

# Postupak dobivanja nodularnog lijeva i izrada suhog veza za tankere

---

**Bešić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:222041>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE**

**POSTUPAK DOBIVANJA NODULARNOG LIJEVA I IZRADA**  
**SUHOG VEZA ZA TANKERE**

**ZAVRŠNI RAD**

**IVAN BEŠIĆ**  
**Matični broj: 1213**

**Split, rujan 2021.**



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**PREDDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE**  
**SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO**

**POSTUPAK DOBIVANJA NODULARNOG LIJEVA I IZRADA**  
**SUHOG VEZA ZA TANKERE**

**ZAVRŠNI RAD**

**IVAN BEŠIĆ**  
**Matični broj: 1213**

**Split, rujan 2021.**

**UNIVERSITY OF SPLIT**  
**FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**  
**UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY**  
**CHEMICAL ENGINEERING**

**PROCEDURE FOR OBTAINING NODULAR CAST IRON AND  
MAKING DRY MOORING FOR TANKERS**

**UNDERGRADUATE THESIS**

**IVAN BEŠIĆ**

**Parent number: 1213**

**Split, September 2021**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

### ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu  
Kemijско-tehnološki fakultet u Splitu  
Preddiplomski studij kemijske tehnologije

**Znanstveno područje:** Tehničke znanosti

**Znanstveno polje:** Kemijско inženjerstvo

**Tema rada** je prihvaćena na 10. elektronskoj sjednici Fakultetskog vijeća Kemijско-tehnološkog fakulteta održanoj 16. i 17. ožujka 2021.

**Mentor:** prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović

**Pomoć pri izradi:** mag. ing. chem. Teo Ugrina

### POSTUPAK DOBIVANJA NODULARNOG LIJEVA I IZRADA SUHOG VEZA ZA TANKERE

Ivan Bešić, 1213

#### Sažetak:

U ovom završnom radu objašnjen je postupak dobivanja nodularnog lijeva te izrada suhog veza. Rad je sastavljen od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu objašnjena su svojstva nodularnog lijeva, njegove prednosti i nedostaci u odnosu na ostale željezne ljevove kao što su sivi i vermikularni te utjecaj različitih elemenata na mikrostrukturu i svojstva nodularnog lijeva, te su prikazani postupci dobivanja nodularnog lijeva. U praktičnom dijelu prikazan je postupak proizvodnje nodularnog lijeva u ljevaonici Brodograđevne industrije Split koji se sastoji od izrade posebnih kalupa, lijevanja čelika u posebne kalupe za oblikovanje suhog veza te naknadnog ispitivanja mehaničkih svojstava epruveta nodularnog lijeva.

**Ključne riječi:** nodularni lijev, postupak dobivanja nodularnog lijeva, utjecaj elemenata, mikrostruktura

**Rad sadrži:** 47 stranica, 62 slike, 4 tablice, 2 priloga, 29 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

#### Sastav Povjerenstva za obranu:

1. prof. dr. sc. Senka Gudić - predsjednik
2. doc. dr. sc. Miće Jakić - član
3. prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović - član-mentor

#### Datum obrane:

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf. format) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijско-tehnološkog fakulteta Split, Ruđera Boškovića 35.

## **BASIC DOCUMENTATION CARD**

### **BACHELOR THESIS**

**University of Split**

**Faculty of Chemistry and Technology Split**

**Undergraduate Study of Chemical Technology**

**Scientific area:** Technical Sciences

**Scientific field:** Chemical Engineering

**Thesis subject** was approved by Faculty Council of Faculty of Chemistry and Technology, session no. 10 (March 16 and 17, 2021)

**Mentor:** Dr. sc. Ladislav Vrsalović, Full Professor

**Technical assistance:** mag. ing. chem. ing. Teo Ugrina

## **PROCEDURE FOR OBTAINING NODULAR CAST IRON AND MAKING DRY MOORING FOR TANKERS**

Ivan Bešić, 1213

### **Summary:**

In this thesis, the ductile iron production process and making a dry bond is explained in detail. The thesis consists of theoretical and practical part. In the theoretical part explanation about the properties of ductile iron, its advantages and disadvantages compared to other iron castings such as gray and vermicular, and the influence of different elements on the microstructure and properties of ductile iron are given and also methods of obtaining ductile iron are described. In the practical part detail discussion about the process of ductile iron production in the Brodosplit foundry, which consists of making special molds, casting steel into special molds to form a dry bond, are given along with the subsequent testing of the mechanical properties of ductile iron test tubes.

**Keywords:** ductile iron, ductile iron production process, influence of elements, microstructure.

**The paper contains:** 47 pages, 62 figures, 4 tables, 2 appendices, 29 literary references

**Origin in:** Croatian

### **Defence committee:**

1. Dr. sc. Senka Gudić, Full prof. – chairperson
2. Dr. sc. Miće Jakić, Assistant prof. – member
3. Dr. sc. Ladislav Vrsalović, Full prof. – supervisor

### **Defence date:**

**Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in** Library of Faculty of Chemistry and Technology Split, Ruđera Boškovića 35.

*Završni rad je izrađen u Zavodu za elektrokemiju i zaštitu materijala, Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Ladislava Vrsalovića u razdoblju od lipnja do rujna 2021. godine. Eksperimentalna ispitivanja napravljena su u BIS-Laboratoriji d.o.o. pod neposrednim voditeljstvom mag. ing. chem. ing. Tea Ugrine.*



## **ZAHVALA:**

Zahvaljujem se prvenstveno neposrednom voditelju dipl.ing.chem.ing Teu Ugrini i mentoru prof. dr. sc. Ladislavu Vrsaloviću na ukazanom znanju, strpljenju i vođenju u izradi završnog rada te cjelokupnoj postavi Brodosplita u opisivanju eksperimentalnog dijela i ukazanoj ljubaznosti. Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i najbližima koji su me gurali ka uspjehu.

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA:**

Teorijski objasniti i eksperimentalno pokazati postupak dobivanja nodularnog lijeva, njegova svojstva te izradu suhog veza za tankere od nodularnog lijeva uz propisanu normu.

**Sažetak:**

U ovom završnom radu objašnjen je postupak dobivanja nodularnog lijeva te izrada suhog veza. Rad je sastavljen od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu objašnjena su svojstva nodularnog lijeva, njegove prednosti i nedostaci u odnosu na ostale željezne ljevove kao što su sivi i vermikularni te utjecaj različitih elemenata na mikrostrukturu i svojstva nodularnog lijeva, te su prikazani postupci dobivanja nodularnog lijeva. U praktičnom dijelu prikazan je postupak proizvodnje nodularnog lijeva u ljevaonici Brodograđevne industrije Split koji se sastoji od izrade posebnih kalupa, lijevanja čelika u posebne kalupe za oblikovanje suhog veza te naknadnog ispitivanja mehaničkih svojstava epruveta nodularnog lijeva.

**Ključne riječi:** nodularni ljev, postupak dobivanja nodularnog lijeva, utjecaj elemenata, mikrostruktura.

**Summary:**

In this thesis, the ductile iron production process and making a dry bond is explained in detail. The thesis consists of theoretical and practical part. In the theoretical part explanation about the properties of ductile iron, its advantages and disadvantages compared to other iron castings such as gray and vermicular, and the influence of different elements on the microstructure and properties of ductile iron are given and also methods of obtaining ductile iron are described. In the practical part detail discussion about the process of ductile iron production in the Brodosplit foundry, which consists of making special molds, casting steel into special molds to form a dry bond, are given along with the subsequent testing of the mechanical properties of ductile iron test tubes.

**Keywords:** ductile iron, ductile iron production process, influence of elements, microstructure.

## Sadržaj

1	UVOD.....	1
2	OPĆI DIO .....	2
2.1	Nodularni lijev.....	2
2.2	Svojstva nodularnog lijeva i usporedba svojstava sa sivim i vermikularnim lijevom.....	4
2.2.1	Utjecaj nodularnosti grafita .....	8
2.2.2	Utjecaj broja i veličine nodula.....	9
2.2.3	Utjecaj udjela ferita i perlita .....	11
2.3	Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog ljeva .....	12
2.3.1	Utjecaj stalnih elemenata.....	12
2.3.2	Utjecaj legirajućih elemenata .....	16
2.4	Cijepljenje nodularnog lijeva .....	19
2.5	Postupci proizvodnje nodularnog lijeva .....	20
2.5.1	Postupci proizvodnje nodularnog lijeva metodama tretiranja magnezijem. 20	
2.5.2	Postupak obrade u otvorenom loncu .....	20
2.5.3	Postupak obrade u loncu s poklopcem .....	21
2.5.4	Postupak u loncu s poklopcem za podizanje .....	22
2.5.5	Postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom kroz porozni čep .....	23
2.5.6	Postupak obrade punjenom žicom.....	23
2.5.7	Postupak obrade u kalupu.....	24
2.6	Postupak obrade protjecanjem.....	26
3	EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
3.1	Postupak izrade nodularnog lijeva.....	29
3.2	Izrada kalupa za odljevke .....	35
3.3	Ispitivanja nodularnog lijeva .....	37
3.4	Metalografska ispitivanja .....	38
3.5	Ispitivanje mehaničkih svojstava.....	38
4	REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA .....	42
4.1	Kemijski sastav uzoraka nodularnog lijeva.....	42
4.2	Rezultati mehaničkih ispitivanja .....	43
4.3	Rezultati metalografskih ispitivanja .....	43
5	ZAKLJUČAK.....	44
6	LITERATURA .....	45

# 1 UVOD

Lijevanje je postupak oblikovanja pri kojemu se rastaljeni metal ulijeva u neku šupljinu (kalup), hladi i skrućuje u njoj, te poprima njen oblik (odljevak). Alati za lijevanje mogu biti pješčani kalupi za jednokratnu upotrebu i metalni (kokile) za višekratnu upotrebu. Ulijevanje može biti gravitacijsko pod djelovanjem sile teže ili tlačno pod povišenim pritiskom radi boljeg popunjavanja kalupne šupljine.<sup>[1]</sup>

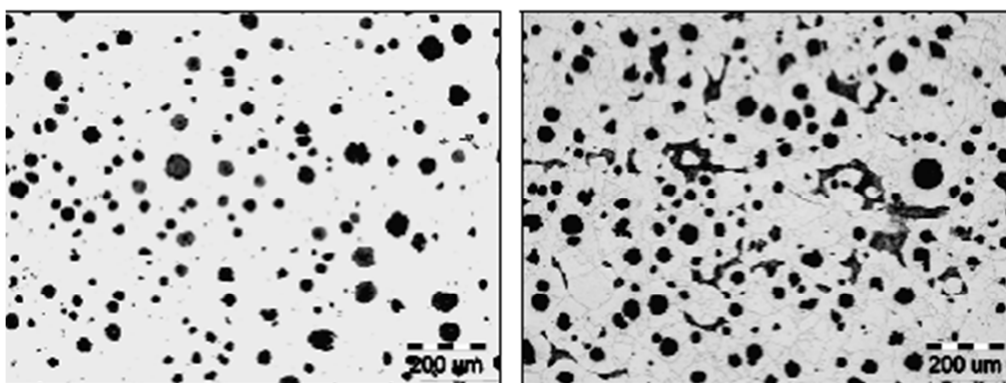
Najveća primjena odljevaka je u automobilskoj industriji u obliku lijevanog željeza ili aluminijskog lijeva. U jedan automobil ugradi se više od 100 odljevaka. Osim automobilske industrije, odljevci se koriste u strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, brodogradnji, za željeznička vozila, energetici, zračnoj i svemirskoj industriji, izradi umjetničkih skulptura itd. Prednosti lijevanja su što se može dobiti složena geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela odljevka, moguće je dobiti dimenzijski točan oblik ili približno točan oblik, moguće proizvesti vrlo velike odljevke, može se lijevati bilo koji metal, moguća masovna proizvodnja, velik raspon dimenzija odljevka: od 1 gram do 250 tona. Nedostaci lijevanja su ograničenja u mehaničkim svojstvima (često se javlja poroznost), nedovoljna dimenzijska točnost i kvaliteta površine, opasnosti u proizvodnji, te nepovoljan utjecaj na okoliš.<sup>[2]</sup>

## 2 OPĆI DIO

### 2.1 Nodularni lijev

Nodularni lijev (*engl. Spheroidal graphite cast iron; Ductile iron*) pripada porodici željeznih lijevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita (slika 1).<sup>[3]</sup>

Budući da grafit u nodularnom lijevu ima kuglasti oblik, ova vrsta lijeva ima dobra mehanička svojstva. Nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću i dobru žilavost. Ova svojstva ga čine poželjnijim od sivog i vermikularnog lijeva u širokom području primjene.<sup>[4]</sup> U odnosu na sivi i vermikularni lijev, kod nodularnog lijeva može se ostvariti veća čvrstoća, granica razvlačenja, tvrdoća, istezanje, žilavost i modul elastičnosti. Sivi i vermikularni lijev imaju bolju livljivost, sposobnost prigušivanja vibracija, toplinsku vodljivost, strojnu obradivost i niže troškove proizvodnje.<sup>[4]</sup>



a)

b)

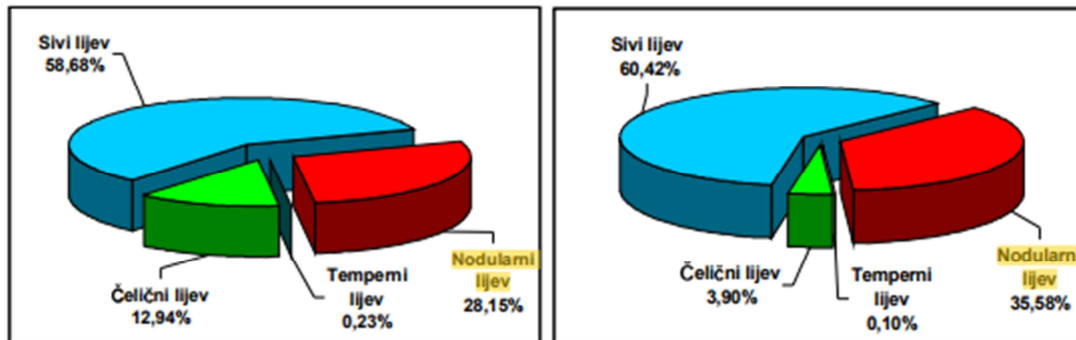
Slika 1. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog lijeva.<sup>[3]</sup>

a) nenagrizeni stanje, b) nagrizeni stanje, nital

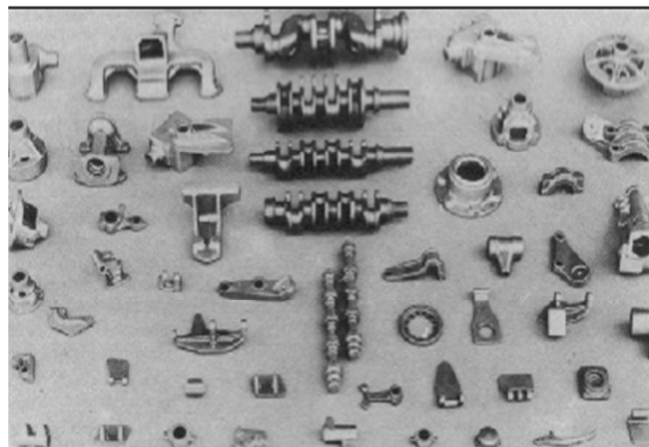
Čelične lijevove je zamijenio nodularni lijev u velikom spektru primjene zbog svojih boljih svojstava kao što su bolja livljivost, otpornost na koroziju, lakša strojna obradivost, veća sposobnosti prigušenja vibracija te niži troškovi proizvodnje u odnosu na niskougljične čelične lijevove. Međutim, u područjima primjene u kojima je potrebna vrlo visoka žilavost, istezljivost i visoki modul elastičnosti, prednost ima niskougljični čelični lijev. Vrijednosti vlačne čvrstoće nodularnog lijeva mogu iznositi od 350 do 1500 N/mm<sup>2</sup>, što ovisi o strukturi metalne osnove, legiranju i izvršenoj toplinskoj obradi. Nodularni lijev ima ~10 % manju gustoću u odnosu na čelik.<sup>[4]</sup>

Danas postoji mnogo postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se nodularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne (polazne, bazne) taline modifikatorima (predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični kuglasti oblik grafita.<sup>[3]</sup> Najčešće primjenjivani modifikatori su legure na bazi magnezija.

