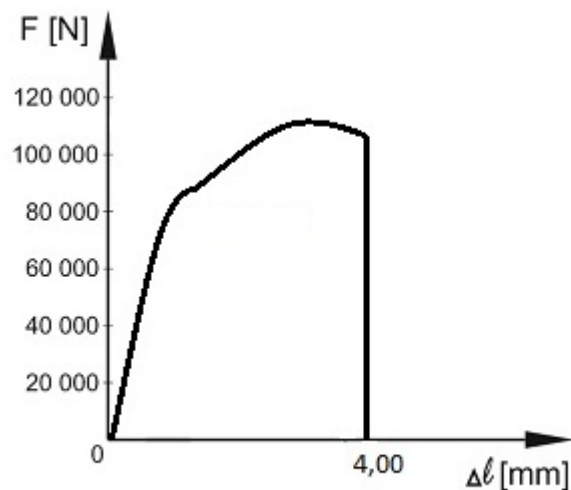
$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{14^2 \pi}{4} = 153,86 \text{ mm}^2$$

$$\Delta l = 74 - 70 = 4 \text{ mm}$$

$$R_e = \frac{96000}{153,86} = 623 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = \frac{112500}{153,86} = 731 \text{ N/mm}^2$$

$$A = \frac{74 - 70}{70} \cdot 100\% = 5,7 \%$$



Slika 29. Dijagram kidanja za epruvetu 1

Za **drugu** epruvetu su očitani i izmjereni slijedeći rezultati:

$$F_e = 69\,000 \text{ N}$$

$$F_m = 83\,000 \text{ N}$$

$$l_{uk} = 71,4 \text{ mm}$$

Pomoću prethodno očitanih rezultata izračunati su ostali parametri, te je nacrtan dijagram  $F/\Delta l$ :

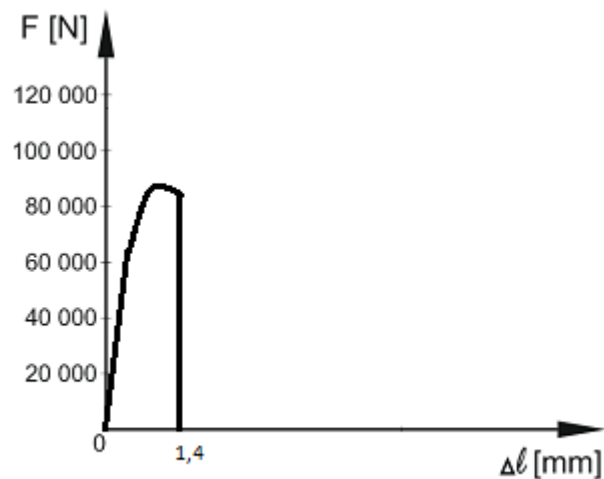
$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{14^2 \pi}{4} = 153,86 \text{ mm}^2$$

$$\Delta l = 71,4 - 70 = 1,4 \text{ mm}$$

$$R_e = \frac{69000}{153,86} = 448 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = \frac{83000}{153,86} = 539 \text{ N/mm}^2$$

$$A = \frac{71,4 - 70}{70} \cdot 100\% = 2 \%$$



Slika 30. Dijagram kidanja za epruvetu 2

Za **treću** epruvetu su očitani i izmjereni slijedeći rezultati:

$$F_e = 69\,000 \text{ N}$$

$$F_m = 101\,500 \text{ N}$$

$$l_{uk} = 73 \text{ mm}$$

Pomoću prethodno očitanih rezultata izračunati su ostali parametri, te je nacrtan dijagram  $F/\Delta l$ :

