

# Utjecaj manjinskih elemenata na mikrostrukturu debelostjenih odljevaka od nodularnoga lijeva

---

Godinić, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:907224>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 046/STR/2021

**Utjecaj manjinskih elemenata na  
mikrostrukturu debelostjenih odljevaka od  
nodularnoga lijeva**

Juraj Godinić

Varaždin, rujan 2021.



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Diplomski sveučilišni studij Strojstvo**



DIPLOMSKI RAD br. 046/STR/2021

**Utjecaj manjinskih elemenata na  
mikrostrukturu debelostjenih odljevaka od  
nodularnoga lijeva**

Student:  
Juraj Godinić, 0789/336D

Mentor:  
Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, rujan 2021.

## Prijava diplomskog rada

### Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRESTUPNIK	Juraj Godinić	IMBAG	0789/336D
DATUM	13.9.2021	KOLEGIJ	Metode ispitivanja materijala i konstrukcija
NASLOV RADA	UTJECAJ MANJINSKIH ELEMENATA NA MIKROSTRUKTURU DEBELOSTJENIH ODLJEVAKA OD NODULARNOGA LIJEVA		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of the micro elements on the microstructure of the thick-walled nodular cast iron castings		
MENTOR	izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić	ZVANJE	izvanredna profesorica
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Matija Bušić, predsjednik povjerenstva 2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentorica 3. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, član 4. doc.dr.sc. Zlatko Botak, rezervni član 5.		

### Zadatak diplomskog rada

BROJ	046/STR/2021
OPIS	<p>U diplomskom radu potrebno je u teorijskom dijelu opisati svojstva, primjenu i način dobivanja nodularnog lijeva. Potrebno je temeljitije prikazati utjecaj kemijskog sastava nodularnog lijeva na svojstva odljevaka te načine kontrole kemijskog sastava. Posebno je potrebno obraditi nepravilne oblike grafitu koji se mogu pojaviti pri lijevanju, posebno debelostjenih odljevaka, s naglaskom na chunky grafit i utjecajne faktore za nastanak istog.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi model i kalup za izradu ispitnih uzoraka oblika kocke kako bi se dobila simulacija debelostjenih odljevaka. U programskom alatu NovaCAST potrebno je napraviti simulaciju tijeka lijevanja i skrućivanja.</p> <p>Potrebno je proizvesti osam uzoraka s varijacijama kemijskog sastava te na uzorcima standardnim metodama pratiti i analizirati kemijski sastav, napraviti toplinsku analizu te nakon skrućivanja i hlađenja pripremiti uzorke za metalografska ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava, vlačne čvrstoće i istezljivosti.</p> <p>Nakon provedenih analiza mikrostrukture i ispitivanja mehaničkih svojstava potrebno je analizirati rezultate i donijeti zaključak.</p>

ZADATAK URUČEN 13.09.2021.



POTRIS MENTORA

Sanja Šolić

Sveučilište  
Sjever

UNIVERSITY  
OF NORTH  
DAKOTA

SVEUČILIŠTE  
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, JURAJ GODINIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ KANJUSKIH ELEKTRODA NA NERADOSTAVITVEU DIOELEKTRIČNIH POLJSVAKA DO NIZOLAKTIVNA LIJEVA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

JURAJ GODINIĆ  
Godinić

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, JURAJ GODINIĆ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/pa s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ KANJUSKIH ELEKTRODA NA NERADOSTAVITVEU DIOELEKTRIČNIH POLJSVAKA DO NIZOLAKTIVNA LIJEVA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

JURAJ GODINIĆ  
Godinić

(vlastoručni potpis)



## **Pregovor**

Posebno želim zahvaliti svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić na susretljivosti i iskazanoj suradnji pri izradi ovog diplomskog rada.

Veliko hvala poduzeću Ferro – Preis d.o.o iz Čakovca, a posebno odjelu tehnologije i razvoja na pomoći i sugestijama u izradi eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Zahvaljujem se i obitelji, prijateljima i kolegama na potpori tijekom studiranja te pri izradi diplomskog rada.



## Sažetak

Ovaj diplomski rad obrađuje temu utjecaja manjinskih elemenata na morfologiju grafita u debelostjenim odljevcima proizvedenim od nodularnog lijeva. Diplomski rad se sastoji od tri dijela.

U prvom dijelu diplomskog prikazana je klasifikacija nodularnog lijeva prema normama HRN EN 1563 i HRN EN 945-1. Nakon toga prikazan je utjecaj stalnih, legiranih i pratećih elemenata na morfologiju grafita i strukturu matrice. Prikazani su i objašnjeni nepravilni oblici grafita u debelostjenim odljevcima od nodularnog lijeva, sa naglaskom na chunky grafit.

Drugi dio diplomskog rada podijeljen je u tri dijela. Prvi dio rada sastojao se od konstrukcije modela zajedno sa uljevnim sustavom i hraniteljem. Drugi dio rada sastojao se od proizvodnje primarne taline, te naknadna modifikacija navedene taline u nodularnu. Treći dio rada sastojao se od laboratorijskih ispitivanja ispitnih uzoraka. Navedena ispitivanja sastojala su se od toplinske analize kemijskog sastava, spektroskopske analize kemijskog sastava, metalografska ispitivanja te ispitivanje mehaničkih svojstava ispitnih uzoraka.

U trećem dijelu diplomskog rada prikazani su i objašnjeni rezultati navedenih ispitivanja.

Ključne riječi: nodularni lijev, manjinski elementi, debelostjeni odljevci

## **Summary**

This diploma thesis focuses on the subject of the influence of minority elements on graphite morphology in thick-walled castings made from nodular cast iron. The thesis consists of three parts.

In first part of the thesis, the classification of nodular cast iron according to norms HRN EN 1563 and HRN EN 945-1 is shown. After that, the influence of constant, alloying and accompanying elements on graphite morphology and matrix structure is shown. Irregular shapes of graphite in thick-walled castings made from nodular cast iron are also shown and explained, with emphasis on chunky graphite.

Second part of the thesis is split into three parts. First part contains model construction together with gating system and feeder. Second part of the thesis covers the primary melt production and subsequent modification of the melt into nodular. Third part contains laboratory tests of testing samples. The tests contain thermal analysis of chemical composition, spectroscopic analysis of chemical composition, metallographic tests and test of mechanical properties of test samples.

**Key words:** ductile iron, trace elements, heavy section castings

## Popis korištenih kratica

<b>Kratica</b>	<b>Značenje</b>
EN	Europska norma
HRN	Hrvatska norma
CHG	chunky grafit
GJS	nodularni lijev
GJV	vermikularni lijev
GJL	sivi lijev
RE	elementi rijetkih zemalja
SEM	skenirajući elektronski mikroskop
M	modul skrućivanja
Sc	stupanj zasićenja
TA	toplinska analiza
G	lijev
J	željezo
S	nodularni grafit

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Teorijski dio .....	2
2.1.	Općenito o željeznim ljevovima.....	2
2.2.	Nodularni ljev.....	3
2.3.	Klasifikacija nodularnog lijeva .....	4
2.4.	Kemijski sastav nodularnoga lijeva.....	7
2.4.1.	<i>Utjecaj stalnih elemenata.....</i>	7
2.4.2.	<i>Utjecaj legirnih elemenata.....</i>	10
	Nikal11	
2.4.3.	<i>Utjecaj nodulatora .....</i>	11
2.4.4.	<i>Utjecaj manjinskih elemenata .....</i>	14
2.5.	Utjecaj ostalih manjinskih elemenata.....	18
2.6.	Kontrola kemijskog sastava nodularnoga lijeva.....	19
2.7.	Skrućivanje nodularnoga lijeva.....	21
2.7.1.	<i>Utjecaj silicija na Fe<sub>3</sub>C dijagram.....</i>	22
2.7.2.	<i>Nukleacija nodularnog grafit.....</i>	23
2.8.	Nepravilni oblici grafit u debelostjenim odljevcima .....	24
2.8.1.	<i>Utjecaj austenitnog ovoja na degeneraciju grafit.....</i>	24
2.8.2.	<i>Eksplodirani grafit .....</i>	25
2.8.3.	<i>Zvezdasti ili spiky grafit .....</i>	26
2.8.4.	<i>Vermikularni grafit.....</i>	26
2.8.5.	<i>Listićavi grafit na površinskom sloju odljevka.....</i>	27
2.8.6.	<i>Metalni i nemetalni uključci u nodularnom lijevu.....</i>	28
2.9.	Chunky grafit.....	29
2.9.1.	<i>Utjecajni faktori na pojavu chunky grafit .....</i>	33
2.10.	Cijepljenje .....	35
2.11.	Postupci nodulacije .....	37
3.	Eksperimentalni dio .....	38
3.1.	Izrada modela .....	39
3.2.	Numerička simulacija.....	41
3.3.	Proizvodnja nodularnog lijeva .....	42
3.3.1.	<i>Proizvodnja bazne taline.....</i>	42
3.3.2.	<i>Modifikacija bazne taline.....</i>	43
3.3.3.	<i>Cijepljenje nodularnog lijeva.....</i>	44
3.3.4.	<i>Nodulatori .....</i>	45
3.3.5.	<i>Izrada kalupa od furanskog pijeska .....</i>	46
3.3.6.	<i>Analiza kemijskog sastava.....</i>	47
3.3.7.	<i>Jednostavna toplinska analiza.....</i>	49
3.3.8.	<i>Metalografska ispitivanja.....</i>	50
3.3.9.	<i>Ispitivanje mehaničkih svojstava.....</i>	53
3.3.1.	<i>Plan lijevanja ispitnih uzoraka.....</i>	54
4.	Rezultati ispitivanja .....	55

4.1. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava.....	55
4.2. Rezultati simulacija.....	57
4.3. Rezultati metalografske analize .....	61
4.3.1. Makroanaliza poprečnih presjeka ispitnih uzoraka .....	61
4.3.2. Mikroanaliza poprečnih presjeka ispitnih uzoraka .....	62
4.3.3. Rezultati mehaničkih svojstava ispitnih uzoraka.....	67
5. Zaključak.....	72
6. Literatura.....	73

# 1. Uvod

Željezni lijev je Fe-C-Si legura koja se koristi dugi niz godina zbog svoje cijene, izvrsne sposobnosti lijevanja te dobrih mehaničkih svojstava. Jedan od razloga izvrsne sposobnosti lijevanja leži u tome što se tijekom skrućivanja ugljik izlučuje u obliku grafita. Prilikom izlučivanja ugljika u obliku grafita, dolazi do povećanja volumena koja sprječava skupljanje tijekom skrućivanja. Izlučeni grafit ima laminarnu strukturu koja ima niz mehaničkih ograničenja [1].

Godine 1948. pojavljuje se s metalurškog gledišta jedan od najvećih izuma ovog stoljeća. Henton Morrogh i Keith Millis pronašli su jedinstven način da dovedu ugljik pri skrućivanju u kuglasti, odnosno sferoidni oblik. Dodavanje male količine cerija i/ili magnezija u talinu željeznog lijeva dolazi do stvaranja kuglastog grafita, umjesto laminarnog. Upravo je ta nova vrsta željeznog lijeva nazvana nodularni lijev. U odnosu na ostale željezne lijeve, nodularni lijev ima najbolji omjer svojstva u pogledu čvrstoće, istežljivosti i žilavosti [2].

U narednim godinama dolazi do naglog povećanja proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva a samim time i proizvodnja debelostjenih odljevaka. Proizvodnja vjetroturbina ili spremnika za pohranu nuklearnog otpada najbolje prikazuju navedene trendove. Zahtjevi koji se postavljaju pred proizvođače visokokvalitetnih odljevaka često su u suprotnosti s poteškoćama proizvođača da kontroliraju mikrostrukturu tijekom skrućivanja i hlađenje debelostjenih odljevaka od nodularnog lijeva. Polagane brzine hlađenja koje karakteriziraju ovakve odljevke stvaraju nizak broj nodula, tvorbu grubljih grafitnih nodula s slabom zaobljenošću te tvorbu chunky grafita (CHG) [3].

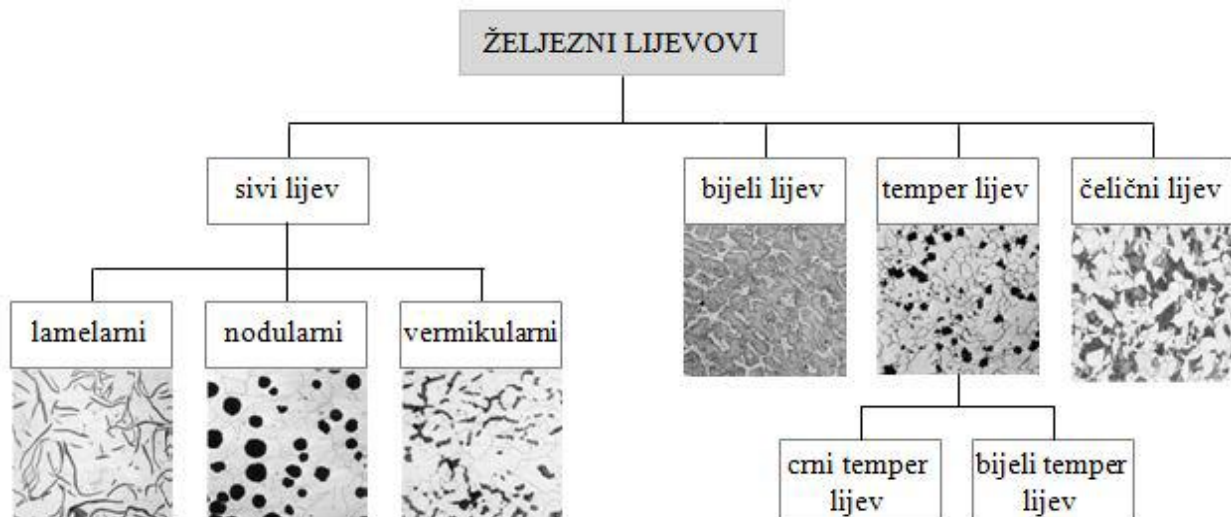
Chunky grafit negativno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva, te je jedna od najraširenijih grešaka u debelostjenim odljencima. Vjerojatnost nastanka takve greške značajno raste s debljinom stjenke od približno 100-200 mm i vremenom skrućivanja dužim od 1h. Često se prisustvo chunky grafita postaje vidljivo tek poslije strojne obrade kao tamna površina odljevka. Povremeno se chunky grafit ne utvrđuje kao osnovni uzrok greške sve do prijeloma komponente. Uobičajeni uzorci za kontrolu kvalitete, kao što su odvojeno lijevani uzorci ili priliveni uzorci, nisu u mogućnosti otkriti prisustvo chunky grafita. Posljednjih desetak godina napravljena su značajna istraživanja o chunky grafitu, ali još uvijek nisu stečeni jednoglasni pogledi na mehanizme nastajanja i izbjegavanje stvaranja chunky grafita. Zbog ekonomskih utjecaja, te visokih zahtjeva za kvalitetom i sigurnosti, proizvođači moraju biti svjesni porijekla chunky grafita te kako ga izbjeći. Neke su studije pokazale kako se prisustvo chunky grafita može smanjiti ili potpuno spriječiti korištenjem odgovarajućeg uložnog materijala, strogom kontrolom kemijskog sastava te odabirom odgovarajućih nodulatora i cjepiva [3,4].

## 2. Teorijski dio

### 2.1. Općenito o željeznim ljevovima

Željezni ljevovi su višekomponentna legura na bazi željeza s udjelom ugljika od 2 do 4% i udjelom silicija većim od 1,5 %. Svojstva željeznih ljevova određena su mikrostrukturom, stabilnom i metastabilnom fazom koja nastaje tijekom skrućivanja i eventualnom naknadnom toplinskom obradom. Prilikom stabilnog skrućivanja ugljik se izlučuje u obliku grafita, a prilikom metastabilnog skrućivanja ugljik se izlučuje u obliku karbida. Na oblik izlučenog grafita u lijevanom željezu utječu: kemijski sastav taline, brzina hlađenja i skrućivanja. Prednosti željeznih ljevova u odnosu na druge vrste ljevova su velike [4].

Neke od prednosti željeznih ljevova u odnosu na ostale ljeveve: niska cijena proizvodnje, dobra livljivost, dobra strojna obradivost, otpornost na koroziju, prigušenje vibracija, dobra toplinska vodljivost, otpornost na koroziju . Slika 2.1 prikazuje osnovnu podjelu željeznih ljevova [5].



Slika 2.1 Osnovna podjela željeznih ljevova [5]

## 2.2. Nodularni lijev

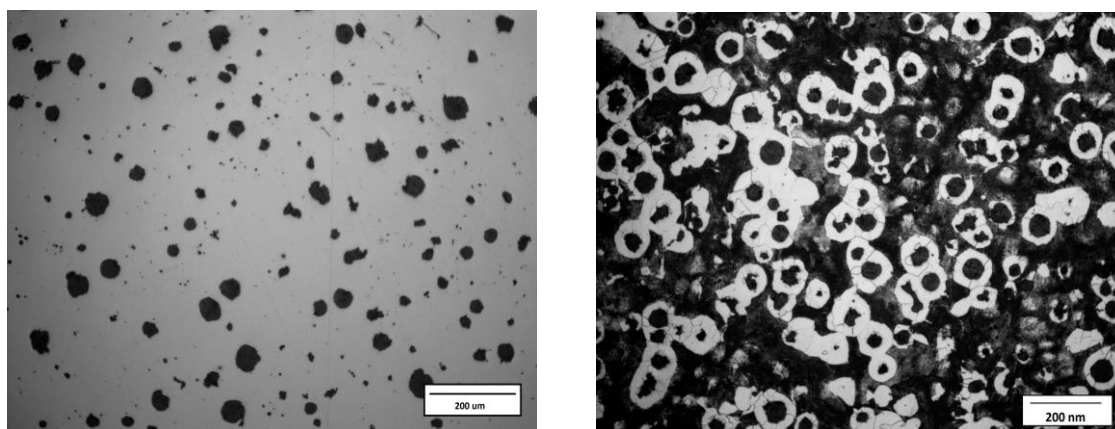
Nodularni lijev je legura Fe-C-Si s udjelom ugljika u rasponu od 3.5 – 3.9 %, i udjelom silicija u rasponu od 1.8 – 2.8 %. Nodularni grafit dobiva se dodavanjem male količine magnezija i/ili cerija u talinu tijekom postupka obrade taline. Proučavanjem mikrostrukture nodularnog lijeva mogu se otkriti različita svojstva poput brzine hlađenja, broja nodula, nodularnosti, udjela nodulatora i cjepiva te vrste matrica. Na mikrostrukturu nodularnog lijeva može se utjecati u tri različite faze tijekom proizvodnog procesa: obradom talile, brzinom skrućivanja te naknadne toplinske obrade [6].

Obrada taline postupak je dodavanje nodulatora i cjepiva u lonac ili kalup, ovisno o vrsti postupka. Nodulator se dodaje kako bi se stvorili potrebni uvjeti za promjenom morfologije grafita (iz laminarnog u nodularni) primarne ili bazne taline. Cjepivo služi za povećanje broja nodula, povećava nodularnost te otežava stvaranje karbida [6].

Brzina hlađenja značajno ovisi o veličini i obliku odljevka. Brzina hlađenja ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Veće brzine hlađenja rezultira sitnijom strukturom, boljom nodulacijom te većom tendencijom stvaranja karbida. Niže brzine hlađenja rezultiraju slabijom nodulacijom, degeneriranim oblikom grafita te pomicanjem faze (npr. iz feritne u feritno – perlitnu ) [6].

Toplinskom obradom može se promijeniti struktura matrice (npr. feritnu, bainitnu ili martenzitnu) ili promijeniti morfologiju i veličinu grafita [6].

Slika 2.2 prikazuje mikrostrukturu feritno – perlitnog nodularnog lijeva u poliranom i nagrizenom stanju [7].



Slika 2.2 Mikrostruktura feritno – perlitnog nodularnog lijeva u poliranom i nagrizenom stanju [7]



## 2.3. Klasifikacija nodularnog lijeva

U svijetu postoje više priznatih normi za klasifikaciju željeznih ljevova. U Republici Hrvatskoj klasifikacija željeznih ljevova preuzeta je iz europske norme EN 1560:2012. Klasifikacija nodularnog lijeva temelji se na normi HRN EN 1563:2018. Prema navedenoj normi, nodularni lijev klasificira se u više kvaliteta prema istezljivosti, konvencionalnoj granici razvlačenja te minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće [8].

Mehanika svojstva nodularnog lijeva mogu se izmjeriti na ispitnim uzorcima koji su dobiveni kao odvojeno lijevani ispitni uzorci, ispitni uzorci lijevani zajedno sa odljevkom ili kao ispitni uzorci koji su izrezani iz odljevka (tablica 2.1). Mjesto uzimanja uzorka mora biti definirano između proizvođača i kupca. Ako mjesto uzimanja uzorka nije definirano, proizvođač ima pravo odabrati mjesto uzimanja uzorka [8]. Tablica 2.1 prikazuje minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala dobiveni strojnom obradom iz posebno lijevanih ispitnih uzoraka ili ispitnih uzoraka lijevanih zajedno s odljevkom [8].

Tablica 2.1 Minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala dobivenih strojnom obradom iz posebno lijevanih ispitnih uzoraka ili ispitnih uzoraka lijevanih s odljevkom [8]

Oznaka materijala		Debljina stjenke t [mm]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Konvencionalna granica razvlačenja Rp0,2 [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Istezljivost A [%] min.
Oznaka	Broj				
EN GJS 350-22-LT	5.3100	t ≤ 30	350	220	22
		30 < t ≤ 60	330	210	18
		60 < t ≤ 200	320	200	15
EN GJS 350-22-RT	5.3101	t ≤ 30	350	220	22
		30 < t ≤ 60	330	220	18
		60 < t ≤ 200	320	210	15
EN GJS 350-22	5.3102	t ≤ 30	350	220	22
		30 < t ≤ 60	330	220	18
		60 < t ≤ 200	320	210	15
EN GJS 400-18-LT	5.3103	t ≤ 30	400	240	18
		30 < t ≤ 60	390	230	15
		60 < t ≤ 200	370	220	12
EN GJS 400-18-RT	5.3104	t ≤ 30	400	250	18
		30 < t ≤ 60	390	250	15
		60 < t ≤ 200	370	240	12
EN GJS 400-18	5.3105	t ≤ 30	400	250	18
		30 < t ≤ 60	390	250	15
		60 < t ≤ 200	370	240	12
EN GJS 400-15	5.3106	t ≤ 30	400	250	15
		30 < t ≤ 60	390	250	14
		60 < t ≤ 200	370	240	11
EN GJS 450-10	5.3107	t ≤ 30	450	310	10
		30 < t ≤ 60	Dogovor između proizvođača i kupca		
		60 < t ≤ 200			
EN GJS 500-7	5.3200	t ≤ 30	500	320	7
		30 < t ≤ 60	450	300	7
		60 < t ≤ 200	420	290	5
EN GJS 600-3	5.3201	t ≤ 30	600	370	3
		30 < t ≤ 60	600	360	2
		60 < t ≤ 200	550	340	1
EN GJS 700-2	5.3300	t ≤ 30	700	420	2
		30 < t ≤ 60	700	400	2
		60 < t ≤ 200	660	380	1
EN GJS 800-2	5.3301	t ≤ 30	800	480	2
		30 < t ≤ 60	Dogovor između proizvođača i kupca		
		60 < t ≤ 200			
EN GJS 900-2	5.3302	t ≤ 30	900	300	2
		30 < t ≤ 60	Dogovor između proizvođača i kupca		
		60 < t ≤ 200			

Mehanička svojstva ispitnih uzorka najbolje odražavaju svojstva samog odljevka ako su ispitni uzorci izrezani iz njega. Tablica 2.2 prikazuje minimalnu vrijednost materijala dobiveni iz ispitnih uzoraka koji su izrezani iz odljevaka [8].

Tablica 2.2 Minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala dobivenih iz ispitnih uzoraka koji su izrezani iz odljevka [8]

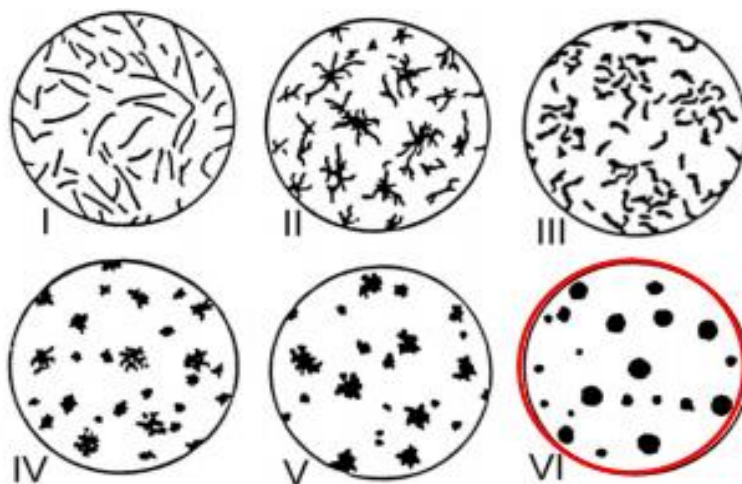
Oznaka materijala		Debljina stjenke t [mm]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Konvencionalna granica razvlačenja Rp0,2 [N/mm <sup>2</sup> ] min.	Istezljivost A [%] min.
Oznaka	Broj				
EN GJS 350-22C-LT	5.3100	t ≤ 30	340	220	20
		30 < t ≤ 60	320	210	15
		60 < t ≤ 200	310	200	12
EN GJS 350-22C-RT	5.3101	t ≤ 30	240	220	20
		30 < t ≤ 60	320	210	15
		60 < t ≤ 200	310	200	12
EN GJS 350-22C	5.3102	t ≤ 30	340	220	20
		30 < t ≤ 60	320	210	15
		60 < t ≤ 200	310	200	12
EN GJS 400-18C-LT	5.3103	t ≤ 30	390	240	15
		30 < t ≤ 60	370	230	12
		60 < t ≤ 200	340	220	10
EN GJS 400-18C-RT	5.3104	t ≤ 30	390	250	15
		30 < t ≤ 60	370	240	12
		60 < t ≤ 200	350	230	10
EN GJS 400-18C	5.3105	t ≤ 30	390	250	15
		30 < t ≤ 60	370	240	12
		60 < t ≤ 200	350	230	10
EN GJS 400-15C	5.3106	t ≤ 30	390	250	12
		30 < t ≤ 60	370	240	11
		60 < t ≤ 200	350	230	8
EN GJS 450-10C	5.3107	t ≤ 30	440	300	8
		30 < t ≤ 60	Dogovor između proizvođača i kupca		
		60 < t ≤ 200			
EN GJS 500-7C	5.3200	t ≤ 30	480	300	6
		30 < t ≤ 60	450	280	5
		60 < t ≤ 200	400	260	3
EN GJS 600-3C	5.3201	t ≤ 30	580	360	3
		30 < t ≤ 60	550	340	2
		60 < t ≤ 200	500	320	1
EN GJS 700-2C	5.3300	t ≤ 30	680	410	2
		30 < t ≤ 60	650	390	1
		60 < t ≤ 200	600	370	1
EN GJS 800-2C	5.3301	t ≤ 30	780	460	2
		30 < t ≤ 60	Dogovor između proizvođača i kupca		
		60 < t ≤ 200			

Analizirajući prikazane tablice, vidi se da vrijednosti vlačne čvrstoće, konvencionalne granice razvlačenja i istežljivosti ovisi o vrsti ispitnog uzorka i debljini stjenke.