Više od 1/3 svjetske proizvodnje nodularnog lijeva odnosi se na izradu vodovodnih armatura (cijevi, ventili), približno 1/3 primjenjuje se u industriji automobila i kamiona i 1/3 za razne konstrukcijske odljevke. Nodularni lijev je postigao najveći uspjeh u industriji automobila i kamiona, gdje postoji snažna konkurencija materijala obzirom na potrebne performanse i zahtjeve za što nižim proizvodnim troškovima.<sup>[3]</sup> Struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu i republici Hrvatskoj prikazan je na slici 2, dok su na slici 3 prikazani primjeri odljevaka od nodularnog lijeva koji se koriste u automobilskoj industriji.



Slika 1. a) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu u 2005. godini,<sup>[3]</sup>  
 b) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u Hrvatskoj u 2006. godini

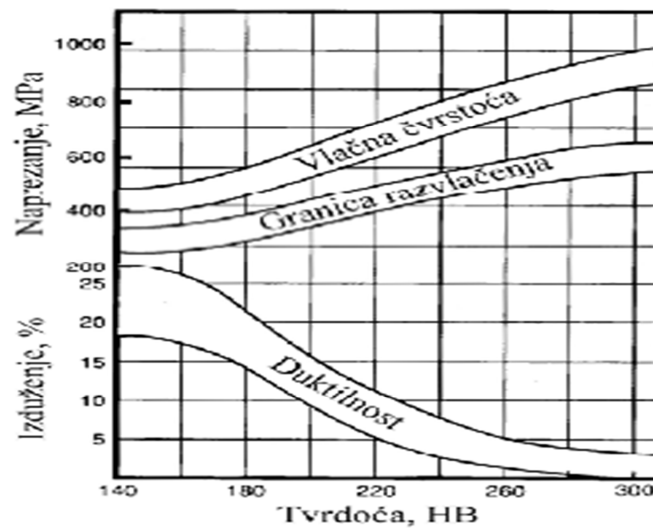


Slika 3. Primjeri tipičnih odljevaka od nodularnog lijeva upotrebljenih u modernom automobilu<sup>[3]</sup>



## 2.2 Svojstva nodularnog lijeva i usporedba svojstava sa sivim i vermikularnim lijevom

Mehanička i fizikalna svojstva nodularnog lijeva ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Kombinacijom raznih kemijskih sastava i uvjeta pri skrućivanju te hlađenju nakon skrućivanja ili putem naknadne toplinske obrade mogu se dobiti različite mikrostrukture, odnosno širok raspon svojstva nodularnog lijeva (slika 4), što omogućuje konstruktorima odabir kvalitete koja osigurava najpovoljniju kombinaciju svojstava.<sup>[3]</sup>



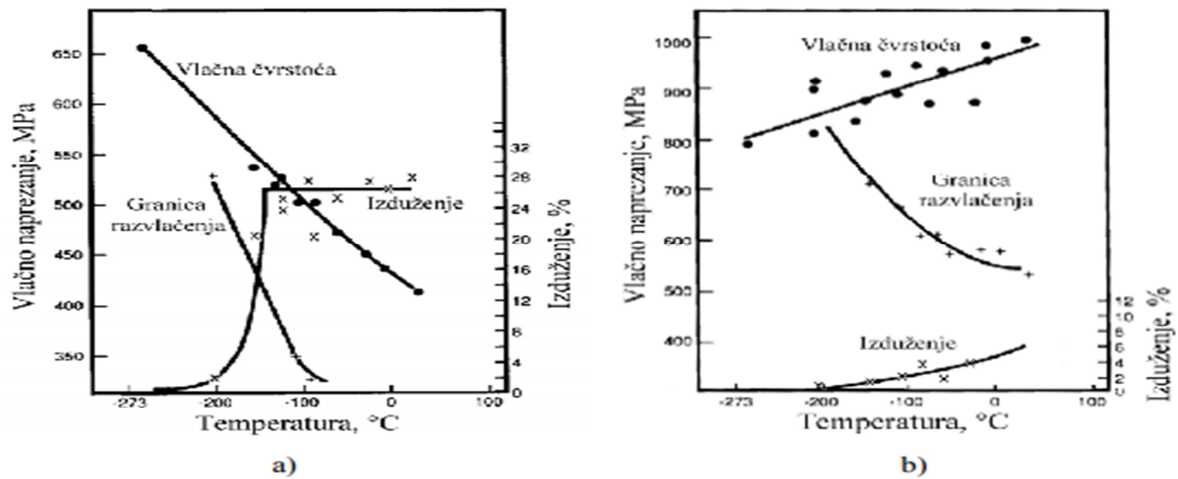
Slika 4. Odnos između vlačne čvrstoće, tvrdoće i izduženja nodularnog lijeva<sup>[3]</sup>

Na (slici 4) vidi se da u odnosu na sivi i vermikularni lijev, nodularni lijev ima višu vlačnu čvrstoću, tvrdoću, izduženje i žilavost, ali nižu toplinsku vodljivost, sposobnost prigušenja vibracija te lošiju livljivost. Vrijednosti vlačne čvrstoće perlitnog nodularnog lijeva mogu doseći i 900 Mpa, dok se specijalnim postupcima toplinske obrade mogu postići vlačne čvrstoće i iznad 1000 MPa.<sup>[3]</sup>

Tablica 1. Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka<sup>[3]</sup>

Označavanje materijala		Vlačna čvrstoća $R_m$ , [MPa], min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , [MPa], min	Istezanje pri lomu [%], min
Oznaka	Broj			
EN-GJS-350-22-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

S porastom vlačne čvrstoće raste granica razvlačenja i tvrdoća nodularnog lijeva, a smanjuje se izduženje i žilavost. Za razliku od sivog lijeva, nodularni lijev pokazuje elastično ponašanje slično čeliku, koje je međutim ograničeno postepenim početkom plastične deformacije oko grafitnih nodula. Ukoliko se nodularni lijev primjenjuje pri niskim temperaturama mora se uzeti u obzir utjecaj temperature na čvrstoću i izduženje. **Feritni** nodularni ljevovi preferiraju se za ovakve primjene jer posjeduju superiorniju žilavost pri niskim temperaturama u odnosu na **perlitni** nodularni lijev. S padom temperature raste vlačna čvrstoća i granica razvlačenja feritnog nodularnog lijeva. Vrijednosti izduženja pri sobnoj temperaturi zadržavaju se do vrlo niskih temperatura, nakon čega slijedi oštar pad (slika 5a.). Granica razvlačenja perlitnog nodularnog lijeva raste s padom temperature, ali opada vlačna čvrstoća i izduženje (slika 5.b).<sup>[3]</sup>



Slika 5. a) utjecaj temperature na vlačna svojstva feritnog nodularnog lijeva<sup>[3]</sup>,  
 b) utjecaj temperature na vlačna svojstva perlitnog nodularnog lijeva

Usporedba svojstava žilavog lijeva sa kovkastim, sivim, čeličnim i bijelim tvrdim ljevom prikazana je na slici 6.

	nodularni ljev	kovkasti ljev	sivi ljev	čelični ljev s 0,3% C	bijeli tvrdi ljev
livljivost	5	4	5	2	3
obradivost	4	4	5	3	N/A
prigušenje vibracija	4	4	5	2	2
zakaljivost	5	5	5	3	N/A
modul elastičnosti	5	4	3	5	N/A
otpornost na udarce	4	3	1	5	N/A
otpornost na udarce	5	4	5	2	4
otpornost na koroziju	5	2	1	3	N/A
čvrstoća/ masa	5	2	1	3	N/A
otpornost na trošenje	4	2	3	1	5
troškovi proizvodnje	4	3	5	2	3

5 4 3 2 1  
 najviša najniža

Slika 6. Usporedba svojstava različitih vrsta ljevova<sup>[5]</sup>

Iz prikazane slike mogu se vidjeti prednosti nodularnog lijeva, u pogledu njegovih svojstava, u usporedbi s vidim s drugim vrstama ljevova.

Nodularni ljev može se uspješno primijeniti i na povišenim temperaturama. Kod feritnih i perlitnih nelegiranih nodularnih ljevova smanjenje vlačne čvrstoće do temperature od 400°C iznosi ~ 30,0 %. Vlačna čvrstoća perlitnog nodularnog lijeva je viša od vlačne čvrstoće feritnog nodularnog lijeva pri svim temperaturama. Nodularni ljev ima višu žilavost od sivog

i vermikularnog lijeva. Kombinacija visoke čvrstoće i dobre žilavosti, koju sivi i vermikularni lijev nemaju, omogućila je vrlo široku primjenu ovog materijala. Feritni nodularni lijev ima veću žilavost od perlitnog nodularnog lijeva. Žilavost nodularnog lijeva opada sa sniženjem i porastom temperature. Sposobnost prigušenja vibracija ima značajnu ulogu u konstrukciji suvremenih komponenti. Visoka sposobnost prigušenja vibracija reducira buku i vibracije koje emitiraju strojne komponente koje su podvrgnute cikličkim naprezanjima. Nodularni lijev ima nižu sposobnost prigušenja vibracija od sivog i vermikularnog lijeva. Sposobnost prigušenja vibracija nodularnog lijeva opada s porastom udjela nodularnog grafita.<sup>[3]</sup>

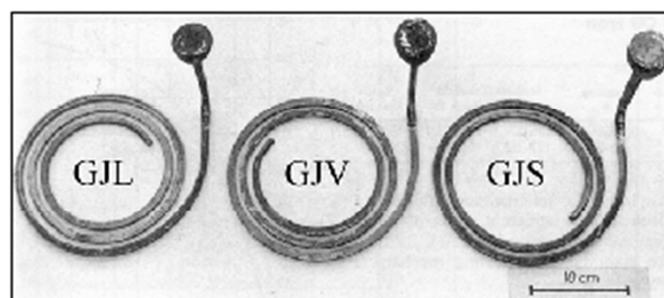
Odnos relativnih sposobnosti prigušenja vibracija sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva je:

$$\text{Sivi lijev} : \text{vermikularni lijev} : \text{nodularni lijev} = 1,0 : 0,60 : 0,34^{[3]}$$

Gustoća nodularnog lijeva primarno ovisi o udjelu grafitiziranog ugljika i kreće se od 6,8 g/cm<sup>3</sup> za visokougljični feritni nodularni lijev do 7,4 g/cm<sup>3</sup> za niskougljični perlitni nodularni lijev. Obzirom da posjeduje nižu gustoću u odnosu na čelik, pogodna je zamjena za kovani ili lijevani čelik. Toplinska vodljivost nodularnog lijeva pod snažnim je utjecajem morfologije grafita. Budući da grafitne nodule nisu međusobno povezane, toplinska vodljivost nodularnog lijeva znatno je niža od toplinske vodljivosti sivog i vermikularnog lijeva.

Livljivost taljevine željeznog lijeva općenito ovisi o sadržaju ugljika i silicija te temperaturi. Pored toga, značajnu ulogu ima i morfologija skrućivanja.<sup>[3]</sup>

Na slici 7 prikazani su rezultati ispitivanja livljivosti taline željeznih ljevova, tzv. spiralne probe (Sippove probe).<sup>[3]</sup>



Slika 7. Spiralne probe odlijevane od sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva. Temperatura taline ista je u sve tri slučaja<sup>[3]</sup>

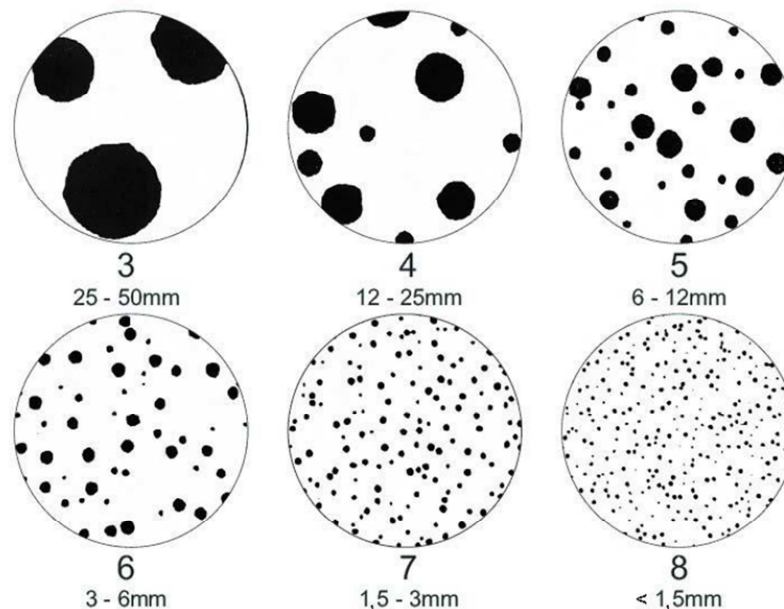
Sa slike 7. može se vidjeti da sivi lijev pokazuje najbolju livljivost, a nodularni lijev najlošiju. Livljivost vermikularnog lijeva leži između livljivosti sivog i nodularnog lijeva. Nelegirani nodularni ljevovi pokazuju približno istu otpornost na koroziju kao sivi lijev i superiorniji su od nelegiranog čelika. Otpornost na trošenje nodularnog lijeva primarno je određen njegovom

mikrostrukturu. Perlitni nodularni ljevovi imaju veću otpornost na trošenje od feritnih nodularnih ljevova. Daljnje poboljšanje može se postići legiranjem ili toplinskom obradom da bi se ostvarila tvrda martenzitna ili barinitna struktura.<sup>[3]</sup>

### 2.2.1 Utjecaj nodularnosti grafita

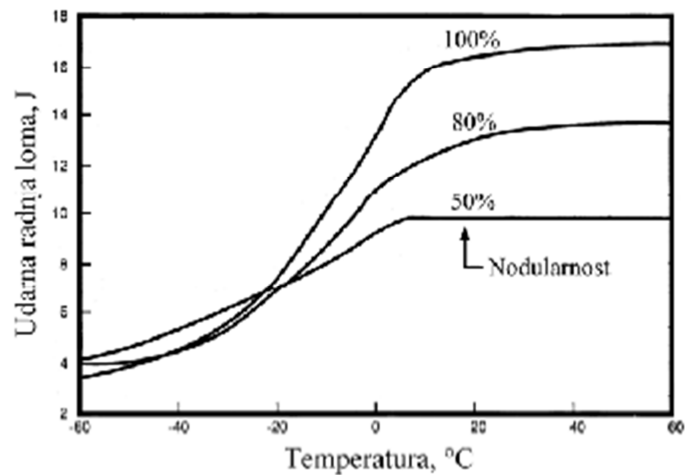
Broj nodula i nodularnost imaju značajan utjecaj na svojstva nodularnog lijeva. Niska nodularnost i prisustvo degeneriranih oblika grafita negativno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Feritni nodularni ljevovi imaju visoko izduženje i relativno nisku vlačnu čvrstoću te tvrdoću, dok je kod perlitnih nodularnih ljevova situacija obrnuta.<sup>[3]</sup>

**Nodularnost** tj. stupanj sferičnosti, volumni je udio kuglica grafita prema ukupnom broju grafitnih faza. Cilj je proizvesti žilavi ljev sa što većom nodularnošću, u pravilu iznad 90%, jer mehanička svojstva značajno ovise o pravilnosti kuglica grafita.



