Proizvodnja i karakterizacija nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15

Godinić, Juraj

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:168713

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 247/PS/2018

Proizvodnja i karakterizacija nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15

Juraj Godinić, 0099/336

Varaždin, svibanj 2018. godine

Sveučilište
Sjever

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 247/PS/2018

Proizvodnja i karakterizacija nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15

Student

Juraj Godinić, 0099/336

Mentor

Sanja Šolić, doc.dr.sc

Varaždin, svibanj 2018. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK: Juraj Godinić | MATIČNI BROJ: 0099/336

DATUM: 10.05.2018. | KOLEGIJ: Tehnologija I

NASLOV RADA: Proizvodnja i karakterizacija nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: Production and characterization of nodular cast iron quality HRN EN 400-15

MENTOR: dr.sc. Sanja Šolić, dipl.ing.stroj. | ZVANJE: docent

ČLANOVI POVJERENSTVA:
1. mr.sc. Zlatko Botak, viši predavač
2. dr.sc. Sanja Šolić, docent
3. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
4. dr.sc. Tomislav Veliki, docent
5.

Zadatak završnog rada

BROJ: 247/PS/2018

OPIS:

Nakon uvoda, u teorijskom dijelu potrebno je detaljno opisati svojstva nodularnog lijeva i područja njegove primjene, utjecaj legirnih elemenata na svojstva nodularnog lijeva, načine proizvodnje te utjecajne faktore na strukturu i mehanička svojstva lijeva. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je detaljno prikazati postupak proizvodnje nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15 te na konkretnim uzircima izuzetim iz lijevane Y-probe metodama karakterizacije ispitati mikrostrukturu i mehanička svojstva izlivene taline, te provjeriti i potvrditi jesu li postignuta zajtjevana svojstva propisana zahtjevima norme HRN EN GJS 400-15. Nakon provedenih ispitivanja potrebno je analizirati dobivene rezultate te napisati zaključak.
Rad je potrebno napraviti prema pravilima i uputama za pisanje završnih radova Sveučilišta Sjever.

ZADATAK URUČEN: 11.05.2018 | POTPIS MENTORA: SSolić

REPUBLIKA HRVATSKA 5 KOPRIVNICA SVEUČILIŠTE SJEVER

Predgovor

Zahvaljujem svojoj mentorici, doc. dr. sc. Sanji Šolić, na podršci i usmjeravanju tijekom izrade mog završnog rada. Također zahvaljujem i djelatnicima poduzeća Ferro-Preis d.o.o. koji su mi pomogli sa savjetima vezanim uz eksperimentalni dio rada. Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na potpori koju su mi pružali tijekom studiranja.

Sažetak

Ovaj završni rad obrađuje temu nodularnog lijeva. Rad se sastoji od dva dijela – teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu opisane su prednosti i nedostaci nodularnog lijeva u odnosu na ostale željezne ljevove. Objašnjeno je što je to nodularni lijev, zašto je popularan i koja ga to svojstva čine boljima od ostalih željeznih ljevova. Objašnjen je utjecaj legirnih i pratećih elemenata na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Nakon toga dan je kratak osvrt na talioničke peći i postupak dobivanja nodularne taline.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada prikazan je i objašnjen postupak proizvodnje nodularnog lijeva HRN EN GJS 400-15, koji se sastoji od dobivanja primarne taline i naknadne modifikacije te taline u nodularnu. U drugom dijelu eksperimentalnog rada prikazano je ispitivanje kemijskog sastava, metalografska ispitivanja i ispitivanje mehaničkih svojstava nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15. Ispitivanja su provedena na tri ispitna uzorka pri čemu je potvrđena tražena kvaliteta lijeva HRN EN GJS 400-15.

Ključne riječi: nodularni lijev, mehanička svojstva, mikrostruktura, kemijski sastav

Summary

This final thesis focuses on the subject of ductile iron. Final thesis is composed of two parts – the theoretical and the experimental one.

In the theoretical part of thesis are described the advantages and disadvantages of ductile iron in relation to cast iron. It is explained what ductile iron is, why is it commonly used and which of the properties are better in relation to other cast irons. Effects of alloying agents and other components on mechanical properties of ductile iron are explained. After that, a short overview of the smelting furnace and the process of manufacturing of a ductile iron is given.

In the experimental part of the final thesis, the procedure for production of ductile iron HRN EN GJS 400-15 is presented and explained, which consists of gaining the primary melt and subsequent modification of the melt into the ductile iron. In the second part of thesis, the examination of chemical, metalographic and mechanical properties of ductile iron HRN EN GJS 400-15 is presented. Examinations have been conducted on three samples whereby a sufficient quality of ductile iron HRN EN GJS 400-15 was affirmed.

Key words: ductile iron, mechanical properties, microstructure, chemical composition

Popis korištenih kratica

ADI	Izotermički poboljšani nodularni lijev
R_m	Vlačna ili rastezna čvrstoća, MPa
F_m	Maksimalna sila kidanja, N
$R_{p\ 0.2}$	Granica razvlačenja, MPa
A	Istezljivost,%
HB	Tvrdoća po Brinellu
CE	Ekvivalent ugljika
RE	Elementi rijetkih zemalja
Fe-C	Željezo ugljik dijagram
HRN	Hrvatska norma
EN	Europska norma
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju
Φd	Promjer epruvete, mm
L_0	Početna mjerna duljina epruvete, mm
L_1	Mjera duljine epruvete nakon loma, mm
Lt	Ukupna duljina epruvete, mm
Lc	Stvarna duljina epruvete, mm
lt	Duljina “glave“ epruvete, mm

Sadržaj:

Predgovor I

Sažetak II

Summary III

Popis korištenih kratica IV

Sadržaj: V

1. Uvod 1
2. Nodularni lijev 2
   - 2.1. Općenito o nodularnom lijevu 2
   - 2.2. Izotermički poboljšan nodularni lijev (ADI) 5
   - 2.3. Klasifikacija nodularnog lijeva 6
   - 2.4. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva 8
     - 2.4.1. Utjecaj legirnih elemenata 8
     - 2.4.2. Utjecaj pratećih elemenata 13
     - 2.4.3. Utjecaj nodularnosti grafita 14
     - 2.4.4. Utjecaj broja i veličine nodula 14
     - 2.4.5. Utjecaj udjela ferita i perlita 15
   - 2.5. Uložni materijali 16
   - 2.6. Talioničke peći 17
     - 2.6.1. Kupolne peći 17
     - 2.6.2. Indukcijske peći 18
   - 2.7. Proizvodnja nodularnog lijeva 20
3. Eksperimentalni dio 21
   - 3.1. Proizvodnja primarne taline 21
   - 3.2. Proizvodnja nodularnog lijeva 26
   - 3.3. Ispitivanja nodularnog lijeva 27
     - 3.3.1. Analiza kemijskog sastava 27
     - 3.3.2. Metalografska ispitivanja 28
     - 3.3.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava 33
4. Zaključak 39
5. Literatura 40

Popis slika 41

Popis tablica 43

1. Uvod

Lijevanje je jedan od najstarijih načina oblikovanja metala. To je postupak taljenja metala i ulijevanja rastaljenog materijala u kalup pod utjecajem gravitacijske ili druge sile, te postupak skrućivanja pri čemu kalupna šupljina oblikuje odljevak.

Lijevanje je često jedina tehnika kojom se mogu izraditi strojni dijelovi komplicirane geometrije s unutarnjim šupljinama, a jedna od najvažnijih prednosti lijevanja je mogućnost vrlo ekonomične velikoserijske proizvodnje. Prilikom lijevanja, skrućivanja i hlađenja talina na kalup djeluje mehanički, toplinski i kemijski. Sve do kraja 19. stoljeća kvaliteta proizvoda prvenstveno je ovisila o majstoru, odnosno pojedincu koji je izradio predmet. Industrijska revolucija značajno mijenja smjer u kojem se kreće ljevarstvo.

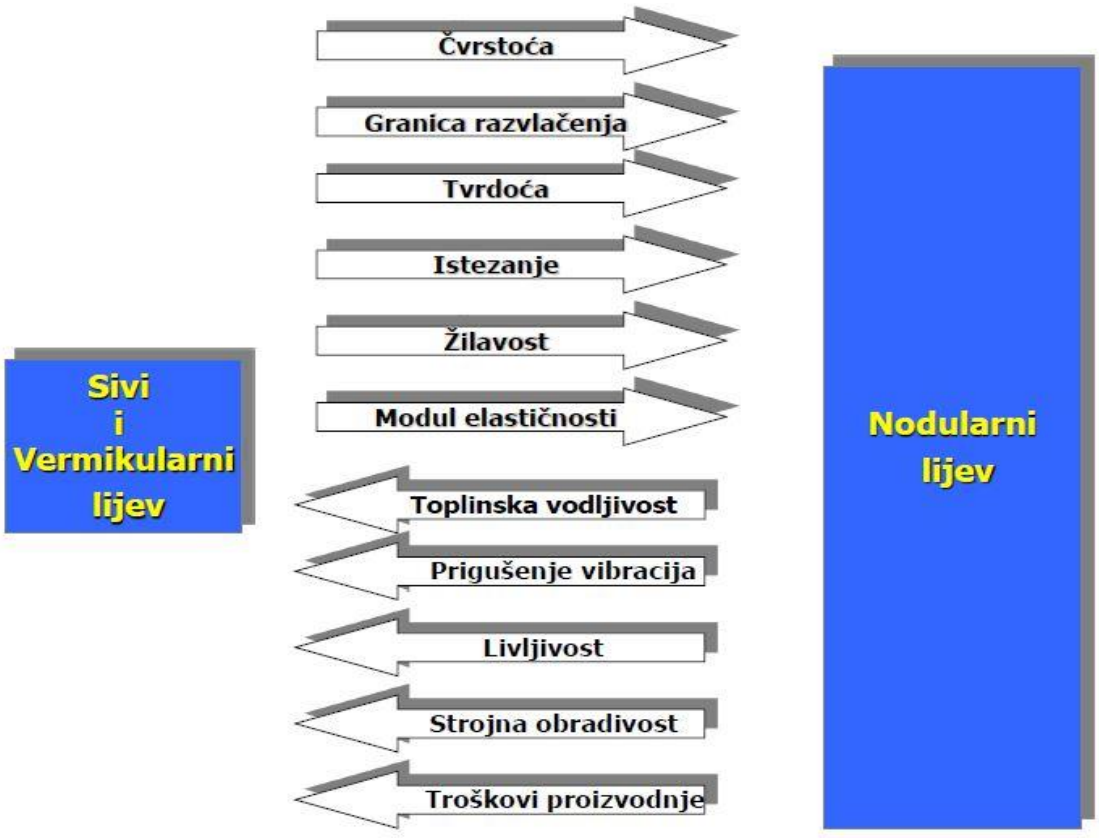
Konstrukcijom kupolnih peći nastaju preduvjeti za povećanje produktivnosti. Jedna od glavnih prednosti kupolnih peći je mogućnost kontinuiranog praćenja procesa dobivanja taline što posljedično utječe na povećanje kvalitete taline. Još jedna velika prednost je mogućnost dobivanja veće količine taline u relativno kratkom vremenu. Mehanička i dimenzijska postojanost te drugi posebni zahtjevi u pogledu kvalitete odljevaka postižu se skrućivanjem taline i promjenom agregatnog stanja, procesom koji još uvijek nije dovoljno istražen pa je i upravljanje kvalitetom vrlo složeno. Jedan od složenijih postupaka tehnologije lijevanja je proizvodnja nodularnog lijeva. Otkriće nodularnog lijeva bio je značajan događaj u metalurgiji željeza [1, 2, 3, 4].

