

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Šaban

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKIRAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Branko Bauer
Dr.sc. Ivana Mihalic Pokopec

Student:

Marko Šaban

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanjastečenatijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc. Branku Baueru i dr.sc. Ivani Mihalic Pokopec na stručnom vođenju, savjetima i strpljenju prilikom izrade ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem ljevaonici Ferro-Preis d.o.o. Čakovec na izradi kalupa, ljevaonici MIV d.d. Varaždin na lijevanju Y proba, laborantu Franji Babiću na izradi epruveta za statičko vlačno ispitivanje, laborantu Romanu Divjaku na izvođenju ispitivanja mehaničkih svojstava i laborantu Ivanu Vovku na pripremi uzoraka za metalografiju.

Na kraju, veliko hvala mojoj obitelji na podršci i strpljenju tijekom cijelog studija i djevojci Doris na podršci i razumijevanju tijekom izrade ovog rada.

Marko Šaban



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 7-01-2019	Prilog:
Klasa: 602-G4/19-G/3	
Ur. broj: 15-1703-19-35	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: MARKO ŠABAN Mat. br.: 0035179061

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu i mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva s povećanim sadržajem silicija

Naslov rada na engleskom jeziku: Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of high silicon ductile iron castings

Opis zadatka:

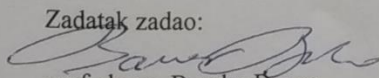
Nodularni lijev je željezni lijev kod kojeg je ugljik izlučen u obliku kuglica grafita - nodula. Svojstva nodularnog lijeva ovise o kemijskom sastavu te rasporedu, veličini, količini i obliku grafitnih nodula u strukturi feritne, feritno/perlitne ili perlitne matrice. Sadržaj silicija u nodularnom lijevu kreće se od 2% do 3%. Veći sadržaj silicija rezultira povećanjem čvrstoće jer dolazi do očvršćivanja ferita.

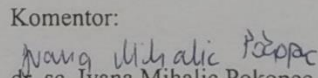
U radu je potrebno proučiti tehnologiju lijevanja nodularnog lijeva. U eksperimentalnom dijelu potrebno je odlići Y probe od nodularnog lijeva EN-GJS-400-15 sa 3,5% Si. Različite debljine stijenke Y probe 25 mm, 50 mm i 75 mm rezultirati će različitim brzinama hlađenja tijekom skrućivanja. Potrebno je provesti metalografska ispitivanja, statičko vlačno ispitivanje i ispitivanje tvrdoće na pripremljenim uzorcima te analizirati rezultate. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

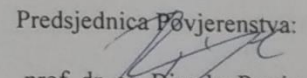
Zadatak zadan:
15. studenog 2018.

Rok predaje rada:
17. siječnja 2019.

Predvideni datum obrane:
23. siječnja 2018.
24. siječnja 2019.
25. siječnja 2019.

Zadatak zdao:

prof. dr. sc. Branko Bauer

Komentor:

dr. sc. Ivana Mihalic Pokopec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. NODULARNI LIJEV	3
2.1 Općenito o nodularnom lijevu.....	3
2.2 Nodularni lijev s povišenim udjelom silicija	6
2.3 Klasifikacija nodularnog lijeva	7
2.4 Skrućivanje nodularnog lijeva	9
2.5 Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva.	13
2.5.1 Utjecaj stalnih elemenata	14
2.5.2 Utjecaj legirajućih elemenata.....	19
2.5.3 Utjecaj pratećih elemenata.....	21
2.5.4. Utjecaj nodularnosti grafita [2].....	23
2.5.5. Utjecaj broja i veličine nodula	24
3. EKSPERIMENTALNI DIO	26
3.1 Izrada kalupa	27
3.2 Proizvodnja taljevine nodularnog lijeva	28
3.2.1 Cijepljenje	30
3.3 Lijevanje u kalupe	31

3.4.	Jednostavna toplinska analiza	32
3.5	Analiza kemijskog sastava	33
3.6	Ispitivanje mehaničkih svojstava	35
3.7	Metalografska ispitivanja	37
3.7.1	Brušenje	39
3.7.2	Poliranje	40
3.7.3	Nagrizanje	42
4.	REZULTATI I RASPRAVA.....	43
4.1	Rezultati kemijska analize	43
4.2	Rezultati jednostavne toplinske analize	44
4.3	Rezultati mehaničkih ispitivanja	45
4.4.	Rezultati metalografske analize	50
5.	ZAKLJUČAK.....	55
	LITERATURA.....	57
	PRILOZI.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura nodularnog lijeva: a) feritna matrica b) perlitno-feritna matrica ...	3
Slika 2.	a) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu u 2005. godini, ..	5
Slika 3.	Odljevci od nodularnog lijeva [1]	6
Slika 4.	Odljevci od nodularnog lijeva [2]	8
Slika 5.	Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0 % C [2]	9
Slika 6.	Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si [2]	10
Slika 7.	Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja.	11
Slika 8.	Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva [2]	14
Slika 9.	Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog	15
Slika 10.	Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Sadržaj ugljika 3,0 do 3,3 %.....	16
Slika 11.	Utjecaj broja nodula/mm ² na nodularnost grafita [2].....	24
Slika 12.	Kalupi za lijevanje ispitnih uzoraka.....	27
Slika 13.	Sušenje kalupa	28
Slika 14.	Ispust primarne taljevine u lonac za obradu.....	29
Slika 15.	Sandwich postupak	30
Slika 16.	Prikaz cjepiva u loncu za obradu	31
Slika 17.	Kalupi nakon lijevanja	32
Slika 18.	Quik-cup [®] čašica za provođenje jednostavne toplinske analize	33
Slika 19.	Uzorak za određivanje kemijskog sastava	34
Slika 20.	Spektrometar ARL 3460	34
Slika 21.	Y probe, a) debljina stjenke 25 mm b) debljina stjenke 50 mm	35
Slika 22.	Epruvete za statičko vlačno ispitivanje	36
Slika 23.	Epruveta s glavnim veličinama za statičko vlačno ispitivanje.....	36
Slika 24.	Kidalica	37
Slika 25.	Uređaj za toplo ulijevanje uzorka	38

Slika 26.	Uzorci za metalografsko ispitivanje.....	39
Slika 27.	Stroj za brušenje.....	40
Slika 28.	Uređaj za poliranje	41
Slika 29.	Mikroskop Olympus GX 51.....	42
Slika 30.	Krivulja hlađenja nodularnog lijeva.....	44
Slika 31.	Izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće.....	46
Slika 32.	Izmjerene vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja	47
Slika 33.	Omjer konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće	47
Slika 34.	Izmjerene vrijednosti istežljivosti	48
Slika 35.	Mikrostruktura uzoraka u poliranom stanju.....	51
Slika 36.	Mikrostruktura uzoraka u nagriženom stanju	53