Označavanje kvalitete nodularnog lijeva sastoji se od kombinacije brojki i slova. Primjer oznake: HRN-EN-GJS-500-7C, HRN označava hrvatsku normu koja je preuzeta iz europske norme (EN), G označava lijev, J označava željezo, S označava nodularni grafit, 500 označava

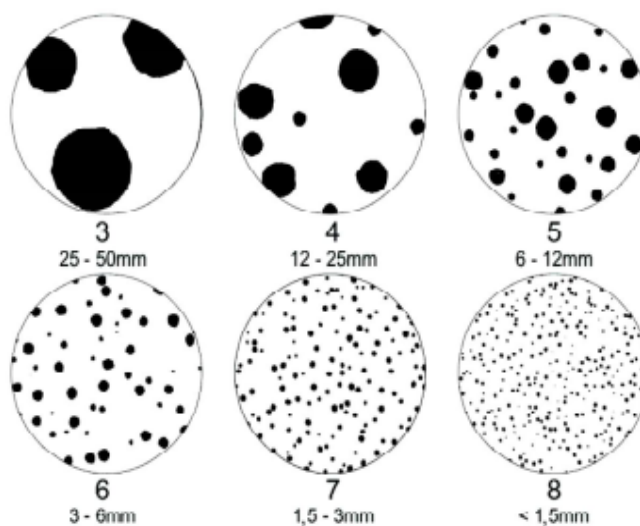
minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće u MPa, 7 označava minimalnu vrijednost istezljivosti a oznaka C označava da je ispitni uzorak izrezan iz odljevaka [8,9].

Norma HRN EN 945-1:2018 klasificira grafit u nodularnom lijevu prema: obliku, rasporedu i veličini. Prema navedenoj normi, u nodularnom lijevu grafit se označava kao oblik VI, prikazan na slici 2.3 [10].



Slika 2.3 Klasifikacija grafita sukladno normi HRN EN 945-1 [10]

Navedena norma propisuje i veličinu grafitnih nodula pri povećanju 100x. Slika 2.4 prikazuje veličinu grafitnih nodula u nodularnom lijevu [10].



Slika 2.4 Veličina grafitnih nodula u nodularnom lijevu prema normi HRN EN 945-1 [10]

## 2.4. Kemijski sastav nodularnoga lijeva

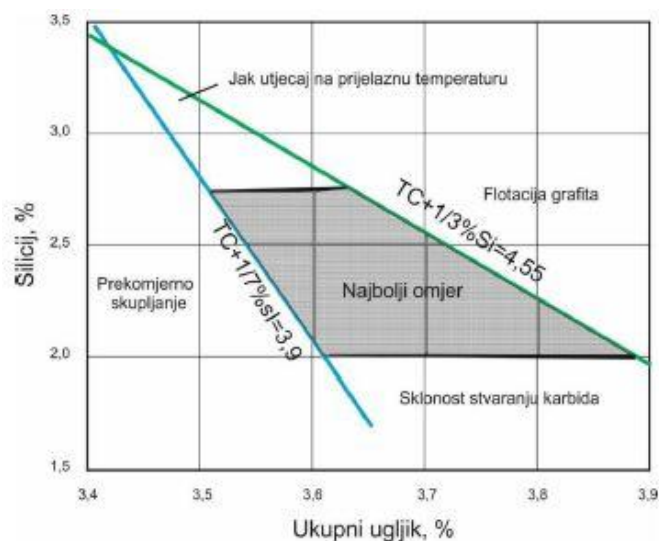
Kemijski sastav nodularnog lijeva glavni je čimbenik koji utječe na oblik grafita a ima i velik utjecaj na strukturu metalne matrice. Sukladno tome, potrebna je stroga kontrola kemijskog sastava s ciljem dobivanja traženih mehaničkih svojstava. Tablica 2.3 prikazuje preporučeni kemijski sastav taline za određenu kvalitetu nodularnoga lijeva [11].

Tablica 2.3 Preporučeni kemijski sastav taline za određenu kvalitetu nodularnoga lijeva [11]

Prosječna debljina stijenke [mm]	Kvaliteta lijeva [HRN EN GJS]											
	800/2	700/2	600/3	500/7			400/10	400/15	400-18	350/22		
	%C	%Si	%Mn	%C	%Si	%Mn	%C	%Si	%Mn	%C	%Si	%Mn
≤ 13	3,6-3,8	2,6-2,8	0,5	3,6-3,8	2,6-2,8	0,3	3,6-3,8	2,6-2,8	0,2	3,6-3,8	2,0-2,5	0,1
13-25	3,5-3,6	2,2-2,5	0,6	3,5-3,6	2,2-2,5	0,35	3,5-3,6	2,2-2,5	0,25	3,5-3,6	2,0-2,5	0,15
25-50	3,5-3,6	2,1-2,3	0,7	3,5-3,6	2,2-2,4	0,4	3,5-3,6	2,2-2,4	0,3	3,5-3,6	2,0-2,4	0,15
50-100	3,4-3,5	1,9-2,1	0,8	3,4-3,5	2,0-2,2	0,5	3,4-3,5	2,0-2,2	0,35	3,4-3,5	1,8-2,0	0,2
≥ 100	3,4-3,5	1,8-2,0	0,8	3,4-3,5	1,8-2,0	0,6	3,4-3,5	1,8-2,0	0,4	3,4-3,5	1,8-2,0	0,25

### 2.4.1. Utjecaj stalnih elemenata

Optimalni udio stalnih elemenata u nodularnom lijevu (-ugljika i silicija) vidljiv je iz Handersonovog dijagrama prikazanog na slici 2.5 [5].



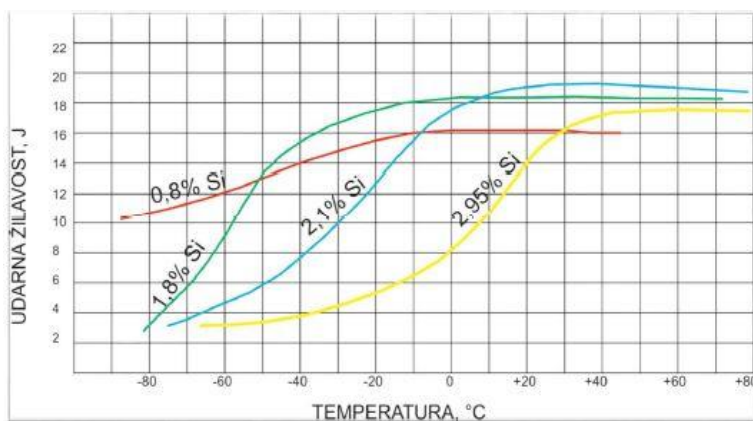
Slika 2.5 Optimalni udio ugljika i silicija u nodularnom lijevu [5]

## Ugljik

Ugljik je primarni element u nodularnom lijevu. Optimalna vrijednost udjela ugljika u nodularnom lijevu iznosi od 3.5 % do 3.9 %, ovisno o udjelu silicija i debljini stjenke odljevka. Više vrijednosti udjela ugljika koriste se za tanko stijene odljevke dok se niže vrijednosti koriste za debelo stijene odljevke. Ako je udio ugljika previsok ( u odnosu na debljinu stjenke) dolazi do flotacije ugljika tj. degeneriranim oblikom grafita te padom mehaničkih svojstava. Ako je udio ugljika pre nizak ( u odnosu na debljinu stjenke ) dolazi do pojave karbida na stjenkama odljevka te isto tako rezultira padom mehaničkih svojstava [12].

## Silicij

Silicije je još jedan primarni element u nodularnom lijevu. Snažan je grafitizator te promovira stvaranje ferita i otežava stvaranje karbida. Silicij povećava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću ali smanjuje udarnu žilavost nodularnom lijevu, slika 2.6. Visok udio silicija nepovoljno djeluje na prijelaznu temperaturu (žilavo – krhko) te može pospješiti stvaranju grešaka u debelostjenim odljvcima od nodularnog lijeva. Optimalni udio silicija u nodularnom lijevu iznosi od 2,0 % do 3 %, ovisno o debljini stjenke te ekvivalentu ugljika [12].



Slika 2.6 Odnos temperature na udarnu žilavost pri različitim udjelima silicija [13]

## Fosfor

Fosfor je nepoželjan i krhki element u nodularnom lijevu i treba ga držati što je niže moguće, po mogućnosti ispod 0,03%. Fosfor promovira stvaranje perlita, povećava livljivost, čvrstoću i tvrdoću a smanjuje istezanje i žilavost nodularnom lijevu. Učinak fosfora na tvrdoću i čvrstoću može se smanjiti naknadnom toplinskom obradom [12].

Udio ranije navedenih elementa (ugljika, silicija i fosfora) može se promatrati kao sumirana vrijednost ugljičnog ekvivalenta (CE).

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3 \quad (2.1)$$

Ekvivalent ugljika govori nam da li imamo lijev eutektičkog, podeutektičkog ili nadeutektičkog sastava. Kada je vrijednost  $CE = 4,3$ , radi se o nodularnom lijevu eutektičkog sastava. Kada je  $CE > 4,3$  govorimo o nodularnom lijevu nadeutektičkog sastava, a kada je  $CE < 4,3$  govorimo o nodularnom lijevu podeutektičkog sastava [13].

## Mangan

Mangan je element koji promovira stvaranje karbida i njegov udio mora biti čim manji u ciljem izbjegavanja karbida u lijevanom stanju. Udio mangana u nodularnom lijevu ovisi o udjelu silicija i debljini stijenke odljevka. U tankostjenim odljevcima (do 30mm) stvaranje karbida može se spriječiti povećanjem udjela silicija. Debelostjeni odljevci ne dopuštaju povećanje udjela mangana, bez obzira na povećanje udjela silicija. Budući da promovira stvaranje karbida, udio mangana u nodularnom lijevu mora biti čim manji (0,1 % - 0,2%) [12].

## Sumpor

Optimalni udio sumpora u nodularnom lijevu kreće se u granicama od 0,008 % do 0,015 %. Sumpor ima snažan afinitet prema magneziju, te stvara magnezijev sulfid (MgS) prilikom nodulacije koji smanjuje udio raspoloživog magnezija za nodulaciju. Magnezijev sulfat spaja se sa kisikom i stvara Mg okside i silicijevim dioksidom koji stvara Mg silikate te uzrokuju različite greške unutar odljevka. Ako je udio sumpora prenizak (manji od 0,008 % dolazi do pada nodulacije te se povećava mogućnost stvaranja karbida [12].

## 2.4.2. Utjecaj legirnih elemenata

### Bakar

Bakar promovira stvaranje perlita te otežava stvaranje ferita i karbida. Maksimalna topivost bakra u nodularnom lijevu iznosi oko 2,5 % , ali se obično dodaju u udjelu od 1,5 % da se spriječi bilo kakav utjecaj na nodularnost grafita. Bakar je 5 od 10 puta efikasniji u promoviranju perlita od mangana, te ne postoji rizik od stvaranja karbida. Dodatkom bakra od 0,82 % moguće je dobiti potpuno perlitnu mikrostrukturu. U feritnom nodularnom lijevu, bakar treba ograničiti na maksimalno 0,03 %. Budući da bakar promovira stvaranje perlita, bakar povisuje tvrdoću, granicu razvlačenja, prijelaznu temperaturu žilavo / krhko i vlačnu čvrstoću a smanjuje žilavost i istežljivost nodularnog lijeva [12].

### Kositar

Kositar je element koji promovira stvaranje perlita kao i bakar. Kositar je deset puta učinkovitiji od bakra u promoviranju perlita a dodatak od 0,03 % do 0,08 % je dovoljan za potpuno perlitnu mikrostrukturu. Ako je udio kositra veći od 0,1 %, difuzijska barijera koja se nalazi oko grafitnih nodula postaje krhka i lomljiva i rezultira padom mehaničkih svojstava. Iz tog razloga potrebno je udio kositra držati ispod 0,1 %, odnosno 0,01 % za feritne nodularne ljevove. U cilju postizanja maksimalne tvrdoće i potpuno perlitne strukture moguća je kombinacija bakra i kositra u udjelu od 1,5 % bakra i 0,08 % kositra [12].

### Molibden

Molibden je element koji lagano promovira stvaranje karbida do 0,3 %. Pri udjelu većem od 0,3 % dolazi do izlučivanja karbida na granica zrna. Pri debelostjenim odljevcima, gdje dolazi do sporog skrućivanja taline izlučivanje karbida je još intenzivnije. Molibden povećava tvrdoću, vlačnu čvrstoću, čvrstoću na povišenim temperaturama, otpornost na puzanje i umor materijala a smanjuje istežljivost i žilavost [12].

## **Nikal**

Nikal je element koji je topiv u željezu u velikom udjelu, ali smanjuje topivost ugljika u željezu. Udio nikla od 18 % do 36 % u nodularnom lijevu promovira stvaranje austenitne metalne ovojnice. Poboljšava svojstva feritnom nodularnom lijevu pri niskim temperaturama, povećava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja bez štetnog djelovanja na istežljivost i žilavosti. Zbog toga se upotrebljava kod kvaliteta gdje su potrebne visoke vlačne čvrstoće i žilavosti [12].

### **2.4.3. Utjecaj nodulatora**

Pri proizvodnji nodularnog lijeva potrebno je provesti modifikaciju grafita primarne (bazne) taline predlegurama koje sadrže određene udjele nodulatore [9].

#### **Magnezij**

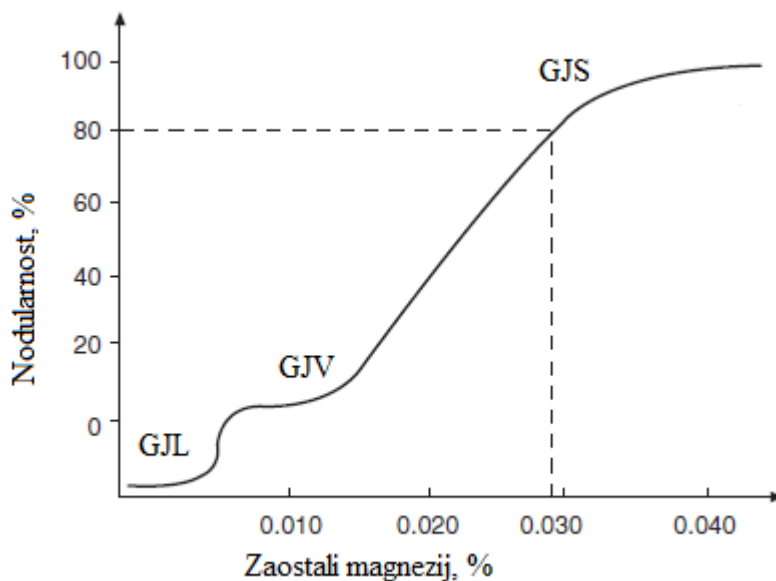
Prilikom dodavanja magnezija u primarnu (baznu) talinu, magnezij prvo deoksidira (MgO), a zatim odsumporava (MgS) talinu prije stvaranja uvjeta potrebnih za nodulaciju grafita. Prilikom reakcije magnezija sa sumporom, dolazi do smanjenja magnezija potrebnog za nodulaciju grafita.

Magnezijev sulfid (MgS) ima malu gustoću te se nalazi na površini taline. Magnezijev sulfid relativno je nestabilan te u kombinaciji sa kisikom dolazi do stvaranja magnezijevog oksida, te ispuštanje sumpora u talinu, koji smanjuje udio magnezija potrebnog za modifikaciju grafita taline. Ovisno o udjelu sumpora u primarnoj talini, potrebna količina magnezija potrebna za proizvodnju sferoidnog nodularnog lijeva iznosi od 0,02 % do 0,06 % [12, 9].

Spajanjem magnezija sa kisikom, stvara se magnezijev oksid (MgO), bijele je boje, kemijski postojan, ima malu gustoću i malu topivost u željezu. Magnezijev oksid se nalazi na površini taline te ukoliko se ulije u kalupnu šupljinu, uzrokuje grešku na odljevku. Prije početka lijevanja potrebno je ukloniti magnezijev sulfid i magnezijev oksid sa površine taline nodularnog lijeva [9,12].

Kada primarna (bazna talina) ima mali udio kisika i sumpora tada je već 0,018 % magnezija dovoljno za dobivanje nodularnog oblika grafita. U praksi ciljani raspon zaostalog magnezija iznosi 0,035 % do 0,05 % za dobivanje nodularnog oblika grafita. Izmjereni zaostali magnezij uključuje ukupni magnezij kao i magnezijev sulfid i magnezijev oksid. Slika 2.7 prikazuje odnos između nodularnosti i udjela zaostalog magnezija pri udjelu sumpora od 0,01 % do 0,015 % [9,12].





Slika 2.7 Odnos između nodularnosti i udjela zaostalog magnezija [14]

Ako je udio zaostalog magnezija manji od 0,018 % dolazi do pada nodularnosti i stvaranje vermikularnog lijeva (GJV). Ako je udio zaostalog magnezija veći od 0,06 % dolazi do stvaranje karbida, poroznosti i troske [9,12,14].

Obrada primarne taline sa čistim magnezijem povezana je sa nizom tehnoloških problema: nisko iskorištenje magnezija, niska gustoća te niska topivost magnezija u primarnoj talini [12,14].

Predlegura FeSiMg razvijena je u cilju otklanjanja poteškoća koje uzrokuje čisti magnezij. Izraz „predlegura“ se upotrebljava jer se primarna talina ne legira, već se samo unosi magnezij potreban za nodulaciju grafita. Predlegura FeSiMg većinom sadrže udio magnezija ~ 5 %, ali sve su više zastupljene i predlegura s nižim udjelom magnezija ( 2,5 % do 3,5 %) te manjim udjelom cerija i elemenata rijetkih zemalja, radi poboljšanja efikasnosti procesa obrade, smanjenjem emisije dima te smanjenjem reakcije magnezija sa primarnom talinom. Udio silicija u predlegurama kreće se u granicama od 45 % do 60 % [12,14].

## Cerij

Cerij je snažan oksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija cerij nije hlapljiv te prilikom reakcije sa primarnom talinom ne proizvodi burne reakcije. Cerij tvori stabilne okside i sulfide te je puno manja tendencija stvaranju poroznosti i uključaka [12,14].

Ako se cerij koristi kao primarni nodulator, tada je udio cerija od 0,035 % dovoljno za modifikaciju grafita primarne taline. Cerij snažno promovira stvaranje karbida u nodularnom lijevu pa udio ugljika mora biti veći od 3,8 % a talina mora biti cijepljena odgovarajućim cjepivima [12,14].

Upotreba čistog cerija u tankostjenim i debelostjenim odljevcima od nodularnoga lijeva treba izbjegavati. U tankim stijenkama postoji opasnost od stvaranja karbida, a u debelostjenim odljevcima postoji opasnost od flotacije grafita i ekspanziranih oblika grafita [12,14]. Tablica 2.4 prikazuje učinak magnezija i elementa rijetkih zemalja na broj nodula [12].

Tablica 2.4 Utjecaj magnezija i elementa rijetkih zemalja na broj nodula u nodularnom lijevu [12]

Zaostali magnezij [%]	Zaostali RE [%]	Broj nodula [mm <sup>2</sup> ]
0,015	0	226
0,015	0,003	342
0,016	0,008	293
0,025	0	225
0,027	0,004	275
0,025	0,012	250
0,043	0	150-175
0,032	0,01	200-225

Cerij se najčešće koristi kao komponenta rijetkih zemalja jer je ustanovljeno da takva kombinacija povećavaju broj nodula u nodularnom lijevu. Udio cerija od 0,08 % dovoljna je da se spriječi neželjen učinak pratećih elemenata (Pb, As, Ti, Sb) u nodularnom lijevu [12,14].

#### 2.4.4. Utjecaj manjinskih elemenata

Tijekom proizvodnje nodularnog lijeva postoje manjinski elementi koji mogu imati štetan utjecaj na mikrostrukturu nodularnog lijeva, a samim time i na mehanička svojstva. Takve elemente nazivamo zaostali elementi. Navedene elemente smatramo štetnim, te je poželjno da je udio tih elemenata što manji. Druge manjinske elemente namjerno se dodaju tijekom taljenja, obrade ili cijepljenja radi neutralizacije djelovanja zaostalih elemenata. Navedene elemente nazivamo elementi u tragovima. Ukoliko udjeli zaostalih elemenata nisu ispravno uravnoteženi s razinom elemenata u tragovima, tada ti isti elementi mogu imati štetno djelovanje na mikrostrukturu nodularnog lijeva [12,15].

U mnogim slučajevima udio manjinskih elemenata ne ovisi samo o traženoj kvaliteti taline, nego ovisi i o veličini i geometriji odljevka te vremenu skrućivanja. Tankostjeni odljevci koji imaju veliku brzinu skrućivanja imaju veće razine tolerancije manjinskih elemenata naspram debelostjenih odljevaka koji skrućuju relativno sporo. Iz tog razloga nije moguće utvrditi točnu granicu kemijskog sastava manjinskih elemenata koja bi bila prikladna za sve kvalitete nodularnog lijeva [12,15].

Elementi kao što su ugljik, silicij i mangan su stalni elementi koji su prisutni u svim željeznim ljevovima. Njihov udio ovisi o uložnome materijalu, koji je sastavljen od sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog materijala. Uz stalne elemente mogu se dodavati i legirani elementi kao što su bakar, nikal ili molibden. Ti legirani elementi mogu imati štetna utjecaj ovisno o traženoj kvaliteti nodularnog lijeva [12,15].

Manjinski elementi u nodularnom lijevu mogu se svrstati u brojne kategorije temeljem njihovih direktnih ili neposrednih utjecaja na mikrostrukturu i oblik nodula [12,15]:

- Zaostali elementi
- Elementi u tragovima
- Kontaminirajući elementi

## **Zaostali elementi**

Zaostali elementi prisutni su u malim količinama u uložnome materijalu i uključuju elemente kao što su sumpor, fosfor, titan, krom, vanadij i niobij. Navedeni elementi se ne dodaju u šaržu uložnog materijala, ali se njihov udio mora pažljivo kontrolirati na temelju izbora uložnog materijala [12,15].

## **Elementi u tragovima**

Elementi u tragovima se namjerno dodaju kao dio legura za cijepljenje i obradu nodularne taline a uključuju elemente: aluminij, bor, arsen, barij, bizmut, kalcij, kadmij, cerij, lantan, magnezij, olovo, antimon, cink i cirkonij. Elementi u tragovima bitni su za rasta grafita te za uklanjanje djelovanja nepoželjnih zaostalih elemenata. U mnogim slučajevima, elementi u tragovima imaju štetan utjecaj ako njihov udio pređe dozvoljene granice [12,15].

## **Kontaminirajući elementi**

Kontaminirajući elementi odnose se na bilo koji zaostali element ili element u tragovima uveden u prekomjernom udjelu tijekom proizvodnje nodularnog lijeva, a rezultira štetnim djelovanjem. U nekim slučajevima nepoželjno djelovanje nekih kontaminirajućih elemenata mogu se učinkovito ukloniti dodatkom određenog elementa u tragovima [12,15].

Ispitivanje i kontrola manjinskih elemenata najčešće se izvodi spektroskopskom analizom kemijskog sastava prije i nakon obrade te cijepljenja. U mnogim slučajevima prihvatljivi udjeli manjinskih elemenata vrlo su mali. Tako mali udjeli manjinskih elemenata dovodi u pitanje ponovljivost i pouzdanost spektroskopske analize kemijskog sastava. Štetni utjecaji kontaminirajućih elemenata u kombinaciji je još teže kvantificirati [12,15].

Dopušteni udjeli manjinskih elemenata mogu se definirati kao maksimalni udjeli manjinskih elemenata bez štetnih djelovanja na mikrostrukturu. Dopustive razine manjinskih elemenata u nodularnom lijevu najviše ovise o obliku i dimenzijama odljevaka, brzini skrućivanja te udjelu drugih manjinskih elemenata [12,15].

Utjecaj manjinskih elemenata na nodularnost u nodularnom lijevu moguće je izračunati preko Thielemann-ovog teorema [12,15]:

$$GJS = 4.4Ti_{wt\%} + 2As_{wt\%} + 2.3Sn_{wt\%} + 5Sb_{wt\%} + 290Pb_{wt\%} + 370Bi_{wt\%} + 1.6Al_{wt\%} \quad (2.2)$$

Ako je  $GJS \leq 1.0$  velika je mogućnost grafitnih nodula, a ako je  $GJS > 1.0$  velika je vjerojatnost degeneriranog oblika grafita.

Sveukupni faktor prihvatljivosti elemenata u tragovima za predviđanje degeneriranog oblika grafitnih nodula ovisi i o geometriji odljevka, brzini hlađenja te o međusobnom djelovanju manjinskih elemenata [12,15].

Različiti autori definirali su različite udjele manjinskih elemenata u nodularnom lijevu. Tablica 2.5 prikazuje kritične udjele manjinskih elemenata u nodularnom lijevu prema različitim izvorima [12,15].