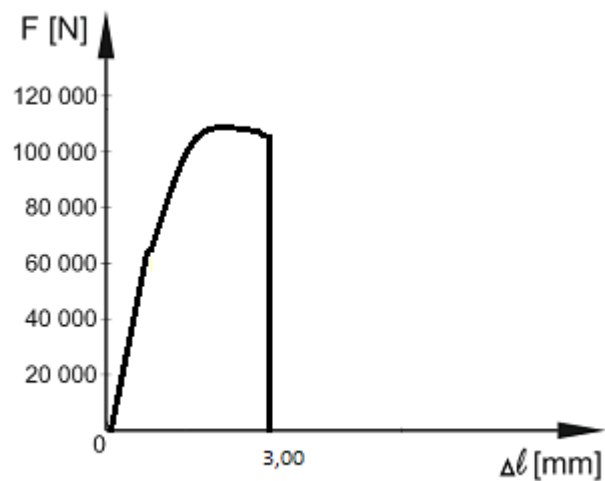
$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{14^2 \pi}{4} = 153,86 \text{ mm}^2$$

$$\Delta l = 73 - 70 = 3 \text{ mm}$$

$$R_e = \frac{69000}{153,86} = 448 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = \frac{101500}{153,86} = 659 \text{ N/mm}^2$$

$$A = \frac{73 - 70}{70} \cdot 100\% = 4,2 \%$$



Slika 31. Dijagram kidanja za epruvetu 3

Za **četrstu** epruvetu su očitani i izmjereni slijedeći rezultati:

$$F_e = 85\,000 \text{ N}$$

$$F_m = 113\,000 \text{ N}$$

$$l_{uk} = 74,5 \text{ mm}$$

Pomoću prethodno očitanih rezultata izračunati su ostali parametri, te je nacrtan dijagram  $F/\Delta l$ :

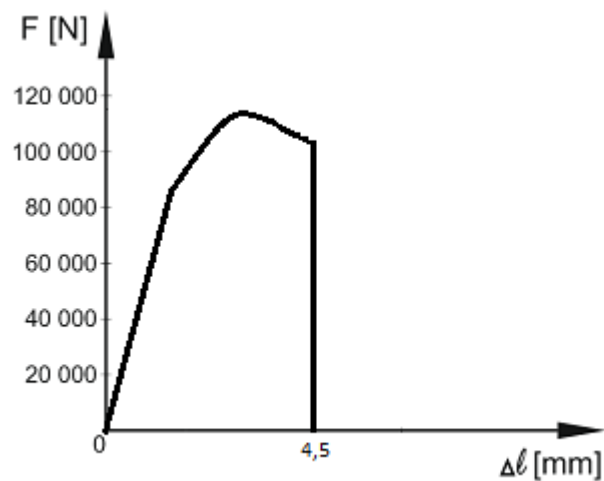
$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{14^2 \pi}{4} = 153,86 \text{ mm}^2$$

$$\Delta l = 74,5 - 70 = 4,5 \text{ mm}$$

$$R_e = \frac{85000}{153,86} = 552 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = \frac{113000}{153,86} = 734 \text{ N/mm}^2$$

$$A = \frac{73 - 70}{70} \cdot 100\% = 6,4 \%$$



Slika 32. Dijagram kidanja za epruvetu 4



Za **petu** epruvetu su očitani i izmjereni slijedeći rezultati:

$$F_e = 69\,000 \text{ N}$$

$$F_m = 107\,500 \text{ N}$$

$$l_{uk} = 73 \text{ mm}$$

Pomoću prethodno očitanih rezultata izračunati su ostali parametri, te je nacrtan dijagram  $F/\Delta l$ :