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Mehanička svojstva nodularnog lijeva prema normi (HRN EN 1563:1997) [8]..	8
Tablica 2.	Metalni zasip za proizvodnju primarne taljevine	28
Tablica 3.	Kemijski sastavi predlegura za obradu	30
Tablica 4.	Kemijski sastav cjepiva.....	31
Tablica 5.	Kemijski sastav primarne taljevine	43
Tablica 6.	Kemijski sastav nodularnog lijeva	43
Tablica 7.	Rezultati mehaničkih ispitivanja	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	istezljivost
ACEL	%	aktivni ekvivalent ugljika
CE	%	ekvivalent ugljika
d_0	mm	početni promjer ispitnog uzorka
d_1	mm	promjer glave epruvete za statičko vlačno ispitivanje
L_0	mm	početna mjerna duljina epruvete za statičko vlačno ispitivanje
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja
T_E	°C	temperatura eutektičkog skrućivanja
T_{EOIDP}	°C	temperatura eutektoidne pretvorbe
T_{EP}	°C	temperatura eutektičkog pothlađenja
T_{ER}	°C	temperatura eutektičke rekalescencije
T_{ES}	°C	temperatura početka eutektičkog skrućivanja
T_L	°C	likvidus temperatura
T_S	°C	solidus temperatura
Sc		stupanj zasićenja

GRČKE OZNAKE

γ austenit

POPIS KRATICA

Kratika	Značenje
ADI	izotermički poboljšani nodularni lijev
ATAS [®]	sustav za toplinsku analizu željeznih lijevova
GDOES	optička emisijska spektroskopija s tinjajućim izbojem

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj brzine hlađenja nodularnog lijeva kvalitete EN-GJS-400-15 s 3,5% silicija na mikrostrukturu i mehanička svojstva.

Teoretski dio ovog diplomskog rada daje uvid u mikrostrukturu nodularnog lijeva, kemijski sastav, prednosti i nedostatke nodularnog lijeva, klasifikaciju te njegovu primjenu. Poseban naglasak stavljen je na legure nodularnog lijeva s visokim sadržajem silicija jer je to nova grupa materijala koja ima sve veću primjenu. Također je opisano kako povećani sadržaj silicija djeluje na mikrostrukturu i mehanička svojstva nodularnog lijeva.

U eksperimentalnom dijeluproučena je tehnologija lijevanja nodularnog lijeva. Odlivene su Y probe različitih debljina stjenki (tip II i tip III) kako bi se utvrdilo kako brzina hlađenja utječe na morfologiju grafita i mehanička svojstva nodularnog lijeva s povišenim sadržajem silicija. U svrhu karakterizacije primarne i obrađene taljevine rađena je jednostavna toplinska analiza i kemijska analiza. Na pripremljenim uzorcima provedena je metalografska analiza svjetlosnim mikroskopom. Statičkim vlačnim ispitivanjem određena su sljedeća mehanička svojstva nodularnog lijeva s povišenim sadržajem silicija; vlačna čvrstoća, konvencionalna granica razvlačenja i istezljivost.

Na osnovi rezultata provedenih ispitivanja vidljivo je da povišeni udio silicija povećava omjer $R_{p0,2}/R_m$, vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja dok istezljivost pada. Sa smanjenjem brzine hlađenja došlo je i do smanjenja navedenih mehaničkih svojstava.

Ključne riječi: nodularni lijev, silicij, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

This thesis analyzes how cooling effect of ductile iron EN-GJS-400-15 with 3,5% silicon influence on microstructure and mechanical properties.

The theoretical part of this thesis provides insight into structure of ductile iron, chemical composition, advantages and disadvantages, classification and its application. Particular emphasis is on alloys of ductile iron with high silicon content because it is a new group of materials that is increasingly applied. The effects of high content of silicon on microstructure and mechanical properties are also described.

The experimental part gives overview on ductile iron casting. After casting Y blocks (type II and type III) the effect of the cooling rate on the graphite morphology and mechanical properties of ductile iron with high silicon content was analyzed. For the purpose of characterization primary and treated melt, simple thermal analysis and chemical analysis were performed. On the prepared samples, a metallographic analysis was performed with a light microscope. The static tensile test determines the following mechanical properties of ductile iron with high silicon content; tensile strength, yield strength and elongation.

On the basis of the results of the tests carried out, the content of high silicon increased $R_{p0,2}/R_m$ ratio, the tensile strength and yield strength while the elongation decreased. With the reduction of the cooling rate there was also a reduction of the this mechanical properties.

Key words: ductile iron, silicon, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se rastaljeni metal (taljevina) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Metal poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja. Tehnologija lijevanja jedan je od najstarijih i najdjelotvornijih načina oblikovanja proizvoda. Od svojih početaka konstantno se razvija (i tehnika i oprema) i danas je to visokorazvijena i uglavnom visokoautomatizirana tehnologija prisutna u svim granama industrije. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine je iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. Ona je često puta i jedina tehnologija za izradu vrlo složenih dijelova s unutarnjim šupljinama (npr. blokova motora i dr.), ili za velika i masivna kućišta strojeva. Tehnologijom lijevanja moguće je dijelove strojeva, koji bi se inače morali raditi iz više komada, odliti u jednom.

Glavni partneri ljevačke industrije su automobilska industrija (preko 50 % tržišta), strojarstvo (30 %) te konstrukcijski sektor (10 %). Sve veći trend u automobilskoj industriji prema smanjenju težine vozila uzrokovao je sve veću proizvodnju i proširenje tržišta za aluminijske i magnezijeve legure. Većina odljevaka od željeznih ljevova koristi se u automobilskoj industriji (oko 60 %), dok odljevci od čelika imaju glavnu primjenu u strojogradnji, konstrukcijama i proizvodnji vodovodne armature.

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg se ugljik izlučuje u obliku nodula grafita. Izlučivanjem grafita u obliku nodula postignuta je povoljna kombinacija svojstava: dobra mehanička svojstva, prije svega visoka vlačna čvrstoća i dobra žilavost, dobra livljivost i strojna obradivost. Upravo je ova kombinacija visoke čvrstoće i dobre žilavosti, koja je inače nekarakteristična za ostale vrste željeznih ljevova (sivi lijev, vermikularni lijev), proširila dosadašnju te omogućila novu primjenu željeznih ljevova. Nodularni lijev ima znatno veću vlačnu čvrstoću od sivog lijeva, ali mu je sposobnost prigušivanja vibracija i obradivost lošija od one koju ima sivi lijev. U odnosu na sivi lijev sa lističastim grafitom, nodularni lijev ima bolju otpornost na trošenje, koroziju i oksidaciju. Posebna prednost nodularnog lijeva, u odnosu na sivi lijev i nelegirane čelike, jest visina granice razvlačenja. Također, nodularni lijev pogodan je za zavarivanje.

Dobra mehanička svojstva nodularnog lijeva posljedica su povoljne mikrostrukture koja se postiže već u lijevanom stanju te odljevke najčešće nije potrebno naknadno toplinski obrađivati, čime su troškovi proizvodnje značajno smanjeni.