Tablica 2.5 Kritični udjeli manjinskih elemenata u nodularnom lijevu prema različitim izvorima [12]

Kemijski elementi	Kritična vrijednost prema različitim izvorima [%]											
Bi	0,003	0,003	0,003	0,03	0,003-0,004	0,002	0,02	0,002	0,002	0,001-0,03	0,01	
Pb	0,004-0,009	0,009	0,009	0,098	0,002-0,009	0,002	0,005	0,002	0,002	0,002-0,011	0,005	
Sb	0,025	0,004	0,026	0,09		0,01	0,02	0,002		0,002-0,026	0,01	
Sn	0,13	0,04	0,01			0,005	0,02	0,15	0,01-0,08	0,005-0,13	0,15	
As	0,125	0,09	0,08			0,02	0,05	0,02		0,02-0,125	0,01	
Te						0,002		0,02	0,01-0,08	0,002-0,08	0,005	
Se						0,03		0,03		0,03	0,002	
B						0,005	0,01	0,15		0,005-0,01	0,01	
Al	0,21	0,15	0,3			0,08	0,1			0,08-0,3	0,2	
Ti	0,04	0,08	0,04	0,08		0,04	0,06		0,08	0,04-0,1	0,2	
V						0,05	0,06			0,05-	0,02	
Zr						0,01				0,01-0,1	0,01	
Mg										0,08-0,1	0,03-0,06	
Ce							0,02			0,02	0,002	

## **Titan**

Titan (Ti) je element koji promovira perlit. Treba ga držati što je niže moguće ( $< 0,035\%$ ). Otežava stvaranje nodularnog grafitu. Njegovo štetno djelovanje može se neutralizirati sa elementima rijetkih zemalja (RE) [12,14].

## **Bizmut**

Dodavanjem  $0,003\%$  bizmuta (Bi) rezultira povećanjem broja nodula i nodularnosti. Koristan učinak bizmuta prestaje ako je njegov udio veći od  $0,0045\%$ . Štetno djelovanje bizmuta uzrokuje tvorbu nepravilnog grafitu u odljevcima. Štetan utjecaj bizmuta može se neutralizirati rijetkim zemljama (RE). Udio rijetkih zemalja (RE) potreban za potpunu neutralizaciju djelovanja bizmuta ovisi o debljini stjenke i vremenu skrućivanja. Omjer RE / Bi od  $0,8$  do  $1,1$  dovoljni su za postizanje potpune neutralizacije s relativno dugim vremenom skrućivanja, dok je odnos RE/Bi u suvišku  $1,1$  potreban za odljevke sa vrlo kratkim vremenom skrućivanja [12,16].

## **Antimon**

Dodavanje  $0,008\%$  antimona (Sb) rezultira povećanjem broja nodula i nodularnosti. Dodavanjem antimona većim od  $0,01\%$  dolazi do degeneracije oblika grafitu u odljevcima sa vremenom skrućivanja većim od  $1600$  sekundi. Štetno djelovanje prekomjernog udjela antimona može se neutralizirati rijetkim zemljama. Odnos RE/Sb u udjelu od  $0,4 - 0,9\%$  je dovoljno da se potpuno neutralizira štetno djelovanje antimona [12,16].

## 2.5. Utjecaj ostalih manjinskih elemenata

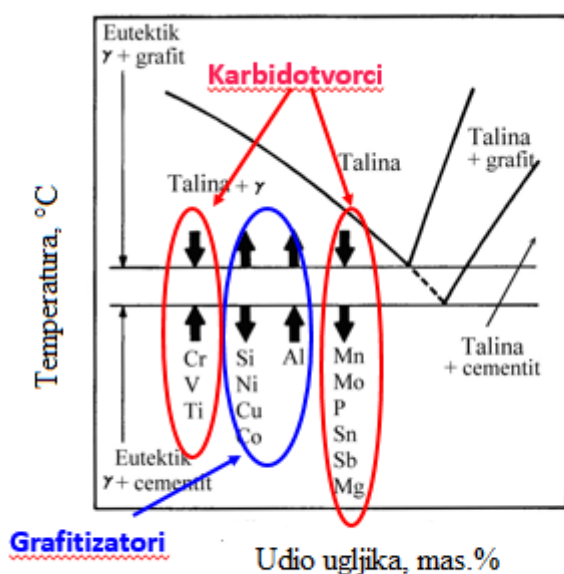
Utjecaj ostalih manjinskih elemenata u nodularnom lijevu prikazani su u tablici 2.6 [17,18].

Tablica 2.6 Utjecaj ostalih manjinskih elemenata u nodularnom lijevu [17,18]

Element	Optimalni udio [%]	Pozitivni učinak	Štetni učinak
Lantan (La)	< 0,015	Deoksidira i odsumporava talinu, omogućuje nukleaciju i rast grafitnih nodula.	Visoki udjeli mogu promovirati karbide na tankim stijenkama i chunky grafit na debelostjenim stijenkama.
Alumini (Al)	0,003 - 0,06	Promovira nukleaciju grafita te promovira stvaranje ferita. Njegovo djelovanje može se neutralizirati sa cerijem.	Potiče poroznost i stvaranje uključaka. Promovira vermikularni lijev u debelostjenim stijenkama.
Barij (Ba)	< 0,01	Povećava nukleaciju grafita te smanjuje gubitak magnezija i slabljenje cjepiva.	Ne zna se za neki značajniji efekt.
Stroncij (Sr)	< 0,01	Otežava stvaranje odbjela, povećava broj nodula te produljuje učinak cjepiva	Visok udio RE neutralizira učinak Sr.
Cirkonij (Zr)	< 0,01	Promovira nukleaciju grafita, povezuje se s dušikom s ciljem izbjegavanja plinskih uključaka.	Promovira stvaranje karbida.
Kalcij (Ca)	< 0,01	Promovira sferoidizaciju grafitnih nodula i nukleaciju. Smanjuje mogućnost nastanka odbjela.	Povećava mogućnost nastanka troske. Promovira chunky grafit u kombinaciji sa visokim silicijem ili niklom.
Krom (Cr)	< 0,05	Udio kroma mora biti čim manji.	Smanjuje stabilnu eutektičku temperaturu, te povećava metastabilnu. Promovira stvaranje karbida koji su otporni na žarenje.
Arsen (As)	< 0,01	Promovira stvaranje perlita. Povećava nodularni oblik grafita, može umanjiti učinak RE ukoliko je potrebno.	Jako promovira stvaranje karbida.
Niobij (Nb)	< 0,01	Promovira stvaranje stabilnih karbida.	Usporava toplinsku obradu.

## 2.6. Kontrola kemijskog sastava nodularnoga lijeva

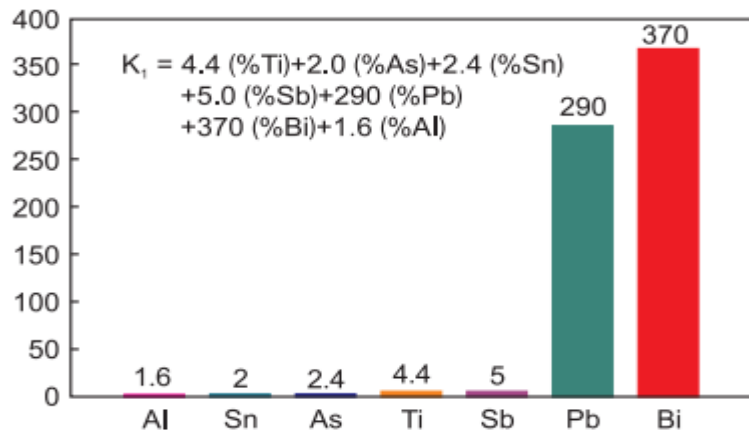
Budući da nodularni lijev ima složeni kemijski sastav, potrebna je stroga kontrola istoga u cilju smanjenja grešaka. Tijekom skrućivanja nodularnoga lijeva, neki kemijski elementi podižu temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika a neki kemijski elementi snižavaju temperaturu metastabilnog eutektika. Elemente koji podižu temperaturu stabilnog eutektika nazivamo grafitizatori. Karbidotvorci djeluju suprotno, tj. snižavaju temperaturu stabilnog eutektika, te povisuju temperaturu metastabilnog eutektika. Slika 2.8 prikazuje utjecaj pojedinih kemijskih elemenata na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika [9,19].



Slika 2.8 Utjecaj pojedinih kemijskih elementa na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika [9]

Utjecaj manjinskih elemenata također se mora uzeti u obzir u cilju osiguravanje prihvatljive razine nodularnosti grafita. U nodularnom lijevu prihvatljiva nodularnost je  $> 80 \%$  za nodularni grafit te  $< 20 \%$  za vermikularni grafit bez lamelnog grafita. Utjecaj manjinskih elemenata možemo izraziti pomoću Thielman-ovog faktora prikazanog na slici 2.9 [19].



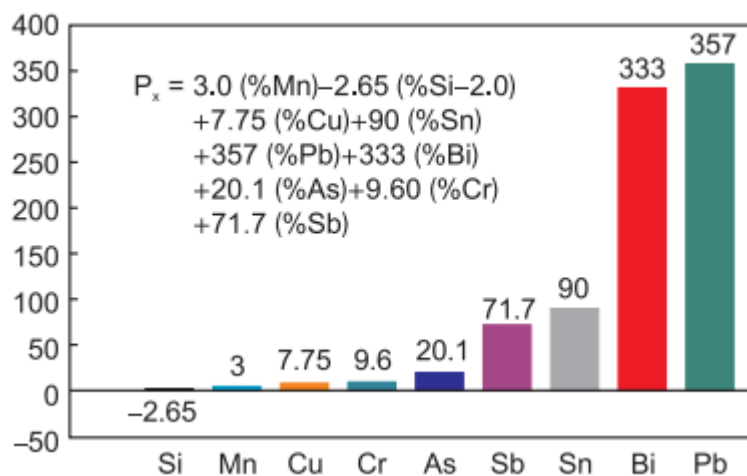


Slika 2.9 Utjecaj manjinskih elemenata na faktor  $K_1$  [19]

Slika 2.9 prikazuje da je da najveći utjecaj na morfologiju grafita imaju olovo i bizmut. Ukoliko su oba kemijska elementa prisutna u nodularnom lijevu, negativan utjecaj na morfologiju je još jače izražen [19].

Faktor  $K_1$  pokazuje nam stupanj nodularnost nodularnog lijeva, tj. prikazuje nam utjecaj manjinskih elemenata na stupanj nodulacije. Kada je  $K_1 = 1$ , nodularni lijev ima nodularnost preko 80 % te dodaci rijetkih zemalja nisu potrebni. Kada je  $K_1 = 2$ , potrebno je dodati elemente rijetkih zemalja u cilju povećanja nodularnosti, a kada je  $K_1$  između jedan i dva, elemente rijetkih zemalja poželjno je dodati u cilju zadržavanja istih [19].

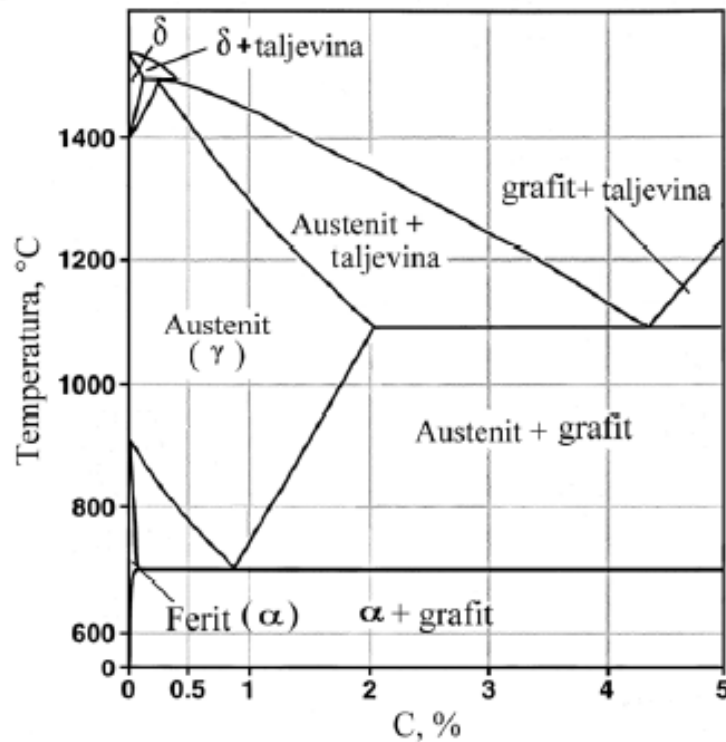
Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu može se odrediti na temelju vrijednosti perlitnog faktora  $P_x$ . Na slici 2.10 vidi se da olovo i bizmut imaju najjači učinak na stvaranje perlita u metalnoj osnovi. Budući da navedeni elementi onemogućuju stvaranje nodularnog grafita, poželjno je da je njihov udio čim manji [19].



Slika 2.10 Faktor utjecaja perlita  $P_x$  [19]

## 2.7. Skrućivanje nodularnoga lijeva

Svi željezni lijevovi s grafitom skrućuju prema ravnotežnom Fe – C dijagramu. Slika 2.11 prikazuje ravnotežni Fe-C dijagram [20].

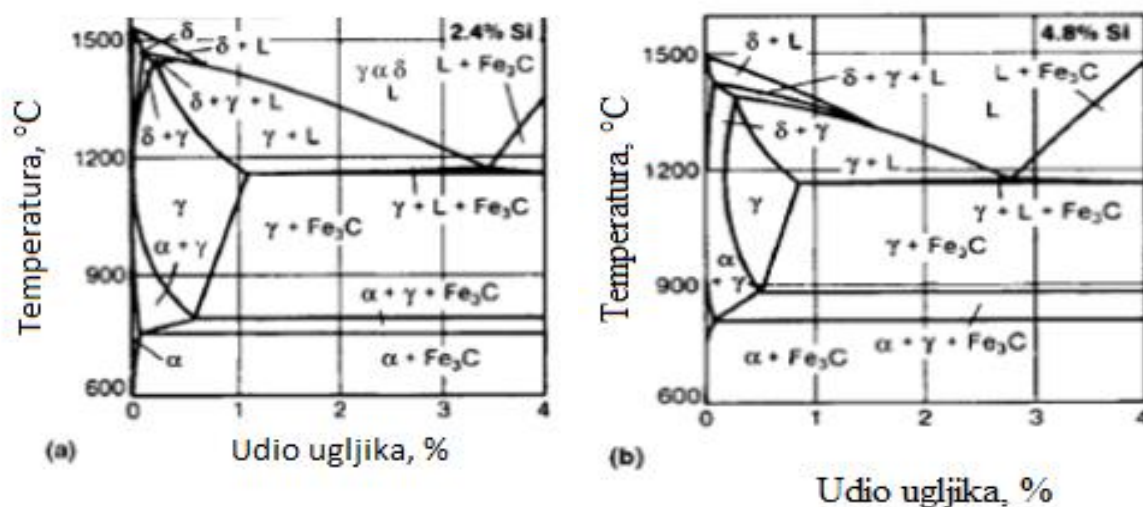


Slika 2.11 Ravnotežni Fe-C dijagram [9]

Eutektička točka na Fe-C dijagramu nalazi se na 4,3 % ugljika. To je točka u kojoj se tekuća faza skrućuje tvoreći dvije krute faze. Temperatura eutektičke transformacije od 1152 °C odgovara stabilnoj eutektičkoj transformaciji. Pri toj temperaturi ugljik skrućuje u obliku grafita. Temperatura eutektičke transformacije od 1145 °C odgovara metastabilnoj eutektičkoj transformaciji. Pri toj temperaturi ugljik skrućuje u obliku željeznog karbida  $Fe_3C$ . Talina s udjelom ugljika manjom od 4,3 % naziva se podeutektička, a talina s udjelom ugljika višim od 4,3 % naziva se nadeutektička. Talina s 4,3 % ugljika naziva se eutektična [20].

## 2.7.1. Utjecaj silicija na Fe<sub>3</sub>C dijagram

Nodularni lijev je lijev koji ima značajni udio silicija. Silicij je element promovira stvaranje grafita a otežava stvaranje perlita i karbida. Prisutnost silicija u nodularnom lijevu uzrokuje promjene u ravnotežnom Fe<sub>3</sub>C dijagramu. Jedna od glavnih promjena izazvanih silicijem je smanjenje udjela ugljika u eutektičkoj točki. Slika 2.12 prikazuje da se s povećanjem udjela silicija, udio ugljika u eutektiku smanjuje, tj. pomiče se lijevo. To znači da se s povećanjem udjela silicija u talini, topivost ugljika u austenitu smanjuje [20].



Slika 2.12 Utjecaj različitog udjela silicija na ravnotežni Fe-C dijagram a) Si=2,4 %, b) Si=4,8 % [20]

Promjena udjela ugljika u eutektičkoj točki može se izračunati kao funkcija udjela silicija prema formuli [20]:

$$CE = 4,30 - 1/3 Si \quad (2.2)$$

Zbog utjecaja silicija na eutektik te zbog udjela ugljika u Fe<sub>3</sub>C dijagramu, definirana je varijabla ekvivalent ugljika (CE). CE predstavlja izmišljeni udio ugljika u Fe<sub>3</sub>C dijagramu s obzirom da prisutnost silicija u talini. Koristeći CE vrijednost, moguće je upotrijebiti binarni Fe<sub>3</sub>C dijagram kako bi ustanovili da li je talina podeutektička, eutektička ili nadeutektička sastava [20]. Jednostavnije rečeno, ekvivalent ugljika nam pokazuje gdje se lijev određenog kemijskog sastava nalazi u odnosu na eutektik [21].

## 2.7.2. Nukleacija nodularnog grafita

Stvaranje nodularnog grafita odvija se u dvije faze. Prva faza je nukleacija, a druga je rast. Postoje mnoge teorije o nukleaciji nodularnog grafita: teorija Si – karbida, grafitna teorija, teorija karbida, teorija sličnih solima, teorija sulfida / oksida. Svim tim teorijama zajedničko je da postojanje uključaka u centru grafitne nodule, koji je mjesto za nukleaciju grafita [9,22]. Tablica 2.7 prikazuje sastav i tip uključaka na kojim se odvija nukleacija grafita [9].

Tablica 2.7 Sastav i tip uključaka na kojim se odvija nukleacija grafita [9]

Tip	Spoj (ili element)	Tip	Spoj (ili element)
Grafit	C	Karbidi	CaC <sub>2</sub> , SrC <sub>2</sub> , BaC <sub>2</sub>
Sulfidi	MgS		silicij - kapid
	CaS		Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>
	MgS·CaS, MgS·Re oksisulfid, MgS·(Ca, RE)S	MgSiN <sub>2</sub>	
	CeS, LaS	Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	
	Ce <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	BN	
	MnS, (Mn, Ca)S	AlN	
	MnS Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> Pb, CePb	
	RE <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	CeSb, CeSb <sub>2</sub>	
Oksidi	SiO <sub>2</sub>	Intermetalni spojevi	La <sub>2</sub> Pb, LaPb
	MgO		LaBi, La <sub>4</sub> Bi <sub>3</sub> , La <sub>5</sub> Bi <sub>3</sub> , LaSb, La <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> , La <sub>2</sub> Sb, LaSb <sub>2</sub>
	MgO·SiO <sub>2</sub>		Mg, Ca mjehurići
	2MgO·SiO <sub>2</sub>	Ostali	N <sub>2</sub> (koji potječu od elemenata rijetkih zemalja)
	3MgO·2SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O		Bi
	xMgO·ySiO <sub>2</sub> ·2MgS		
	(Mg, Ca, Al)SiO <sub>3</sub> , (Mg, Al)SiO <sub>3</sub>		
	(Mg, Ca, Al)SiO <sub>3</sub>		
	2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·FeO·10SiO <sub>2</sub>		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	CeO <sub>2</sub>		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		

Da bi uključci postali pogodna mjesta za nukleaciju grafita nodularnog lijeva mora postojati dobro slaganje uključaka i kristalne rešetke, te odgovarajuća međufazna energija između grafita i uključaka [9,24].

Grafit je idealno mjesto za nukleaciju nodularnog grafita, jer ne postoji razlika u kristalnoj rešetki. To može biti neotopljeni grafit iz sivog sirovog željeza, dodani kristalni grafit i izlučeni neravnotežni grafit [9,22].

## 2.8. Nepravilni oblici grafita u debelostjenim odljevcima

Zbog dužeg vremena skrućivanja debelostjeni odljevci od nodularnoga lijeva pokazuju neke specifičnosti. S povećanjem debljine stjenke odljevka, idealni kuglasti oblik nodula opada te raste veličina nodule, a smanjuje se njihov broj. Velika je sklonost prema tvorbi degeneriranog oblika grafita. Postoje nekoliko vrsta degeneriranog grafita: eksplozirani, koraljni, vermikularni, šiljasti i chunky grafit. Svaki od tih degeneriranih oblika uzrokuje pad mehaničkih svojstava [5].

### 2.8.1. Utjecaj austenitnog ovoja na degeneraciju grafita







Austenitni ovoj može se podijeliti u tri osnovna oblika [2]:

1. Brzo zatvoreni
2. Polagano zatvoreni
3. Otvoreni

Pri brzom zatvaranju austenitnom ovojnicom odvija se skrućivanje taline siromašne ugljikom oko grafitne nodule veoma brzo nakon dostizanja određene veličine nodule. Grafit je potpuno okružen austenitnim ovojem. Rast nodule prestaje relativno rano, te nastaje velik broj malih i pravilnih nodula [23].

Pri polaganom zatvaranju austenitne ovojnice talina u kanalu ostaje duže tekuća. Ostatak taline ima izravan kontakt s nodulom. Nodula u tom slučaju raste, sve dok postoji kanal s talinom. Nakon skrućivanja taline u kanalu, nodula je potpuno okružena austenitnim ovojem. Sporije zatvaranje austenitnog ovoja rezultira jačim degeneriranim oblikom grafitne nodule [23].

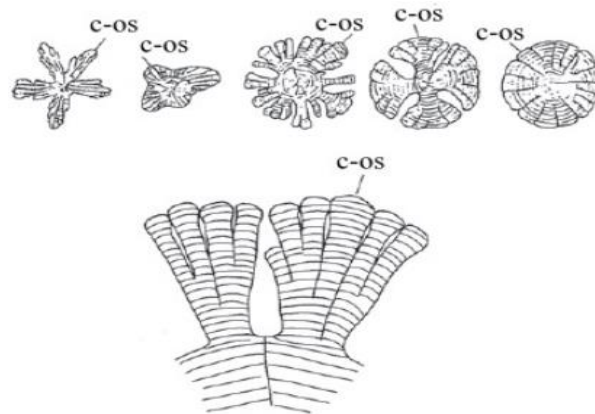
Kod otvorenog tipa austenitnog ovoja talina u kanalu ostaje tekuća sve do kraja rasta nodule. Posljedica je da nastupa još jača degeneracija grafita. Slika 2.13 prikazuje odnos između tvorbe austenitnog ovoja i oblika grafitne nodule [23].

Austenitna ovojica	Proces oblikovanja grafita	Oblik grafita
Brzo zatvorena		
Sporo zatvorena		
Otvorena		

Slika 2.13 Odnos između tvorbe austenitnog ovoja i oblika grafitne nodule [9]

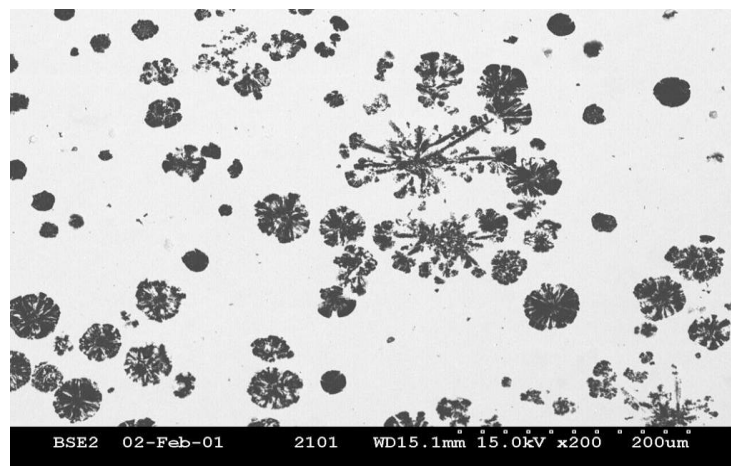
## 2.8.2. Eksplozirani grafit

Grafit koji je nastao u ranoj fazi skrućivanja zbog niske gustoće može se nakupiti na gornjoj površini stjenke odljevka. Visok udio ekvivalenta uljika, elementa rijetkih zemalja i magnezija narušuju regularni rast grafitnih nodula. Brzina rasta nodule u smjeru c osi bit će puno veća nego u smjeru a osi. Slika 2.14 prikazuje mehanizam rasta eksplozirano grafit [13].



Slika 2.14 Mehanizam rasta eksplozirano grafit [13]

Rezultat navedenog je dendritno grananje grafitu u pothlađenom području što uzrokuje nastanak eksplozirano grafitu. Slika 2.15 prikazuje eksplozirano grafitu u nodularnom lijevu [14].

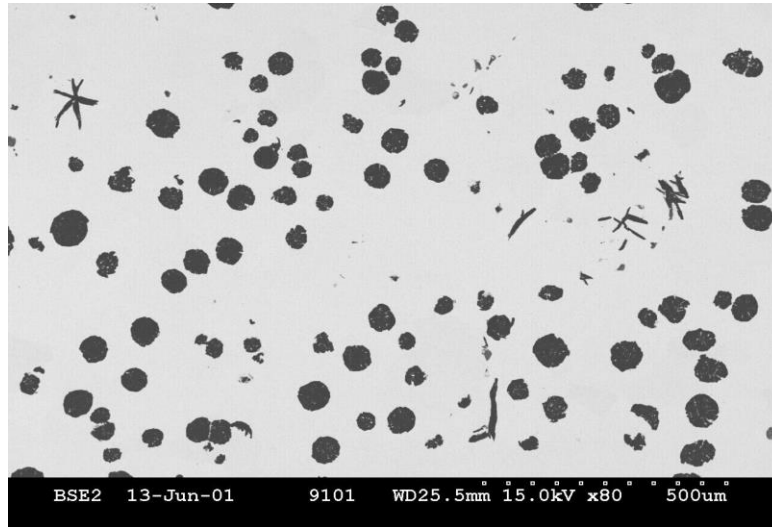


Slika 2.15 Eksplozirano grafitu u nodularnom lijevu [14]

Kontrolom ekvivalenta ugljika i elemenata rijetkih zemalja, te povećanjem brzine hlađenja može se smanjiti flotacija, odnosno isplivavanje grafitnih nodula te nastanak eksplozirano grafitu [13].