Slika 8. Normirane veličine grafitnih kuglica u žilavom lijevu po normi HRN EN ISO 945:2002<sup>[6]</sup>

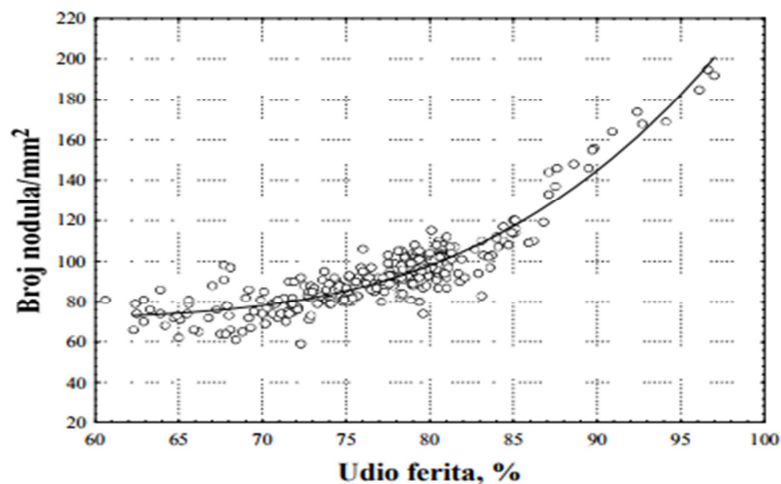
Sa smanjenjem nodularnosti grafita opada vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i udarna žilavost (slika 9.). Što je grafitna čestica bliže savršenom krugu (kugli) to ona za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukturi, odnosno manje utječe na slabljenje metalne osnove. To u konačnici rezultira boljim mehaničkim svojstavima. Očito je da nastanak nodula slabe sferičnosti, vermikularnog, te eventualno degeneriranih oblika grafita utječe na sniženje udarne žilavosti nodularnog lijeva.<sup>[3]</sup>



Slika 9. Utjecaj nodularnosti grafita na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva<sup>[3]</sup>

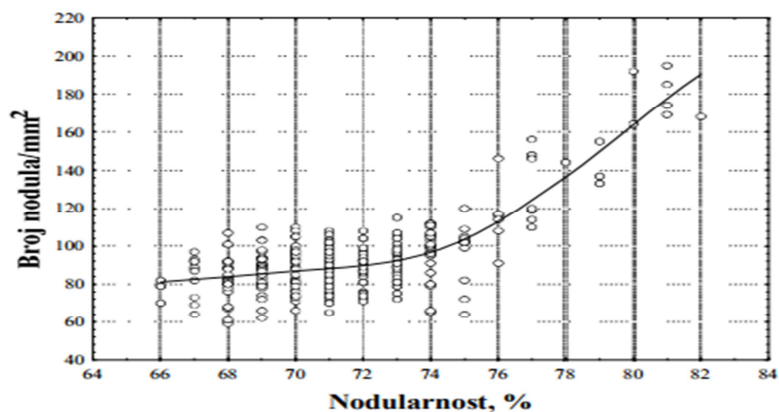
### 2.2.2 Utjecaj broja i veličine nodula

Broj grafitnih nodula (broj grafitnih nodula/mm<sup>2</sup>) ima značajan utjecaj na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi, a samim tim i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Povećanje broja nodula rezultira većim udjelom ferita u mikrostrukturi (slika 10), jer se skraćuju putovi difuzije ugljika iz austenita pri eutektoidnoj pretvorbi. Ovaj utjecaj broja nodula na udio ferita ne treba shvatiti jednoznačno. Naime, u tankim stjenkama, gdje su prisutne velike brzine hlađenja, prisutan je veliki broj manjih nodula, ali i povišeni udio perlita.<sup>[3]</sup>



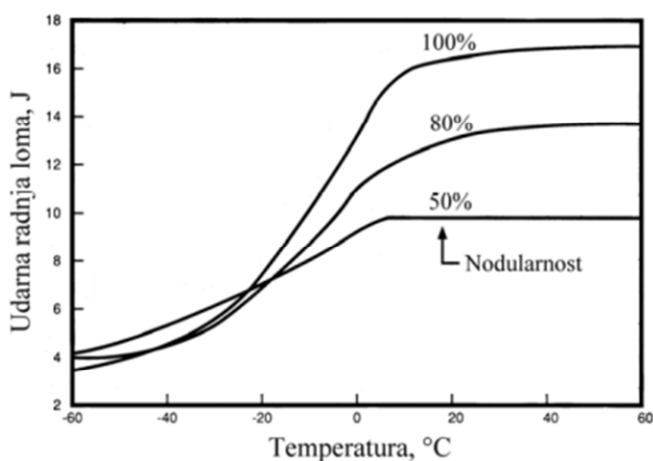
Slika 10. Utjecaj broja nodula/mm<sup>2</sup> na udio ferita u mikrostrukturi nodularnog lijeva<sup>[3]</sup>

Broj grafitnih nodula utječe i na nodularnost grafita (slika 11). S povećanjem broja nodula smanjuje se njihov promjer, što rezultira većom nodularnošću grafita, jer su manje nodule bliže obliku savršene kugle.<sup>[3]</sup>



Slika 11. Utjecaj broja nodula/mm<sup>2</sup> na nodularnost grafitu<sup>[3]</sup>

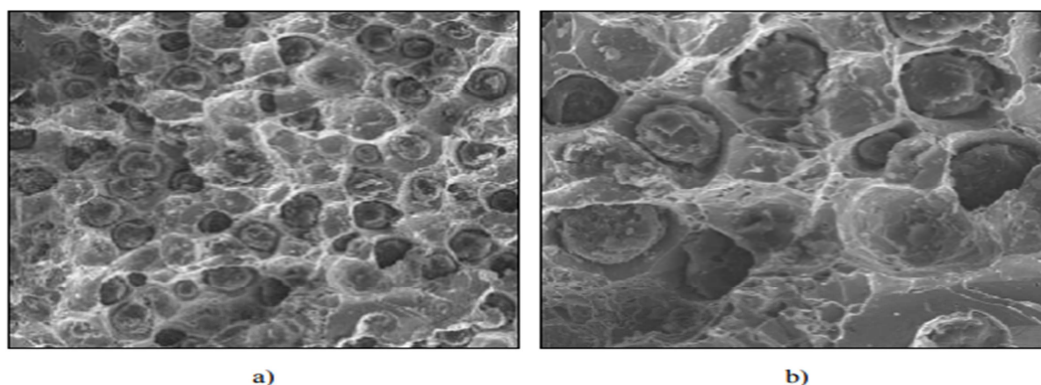
Broj grafitnih nodula utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Općenito, povećanje broja nodula utječe na smanjenje njihove veličine, što poboljšava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, udarnu žilavost i otpornost na umor. Cijepljenjem taline povećava se broj grafitnih nodula i poboljšava nodularnost. Prema tome, veliki broj nodula povezan je s poboljšanjem nodularnosti. Međutim, za svaki presjek odljevka, odnosno debljinu stjenke postoji optimalno područje broja nodula. Odstupanje od tog područja može rezultirati slabljenjem mehaničkih svojstava. Osim toga, broj nodula/mm<sup>2</sup> potrebno je prilagoditi uvjetima primjene odljevaka. Npr. kod feritnog nodularnog lijeva previsok broj nodula/mm<sup>2</sup> negativno utječe na udarnu žilavost pri sobnoj temperaturi (slika 12). Međutim, pri niskim temperaturama veći broj nodula/mm<sup>2</sup> rezultira višim vrijednostima udarne žilavosti.<sup>[3]</sup>



Slika 12. Utjecaj nodularnosti grafitu na udarni rad loma<sup>[3]</sup>

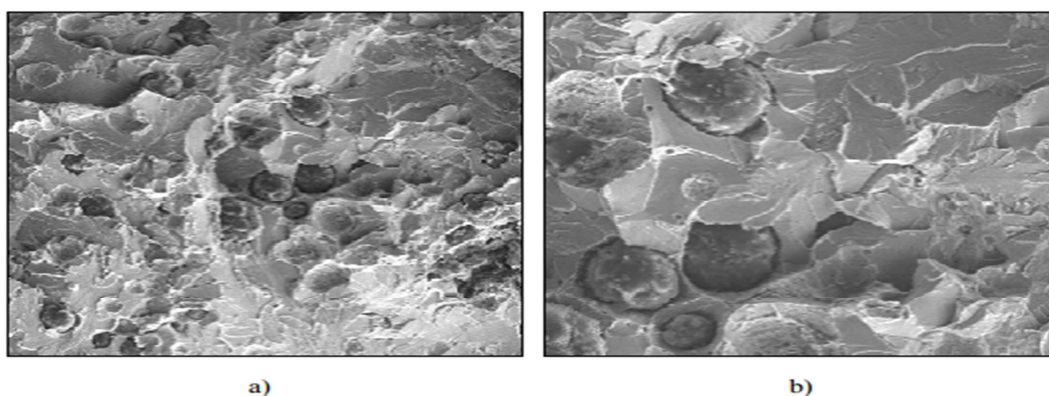
### 2.2.3 Utjecaj udjela ferita i perlita

Feritni nodularni lijev ima relativno visoko izduženje i udarnu žilavost te osrednju vlačnu čvrstoću i tvrdoću. Analizom prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) feritnog nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) može se ustanoviti da prije loma uzorka dolazi do značajne plastične deformacije ferita u cilju razgradnje naprezanja (slika 13).<sup>[3]</sup>



Slika 13. Snimka prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) feritnog nodularnog lijeva (udio ferita 96,6 %) pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pri povećanju 100x (a) i 300x (b)<sup>[3]</sup>

Perlitni nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću i tvrdoću te nisko izduženje i udarnu žilavost. Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita i samim tim ima povećanu čvrstoću i tvrdoću u odnosu na ferit, zbog čega je kod perlitnog nodularnog lijeva prisutan transkristalni krhki lom koji slijedi određene kristalne ravnine u pojedinim kristalnim zrnima (slika 14). Mogu se vidjeti karakteristične ravne plohe, što ukazuje da se radi o krhkom lomu bez prethodne plastične deformacije.<sup>[3]</sup>



Slika 14. Snimka prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) perlitnog nodularnog lijeva (udio perlita 63,6 %) pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pri povećanju 100x (a) i 200x (b)<sup>[3]</sup>



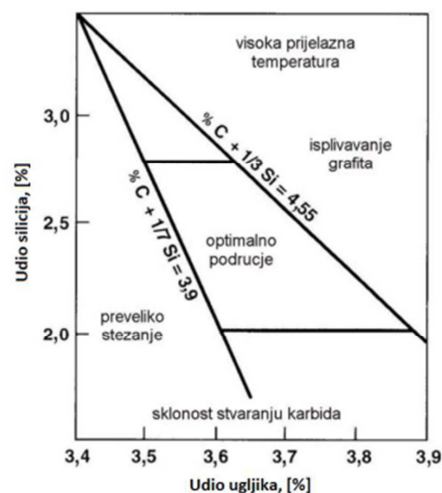
## 2.3 Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva

Kemijski sastav je važan čimbenik koji utječe na oblik grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu. Prema utjecaju na mikrostrukturu, kemijski elementi koji se pojavljuju u žilavom lijevu mogu se podijeliti u sljedeće skupine:<sup>[7]</sup>

- primarni (stalni) elementi: C, Si, Mn, S, P,
- nodulatori: Mg, rijetke zemlje (Ce, La i dr.),
- elementi koji utječu na matricu: Cu, Sn,
- legirni elementi: Ni, Mo,
- karbidotvorci: Cr, V, B, Mo, Te,
- antiglobulatori: Ti, Al, Pb, Bi, As.

### 2.3.1 Utjecaj stalnih elemenata

Optimalni sadržaj ugljika i silicija može se odrediti iz Handersonovog dijagrama (slika 15)<sup>[8]</sup>

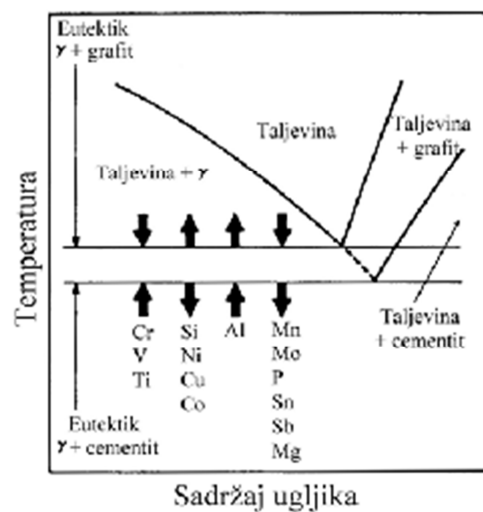


Slika 15. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva<sup>[8]</sup>

Iz dijagrama na slici 15 može se zaključiti da se optimalni sadržaj ugljika kreće u granicama od 3,5 do 3,9 %, ovisno o sadržaju silicija. Više vrijednosti sadržaja ugljika preferiraju se za tanje stjenke, a niže vrijednosti za deblje stjenke. Kombinacija visokih vrijednosti sadržaja ugljika, tj. ekvivalenta ugljika i niskih brzina hlađenja (debele stjenke) može rezultirati flotacijom (isplivavanjem na površinu) i degeneracijom nodula, što ima negativan učinak na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Kod tankih stjenki ne postoji opasnost od flotacije, zbog čega se preferiraju više vrijednosti ekvivalenta ugljika u cilju izbjegavanja stvaranja

karbida. Visoke vrijednosti sadržaja ugljika povećavaju ekspanziju tijekom skrućivanja. U većini slučajeva nodularni lijev ima sastav blizu eutektičkog.