2. Nodularni lijev

2.1. Općenito o nodularnom lijevu

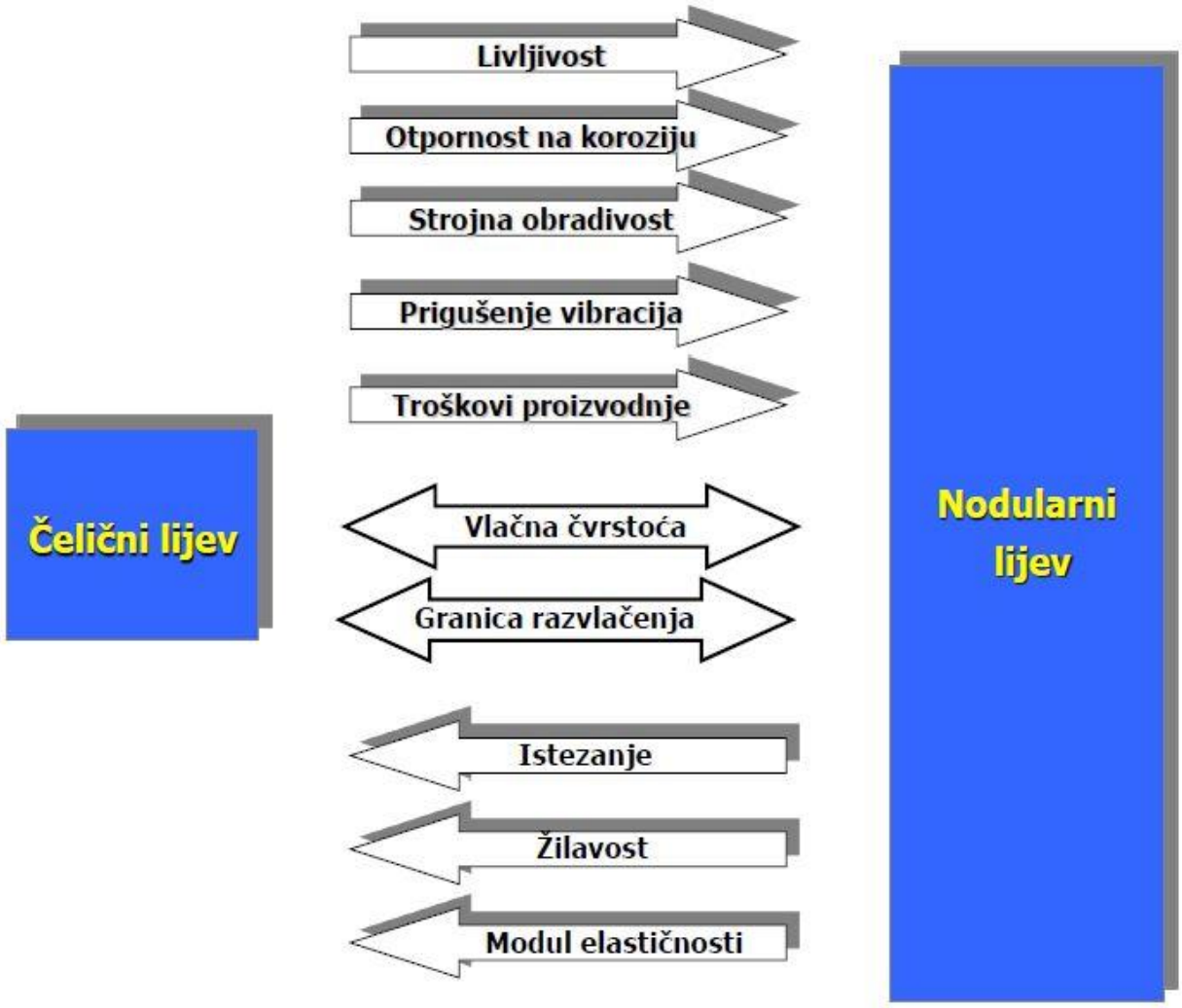
Nodularni lijev pripada skupini sivih ljevova kod kojih se grafit izlučuje u obliku kuglica ili nodula. Budući da grafit u nodularnom lijevu ima kuglasti (odnosno nodularni) oblik, ova vrsta lijeva ima dobra mehanička svojstva. Karakterizira ga visoka vlačna čvrstoća i povoljna žilavost. Ta kombinacija svojstava nije karakteristična za sivi i vermikularni lijev te bijele ljevove. Zbog povoljne kombinacije vlačne čvrstoće i žilavosti nodularni lijev ima široku primjenu [5].

U odnosu na sivi i vermikularni lijev, kod nodularnog lijeva može se ostvariti veća čvrstoća, granica razvlačenja, tvrdoća, istezanje, žilavost i modul elastičnosti. Sivi i vermikularni lijev imaju bolju livljivost, prigušene vibracije, toplinsku vodljivost, strojnu obradivost i niže troškove proizvodnje. Slika 2.1 prikazuje usporedbu svojstava sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva [5].



Slika 2.1 Usporedba svojstava sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva [6]

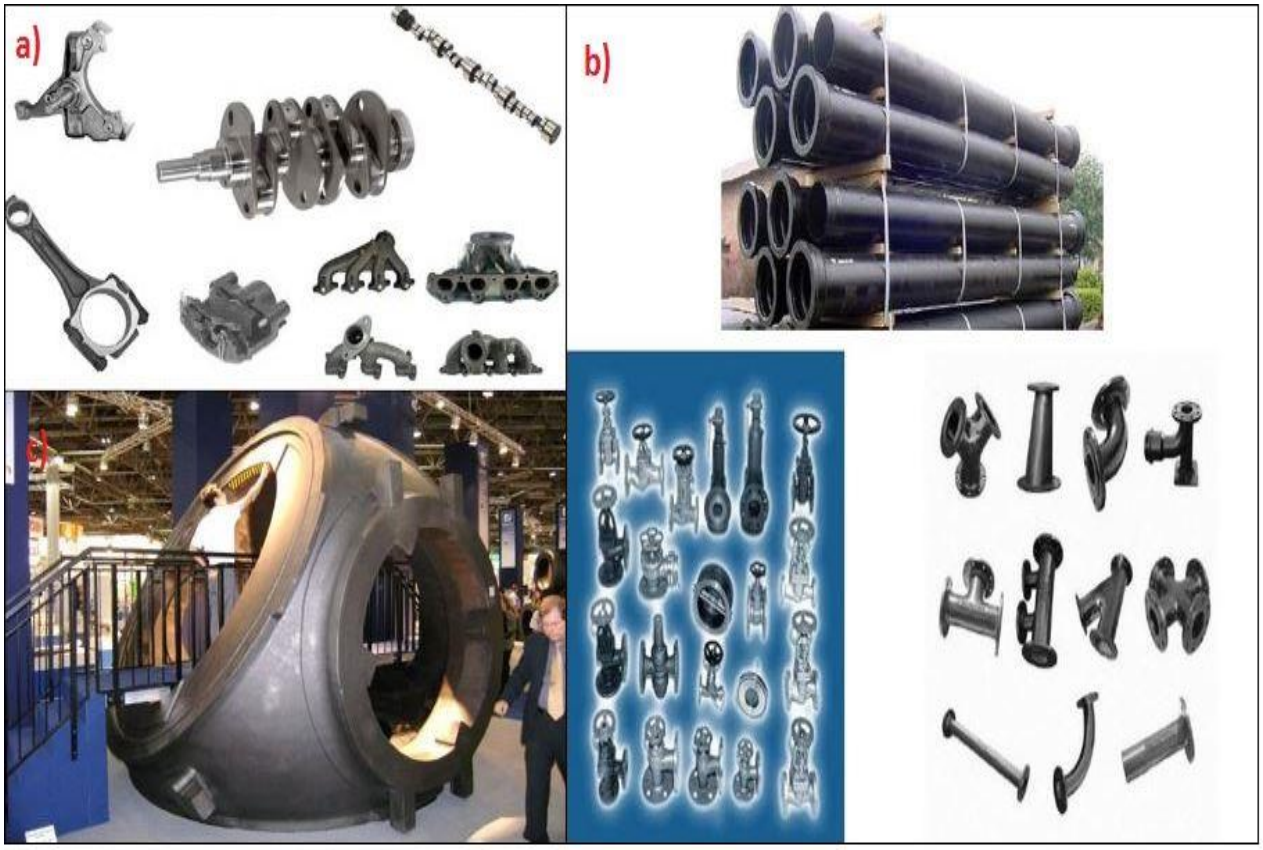
Nodularni je lijev u mnogim područjima primjene zamijenio čelične ljevove. Bolja livljivost, otpornost na koroziju, strojna obradivost, sposobnost prigušenja vibracija te niži troškovi proizvodnje prednost su nodularnog lijeva u odnosu na niskougljične čelične ljevove. Međutim, u zahtjevnijim aplikacijama gdje je potrebna vrlo visoka žilavost, istezljivost i modul elastičnosti, prednost ima niskougljični čelični lijev. Ovisno o strukturi metalne osnove, legiranju i primijenjenoj toplinskoj obradi, vrijednosti vlačne čvrstoće nodularnog lijeva mogu iznositi od 350 do 1500 N/mm². Nodularni lijev ima ~ 10 % manju gustoću u odnosu na čelik. Slika 2.2 prikazuje usporedbu svojstava čeličnog i nodularnog lijeva [5].



Slika 2.2 Usporedba svojstava čeličnog i nodularnog lijeva [6]

Danas postoji veći broj različitih postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se nodularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne (bazne) taline sivog lijeva raznim modifikatorima. Dodatkom modifikatora, a to su najčešće legure koje sadrže magnezij, dobiva se karakterističan kuglasti oblik grafita [5].

Više od 1/3 svjetske proizvodnje nodularnog lijeva primjenjuje se u industriji motornih vozila (slika 2.3a), ~ 1/3 odnosi se na izradu cijevi i ventila za fluide pod tlakom (slika 2.3b) i ~ 1/3 za razne konstrukcijske odljevke, npr. vjetroagregate (slika 2.3c) [5].



Slika 2.3 Područje primjene nodularnog lijeva [6]:

a) industrija motornih vozila

b) cijevi i ventili za fluide

c) različiti konstrukcijski odljevci

2.2. Izotermički poboljšan nodularni lijev (ADI)

Izotermički poboljšan nodularni lijev (ADI) posjeduje izuzetna svojstva u smislu visoke vlačne čvrstoće i dinamičke izdržljivosti, visoke žilavosti i otpornosti na trošenje te dobre strojne obradivosti. Visok odnos čvrstoće i mase čini ovaj materijal pogodnim za različite aplikacije koje moraju imati visoku čvrstoću uz zadržavanje niske mase. Da bi se ostvarila povoljna kombinacijska svojstva, potrebna je primjena specifične toplinske obrade nakon lijevanja koja se sastoji od austenitizacije i izotermičkog poboljšanja. Toplinskom obradom postiže se karakteristična ausferitna struktura metalne osnove koja se sastoji od bainitnog ferita i stabiliziranog austenita s visokim udjelom ugljika. Stvaranje bainita tj. izlučivanje cementita potrebno je izbjeći zbog lošeg utjecaja na mehanička svojstva. Norma za klasifikaciju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prikazana je u tablici 2.1 [1].

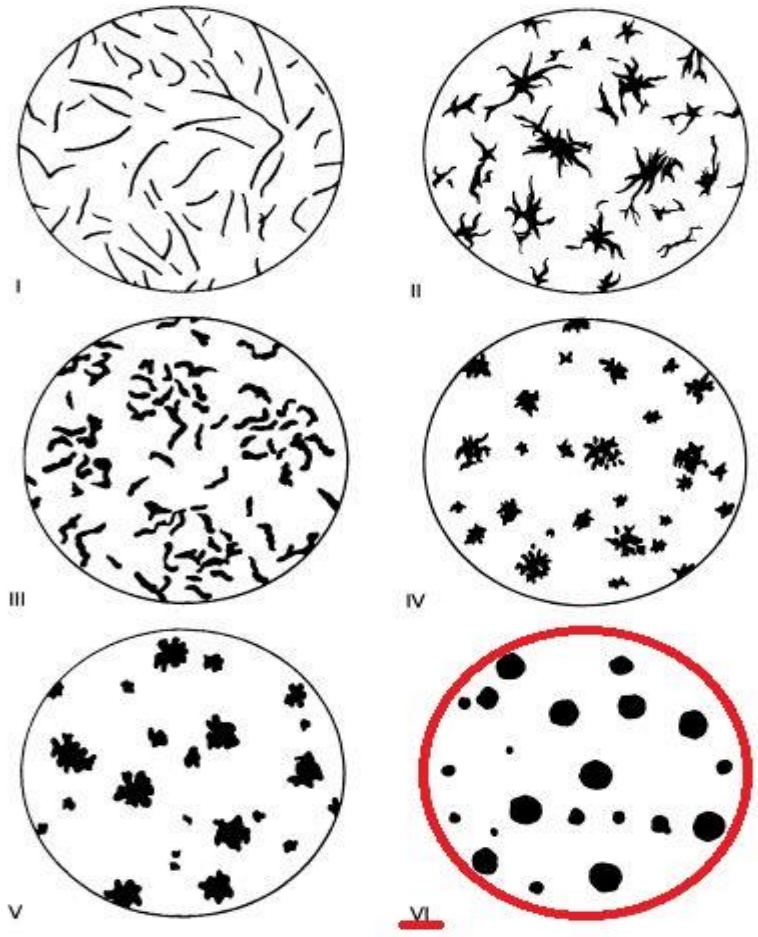
Tablica 2.1 Mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1564 [1]

Označivanje materijala		Vlačna čvrstoća R_m, [MPa], min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, [MPa], min.	Izduženje [%], min.	Tvrdoća, HB
Oznaka	Broj				
EN-GJS-800-8	EN-JS1100	800	500	8	260-320
EN-GJS-1000-5	EN-JS1110	1000	700	5	300-360
EN-GJS-1200-2	EN-JS1120	1200	850	2	340-440
EN-GJS-1400-1	EN-JS1130	1400	1100	1	380-480

Troškovi proizvodnje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva po jedinici mase su ~ 20 % niži u odnosu na čelični lijev i ~ 30 – 50 % niži u odnosu na aluminij. Modul elastičnosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva kreće se u granicama od 155 do 163 GPa i neznatno je niži od modula elastičnosti uobičajenog nodularnog lijeva. U odnosu na čelične ljevove izotermički nodularni lijev ima niži modul elastičnosti ali je zbog svojih povoljnih svojstava posebno u uvjetima dinamičkog opterećenja pogodan za mnoge aplikacije. Koristi se u industriji motornih vozila, za izradu zupčanika, bregastih osovina, nosača motora, koljenastih vratila [1].

2.3. Klasifikacija nodularnog lijeva

Nodularni lijev spada u skupinu željeznih ljevova u kojima se grafit izlučuje u obliku nodula (kuglica) prema normi HRN EN 945:2002 ("Željezni lijev – označavanje mikrostrukture grafita"). Prema navedenoj normi nodularni oblik grafita označava se kao oblik VI. Klasifikacija oblika grafita prikazana je na slici 2.4. Kratica koja označava nodularni lijev je GJS i temelji se na normi HRN EN 1560:1997 ("Sustav označavanja željeznih ljevova") [1].



Slika 2.4 Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN 945:2002
Oblik nodularnog grafita – VI [7]

Nodularni lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće prema normi HRN EN 1563:2011. Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje izrađuju se strojnom obradom od odgovarajućih lijevanih uzoraka. Dimenzije i oblik uzoraka također su definirani

normom HRN EN 1563:2011. U tablici 2.2 prikazane su minimalne zahtjevne vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva za svaku pojedinu kvalitetu [1, 8].