### 2.8.3. Zvezdasti ili spiky grafit

Na slici 2.16 prikazan je zvezdasti ili „spiky“ grafit u nodularnom lijevu.

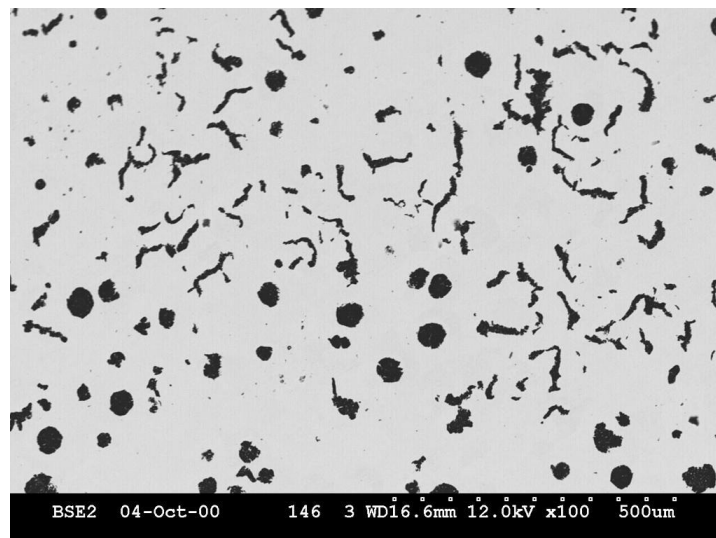


*Slika 2.16 Zvezdasti ili spiky grafit [24]*

Zvezdasti grafit u nodularnom lijevu uzrokuju vrlo mali udjeli bizmuta, olova, titana i antimona. Stvaranje zvezdastog grafita može se izbjeći dodatkom elemenata rijetkih zemalja. Zvezdasti grafit izrazito nepovoljno djeluje na mehanička svojstva, jer degenerirani oblik grafita djeluje kao konzentator naprezanja [13].

### 2.8.4. Vermikularni grafit

Na slici 2.17 prikazan je vermikularni oblik grafita.

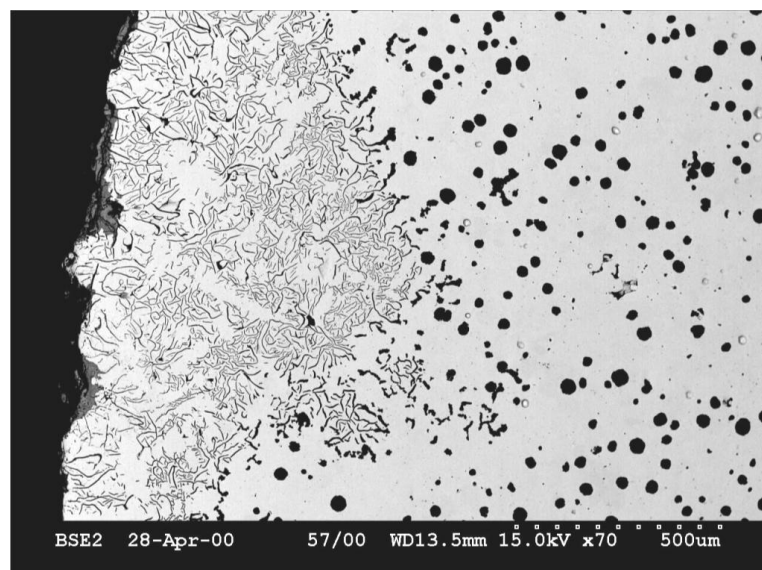


*Slika 2.17 Vermikularni oblik grafita u nodularnom lijevu [24]*

Postoje više uzroka vermikularnom obliku grafita u nodularnom lijevu. Neki od razloga vermikularnog grafita su: niski udio nodulatora u talini, predugo zadržavanje taline nakon nodulacije, previsoka temperatura taline, visok udio sumpora i kisika u primarnoj talini. Prisustvo manjinskih elemenata kao što su titan i aluminij također promovira vermikularni oblik grafita [13].

### 2.8.5. Listićavi grafit na površinskom sloju odljevka

Na slici 2.18 prikazan je listićavi grafit na površinskom sloju odljevka.



Slika 2.18 Listićavi grafit na površinskom sloju odljevaka [24]

Uzrok navedene greške je nakupljanje sumpora u kalupnoj mješavini koji reagira s magnezijem iz taline. Struktura površinskog sloja sastoji se o tri različita sloja [24]:

1. Vanjski sloj – sadrži sitne grafite listiće
2. Srednji sloj – sadrži vermikularne grafit
3. Unutarnji sloj – nodularni grafit

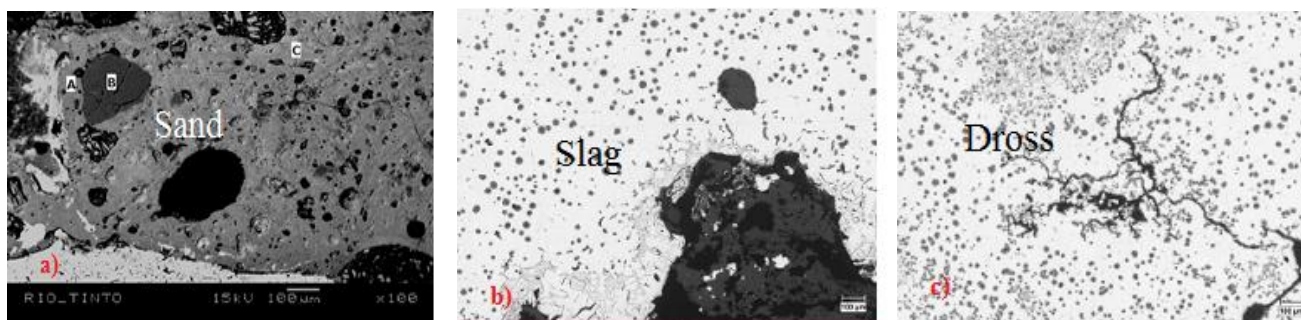
Parametri koji utječu na smanjenje debljine listićavog grafita su [24]:

- I. Smanjenje udjela sumpora u kalupnoj mješavini
- II. Viši udio nodulatora, veći udio nodulatora smanjuju debljinu sloja, ali ga ne uklanjaju
- III. Smanjenje temperature taline
- IV. Pojačati cijepljenje taline



## 2.8.6. Metalni i nemetalni uključci u nodularnom lijevu

U odljevcima od nodularnog lijeva mogu se pronaći različite vrste metalnih i nemetalnih uključaka. Navedeni uključci se sastoje od čestica pijeska, čestica troske i metalnih oksida. Čestice pijeska i troske su egzogeni materijali, tj. oni ulaze u talinu tijekom lijevanja a metalni uključci su endogene čestice koje nastaju u talini. Slika 2.19 prikazuje metalne i nemetalne uključke u nodularnom lijevu [25]:



Slika 2.19 Metalni i nemetalni uključci u nodularnom lijevu [25]:

- a) Čestice pijeska (Sand)
- b) Čestice troske (Slag)
- c) Čestice metalnog oksida (Dross)

Glavna razlika između čestica troske i čestica metalnog oksida je odsustvo CaO u metalnim oksidima, dok čestice troske obično sadrže CaO [25].

Metalni oksid je produkt reakcije koji nastaje uslijed obrade primarne taline s magnezijem i tijekom naknadne reoksidacije. Metalni oksid nastaje kontinuirano tijekom lijevanja i u rijetkim slučajevima javlja se u obliku slonove kože na gornjim površinama odljevka. Budući da je tvorba metalnog oksida povezana sa magnezijem, poželjno je držati udio magnezija za nodulaciju što je moguće nižim [25].

Pojava metalnog oksida značajno ovisi i o udjelu kisika u talini, te o vrsti strujanja tijekom lijevanja. Strujanje doprinosi apsorpciji kisika te stvaranju oksida. Iz navedenog je poželjno minimalizirati turbulentno strujanje tijekom lijevanja [25].

## 2.9. Chunky grafit

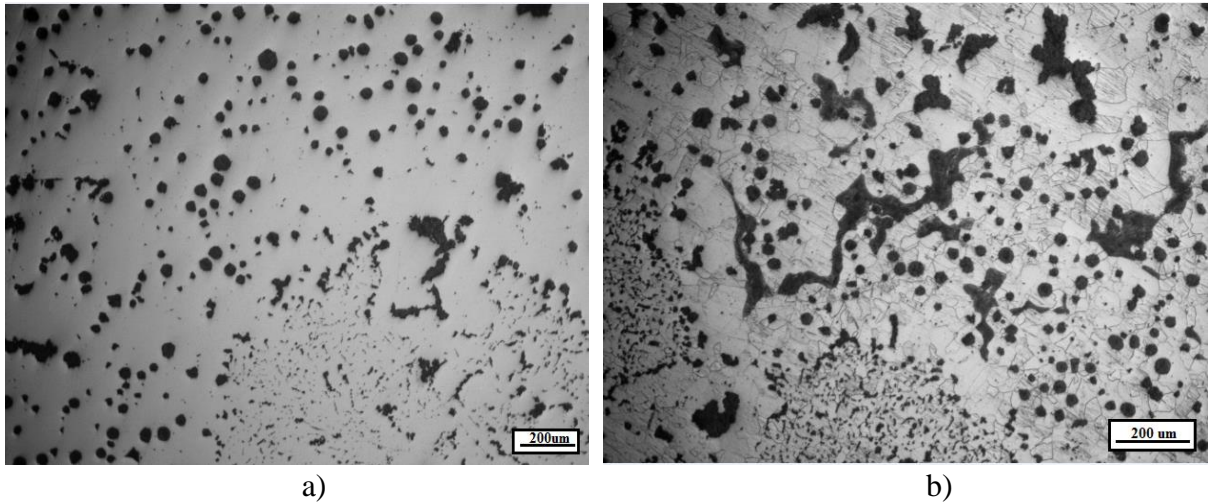
Chunky grafit pojavljuje se u obliku mreže visoko razgranatih i međusobno povezanih niti. Chunky grafit može se prepoznati kao tamno područje na površini odljevka koje postaje vidljivo nakon strojne obrade. Slika 2.20 prikazuje mjesto chunky grafita u ispitnom uzorku nakon rezanja pilom [4,26].



*Slika 2.20 Područje chunky grafita nakon rezanja odljevka [7]*

Mjesto chunky grafita upućuje na mjesto toplinskog centra odljevka (slika 2.18). Chunky grafit obično raste u eutektičkim ćelijama grafita i austenita a visina ćelija iznosi od 0.5 mm do 4 mm. Chunky grafit ne raste u savršeno oblikovanim eutektičkim ćelijama, a vidljivost pojedinih ćelija u metalografskim presjecima opada s povećanjem udjela chunky grafita. Vidljivost chunky grafita ovisi o tome kako su nakupine chunky grafita vidljive nakon strojne obrade. Prepoznavanje chunky grafita otežava grafit nepravilnog oblika koji se ne može klasificirati prema ispitnim normama [4, 26].

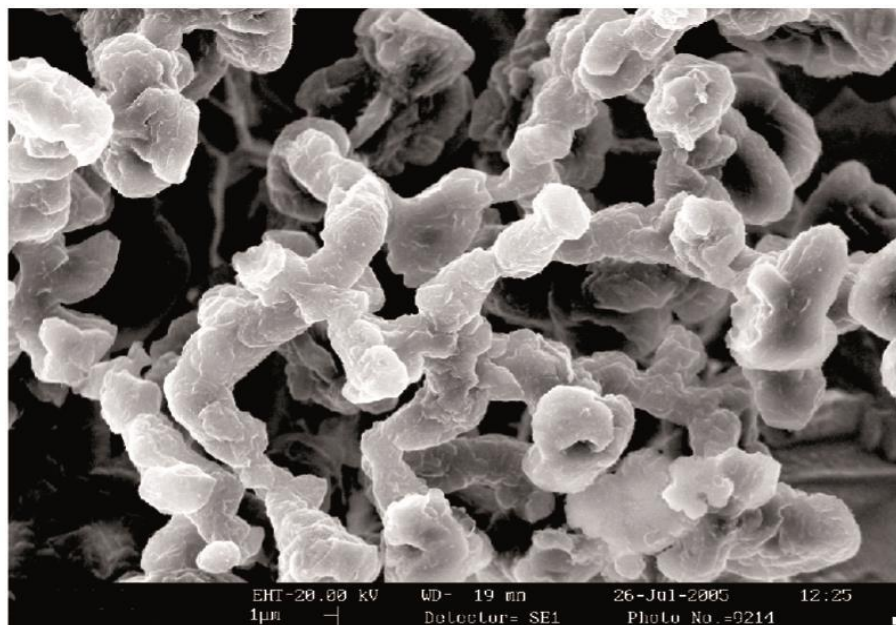
Slika 2.21 prikazuje chunky grafit u feritno – perlitnom nodularnom lijevu, polirano i nagrizeno stanje.



*Slika 2.21 Chunky grafit u poliranom (a) i nagrizenom (b) stanju [7]*

Postoje dva oblika chunky grafita, fini i grubi. Zajedničko svojstvo oba oblika je radijalna struktura s rastom uzduž z osi. Krupni chunky grafit izlučuje se između dendrita u kasnom stadiju skrućivanja, dok se na velikim površinama pojavljuje sitni chunky grafit [4,26].

Glavna značajka chunky grafita je trodimenzionalna vlaknasta, razgranata i međusobno povezana struktura u svakoj ćeliji. Ovakva vrsta strukture ne postaje očita promatranjem dvodimenzionalnih metalografskih presjeka, gdje se grafit pojavljuje kao diskretne čestice. Bolji izgled specifične morfologije chunky grafita može se otkriti promatranjem pomoću elektronskog mikroskopa (SEM). Slika 2.22 prikazuje chunk grafit promatran pomoću SEM- a [4, 26].

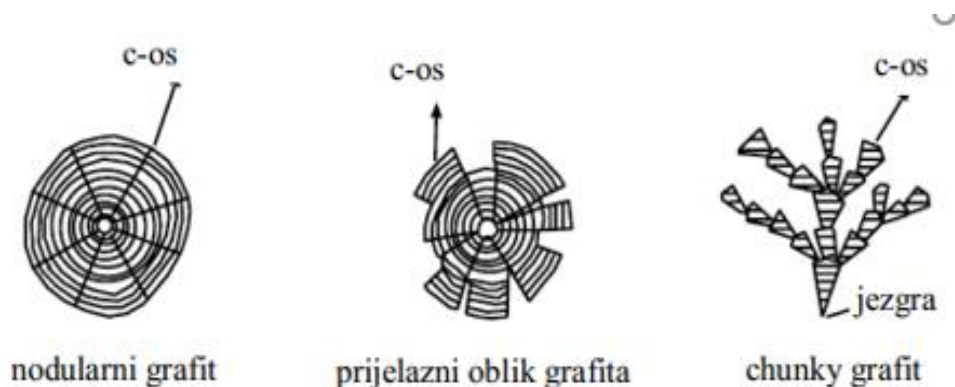


*Slika 2.22 Niti chunky grafita [26]*

Postoje više teorija o nastanku i rastu chunky grafita u nodularnom lijevu, ali jedinstveno i općeprihvatljivo objašnjenje još nije ustanovljeno. U nastavku prikazane su neke od teorija nastanka i rasta chunky grafita [4].

**Karsay** navodi da chunky grafit proizlazi od malih komadića odlomljenih od običnih grafitnih nodula. Zbog toplinskog strujanja i napetosti pri rastu, nodule se mogu razbiti u sektore i raspršiti u interdendritne prostore. Ugljik može difundirati iz taline, te se može taložiti na tim komadićima, mijenjajući njihov izgled uzrokujući karakterističnu grafitnu povezanost. Danas je ova teorija isključena jer je otkriveno da chunky grafit raste međusobno povezan [4].

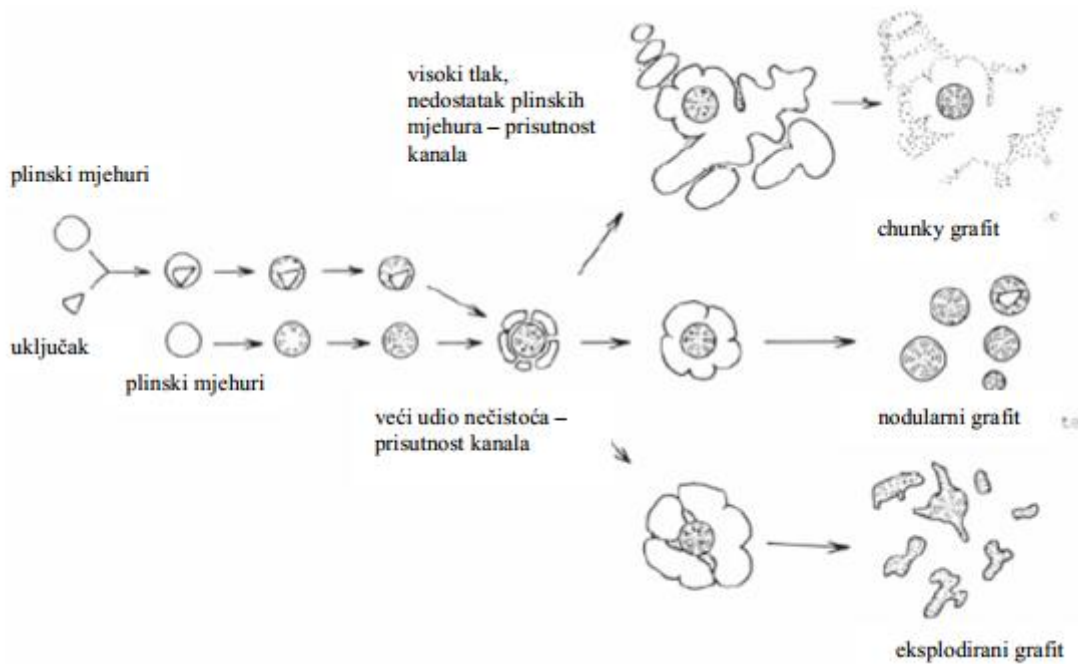
**Liu** predlaže mehanizam spiralnog rasta gdje je chunky grafit sastavljen od niza nakupina, tj. grafitnih segmenata. Grananje se pripisuje mikorsegregaciji izvjesnih elemenata kao npr. cerij. Chunky grafit opisan je kao degenerirani oblik nodularnog grafita pri čemu postoje intermedijalni oblici između chunky grafita i nodularnog grafita koji se mogu primijeniti u područjima chunky grafita u debelostjenim odljevcima od nodularnoga lijeva. Zajednička obilježja su centralni nukleus i glavni pravac rasta grafita duž c osi. Slika 2.23 prikazuje rast nodularnog, prijelaznog te chunky grafita [4].



Slika 2.23 Rast nodularnog, prijelaznog i chunky grafita [4]

**Itofuji** navodi da nodularni grafit nukleira na površini mjehura magnezija i raste radijalno prema centru. Glavni razlog izlučivanja chunky grafita u toplinskom centru debelostjenih

odljevaka je mogući nedostatak raspoloživog magnezija u obliku plinskih mjehura sa slobodnom površinom za tvorbu grafita. Daljnji razlozi za nedostatak raspoloživog magnezija mogu biti duga oksidacija tijekom lijevanja, reakcija sa vatrostalnom oblogom ili postupno gubljenje putem plinskih mjehura. Svaki dio chunky grafita ima površinu bazne ravnine i presjek prizme površine heksagonalnog kristala grafita. Chunky grafit raste uzduž a osi a spiralni rast ne postoji. Ugljik se izlučuje kroz austenit kroz uske kanale i taloži se na grafitu. Podstrukture vermikularnog, nodularnog i chunky grafita su u osnovi iste. Slika 2.24 prikazuje tvorbu chunky grafita prema Itofuji [4].



Slika 2.24 Rast chunky grafita prema Itofuji [5]

**Zhou** navodi da se stvaranje chunky grafita temelji na heterogenoj nukleaciji grafita i slaboj povezanosti između eutektičkih faza. Dok listićavi grafit raste uz čvrstu povezanost, a nodularni grafit bez povezanosti, chunky i vermikularni grafit rastu sa slabom povezanosti između austenita i grafitnih faza. Grafit je slobodan te se savija zbog slabe povezanosti s austenitom [4].

**Gange** navode da chunky grafit raste brzo na ravnini baze kristala grafita na spiralni način duž z osi. Glavni pokretač spiralnog rast je prezasićenje ugljikom, koje je uzrokovano visokom ekvivalentom ugljika i niskim nukleacijskim potencijalom taline [4].

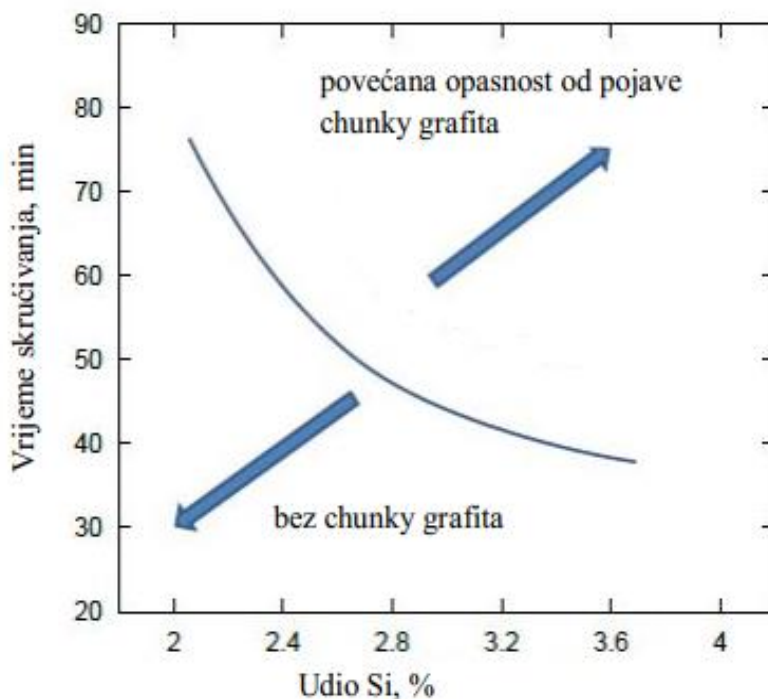
### 2.9.1. Utjecajni faktori na pojavu chunky grafita

Glavni utjecajni faktori na pojavu chunky grafita su: kemijski sastav taline, brzina skrućivanja, temperatura lijevanja, udio rezidualnog magnezija i nukleacijski potencijal taline [4].

#### Utjecaj kemijskog sastava na pojavu chunky grafita

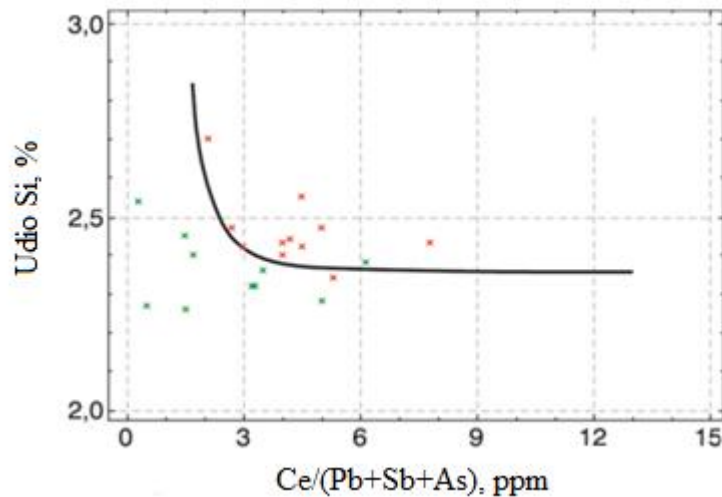
Postoje različite teorije o postavljanju optimalnog ekvivalenta ugljika na stvaranje chunky grafita. Neka istraživanja navode da se s povećanjem ugljičnog ekvivalenta smanjuje chunky grafit, jer viši ekvivalent ugljika povećava broj nodula. Neka istraživanja navode da bi idealni ekvivalent ugljika trebao biti eutektičkog sastava da se spriječi flotacija ugljika [26].

Silicij je jedan od najvažnijih elemenata u nodularnom lijevu. Promovira stabilno skrućivanje, otežava stvaranje karbida i promovira stvaranje ferita. Istraživanja pokazuju da je maksimalni dopušteni udio silicija na sprječavanje nastanka chunky grafita u ovisnosti o vremenu skrućivanja odljevka. Slika 2.25 prikazuje utjecaj udjela silicija i vremena skrućivanja na nastanak chunky grafita [4,5].



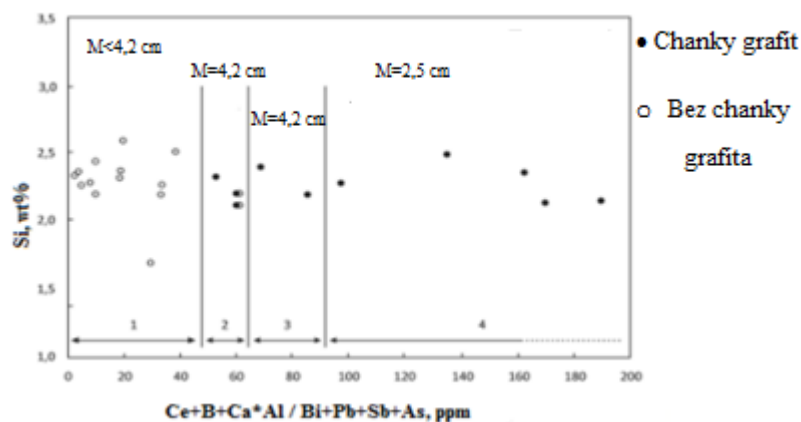
Slika 2.25 Utjecaj udjela silicija i vremena skrućivanja na nastanak chunky grafita [5]

U nodularnom lijevu osim stalnih i legirnih elemenata postoje i manjinski elementi. Manjinski elementi mogu promovirati ili otežavati stvaranje chunky grafita, ovisno o udjelu te interakciji sa drugim manjinskim elementima. Dodavanjem elemenata u tragovima moguće je neutralizirati štetno djelovanje zaostalih elemenata. Slika 2.26 prikazuje odnos silicija i omjera manjinskih elemenata na pojavu chunky grafita [4,26].