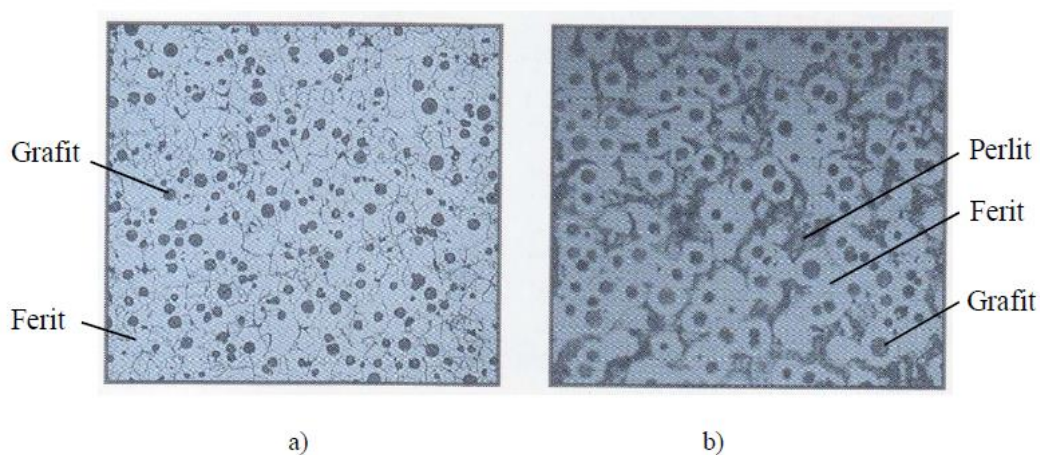
Naknadnim toplinskim i mehaničkim obradama ranije spomenuta svojstva odljevaka mogu se dodatno poboljšati. [1-4]

2. NODULARNI LIJEV

2.1 Općenito o nodularnom lijevu

Nodularni lijev je legura željeza, ugljika i silicija kod koje je ugljik izlučen u obliku grafitnih kuglica - nodula. Tipična mikrostruktura nodularnog lijeva sastoji se od perlitno-feritne metalne osnove i grafitnihodula. Da bi umjesto listićavog nastao nodularni grafit potrebna je obrada taljevine magnezijem (najčešće se koristi FeSiMg predlegura). Metalna matrica može biti čiste feritne, čiste perlitne ili kombinirane strukture. Legiranjem i/ili toplinskom obradom mogu se postići i druge strukture.

Na slici 1 prikazana je mikrostruktura nodularnog lijeva.



Slika 1. Mikrostruktura nodularnog lijeva: a) feritna matrica b) perlitno-feritna matrica [1]

Zbog specifičnoga kuglastog oblika grafita (nema više zareznog djelovanja grafitnih listića) postiže se povoljna kombinacija svojstava – visoka istezljivost i granica razvlačenja uz dobru žilavost. Još se naziva žilavi lijev. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na nivou vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva.

Vrijednosti vlačne čvrstoće nodularnog lijeva kreću se od 350 MPa do >1500 MPa, ovisno o legiranju i primijenjenoj toplinskoj obradi. Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev zamijenio je u mnogim aplikacijama sivi, čelični i temper lijev. Mehanička svojstva

usporediva su s mehaničkim svojstvima čeličnog lijeva, ali nodularni lijev ima manju gustoću od čeličnog lijeva (10 % manja masa). Sposobnost prigušenja vibracija je oko dva puta niža nego kod sivog lijeva s lističavim grafitom, ali je viša nego kod čelika. Mehanička i tribološka svojstva povisuju se klasičnim poboljšavanjem i površinskim kaljenjem ako su ispunjeni uvjeti kaljenja.

Nodularni lijev povoljnu mikrostrukturu postiže već u lijevanom stanju te odljevke najčešćenije potrebno naknadno toplinski obrađivati, čime su troškovi proizvodnje značajno smanjeni. Ako se zahtijeva otpornost trošenju rabi se nodularni lijev s perlitnom strukturom. Kad se zahtijeva žilavost potrebno je dobiti feritnu strukturu. Tvrdoća nodularnog lijeva podešava se udjelom perlita u strukturi, najčešće legiranjem s različitim udjelima bakra.

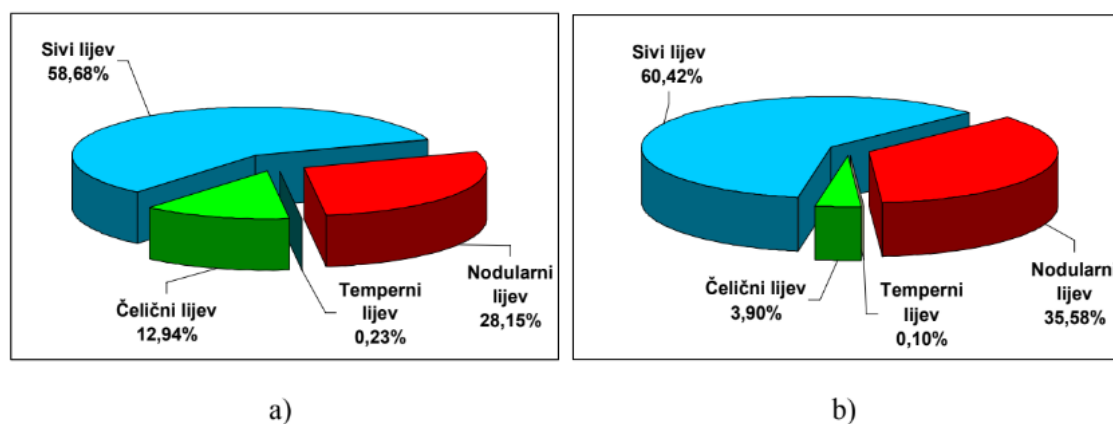
Vlačna čvrstoća nodularnog lijeva je u području od 350 N/mm^2 do 900 N/mm^2 . Ako se toplinskom obradom dobiva austenitno-feritna metalna matrica (ADI) vlačna čvrstoća postiževrijednosti od 800 N/mm^2 do 1400 N/mm^2 . Kemijski sastav nije propisan, već se prepušta proizvođaču. Kemijski sastav nodularnog lijeva razlikuje se od sastava sivog lijeva po tome što sadrži vrlo male količine magnezija (od 0,04 % do 0,08 %) ili cerija te ostale elemente rijetkih zemalja (La, Pr, Nd), koji se dodaju kako bi se grafit izlučio u obliku kuglica. [2,5,6]

Proizvodnja nodularnog lijeva u svijetu bilježi iz godine u godinu pozitivan trend rasta. Tijekom 2005. godine u svijetu je proizvedeno 19,6 milijuna tona nodularnog lijeva, što predstavlja 28,15 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova. Razlog za ovaj impresivni rast u odnosu na ostale materijale leži svakako u njegovim svojstvima te u najnižim troškovima po jedinici čvrstoće u odnosu na konkurentne materijale.

Vodeće zemlje u proizvodnji ljevova na bazi željeza, s količinama od 40 kg do 50 kg lijeva po stanovniku, su Slovenija, Njemačka, Tajvan i Češka. Za njima su Rusija, Francuska, Koreja, Japan i SAD, s 36 kg – 38 kg/stanovniku/godini. Prosječna je proizvodnja željeznih ljevova 16,3 kg/stanovniku. Republika Hrvatska je daleko ispod prosjeka s godišnjom proizvodnjom od 8,7 kg/stanovniku.