Tablica 2.2 Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom strojnom obradom [8]

Označavanje materijala:		Vlačna čvrstoća, Rm, MPa,min.	Konv. granica razvlačenja, *Rp*0,2, MPa, min.	Istezljivost, A, %, min.
Oznaka:	Broj:			
EN-GJS-350-22-LT[1)]	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT[2)]	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT[1)]	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT[2)]	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

[1)] LT (engl. low temperature) – žilavost pri niskoj temperaturi

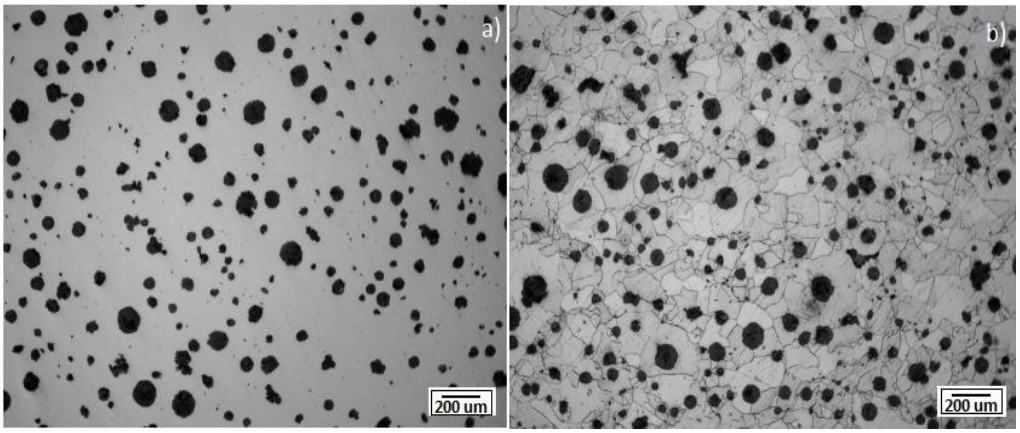
[2)] RT (engl. room temperature) – žilavost pri sobnoj temperaturi

Označavanje nodularnog lijeva sastoji se od kombinacija slova i brojki (tablica 2.2). Primjer: oznaka HRN EN GJS 400-18: HRN označava hrvatsku normu koja je preuzeta iz europske norme EN, slovo G označava lijev, slovo J označava željezo, slovo S označava nodularni grafit, broj 400 označava minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće, broj 18 označava minimalnu vrijednost istezanja. U navedenoj oznaci može se pojaviti još i slovo U koje označava ispitni uzorak koji je lijevan s odljevkom ili poseban lijevani uzorak koji se označuje slovom S [1, 8].

2.4. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva

Mehanička svojstva nodularnog lijeva prvenstveno ovise o mikrostrukturi koja se sastoji od metalne osnove i grafita kuglastog oblika, a na mikrostrukturu direktno utječu kemijski sastav, dodaci talini i brzina hlađenja [1].

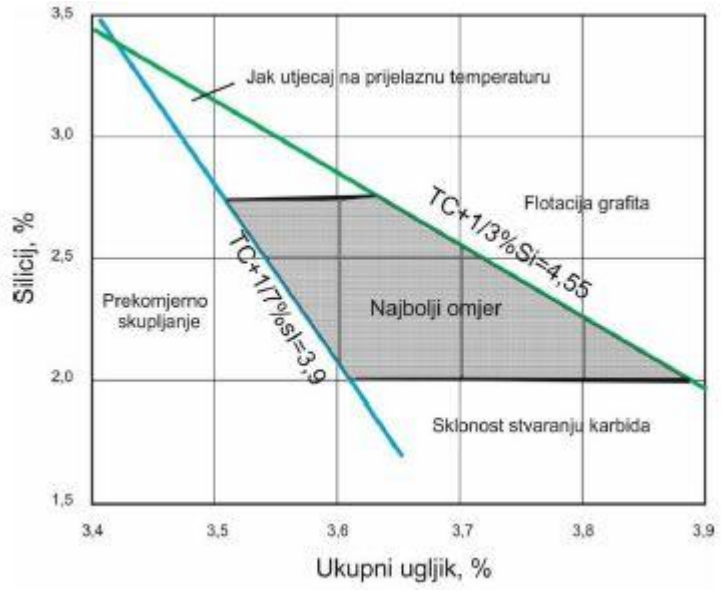
Cijepljenje taline, odnosno dodatak sredstava za obradu taline, povećava broj aktivnih mjesta za nukleaciju grafita. Slika 2.5 prikazuje mikrostrukturu feritnog nodularnog lijeva u poliranom i nagrizenom stanju [1].



Slika 2.5 Metalografske snimke mikrostrukture feritnog nodularnog lijeva [9]:
a) polirano stanje b) nagrizeno stanje, nital

2.4.1. Utjecaj legirnih elemenata

Udio ugljika i silicija ima značajan utjecaj na postizanje povoljne mikrostrukture bez karbida u lijevanom stanju. Optimalni udjeli navedenih elemenata mogu se odrediti iz Handersonova dijagrama prikazanog na slici 2.6 [10].



Slika 2.6 Optimalni udjeli ugljika i silicija u nodularnom lijevu [11]

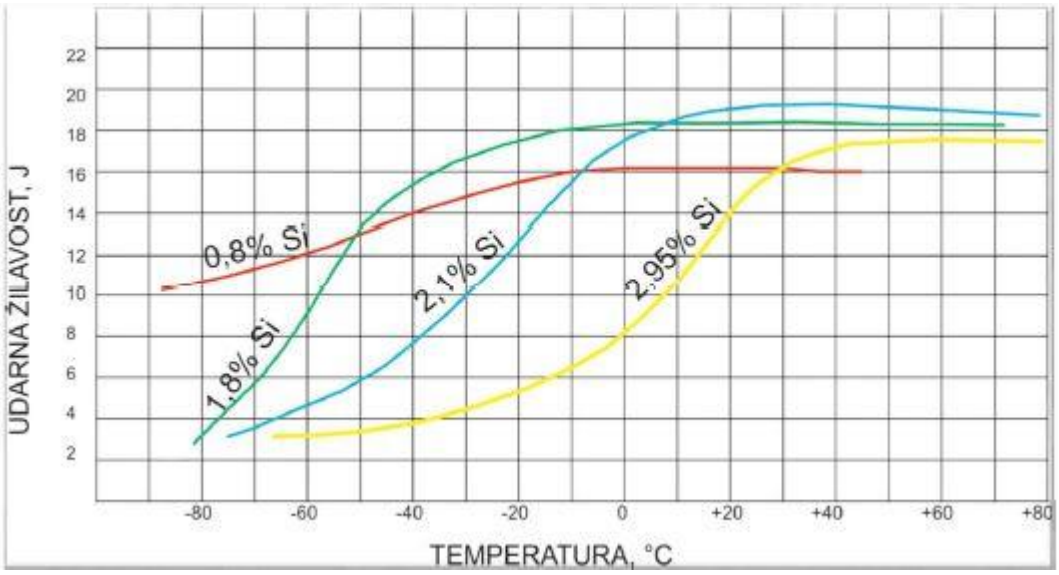
Udio ugljika, silicija (i fosfora) može se promatrati zajedno kao vrijednost CE, odnosno ekvivalent ugljika, koji je koristan pokazatelj ljevačkih svojstava. Formula (1) prikazuje elemente potrebne za dobivanje vrijednosti CE [10].

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

Ekvivalent ugljika (CE) ukazuje na to gdje se lijev određenog kemijskog sastava nalazi u odnosu na eutektički sastav u Fe-C dijagramu [12].

Optimalni udio ugljika u nodularnom lijevu kreće se u granicama 3,6 – 3,8 % jer taj udio ugljika daje najbolji oblik i veličinu nodula. Ako je udio ugljika niži od 3,6 %, stvaraju se karbidi na stjenkama odljevka. Ako je udio ugljika viši od 3,8 %, dolazi do pojave spužvastog grafita, tj. nastaje flotacija ugljika na gornjim površinama odljevka [3].

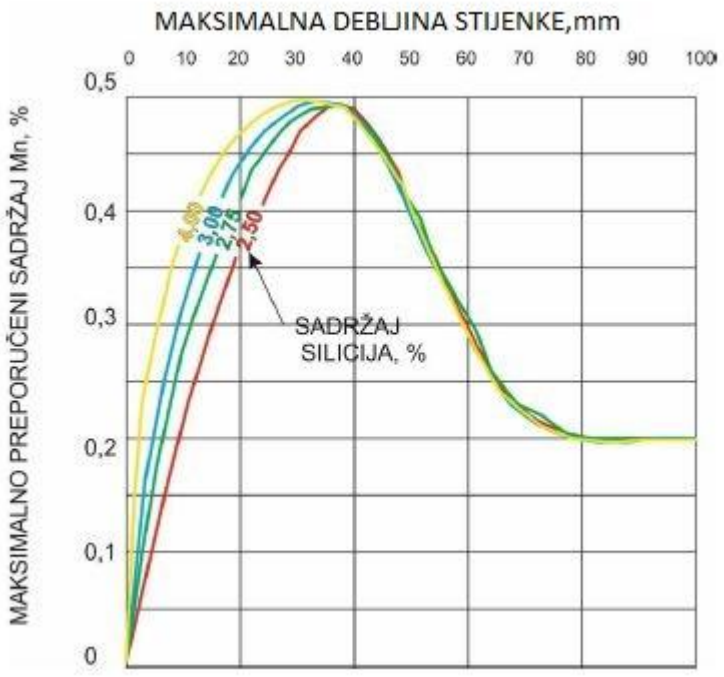
Silicij promovira izlučivanje ugljika u obliku grafita, otežava stvaranje karbida te pospješuje stvaranje ferita. Kontrolom udjela silicija u nodularnom lijevu može se postići povišena vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, a da se pritom istezljivost ne mijenja. Feritni nodularni ljevovi koji su očvrsnuti silicijem imaju viši omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće od uobičajenih nodularnih ljevova. Ako je udio silicija previsok, javlja se smanjena istezljivost te porast čvrstoće i tvrdoće feritnog nodularnog lijeva zbog prekomjernog očvršćivanja ferita [1, 10].



Slika 2.7 Utjecaj udjela silicija na vrijednost udarnog loma feritnog nodularnog lijeva pri različitim temperaturama [11]

Previsok udio silicija ima nepovoljan utjecaj na žilavost nodularnog lijeva (slika 2.7). Povećanjem udjela silicija pada žilavost iako promovira stvaranje ferita koji je poželjan kod kvalitete koje moraju imati visoku žilavost. Pad žilavosti nodularnoga lijeva s porastom udjela silicija tumači se očvršćivanjem ferita od strane silicija i smanjenjem njegove plastičnosti. Ako se želi postići optimalna žilavost nodularnog lijeva koji se primjenjuje pri niskim temperaturama, potreban je što niži udio silicija (2,0 - 2,5 %) [1, 10].

Mangan je element cementator koji doprinosi stvaranju perlita i željeznog karbida (cementita). Proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature. Kod nižih temperatura brzina stvaranja austenita je spora zbog smanjene difuzije ugljika. Stvara se povišen udio ugljika u austenitu i promovira staranje perlita. Karbidi utječu na smanjenje vlačne čvrstoće, istezljivost i udarne žilavosti. Da bi se izbjeglo stvaranje karbida, udio mangana mora biti što niži (0,1 - 0,2 %). Udio mangana povezan je sa udjelom silicija te s debljinom odljevka (slika 2.8). Kod tankostjenih odljevaka (do 30 mm) sklonost mangana stvaranju karbida može se spriječiti porastom udjela silicija. Kod debelostjenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kompenzirati količinom silicija. Ako je udio mangana veći od 0,2 %, može doći do stvaranja karbida [1, 10].



Slika 2.8 Utjecaj udjela silicija i debljine odljevaka na dopušteni udio mangana [11]

Udio sumpora mora biti nizak (od 0,008 % do 0,015 %) zbog velikog afiniteta prema magneziju. Prilikom obrade primarne taline koja u sebi sadrži visok postotak sumpora, a predlegura je na bazi magnezija, stvara se MgS koji se spaja u MgO i SiO_2 stvarajući $MgSiO_3$. Rezultat ove interakcije je stvaranje nepoželjnih čestica troske koje mogu uzrokovati stvaranje uključaka u odljevcima [1, 10].

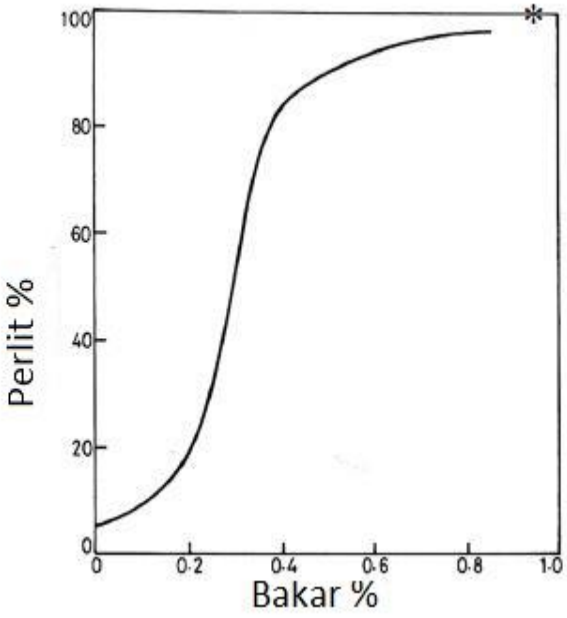
Prilikom reakcije magnezija sa sumporom smanjuje se količina raspoloživog magnezija za modifikaciju grafita što može imati za posljedicu smanjenje nodulacije te pad mehaničkih svojstava. Ako je udio sumpora prenizak (manji od 0,005 %), talina će imati slab odziv na nodulaciju te nastanak broja grafitnih nodula. Optimalni udio sumpora kreće se od 0,008 % do 0,015 % [1, 10].

Fosfor se tijekom skrućivanja pojavljuje na granicama eutektičkih zrna u obliku fosfida kao tvrda i krhka faza. Budući da povećava krhkost nodularnog lijeva, njegov udio mora biti što manji (manji od 0,02 %). Fosfor negativno utječe i na žilavost nodularnog lijeva jer fosfidni eutektik ima visoku tvrdoću i nisku plastičnost [1, 10].