Slika 2.26 Odnos između silicija i omjera manjinskih elemenata na pojavu chunky grafita [26]

Slika 2.26 uzima u obzir samo elemente: cerij, olovo, antimon i arsen, a elemente kao što su aluminij, kalcij, bor i bizmut ne uzima u obzir. Budući da se u nodularnom lijevu nalaze navedeni elementi, potrebno je i njih uzeti u obzir. Također je potrebno uzeti u obzir i modul skrućivanja odljevka, jer je velik modul skrućivanja odljevka jedan od najvećih uzroka nastajanja chunky grafita. Slika 2.27 prikazuje utjecaj manjinskih elemenata na stvaranje chunky grafita ovisno o modulu skrućivanja i udjelu silicija [4,26].



Slika 2.27 Utjecaj omjera manjinskih elemenata, silicija i modula skrućivanja na pojavu chunky grafita [5]

Na slici 2.27 prikazana su četiri područja u ovisnosti o omjeru manjinskim elementima. U prvom području gdje je modul skrućivanja manji od 4,2 cm a omjer manjinskih elemenata manji od 45 ppm. nema pojave chunky grafita. U drugom području pri omjeru manjinskih elemenata od 45 pa do 65 ppm postoji mogućnost nastanka chunky grafita. U trećem području pri omjeru manjinskih elemenata od 65 pa do 90 ppm. dolazi do stvaranja chunky grafita uzrokovano sve većim udjelom elemenata koji promoviraju stvaranje chunky grafita. U četvrtom području također dolazi do stvaranja chunky grafita uzrokovano još većim udjelom elemenata koji promoviraju stvaranje chunky grafita, bez obzira na modul od 2.5 cm [6].

## 2.10. Cijepljenje

Dodaci malih količina materijala poznatih pod imenom cjepivo možemo mijenjati mikrostrukturu te nukleacijski potencijal taline. Učinci cjepiva mnogo su veći od onih koji se očekuju promjenom kemijskog sastava taline. Talina se obogaćuje novim nukleusima koji smanjuju pothlađenje tijekom skrućivanja [27].

Cijepljenje se koristi primarno za proizvodnju nodularnog lijeva bez eutektičkih karbida, za dobivanje feritne mikrostrukture te za povećanje broja nodula i smanjenje degeneriranog oblika grafita [27].

Većina cjepiva koja se koriste bazirana su na ferosiliciju koji sadrži 45 do 75 % silicija. Jačina cjepiva ovisi o prisutnosti jednog ili više manjinskih elemenata. U nekim slučajevima manjinski elementi mogu sami djelovati kao cjepivo, ali ih nije praktično koristiti u njihovom elementarnom obliku [27]. Tablica 2.8 prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka gdje je antimon dodan u obliku cjepiva i te kao čisti manjinski element [28].

Tablica 2.8 Rezultati ispitivanja ispitnog uzoraka sa dodatkom čistog antimon ili u obliku cjepiva [28]

	Cjepivo sa dodatkom Sb	Čisti Sb + FeSi
Nodularnost [%]	96	84
Broj nodula [mm <sup>2</sup> ]	204	158
Rm [Mpa]	381	325
A [%]	28	24
Udio perlita [%]	0	2
Udio chunky grafita [%]	0	5



Sva cjepiva koja su bazirana na FeSi ovise o udjelu jednog ili više manjinskih elemenata: aluminijska, kalcijeva, lantana, barijska, stroncijeva, cirkonijska, manganska i cerijska. Tablica 2.9 prikazuje kemijski sastav cjepiva za nodularni lijev [13].

Tablica 2.9 Kemijski sastav cjepiva za nodularni lijev [13]

Cjepivo	Kemijski sastav cjepiva, mas.%								
	Si	Al	Ca	Ba	Sr	Zr	Mn	Mg	RE
FeSi-Al-Ca	75	0,6-0,125	0,6-1						
FeSi-Ba	60-65	1	0,8	0,8		6	6		
FeSi-Ba	60-65	0,5-1,7	1	9,0-11,0					
FeSi-Ba	60-65	1,5	2	5,0-6,0			9,0-10,0		
FeSi-Ba	70-75	0,8-1,2	0,8-1,2	1,75-2,25					
FeSi-Zr	80	1,5-2,5	2,5			1,5			
FeSi-Sr	75	> 0,5	> 0,1		0,8				
FeSi-Sr	45-50	> 0,5	> 0,1		0,8				
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						13 Ce
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						2,5 Ce
45% FeSi	45-50	0,8	0,8					1,25	
45% FeSi-Mg	45-50	0,8	0,8						
FeSi-La	75	1,5							2,0 - 2,5 La

Postoje više varijanta cijepjenja. Cjepivo se može dodati tijekom taljenja metalnog uložka, tijekom izlijevanja iz peći (cijepjenje u mlaz) ili dodatkom cjepiva u lonac prije nodulacije. Metoda cijepjenja tijekom lijevanja i ulaska taline u kalup nazivamo metode kasnijeg cijepjenja. Prednosti metoda kasnijeg cijepjenja je da se smanjuje slabljenje cjepiva. Istraživanja su pokazala da se više od polovice učinka cijepjenja izgubi unutar pet do deset minuta od dodatka cjepiva [13,27].

## 2.11. Postupci nodulacije

Dodatak sredstva za nodulaciju u primarnu talinu mora se provesti na odgovarajući način da bi se ostvario ciljani udio magnezija u talini. Postoje različiti postupci nodulacije. U tablici 2.10 prikazani su različiti postupci nodulacije [9].

Tablica 2.10 Postupci nodulacije [9]

Nodulator	Preljevanje ili obrada u otvorenom loncu		Obrada u loncu s poklopcem	Obrada u kalupu	Obrada protjecanjem	Uranjanje nodulatora		Konvertor	Nodulator u čeličnoj žici
	Ni-Mg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg ili Mg/Si	Mg/Fe briket	Mg	Mg/Si ili Mg
Udio Mg, %	4 - 15	3 - 10	3 - 10	3 - 10	3 - 5	10 - 45	15+	100	20 - 100
Iskorištenje Mg, %	45 - 90	35 - 70	50 - 80	70 - 80	30 - 50	30 - 60	30 - 50	30 - 50	30 - 50
Troškovi postrojenja	Vrlo niski	Vrlo niski	Niski	Vrlo niski	Niski	Srednji	Srednji	Visoki	Srednji
Fleksibilnost procesa (6-najviša)	6	6	5	2	3	3	2	1	2
Emisija plinova	Srednja	Srednja/visoka	Niska	Bez	Srednja	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka
Sakupljanje plinova	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Da	Da
Ograničenje na %S u primarnoj talini	0,04	0,03	0,03	0,01	0,03	0,04	0,1	Nema	Nema
Mjesto na kojem se provodi obrada	Kod peći	Kod peći	Kod peći	U kalupu	Izbor	Izbor	Izbor	Izbor	Izbor
Ograničenje na masu primarne taline	Nema	Nema	Nema	< 500 kg	Nema	< 500 kg	< 500 kg	< 500 kg	< 500 kg
Učinkovitost cijepjenja od obrade	Ne	Nizak/srednji	Srednji/visok	Vrlo visok	Srednji/visok	Nizak	Ne	Ne	Ne/nizak
Jačina reakcije	Slaba/srednja	Srednja/visoka	Slaba/srednja	Vrlo slaba	Srednja	Srednja/jaka	Srednja/jaka	Vrlo jaka	Jaka
Moguć rizik od visokog udjela Si	Ne	Da	Da	Da	Da	Da	Ne	Ne	Ne
Proizvodni kapacitet pogodan za proces	Mali	Mali do veliki	Mali do veliki	Srednji do veliki	Mali do srednji	Srednji do veliki	Srednji do velik	Veliki	Srednji do velik

Jedan od najraširenijih postupaka obrade je postupak obrade u loncu. Kod tog postupka nodulator je smješten na dnu lonca a primarna ili bazna talina preljeva se preko njega. Dodavanjem poklopca na lonac dolazi do povećanje iskorištenja magnezija. Osim tog postupka, primjenjuje se i dodavanje čelične žice punjenje nodulatorom u primarnu talinu u loncu [13].

Osim obrade u loncu, predlegura se može smjestiti i u uljevni sustav u kalupu. U tom slučaju u kalup se lijeva primarna talina, koja u kalupu reagira s nodulatorom [13].

Postupak obrade protjecanjem također je zastupljen u praksi. Kod tog postupka u posebnu komoru u kojoj se nalazi predlegura ulijeva primarna talina koja reagira s predlegurom, a nodulirana talina izlazi van kroz dno komore [13].

### 3. Eksperimentalni dio

Cilj ovog diplomskog rada je istražiti utjecaj manjinskih elemenata u nodularnom lijevu na mehanička svojstva debelostjenih odljevaka od nodularnog lijeva. Od manjinskih elemenata u nodularnom lijevu, posebna pozornost posvećena je bizmutu, antimonu, ceriju i lantanu. Manjinski elementi nisu dodavani kao čisti metali, nego u obliku cjepiva. Njihov udio u cjepivu definirao je proizvođač. Za izradu diplomskog rada izrađene su četiri kvalitete lijeva: HRN EN GJS 400-15, HRN EN GJS 400-18, HRN EN GJS 400-18 LT i HRN EN GJS 500-7 prema normi HRN EN 1563. Temperature taline te brzine hlađenja debelostjenih odljevaka bile jednake za sve odljevke.

Prvi dio eksperimentalnog rada sastojao se od konstrukcije modela kocki dimenzija 180 mm x 180 mm x 180 mm sa pripadajućim uljevnim sustavom i hraniteljem. Veličina modela određena je debljinom stjenke odljevka prema normi HRN EN 1563. Prema navedenoj normi, najveća debljina stjenke odljevka iznosi 200 mm. Ako je debljina stjenke odljevka veća od 200 mm tada zahtjeve za mehanička svojstva ne definira norma nego su predmet dogovora između proizvođača i kupca. Napravljena je numerička simulacija lijevana i skrućivanja u kojoj su definirani glavni parametri za simulaciju (dimenzije i materijal kalupa, veličina mreže, materijal legure, temperatura lijevanja, protok taline te vrsta hranitelja).

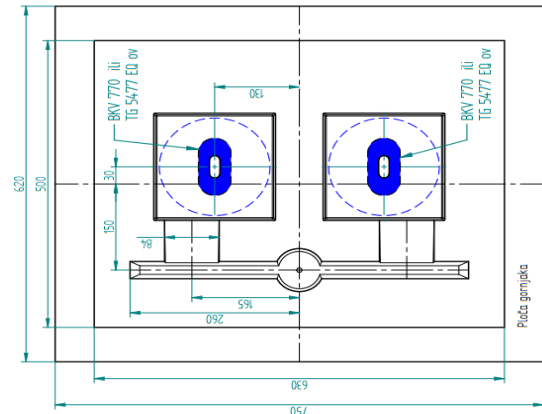
Drugi dio eksperimentalnog rada bio je proizvodnja nodularnog lijeva koja se sastojala od proizvodnje bazne taline i naknadna modifikacija navedene taline u nodularnu. Proizvodnja bazne taline izvedena je u srednje-frekventnoj indukcijskoj peći s loncem. Modifikacija grafita izvedena je u otvorenom loncu s pregradom.

Treći dio eksperimentalnog rada sastojao se od laboratorijska ispitivanja ispitnih uzoraka. Navedena ispitivanja sastojala su se od toplinske analize kemijskog sastava, spektroskopske analize kemijskog sastava, metalografskih ispitivanja te ispitivanja mehaničkih svojstava nodularnog lijeva.

Izrada modela, izrada kalupa, proizvodnja nodularnog lijeva te naknadna ispitivanja ispitnih uzoraka provedena su u ljevaonici Ferro-Preis d.o.o u Čakovcu.

### 3.1. Izrada modela

Za izradu diplomskog rada izrađen je model kocke dimenzija 180 mm x 180 mm x 180 mm. Model kocke izrađen je u modelariji ljevaonice Ferro-Preis, te prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1 Model i nacrt kocke [7]

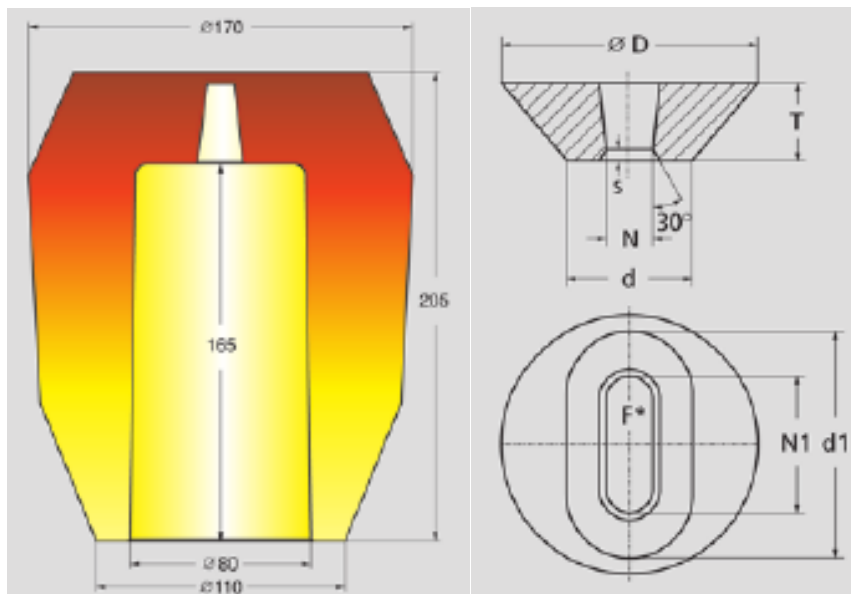
Na modelnoj ploči nalaze se dva modela kocki. Modul svake kocke iznosi 3 cm. Za ovo istraživanje ispitana je samo kocka 1. Na svakoj kocki nalazi se egzotermno pojilo s modulom  $M=4,20$  cm. Čaša s keramičkim filterom stavljena je na vrhu spusta [29].

Modul kocke dobiven je računskim putem, dijeljenjem volumena kocke ( $V$ ) sa oplošjem kocke ( $A$ ). Modul kocke prikazan je izrazom [29]:

$$M = \frac{V}{A} \quad (3.1)$$

Egzotermno pojilo sa modulom  $M=4,2$  cm izabrano je u cilju pravilnog hranjenja i skrućivanja odljevka.

Slika 3.2 prikazuje egzotermno pojilo sa modulom  $M=4,20$  cm [29].



Slika 3.2 Egzotermno pojilo BKV 770 [29]

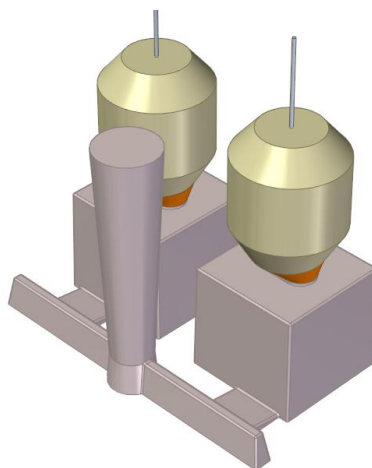
Dimenzije egzotermnog pojila prikazane su u tablici 3.1 [29].

Tablica 3.1 prikazuje dimenzije i karakteristike egzotermnog pojila BKV 770 [29]

Tip pojila	Dimenzije (mm)							$F^*(\text{cm}^2)$	Modul (cm)
	D	d	d1	N	N1	T	s		
BKV 770	110	50	100	17	40	26	5	6,2	4,2

## 3.2. Numerička simulacija

Numerička simulacija u ljevarstvu prikazuje nam tijekom lijevanja i skrućivanja, pojavu poroznosti uslijed skupljanja, pojavu plinske poroznosti, prikazuje erozije kalupa te deformaciju odljevaka tijekom skrućivanja. Za izradu simulacije potrebno je prvo izraditi reprezentativan 3D model odljevka. Model odljevaka može se izraditi u bilo kojem programskom alatu za 3D crtanje [30]. Slika 3.3 prikazuje 3D model kočke izrađen u programskom alatu SolidEdge [7].



Slika 3.3 3D model kočke [7]

Nakon izrade modela, isti je potrebno izvesti u .stp ili .stl ekstenziju te uvesti u program za simulaciju. Izrada simulacije izvedena je u programskom alatu NovaCAST. Nakon učitavanja 3D modela potrebno je odrediti parametre. Tablica 3.2 prikazuje potrebne parametre za numeričku simulaciju 3D modela kočke.

Tablica 3.2 Potrebni parametri za numeričku simulaciju kočke

Dimenzije kalupa [mm]	630*500*600
Okvirna veličina mreže [mm]	5
Materijal legure	HRN EN GJS 400-15
Temperatura lijevanja (°C)	1375
Protok [kg/s]	14,5
Materijal kalupa	Furan
Hranitelj	FEEDEX HD

### 3.3. Proizvodnja nodularnog lijeva

Proizvodnja nodularnog lijeva sastoji se od dva dijela. Prvi dio je proizvodnja bazne taline, a drugi dio jer modifikacija grafita bazne taline [9].

#### 3.3.1. Proizvodnja bazne taline

Proizvodnja bazne taline izvedena je u srednje frekventnoj peći za taljenje željeznih ljevova kapaciteta 4 t. Uložni materijal za proizvodnju bazne taline sastoji se od: niskomanganskog sivo sirovog željeza, čeličnog otpada, povratnog materijala unutar ljevaonice, karbosila, sredstva za naugljičenje, te ferolegure. Tablica 3.3 prikazuje uložni materijal za proizvodnju bazne taline [31].

Tablica 3.3 Uložni materijali za proizvodnju nodularnoga lijeva [31]

Uložni materijal	Udio (%)	Masa (kg)	%mas. C	%mas. Si	%mas. Mn	%mas. P	%mas. S
Niskomangansko sivo sirovo željezo	58,73	2427	4,13	0,15	0,022	0,032	0,012
Čelični otpad	14,13	584	0,14	0,18	1	0,01	0,01
Povratni materijal	24,85	1027	3,5	2,5	0,3	0,03	0,01
Karbosil	0,7	29	28,5	60	0	0	0
Ferosilicij	0,98	40	0	75	0	0	0
Naugljičivač	0,61	25	99,5	0	0	0	0
Ukupno	100	4132	4,03	1,7	0,25	0,028	0,011

Osim uložnih materijala, tablica 3.3 prikazuje udjele uložnih materijala, njihov kemijski sastav te očekivani kemijski sastav bazne taline. Računski udio uljika iznosi 4,03 % mas. ali je on u praksi niži jer dolazi do izganja ugljika tijekom taljenja [31].

Referentne vrijednosti kemijskog sastava bazne taline prikazane su u tablici 3.4 [11].

Tablica 3.4 Referentne vrijednosti bazne taline nodularnog lijeva [11]

Kemijski element	Fe	C	Si	S	P	Mn	Cr	Cu	Ni	CE
% mas.	93,60 – 94	3,6 - 3,8	1,6 - 1,8	< 0,015	< 0,04	< 0,3	< 0,02	< 0,4	< 0,03	4,17 - 4,44

Nakon završetka taljenja uzima se ispitni uzorci za termičku analizu i analizu kemijskog sastava. Ako su vrijednosti kemijskih elemenata manje od referentnih potrebno je napraviti korekciju taline dodavanjem istih [31].

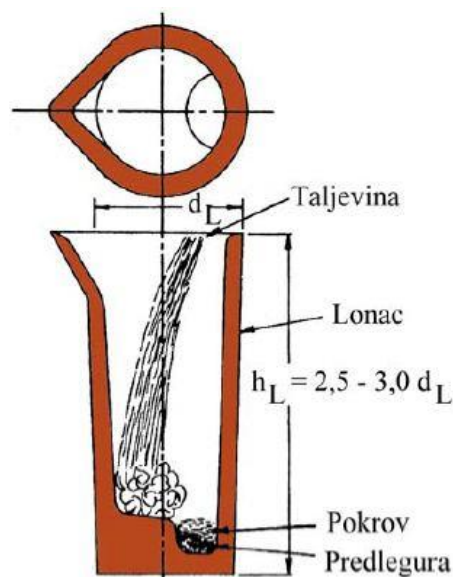
Referentna temperatura u elektropeći je od 1460 – 1480 °C [31].

### 3.3.2. Modifikacija bazne taline

Da bi proizveli nodularni lijev potrebno je modificirati grafit bazne taline. U ovom radu nodulator je na bazi magnezija, osim u jednom slučaju kad je nodularator na bazi magnezija i nikla

Za postupak obrade odabran je Sandwich postupak zbog svoje jednostavnosti i fleksibilnosti [31].

Slika 3.5 prikazuje Sandwich postupak modifikacije [9].



Slika 3.5 Sandwich postupak [9]

Nodulator se smješta u džep na dnu lonaca. Nodulator se pokriva sa cjepivom i/ili čeličnim česticama koja sprječava prijevremenu reakciju magnezija sa talinom. Kasnija reakcija povećava usvajanje magnezija u talini [9].



Slika 3.6 prikazuje izlivanje bazne taline iz elektro peći i reakciju taline i nodulatora [31].



Slika 3.6 Nodulacija bazne taline [7]

### 3.3.3. Cijepljenje nodularnog lijeva

U ovom radu cijepljenje je izvedeno na dva načina. Prvi način je cijepljenje prilikom izlivanja taline iz peći a drugi način je prekrivanje nodulatora u Sandwich loncu [30]. Za potrebe ovog rada odliveno je osam ispitnih uzoraka. Cjepiva su od različitih proizvođača sa različitim manjinskim elementima [31]. Kemijski sastav cjepiva prikazan je u tablici 3.5 [31].

Tablica 3.5 Kemijski sastav cjepiva [31]

Kemijski sastav cjepiva, mas. %								
Cjepiva	Si	Ca	Ba	RE	Al	Bi	Sb	Fe
FeSi-Ba	46-50	0,75 - 1,25	0,75 - 1,25	0	0,75 - 1,25	0	0	ost.
FeSi-Bi	70 - 75	1,0 - 2,0	0	0,4 - 0,7	0,7 - 1,4	0,8 - 1,3	0	ost.
FeSi-Ce	70 - 76	0,75 - 1,25	0	1,5 - 2,0	0,75 - 1,25	0	0	ost.
FeSi-Sb	68 - 75	1,2 - 2,0	0	0,4 - 0,7	0,7 - 1,5	0	0,8 - 1,3	ost.

Cjepiva su na bazi silicija. Sva cjeviva sadrže određene udjele kalcija i aluminijsa. Jedina je razlika u dodatku jednog ili više manjinskih elemenata. U ovom radu ispitano je cjevivo sa manjinskim udjelom barija i elementa rijetkih zemalja. To je standardno cjevivo koje se koristi u proizvodnji nodularnog lijeva. Ispitana su još i cjeviva na bazi bizmuta i antimona. Literatura navodi kako mali udjeli navedenih elemenata povoljno djeluje na morfologiju grafita te smanjuje pojavu grešaka u debelostjenim odljevcima od nodularnoga lijeva [31].

### 3.3.4. Nodulatori

U ovom radu ispitana su četiri noduladora. Nodulator sa manjinskim udjelom elementa rijetkih zemalja, kalcija i nikla. Željeni udio magnezija u nodularnoj talini je od 0,04 – 0,05 % mas. [31].

Tablica 3.6 prikazuje nodulatore sa različitim udjelima manjinskih elemenata [31].

Tablica 3.6 Kemijski sastav noduladora sa različitim udjelima manjinskih elemenata [31]

Kemijski sastav noduladora, mas. %							
Nodulatori	Si	Mg	Ca	RE	Al	Ni	Fe
nodulator sa RE	44 - 48	3,5 - 3,8	0,9 - 1,1	0,6 - 0,8	0,5 - 1,2	0	ost.
nodulator sa Ca	44 -48	5,55 - 6,15	0,8 - 1,2	0	0,8 -1,2	0	ost.
FeNiMg nodulator	0	4.0 - 5.0	0	0	0	62	ost.
Mischmetal	45	5,9	1,1	1	0,8	0	ost.

Mischmetal je legura elemenata rijetkih zemalja. U nekim literaturama naziva se još i cerij Mischmetal ili rijetke zemlje Mischmetal. Mischmetal obično sadrži 0,25 % lantana, 0,5 % cerija te 0,25 % neodimija [6].

### 3.3.5. Izrada kalupa od furanskog pijeska

Kalupi za lijevanje ispitnih uzoraka izrađeni su od furanske kalupne mješavine. Navedena mješavina se sastoji od novog suhog kvarcnog pijeska srednje veličine zrna 0,377 mm, povratnog (regeneriranog) pijeska srednje veličine zrna 0,355 mm te furanske smole kao veziva u udjelu od 1,1 % prema količini pijeska i kiselog utvrđivača u udjelu od 25 % prema smoli. Omjer novog i povratnog pijeska iznosio je 10:90 [32]. Slika 3.7 prikazuje kalup za lijevanje ispitnog uzorka [7].



*Slika 3.7 Kalup za lijevanje ispitnog uzorka [7]*

Kalup je premazan premazom na bazi Mg i Fe silikata sa udjelom Fe oksida i sjajnog ugljika. Navedeni premaz smanjuje štetan utjecaj sumpora iz kalupne mješavine na površinsku strukturu odljevka, odnosno smanjuje degenerirani oblik grafita na površini odljevka. Svojstva premaza prikazana su u tablici 3.7 [32].

Tablica 3.7 Svojstva premaza [32]

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća pri 20 <sup>0</sup> C	1,6 g/cm <sup>3</sup>
Suha tvar	66%
Viskoznost (DIN 4)	11 sek.

### 3.3.6. Analiza kemijskog sastava

U metalurgiji je veoma važno poznavati kemijski sastav odljevka. To je prije svega važno kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta odljevka koja je propisana raznim normama i standardima [33].