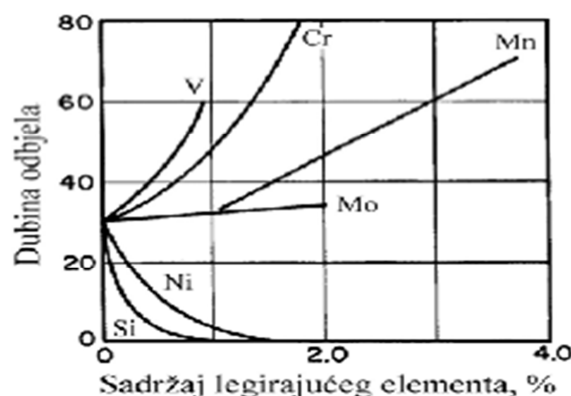
**Silicij** smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida. Kao i ostali grafitizatori, tijekom skrućivanja segregira u krutu fazu te podiže temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 16). Kod iste kvalitete nodularnog lijeva, viši sadržaji silicija preporučuju se kod lijevanja odljevaka tankih stjenki, da bi se smanjila mogućnost stvaranja karbida.<sup>[3]</sup>



Slika 16. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog ( $\gamma + \text{cementit}$ ) eutektik<sup>[3]</sup>

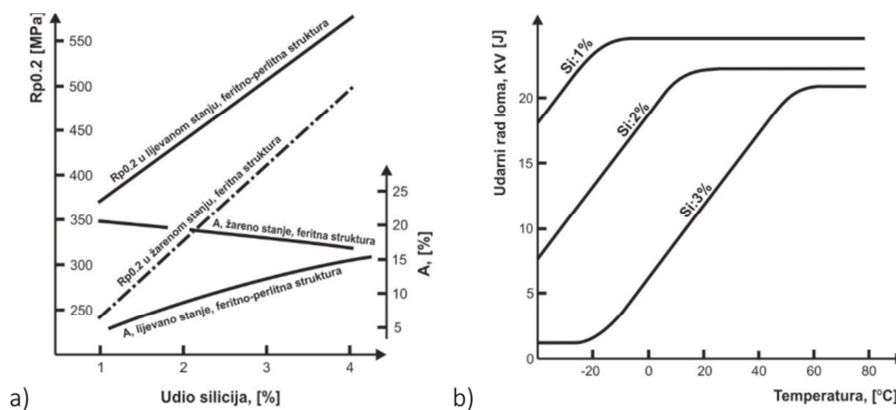
Grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja odbjela - cementita) (slika 17).<sup>[3]</sup>

Karbidotvorci (npr. krom, vanadij itd.) djeluju suprotno.



Slika 17 Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela (cementita). Sadržaj ugljika 3,0 do 3,3 %<sup>[3]</sup>

Dodatkom silicija proširuje se i pomiče trofazno područje ka višim temperaturama, jer silicij podiže eutektoidne temperature ( $T_T$  i  $T_{EODP}$ ). Zbog toga, za danu brzinu hlađenja, na raspolaganju stoji više vremena za difuziju ugljika, što u konačnici potpomaže (promovira) stvaranje ferita. S porastom udjela ferita povećava se žilavost i izduženje nodularnog lijeva, a smanjuje vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Utjecaj silicija na tehničku granicu razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) i istezljivost ( $A$ ), za žilavi lijev s feritno-perlitnom matricom i za žilavi lijev u žarenom stanju s feritnom matricom, prikazan je na slici 18. (a). Na slici 18. (b) prikazan je utjecaj silicija na udarnu radnju loma (KV) žilavog lijeva pri različitim temperaturama.<sup>[8]</sup>

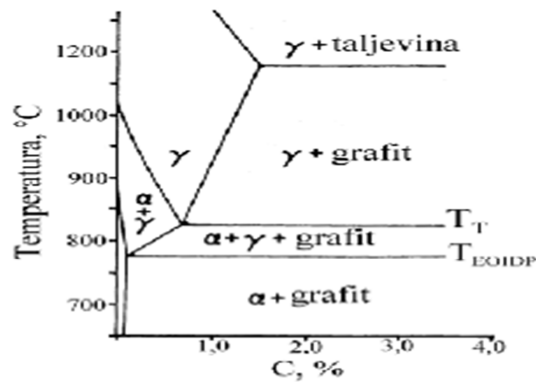


Slika 18 a) utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko<sup>[8]</sup>

b) utjecaj silicija na udarnu radnju loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev

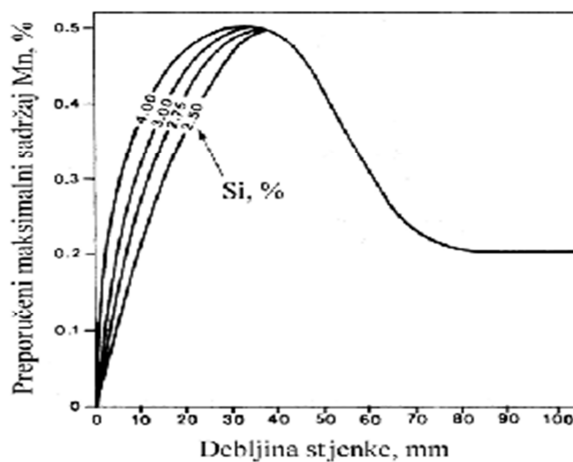
Silicij snižava vrijednosti udarne radnje loma i linearno povećava prijelaznu temperaturu krhkog loma. Zbog toga se udio silicija obično postavlja u granicama od 1,5 % do 3 %. Taj utjecaj na udarnu radnju loma žilavog lijeva naročito je važan kod feritnih vrsta žilavog lijeva, dok je kod feritno-perlitnih ljevova manje izražen s obzirom da je kod tih ljevova udarna radnja loma ionako smanjena uslijed pojave perlita u mikrostrukturi matrice.

**Mangan** je jedan od najčešće korištenih legiranih elemenata u žilavom lijevu. Mangan poboljšava mehanička svojstva žilavog lijeva jer pozitivno djeluje na stvaranje i stabiliziranje perlita što povećava čvrstoću, ali smanjuje duktilnost i strojnu obradivost. Mangan smanjuje koncentraciju ugljika u feritu te stabilizira cementit  $Fe_3C$ . Mangan proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature  $T_T$  i  $T_{EODP}$  (slika 19). Stabilizira austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu.<sup>[6]</sup>



Slika 19. Eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-Si sa sadržajem silicija od 2,0 %<sup>[3]</sup>

Na slici 19 prikazano je eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-Si sa sadržajem silicija od 2,0 %. Može se vidjeti da se nakon završetka skrućivanja topljivost ugljika u austenitu ( $\gamma$ ) smanjuje sa smanjenjem temperature. Prisustvo karbida u mikrostrukturi utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, izduženja i udarne žilavosti. U cilju izbjegavanja stvaranja karbida, potrebno je sadržaj mangana održavati što nižim (0,1-0,2 %). Dopušteni sadržaj mangana određen je sadržajem silicija i debljinom stjenke odljevka.<sup>[3]</sup>



Slika 20. Utjecaj sadržaja silicija i debljine stjenke na dopušteni sadržaj mangana<sup>[3]</sup>

U tankim stjenkama (do 30 mm) sklonost mangana ka stvaranju karbida može se izbalansirati porastom sadržaja silicija. Međutim, kod odljevaka debelih stjenki utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati sadržajem silicija jer mangan preferirano segregira u taljevinu koja zadnja skrućuje (potiskuje se ispred fronta kristalizacije). Pri tome dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna.

**Sumpor** snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe<sub>3</sub>C) eutektika, zbog čega doprinosi stvaranju odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan, sprječava grafitizaciju. Obzirom da se nodularni lijev proizvodi obradom primarne taljevine predlegurama na bazi magnezija i da magnezij ima visok afinitet prema sumporu, očito je da se sadržaj sumpora mora održavati niskim.<sup>[3]</sup>

Reakcijama magnezija sa sumporom smanjuje se raspoloživa količina magnezija za modifikaciju oblika grafita, to može rezultirati nastankom vermikularnog, listićavog i degeneriranih oblika grafita. Prisutnost ovih oblika grafita u mikrostrukturi nodularnog lijeva negativno se odražava na njegova mehanička svojstva. Preniski sadržaji sumpora (<0,005 %) također nisu poželjni jer čestice magnezijeva sulfida predstavljaju mjesta za nukleaciju grafita. Primarna talina s niskim sadržajem sumpora imati slab odziv na nodularizaciju i cijepljenje u pogledu broja grafitnih nodula i nastanka karbida. Optimalni sadržaj sumpora kreće se od (0,008 do 0,015 %).<sup>[3]</sup>

**Fosfor** je nepoželjan element u nodularnom lijevu jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim (< 0,02 %). Kao i u sivom lijevu, stvara nisko topivi fosfidni eutektik (Fe<sub>3</sub>P) (slika 21) koji je poznat pod nazivom steadit koji se nakuplja po granicama zrna u obliku krhke i tvrde faze.<sup>[3]</sup>

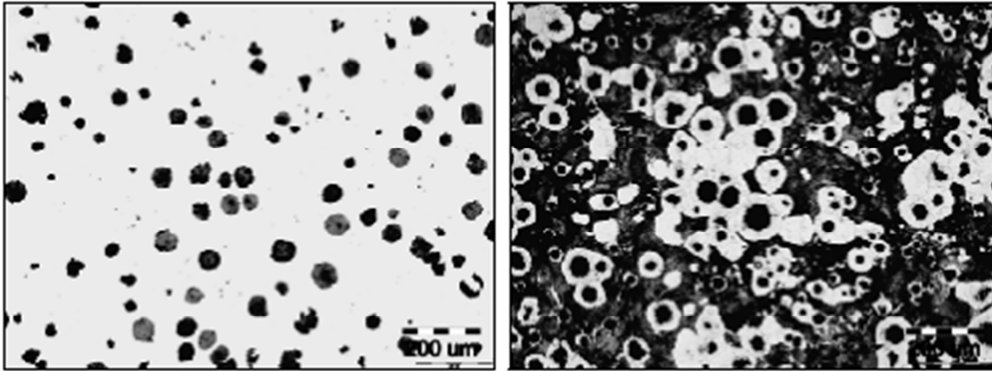


Slika 21. Metalografska snimka mikrostrukture uzorka taljevine nodularnog lijeva u nagriženom stanju (nital)<sup>[3]</sup>

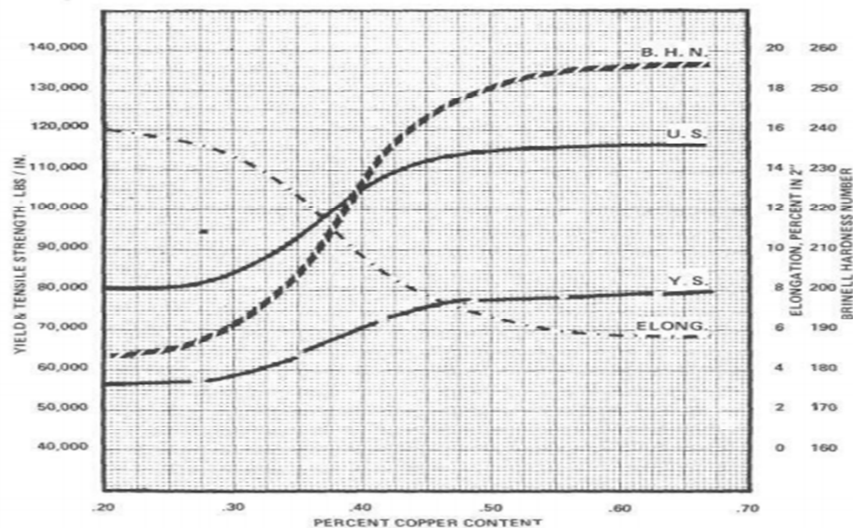
### 2.3.2 Utjecaj legirajućih elemenata

**Bakar** je grafizator i promotor nastajanja perlitne mikrostrukture. Dodaje se kada je potrebno postići potpuno perlitnu mikrostrukturu žilavog lijeva. Topljivost bakra u željezu iznosi oko 2,5 %, a kod perlitnih žilavih ljevova udio bakra bi trebao biti u granicama između 0,4 mas. % i 0,8 mas. %. Kao dodatak pojedinačnoj leguri, bakar povećava tvrdoću duktilnom željezu; ali

je u kombinaciji s molibdenom bakar znatno učinkovitiji. Kombinacije molibdena i bakra obično se koriste u proizvodnji odljevaka od čeličnog željeza.<sup>[9]</sup>



Slika 22. Metalografske snimke mikrostrukture perlitnog nodularnog lijeva (Cu = 0,48 %) u nenagrizenom (a) i nagrizenom (b) stanju (nital) pri povećanju 100x. Udio ferita 38,7 %, udio perlita 61,3 %, 80 nodula/mm<sup>2</sup>, nodularnost 70 %<sup>[3]</sup>



Slika 23. Utjecaj sadržaja bakra na mehanička svojstva nodularnog lijeva (vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i postotak izduženja te tvrdoću po Brinellu)<sup>[9]</sup>

Sa slike 23 vidljivo je da viši postotak bakra doprinosi povećanju vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i tvrdoće te smanjuje žilavost i elongaciju nodularnog lijeva.

**Kositar** je snažan promotor perlita u nodularnom lijevu, ali ne potiče stvaranje karbida čak ni na 0,15% udjela. Kositar je učinkovit kao promotor perlita jer se prvenstveno nakuplja na površini grafitnog sferoida i stoga ometa difuziju ugljika, čime se sprječava stvaranje ferita. U odnosu na bakar, kositar je ~ 10 puta efikasniji u stvaranju perlita. Zbog toga sadržaji od 0,03 do 0,08 %, što ovisi o debljini stjenke, već su dovoljni da se ostvari potpuno perlitna mikrostruktura. Budući da pospješuje stvaranje perlita, kositar povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva.<sup>[9]</sup>

**Molibden** se dodaje u lijevano željezo u jednu od dvije svrhe:

- za stvrdnjavanje - postizanje mikrostruktura bez perlita, bilo lijevanih ili nakon toplinske obrade (dodaje se do 1 %);
- za povećanje vlačne čvrstoće pri povišenoj temperaturi, čvrstoće pri pucanju i puzanju te otpornosti na toplinski zamor (sadržaj molibdena do 2%).