Magnezij se najčešće upotrebljava za obradu primarne taline. Mijenja oblik grafita, odnosno potiče stvaranje nodularnog grafita. Dodan u primarnu talinu najprije deoksidira i odsumporava talinu, a tek onda stvara uvjete potrebne za modifikaciju. Da bi se sav grafit izlučio u obliku nodula,

potrebno je ostvariti udio magnezija od 0,02 do 0,06 % što ovisi o početnom udjelu sumpora. Ako je udio sumpora i kisika u talini nizak, tada je već 0,018 % magnezija dovoljno za stvaranje potpune nodularne strukture grafita. Ciljani udio magnezija u praksi kreće se od 0,035 do 0,05 %. Ako je udio magnezija previsok (> 0,06 %), postoji velika opasnost od stvaranja karbida, troske ili poroznosti. Rizik se povećava porastom brzine skrućivanja i smanjenjem broja nodula. Udio magnezija ima velik utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Ako je udio magnezija nizak, rezultat je nedovoljna modifikacija grafita i mogućnost staranja vermikularnog i listićavog grafita. To se odražava na pad mehaničkih svojstava nodularnog lijeva [1, 10].

Bakar je grafitizirajući element i ne promovira stvaranje karbida. Snižava temperaturu eutektoidne pretvorbe te pospješuje stvaranje perlita. Djeluje kao difuzijska barijera za ugljik te tako onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit. Udio od 0,82 % dovoljan je za stvaranje perlitne osnove (slika 2.9). Zbog stvaranja perlitne osnove bakar povisuje vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću, a smanjuje istezljivost i žilavost nodularnog lijeva [1, 10].



Slika 2.9 Utjecaj bakra na udio perlita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [11]

Kositar snažno promovira perlit i ne promovira stvaranje karbida. Način djelovanja je isti kao i kod bakra. U odnosu na bakar kositar je 10 puta efikasniji u stvaranju perlita. Udio od 0,03 do 0,08 % dovoljan je za stvaranje perlitne mikrostrukture. Ako je udio kositra veći od 0,1 %, stvara

se sloj oko grafitnih nodula koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik. Taj sloj je krhak i ima negativan učinak na mehanička svojstva. Kositar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje istezljivost i udarnu žilavost nodularnoga lijeva [1, 10].

Molibden ima manju sklonost stvaranju karbida od kroma i vanadija. Povisuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću na sobnim i visokim temperaturama, granicu razvlačenja i toplinski umor. Negativno utječe na istezljivost i udarnu žilavost nodularnog lijeva [1, 10].

Nikal poboljšava svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama. Pospješuje stvaranje austenitne metalne osnove te poboljšava vlačnu čvrstoću. Može biti zamjena za silicij u onim kvalitetama lijeva u kojima se traži visoka čvrstoća i povišena žilavost [1, 10].

Krom poboljšava prokaljivost, otpornost na trošenje i tvrdoću. Ima visoku sklonost stvaranju karbida koje je, ako nastanu, vrlo teško ukloniti dugotrajnim žarenjem. Sklonost nastanku karbida značajno se povećava uz prisustvo mangana [1, 10].

2.4.2. Utjecaj pratećih elemenata

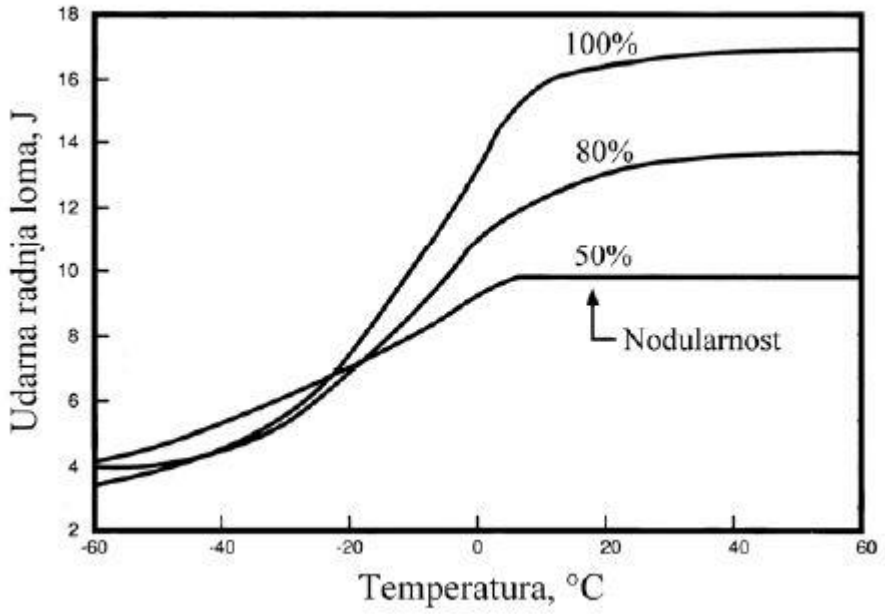
Obradom taline cerijem također se može postići nodularni oblik grafita. Cerij je snažan deoksidant i desulfurant. Nije lako ispariv u odnosu na magnezij pa prilikom reakcije s talinom ne dolazi do burne reakcije. Udio cerija prilikom nodulacije iznosi približno 0,035 %. Cerij ima svojstvo stvaranja karbida pa se zbog toga ne upotrebljava kao primarni nodulator, već kao dio elemenata rijetkih zemalja (RE). Uporaba elemenata rijetkih zemalja i cerija značajno povećava broj nodula što se može vidjeti u tablici 2.3 [1, 10].

Tablica 2.3 Utjecaj udjela elemenata rijetkih zemalja (RE) na broj nodula u nodularnom lijevu [1]

Rezidualni Mg, %	Rezidualni RE, %	Broj nodula/mm^2
0,015	0,0	226
0,015	0,003	342
0,016	0,008	292
0,025	0,0	225
0,027	0,004	275
0,025	0,012	250
0,043	0,0	150-175
0,032	0,010	200-225

2.4.3. Utjecaj nodularnosti grafita

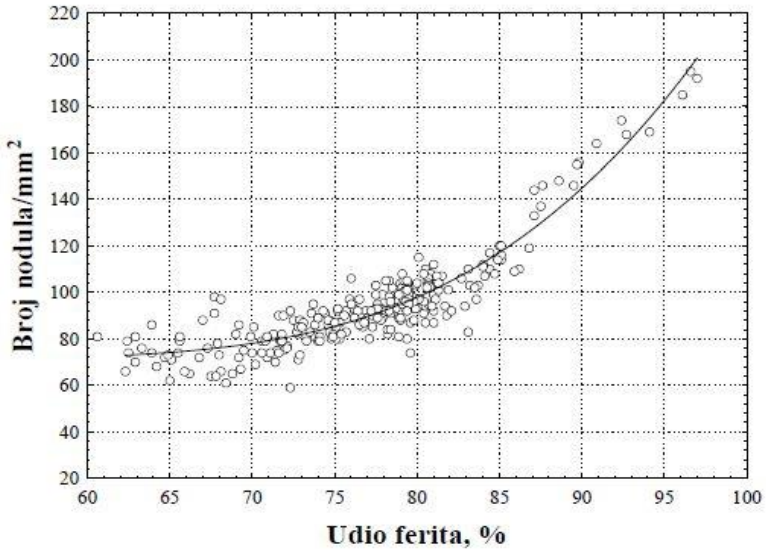
Nodularnost se definira kao udio grafitnih čestica nodularnog oblika u ukupnom broju grafitnih čestica u mikrostrukturi. Nodularnost direktno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Povećanjem nodularnosti raste žilavost feritnog nodularnog lijeva. Ako su čestice grafita po obliku bliže kugli, grafit za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukturi. Posljedica toga je povećanje mehaničkih svojstava. Smanjenjem nodularnosti grafita opada vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i udarna žilavost (slika 2.10) [1, 10, 13].



Slika 2.10 Utjecaj nodularnosti feritnog nodularnog lijeva na udarni rad loma [1]

2.4.4. Utjecaj broja i veličine nodula

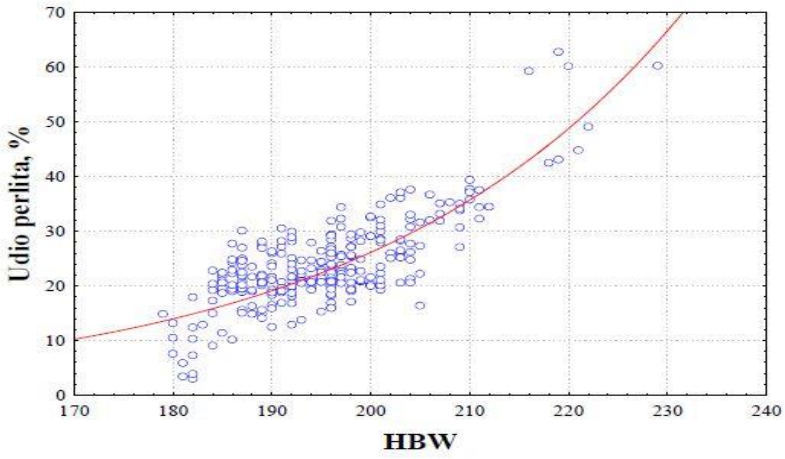
Broj grafitnih nodula ima značajan utjecaj na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi, a samim time i na mehanička svojstva. Povećanje broja nodula rezultira većim udjelom ferita u mikrostrukturi. U tankostjenim odljevcima zbog velike brzine hlađenja prisutan je velik broj manjih nodula te povišen udio perlita. Velike brzine hlađenja otežavaju difuziju ugljika prema nodulama što rezultira višim udjelom perlita. Povećanjem broja nodula smanjuje se njihov promjer što rezultira većom nodularnosti grafita (slika 2.11) [1].



Slika 2.11 Utjecaj broja nodula/mm^2 na udio ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [14]

2.4.5. Utjecaj udjela ferita i perlita

Tvrdoća nodularnog lijeva ovisi o udjelu perlita što je prikazano na slici 2.12. Porastom udjela perlita u mikrostrukturi raste tvrdoća. Perlitni nodularni lijev ima visoku tvrdoću i vlačnu čvrstoću te nisku udarnu žilavost. Perlit je visokotemperaturni eutektoid koji se sastoji od feritne i cementitne faze pa samim time ima povećanu čvrstoću i tvrdoću u odnosu na ferit. Feritni nodularni lijev ima visoku istezljivost i žilavost te osrednju vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću. Perlitni nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću te nisku istezljivost i žilavost. Slika 2.12 prikazuje utjecaj udjela perlita na tvrdoću nodularnog lijeva [1].



Slika 2.12 Utjecaj udjela perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću nodularnog lijeva [14]

2.5. Uložni materijali

U procesu proizvodnje nodularnog lijeva upotrebljavaju se sivo sirovo željezo, čelični otpad i povratni materijal unutar ljevaonice. Pored navedenih materijala u uložak se dodaju sredstva za naugljičenje, ferolegure i talitelji [1].

Sivo sirovo željezo sadrži visok udio ugljika i silicija i ima značajnu ulogu u postizanju propisanog kemijskog sastava primarne taline. Dodatak sivog sirovog željeza u uložak povoljno utječe na nukleacijski potencijal taline. Specijalno sivo sirovo željezo s niskim udjelom mangana, sumpora, fosfora i ostalih zaostalih elemenata ima brojne pogodnosti za proizvodnju nodularnog lijeva. Neke od prednosti su: veće iskorištenje ugljika, veća kompaktnost uložnog materijala, smanjenje koncentracije štetnih plinova [1].

Čelični otpad koji se upotrebljava kao uložni materijal mora biti poznatog kemijskog sastava. Upotreba odgovarajuće količine čeličnog otpada u ulošku je prihvatljiva, čak i neophodna za snižavanje ukupnog udjela ugljika i silicija u ulošku. Prekomjerni udjeli nisu poželjni jer porastom udjela čeličnog otpada u ulošku raste potrošnja koksa ili električne energije za taljenje [1].

Povratni materijal unutar ljevaonice uključuje pojila, škartne odljevke i uljevne sustave. Udio povratnog materijala varira ovisno o raspoloživoj količini materijala. Važno je pravilno gospodarenje povratnim materijalom unutar ljevaonice, tj. materijal je potrebno razvrstati po kemijskom sastavu i upotrijebiti za uložak ovisno o kvaliteti koja se proizvodi [1].

Sredstva za naugljičenje dodaju se kao komponente uloška ili naknadno s ciljem podešavanja udjela ugljika u talini. Kao sredstva za naugljičenje koriste se komadi elektroda, petrol koks, sintetički grafit itd. Prilikom odabira sredstava za naugljičenje potrebno je obratiti pozornost na udio sumpora i dušika [1].

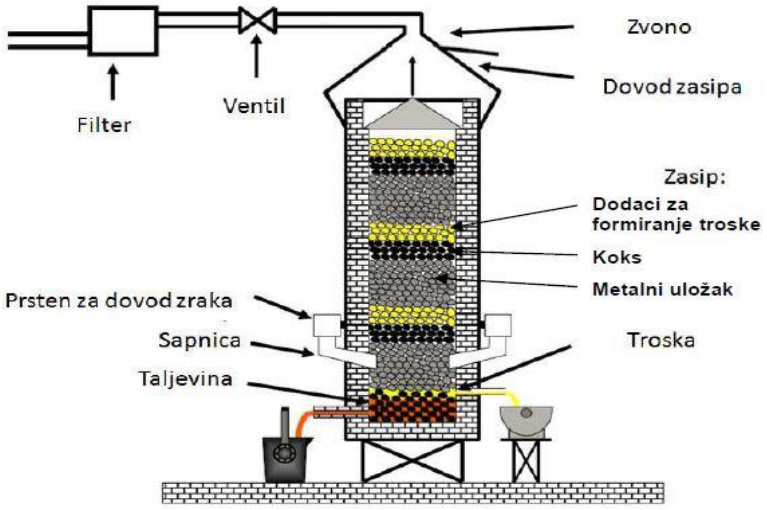
Silicijev karbid sadrži ~ 30 % ugljika i ~ 70 % silicija i upotrebljava se za poboljšanje metalurške kvalitete taline. Povoljno utječe na nukleacijski potencijal taline [1].