#### Spektralna kemijska analiza

Spektralna analiza kemijskog sastava je vrsta kemijske analize koja se koristi za određivanje raspodjele atoma i elektrona unutar molekule. Uređaj za spektralnu analizu naziva se spektrometar. Prilikom ispitivanja dolazi do interakcije između energije zračenja i ispitnog uzorka. Navedena interakcija proizvodi elektromagnetske valove u obliku vidljive svjetlosti, koju obično vidimo kao iskre. Dolazi do stvaranja spektralnih linija a spektrometar mjeri valnu duljinu i intenzitet. Na temelju tih mjerenja dolazi do odvajanje čestica, atoma i molekula prema njihovoj masi ili energije. Razlikujemo dvije vrste spektrometra: optički ili maseni spektrometar [34].

## Optički spektrometar

Optički spektrometar mjeri pojedine uske dijelove spektra svjetlosti. Prikazuje intenzitet svjetlosti u ovisnosti o valnoj duljini, a refleksiju uzrokuje lom u prizmi i skretanje svjetlosti u rešetki. Budući da svaki kemijski element u ispitnom uzorku ostavlja jedinstveni spektralni potpis, spektralnom analizom možemo odrediti kemijski sastav samog ispitnog uzorka [34]. Slika 3.8 prikazuje optički spektrometar [7].



*Slika 3.8 Optički spektrometar [7]*

Kemijski sastav ispitnog uzorka – tablete ispitan je na optičkom spektrometru ARL iSpark 8860. Napravljene su tri kemijske analize na ispitnom uzorku i izračunata srednja vrijednost. Uzorak za kemijsku analizu lijeva se u bakreni kalup radi bržeg odvođenja topline. Slika 3.9 prikazuje ispitni uzorak za kemijsku analizu [34].



*Slika 3.9 Ispitni uzorak za kemijsku analizu [7]*

### 3.3.7. Jednostavna toplinska analiza

Jednostavna toplinska analiza dokazana je metoda za brzu, preciznu, pouzdanu i jeftinu kontrolu željeznih ljevova. Navedena metoda omogućuje određivanje ekvivalenta ugljika (CE), stupnja zasićenja (Sc) te udjela ugljika i silicija. Moguće je previdjeti i neka fizikalna i mehanička svojstva kao što su vlačna čvrstoća ( $R_m$ ), tvrdoća po Brinellu (HB), faktor grafitizacije (K) te količinu eutektičkog grafita (MEG) [35].

Jednostavnom toplinskom analizom tumače se promjene koje nastaju tijekom skrućivanja. Sve reakcije koje se dešavaju oslobađanjem topline utječu na oblik krivulje hlađenja. Daljnjom analizom utvrđuju se karakteristične temperatura, kao što su temperatura solidusa, eutektika i likvidusa. Iz navedenih temperatura moguće je predvidjeti stanje mikrostrukture te mehanička i fizikalna svojstva [35]. Slika 3.10 prikazuje krivulju hlađenja bazne taline nodularnoga lijeva [7].

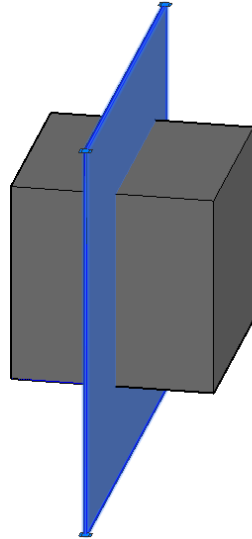


Slika 3.10 Krivulja hlađenja bazne taline nodularnoga lijeva [7]

Proizvođač uređaja za jednostavnu toplinsku analizu je Heraeus Electro Nite, tip uređaja je Quick-lab E a naziv programa je Meltcontrol 2000QTA [31].

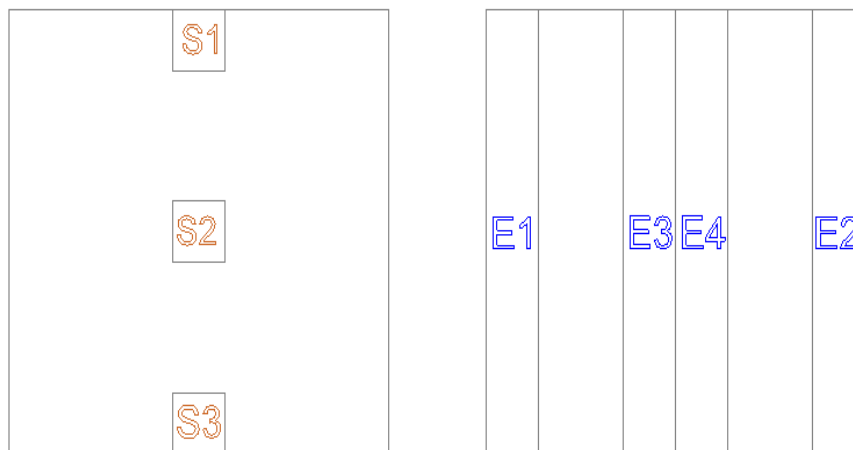
### 3.3.8. Metalografska ispitivanja

Za potrebe analize mikrostrukture ispitni uzorci izrezani su iz odljevka oblika kocke. Odljevak je prerezan na pola kroz toplinski centar. Slika 3.11 prikazuje poprečni presjek rezanja kocke.



Slika 3.11 Poprečni presjek rezanja kocke [7]

Ispitni uzorci izrezani su iz kocke vodom hlađenim strojem za rezanje. Hlađenje vodom ima ulogu da spriječi transformaciju i deformaciju strukture ispitnog uzorka. Mjesto uzimanja uzoraka za metalografska ispitivanja (S1, S2, S3) i statično vlačno ispitivanje (E1, E2, E3, E4) prikazana su na slici 3.12 [36].



Slika 3.12 Shematski prikaz mjesta uzimanja uzorka [7]

## Priprema uzorka

Za potrebe analize mikrostrukture uzorci su pripremljeni standardnom metalografskom procedurom. Priprema uzoraka za metalografska ispitivanja sastoji se od [36]:

- Brušenje
- Poliranje
- Nagrizanje

Brušenje ispitnih uzoraka izvedeno je na metalografskoj brusilici proizvođača PRESI marke Mecatech 234 [37].

Slika 3.13 prikazuje uređaj za brušenje i poliranje metalografskih uzoraka [36].



*Slika 3.13 Uređaj za brušenje i poliranje metalografskih uzoraka [7]*

Brušenje se izvodi sa brusnim papirima različite granulacije. Brušenje je provedeno sa sedam brusnih papira. Granulacije brusnih papira kretale su se od 80 zrna (najgrublji), 120, 320, 400, 600, 1000 do 1200 zrna (najfiniji), a sredstvo za hlađenje je voda. Nakon svakog brusnog papira uzorak je opran u vodi u cilju uklanjanja nečistoća i čestica brušenja. Brušenje je izvedeno pri brzini okretanja od 200 okr/min, vrijeme trajanja brušenja po jednom brusnom papiru iznosi 120 sekundi



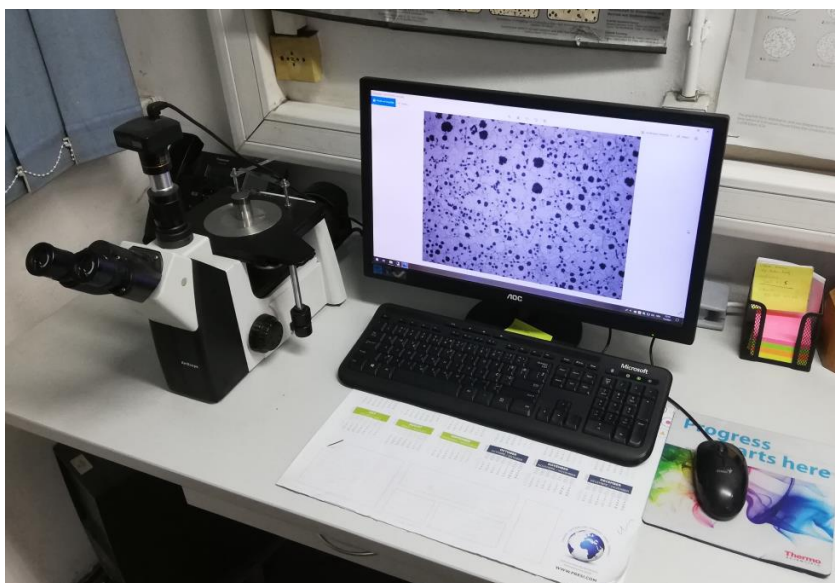
a pritiska sila iznosila je 20 N. Nakon zadnjeg brusnog papira, uzorak je očišćen u vodi, alkoholu te ostavljen da se osuši [36,37].

Poliranje je izvedeno na sintetičkoj tkanini uz primjenu odgovarajuće dijamantne paste (abraziva) za poliranje. Poliranje je izvedeno u dva koraka. Prvo je izvedeno poliranje grubljim abrazivom, veličine abraziva 3  $\mu\text{m}$  a zatim finijim abrazivom od 1  $\mu\text{m}$ . Na kraju poliranja ispitni uzorak opran je u sapunici i alkoholu. Na kraju poliranja površina ispitnog uzorka je zrcalna, bez brazdi i oštećenja [36,37].

Nagrizanje je izvedeno u cilju određivanja udjela ferita i perlita u mikrostrukturi. Za željezne ljevove sredstvo za nagrizanje naziva se nital. Nital je otopina koja sadrži 2%  $\text{HNO}_3$  i 98% etanola [36,37].

### **Analiza mikrostrukture**

Analiza mikrostrukture izvedena je pomoću svjetlosnog mikroskopa s integriranom kamerom. Proizvođač svjetlosnog mikroskopa je AmScope a omogućava povećanje slike od 50 x do 100 x. Slika 3.14 prikazuje svjetlosni mikroskop povezan sa računalom [37].



*Slika 3.14 Svjetlosni mikroskop [7]*

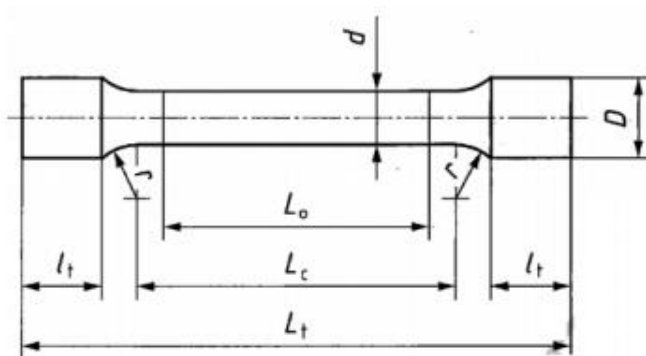
Analiza mikrostrukture izvedena je komparativnom vizualnom analizom. Veličina i oblik grafita te stupanj nodulacije određuje se usporedbom sa referentnim slikama prema normi HRN EN 945-1. Rezultati navedene metode prvenstveno ovise o subjektivnom dojmu ispitivača [10,36,37].

### 3.3.9. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva nodularnog lijeva definirana su normom HRN EN 1563. Mehanička svojstva definirana navedenom normom su: vlačna čvrstoća,  $R_m$ , MPa, konvencionalna granica razvlačenja,  $R_{p0,2}$ , MPa, tvrdoća, HB, istezljivost,  $A$ , %, i udarne žilavost, KV, KU, J. U ovom radu ispitana su vlačna čvrstoća i istezljivost [8].

Mehanička svojstva nodularnog lijeva mogu se izmjeriti na ispitnim uzorcima koji su dobiveni kao odvojeno lijevani uzorci, uzorci lijevani sa odljevkom ili uzorci koji su izrezani iz odljevka (C). U ovom radu ispitni uzorci su izrezani iz odljevka [8].

Statičko vlačno ispitivanje izvodi se prema normi HRN EN 10002-1. Navedena norma definira oblik i veličinu ispitnog uzorka. Slika 3.15 prikazuje oblik ispitnog uzorka za statičko vlačno ispitivanje [9].



Slika 3.15 Ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [9]

Dimenzije ispitnih uzoraka prikazani su u tablici 3.8 [9].

Tablica 3.8 Dimenzije ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje [9]

$\Phi d$ [mm]	$L_0$ [mm]	$L_c$ [mm]
5	25	30
7	35	42
10	50	60
14	70	84
20	100	120

U ovom radu promjer ispitnog uzorka iznosio je  $d = 10\text{mm}$  a početna duljina  $L_0$  iznosila je 50 mm.

### 3.3.1. Plan lijevanja ispitnih uzoraka

Za izradu diplomskog rada odliveno je osam ispitnih uzoraka različitih kvaliteta lijeva. Kvalitete lijeva ispitane u ovom radu su: HRN EN GJS 400-15, HRN EN GJS 400-18, HRN EN GJS 400-18LT i HRN EN GJS 500-7.

Ispitni uzorak broj šest lijevan je sa nodulatorom na bazi nikla i magnezija, dok su ostali ispitni uzorci lijevani sa nodulatorom na bazi magnezija.

Postupak obrade za sve ispitne uzorke izveden je u otvorenom loncu sa pregradom ili popularnije nazvanom sandwich postupak.

Udio nodulatora ovisio je o udjelu magnezija, a kretao se od 1,2 % do 1,4 %. Ciljani udio zaostalog magnezija bio je oko 0,04 %.

Udio cjepiva kretao se od 0,35 % do 0,6 %. Ciljani udio silicija u noduliranoj talini iznosio je od 1,9 % pa do 2,7 %. Cijepljenje je izvedeno na dva načina. Prvi način je da nodulator prekrije sa cjepivom. Kod takvog načina nema cijepljenja u mlaz. Drugi način je da se nodulator prekrije sa čeličnom strugotinom koja sprječava prijevremenu reakciju magnezija, a cijepljenje se izvodi prilikom izlivanja taline iz peći u mlaz. Tablica 3.9 prikazuje plan lijevanja ispitnih uzoraka.

Tablica 3.9 Plan lijevanja ispitnih uzoraka

Broj uzorka	Kvaliteta lijeva	Ni [%]	Postupak obrade - otvoreni lonac s pregradom				Nodulator	Cjepivo na bazi
			Pokrov - štanca [%]	Nodutator [%]	Cjepivo [%]	Način cjepljenja		
1	EN GJS 400-15			1,4	0,4	u loncu	RZ	Ba
2	EN GJS 500-7			1,4	0,4	u loncu	RZ	Ba
3	EN GJS 500-7		1	1,2	0,35	u mlaz	MM	Bi
4	EN GJS 500-7		1	1,3	0,35	u mlaz	La	Ce
5	EN GJS 400-18 LT			1,3	0,4	u loncu	La	Ba
6	EN GJS 400-18 LT	0,6			0,4	u mlaz	Ni	Ba
7	EN GJS 500-7		1	1,2	0,35	u mlaz	MM	Sb
8	EN GJS 400-18			1,2	0,6	u loncu	La	Ba

## 4. Rezultati ispitivanja

### 4.1. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava bazne taline izvedena je na osam ispitnih uzoraka te prikazana u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Kemijski sastav bazne taline

Uzorak	Kemijski elementi [mas.%]													
	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Mg	Sn
1	4,16	3,73	1,63	0,254	0,034	0,016	0,013	0,002	0,017	0	0,032	0,004	0	0,002
2	4,2	3,77	1,65	0,258	0,032	0,015	0,012	0,002	0,012	0	0,033	0,004	0	0,002
3	4,12	3,77	1,36	0,299	0,036	0,024	0,016	0,003	0,014	0	0,029	0,005	0	0,002
4	4,12	3,77	1,36	0,299	0,036	0,024	0,016	0,003	0,014	0	0,029	0,005	0	0,002
5	3,96	3,6	1,38	0,27	0,034	0,017	0,012	0,002	0,017	0	0,031	0,004	0	0,002
6	4,17	3,78	1,5	0,29	0,029	0,015	0,03	0,003	0,024	0	0,032	0,005	0	0,003
7	4,25	3,82	1,66	0,19	0,024	0,012	0,03	0,003	0,027	0,001	0,03	0,005	0	0,003
8	4,26	3,81	1,7	0,16	0,044	0,012	0,03	0,004	0,02	0,001	0,087	0,01	0	0,003

Prije početka lijevanja uzeti su ispitni uzorci nodulirane taline, u cilju određivanja udjela silicija, bakra i magnezija. Tablica 4.2 prikazuje kemijski sastav nodulirane taline za osam ispitnih uzoraka.

Tablica 4.2 Kemijski sastav nodulirane taline

Uzorak	Kemijski elementi [mas.%]													
	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Mg	Sn
1	4,31	3,61	2,74	0,265	0,034	0,014	0,015	0,03	0,017	0,009	0,032	0,006	0,047	0,003
2	4,29	3,64	2,56	0,267	0,032	0,012	0,013	0,003	0,013	0,01	0,337	0,005	0,051	0,003
3	4,18	3,67	1,96	0,3	0,039	0,02	0,018	0,004	0,014	0,002	0,33	0,005	0,046	0,003
4	4,25	3,67	2,26	0,3	0,039	0,018	0,017	0,004	0,014	0,006	0,377	0,005	0,053	0,003
5	4,05	3,46	2,27	0,28	0,035	0,013	0,014	0,002	0,017	0,007	0,032	0,005	0,044	0,003
6	4,24	3,76	1,87	0,29	0,027	0,013	0,03	0,003	0,38	0,005	0,032	0,006	0,044	0,003
7	4,43	3,78	2,56	0,2	0,026	0,009	0,032	0,004	0,028	0,008	0,371	0,006	0,047	0,004
8	4,48	3,77	2,74	0,17	0,043	0,008	0,031	0,004	0,02	0,014	0,05	0,012	0,049	0,004

Udio ugljika iznosio je od 3.46 % mas. pa do 3.78 % mas. i u skladu je sa literaturnom preporukom [9,12].

Udio silicija iznosio je od 1.87 % mas. pa do 2.74 % mas. Iako literatura navodi da visok udio silicija u kombinaciji sa dužim vremenom skrućivanja promovira stvaranje chunky grafitu, kontroliranim dodavanjem manjinskih elemenata uspijeva se spriječiti stvaranje chunky grafitu [9,12].

Udio zaostalog magnezija iznosio je od 0,044 % mas. pa do 0,053 % mas. i u skladu je sa literaturnom preporukom. Zbog toga je za pretpostaviti da eventualni nepravilni oblici grafitu tijekom skrućivanja nisu nastali zbog niskog ili previsokog udjela magnezija [9,12].

Udio karbidotvornih elemenata kao što su mangan, fosfor, krom, molibden, titan i kositar je nizak, te se u mikrostrukturi ne očekuje pojava karbida. Udio karbidotvornih elemenata najviše ovisi o vrsti uložnog materijala [9,12].

Udio sumpora iznosio je od 0,008 % mas. pa do 0,02% mas. i u skladu je sa literaturnom preporukom [9,12].

Udio aluminija iznosio je od 0,002 % mas. pa do 0,014 % mas. i u skladu je sa literaturnom preporukom [9,12].

Udio nikla iznosi je od 0,013 % mas. pa do 0,028 % mas. osim u ispitnom uzorku broj šest gdje je dodan kao predlegura FeMgNi u cilju dobivanja nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-18LT [9,12].

Udio bakra iznosio je od 0,032 % mas. pa do 0,37 % mas. Bakar je element koji promovira stvaranje perlita. U ovom radu dodatkom bakra u talinu nodularnog lijeva dolazi do promjene kvalitete taline. Dodatkom čistog bakra u udjelu od 0,3 % dolazi do povećanja vlačne čvrstoće za 100 MPa [9,12].

U ovom radu nije bilo mogući odrediti udjele pojedinih manjinskih elemenata. Manjinski elementi kojima nisu određeni udjeli su: antimon, bizmut, barij, lantan i cerij.

Budući da navedeni elementi imaju značajan utjecaj na morfologiju grafitu i mikrostrukturu nodularnoga lijeva, navedeni elementi dodani su u talinu nodularnoga lijeva na temelju literaturnih preporuka proizvođača u obliku cjepiva [31].

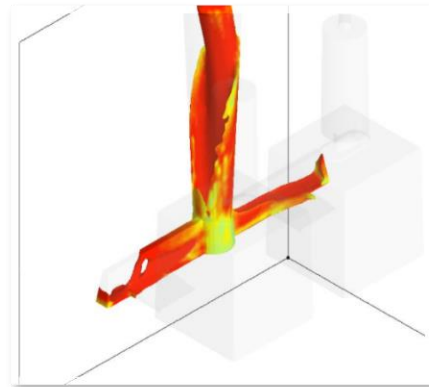
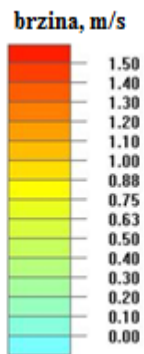
Temperature taline kojima su lijevani ispitni uzorci prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Temperatura taline

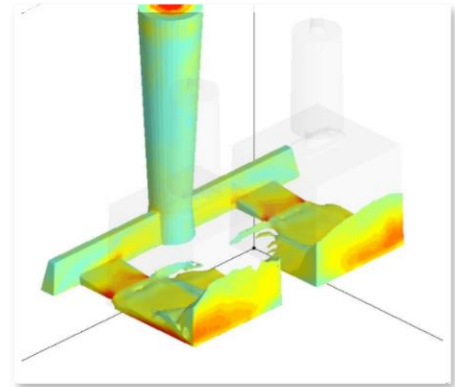
Ispitni uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura [°C]	1396	1345	1351	1347	1340	1415	1372	1350

## 4.2. Rezultati simulacija

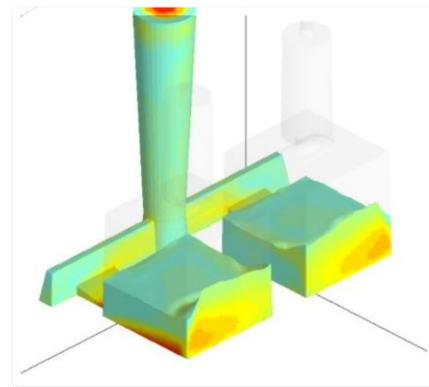
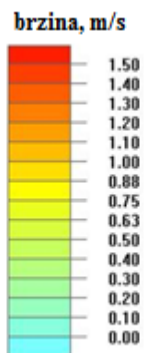
U nastavku su prikazane slike simulacije lijevanja. Na slici 4.1 prikazane su brzine taline u pojedinim fazama lijevanja [38].