U Republici Hrvatskoj je tijekom 2006. godine proizvedeno 18243 tona odljevaka od nodularnog lijeva, što je za 240 % više u odnosu na 1990. godinu. Udio odljevaka od nodularnog lijeva u ukupnoj količini proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova tijekom 2006. godine u Hrvatskoj iznosi 35,58 %.[2,5-7]

Na slici 2 grafički je prikazana struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu i Republici Hrvatskoj.



Slika 2. a) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu u 2005. godini, b) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u Hrvatskoj u 2006. godini [2]

Radi povoljnih mehaničkih svojstava, nodularni ljev se primjenjuje kao zamjena za čelični ljev i čelične otkovke srednje i veće masivnosti. Tipični odljevci od nodularnog lijeva su razne komponente cestovnih vozila, kao što su npr. upravljački zglobovi i čeljusti, koljenaste i bregaste osovine motora, košuljice cilindara motora i kompresora, ovjes; vodovodne cijevi te ostala vodovodna armatura, stapajice, zupčanici, poklopci kliznih ležaja pumpe i ventili kao i razni konstrukcijski dijelovi za poljoprivrednu, vojnu, rudarsku i željezničku industriju.[2,5]

Slika 3 prikazuje primjere odljevaka od nodularnog lijeva.



Slika 3. Odljevci od nodularnog lijeva[1]

2.2 Nodularni lijev s povišenim udjelom silicija

Nodularni lijev s povišenim sadržajem silicijanova je grupa materijala, koja se počela ozbiljnije istraživati 2012.godine. Udio ferita i perlita u metalnoj matrici značajno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Općenito, nodularni lijev s feritnom metalnom matricom ima niže vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja te više vrijednosti žilavosti i izduženja. Perlitna metalna matrica ima suprotna svojstva.

Kemijski sastav ima velik utjecaj na morfologiju grafita i strukturu metalne matrice, tako da i udio silicija ima veliki učinak. Poznato je da je silicij grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje ferita. Također, silicij je učinkovit element za očvršćivanje feritne faze. Uobičajeni sadržaji silicija u nodularnom lijevu kreću se od 2 % do 3 %. S daljnjim povećanjem sadržaja silicija dolazi do postupnog očvršćivanja ferita, tj. do porasta vlačne čvrstoće i granice razvlačenja.

Istraživanja su pokrenuta kako bi se poboljšala obradivost i dosegla jednaka ili veća mehanička svojstva kao feritno-perlitnog nodularnog lijeva. Povremeno su lijevaonice koristile

lijevove s nešto višim sadržajem silicija sa ciljem kako bi izbjeglo stvaranje karbida na tankostjenim odljercima, a ne radi postizanja povoljnijih mehaničkih svojstava.

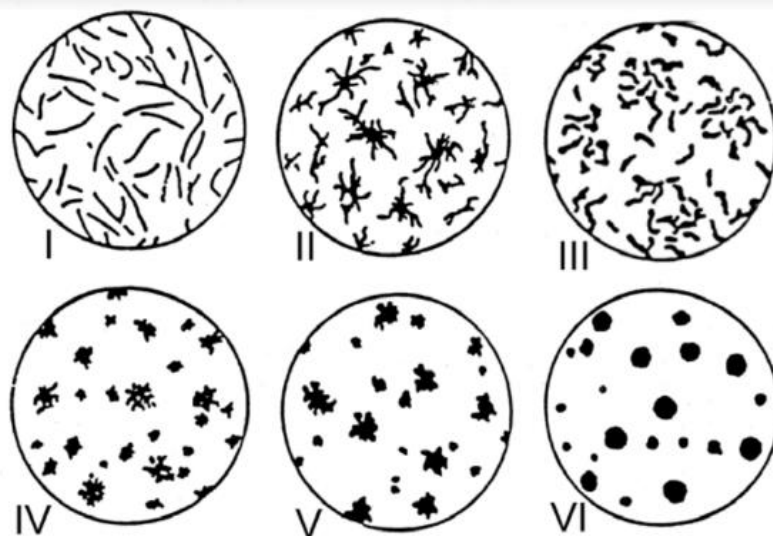
Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja nodularnog lijeva povećavaju se s povećanjem sadržaja silicija do 4,22 %, a zatim se smanjuju s daljnjim povećanjem udjela silicija zbog značajnog povećanja krhkosti ferita.

Istezljivost se kontinuirano smanjuje s povećanjem sadržaja silicija od 3,11 % do 5,42 % zbog smanjenja plastičnosti i povećanja krhkosti ferita. Uočljiv je značajan pad istežljivosti nakon povećanog udjela silicija od 3,8 %. Međutim, feritni nodularni lijev očvršćen silicijem ima veći omjer $R_{p0,2}/R_m$ i veću istežljivost od konvencionalnog feritnog, feritno-perlitnog i perlitnog nodularnog lijeva, pri istoj vrijednosti vlačne čvrstoće, što je vrlo povoljno svojstvo. Viša granica razvlačenja omogućuje smanjenje debljine stjenke odljevka. Još jedan od efekta povećanja sadržaja silicija je kontinuirano povećanje tvrdoće zbog očvršćenja ferita silicijem, odnosno dolazi do ujednačene tvrdoće što rezultira poboljšanom obradivošću. Međutim, istovremeno se povećava lomljivost, što znači da postoji gornja granica sadržaja silicija. Feritni nodularni lijevočvršćen silicijem ima jedinstvenu kombinaciju svojstava, tj. visoku vlačnu čvrstoću, visoku granicu razvlačenja, višu istežljivost, ujednačenu tvrdoću i dobru strojnu obradivost.[9,10, 13]

2.3 Klasifikacija nodularnog lijeva

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva čija je osnovna karakteristika izlučivanje grafita u tzv. nodularnom obliku sukladno HRN EN ISO 945:2002 („Željezni lijev - označavanje mikrostrukture grafita”). Prema ovoj normi nodularni grafit označava se kao oblik VI. Morfologija nodularnog grafita prikazana je na slici 4. Označavanje ovog materijala (GJS) temelji se na HRN EN 1560:1997 („Ljevarstvo - sustav označavanja željeznih ljevova”).

S obzirom da se postupak karakterizacije grafitnih elemenata kod željeznih ljevova temelji na vizualnom promatranju pripremljenih uzoraka koji se potom uspoređuju sa „standardnim” slikama, te se promatraju karakteristike grafitnih čvorova (oblik, dimenzija i raspodjela), što je iznimno važno za definirati mehanička svojstva željeznih ljevova.[2,16]



Slika 4. Odljevci od nodularnog lijeva [2]

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za nodularni lijev.

Tablica 1. prikazuje normom (HRN EN 1563:1997) propisana mehanička svojstva.