2.6. Talioničke peći

U proizvodnji nodularnog lijeva najčešće se primjenjuju kupolne ili indukcijske peći [1].

2.6.1. Kupolne peći

Kupolne peći su najekonomičniji agregati za taljenje i pretaljivanje svih vrsta željeznih ljevova. Kupolna peć u osnovi se sastoji od cilindričnog čeličnog plašta kojem promjer ovisi o veličini peći. Unutrašnjost je obložena vatrostalnim materijalom. Kružnog je presjeka, a unutarnji profil ovisi o njezinoj veličini. Na donjem je kraju, s unutarnje strane plašta, željezni ili čelični prsten. Na gornjem se dijelu plašt produžava u dimnjak, odnosno iskrolovku. Pod peći obično se izrađuje zbijanjem kalupnog pijeska, a leži na vratima koja omogućuju pražnjenje peći nakon završetka lijevanja. Vrata su ugrađena u čeličnu ploču koja zatvara plašt s donje strane. Kupolna peć obično leži na 4 stupa postavljena na betonske temelje peći. Slika 2.13 prikazuje kupolnu peć [15].



Slika 2.13 Kupolna peć [16]

Rastaljeni metal ispušta se kroz otvor pri dnu peći. Pod peći ima blagi nagib prema strani na kojoj se ispušta talina. Na određenoj visini iznad otvora za ispust taline, s druge strane nalazi se otvor za ispust troske. Prostor između ta dva otvora služi za skupljanje taline pa se još naziva i sabirnik. Iznad otvora za ispust troske nalaze se sapnice pravokutnog, kvadratnog ili kružnog oblika simetrično raspoređene po opsegu peći. Kroz sapnice se upuhuje zrak za izgaranje koksa. Sapnice se najčešće izrađuju od sivog lijeva te su pričvršćene na čelični plašt s nagibom prema dolje. Na gornjem kraju dimnjaka nalazi se iskrolovka koja sprečava izlazak užarenih čestica u atmosferu [15].

2.6.2. Indukcijske peći

Indukcijske peći su suvremeni agregati za taljenje čelične taline, željeznih ljevova i aluminijskih legura. Indukcijske peći imaju niz prednosti u odnosu na kupolne peći. To je prije svega brže zagrijavanje i taljenje uloška, mali odgor elemenata, relativno jednostavna kontrola kemijskog sastava te mogućnost postizanja viših temperatura [1, 16].
Nedostaci indukcijskih peći u odnosu na kupolne peći su veći investicijski troškovi i veći troškovi taljenja zbog veće cijene električne energije. Dužim vremenom zadržavanja povećava se sklonost taline pothlađivanju, odnosno smanjuje se nukleacijski potencijal taline [1].

Razlikuju se dva tipa indukcijskih peći [16]:

- indukcijske peći s loncem
- kanalne indukcijske peći

Indukcijska peć s loncem prikazana je na slici 2.14. Glavni element peći je lonac obložen vatrostalnim materijalom i vodom hlađeni induktor. Struja prolazi kroz induktor i stvara promjenjivo magnetsko polje koje inducira struju u metalu. Djelovanjem te struje metal stvara električni otpor zbog kojeg se brzo zagrijava i tali. Na vrhu lonca je poklopac koji sprečava gubitak topline prema gore i žlijeb za izlijevanje taline. Izlijevanje taline izvodi se hidrauličkim nagibanjem peći. Danas se u praksi upotrebljavaju niskofrekventne ili srednjefrekventne peći [1, 16].



Slika 2.14 Indukcijska peć s dva lonca [16]

Kanalna indukcijska peć izrađena je od čeličnog lima i obložena je vatrostalnim materijalom. Kanal s dnom peći čini zatvoreni krug unutar kojeg se nalazi primarni namotaj s čeličnom jezgrom. Kad je primarni namotaj pod naponom, u rastaljenom metalu u kanalu se inducira struja velike jakosti. Toplina se razvija zbog otpora metala. Miješanjem taline zbog elektromagnetnih sila toplina se prenosi na metal u koritu peći putem konvekcije. Za razliku od indukcijskih peći s loncem gdje cijeli uložni materijal predstavlja sekundar, kod kanalnih indukcijskih peći sekundar predstavlja samo talina u kanalu peći. Električna energija za taljenje u ovoj peći predaje se relativno maloj masi taline u kanalu tako da ona mora biti pregrijana na veću temperaturu od ostale taline u kadi peći. Gibanje taline kroz kanal mora biti optimalno kako bi se spriječilo pregrijavanje taline u kanalu peći. Ako je gibanje taline kroz kanal usporeno ili ako ga nema, tada dolazi do nekontroliranog pregrijavanja taline i mogućnosti proboja taline kroz kanal ili prirubnice. Kanalne indukcijske peći najčešće su izvedene kao niskofrekventne (50 Hz).

Ove se peći obično koriste za održavanje taline, njeno legiranje ili kao uređaji za lijevanje. Nedostatak ovih peći je da uvijek moraju imati minimalnu količinu taline kako ne bi došlo do skrućivanja taline u kanalu. Slika 2.15 prikazuje kanalnu indukcijsku peć [1, 16].



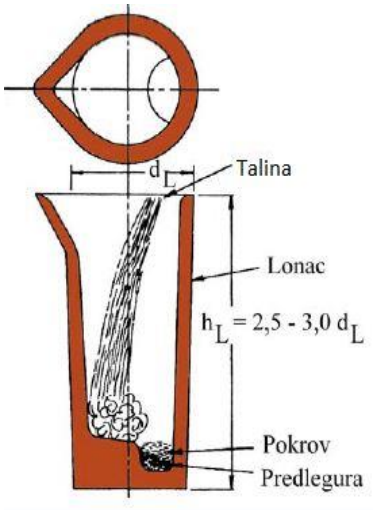
Slika 2.15 Kanalna indukcijska peć [9]

2.7. Proizvodnja nodularnog lijeva

Proizvodnja nodularnog lijeva sastoji se od proizvodnje primarne taline te naknadne modifikacije taline u nodularnu. Proizvodnja primarne taline obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu primarne taline (korekcija kemijskog sastava, odsumporavanje). Uložni materijali za proizvodnju primarne taline nodularnog lijeva isti su kao i za proizvodnju sivog lijeva. Jedina razlika je u tome da je za proizvodnju primarne taline nodularnog lijeva poželjno imati uložne materijale s niskim udjelom sumpora. Ako primarna talina ima visok udio sumpora (veći od 0,02 %), potrebno ju je odsumporiti prije obrade [1].

Proizvodnja nodularnog lijeva provodi se modifikacijom oblika grafita primarne taline (ugljik mora biti izlučen u obliku nodula). Sredstva za modifikaciju primarne taline najčešće su na bazi magnezija a najčešće se koristi predlegura FeSiMg. Predlegura FeSiMg sastoji se od ~ 45 % silicija, ~ 5 % magnezija, ~ 50 % željeza. Sve više su zastupljene legure s niskim udjelom magnezija (2,5 - 3,5 %) te manjim udjelom cerija (~ 1 %) i elemenata rijetkih zemalja (RE) [1].

Najčešći postupak obrade primarne taline je postupak obrade u otvorenom loncu ("sandwich" postupak). Predlegura za obradu taline smješta se u džep na dnu lonca i pokriva se sitnom čeličnom strugotinom. Količina čeličnog pokrova iznosi 2 - 3 % od mase taline. Uloga čeličnog pokrova je onemogućavanje reakcije između taline i magnezijevih legura odmah nakon ulijevanja taline u lonac. Do taljenja čeličnog pokrova i reakcije s nodulatorom dolazi kod određenog nivoa taline u loncu. Na taj način dolazi do veće iskoristivosti magnezija jer pare magnezija prije nego što izađu na površinu prolaze kroz talinu te dolazi do usvajanja magnezija [1]. Slika 2.16 prikazuje postupak obrade primarne taline u otvorenom loncu.



Slika 2.16 Postupak obrade primarne taline u otvorenom loncu [1]

3. Eksperimentalni dio

U ovom dijelu rada opisan je postupak proizvodnje nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 400-15. U radu je bilo potrebno analizom kemijskog sastava, ispitivanjem mehaničkih svojstava i karakterizacijom mikrostrukture utvrditi i potvrditi zahtjeve koje propisuju norme HRN EN 1563 i HRN EN 945 za navedenu kvalitetu proizvedenog lijeva.

Proizvodnja nodularne taline i sva potrebna ispitivanja obavljena su u ljevaonici Ferro-Preis d.o.o. iz Čakovca.

3.1. Proizvodnja primarne taline

Prema zadatku završnog radu tražena kvaliteta taline je HRN EN GJS 400-15. Slika 3.1 prikazuje recepturu uložnog materijala za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15.

Receptura za kvalitetu taline EN-GJS-400-15

	%	Masa (kg)	%C	%Si	%Mn	%S	%P	
SSŽ Sorel (niskomanganskо) - zadnji box	72	2985	4.066	0.15	0.03	0.009	0.03	
Čelik -ploč.- iz 1. boxa	11.33	470	0.063	0.006	0.7	0.003	0.02	
Štanca	0	0	0.1	0.1	0.01	0.03	0.02	ovo sve ide u peć prilikom šaržiranja
povratni materijal	16.88	700	3.7	2.7	0.23	0.01	0.03	
SiC	0.7	29	16.2	45	0	0	0	
FeSi -komadni	1.17	49	0	70	0	0	0	
Naugljičivač za NODULARNI (Desulco)	0.08	3	95	0	0	0.009	0	
Barinoc 0,5-2mm ?????	0	0.0	0	65				
Topseed (pokrov nodulatora) u lonac se dodaje	0.4	16.6	0	48	0	0	0	ove tri stavke idu u lonac
Nodulator ELKEM: NODULATOR ELMAG 3717 -ne dodaje u peć nego u lonac - obrada taline -sandwich	1.4	57.17		50				
	102.16	4146	3.78	1.72	0.14	0.009	0.029	→ očekivani kemizam u baznoj talini

Slika 3.1 Receptura materijala za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15 [17]

Uložni materijal sastoji se od niskomanganskog željeza, čeličnog otpada - ploče, prešanih briketa od strojne obrade, povratnog materijala unutar ljevaonice i sredstva za naugljičenje. Slika 3.2 prikazuje uložne materijale. Uložni materijal za šaržiranje priprema se na način da se dobije bazna talina što sličnijeg kemijskog sastava u odnosu na traženu kvalitetu lijeva. Razlika kemijskog sastava do tražene optimira se dodatkom ferolegura [17].



Slika 3.2 Uložni materijal [9]

Ferolegure se dodaju u šaržu zajedno s uložnim materijalom na kraju taljenja radi bolje iskoristivosti. Ferolegure koje se upotrebljavaju su silicijev karbid, ferosilicij i naugljičivač. Sljedeći korak proizvodnog procesa je taljenje metalnog uloška. Taljenje je izvedeno u indukcijskoj peći proizvođača Inductiotherm. Ukupna snaga peći iznosi 3 MW, a kapacitet peći je 4 t. Brzina taljenja iznosi 5 t/h pri punoj snazi. Slika 3.3 prikazuje taljenje metalnog uloška [18].



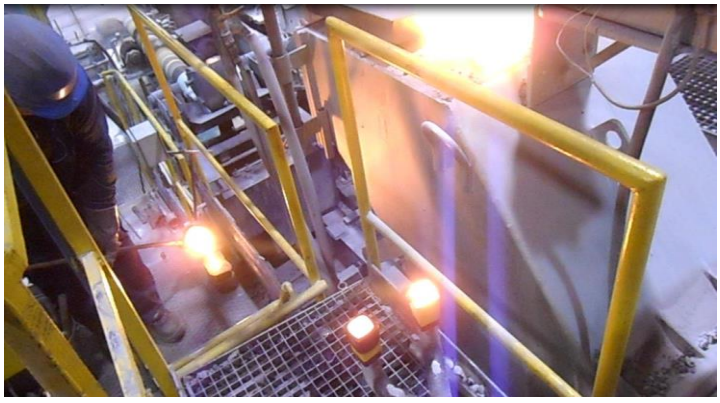
Slika 3.3 Taljenje metalnog uloška [9]

Završetkom taljenja pristupa se mjerenju temperature kako bi se napravila korekcija u računalnom programu jer se temperatura tijekom taljenja teoretski izračunava na temelju mase i režima snage tijekom taljenja. Nakon očitanja temperature operater s površine peći čisti trosku. Čišćenje može biti strojno i ručno. Strojno, uz pomoć dizalice s lopaticama koje se urone u talinu peći pomoću kojih se troska vadi iz peći. Ručno čišćenje izvodi se uz pomoć čeličnih lopatica. Kako bi čišćenje troske bilo efikasnije, na trosku se posipava odvajač troske. Odvajač troske veže trosku u homogenu cjelinu te ju je tako lakše ukloniti s površine taline. Prilikom radnji s talinom obvezna je zaštitna oprema propisana radnim uputama [18]. Slika 3.4 prikazuje ručno čišćenje troske.



Slika 3.4 Ručno čišćenje troske [9]

Nakon mjerenja temperature i čišćenja troske uzima se uzorak za toplinsku i kemijsku analizu. Operater uzima talinu iz peći i ulijeva je u ATAS ispitne čašice, a potom i u čelični kalup koji daje okrugli oblik pločice pomoću kojeg se ispituje kemijski sastav taline (slika 3.5) [18].