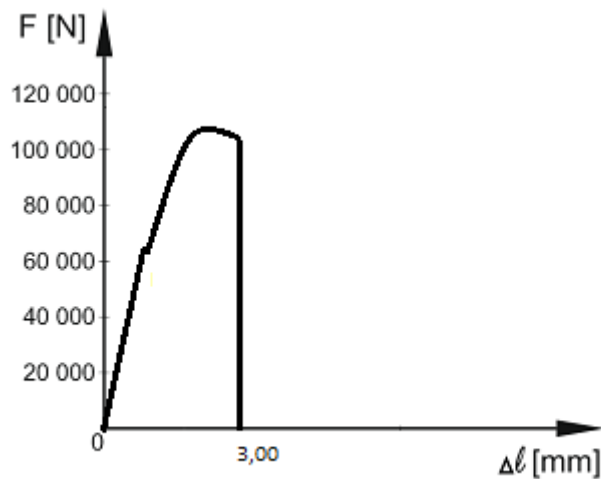
$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = \frac{14^2 \pi}{4} = 153,86 \text{ mm}^2$$

$$\Delta l = 73 - 70 = 3 \text{ mm}$$

$$R_e = \frac{69000}{153,86} = 448 \text{ N/mm}^2$$

$$R_m = \frac{10500}{153,86} = 668 \text{ N/mm}^2$$

$$A = \frac{73 - 70}{70} \cdot 100\% = 4,2 \%$$



Slika 33. Dijagram kidanja za epruvetu 5

U tablici 9. prikazani su zahtjevani parametri za epruvete od nodularnog lijeva NL 700-2 i utvrđeni rezultatima ispitivanja za epruvete od norudlarnog lijeva NL 700-2.

Tablica 9. Utvrđeni parametri za epruvete od nodularnog lijeva NL 700-2 i rezultati ispitivanja

EPRUVETA	ZAHTJEVANO	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5
<b>PROMJER EPRUVETE, <math>d_0</math> (mm)</b>	-	Ø14	Ø14	Ø14	Ø14	Ø14
<b><math>S_0</math> (mm<sup>2</sup>)</b>	-	153,86	153,86	153,86	153,86	153,86
<b>SILA TEČENJA, <math>F_e</math> (N)</b>	-	96 000	69 000	69 000	85 000	69 000
<b>MAKSIMALNA SILA, <math>F_m</math>(N)</b>	-	112 500	83 000	101 500	113 000	107 500
<b>GRANICA RAZVLAČENJA, <math>R_e</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	420 min.	623	448	448	552	448
<b>VLAČNA ČVRSTOĆA, <math>R_m</math> (N/mm<sup>2</sup>)</b>	700 min.	731	539	659	734	698
<b><math>L_0</math> (mm)</b>	-	70	70	70	70	70
<b><math>L_1</math> (mm)</b>	-	74	71,4	73	74,5	73
<b><math>\Delta L</math> (mm)</b>	-	4	1,4	3	4,5	3
<b>ISTEZANJE, <math>A_5</math> (%)</b>	2 min.	5,7	2	4,2	6,4	4,2

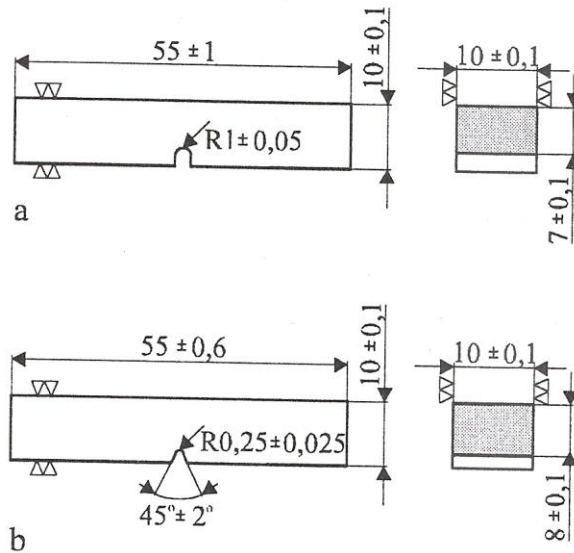
## 8.4. ISPITIVANJE UDARNOG RADA LOMA (ŽILAVOSTI)

Određivanje udarnog rada loma ispitnog uzorka spada među najstarija mehanička ispitivanja materijala i služi za određivanje njegove otpornosti prema krhkome lomu. Rezultati ispitivanja vrlo su uporabljivi za namjenu materijala u eksploatacijskim uvjetima.[1] Ovakva se ispitivanja izvode na ispitnim uzorcima (epruvetama) na Charpyevom uređaju ili bat, prikazano na slici 34.