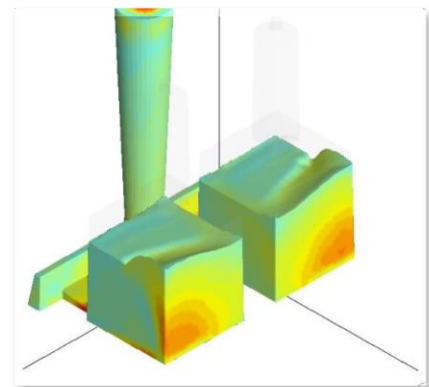
a) 0,5 s (8 % popunjeno)



b) 1 s (24 % popunjeno)

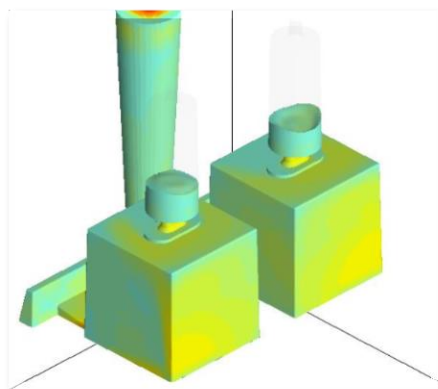
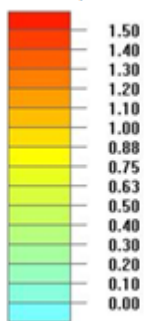


d) 3 s (44 % popunjeno)

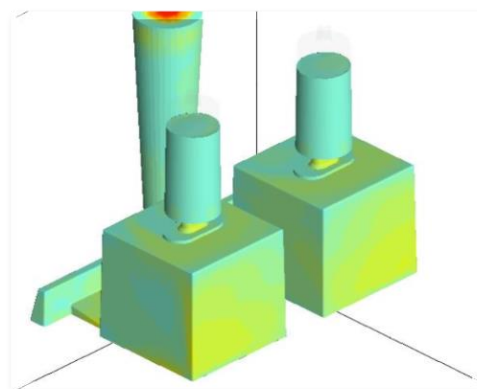


c) 6 s (70 % popunjeno)

brzina, m/s



e) 10 s (93 % popunjeno)

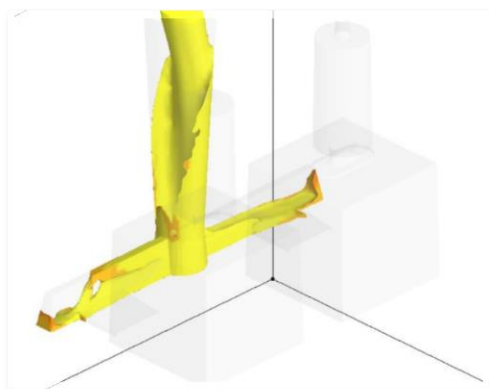
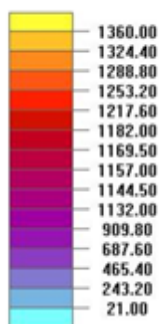


f) 12 s (100 % popunjeno)

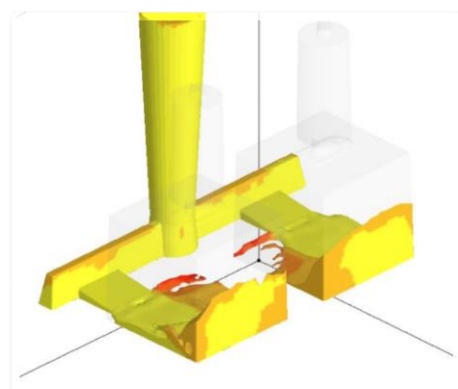
Slika 4.1 Brzine lijevanja u pojedinim fazama lijevanja [38]

Slika 4.2 prikazuje temperaturu taline u pojedinim fazama lijevanja [38]

Temperatura, °C

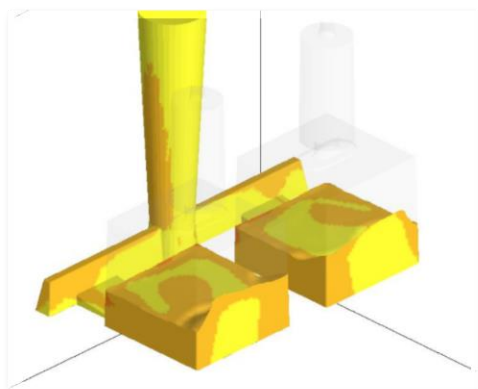
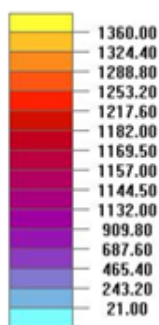


a) 0,5 s (8 % popunjeno)

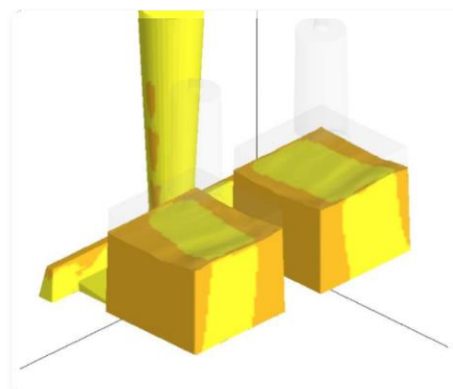


b) 1 s (24 % popunjeno)

Temperatura, °C

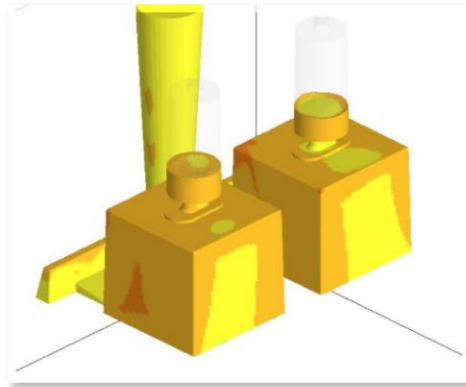
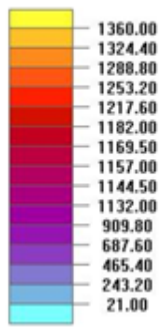


c) 3 s (44 % popunjeno)

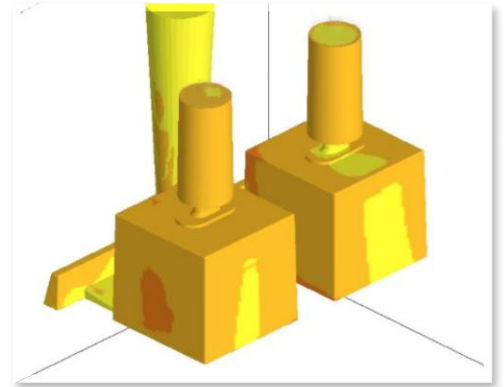


d) 6 s (70 % popunjeno)

Temperatura, °C



e) 10 s (93 % popunjeno)

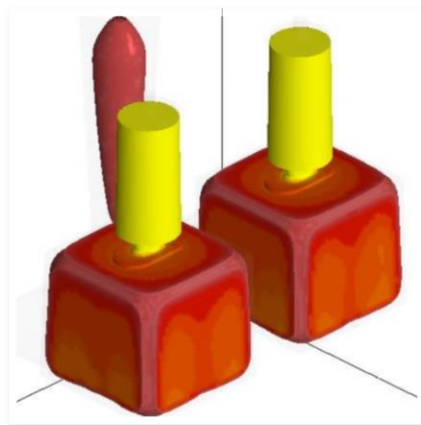
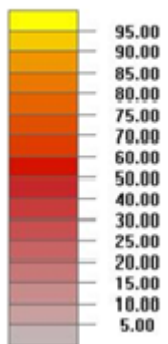


f) 12 s (100 % popunjeno)

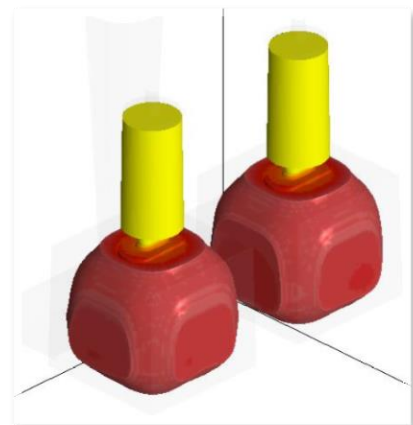
Slika 4.2 Temperatura taline u pojedinim fazama lijevanja [38]

Slika 4.3 prikazuje tijek skrućivanja ispitnih uzoraka [38]

Tekuća faza, %

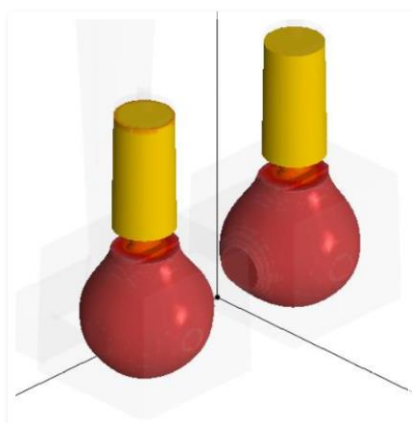
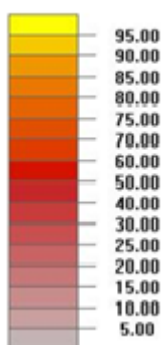


a) 1157s (80% tekuće)

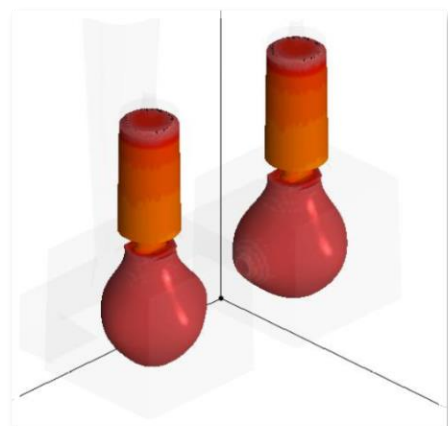


b) 1819s (59% tekuće)

Tekuća faza, %



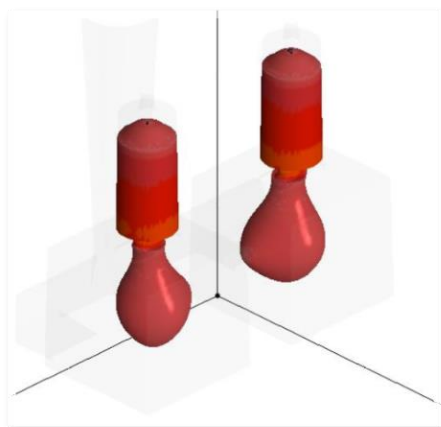
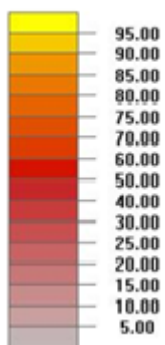
c) 2780s (31% tekuće)



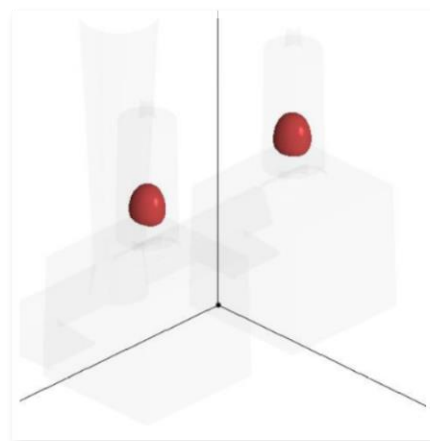
d) 3470s (18% tekuće)



Tekuća faza, %



e) 4101s (9% tekuće)

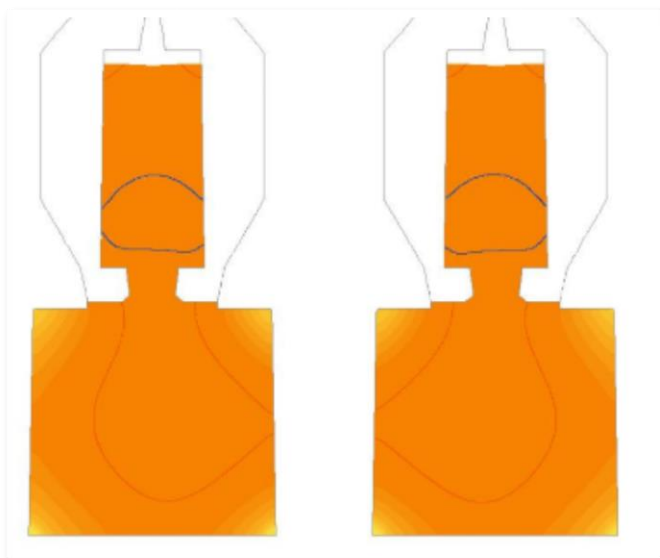
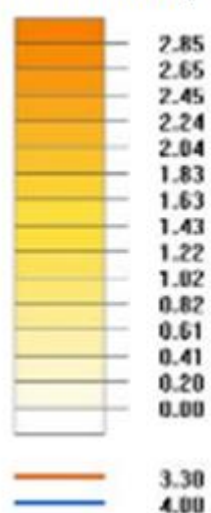


f) 5656s (2% tekuće)

Slika 4.3 Tijek skrućivanja ispitnih uzoraka [38]

Slika 4.4 prikazuje termalni modul [38].

Termalni modul, cm



Slika 4.4 Termalni modul [38]

Rezultati simulacija lijevanja i skrućivanja prikazuju pravilno popunjavanje kalupne šupljine uz optimalnu brzinu i temperaturu lijevanja. Kod simulacije skrućivanja vidljivo je kako fronta skrućivanja kreće iz smjera najmanjeg modula prema najvećem (od rubova prema središtu kocke). Iz slike 4.4 vidi se da je najveći termalni modul u samom egzotermnom pojilu, što minimalizira mogućnost pojave poroznosti u kocki [38].

### 4.3. Rezultati metalografske analize

#### 4.3.1. Makroanaliza poprečnih presjeka ispitnih uzoraka

Makroanaliza poprečnih presjeka ispitnih uzoraka prikazana je u tablici 4.4.

Tablica 4.4 Rezultati makroanalize poprečnih presjeka ispitnih uzoraka

Ispitni uzorak br.	1	2	3	4	5	6	7	8
Kvaliteta lijeva	HRN EN GJS 400-15	HRN EN GJS 500-7	HRN EN GJS 500-7	HRN EN GJS 500-7	HRN EN GJS 400-18LT	HRN EN GJS 400-18LT	HRN EN GJS 500-7	HRN EN GJS 400-18
Nodulator	RZ	RZ	MM	La	La	Ni	MM	La
Cjepivo	Ba	Ba	Bi	Ce	Ba	Ba	Sb	Ba
Površinski udio chunky grafita [cm <sup>2</sup> ]	90	52,5	0	0	0	0	0	0
Površinski udio chunky grafita [%]	28	16,2	0	0	0	0	0	0
Poroznost [cm <sup>2</sup> ]	nema	nema	nema	nema	nema	nema	nema	nema

Analizom svi osam poprečnih presjeka ispitnih uzoraka nije uočena poroznost.

Nakon rezanja kocki na ispitnom uzorku jedan i dva uočeno je područje chunky grafita. Područje chunky grafita pojavilo se u toplinskom centru kocke. Razlog pojavljivanja chunky grafita je u tome da uz visok udio silicija u talini te sporu brzinu hlađenja nodulatori, sadrže prevelike udjele elementa rijetkih zemalja, odnosno cerija [9,12]. Korištena cjeviva bila su na bazi barija.

Na poprečnom presjeku broj šest nije uočeno područje chunky grafita, iako literatura navodi da nikal promovira stvaranje chunky grafita. Razlog zbog kojeg nije došlo do stvaranje chunky grafita je u niskom udjelu nikla ( 0,38 % mas.) i silicija (1,87 % mas.). Literatura navodi

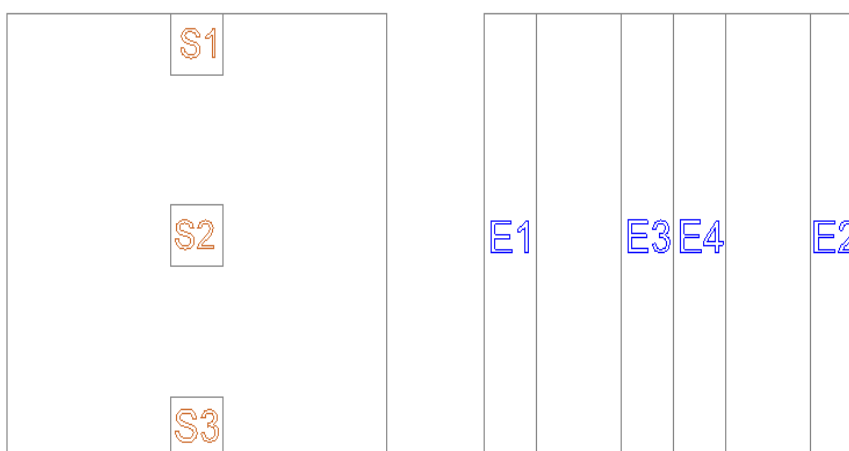
da udio nikla viši od 0,7 % mas. snažno promovira stvaranje chunky grafitu [9,12]. Korištena cjevica bila su na bazi barija.

Na poprečnom presjeku kocke broj tri i sedam nije uočeno područje chunky grafitu. Nodulatori su sadržavali određene udjele „legura miješanog metala“ (eng. Mischmetal). Tipični sastav navedene legure sadrži približno 0,55 % cerija, 0,25 % lantana i 0,15-0,18 % neodimija. Korištena cjevica bila su na bazi bizmuta i antimona. Literatura navodi da određeni udjeli cjevica na bazi bizmuta i antimona efikasno sprječavaju stvaranje chunky grafitu [6,9,12].

Na poprečnom presjeku kocke broj četiri, pet i osam također nije uočeno područje chunky grafitu. Nodulatori su sadržavali određene udjele lantana. Literatura navodi kako određeni udjeli lantana promoviraju ravno osno skrućivanje, sprječavaju pojavu mikroporoznosti i otežavaju stvaranje chunky grafitu. Korištena cjevica bila su na bazi cerija i barija [9,12].

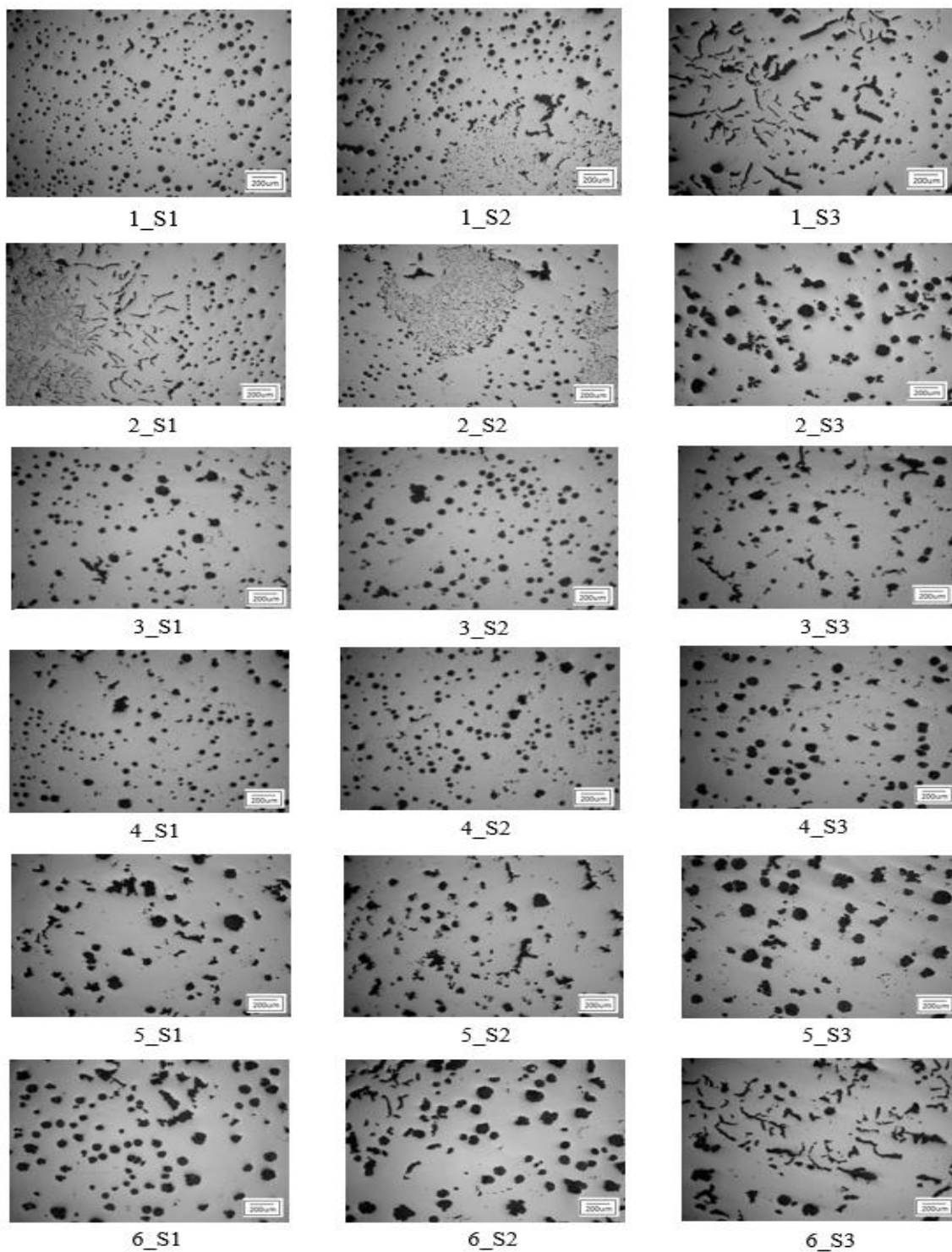
#### 4.3.2. Mikroanaliza poprečnih presjeka ispitnih uzoraka

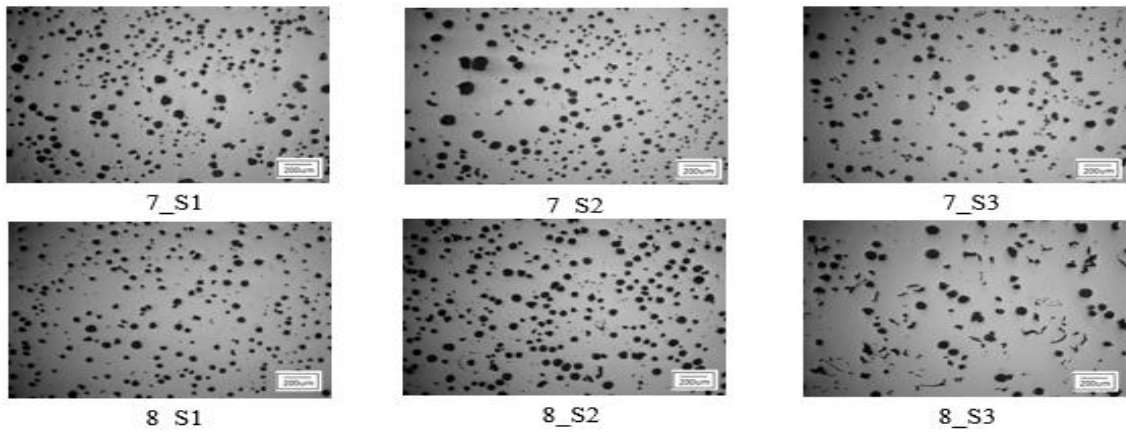
Na svakom odljevku izrezana su tri ispitna uzorka za metalografsku analizu. Ispitni uzorak broj jedan (S1) uzet je na poprečnom presjeku kocke s gornje strane. Ispitni uzorak broj dva (S2) uzet je na sredini poprečnog presjeka kocke. Ispitni uzorak broj tri (S3) uzet je na poprečnom presjeku kocke s donje strane. Mjesto uzimanja uzorka za metalografska ispitivanja (S1, S2 i S3) i statičko vlačna ispitivanja (E1, E2, E3, E4) prikazana su na slici 4.5.



Slika 4.5 Shematski prikaz mjesta uzimanja uzorka [7]

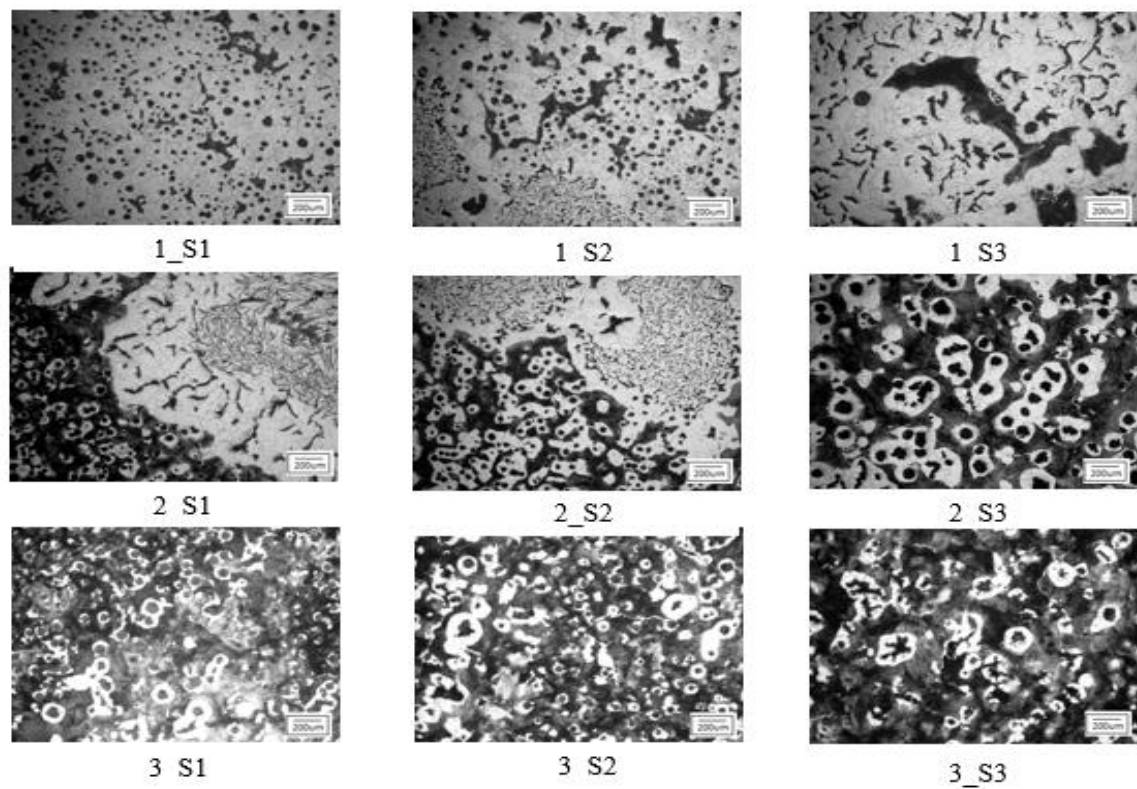
Slika 4.6 prikazuje mikrostrukturu ispitnih uzoraka u poliranom stanju pri povećanju od 100 X [7].

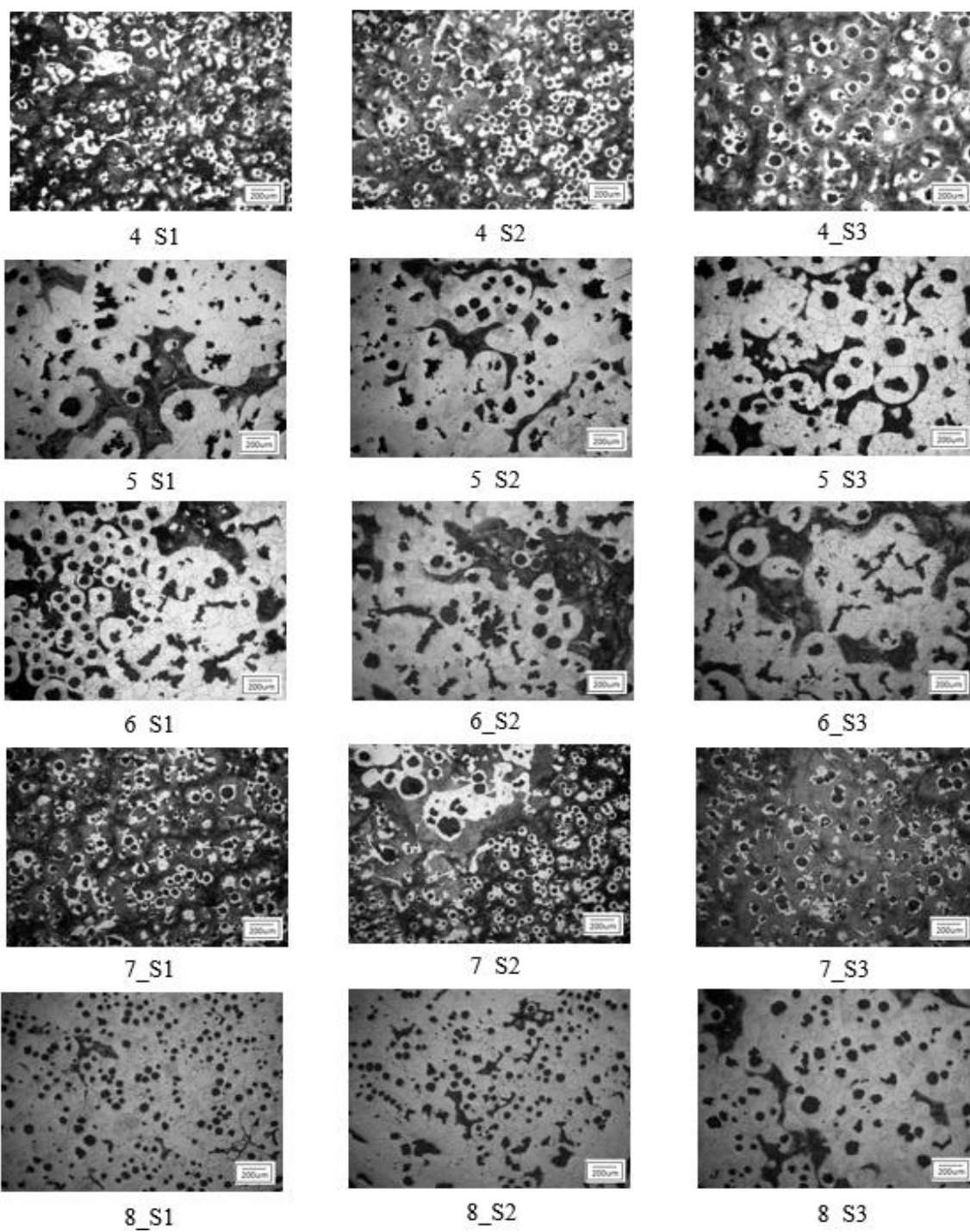




*Slika 4.6 Metalografska analiza ispitnih uzoraka, polirano stanje, povećanje 100x [7]*

Slika 4.7 prikazuje mikrostrukturu ispitnih uzoraka u nagrizenom stanju, povećanje 100x [7]





*Slika 4.7 Metalografska analiza ispitnih uzoraka, nagrizeno stanje, povećanje 100x [7]*

Tablica 4.5 prikazuje rezultate metalografske analize ispitnih uzoraka.