Tablica 1. Mehanička svojstva nodularnog lijeva prema normi (HRN EN 1563:1997) [8]

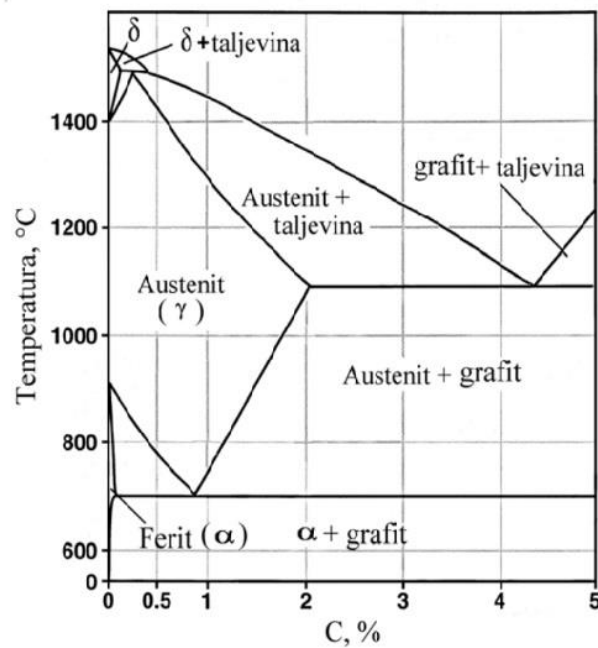
Označivanje materijala:		Vlačna čvrstoća, R_m , N/mm^2 , min.	Konv. granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, N/mm^2 , min.	Istezljivost, A , %, min.
Oznaka:	Broj:			
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	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 se ispituje na niskim temperaturama

²⁾ RT (engl. *room temperature*) – žilavost se ispituje na sobnoj temperaturi

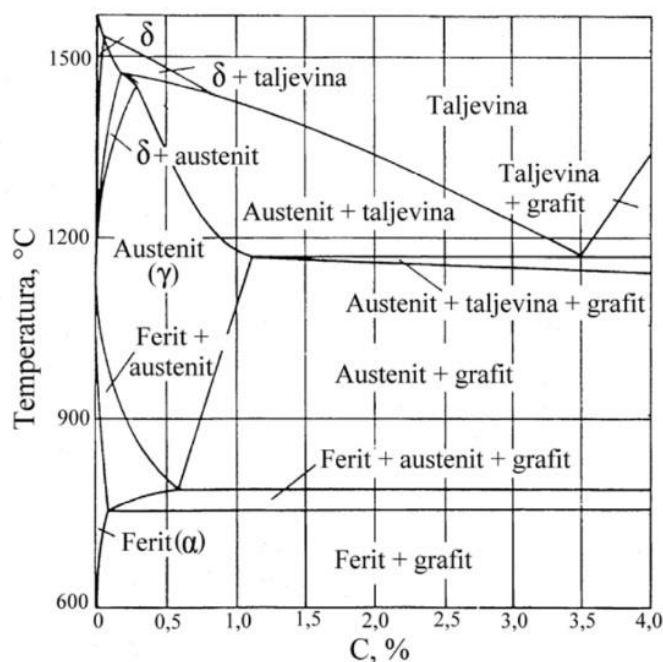
2.4 Skrućivanje nodularnog lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih lijevova s grafitom je ravnotežni Fe-C dijagram, slika 5. Nodularni lijev, kao i ostale željezne lijevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.



Slika 5. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C [2]

Od svih prisutnih elementa (osim ugljika) u nodularnom lijevu, silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 6.



Slika 6. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si [2]

Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1,0 % silicija snižava eutektički sastav za 0,31 % ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupanj zasićenja (Sc):

$$CE = \% C + \frac{\% S + \% P}{3} \quad (1)$$

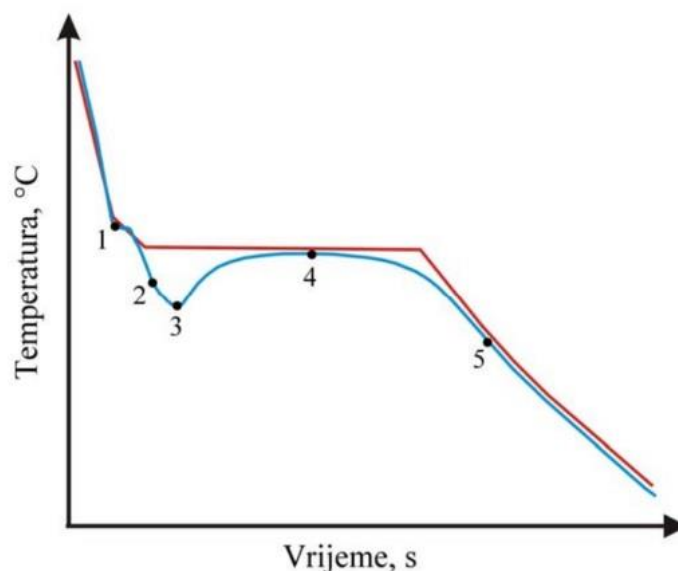
$$Sc = \frac{\% C}{4,26 - \frac{1}{3}(\% Si + \% P)} \quad (2)$$

Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3, govori se o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika $< 4,3$ radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika $> 4,3$ govorimo o nadeutektičkom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičkih sastava je primarni grafit (krupne i grube nodule).

Kada je $Sc = 1$ govori se o eutektičkom sastavu, Ukoliko je $Sc < 1$ govori se o podeutektičkom sastavu, a u slučaju $Sc > 1$ o nadeutektičkom sastavu.

Ugljik zajedno sa silicijem treba biti u sadržaju koji osigurava približan eutektički sastav lijeva (CE= 4,3 %). Prevelik sadržaj ugljika može uzrokovati isplivavanje kuglica grafita (flotaciju) kod debelostjenih odljevaka (iznad 50 mm). Kod tankostjenih odljevaka preporučuje se veći udio C jer se ne pojavljuje flotacija, a veći sadržaj ugljika poboljšava livljivost.[2,6]

Promjene tijekom skrućivanja mogu se pratiti snimanjem krivulja hlađenja, odnosno toplinskom analizom. Krivulja hlađenja prikazuje promjenu temperature s vremenom tijekom skrućivanja. Na slici 7 prikazana je idealna (crvena linija) i stvarna (plava linija) krivulja hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva.



Slika 7. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva [2]

Kad se taljevina nodularnog lijeva ulije u kalup, ona se kontinuirano hladi sve dok se ne dostigne likvidus temperatura T_L (točka 1, slika 7), kad nukleira primarni austenit, koji tijekom daljeg hlađenja raste u dendritnom obliku. Veličina dendrita određena je ekvivalentom ugljika, stupnjem zasićenja i brzinom skrućivanja. Niži ekvivalent ugljika rezultira većim dendritima, što je povezano sa širim intervalom skrućivanja. Bržim hlađenjem promovira se stvaranje finijih (sitnijih) dendrita. Tijekom izlučivanja primarnog austenita višak ugljika odbacuje se u taljevinu.