Molibden je blagi karbidotvorac pa ukoliko je prisutan u leguri u postotku od 0,5% ili više, može se očekivati nastanak karbida na granici zrna. Ovaj učinak stabilizacije karbida bit će naglašen segregacijom u polako učvršćujućim odljevima debelog presjeka i prisutnošću drugih elemenata za stabilizaciju karbida, poput Cr, Mn i V.<sup>[9]</sup>

**Nikal** se dodaje u žilavi ljev u postocima od 0,5 do 36%. Dodaje se u razne svrhe, uključujući sljedeće:

- za stvrdnjavanje - kako bi se izbjegla transformacija u perlit (dodaje se u postocima od 0,5-4%);
- za stabilnost austenita - za promicanje stabilnih mikrostruktura austenitne matrice (od 18-36%);
- za primjenu na niskim temperaturama - za razvoj feritnih željeza relativno visoke čvrstoće s niskim udjelom silicija (od 1-2%).

Nikal se obično dodaje u obliku metalnih niklenih kuglica (> 90% Ni) ili kao legure nikal-magnezij ili nikal-magnezij-silicij. Zbog visoke topljivosti Mg u niklu, legure nikla-magnezija otapaju se u rastaljenom željezu uz minimalno širenje i turbulenciju.

Nikal je topljiv u lijevanom željezu. To je element grafitiranja.<sup>[9]</sup>

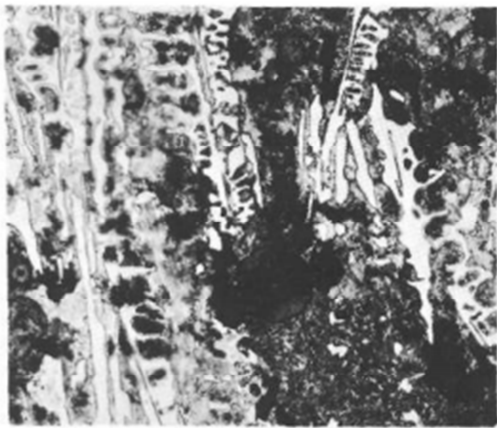
**Krom** je posebno djelotvoran karbidotvorac i promotor perlita u nodularnom željezu. Krom se u željezo uvodi kroz metalne nabojne materijale, posebno iz čelika gdje je element „lutalica“. U onim slučajevima u kojima se želi postojanje kroma iznad zaostale razine, krom se obično dodaje kao ferokrom. Razina tolerancije kroma ovisi o vrsti proizvedenog duktilnog željeza i strukturi matrice.<sup>[9]</sup>

**Vanadij** pokazuje učinak u duktilnom željezu sličan učinku kroma i može se koristiti u količinama do 0,02%, zajedno s niklom i molibdenom, za povećanje čvrstoće i tvrdoće lijevanih dijelova debljine iznad 7.62cm. Kao i krom, učinak je osjetljiv na veličinu presjeka, a masivni karbidi stvarat će se na razinama preko 0,20%.<sup>[9]</sup>

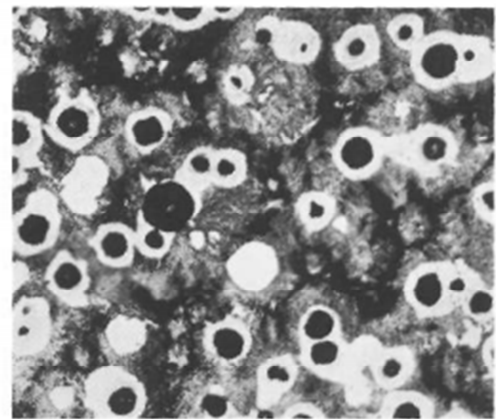
## 2.4 Cijepljenje nodularnog lijeva

Cijepljenje je kemijska modifikacija taline pomoću koje se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije pothlađenja i povećanja broja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja.<sup>[9]</sup> Cjepivo se dodaje u maloj količini u talinu željeznog lijeva prije ili za vrijeme lijevanja taline u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja. Zašto cijepiti nodularni lijev?

Cijepljenje je neophodan korak u proizvodnji duktilnog željeza. Necijepljeno, čisto željezo obrađeno magnezijem gotovo je uvijek potpuno karbidno, a istaloženi grafit je zbijen i nije uvijek sferoidan. Cijepljenje stoga treba provoditi pažljivo i precizno. Legure magnezija i ferosilicija sadrže jezgrene elemente, poput kalcija i cerija; željeza tretirana njima bit će znatno manje karbidna i stoga ih je lakše cijepiti.<sup>[9]</sup> Odgovarajuća inokulacija osigurava dovoljne centre nukleacije za skrućivanje u "sustavu grafit-plus-austenit". Općenito, što je veći stupanj nukleacije u nodularnom lijevu, to je veći broj, a manji i ujednačeniji po veličini i obliku bit će grafitni sferoidi. Također će biti manja tendencija taloženja karbida tijekom skrućivanja. Učinak cijepljenja je maksimalan odmah nakon dodavanja inokulanta i nije trajan. Gubitak učinka cijepljenja se događa s vremenom bez primjetnih promjena u sastavu metala.<sup>[9]</sup>



a)



b)

Slika 24. Metalografska snimka mikrostrukture a) necijepljenog nodularnog lijeva b) cijepljenog nodularnog lijeva<sup>[9]</sup>

Slika (24a) prikazuje primjer mikrostrukture necijepljenog nodularnog lijeva u kojoj se jasno mogu uočiti karbidi, dok slika (24b) prikazuje mikrostrukturu iste taljevine nodularnog lijeva nakon cijepljenja.



## 2.5 Postupci proizvodnje nodularnog lijeva

### 2.5.1 Postupci proizvodnje nodularnog lijeva metodama tretiranja magnezijem

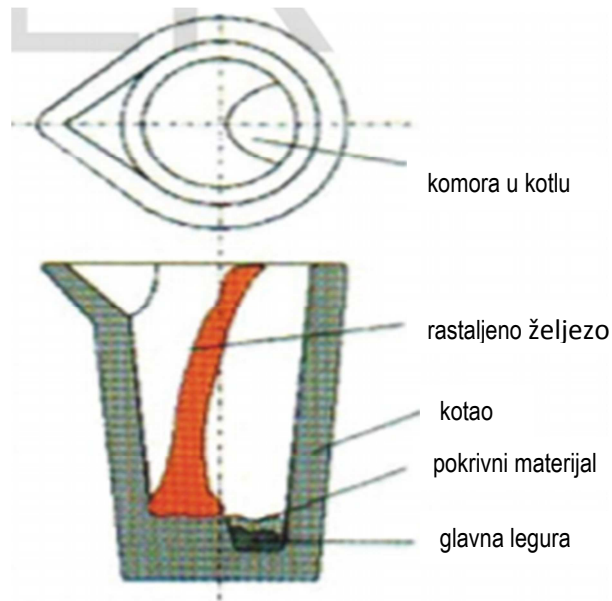
Dodavanje sferoidizirajućih sredstava u rastopljeno željezo vjerojatno je najvažniji pojedinačni korak u proizvodnji duktilnog željeza. Magnezij se koristi isključivo kao sferični element u komercijalnoj praksi, a često se dodaje s cerijem i drugim materijalima koji sadrže rijetke elemente. Magnezij i njegove legure imaju niske temperature isparavanja, pa se njihovo dodavanje rastopljenom željezu mora obaviti izuzetno pažljivo.

Postupci izrade:

- a) postupak obrade u otvorenom loncu („*Sandwich*“ postupak),
- b) postupak obrade u loncu s poklopcem („*Tundish Cover*“ postupak),
- c) postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom („*Osmose*“ postupak),
- d) postupak obrade punjenom žicom („*Cored Wire*“ postupak)
- e) postupak obrade u kalupu („*In Mould*“ postupak),
- f) postupak protjecanja („*Flotret*“ postupak).<sup>[9]</sup>

### 2.5.2 Postupak obrade u otvorenom loncu

„*Sandwich*“ postupak obrade u otvorenom loncu (engl. *Sandwich method*) jedan je od najčešće korištenih postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva.<sup>[8,11,12]</sup> Pomoću dugačkog lijevka predlegura FeSiMg određene granulacije stavlja se u džep kružnog poprečnog presjeka koji se nalazi na ili u dnu predgrijanog lonca i nakon toga pokriva se sitnom čeličnom strugotinom ili sa FeSi (slika 25). Pokrovni materijal djeluje kao fizička barijera između legure koja stvara nodulaciju i dolaznog rastaljenog željeza, što odgađa vrijeme reakcije, stoga povećava učinkovitost u smislu upotrebe legure, uporabe magnezija i smanjuje plamen i spaljivanje. Glavne značajke ove metode su fleksibilnost, niski troškovi, konzistentnost i jednostavnost.<sup>[3]</sup> Veće količine dima i prašine koji nastaju tijekom obrade i niže iskorištenje magnezija u odnosu na ostale srodne postupke obrade glavni su nedostaci tog postupka.<sup>[13]</sup>

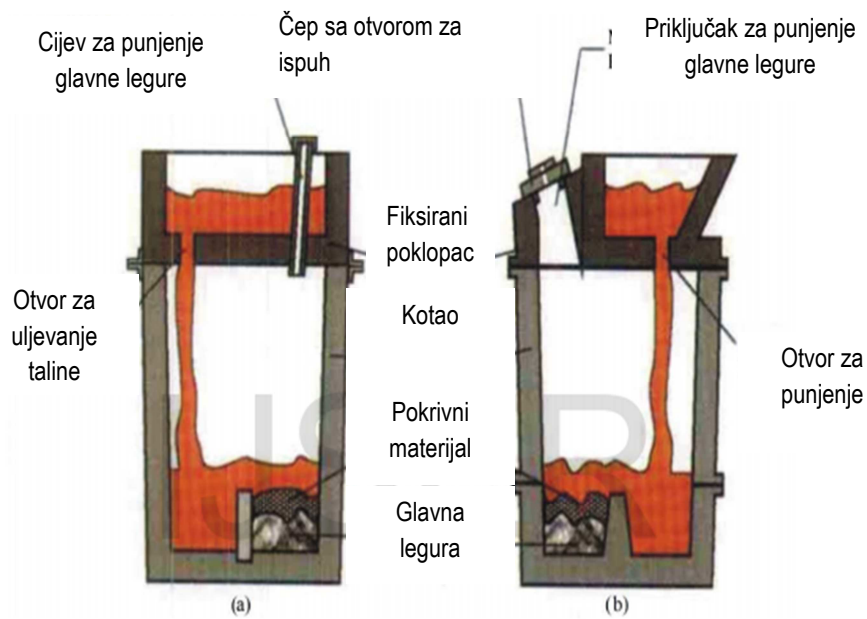


Slika 25. Shema Sandwich postupka<sup>[13]</sup>

### 2.5.3 Postupak obrade u loncu s poklopcem

Postupak obrade u loncu s poklopcem je daljnje poboljšanje prethodne metode koji ima za cilj smanjenje sadržaja kisika unutar lonca primjenom posebnog poklopca. Ovaj poklopac je izveden u obliku bazena za izlivanje (slika 26) s otvorom za punjenje lonca tekućim željezom i osiguravanje stalnog protoka. Poklopac na loncu onemogućuje odlazak para magnezija u atmosferu, što u konačnici rezultira većim iskorištenjem magnezija i boljim radnim uvjetima u ljevaonici. Poseban pregradni zid nalazi se na dnu kotla za odvajanje područja nodulirajućim materijalom i dio je koji se prvo mora napuniti kako bi se izbjeglo prerano otapanje glavne legure. Također je potreban materijal za prekrivanje, iako općenito u manjim količinama nego što se koristi u sendvič postupku.<sup>[13]</sup>

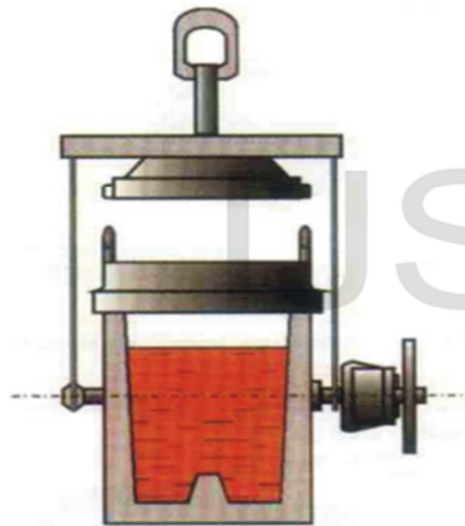
Ako se pravilno provede, postupkom obrade u loncu s poklopcem dobiva se povećano iskorištenje (do 80 %) i konzistentnije usvajanje magnezija, smanjuje se stvaranje troske, pad temperature taline, emisija dima (za ~ 90 %), dodatak predlegure i gubitak ugljika tijekom obrade te se eliminira bljeskanje i raspršivanje taline za vrijeme obrade.<sup>[14,15]</sup>



Slika 26 Lonci s fiksim poklopcem a) stari dizajn b) novi dizajn<sup>[13]</sup>

#### 2.5.4 Postupak u loncu s poklopcem za podizanje

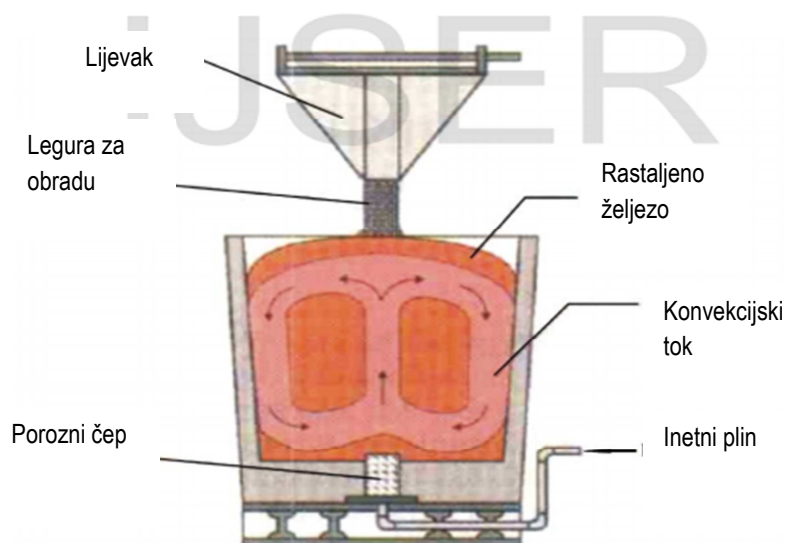
Ovaj postupak kombinira dostupnost otvorenog kotla s prednostima postupka obrade u loncu s poklopcem, kao što su visoka oporaba i sigurnost Mg. Poklopci za podizanje mogu se integrirati u kotao s zasebnim ušicama za podizanje ili konstruirati kao potpuno uklonjivi poklopac.<sup>[6]</sup>