Tablica 4.5 Rezultati metalografske analize ispitnih uzoraka

Br. uzorka	Oblik	Veličina	Stupanj nodularnosti [%]	Omjer ferit / perlit [%]
1_S1	V,VI	5,6	85	90/5
1_S2	IV,V	5	55	90/10
1_S3	III	5	30	90/10
2_S1	I,III,V	5	40	50/50
2_S2	II,V	6	40	50/50
2_S3	IV,V	4	60	50/50
3_S1	V,VI	5	70	40/60
3_S2	V,VI	5	70	40/60
3_S3	IV	4	60	40/60
4_S1	V,VI	5	70	40/60
4_S2	V,VI	5	75	40/60
4_S3	V,VI	4	70	40/60
5_S1	IV,V	4	60	80/20
5_S2	IV,V	4	60	80/20
5_S3	V,VI	4	70	80/20
6_S1	V,VI	4	80	80/20
6_S2	III,IV,V	4	60	80/20
6_S3	II,III	4	30	80/20
7_S1	V,VI	5	85	30/70
7_S2	V,VI	5	85	30/70
7_S3	V,VI	5	80	30/70
8_S1	V,VI	5	85	95/5
8_S2	V,VI	5	85	95/5
8_S3	II,VI	4,5	70	90/10

Iz tablice 4.5 je vidljivo da se stupanj nodularnosti kretao od 30 % pa do 85 %, ovisno o ispitnom uzorku. Literatura navodi da nodularnost u nodularnom lijevu mora biti veća od 80 % kako bi se osigurali zahtjevi norme HRN EN 1563 [5]. Veličina grafita kretala se u granicama od 4 do 5. Oblik grafita pojavljivao se u razredima V i VI, osim u slučajevima gdje je dolazilo do stvaranja chunky grafita (oblik II), ili do degeneriranog oblika grafita (oblik II, III, IV). Udio ferita i perlita ovisio je o traženoj kvaliteti lijeva i kretao se od 95/5 (feritna matrica) pa do 30/70 (feritno – perlitna matrica). U ovom radu promjena kvalitete lijeva izvodila se dodatkom bakra prilikom modifikacije bazne taline.

### 4.3.3. Rezultati mehaničkih svojstava ispitnih uzoraka

Na svakom odljevku uzete su četiri epruvete za statičko vlačno ispitivanje. Dvije epruvete uzete su iz rubnih dijelova odljevaka ( E1 i E2) dok su preostale dvije epruvete uzete iz centra odljevka ( E3 i E4). Mjesto uzimanja epruveta prikazano je na slici 3.12

U ovom radu imamo četiri vrste kvalitete materijala pa je potrebno svaku kvalitetu materijala usporediti sa normom HRN EN 1536. U ovom radu debljina stjenke odljevka iznosila je 180 mm, pa su prema normi HRN EN 1563 uzeti podaci iz tablice 2.2 koja prikazuje minimalnu vrijednost mehaničkih svojstava dobivenih iz ispitnih uzoraka koji su izrezani iz odljevaka. Tablica 4.6 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za prvi odljevak.

Tablica 4.6 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za prvi odljevak

	Kocka 1 [HRN EN GJS 400-15] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>367</b>	<b>10</b>	<b>360</b>	<b>9</b>	<b>353</b>	<b>6</b>	<b>362</b>	<b>5</b>
Norma HRN EN 1563	350	8	350	8	350	8	350	8

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak jedan ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. Najniža nodularnost iznosila je 30 % (uzorak 1\_S3), a na uzorku 1\_S2 uočen je chunky grafit.



Tablica 4.7 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za drugi odljevak.

Tablica 4.7 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za drugi odljevak

	Kocka 2 [HRN EN GJS 500-7] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>488</b>	<b>6</b>	<b>504</b>	<b>4</b>	<b>400</b>	<b>2</b>	<b>397</b>	<b>2</b>
Norma HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak dva ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. Najniža nodularnost primijećena je na uzorku 2\_S1 i iznosila je 40 %. Na uzorku 2\_S2 uočen je chunky grafit.

Tablica 4.8 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za treći odljevak.

Tablica 4.8 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za treći odljevak

	Kocka 3 [HRN EN GJS 500-7] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>508</b>	<b>3</b>	<b>523</b>	<b>5</b>	<b>505</b>	<b>4</b>	<b>488</b>	<b>4</b>
Norma HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak tri zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku tri nije uočen chunky grafit. Najlošiju nodularnost ima uzorak 3\_S3 a ona iznosi 60 %.

Tablica 4.9 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za četvrti odljevak.

Tablica 4.9 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za četvrti odljevak

	Kocka 4 [HRN EN GJS 500-7] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>507</b>	<b>3</b>	<b>516</b>	<b>3</b>	<b>519</b>	<b>4</b>	<b>492</b>	<b>4</b>
Norma HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak četiri zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku četiri nije uočen chunky grafit. Najlošiju nodularnost imaju uzorci 4\_S1 i 4\_S3 i one iznose 70 %.

Tablica 4.10 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za peti odljevak.

Tablica 4.10 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za peti odljevak

	Kocka 5 [HRN EN GJS 400-18 LT] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>411</b>	<b>18</b>	<b>414</b>	<b>17</b>	<b>393</b>	<b>15</b>	<b>393</b>	<b>15</b>
Norma HRN EN 1563	340	10	340	10	340	10	340	10

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak pet zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku pet nije uočen chunky grafit. Najlošiju nodularnost imaju uzorci 5\_S1 i 5\_S2 i one iznose 60 %.

Tablica 4.11 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za šesti odljevak.

Tablica 4.11 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za šesti odljevak

	Kocka 6 [HRN EN GJS 400-18 LT] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>349</b>	<b>5</b>	<b>361</b>	<b>9</b>	<b>334</b>	<b>7</b>	<b>334</b>	<b>8</b>
Norma HRN EN 1563	340	10	340	10	340	10	340	10

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak šest ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku šest nije uočen chunky grafit ali je uočeno jako puno degeneriranog oblika grafita. Najlošiju nodularnost ima uzorak 6\_S3 i ona iznosi 30 %.

Tablica 4.12 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za sedmi odljevak.

Tablica 4.12 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za sedmi odljevak

	Kocka 7 [HRN EN GJS 500-7] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>542</b>	<b>3</b>	<b>554</b>	<b>3</b>	<b>509</b>	<b>3</b>	<b>549</b>	<b>3</b>
Norma HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak sedam zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku sedam nije uočen chunky grafit. Metalografska ispitivanja pokazuju da je u kocki sedam nodularnost veća od 80 % u svim ispitnim uzorcima.

Tablica 4.13 prikazuje rezultate statičko vlačnog ispitivanja za osmi odljevak.

Tablica 4.13 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za osmi odljevak

	Kocka 8 [HRN EN GJS 400-18] [ 60 < t < 180 ]							
	Epruveta E1		Epruveta E2		Epruveta E3		Epruveta E4	
	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]
<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>401</b>	<b>10</b>	<b>412</b>	<b>14</b>	<b>411</b>	<b>10</b>	<b>415</b>	<b>17</b>
Norma HRN EN 1563	350	10	350	10	350	10	350	10

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja pokazuju da odljevak osam zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563. U odljevku osam nije uočen chunky grafit. Najlošiju nodularnost ima uzorak 8\_S3 i ona iznosi 80 %.

U tablici 4.14 prikazani su rezultati statičko vlačnog ispitivanja za osam odljevaka.

Tablica 4.14 Sumirane vrijednosti statičko vlačnog ispitivanja za osam odljevaka

Br. uzorka		Epruveta 1		Epruveta 2		Epruveta 3		Epruveta 4		Oznaka materijala
		Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	Rm [Mpa]	A [%]	
1	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>367</b>	<b>10</b>	<b>360</b>	<b>9</b>	<b>353</b>	<b>6</b>	<b>362</b>	<b>5</b>	HRN EN GJS 400-15
	NORMA HRN EN 1563	350	8	350	8	350	8	350	8	
2	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>488</b>	<b>6</b>	<b>504</b>	<b>4</b>	<b>400</b>	<b>2</b>	<b>397</b>	<b>2</b>	HRN EN GJS500-7
	NORMA HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3	
3	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>508</b>	<b>3</b>	<b>523</b>	<b>5</b>	<b>505</b>	<b>4</b>	<b>488</b>	<b>4</b>	HRN EN GJS500-7
	NORMA HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3	
4	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>507</b>	<b>3</b>	<b>516</b>	<b>3</b>	<b>519</b>	<b>4</b>	<b>492</b>	<b>4</b>	HRN EN GJS500-7
	NORMA HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3	
5	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>411</b>	<b>18</b>	<b>414</b>	<b>17</b>	<b>393</b>	<b>15</b>	<b>393</b>	<b>15</b>	HRN EN GJS 400-18 LT
	NORMA HRN EN 1563	340	10	340	10	340	10	340	10	
6	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>349</b>	<b>5</b>	<b>361</b>	<b>9</b>	<b>334</b>	<b>7</b>	<b>334</b>	<b>8</b>	HRN EN GJS 400-18 LT
	NORMA HRN EN 1563	340	10	340	10	340	10	340	10	
7	<b>Dobiveni rezultata</b>	<b>542</b>	<b>3</b>	<b>554</b>	<b>3</b>	<b>509</b>	<b>3</b>	<b>549</b>	<b>3</b>	HRN EN GJS500-7
	NORMA HRN EN 1563	400	3	400	3	400	3	400	3	
8	<b>Dobiveni rezultati</b>	<b>401</b>	<b>10</b>	<b>412</b>	<b>14</b>	<b>411</b>	<b>10</b>	<b>415</b>	<b>17</b>	HRN EN GJS 400-18
	NORMA HRN EN 1563	350	10	350	10	350	10	350	10	

Iz rezultata statičko vlačnog ispitivanja i analize mikrostrukture vidi se da je udio nodularnosti od 60 % dovoljan da se zadovolje zahtjevi norme HRN EN 1563. Ispitni uzorci koji su imali nodularnost manju od 60 % nisu zadovoljili zahtjeve norme HRN EN 1563.

## 5. Zaključak

Proizvodnja odljevaka od nodularnog lijeva raste iz godine u godinu, pa samim time raste i proizvodnja debelostjenih odljevaka. Debelostjeni odljevci od nodularnoga lijeva pokazuju neke zakonitosti. Polagane brzine hlađenja koje karakteriziraju navedene odljevke stvaraju nizak broj nodula, tvorbu degeneriranih grafitnih nodula te stvaranje chunky grafita.

Chunky grafit jedna je od najraširenijih grešaka u debelostjenim odljencima od nodularnoga lijeva te negativno utječe na mehanička svojstva. Pojava chunky grafita u debelostjenim odljencima od nodularnoga lijeva kontrolirana je brojnim, često uzajamno djelujućim metalurškim faktorima. Kemijski sastav, brzina skrućivanja, nukleacijski potencijal taline te udjeli pojedinih manjinskih elemenata glavni su faktori koji utječu na stvaranje chunky grafita. Posljednjih desetak godina napravljeni su značajni iskoraci o chunky grafitu, ali još uvijek nisu stečeni jednoglasni pogledi o mehanizmu nastajanja i izbjegavanja stvaranja chunky grafita.

U ovom diplomskom radu ispitano je osam ispitnih uzoraka nodularnoga lijeva. Ispitivanja ispitnih uzoraka su se sastojala od analize kemijskog sastava, metalografskih ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava nodularnoga lijeva.

U ispitnom uzorku broj jedan i dva uočeno je područje chunky grafita. Razlog pojavljivanja chunky grafita je u prekomjernom udjelu elementa rijetkih zemalja. Navedeni uzorci nisu zadovoljili normu HRN EN 1563.

U ispitnom uzorku broj tri i sedam nije uočeno područje chunky grafita. Cjepiva koje su korištena sadržavala su određene udjele bizmuta odnosno antimona. Navedeni uzorci zadovoljili su zahtjeve norme HRN EN 1563.

U ispitnim uzorcima broj četiri, pet i osam nije uočeno područje chunky grafita. Nodulatori koji su korišteni za modifikaciju taline sadržavali su određene udjele lantana. Navedeni uzorci zadovoljili su zahtjeve norme HRN EN 1563.

Na ispitnom uzorku broj šest nije uočeno područje chunky grafita, ali je uočeno jako puno degeneriranog oblika grafita. Nodulator koji je korišten za modifikaciju taline bio je na bazi nikla. Udio nikla od 0,38 % mas. nije promovirao stvaranje chunky grafita. Navedeni uzorak nije zadovoljio normu HRN EN 1563.

Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da kemijski sastav, brzina hlađenja te udio manjinskih elemenata ima značajan utjecaj na morfologiju grafita a samim time i na pojavu degeneriranog oblika grafita te je potrebno posvetiti posebnu pažnju pri lijevanju debelostjenih odljevaka od nodularnog lijeva kako bi izbjegli njihovo nastajanje.

## 6. Literatura

- [1] K. Martin Pedersen: Solidification and microstructure of thin walled ductile cast iron, Technical University of Denmark, 2006.
- [2] Suvremeni postupci proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva, zbirka radova, metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Metalna industrija Varaždin, 2000.
- [3] Ferro, P., P., Fabrizi, A., Cervo, R., Carollo, C., Effect of Inoculant Containing Rare Earth Metals and Bismuth on Microstructure and Mechanical Properties of Heavy-Section Near-Eutectic Ductile Iron Casting, Journal of Materials Processing Technology, 2013.
- [4] W. Baer: Chunky Graphite in Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron: Formation, Prevention, Characterization, Impact on Properties, Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, 2019.
- [5] I. Mihalic Pokopec: Utjecaj brzine hlađenja i dodatka cerija i bizmuta na morfologiju grafita u debelostjenim odljercima od nodularnog lijeva, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2016.
- [6] K. Amiri Kasvayee: On the deformation behavior and cracking of ductile iron: effect of microstructure , Doktorski rad, Jönköping University, 2017.
- [7] J. Godinić: fotografije napravljene u ljevaonici Ferro-Preis d.o.o, Čakovec, 2020.
- [8] HRN EN 1563:2018 – Europska norma: Nodularni ljevovi
- [9] F. Unkić, Z. Glavaš: Lijevanje željeznih metala, Sisak, 2008.
- [10] HRN EN 945-1:2018 – Europska norma: Klasifikacija grafita vizualnom metodom
- [11] Production of Heavy and Thick Ductile Iron Casting: P. Cabanne, C. Labrecque, G. Murratore, H. Roedter, Rio Tinto & Titanium Group, Frankfurt
- [12] M. Gange: The Sorelmetal Book of Ductile Iron: Rio Tinto Iron & Titanium Inc, Montreal, 2004.
- [13] J. Jandel, Utjecaj antimona na morfologiju grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu, Diplomski rad, 2013.
- [14] Shrinkage Porosity Formation during Solidification in Compacted Graphite Iron, Andre Koerich Ramos, Joinville, 2018.
- [15] ASM Handbook, Volume 1.A, Cast Iron Science and Technology, R. Voigt, Pennsylvania University.
- [16] Effects of Bi and Sb on Graphite Structure of Heavy – Section Ductile Iron, E.N.Pan, C.Y.Chen, Taipen, Taiwan.
- [17] Elkem Foundry Products, Common Metallurgical Defects in Ductile Iron.
- [18] K. M. Pedersen, Solidification and microstructure on thin walled ductile cast iron, Technical University of Denmark, 2006.
- [19] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan: Performance of heavy ductile iron castings for windmills, Politehnica University of Bucharest, 2010.
- [20] V.E.A. Anjos: Use of Thermal Analysis to Control the Solidification Morphology of Nodular Cast Irons and Reduce Feeding Needs, Doktorski rad, Portugal, 2015.
- [21] Sanja Šolić: Tehnologija 1, Ljevarstvo - predavanje 5, 2016.
- [22] J. Zhou, Spheroidal Graphite Cast Iron, China Foundry, 7, 2010.
- [23] J.Zhou, W. Schmitz, S. Engler: Investigation of the microstructure in spheroidal cast iron for low solidification rates, Aachen, 1987.

- [24] Metallurgical Defects in Ductile Iron, Foundry Products Division, Elkem, 2012.
- [25] H. Roedter, M.Gange: Microstructure Defects in Heavy Section Ductile Iron Casting – Formation and Effect on Properties, Germany / Canada.
- [26] U. Petzschmann: Vermehrung von Chunky-Graphite in dickwandigen Gusstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit, Düsseldorf, 2013.
- [27] J.V.Dawson: BRICA, The future role of inoculation technology, Conference, 1979.
- [28] FerroPem: Technical data sheet, Spherix Plus.
- [29] Foseco: Technical data sheet, FEEDEX.
- [30] I. Džijan, Računalna dinamika fluida, 2010.
- [31] Radna uputa za odjel topionice: Uputa za recepturu materijala, Ferro-Preis d.o.o, Čakovec, 2016.
- [32] Foseco: Technical data sheet, TENO\*Tec
- [33] J. Grum, D. Ferlan: Tehniška založna Slovenije, Ljubljana.
- [34] <https://www.reliance-foundry.com/blog/spectrochemicalanalysis#gref>, dostupno sa 16.03.2021.
- [35] Heraeus Electro-Nite; Thermal Analysis of Cast Iron
- [36] S. Šolić, B. Smoljan: Metode ispitivanja materijala i konstrukcija, predavanja, 2018/2019.
- [37] Radna uputa za laboratorijska ispitivanja: Odjel osiguranja kvalitete, Ferro-Preis d.o.o., 2011.
- [38] Računalni paket NovaCast

## Popis slika

Slika 2.1 Osnovna podjela željeznih ljevova [5] .....	2
Slika 2.2 Mikrostruktura feritno – perlitnog nodularnog lijeva u poliranom i nagrizenom stanju [7] .....	3
Slika 2.3 Klasifikacija grafita sukladno normi HRN EN 945-1 [10] .....	6
Slika 2.4 Veličina grafitnih nodula u nodularnom lijevu prema normi HRN EN 945-1 [10] .....	6
Slika 2.5 Optimalni udio ugljika i silicija u nodularnom lijevu [5].....	7
Slika 2.6 Odnos temperature na udarnu žilavost pri različitim udjelima silicija [13] .....	8
Slika 2.7 Odnos između nodularnosti i udjela zaostalog magnezija [14].....	12
Slika 2.8 Utjecaj pojedinih kemijskih elementa na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika [9] .....	19
Slika 2.9 Utjecaj manjinskih elemenata na faktor $K_1$ [19] .....	20
Slika 2.10 Faktor utjecaja perlita $P_x$ [19] .....	20
Slika 2.11 Ravnotežni Fe-C dijagram [9] .....	21
Slika 2.12 Utjecaj različitog udjela silicija na ravnotežni Fe-C dijagram [20] .....	22
Slika 2.13 Odnos između tvorbe austenitnog ovoja i oblika grafitne nodule [9] .....	24
Slika 2.14 Mehanizam rasta eksplodiranog grafita [13].....	25
Slika 2.15 Eksplodirani grafit u nodularnom lijevu [24].....	25
Slika 2.16 Zvezdasti ili spiky grafit [24] .....	26
Slika 2.17 Vermikularni oblik grafita u nodularnom lijevu [24].....	26
Slika 2.18 Listićavi grafit na površinskom sloju odljevaka [24].....	27
Slika 2.19 Metalni i nemetalni uključci u nodularnom lijevu [25]:.....	28
Slika 2.20 Područje chunky grafita nakon rezanja odljevka [7].....	29
Slika 2.21 Chunky grafit u poliranom (a) i nagrizenom (b) stanju [7].....	30
Slika 2.22 Niti chunky grafita [26] .....	30
Slika 2.23 Rast nodularnog, prijelaznog i chunky grafita [4].....	31
Slika 2.24 Rast chunky grafita prema Itofuji [5] .....	32
Slika 2.25 Utjecaj udjela silicija i vremena skrućivanja na nastanak chunky grafita [5].....	33
Slika 2.26 Odnos između silicija i omjera manjinskih elemenata na pojavu chunky grafita [26] .....	34
Slika 2.27 Utjecaj omjera manjinskih elemenata, silicija i modula skrućivanja na pojavu chunky grafita [5] .....	34
Slika 3.1 Model i nacrt kocke [7] .....	39
Slika 3.2 Egzotermno pojilo BKV 770 [29] .....	40



Slika 3.3 3D model kocke [7] .....	41
Slika 3.5 Sandwich postupak [9] .....	43
Slika 3.6 Nodulacija bazne taline [7].....	44
Slika 3.7 Kalup za lijevanje ispitnog uzorka [7] .....	46
Slika 3.8 Optički spektrometar [7] .....	48
Slika 3.9 Ispitni uzorak za kemijsku analizu [7] .....	48
Slika 3.10 Krivulja hlađenja bazne taline nodularnoga lijeva [7] .....	49
Slika 3.11 Poprečni presjek rezanja kocke [7].....	50
Slika 3.12 Shematski prikaz mjesta uzimanja uzorka [7].....	50
Slika 3.13 Uređaj za brušenje i poliranje metalografskih uzoraka [7] .....	51
Slika 3.14 Svjetlosni mikroskop [7] .....	52
Slika 3.15 Ispitni uzorak za statičko vlačno ispitivanje [9].....	53
Slika 4.1 Brzine lijevanja u pojedinim fazama lijevanja [38] .....	58
Slika 4.2 Temperatura taline u pojedinim fazama lijevanja [38].....	59
Slika 4.3 Tijek skrućivanja ispitnih uzoraka [38].....	60
Slika 4.4 Termalni modul [38] .....	60
Slika 4.5 Shematski prikaz mjesta uzimanja uzorka [7].....	62
Slika 4.6 Metalografska analiza ispitnih uzoraka, polirano stanje, povećanje 100x [7] .....	64
Slika 4.7 Metalografska analiza ispitnih uzoraka, nagrizenno stanje, povećanje 100x [7] .....	65

## Popis tablica

Tablica 2.1 Minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala dobivenih strojnom obradom iz posebno lijevanih ispitnih uzoraka ili ispitnih uzoraka lijevanih s odljevkom [8] .....	4
Tablica 2.2 Minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava materijala dobivenih iz ispitnih uzoraka koji su izrezani iz odljevka [8] .....	5
Tablica 2.3 Preporučeni kemijski sastav taline za određenu kvalitetu nodularnoga lijeva [11] .....	7
Tablica 2.4 Utjecaj magnezija i elementa rijetkih zemalja na broj nodula u nodularnom lijevu [12] .....	13
Tablica 2.5 Kritični udjeli manjinskih elemenata u nodularnom lijevu prema različitim izvorima [12].....	16
Tablica 2.6 Utjecaj ostalih manjinskih elemenata u nodularnom lijevu [17,18] .....	18
Tablica 2.7 Sastav i tip uključaka na kojim se odvija nukleacija grafitu [9] .....	23
Tablica 2.8 Rezultati ispitivanja ispitnog uzoraka sa dodatkom čistog antimon ili u obliku cjepiva [28].....	35
Tablica 2.9 Kemijski sastav cjepiva za nodularni lijev [13].....	36
Tablica 2.10 Postupci nodulacije [9] .....	37
Tablica 3.1 prikazuje dimenzije i karakteristike egzotermnog pojila BKV 770 [29].....	40
Tablica 3.2 Potrebni parametri za numeričku simulaciju kocke .....	41
Tablica 3.3 Uložni materijali za proizvodnju nodularnoga lijeva [31].....	42
Tablica 3.4 Referentne vrijednosti bazne taline nodularnog lijeva [11].....	42
Tablica 3.5 Kemijski sastav cjepiva [31].....	44
Tablica 3.6 Kemijski sastav nodulatora sa različitim udjelima manjinskih elemenata [31] .....	45
Tablica 3.7 Svojstva premaza [32] .....	47
Tablica 3.8 Dimenzije ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje [9].....	53
Tablica 3.9 Plan lijevanja ispitnih uzoraka.....	54
Tablica 4.1 Kemijski sastav bazne taline.....	55
Tablica 4.2 Kemijski sastav nodulirane taline.....	55
Tablica 4.3 Temperatura taline.....	56
Tablica 4.4 Rezultati makroanalize poprečnih presjeka ispitnih uzoraka .....	61
Tablica 4.5 Rezultati metalografske analize ispitnih uzoraka .....	66
Tablica 4.6 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za prvi odljevak .....	67
Tablica 4.7 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za drugi odljevak .....	68
Tablica 4.8 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za treći odljevak.....	68

Tablica 4.9 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za četvrti odljevak .....	68
Tablica 4.10 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za peti odljevak.....	69
Tablica 4.11 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za šesti odljevak.....	69
Tablica 4.12 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za sedmi odljevak .....	70
Tablica 4.13 Rezultati statičko vlačnog ispitivanja za osmi odljevak .....	70
Tablica 4.14 Sumirane vrijednosti statičko vlačnog ispitivanja za osam odljevaka.....	71