Preostala taljevina nastavlja s kontinuiranim hlađenjem sve do dostizanja temperature početka eutektičkog skrućivanja T_{ES} (točka 2), gdje između dendritnih grana u taljevini obogaćenoj ugljikom započinje nukleacija grafitu i stvaranje eutektika. Kod temperature T_{ES} u taljevini je dostignut eutektički sadržaj ugljika od 4,3 %. Dakle, po dostizanju eutektičke koncentracije odvija se pretvorba preostale taljevine u dvije krutine – jedna je eutektički austenit, a druga grafit. Umjesto grafitu može nastati karbid Fe_3C , što ovisi o uvjetima pri skrućivanju. Karbidi imaju štetan utjecaj na svojstva i potrebno je izbjeći njihovo stvaranje.

Kod temperature T_{ES} neće se taljevina u potpunosti transformirati u dvije krute faze zbog nedostatka centara nukleacije, tj. klica u taljevini. Zbog toga temperatura taljevine nastavlja s padom (područje na krivulji hlađenja između točaka 2 i 3) sve dok broj centara s kojih se pojavljuje rast eutektika i brzina rasta ne budu takvi da toplina oslobođena skrućivanjem eutektika (latentna toplina ili entalpija skrućivanja) ne prijeđe brzinu (intenzitet) odvođenja topline od strane kalupa (točka 3 – temperatura eutektičkog pothlađenja (T_{EP})). U biti govori se o pothlađenju taljevine, koje predstavlja pokretačku silu nukleacije. Kod točke 3 prestaje pothlađenje i zbog povoljnih nukleacijskih uvjeta odvija se razdvojeni rast eutektika austenit-nodularni grafit. Razdvojeni rast grafitu i austenita posljedica je različitih mehanizama rasta.

Tijekom skrućivanja globule austenit-nodularni grafit povezuju se međusobno te s dendritima austenita. U ovakvom nasumičnom rasporedu, pojedinačne grupe globula austenit-nodularni grafit međusobno su odvojene taljevinom. Ove grupe nazivaju se eutektičke ćelije. Kako skrućivanje napreduje, taljevina se osiromašuje ugljikom.

Budući da se eutektičko skrućivanje odvija u temperaturnom intervalu, s napredovanjem skrućivanja mijenja se sastav nastalog austenita i taljevine. Elementi prisutni u taljevini koji segregiraju pozitivno (u taljevinu) koncentriraju se tijekom skrućivanja u interćelijastim područjima koja posljednja skrućuju. Obzirom da toplina oslobođena tijekom skrućivanja eutektika premašuje toplinu odvedenu od strane kalupa, dolazi do povišenja temperature pri skrućivanju (područje od točke 3 do točke 4). Ovaj fenomen poznat je pod nazivom rekalescencija. Točka 4 označava se kao temperatura eutektičke rekalescencije (T_{ER}).

Kako se eutektičko skrućivanje bliži završetku, postepeno se smanjuje oslobađanje entalpije skrućivanja i ponovo dolazi do pada temperature (područje između točaka 4 i 5). Eutektičko skrućivanje završava pri temperaturi solidusa T_S (točka 5).

Skrućivanje nodularnog lijeva nadeutektičkog sastava odvija se na identičan način s razlikom da je prva faza koja se izlučuje grafit u nodularnom obliku. Kada se sadržaj ugljika u taljevini i temperatura dovoljno snize, preostala taljevina skrućuje u obliku eutektičkih ćelija. [2,5,6]

2.5 Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva

Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu. Prema kemijskom sastavu, nodularni lijev je visokouglični lijev na bazi željeza, kod kojega se ugljik izlučuje u obliku kuglica grafita. Približni sastav nodularnog lijeva je[2,5]:

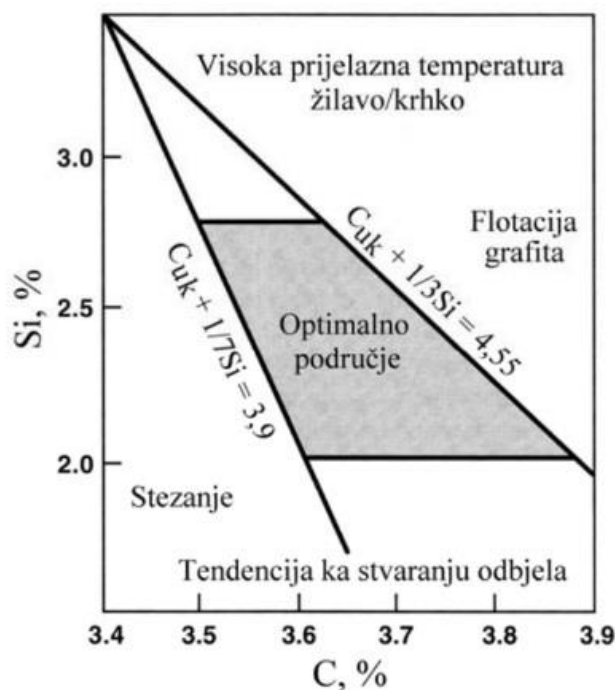
- 3,2 do 3,8 %C,
- 2,4 do 2,8 %Si,
- < 0,5 %Mn,
- < 0,04 5%P,
- < 0,01 %S,
- 0,03 % do 0,04 %Mg.

Elementi se mogu klasificirati i po učincima na mikrostrukturu [14]:

- osnovni elementi: C, Si, Mn, S, P,
- sferoidizacijski elementi: Mg, RE,
- elementi za stvaranje matrice: Cu, Sn,
- legirni elementi: Ni, Mo,
- karbidotvorci: Cr, V, B, Mo, Te.

2.5.1 Utjecaj stalnih elemenata

Optimalni sadržaj ugljika i silicija može se odrediti iz Handersonovog dijagrama, slika 8.



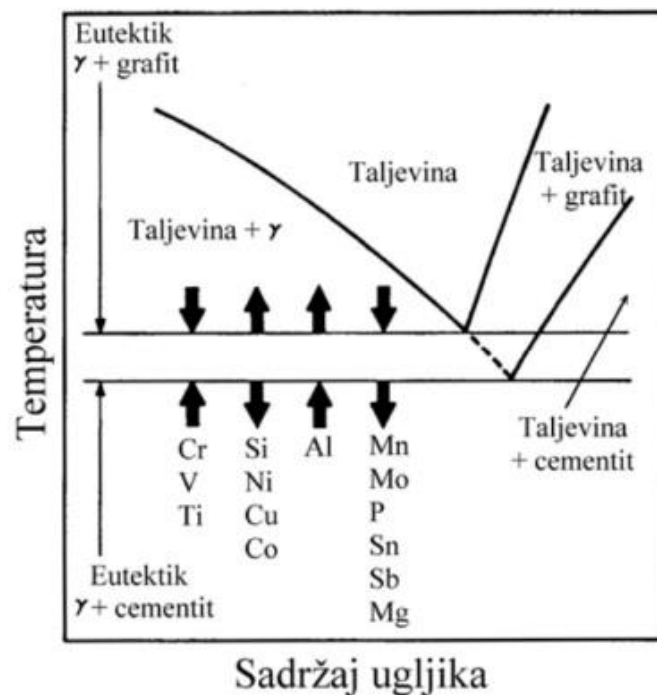
Slika 8. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva [2]

Iz dijagrama na slici 8 može se zaključiti da se optimalni sadržaj **ugljika** kreće u granicama od 3,5 % do 3,9 %, ovisno o sadržaju silicija. Više vrijednosti sadržaja ugljika preferiraju se za tanje stjenke, a niže vrijednosti za deblje stjenke. Kombinacija visokih vrijednosti sadržaja ugljika, tj. ekvivalenta ugljika i niskih brzina hlađenja (debele stjenke) može rezultirati flotacijom (isplivavanjem na površinu) i degeneracijom nodula, što ima negativan učinak na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Kod tankih stjenki ne postoji opasnost od flotacije, zbog čega se preferiraju više vrijednosti ekvivalenta ugljika u cilju izbjegavanja stvaranja karbida. Visoke vrijednosti sadržaja ugljika povećavaju ekspanziju tijekom skrućivanja. U većini slučajeva nodularni lijev ima sastav blizu eutektičkog.