Slika 27. Tundish cover postupak sa poklopcem za podizanje<sup>[13]</sup>

### 2.5.5 Postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom kroz porozni čep

Proces obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom kroz porozni čep (slika 28) temelji se na intenzivnom miješanju tekućeg željeza i glavne legure FeSiMg uvođenjem inertnog plina, obično dušika, kroz porozni čep na dnu lonca. Iz lijevka koji se nalazi iznad lonca ispušta se odgovarajuća količina predlegure za obradu na površinu taline u loncu. Inertni plin (najčešće dušik) uvodi se u lonac radi miješanja predlegure za obradu i taline. Inokulanti se također mogu dodati u posljednjih nekoliko sekundi ciklusa miješanja. Niski troškovi i mogućnost izvođenja odsumporavanja željeza s visokim udjelom sumpora, kao i njegovo nodulariziranje u istoj kupelji tijekom jednog ciklusa obrade, čine ovaj postupak prikladnim za lijevaonice s kupolom. Glavni nedostaci uključuju niski oporavak magnezija, koji obično ne prelazi 35%, zbog prekomjernog mjehurića koji potiče oksidaciju magnezija, te gubitke temperature povezane prvenstveno s mjehurićima. Trenutno se samo približno 5% duktilnog željeza proizvodi ovim postupkom.<sup>[13]</sup>

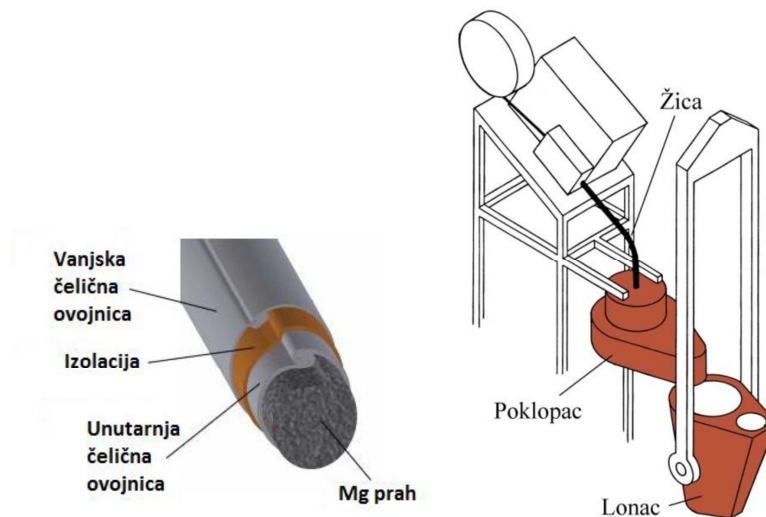


Slika 28. Proces poroznog čepa<sup>[13]</sup>

### 2.5.6 Postupak obrade punjenom žicom

Postupak obrade punjenom žicom (engl. *Cored wire treatment*) koristi predleguru FeSiMg ili čisti magnezij koji se u obliku punjenja nalaze u čeličnoj žici, tj. čeličnom omotaču u obliku cijevi promjera 9 do 16 mm<sup>[1,4,15]</sup> koja je namotana na kolut (slika 29a). Kroz poklopac na loncu žica se okomito injektira u primarnu talinu pomoću programiranog mehanizma (slika

29b). Brzina injektiranja žice mora se tako podesiti da što dublje prodire u talinu u loncu prije nego što se rastali (poželjno je da se rastali blizu dna lonca). Na taj način magnezij se unosi duboko u talinu. Postupak je automatiziran i omogućuje preciznu kontrolu zaostalog sadržaja Mg preciznim dodavanjem žice, a fleksibilan je s obzirom na kapacitet, sadržaj osnovnog željeza sumpora i temperaturne raspone. Oporavak Mg povećava se s smanjenjem sadržaja Mg u žici, a obično je u rasponu od 30- 50%.<sup>[13]</sup>



Slika 29. a) shematski prikaz čelične žice punjene magnezijem,<sup>[16,17]</sup>  
 b) shematski prikaz postupka obrade punjenom žicom<sup>[3]</sup>

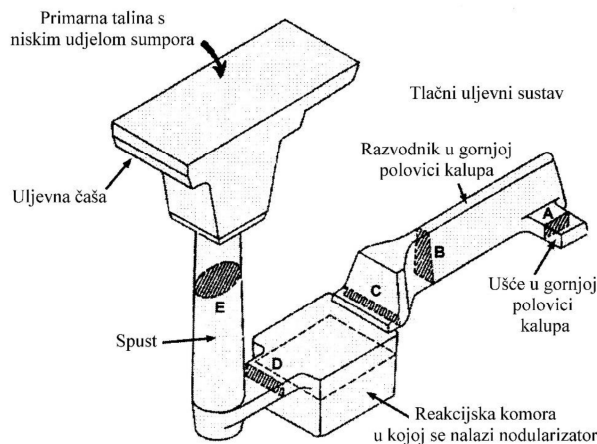
Prednosti postupka obrade punjenom žicom su:<sup>[16,18]</sup>

- može se direktno obrađivati primarna talina s visokim udjelom sumpora bez dodatka sredstava za odsumporavanje,
- smanjeno formiranje troske (manje čišćenja i duži trajanje vatrostalne obloge lonca),
- laka automatizacija i dobra kontrola procesa, bolja ponovljivost (manji utjecaj ljudskog faktora),
- manji dodatak magnezija u usporedbi s drugim postupcima,
- može se istovremeno provoditi obrada magnezijem i cijepljenje,
- može se proizvoditi nodularni lijev s niskim udjelom silicija,
- visoka produktivnost.

### 2.5.7 Postupak obrade u kalupu

Postupak obrade u kalupu (engl. *In-mould treatment*) shematski je prikazan na slici 16. Razvijen je u Engleskoj tijekom 70-ih godina prošlog stoljeća. Predlegura FeSiMg granulacije

od 1 do 4 mm koja obično sadrži lantan stavlja se u specijalnu reakcijsku komoru koja je sastavni dio uljavnog sustava.<sup>[19]</sup> Primarna talina ulijeva se direktno u uljevni sustav i obrađuje se kontinuirano dok teče kroz reakcijsku komoru prije ulaska u kalupnu šupljinu.

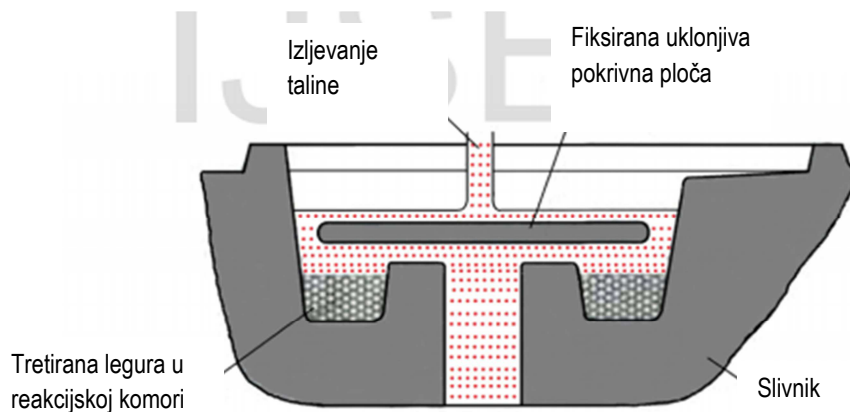


Slika 30. Shematski prikaz postupka obrade u kalupu

(A – kritični presjek; B = A + 10 %; C = A + 12 %; D = E = A + 30 %)<sup>[19]</sup>

Vrlo je važno da u predleguri bude što niži udio elemenata koji stvaraju trosku kako bi se smanjila mogućnost pojave nemetalnih uključaka troske u odljevcima. Upotrebom predlegure koja sadrži čisti lantan umjesto klasične smjese elemenata rijetkih zemalja smanjuje se sklonost nodularnog lijeva ka stezanju i povećava broj nodula.

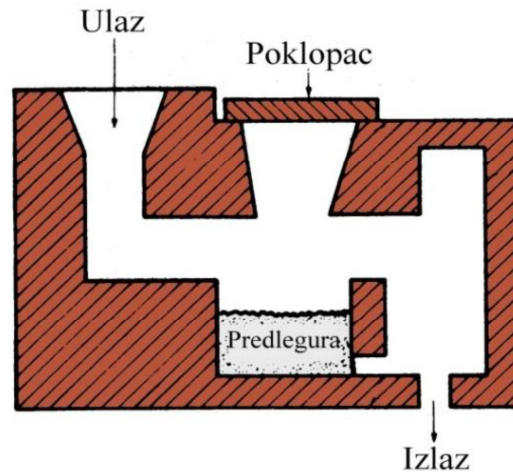
Budući da je inokulacija u kalupu pomoću reakcijske komore postala uobičajena praksa u lijevaonicama, najnoviji razvoj imao je za cilj poboljšati ovu metodu. Neki izumi opisuju reakcijsku komoru koja se nalazi izravno u bazenu za izlivanje. Inokulanti se stavljaju u posudu za izlivanje. U američkom patentu 4779668 (General Motors Corp) dvije su reakcijske komore smještene u bazi za izlivanje nasuprot otvora za mlaznicu, kako je prikazano na slici 31.<sup>[20]</sup>



Slika 31. In mould postupak<sup>[13]</sup>

## 2.6 Postupak obrade protjecanjem

Postupak obrade protjecanjem (engl. *Flow-through nodulizing process*) ili „*Flotret*“ postupak koristi sličan princip kao postupak obrade u kalupu, s razlikom da se reakcijska komora nalazi izvan kalupa. Predlegura FeSiMg stavlja se u reakcijsku komoru koja se nalazi u odvojenoj (samostalnoj) jedinici za obradu smještenoj između peći i kalupa ili lonca (slika 32). Primarna talina ulijeva se odozgo u jedinicu za obradu i obrađuje dok teče kroz reakcijsku komoru. Obradena talina izlazi na drugom kraju jedinice za obradu gdje se u mlaz dodaje cjepivo.



Slika 32. Shematski prikaz postupka obrade protjecanjem<sup>[21]</sup>

Slika 32 ilustrira primjer dizajna uređaja za protjecanje. Ova jedinica nalazi se između izvora tekućeg željeza, poput indukcijske peći bez jezgre, i cilindarskog lonca kao što je prijenosni lonac. Glavna legura koja sadrži magnezij puni se u reakcijsku komoru kroz otvor za punjenje, koji je dodatno zatvoren čime se ograničava pristup kisiku. Tekuće željezo ulijeva se u bazen za izlivanje, puni reakcijsku komoru koja sadrži glavnu leguru i obrađuje se dok prolazi kroz reakcijsku komoru postupnim uključivanjem i otapanjem čestica glavne legure. Promjer izlaznog otvora kontrolira protok željeza, što je vrlo važno za postizanje najboljih rezultata. Master legure koje sadrže 3-6% Mg obično se koriste za smanjenje reakcije. Korištenje baznog željeza s vrlo niskim sadržajem sumpora (manje od 0,02%) smanjuje količinu troske i poboljšava oporavak magnezija.<sup>[22]</sup>

### 3 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu dat je prikaz proizvodnje nodularnog lijeva u ljevaonici Brodosplit te izrada suhog veza za tankere od proizvedenog nodularnog lijeva. Također su prikazana i mehanička ispitivanja nodularnog lijeva kao i njegova mikrostruktura.

Brodosplit – Ljevaonica se bavi proizvodnjom odljevaka od sivog i nodularnog lijeva. Mogućnosti proizvodnje odljevaka od sivog lijeva su težinski do 30 tona, a za nodularni lijev do 8 tona. Način proizvodnje odljevaka je pojedinačni ili maloserijski. Način kalupiranja je ručni dok je postupak izrade kalupa na bazi furana. Od agregata za topljenje ljevaonica posjeduje kupolnu peć svijetlog otvora 1000 mm i kapaciteta topljenja 5 t / h i elektropeč sa dva lonca i jednim elektropostrojenjem.<sup>[23]</sup>

#### **Nodularni lijev**

Sastav šarže za proizvodnju nodularnog lijeva se sastoji od: čelika, niskomanganskog sivog sirovog željeza (sorel) i vlastitog kružnog materijala (povrata) od nodularnog lijeva. Za korekciju kemijskog sastava koristi se: karburit, ferosilicij, silikokarbid i bakar.

Odljevci čija pojedinačna bruto težina ne prelazi 1600 kg rade se postupkom osmoze, dok se teži odljevci rade sa Tundish postupkom.

**Osmotski postupak** sastoji u tome da se talina iz elektropeći napravljena po tehnološkom upustvu izlije u ljevački lonac. Potom se u talinu preko posebne naprave dozira definirana količina nodulatora i cjepiva. Na dnu lonca postoji difuzor kroz koji se pošta dušik. Propuhivanje dušikom traje do prestanka reakcije nodulatora i taline (prestanak plavičastog plamena). Nakon završetka procesa propuhivanja, talina je spremna za lijevanje odljevaka.

**Tundish postupak** se radi u posebnim loncima namijenjenim za ovu metodu rada. Na dnu lonca postoji komora u koju se smješta definirana količina cjepiva i nodulatora koja se prekrije sa strugotinom od strojno obrađenih odljevaka nodularnog lijeva. Na lonac se postavlja specijalno konstruirani poklopac sa uljevnom čašom kroz koji se izlijeva talina iz elektropeći peći u tundish lonac. Za vrijeme punjenja lonca započinje reakcija. Kada se lonac napuni s točno određenom količinom taline i kada se više ne vide plavkasti plamičci na sastavu poklopca i lonca proces noduliranja je završen. Talina se preljeva u lonac za lijevanje uz istovremeni sekundarni dodatak cjepiva u mlaz taline. Po završetku prelijevanja talina je spremna za lijevanje odljevaka.<sup>[23]</sup>





Slika 33. Prazna elektropeć<sup>[24]</sup>

Kapacitet svakog lonca je 6 tona. Proces taljenja se ne može odvijati istovremeno u oba lonca nego samo pojedinačno.



Slika 34. Kotao za proces lijevanja<sup>[24]</sup>

### 3.1 Postupak izrade nodularnog lijeva

Postupak započinje odabiranjem sirovine definirane težine koja se doprema vlakićem u ljevaonicu.



Slika 35. Sirovina nisko manganskog željeza u vagonu vlakića<sup>[24]</sup>

Dizalica zahvaća vagon i istresa sirovinu izravno u peć u kojoj se nalazi startni blok bez kojeg peć ne bi mogla upaliti.



20210217\_094506.mp4

Video 1. Punjenje peći sirovinom(nisko manganskim željezom)<sup>[20]</sup>

Peć se puni staklom koje bi držalo talinu od ruba peći odvojeno zbog mogućih nečistoća, staklo služi kao izolator taline od ruba peći.



Slika 36. Vrh peći napunjen staklom<sup>[24]</sup>

Elektropeć se zagrijava do 1400 °C, očisti se šljaka i doda 0,6% SiC.

Temperatura se prati pomoću termometra koji se uranja u talinu, a rezultat se očitava na računalu.



Slika 37. Upaljena elektropeč sa svim sastojcima<sup>[24]</sup>



Slika 38. Računalo na kojem se očitava temperaturu<sup>[24]</sup>

Čim se postigne radna temperatura radnik uzima uzorak taline izravno iz peći te je izlije u kalup i pusti da se ohladi i stisne.