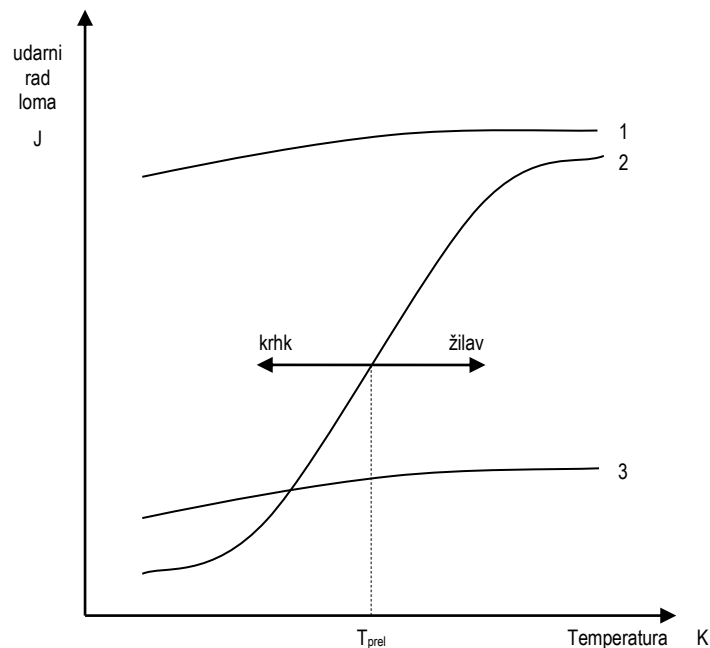
Slika 34. Charpyev bat

Udarni rad loma metalnih materijala određuje se na standardiziranim uzorcima kvadratnog ili pravokutnog poprečnog presjeka s urezanim zarezom "V" ili "U" oblika (slika 35.), a označava se K(U) ili K(V). [8]



Slika 35. Oblik i dimenzija epruvete za ispitivanje udarnog rada loma [9]

Obzirom da kod velikog broja konstrukcijskih čelika ispitna temperatura bitno utječe na udarni rad loma, ispitivanje se često provodi pri sniženim temperaturama. Utjecaj temperature ispitivanja na iznos udarne radnje loma prikazano je slikom 36.

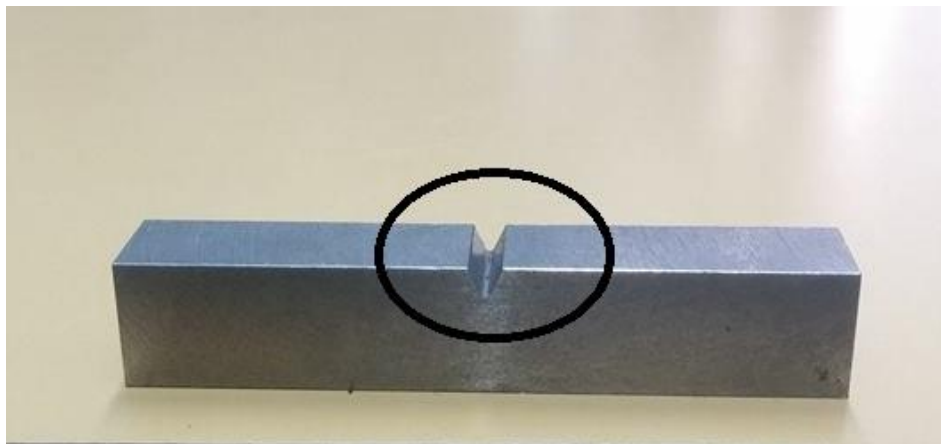


Slika 36. Utjecaj temperature ispitivanja na udarni rad loma za različite materijale [1]