Silicij smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida. Kao i ostali grafitizatori, tijekom skrućivanja segregira u krutu fazu

tepodize temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C). Kod iste kvalitete nodularnog lijeva, viši sadržaji silicija preporučuju se kod lijevanja tankostjenih odljevaka, da bi se smanjila mogućnost stvaranja karbida.

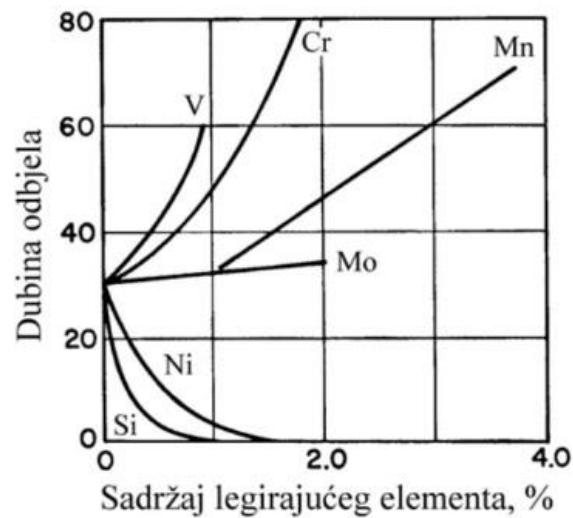
Na slici 9 prikazan je utjecaj kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ + grafit) i metastabilnog (γ + cementit) eutektika



Slika 9. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ + grafit) i metastabilnog (γ + cementit) eutektika [2]

Grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja odbjela - cementita). Karbidotvorci (npr. krom, vanadij itd.) djeluju suprotno.

Slika 10 prikazuje utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela sa sadržajem ugljika od 3,0 % do 3,3 % .



Slika 10. Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Sadržaj ugljika 3,0 do 3,3 % [2]

Povećanje sadržaja silicija u lijevanim feritnim nodularnim ljevovima pokazalo je značajne učinke na skrućivanje (postepena stabilizacija ferita) i na dobivenu morfologiju grafita. Dodatkom silicija proširuje se i pomiče trofazno područje ka višim temperaturama, jer silicij podiže temperaturu. Zbog toga, za danu brzinu hlađenja, na raspolaganju stoji više vremena za difuziju ugljika, što u konačnici potpomože (promovira) stvaranje ferita. S porastom udjela ferita povećava se žilavost i izduženje nodularnog lijeva, a smanjuje vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Sadržaj silicija iznad potrebnog za stvaranje pretežno feritne metalne osnove rezultira smanjenjem žilavosti i izduženja te porastom čvrstoće i tvrdoće feritnog nodularnog lijeva. Nodularni ljev s višim udjelom silicija uz već navedene prednosti pokazuje veću otpornost na umor materijala. [2,10,13]

Zbog promoviranja stvaranja ferita, u proizvodnji perlitnog nodularnog lijeva sadržaj silicija treba biti < 2,0 %.

Međutim, nodularni ljev s feritnom matricom s višim udjelom silicija ima viši omjer $R_{p0,2}/R_m$ i veću istezljivost od konvencionalnih feritnih, feritno-perlitnih i perlitnih nodularnih lijevova na istoj razini vlačne čvrstoće. Veća granica razvlačenja omogućuje smanjenje debljine stijenke odljevka. Rezultat povećanja sadržaja silicija je kontinuirano povećanje tvrdoće zbog očvršćenja ferita silicijom. [2,9,12]

Mangan promovira stvaranje perlita i karbida jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C), ali i metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) (slika 9). Mangan proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature T_T . Stabilizira austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu. Brzina stvaranja ferita je sporija kod nižih temperatura jer se sa sniženjem temperature smanjuje brzina difuzije ugljika. Time se uspostavlja povišen sadržaj ugljika u austenitu i promovira stvaranje perlita. Prisustvo karbida u mikrostrukтури utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, izduženja i udarne žilavosti. U cilju izbjegavanja stvaranja karbida, potrebno je sadržaj mangana održavati što nižim (0,1 % – 0,2 %). Može se tolerirati sadržaj Mn do 0,4 %, bez gubitka čvrstoće i duktilnosti, što povoljno utječe na troškove lijevanja. [2,10]

Dopušteni sadržaj mangana određen je sadržajem silicija i debljinom stijenke odljevka. U tankim stijenkama (do 30 mm) sklonost mangana ka stvaranju karbida može se izbalansirati porastom sadržaja silicija. Međutim, kod debelostjenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati sadržajem silicija jer mangan preferirano segregira u taljevinu koja zadnja skrućuje (potiskuje se ispred fronta kristalizacije). Pri tome dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna.

Sumpor snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe₃C) eutektika, zbog čega doprinosi stvaranju odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan, sprječava grafitizaciju.

Obzirom da se nodularni lijev proizvodi obradom primarne taljevine predlegurama na bazi magnezija i da magnezij ima visok afinitet prema sumporu, očito je da se sadržaj sumpora mora održavati niskim.

Reakcijama magnezija sa sumporom smanjuje se raspoloživ sadržaj magnezija za modifikaciju oblika grafita, što može rezultirati nastankom vermikularnog, listićavog i degeneriranih oblika grafita. Prisutnost ovih oblika grafita u mikrostrukтури nodularnog lijeva negativno se odražava na njegova mehanička svojstva.

Preniski sadržaji sumpora (<0,005 %) također nisu poželjni jer čestice magnezijeva sulfida predstavljaju mjesta za nukleaciju grafita. Primarna taljevina s niskim sadržajem sumpora imati slab „odziv“ na nodularizaciju i cijepljenje u pogledu broja grafitnih nodula i nastanka karbida. Optimalni sadržaj sumpora kreće se od 0,008 % do 0,015 %.

Fosfor je nepoželjan element u nodularnom lijevu jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim ($< 0,02\%$). Kao i u sivom lijevu, stvara nisko topivi fosfidni eutektik (Fe_3P) koji je poznat pod nazivom steadit. Točka taljenja fosfidnog eutektika je niska i iznosi $\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$. Tijekom skrućivanja segregira po granicama eutektičkih ćelija kao tvrda i krhka faza.