Slika 3.5 Uzimanje uzorka za toplinsku i kemijsku analizu [9]

Toplinska analiza provodi se s ciljem brzog i točnog uvida u fazne promjene pri skrućivanju s obzirom na kemijski sastav taline. Ispitne čašice u sebi sadrže termoelement koji očitava temperaturu tijekom skrućivanja taline u čašici. Zastoji temperature tijekom skrućivanja taline ukazuju na fazne promjene u Fe-C dijagramu [18]. Proizvođač uređaja za toplinsku analizu je Heraeus Electro-Nite, tip uređaja je E3 Quick-lab, a program Meltcontrol 2000 QTA. U programu uređaja prati se udio ugljika, silicija, CE, grafički prikaz linije hlađenja, njezinu prvu derivaciju te likvidus i solidus temperature (slika 3.6.) [19].



Slika 3.6 Krivulja hlađenja taline nodularnog lijeva [19]

Kemijski sastav potreban za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15 prikazan je u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Kemijski sastav potreban za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15 [17]

Kvaliteta NL:	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Cu	%Ni
EN GJS-400	3,4-3,8	2,0-2,8	0,2-0,3	max. 0,02	max.0,03	max.0,05	max.0,05	max.1,5
EN GJS-500	3,4-3,8	2,0-2,8	0,3-0,5	max. 0,02	max.0,03	max.0,05	max.0,2	max.1,5
EN GJS-600	3,4-3,6	1,8-2,5	0,5-0,8	max. 0,02	max.0,03	max.0,05	max.0,5	max.1,5

Analiza bazne taline koja je dobivena uređajem proizvođača Heraeus Electro-Nite, tipa E3 Quik-Lab, programom Meltcontrol 2000 prikazana je u tablici 3.2.

Tablica 3.2 Podaci dobiveni toplinskom analizom bazne taline [20]

Kemijski element	Fe	C	Si	CE
% mas.	94,80	3,37	1,83	4,08

Iz tablice 3.2 vidljivo je da dobivene vrijednosti ne zadovoljavaju zahtjeve zadane kvalitete taline pa je napravljena korekcija.

Talina je korigirana sa 6 kg naugljičivača. Silicij, čiji udio je bio prenizak, dodavat će se prilikom nodulacije taline u lonacu. U tom slučaju silicij ima dvojaku ulogu. Prva je korekcijski faktor kemijskog sastava, a druga je da služi kao zaštitna barijera između magnezijevih legura i taline, tj. sprečava prijevremene reakcije magnezijevih legura. Naugljičivač se dodaje direktno u peć. Kako bi korekcija bila pravilno provedena, tj. kako bi se legura homogenizirala s ostatkom taline u peći, potrebno je leguru dodati u područje intenzivnog miješanja. Legiranje taline neće biti uspješno ako se korekcija provodi s punom peći. Kako bi legiranje bilo uspješno, potrebno je bilo iz peći izliti određenu količinu taline, a zatim dodati leguru. Nakon dodavanja legure peć je uključena na maksimalnu snagu (2750 kW) da bi se talina dobro promiješala. Tada se u peć vraća talina koja je bila izlivena u lonac zbog izrade korekcije [18].

Nakon navedene korekcije ponovo se provodi toplinska analiza kako bi se provjerila ispravnost korekcije. Podaci toplinske analize prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Podaci dobiveni toplinskom analizom nakon korekcije bazne taline [20]

Kemijski element	Fe	C	Si	CE
% mas.	94,30	3,86	1,84	4,33

Ispitivanje je pokazalo da su traženi udjeli kemijskih elemenata zadovoljili zahtjeve zadane kvalitete te se pristupilo dovršetku postupka proizvodnje nodularnog lijeva.

3.2. Proizvodnja nodularnog lijeva

Za proizvodnju nodularnog lijeva potrebno je provesti modifikaciju grafita primarne taline. Postupak obrade primarne taline provodi se “sandwich“ postupkom u loncu. Modifikacija primarne taline radi se predlegurom FeSiMg “Elmag 3717“ proizvođača Elkem. Količina nodulatora kreće se oko 1,4 % mase. Količina pokrova, odnosno predlegure FeSi naziva “Topseed“, iznosi 0,4 % mase. Predlegura ima dvojaku ulogu, kao predlegura i zaštitna barijera od prijevremene reakcije nodulatora i taline [18]. Iskorištenje magnezija u ovom postupku iznosi oko 60 %. Prednosti ovog postupka su jednostavna obrada, niski troškovi i fleksibilnost. Nedostaci su velika količina dima i prašine te manja iskoristivost magnezija [1]. Temperatura primarne taline mora biti 1480 ºC. Ljevački lonac mora biti zagrijan plinskim plamenikom do 900 ºC kako bi gubici odvođenja topline bili što manji [18].



Slika 3.7 Ulijevanje primarne taline u lonac i reakcija s nodulatorom [9]

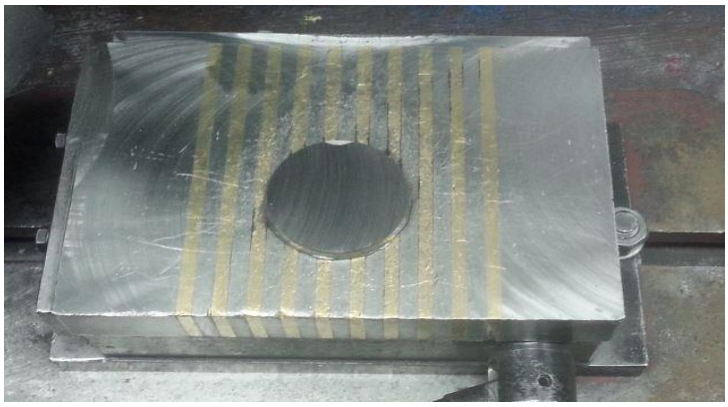
Prilikom ulijevanja primarne taline dolazi do reakcije s nodulatorom. Slika 3.7 prikazuje reakciju nodulatora i taline. Lonac se transportira pomoću mosne dizalice od elektropeći do linije lijevanja. Temperatura lijevanja treba biti 1380 ºC te se ona provjerava uranjajućim pirometrom. Ako je temperatura optimalna, može se pristupiti lijevanju kalupa [18].

3.3. Ispitivanja nodularnog lijeva

U svrhu kontrole parametara nodularnog lijeva, a s ciljem povećanja kvalitete i smanjenja grešaka u odljevcima, kojima je direktna posljedica smanjenje škarta, provedena su ispitivanja kemijskog sastava, metalografska ispitivanja i ispitivanje mehaničkih svojstava.

3.3.1. Analiza kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava izvodi se na ispitnom uzorku koji se uzima iz taline i lijeva u bakrenu kokilu radi bržeg odvođenja topline. Ispitni uzorak ima kružni oblik pa se još naziva tableta ili dukat [21]. Slika 3.8 prikazuje ispitni uzorak za kemijsku analizu.



Slika 3.8 Ispitni uzorak za kemijsku analizu [9]

Promjer ispitnog uzorka iznosi 50 mm. Prije analize ispitni je uzorak potrebno brusiti kako bi se uklonile neravnine. Nakon brušenja ispitni je uzorak spreman za analizu. Kemijski sastav određuje se spektroskopskom analizom pomoću uređaja PolySpek (slika 3.9) [21].



Slika 3.9. Uređaj za spektrogramsku analizu PolySpek [9]

PolySpek radi na principu električnog pražnjenja između elektrode i površine metalnog uzorka. Mjerenje je provedeno u atmosferi argona unutar komore iskre. Elementi s površine uzorka isparavaju i zrače svjetlost u određenim valnim duljinama koje ovise o elementima. Svjetlost iz iskre prelazi u multi-optiku spektrometra. Ondje detektor mjeri relativne amplitude različitih valnih duljina svjetlosti. Obrada ovih spektralnih podataka donosi rezultate analize. Analitički rezultati pojavljuju se kao postotak vrijednosti za svaki element. Potrebno vrijeme za ispitivanje jednog ispitnog uzora iznosi od 20 do 30 sekundi [21].
Rezultati dobiveni spektroskopskom analizom spektrometra PolySpek prikazani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Analiza uzorka pomoću spektrometra PolySpek [20]

Kemijski element	Fe	C	Si	S	P	Mn	Cr	Cu	Mg	Ni	CE
% mas.	93,38	3,72	2,58	0,013	0,047	0,13	0,031	0,028	0,054	0,016	4,39

Odstupanja udjela ugljika, silicija i fosfora dopuštena su ako računski ulaze u zadanu vrijednost CE [21].

Ostali kemijski elementi smiju odstupati 20 % iznad gornje granice i 10 % ispod donje granice, ako je definirana [21].

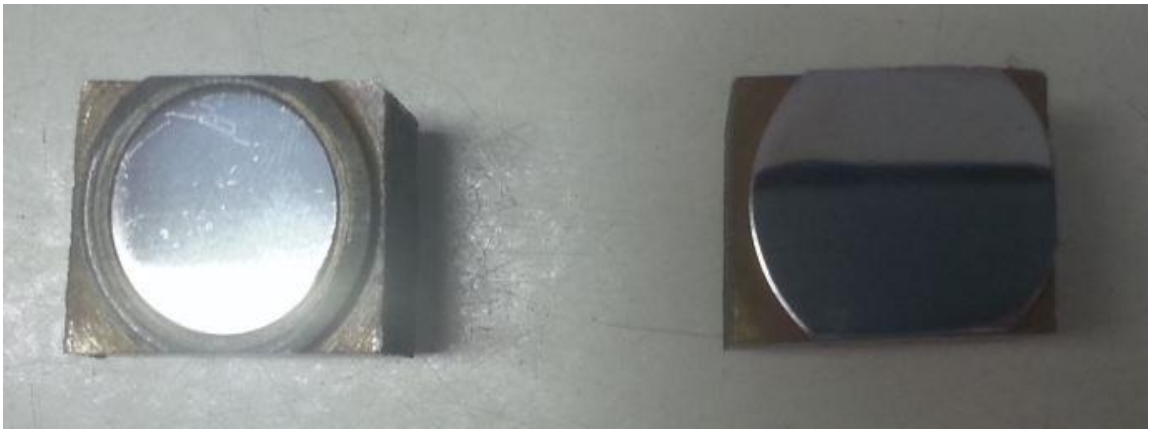
Analiza je pokazala da su vrijednosti udjela pojedinih legirnih elemenata unutar zadanih granica. Uspoređujući rezultate toplinske analize i analize pomoću spektrometra vidi se da se vrijednosti udjela poklapaju što znači da je kvaliteta taline ispravna. Ispitni uzorak i rezultati analiza pohranjuju se kao dokaz o kemijskom sastavu pojedine šarže. Kupac može tražiti ponovnu analizu pojedinog ispitnog uzorka ako smatra da kemijski sastav odljevka ne odgovara traženoj kvaliteti [21].

3.3.2. Metalografska ispitivanja

Metalografsko ispitivanje sastoji se od dva dijela. Prvi dio je priprema uzorka, a drugi dio je analiza mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom. Pripremljena su dva uzorka koja su uzeta iz dvije Y-probe postupkom obrade odvajanja čestica [22].

- **Priprema uzorka**

Analiza mikostrukture radi se na svjetlosnom mikroskopu. Za analizu ispitni uzorci moraju biti adekvatno pripremljeni standardnim metalografskim postupcima [22]. Slika 3.10 prikazuje ispitne uzorke za ispitivanje.



Slika 3.10 Ispitni uzorci za ispitivanje [9]

Postupak pripreme uzorka podrazumijeva [22]:

- brušenje
- poliranje
- nagrizanje.

Brušenje uzoraka izvodi se na metalografskoj brusilici marke Buhler Metaserv pri čemu se koriste brusni papiri različitih granulacija. Brušenje se provodi s 4 brusna papira granulacije 320, 400, 600 i 1200 zrna. Brušenje se izvodi od grubljeg prema finijem. Brušenje se provodi pri brzini od 100 okr/min, a sredstvo hlađenje je voda. Poslije brušenja ispitni uzorak pere se vodom radi uklanjanja svih nečistoća i čestica brušenja kako u idućim koracima ne bi došlo do njihovog utiskivanja u površinu i stvaranja brazda na površini. Sljedeći korak je poliranje ispitnog uzorka. Poliranje se provodi na tkaninama uz primjenu odgovarajuće emulzije za poliranje. Ispitni se uzorak laganim pritiskom polira okretanjem u svim smjerovima vrtnje. Nakon poliranja uzorak je potrebno nagristi kako bi se razvila mikrostruktura. Uzorci na bazi željeza najčešće se nagrizaju otopinom HNO_3 (2-5%) i etanola koji se naziva nital. Nital nagriza granice alfa faza [22].

- **Analiza mikrostrukture**

Za analizu mikrostrukture korišten je svjetlosni mikroskop proizvođača AmScope s mogućnošću povećanja od 50 x do 1000 x. Mikroskop je opremljen integriranom kamerom i povezan s računalom (slika 3.11) [22].



Slika 3.11 Metalografska ispitivanja optičkim mikroskopom [9]

Analiza mikrostrukture napravljena je komparativnom vizualnom analizom na dva ispitna uzorak. Oblik, veličina i stupanj nodulacije grafita ispitnog uzorka određuje se usporedbom sa referentnim slikama prema normi HRN EN 945. Analiza mikrostrukture napravljena je na dva ispitna uzorka, te je izračunata srednja vrijednost koja je uzeta kao rezultat [7].