Slika 39. Kalupi za uzorak taline<sup>[24]</sup>

Uzorak taline se odnosi u radionicu gdje se strojno obrađuje (brusi i kida u finije dijelove) te se vrši ispitivanje svojstava na kvantometru i uređaju za određivanje sadržaja sumpora i ugljika (slike 40 i 41) gdje se dobiju podaci o udjelima pojedinih elemenata u talini. Na temelju rezultata analize može se utvrditi koliko je još potrebno dodati pojedinih komponenti da bi se dobio ciljani kemijski sastav taline.

Ciljani kemijski sastav (u peći) postiže se dole navedenim udjelima u tablici 2

Tablica 1 Tablica ciljanog kemijskog sastava taline u peći<sup>[23]</sup>

C%	Si%	Cu%	Struktura šarže za peć
3.8-3.85	1.35-1.4	NL50 0.2-0.25 NL60 0.3-0.35 NL70 0.7-0.80	20% čelika 40% povrata(ako ga ima) 40% NMnFe



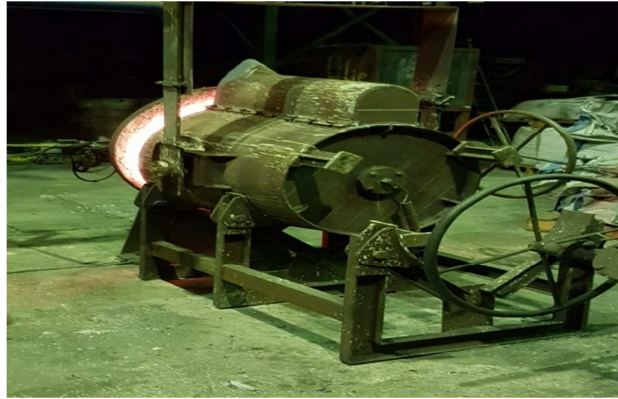
Slika 10. Kvantometar<sup>[24]</sup>



Slika 41. Uređaj za određivanje sadržaja ugljika i sumpora<sup>[24]</sup>

Temperatura u peći se diže na 1440 °C, ukloni se šljaka i prema analizi izvrši korekcija taline na ciljani kemijski sastav. Slijedi zagrijavanje taline u peći na 1480 °C, uklanjanje šljake i

hlađenje taline na 1420 °C. Zatim se talina izlije u lonac (produženi ili normalni) i izvrši propuhivnje taline cca. 2 min, a prije toga se vrši zagrijavanje kotlova do temperature taline 1420 °C.



Slika 42. Zagrijavanje kotlova otvorenim plamenom<sup>[24]</sup>



Slika 43. Ulijevanje taline u kotao<sup>[24]</sup>

Kada se kotao napuni talinom, u talinu se preko posebne naprave dozira definirana količina nodulatora i cjepiva. Prije izlijevanja taline u lonac isti zagrijati na plinu te u tako zagrijani lonac ubaciti nodulator (BJOMET 8 – 1,6% ili 62 kg) na nodulator staviti cjepivo (BARINOK – 0,25% ili 10 kg). Sve zajedno prekriti sa 11 kg špene od nodularnog odljevka. Istovremeno ubaciti u dozator kod kupole 18 kg BARINOKA ili 0,45% na masu taline. Talinu iz Tandish lonca priliti u lonac od 6 t uz cijejpljenje. Na dnu lonca postoji difuzor kroz koji se propušta dušik. Izvrši se propuhivanje taline oko 2 min. Propuhivanje sa dušikom traje do prestanka reakcije nodulatora i taline (prestanak plavičastog plamena).<sup>[23]</sup>



Slika 44. Propuhivanje taline dušikom u svrhu miješanja taline, nodulatora i cjepiva<sup>[24]</sup>

Nakon završetka procesa propuhivanja odstrani se šljaka i talina je spremna za lijevanje odljevaka ali se prvo odlije dio taline da se maknu nečistoće s „nosa“ kotla, a odljevna talina se koristi kao startni blok za iduće lijevanje. Nakon odlijevanja prve pozicije odlije se epruveta. Epruvete od NL 40 pospu se Lunkeritom a ostale se ne posipaju.

Lunkerit je sastojak koji se posipa po epruветama kako bi se ostvarilo brže hlađenje odnosno brže stiskanje epruветa da bi mogli u kraćem vremenu ispitati mehanička i metalografska svojstva ljevova.<sup>[23]</sup>



Slika 45. Odljevanje taline za startni blok<sup>[24]</sup>

Nakon odlijevanja taline za startni blok talina se izlijeva u kalupe za suhi vez. Na ulazu u kalup postoji kugla koja u početku sprječava da talina prodre u kalup i na taj način nečistoće isplivaju na vrh te se jednostavno uklone zalijepivši se za kuglu.



Slika 46. Kugla blokira ulaz taline u kalup<sup>[24]</sup>

Tokom izlivanja taline bitno je potpaliti rubove kalupa da plinovi koji se razvijaju izgore.



20210212\_010110.mp4

Video 2. Postupak lijevanja u kalupe<sup>[24]</sup>

Nakon završetka lijevanja lonac se čisti a kalupi ostave da očvrstnu na zraku nekoliko dana.



Slika 47. Gotovi odljevak suhog veza<sup>[24]</sup>

Odljevci se šalju na završne obrade kidanja, brušenja i bojanja te su takvi spremni za isporuku.

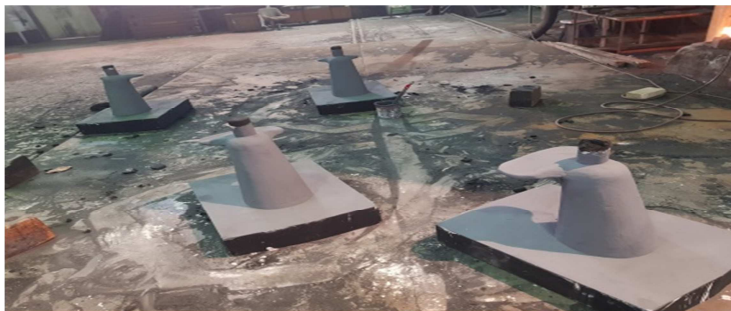
### 3.2 Izrada kalupa za odljevke

Oblikovanje odljevaka se obavlja ručno.



Slika 48. Kalup za izradu centralne jezgre<sup>[24]</sup>

Pijesak u smjesi sa kiselinom i smolom puni se u drvene kalupe i ostavlja da se smjesa stisne dok ne dobije čvrst oblik.



Slika 49. Centralne jezgre za izradu suhog veza<sup>[24]</sup>

Mješavina za izradu kalupa priprema se u automatiziranom mješaču (mikseru).



Slika 10. Mješač kiseline, smole i pijeska<sup>[24]</sup>

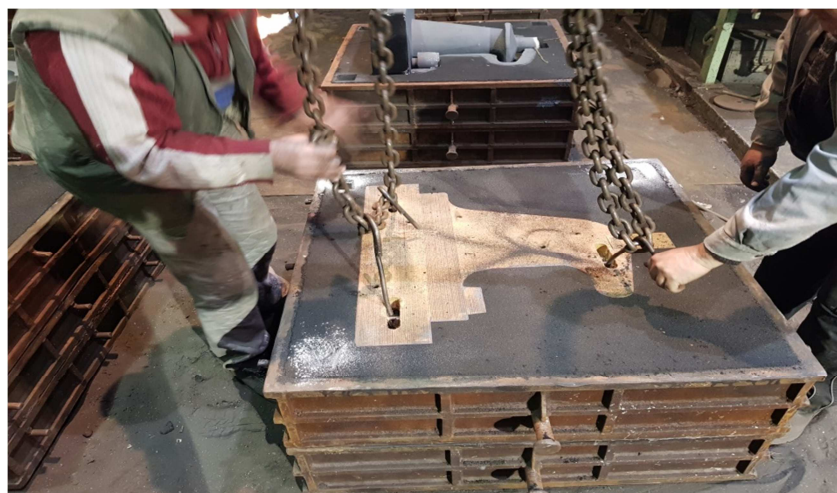
U mikser dolazi najprije pijesak kroz posebnu cijev sa mogućnošću reguliranja protoka, sa specijalnim gumenim crijevima preko pumpi vrši se dobava smole i kiseline. Omjeri pijesak, smola i kiselina se mogu točno podešavati, a sve prema tehnološkom uputstvu.



Iz miksera preko pužnog vijka mješavina se dozira u kalupnik u kojem se kalupira dotični odljevak.<sup>[23]</sup>



Slika 51. Punjenje kalupa mješavinom za izradu kalupa<sup>[24]</sup>



Slika 52. Skidanje drvenih jezgri<sup>[24]</sup>

Zbog boljeg ulijeganja i sigurnosti na kalupe su dodatno izrađeni utori pa tako imamo donji i gornji kalup.



a)



b)

Slika 53. Izgled gornjeg (a) i donjeg (b) kalupa<sup>[24]</sup>

Nakon skidanja drvenih modela iz kalupa prijašnje izrađene centralne jezgre stavljaju se u sredinu kalupa.



Slika 54. Postavljena centralna jezgra u donji kalup<sup>[24]</sup>

Nakon postavljanja centralne jezgre gornji kalup se ponovo vraća na donji i pazi se da dobro nasjedne na utore te su kalupi spremni za lijevanje.



Slika 55 Postupak lijevanja<sup>[24]</sup>

### 3.3 Ispitivanja nodularnog lijeva

Ispitivanje se vrši u svrhu ispitivanja kvalitete nodularnog lijeva i mehaničkih svojstava. Za ispitivanje nodularnog lijeva koristi se epruvete dobivene postupkom lijevanja u posebne kalupe za epruvete.



Slika 56 Kalupi za ispitne epruvete.<sup>[24]</sup>

Ispitivanja koja se izvode su mehanička ispitivanja i metalografska ispitivanja.

### 3.4 Metalografska ispitivanja

Vrše se u cilju ispitivanja strukture metala i legura sa različitim uređajima kojima se princip rada temelji na povećanju metalne površine od 20 za makroskopsko i do 2000 puta za mikroskopsko ispitivanje čime se detektira veličina kristalnog zrna, prisutne faze, kemijsku homogenost, raspodjelu faza, deformacije strukture nastale nakon plastične deformacije materijala, debljinu i strukturu površinskih prevlaka, određivanje pukotine i načina loma.

Ispitivanja započinju pripremom uzorka.<sup>[25]</sup>

Priprema uzorka metala za metalografsku analizu se sastoji od: uzimanja (izrezivanja) reprezentativnog uzorka iz osnovnog materijala (ili oštećenog materijala), pripremanja početne ravne površine uzorka i brušenja uzorka, umetanja uzorka u polimernu smolu, poliranja površine uzorka, odmaščivanja, ispiranja i sušenja površine, kemijskog nagrivanja površine (Nital), ispiranja i sušenja površine uzorka.<sup>[26]</sup>

Brušenje se vrši na metalografskoj brusilici na kojoj se postavi zadani broj okretaja i hladi vodom. U metalografiji i metalurgiji poliranje se koristi za stvaranje ravne površine bez defekata za ispitivanje mikrostrukture metala pod mikroskopom.<sup>[25]</sup>

Nagrivanje se najčešće provodi Nitalom (Nital je otopina dušične kiseline i alkohola koja se obično koristi za nagrivanje metala). Posebno je pogodan za otkrivanje mikrostrukture ugljičnih čelika, alkohol može biti metanol, etanol ili metilirani alkohol.)<sup>[26]</sup>

Nakon pripreme vrši se ispitivanje površine metalografskim mikroskopom gdje se dobiju uvećane slike površine metala.

### 3.5 Ispitivanje mehaničkih svojstava

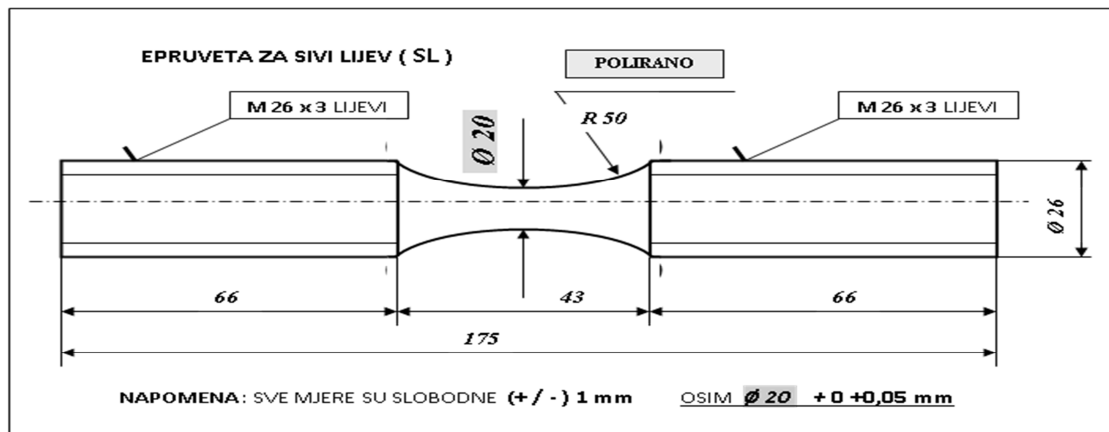
U ispitivanje mehaničkih svojstava spada ispitivanje čvrstoće (statičko vlačno ispitivanje) odnosno „*tensile test*“ i ispitivanje tvrdoće po Brinellu.

Provedbom ispitivanja čvrstoće materijala dobiju se podatci o granici razvlačenja, zateznoj čvrstoći i izduženju. Granica razvlačenja je naprezanje pri kojem se materijal trajno produlji odnosno ne vraća se u prvobitno stanje. Zatezna ili vlačna čvrstoća je otpor materijala na određenu vrijednost vanjskog naprezanja odnosno koliko naprezanje materijal može podnijeti prije nego nastane trajni lom. Izduženje odnosno elongacija prije loma je posljedica vlačnog naprezanja materijala pri kojem se materijal trajno produži za određeni postotak prvotne dužine prije no što pukne.