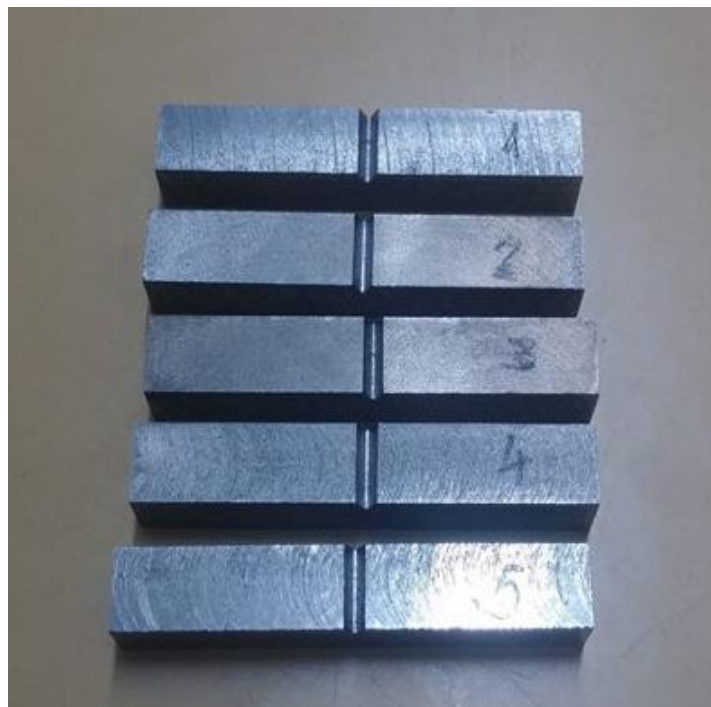
Dijagram prikazan slikom 36., prikazuje različite krivulje temeprature za pojedine materijale. Tako krivulja (1) prikazuje legure metala s FCC rešetkom, krivulja (2) prikazuje legure metala s BCC rešetkom, dok krivulja (3) prikazuje visokočvrste materijale. Također na dijagramu je prikazana i prijelazna temperatura ( $T_{prel}$ ) na kojoj materijal prelazi iz žilavog u krhko stanje.

U ekperimentalnom dijelu rađeno je pet ispitivanja, a proces ispitivanja kao i rezultati biti će prikazani u nastavku.

Slika 37. prikazuje epruvetu s "V" utorom koja je korištena za ispitivanje udarnog rada loma, dok slika 38. prikazuje 5 epruveta napravljenih od NL 700-2 koje su korištene za ispitivanje.



*Slika 37. Eruveta s "V" utorom*



*Slika 38. Epruvete za ispitivanje udarnog rada loma*



*Slika 39. Namještanje epruvete*



*Slika 40. Namještena epruveta*





Slika 41. Charpyev bat prije ispitivanja



Slika 42. Očitanje rezultata



Slika 43. Epruvete nakon pucanja

Slika 39. prikazuje namještanje epruvete, slika 40. prikazuje kako epruveta mora biti namještena prije ispitivanja, slika 41. prikazuje položaj Charpyeva bata prije ispitivanja. Rezultati se očitavaju na skali uređaja prikazano na slici 42.

Slika 43. prikazuje izgled epruvete nakon postupka ispitivanja udarnog rada loma na Charpyevom batu.

### 8.4.1. REZULTATI ISPITIVANJA

Tablica 10. prikazuje rezultate ispitivanja udarnog rada loma. Srednja vrijednost ispitivanih epruveta na udarni rad loma iznosi 5,5 J.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

ZNAČAJKE ISPITIVANJA	Udarni rad loma, KV [J] 20 °C				
	EPRUVETA 1	EPRUVETA 2	EPRUVETA 3	EPRUVETA 4	EPRUVETA 5
ZAHTJEVANO	-	-	-	-	-
UTVRĐENO	5	5	6	6	5,5



## 9. ANALIZA REZULTATA

Prilikom statičkog vlačnog pokusa dijagrami pokazuju ovisnost sile i produljenja. Međusobni omjer sile elastičnosti (tečenja) i površine poprečnog presjeka daje nam granicu razvlačenja, što je granično naprezanje koje dijeli elastično područje od plastičnog. Od te točke epruveta se znatno deformira i počinje teći.