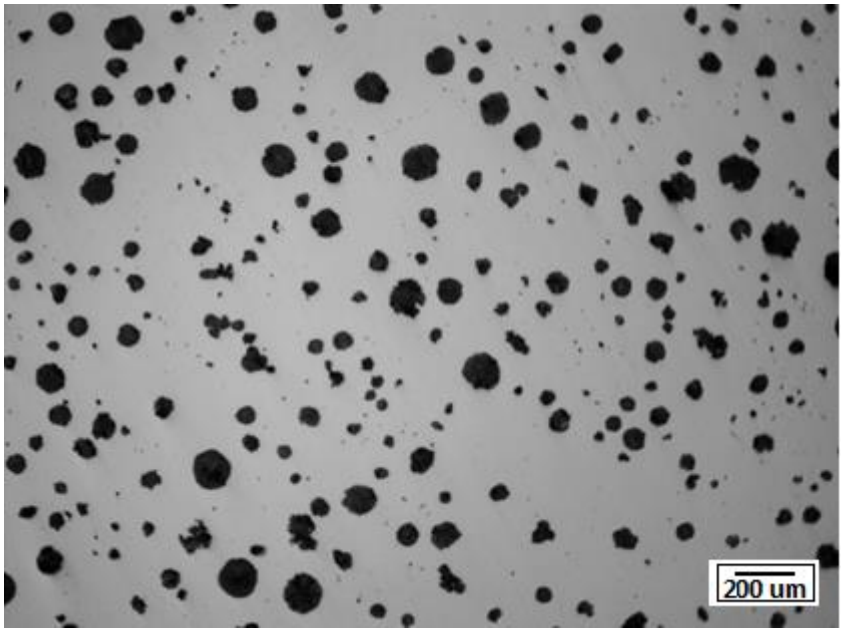
Rezultati ispitivanja svjetlosnim mikroskopom prikazani su u tablici 3.5.

Tablica 3.5 Podaci dobiveni vizualnom analizom mikrostrukture [20]

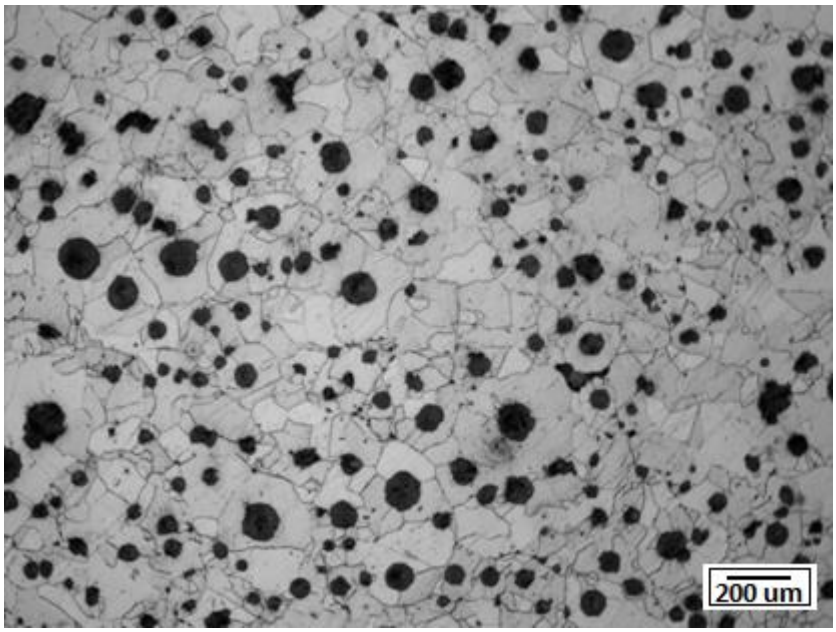
Broj uzorka	Veličina nodula/mm²	Stupanj nodulacije %	Oblik nodula
1.	5,6	>90	V,VI
2.	5,6	>90	V,VI

Komparativna vizualna analiza mikrostrukture pokazala je da je u mikrostrukturi ostvaren visok stupanj nodulacije. Nodule su jednoliko raspoređene po cijeloj površini uzorka i u mikrostrukturi nema prisutnih karbida [22].

Mikrostruktura prvog uzorka u poliranom i nagrizenom stanju prikazana je na slici 3.12 i 3.13.

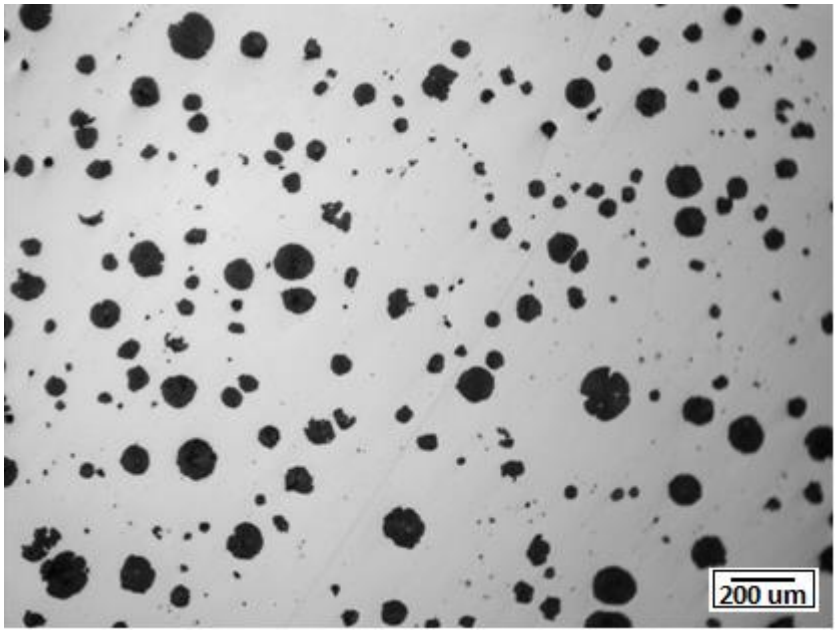


Slika 3.12 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, polirano stanje [9]

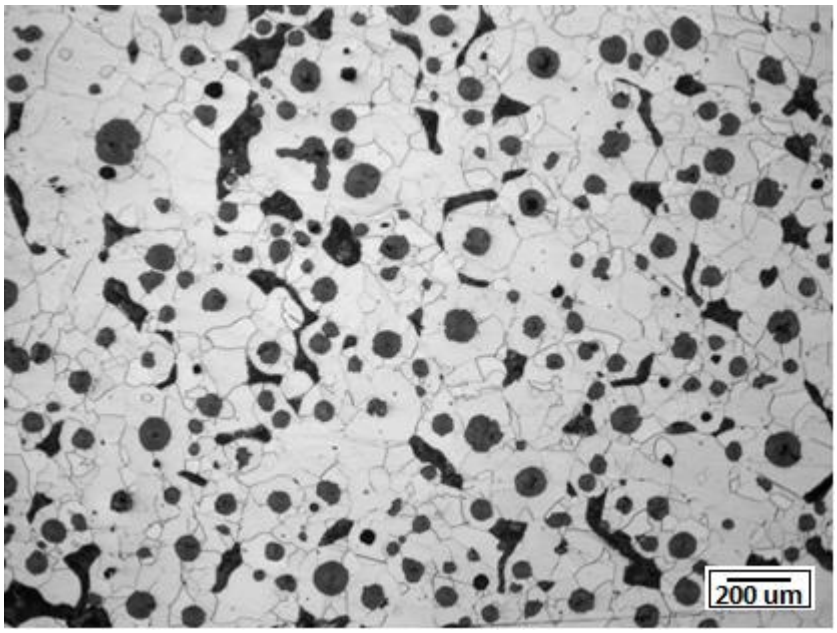


Slika 3.13 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, nagrizeno stanje [9]

Mikrostruktura drugog uzorka u poliranom i nagrizenom stanju prikazana je na slici 3.14 i 3.15.



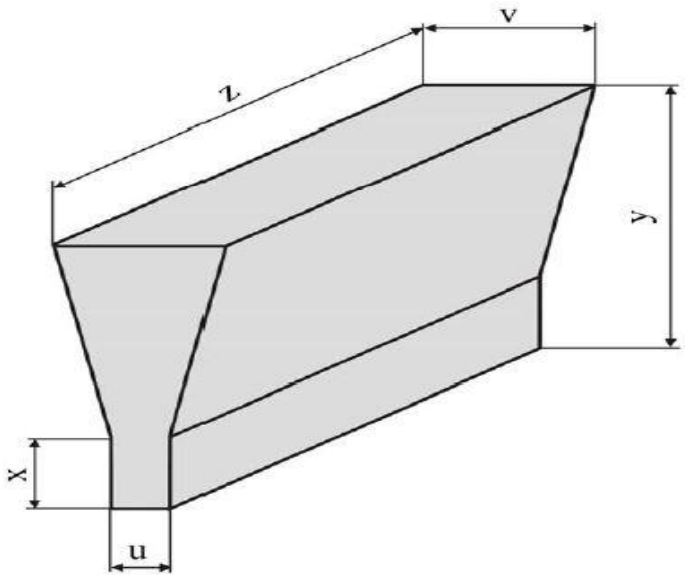
Slika 3.14 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, polirano stanje [9]



Slika 3.15 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, nagrizeno stanje [9]

3.3.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva odljevaka od nodularnoga lijeva propisana su normom HRN EN 1563, a mogu i ovisiti i o dogovoru između proizvođača i kupca. Mehanička svojstva propisana navedenom normom su: vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, tvrdoća, žilavost i istezljivost. Mehanička svojstva ispitana u ovom radu su: vlačna čvrstoća, istezljivost i tvrdoća. Na slici 3.16 prikazan je oblik i dimenzija ispitnog uzorka [23].



Slika 3.16 Oblik i dimenzije ispitnog uzoraka; Y-proba [1]

Norma HRN EN 1563 propisuje Y-probe koje se razlikuju po dimenzijama [23]. Tablica 3.6 prikazuje dimenzije Y probi propisanih normom HRN EN 1563.

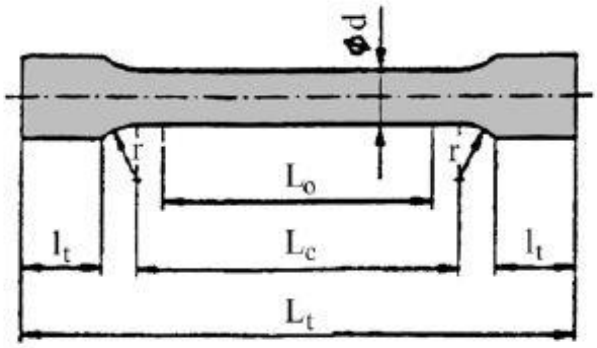
Tablica 3.6 Dimenzije Y-probe prema normi HRN EN 1563 [1]

Dimenzija, mm	Tip Y-probe			
	I	II	III	IV
u	12,5	25	50	75
v	40	55	100	125
x	25	40	50	65
y[1)]	135	140	150	175
z	Ovisi o dužini ispitnog uzorka			

Prema normi HRN EN 1563, Y proba dobiva se lijevanjem nodularne taline u pješčani kalup. Prije ulijevanja taline potrebno je staviti traku lima kojom se označava kvaliteta lijeva, oznaka pozicije te sljedivost. Nakon skrućivanja nodularne taline slijedi čišćenje Y probe od pijeska [23].

- **Statično vlačno ispitivanje**

Norma HRN EN 10002 propisuje oblik i dimenziju ispitnih uzoraka – epruveta za statičko vlačno ispitivanje (tablica 3.7). Epruvete za statičko vlačno ispitivanje uzimaju se iz Y probe, ali moguće ih je izraditi i iz odljevaka ukoliko kupac ima takve zahtjeve. U ovom ispitivanju ispitni uzorci izrađeni su iz Y probi, dimenzija B 10 x 50 mm. Ispitana su tri ispitna uzorka, te je izračunata srednja vrijednost koja je uzeta kao rezultat [1]. Slika 3.17 prikazuje oblik ispitnog uzorka – epruvete.



Slika 3.17 Oblik ispitnog uzorka – epruvete [1]

Gdje je [1]:

Φd – početni promjer epruvete, mm

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm

Lt – ukupna duljina epruvete, mm

L_C – stvarna duljina epruvete, mm

lt – duljina "glave" epruvete, mm.

Tablica 3.7 Dimenzija ispitnih uzoraka - epruveta za vlačna ispitivanja [1]

d, mm	L_0, mm	L_c [1)] min., mm
5	25	30
7	35	42
10	50	60
14[2)]	70	84
20	100	120

Statičko vlačno ispitivanje napravljeno je na kidalici marke "Wolpert Testor U20" proizvedenoj 1976. godine (slika 3.18) [23].



Slika 3.18 Kidalica marke "Wolperttestor U20" [9]

Na navedenoj kidalici prije početka ispitivanja potrebno je postaviti utege na primjereno mjesto. Na ispitnom uzorku je potrebno označiti početnu mjernu duljinu epruvete (L_0) kako bi se naknadnim mjerenjem moglo očitati produljenje. Ispiti uzorak se postavlja u čeljusti kidalice. Ispitni uzorak opterećuje se konstantnim vlačnim opterećenjem sve dok ne pukne [23]. Prilikom vlačnog pokusa kazaljka se zaustavlja na maksimalnoj vrijednosti. Ta vrijednost predstavlja maksimalnu silu F_m. Vlačna ili rastezna čvrstoća R_m izračunava se prema formuli (2) [24].

$$R_m = \frac{F_m}{\frac{d^2 x\, \pi}{4}} \qquad (2)$$

Gdje je [24]:

F_m - maksimalna sila kidanja, N

R_m – vlačna ili rastezna čvrstoća, N/mm^2

d - početni promjer epruvete, mm.

Nakon statičko vlačnog ispitivanja potrebno je izmjeriti duljinu epruvete nakon loma L_1 ,kako bi se mogla izračunati istezljivost. Istezljivost se izračunava prema formuli (3) [24].

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} x100\% \quad (3)$$

Gdje je [24]:

A – istezljivost, %

L_1 – mjera duljine epruvete nakon loma, mm

L_0 - početna mjerna duljina epruvete, mm.