Uređaj na kojem se ispituje epruveta vlačnim naprežanjem zove se kidalica.<sup>[27]</sup>

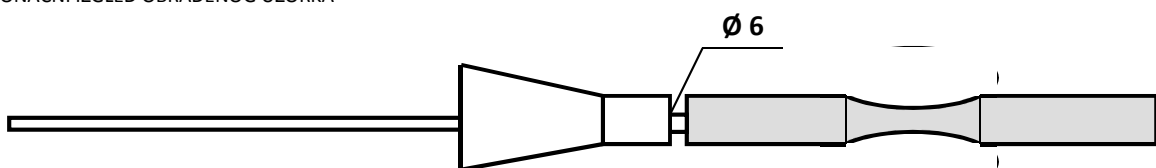


Slika 57. Ispitna kidalica<sup>[27]</sup>



Slika 58. Izgled epruvete za statičko vlačno ispitivanje<sup>[23]</sup>

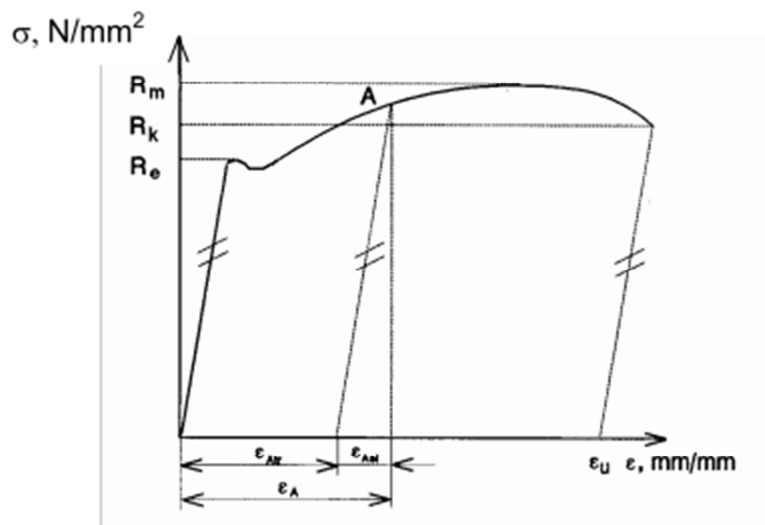
KONAČNI IZGLED OBRADENOG UZORKA



Slika 59. Izgled obrađenog uzorka<sup>[19]</sup>

Određivanje čvrstoće materijala provodi se na način da se pripremljena ispitna epruveta postavi u čeljusti kidalice nakon čega se primijeni kontinuirano vlačno opterećenje sve do loma epruvete. Budući da u svakom tijelu opterećenje odnosno proizvedeno naprezanje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom pokusu epruveta produljivati. Stoga se pri statičkom vlačnom ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na

kidalici se na monitoru ili pisaču za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram sila-produljenje,  $F-\Delta L$ , koji se naziva i dijagramom kidanja. Produljenje  $\Delta L$ , mm predstavlja povećanje razmaka  $L_0$  koji je naznačen na epruveti prije ispitivanja. U početku ispitivanja se javlja elastična deformacija u području u kojem vrijedi Hookeov zakon. Daljnjim povećanjem napreznja dolazi do trajne plastične deformacije, suženja presjeka na jednom mjestu ispitne epruvete i konačno do loma epruvete. Promjene u ponašanju materijala mogu se pratiti u realnom vremena na dijagramu ovisnosti napreznje – istežanje (slika 60.) iz kojeg se određuju karakteristične veličine kao što su granica razvlačenja, vlačna (zatezna) čvrstoća i konačno napreznje kod kojeg dolazi do loma epruvete.



Slika 60. Dijagram napreznje-istežanje za "meki" konstrukcijski čelik<sup>[28,29]</sup>

Dijagram  $\sigma-\epsilon$  počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke-ovim pravcem. U tom području napreznja materijal je deformiran isključivo elastično i u slučaju rasterećenja ne dolazi do trajne deformacije, tj. razmak mjernih točaka na epruveti jednak je  $L_0$ . Nakon što napreznje u materijalu (u ovom slučaju "mekom" čeliku) dostigne vrijednost  $R_e$  - granice razvlačenja, on počne teći bez povećanja napreznja. Granica razvlačenja je po definiciji jednaka:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N mm}^{-2} \quad (1)$$

Materijal nakon prijedene granice razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija, te u ovom području i nakon rasterećenja zaostaje deformacija u materijalu.

Napreznje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N mm}^{-2} \quad (2)$$

Nakon dostignute vrijednosti  $R_m$ , deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj njoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje tzv. vrat.

Naprezanje kod kojeg epruveta puca naziva se konačnim naprezanjem i jednako je:<sup>[28,29]</sup>

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N mm}^{-2} \quad (3)$$

### Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanje tvrdoće se odvija na tvrdomjeru odnosno uređaju za ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu.



Slika 61. Ispitivanje tvrdoće pomoću tvrdomjera<sup>[21]</sup>

Ispitivanje spada u metode bez razaranja i koristi se za srednje tvrde i meke materijale.

Tvrdoća po Brinellu se primjenjuje za sve metalne konstrukcijske materijale, čija tvrdoća ne prelazi 450 HB, ako se ispituje sa zakaljenom čeličnom kuglicom ili HBS (engl. *Hardness Brinell Steel indenters*), odnosno do 650 HB, ako se koristi kuglica od tvrdog materijala (volframov karbid) ili HBW (engl. *Hardness Brinell Wolfram carbide*). To znači da je Brinellovim postupkom moguće mjeriti tvrdoću elastoplastičnih materijala do 4500 N/mm<sup>2</sup>, jer je tvrdoća zakaljene čelične kuglice od 6500 do 7000 N/mm<sup>2</sup>. Postupak se izvodi utiskivanjem metalne kuglice određenog promjera i dubine u metalni materijal poznatom silom do uspostavljanja ravnoteže između kuglice i materijala.

Izmjeri se otisak kuglice i izračuna tvrdoću preko formule.<sup>[28,29]</sup>

$$HB(\text{tvrdoća po Brinellu}) = \frac{\text{Poznata sila utiska}}{\text{površina utiska kuglice u materijalu}}$$

## 4 REZULTATI ISPITIVANJA I RASPRAVA

### 4.1 Kemijski sastav uzoraka nodularnog lijeva

Tablica 2. Kemijski sastav nodularnog lijeva<sup>[23]</sup>

Uzorak	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
1A1N	3.63	2.57	0.35	0.024	0.018	0.8	0.040
2A1N	3.62	2.59	0.37	0.02	0.017	0.81	0.044
3A1N	3.62	2.53	0.36	0.028	0.017	0.8	0.041
4A1N	3.61	2.66	0.37	0.023	0.017	0.81	0.041
1A2N	3.63	2.50	0.34	0.029	0.02	0.82	0.040
2A2N	3.67	2.49	0.31	0.03	0.018	0.82	0.040
3A2N	6.63	2.59	0.34	0.03	0.017	0.81	0.041

Tablica 3. pokazuje udjele pojedinih elemenata u nodularnom lijevu. Udio ugljika i silicija se odabire iz preferiranog područja Handersonovog dijagrama, mangan se drži u rasponu od (0.31 do 0.37%) jer je u tom rasponu jaki promotor perlita, fosfor se drži u jakom malom udjelu u rasponu od (0.02 do 0.03%) jer uzrokuje krhku fosfidnu (steaditnu) mrežu koja negativno utječe na žilavost. Sumpor se drži u još nižem udjelu od fosfora u rasponu od (0.017 do 0.02%) jer ima tendenciju reagiranja s magnezijem te stvara MgS koji uz prisustvo kisika oksidira u MgO i sa silicijem stvara MgSiO<sub>3</sub> (magnezijev silikat) što nije poželjno jer stvaraju šljaku. Udio bakra drži se u visokom udjelu jer je grafizator i promotor perlita. Magnezij dodan u talinu služi kao antioksidans, odsumporivač i promotor grafita, a njegov udio je usko vezan sa udjelom sumpora stoga ako je viši udio sumpora mora se dodati viši udio magnezija da se sumpor ukloni.

## 4.2 Rezultati mehaničkih ispitivanja

Tablica 3. Rezultati mehaničkih ispitivanja nodularnog lijeva<sup>[23]</sup>

RASTEZANJE / TENSILE TEST Standard: EN ISO 6892-1 / EN ISO 4136										Tvrdća HARDNESS Standard EN ISO 6506-1 HB EN ISO 6508-1 HRC
Broj No	Mjere prije prekida Original cross section		Granica razvlačenja Yield strenght		Zatezna čvrstoća Tensile strenght		Izduženje elongation after fracture			
	Veličina Size (mm)	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	F <sub>0</sub> (kN)	R <sub>0H</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	F <sub>m</sub> kN	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Mjerena dužina L <sub>0</sub> (mm) L <sub>a</sub> (mm)		A;A %	
1A1N	15	176.6	79	447	127	719	75	78	4	270
2A1N	15	176.6	100	566	130	736	75	79	5.3	265
3A1N	15	176.6	94	532	124	702	75	78	4	265
4A1N	15	176.6					75			263
1A2N	15	176.6	92	521	124	702	75	78	5.3	275
2A2N	15	176.6	84	476	125	706	75	79	5.3	270
3A2N	15	176.6	91	515	113	640	75	79	5.3	274
4A1N	15	176.6	81	458	126	713	75	78	4	260
3A2N	15	176.6	76	430	127	719	75	79	5.3	259

<sup>1</sup>Sve su epruvete iz tablice zadovoljile standard EN ISO 6892-1 / EN ISO 4136 koji zahtjeva da je granica razvlačenja minimalno 420 N/mm<sup>2</sup>, zatezna čvrstoća minimalno 700 N/mm<sup>2</sup>, izduženje minimalno 2% i tvrdoća po Brinellu (HB 225-305).

## 4.3 Rezultati metalografskih ispitivanja

Na slici 62 prikazana je mikrostruktura površine žilavog lijeva.



Slika 62. Metalna površina uzorka pod svjetlosnim mikroskopom u nenagriženom stanju uvećana 200 puta<sup>[23]</sup>

Sa slike 62 se može vidjeti visoka nodularnost nodularnog lijeva, nodule su pravilnog oblika i poželjnih malih dimenzija što povoljno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva u smislu velike žilavosti, zatezne čvrstoće, granice razvlačenja te izduženja. Sastav nodularnog lijeva je 70% perlita i 30% ferita.



## **5 ZAKLJUČAK**

U ovom završnom objašnjen je i prikazan postupak dobivanja nodularnog lijeva njegova svojstva i izrada suhog veza za tankere uz propisanu normu.

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno izraditi nodularni lijev te od njega napraviti suhi vez za tankere i ispitati odgovara li lijev kemijskim sastavom, mikrostrukturom i mehaničkim svojstvima normi EN-ISO 6892-1/EN-ISO 4136. Odliveni su ispitni uzorci za analizu kemijskog sastava, analizu mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih svojstava. Rezultati ispitivanja pokazali su da proizvedeni lijev odgovara svim zahtjevima normi EN-ISO 6892-1/EN-ISO 4136.

## 6 LITERATURA

- [1] *H. Požar*, Tehnička enciklopedija, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [2] *B. Bauer, I. Mihalic Pokopec*, Ljevarstvo i prerada polimera, Sveučilište u Zagrebu, FSB Zagreb, 2016.
- [3] *F. Unkić, Z. Glavaš*, *Lijevanje željeznih materijala*, Metalurški fakultet u Zagrebu, [www.simet.unizg.hr](http://www.simet.unizg.hr), 2008.
- [4] *J. Janđel*, Nodularni lijev – proizvodnja, svojstva i primjena, Diplomski rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2011.
- [5] HRN EN ISO 945:2002 – Hrvatska norma: Željezni lijev – Označavanje mikrostrukture grafita, 2002.
- [6] *N. Čatipović*, Utjecaj bakra i toplinske obrade na svojstva izotermički poboljšanog žilavog lijeva, Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2019.
- [7] *I. Žmak*, Modeliranje strukture i svojstava žilavog lijeva neuronskim mrežama, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [8] *M. Gagne*, The Sorelmetal book of ductile iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montral, Kanada, 2004.
- [9] *Al Alagarsamy, D. B. Craig, R. B. Gundlach, H. Henderson, H. Kind, B. V Kovacs, R. Kryzanek, C. R. Loper Jr, R. Neuman, W. L. Powell, W. Spear, D. M. Stefanescu, T. Stoecker, N. Wukovich, T. Zeh*, Ductile iron handbook, 1992.
- [10] Hrvatska norma HRN EN 1563:2011: Ljevarstvo – Nodularni ljevovi.
- [11] *W. A. Henning, J. Mercer*, Ductile Iron Handbook, American Foundry Society, Inc., Illinois, USA 2010.
- [12] Elkem Foundry Products, The “Sandwich Pocket Process”, Technical Information 11, <https://wenku.baidu.com/view/bdb0cb8502d276a200292e82> (pristupljeno 30. 8. 2021)
- [13] *Y. S. Lerner, G. V. Panteleev*, Magnesium Treatments in Ductile Iron Production – Part 2, Foundry Management and Technology, 131(2) (2003) 24-29.
- [14] *I. C. H. Hughes*, Ductile Iron, in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, USA, 1988., 647 - 666.
- [15] Elkem Foundry Products, Tundish Cover Ladle Nodularizing, Technical Information 10, <http://documents.mx/documents/technical-information.html> (pristupljeno 30. 8. 2021)
- [16] *O. Bahuon*, Technical Overview of Cored Wire for Ductile Iron Treatment, Proceedings book of 11th International foundrymen conference, ed. F. Unkić, Opatija, 28 – 29 April 2011.

- [17] *Y. S. Lerner, G. V. Panteleev*, Magnesium Treatments in Ductile Iron Production – Part 1, *Foundry Management and Technology*, 130(8) (2002) 25-31.
- [18] *P.-M. Cabanne*, Magnesium Cored Wire Treatment Advantages and Disadvantages vis-à-vis Other Processes, Suggestions for ductile iron production 109, ([http://www.sorelmetal.com/en/publi/PDF/109\\_\(2006\).pdf](http://www.sorelmetal.com/en/publi/PDF/109_(2006).pdf)).
- [19] Elkem Foundry Products, In-the-Mould Nodularising, Technical Information 35, <https://www.scribd.com/document/29138112/In-the-Mould-Nodular-is-Ing> (pristupljeno 30. 8. 2021)
- [20] *E. R. Nagel, T. J. Gray*, Treatment of Cast Metal in Cope Mould Pouring Basin, Patent US4779668, 1988
- [21] *F. Kumer*, Postupci obrade magnezijem za proizvodnju nodularnog lijeva, Završni rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [22] *Y. S. Lerner, L. S. Aubrey, D. Craig*, In Mould Treatment Processes in Iron Foundry Practice, *Foundry Trade Journal*, vol. 9, pp. 24-31, 2001.
- [23] *T. Ugrina, R. Čopić, A. Marjanović*, Brodosplit, tvornica dizel motora doo., Tehnološke upute(interni materijali).
- [24] *I. Bešić*, vlastite fotografije napravljenje u ljevaonici Brodosplita tijekom izrade završnog rada
- [25] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Metalografija#cite\\_note-4](https://hr.wikipedia.org/wiki/Metalografija#cite_note-4) (pristupljeno 2. 9. 2021.)
- [26] <https://en.wikipedia.org/wiki/Nital> (pristupljeno 2. 9. 2021.)
- [27] *Anita Matijaš*, <https://skveranka.com/2016/02/29/brodosplit-laboratorij/>, (pristupljeno 17.7.2021.)
- [28] *M. Franz*, Materijali I – 3. dio, Autorizirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, FSB Zagreb, 2005.
- [29] *Z. Kolumbić, M. Dunder*, Materijali, Udžbenik, Sveučilište u Rijeci, Alfa d.d. Zagreb, 2010.

## **Prilozi**

Video1. Punjenje peći sirovinom(niskomanganskim željezom) 29

Video2. Postupak lijevanja u kalupe 34