Najmanji iznos granice razvlačenja imale su epruvete 2-2, 3-3 i 5-5 i one su iznosile  $R_e=448 \text{ N/mm}^2$ , što znači da su zadovoljile zahtjevani uvjet granice razvlačenja s obzirom da je kod nodularnog lijeva NL 700-2 ona trebala iznositi minimalno  $420 \text{ N/mm}^2$ , ali s obzirom da svi parametri tijekom ispitivanja moraju biti zadovoljeni smatra se da ove epruvete nisu zadovoljile ispitivanje, jer nisu ispunile minimalni zahtjevani uvjet vlačne čvrstoće.

Prema normi nodularni lijev NL 700-2, ima garantiranu vlačnu čvrstoću od  $R_m=700 \text{ N/mm}^2$  i istežljivost od minimalno 2% može se zaključiti da su te uvjete zadovoljile samo epruvete 1-1 i 4-4, što je i vidljivo iz tablice 9..

Na epruveti 1-1 i 3-3 vidljivo je da su one pukle u samom navoju, a do toga je došlo jer je prilikom strojne obrade došlo do krive obrade navoja, dok je na presjeku epruvete 4-4 koja je prikazana slikom 44. vidljivo da postoji greška u materijalu.



Slika 44. Greška u materijalu

## 10. ZAKLJUČAK

U radu na temu Svojstva željeznih ljevova nakon teorijskog dijela proveden je i eksperimentalni dio u kojemu su se dobiveni rezultati usporedili sa očekivanim. Naglasak je bio na nodularnom lijevu, s obzirom da se za ispitivanje koristio materijal NL 700-2 (EN-GJS-700-2).

Statičnim vlačnim pokusom ispitivanje se vršilo na epruvetama okruglog poprečnog presjeka od nodularnog lijeva NL 700-2. Normom su propisana svojstva koja zahtjevaju da minimalna vlačna čvrstoća za nodularni lijev iznosi  $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$ , a istežljivost  $A_5 = 2\%$ . Usporedbom dobivenih rezultata s vrijednostima koje su propisane normom zaključeno je da svih pet epruveta ne zadovoljava po pitanju vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istežanja. Epruvete 1-1 i 4-4 zadovoljile su zahtjevane uvjete, dok epruvete 2-2, 3-3 i 5-5 nisu zadovoljile. Ispitivanjem udarnog rada loma utvrđena je srednja vrijednost od 5,5 J, što je uobičajeno za nodularni lijev.

Tijekom eksperimentalnog dijela vidljivo je da prilikom izrade epruveta treba biti pažljiv, jer i mala pogreška dovodi do toga da epruveta puca u navoju, što može dovesti do krivih rezultata ispitivanja, a time i velikih financijskih problema tvrtke. U slučaju da epruveta pukne u navoju, ti rezultati se ne mogu uzeti u obzir, nego tvrtka mora poslati novu epruvetu na ispitivanje.

## LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] [http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Uvod\\_Metastabilni%20Fe-C%20dijagram.pdf](http://brod.sfsb.hr/~ikladar/SISM/Uvod_Metastabilni%20Fe-C%20dijagram.pdf)
- [3] 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.
- [4] [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1396606171-0-fe-ljevovi\\_2012.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1396606171-0-fe-ljevovi_2012.pdf)
- [5] [http://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Celi%C4%8Dni\\_ljev](http://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Celi%C4%8Dni_ljev)
- [6] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Sivi\\_ljev](http://hr.wikipedia.org/wiki/Sivi_ljev)
- [7] <https://www.google.hr/search?q=nodularni+lijev&client=firefox-a&hs=Kjl&rls=org.mozilla:enUS:official&channel=sb&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=ZuXJVNuNDsqrUaGQg-gH&ved=0CDYQsAQ&biw=1920&bih=915>
- [8] Irena Žmak: Modeliranje strukture i svojstva nodularnog lijeva neuronskim mrežama, doktorski rad.
- [9] [https://www.google.hr/?gfe\\_rd=cr&ei=EkEpVcz4CcuagbAjoDoCQ&gws\\_rd=ssl#q=prijelazna+temperatura](https://www.google.hr/?gfe_rd=cr&ei=EkEpVcz4CcuagbAjoDoCQ&gws_rd=ssl#q=prijelazna+temperatura)

## **PRILOZI**

Prilog 1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

	<b>VELEUČILIŠTE U KARLOVCU</b> KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	<b>IZVJEŠĆE / REPORT</b>	

**LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU**  
LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT

**IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING**

Radni nalog Work order	-	Naručitelj Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	-
Materijal Material	<b>NL 700-2 (EN-GJL-700-2)</b>	Količina Quantity	5 x vlačna čvrstoća
Norma Standard	HRN EN 1561	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	<b>1;2;3;4;5</b>
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	Lijevano stanje
Predmet Object	Probni uzorci		

**MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES**

Značajke ispitivanja Test mark	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Napon tečenja Re [N/mm <sup>2</sup> ] Yield Stress	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm <sup>2</sup> ] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HV Hardness value	Savijanje Bending
Zahtijevano in accordance	Ø 14	420 min.	700 min.	2 min.				
Utvrđeno Realized 1	Ø 14	<b>96 000 623</b>	<b>112 500 731</b>	<b>74 5,7</b>				
Utvrđeno Realized 2	Ø 14	<b>69 000 448</b>	<b>83 000 539</b>	<b>71,4 2</b>				
Utvrđeno Realized 3	Ø 14	<b>69 000 448</b>	<b>101 500 659</b>	<b>73 4,2</b>				
Utvrđeno Realized 4	Ø 14	<b>85 000 552</b>	<b>113 000 734</b>	<b>74,5 6,4</b>				
Utvrđeno Realized 5	Ø 14	<b>69 000 448</b>	<b>107 500 698</b>	<b>73 4,2</b>				

Primjedba:  
Remark:

Ispitivanje epruveta materijala NL 700-2 za potrebe završnog rada Dinota Domića.

Datum/Date: 16-03-2015	Ispitao/Examined: Nikola Sonički, dipl.ing. Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision:
---------------------------	---	--	---------------------

Prilog 2. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

	<b>VELEUČILIŠTE U KARLOVCU</b> KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 <small>HR EN ISO 9001:2009</small>
	<b>IZVJEŠĆE / REPORT</b>	

<b>LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU</b> LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT
---

<b>IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING</b>
---

Radni nalog Work order	Za potrebe izrade završnog rada	Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	
Materijal Material	NL 700-2	Količina Quantity	5 epruveta na žilavost
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probne epruvete		

<b>MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES</b>
---

Značajke ispitivanja Test mark	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Napon tečenja Re [N/mm <sup>2</sup> ] Yield Stress	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm <sup>2</sup> ] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HV Hardness value	Savijanje Bending
Zahtjevano In accordance								
Utvrđeno Realized 1)						<b>5</b>		
2)						<b>5</b>		
3)						<b>6</b>		
4)						<b>6</b>		
5)						<b>5.5</b>		

Primjedba: Remark:  Ispitivanje 5 epruveta na žilavost za potrebe izrade završnog rada na temu Svojstva željeznih ljevova studenta Dinota Domića.
--

Datum/Date: 2015-02-17	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision:
---------------------------	--	--	---------------------