Rezultati provedenog statičko vlačnog ispitivanja prikazani su u tablici 3.8.

Tablica 3.8 Rezultati ispitivanja vlačnim ispitivanjem [20]

br. uzorak	Vlačna čvrstoća N/mm^2	Istezljivost %
1.	456	23
2.	497	20
3.	465	22
$\bar{X}$	473	22

Na tri ispitna uzorka provedena su statička vlačna ispitivanja. Vrijednost vlačne čvrstoće predstavlja srednju vrijednost dobivenih mjerenja. Usporedbom rezultata s normom HRN EN 1563 vidljivo je da dobiven rezultat zadovoljava traženu vrijednost za zadanu kvalitetu lijeva. Tablica 3.9 prikazuje zahtijevana mehanička svojstva nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1563 [23].

Tablica 3.9 Kriteriji prihvaćanja prema normi HRN EN 1563 [23]

Oznaka matreijala	Rm (Mpa)	Rp0.2 (Mpa)	A (%)	HB
EN GJS 350-22	350	220	22	>160
EN GJS 400-15	400	250	15	135-180
EN GJS 400-18	400	250	18	130-175
EN GJS 450-10	450	250	10	160-210
EN GJS 500-7	500	320	7	170-230

Iz rezultata dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem vidljivo je da ispitni uzorci zadovoljavaju zahtjeve norme. Vrijednosti vlačna čvrstoća i istezljivost su unutar zadanih vrijednosti [23].

- **Mjerenje tvrdoće**

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju stranog tijela u njegovu površinu [25].

U ovom radu tvrdoća je mjerena prema Brinellovoj metodi. Brinellova metoda koristi se za meke i srednje tvrde materijale. Kod ove metode indentor je kuglica od tvrdog metala. Kuglica se utiskuje u ispitni uzorak određenom silom F. Tvrdoća po Brinellu (HB) predstavlja omjer primijenjene sile i površine kalote otiska. Brinellova metoda ne mjeri dubinu prodiranja indentora (kuglice) nego promjer kalote. Mjerenje po Brinellu posebno je pogodno za heterogene materijale kao što su i željezni ljevovi radi veličine otisaka [23]. Slika 3.19 prikazuje uređaja za mjerenje tvrdoće.



Slika 3.19 Uređaj za mjerenje tvrdoće ispitnog uzorka [9]

Mjerenje tvrdoće provedeno je na tvrdomjeru proizvođača Innovatest Nexus 8003HBT. Penetrator je kuglica od tvrdog metala promjera 5 mm, vrijeme utiskivanja je 10 sekundi, a upotrijebljena sila podešava se automatski (slika 3.19) [23].

Ispitni uzorak potrebno je prethodno pripremiti. Na tvrdomjeru se podešava potrebni parametar, a to je vrijeme utiskivanja indentora. Silu utiskivanja nije potrebno postaviti jer ju tvrdomjer automatski podešava. Primjenom optički skener s integriranom kamerom mjeri se promjer kalote (slika 3.20). Tvrdomjer automatski izračunava tvrdoću po Brinellu (HB) [23].



Slika 3.20 Mjerenje promjera kalote [9]

Na svakom ispitnom uzorku napravljeno je tri mjerenja. Vrijednost tvrdoće predstavlja srednju vrijednost dobivenih mjerenja [8]. Rezultati ispitivanja tvrdoće prikazani su u tablici 3.10.

Tablica 3.10 Prikaz tvrdoće ispitnih uzoraka [20]

Br. uzorka	1. mjerenje (HB)	2. mjerenje (HB)	3.mjerenje (HB)	$\bar{X}$ (HB)
1.	152	147	146	148
2.	154	156	151	154
3.	155	153	156	155

Dobiveni rezultati pokazuju da ispitni materijal HRN EN GJS 400-15 zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 1563 za zadanu kvalitetu materijala [23].

Svi rezultati ispitivanja, analiza kemijskog sastava, analiza mikrostrukture, te rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava pokazali kako lijev kvalitete HRN EN GJS 400-15 izrađen u ovom ispitivanju zadovoljava zahtjeve normi HRN EN 1563 i HRN EN 945 [8].

4. Zaključak

Nodularni lijev se po svojim karakteristikama nalazi se između sivog i čeličnog lijeva. Tijekom skrućivanja nodularnog lijeva ugljik se izlučuje u obliku grafitnih nodula (kuglica). Nodularni lijev ima bolja svojstva pri vlačnom opterećenju i udarnom radu loma od sivog lijeva, ali lošiju toplinsku vodljivost, sposobnost prigušenja vibracija i strojnu obradivost.

Proizvodnja nodularnog lijeva povećava se iz godine u godinu. Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev je u mnogim aplikacijama zamijenio čelični lijev, zbog nižih troškova proizvodnje, bolje otpornosti na koroziju, bolje strojne obradivosti i manje gustoće. Gustoća nodularnog lijeva je ~ 10 % manja u odnosu na čelične ljevove, što znači da je za jednaki volumen nodularni lijev ~ 10 % lakši. Navedena prednost posebno dolazi do izražaja u automobilskoj industriji gdje je jedan od glavnih ciljeva smanjenje mase vozila.

Mehanička svojstva nodularnog lijeva prvenstveno ovise o mikrostrukturi koja se sastoji od metalne osnove i grafita kuglastog oblika, a na mikrostrukturu direktno utječe kemijski sastav, dodaci talini i brzina hlađenja. Promjenama u mikrostrukturi može se postići širok spektar mehaničkih svojstava što nodularni lijev čini poželjnim materijalom.

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno izraditi nodularni lijev kvalitete HRN EN GJS 400-15, te ispitati odgovara li lijev kemijskim sastavom, mikrostrukturom i mehaničkim svojstvima zahtjevima normi HRN EN 1563 i HRN EN 945. U tu svrhu odlivene su tri Y probe iz kojih su napravljeni ispitni uzorci za analizu kemijskog sastava, analizu mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih svojstava. Rezultati ispitivanja pokazali su da proizvedeni lijev odgovara svim zahtjevima normi HRN EN 1563 i HRN EN 945.

5. Literatura

[1] Unkić Faruk, Zoran Glavaš: Lijevanje željeznih metala, Sveučilište u Zagrebu – Metalurški fakultet, Sisak, 2008.

[2] Unkić Faruk, Zoran Glavaš: Osnove lijevanja metala, zbirka riješenih zadataka, Sisak, 2009.

[3] Mile Galić: Industrijski postupci izrade nodularnog lijeva u Jugoslaviji, Zagreb, 1990.

[4] Ivan Budić: Osnove tehnologije kalupljenja, Slavonski Brod, 2010.

[5] J. Janđel: Nodularni lijev – proizvodnja, svojstva i primjena, Diplomski rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2011.

[6] Z. Glavaš: Nodularni lijev, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Čakovec-2015.

[7] HRN EN 945:2002 – Hrvatska norma: Željezni lijev – Označavanje mikrostrukture grafita, 2002.

[8] HRN EN 1560:2011 – Hrvatska norma: Ljevarstvo – Nodularni ljevovi, 2011.

[9] Juraj Godinić: fotografije napravljene u ljevaonici Ferro-Preis d.o.o., Čakovec, 2017.

[10] The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron&Titanium, Montreal, Canada, 2004.

[11] Proizvodnja nodularnog lijeva: Gordana Gojsević Marić, Elkem AS podružnica u Sisku, 2015.

[12] Sanja Šolić: Tehnologija 1, Ljevarstvo - predavanje 5, 2016.

[13] Ductile Iron Data for Design Engineers, Rio Tinto Iron&Titanium, Montreal, Canada, 1998.

[14] Z. Glavaš: Optimizacija udarne žilavosti nodularnog lijeva metodama umjetne inteligencije, doktorski rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2007.

[15] Mile Galić: Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, Miramarska 24, 1985.

[16] Branko Bauer, Ivana Mihalic: Osnove tehnologije lijevanja, 2012.

[17] Radna uputa za odjel topionice: Upute za recepturu materijala, Ferro-Preis d.o.o., Čakovec, 2016.

[18] Radna uputa za odjel topionice: Uputa za proizvodnju nodularnog lijeva, Ferro-Preis d.o.o., Čakovec, 2016.

[19] Računalni program Meltcontrol 2000QTA, proizvođača Heraeus Electro-Nite, tipa E3 Quick-Lab.

[20] Rezultati ispitivanja nodularnog lijeva EN GJS 400-15, Ferro-Preis, Čakovec, 2016.

[21] Radna uputa za laboratorijska ispitivanja: Odjel osiguranja kvalitete, Upute za ispitivanje kemijskog sastava, Ferro-Preis d.o.o., 2011.

[22] Radna uputa za laboratorijska ispitivanja: Odjel osiguranja kvalitete, Upute za metalografska ispitivanja, Ferro-Preis d.o.o., 2011.

[23] Radna uputa za laboratorijska ispitivanja: Odjel osiguranja kvalitete, Upute za ispitivanje mehaničkih svojstava, Ferro-Preis d.o.o., 2011.

[24] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1461228818-0-odabranapoglavlja-mehanickasvojstvamaterijala.pdf , dostupno 9.10.2017.

[25] http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20tvrdoce.pdf ,dostupno 20.08.2017.

Popis slika

Slika 2.1 Usporedba svojstava sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva [6] 2
Slika 2.2 Usporedba svojstava čeličnog i nodularnog lijeva [6] 3
Slika 2.3 Područje primjene nodularnog lijeva [6]: 4
Slika 2.4 Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN 945:2002 6
Slika 2.5 Metalografske snimke mikrostrukture feritnog nodularnog lijeva [9]: 8
Slika 2.6 Optimalni udjeli ugljika i silicija u nodularnom lijevu [11] 9
Slika 2.7 Utjecaj udjela silicija na vrijednost udarnog loma feritnog nodularnog lijeva pri različitim temperaturama [11] 10
Slika 2.8 Utjecaj udjela silicija i debljine odljevaka na dopušteni udio mangana [11] 11
Slika 2.9 Utjecaj bakra na udio perlita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [11] 12
Slika 2.10 Utjecaj nodularnosti feritnog nodularnog lijeva na udarni rad loma [1] 14
Slika 2.11 Utjecaj broja nodula na udio ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva [14] 15
Slika 2.12 Utjecaj udjela perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću nodularnog lijeva [14] 15
Slika 2.13 Kupolna peć [16] 17
Slika 2.14 Indukcijska peć s dva lonca [16] 18
Slika 2.15 Kanalna indukcijska peć [9] 19
Slika 2.16 Postupak obrade primarne taline u otvorenom loncu [1] 20
Slika 3.1 Receptura materijala za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15 [17] 21
Slika 3.2 Uložni materijal [9] 22
Slika 3.3 Taljenje metalnog uloška [9] 22
Slika 3.4 Ručno čišćenje troske [9] 23
Slika 3.5 Uzimanje uzorka za toplinsku i kemijsku analizu [9] 23
Slika 3.6 Krivulja hlađenja taline nodularnog lijeva [19] 24
Slika 3.7 Ulijevanje primarne taline u lonac i reakcija s nodulatorom [9] 26
Slika 3.8 Ispitni uzorak za kemijsku analizu [9] 27
Slika 3.9. Uređaj za spektrogramsku analizu PolySpek [9] 27
Slika 3.10 Ispitni uzorci za ispitivanje [9] 29
Slika 3.11 Metalografska ispitivanja optičkim mikroskopom [9] 30
Slika 3.12 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, polirano stanje [9] 31
Slika 3.13 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, nagrizeno stanje [9] 31
Slika 3.14 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, polirano stanje [9] 32
Slika 3.15 Mikrostruktura uzorka nodularnog lijeva, nagrizeno stanje [9] 32

Slika 3.16 Oblik i dimenzije ispitnog uzoraka; Y-proba [1].....33
Slika 3.17 Oblik ispitnog uzorka – epruvete [1].....34
Slika 3.18 Kidalica marke “Wolperttestor U20“ [9].....35
Slika 3.19 Uređaj za mjerenje tvrdoće ispitnog uzorka [9].....37
Slika 3.20 Mjerenje promjera kalote [9].....38

Popis tablica

Tablica 2.1 Mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva prema normi HRN EN 1564 [1] 5
Tablica 2.2 Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom strojnom obradom [8] 7
Tablica 2.3 Utjecaj udjela elemenata rijetkih zemalja (RE) na broj nodula u nodularnom lijevu [1] 13
Tablica 3.1 Kemijski sastav potreban za kvalitetu taline HRN EN GJS 400-15 [17] 24
Tablica 3.2 Podaci dobiveni toplinskom analizom bazne taline [20] 25
Tablica 3.3. Podaci dobiveni toplinskom analizom nakon korekcije bazne taline [20] 25
Tablica 3.4 Analiza uzorka pomoću spektrometra PolySpek [20] 28
Tablica 3.5 Podaci dobiveni vizualnom analizom mikrostrukture [20] 30
Tablica 3.6 Dimenzije Y-probe prema normi HRN EN 1563 [1] 33
Tablica 3.7 Dimenzija ispitnih uzoraka - epruveta za vlačna ispitivanja [1] 34
Tablica 3.8 Rezultati ispitivanja vlačnim pokusom [20] 36
Tablica 3.9 Kriteriji prihvaćanja prema normi HRN EN 1563 [23] 36
Tablica 3.10 Prikaz tvrdoće ispitnih uzoraka [20] 38

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 GORIJUC *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROIZVODNJA I KARAKTERIZACIJA UDOVLAŽNOG LIJEVA KVALITETE HRN EN GJS 400-15 *(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 Gorjanc
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost 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 GORIJUC *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom PROIZVODNJA I KARAKTERIZACIJA UDOVLAŽNOG LIJEVA KVALITETE HRN EN GJS 400-15 *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Juraj Gorjanc
(vlastoručni potpis)