Kod većih sadržaja fosfora stvara se mreža fosfidnog eutektika po granicama eutektičkih ćelija. U tom slučaju, u tankim stjenkama, granice ćelija sadrže dvostruko više fosfora od prosječnog sadržaja, dok u debelim stjenkama ($> 25,0\text{ mm}$) čak i do 10 puta više od prosječnog sadržaja. To rezultira velikim padom čvrstoće, duktilnosti i udarne žilavosti, odnosno udarnog rada loma.

Fosfor snižava likvidus temperaturu te temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) eutektika. Pored stvaranja fosfidnog eutektika, fosfor stabilizira perlit. Udio perlita u mikrostrukturi nodularnog lijeva raste s porastom sadržaja fosfora.

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, najčešće se provodi obradom primarne taljevine predlegurom čiji je glavni sastojak magnezij. **Magnezij** dodan uprimarnu taljevinu najprije dezoksidira (MgO) i odsumporava (MgS) taljevinu. Na taj način se smanjuje sadržaj magnezija raspoloživog za modifikaciju oblika grafita.

Ukoliko je sadržaj sumpora i kisika u taljevini nizak, tada je već rezidualni magnezij od $0,018\%$ dovoljan za formiranje potpuno nodularne strukture grafita. Ciljani sadržaj rezidualnog magnezija u praksi kreće se od $0,035\%$ do $0,045\%$.

Ostvareni rezidualni sadržaj magnezija ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Nizak rezidualni sadržaj magnezija rezultira nedovoljnom modifikacijom grafita (opasnost od stvaranja vermikularnog i listićavog grafita), odnosno smanjenom nodularnosti i brojem grafitnih nodula. U konačnici to se odražava na pad svih mehaničkih svojstava nodularnog lijeva.

Ako je rezidualni magnezij previsok ($>0,06\%$) postoji velika opasnost od stvaranja karbida, poroznosti i troske. Ovaj rizik pojačava se s porastom brzine skrućivanja i smanjenjem broja nodula. Zbog toga je potrebno primijeniti adekvatno cijepljenje taljevine.

Omjer Mg:S važan je za održavanje nodularnosti u nodularnom lijevu. Poželjno je da ovaj odnos bude iznad 3:0. [2]

2.5.2 Utjecaj legirajućih elemenata

Bakar je grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida. Pri skrućivanju segregira na površinu grafitnih nodula i djeluju kao difuzijska barijera za ugljik. Na taj način onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit, što rezultira stvaranjem perlita. Premda je maksimalna topivost bakra u nodularnom lijevu ~ 2,5 %, obično se ograničava na ~ 1,5 % da bi se izbjegao njegov utjecaj na nodularnost. Već sadržaj od 0,82 % je dovoljan da bi se ostvarila potpuno perlitna mikrostruktura. U feritnom nodularnom lijevu sadržaj bakra treba biti što je moguće niži.

U odnosu na mangan, bakar je od 5 do 10 puta efikasniji u stvaranju perlita i ne postoji opasnost od nastanka karbida kao u slučaju dodatka mangana. Zbog promoviranja stvaranja perlita, bakar povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva te podiže prijelaznu temperaturu žilavo/krhko.

Kositar je snažan promotor perlita. Mehanizam djelovanja je identičan kao kod bakra. U odnosu na bakar, kositar je približno 10 puta efikasniji u stvaranju perlita. Zbog toga sadržaji od 0,03 % do 0,08 %, što ovisi o debljini stjenke, već su dovoljni da se ostvari potpuno perlitna mikrostruktura.

Sadržaj kositra >0,1 % nije poželjan jer nastali sloj oko grafitnih nodula, koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik, postaje relativno debeo i krhak, što ima negativan učinak na mehanička svojstva.

Kositar otežava grafitizaciju, ali ne promovira stvaranje karbida. Snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika, te kao i bakar, segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija).

Budući da pospješuje stvaranje perlita, kositar povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva.

Molibden povišuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću na sobnoj i visokim temperaturama, granicu razvlačenja te otpornost na lom, puzanje i toplinski umor nodularnog lijeva. Negativno utječe na izduženje i udarnu žilavost. Negativna strana molibdena je sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma.

Molibden snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje. Ne promovira stvaranje perlita već ga samo usitnjava (povećanje čvrstoće).

Nikal podiže temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C). Prema tome, nikal, kao i silicij, proširuje interval između navedenih temperatura i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela i nastanku karbida. Snižava eutektoidnu temperaturu i blago promovira stvaranje perlita. Pri skrućivanju segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija).

Nikal je grafitizirajući element koji povišuje prokaljivost (dodatak od 0,5 % do 4,0 %), poboljšava svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama, poboljšava vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva s niskim sadržajem silicija, te pospješuje stvaranje austenitne metalne osnove. U feritnom nodularnom lijevu povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću bez štetnog utjecaja na udarnu žilavost. Zbog toga se primjenjuje kao supstitucija za silicij u onim kvalitetama gdje se zahtijeva visoka čvrstoća i udarna žilavost.

Krom ima visoku sklonost ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju) jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povišuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C). Kao i ostali karbidotvorci, tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje.

Čak se i dugotrajnim žarenjem na visokim temperaturama teško mogu u potpunosti ukloniti ovi karbidi. Zbog toga njegov sadržaj u nodularnom lijevu treba biti što niži. Sklonost ka nastajanju karbida pospješuje se u prisustvu mangana. To zahtijeva još niže sadržaje kroma, ako je prisutan povišen sadržaj mangana.

Prokaljivost, tvrdoća i otpornost na trošenje nodularnog lijeva može se poboljšati legiranjem kromom.

Vanadij povišuje prokaljivost i ima visoku sklonost ka stvaranju interčelijastih karbida i odbjela, jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povišuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) te slabo perlitizirajuće djelovanje.

Kod uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva sadržaj vanadija potrebno je održavati štoje moguće nižim zbog visoke sklonosti ka stvaranju karbida. S povećanjem brzine hlađenja raste opasnost od stvaranja karbida.[2]

2.5.3 Utjecaj pratećih elemenata

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, može se postići obradom taljevine cerijem. Kao i magnezij, **cerij** je snažan dezoksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija, cerij nije lako ispariv (točka isparavanja iznosi 2406 °C). Cerij dodan u taljevinu neće uzrokovati snažne i burne reakcije te nastajanje dima karakterističnog za obradu taljevine magnezijem. Nadalje, cerij stvara mnogo stabilnije okside i sulfide, zbog čega postoji daleko manja sklonost ka odgoru i stvaranju troske.

Cerij je jak promotor karbida, zbog čega primarna taljevina mora imati visok sadržaj ugljika (>3,8 %), a zahtijeva se i primjena adekvatnog cijepjenja. Nodularni lijev proizveden obradom primarne taljevine cerijem mnogo je osjetljiviji na debljinu stjenke i u tankostjenim odljevcima teško je postići lijevanu strukturu bez karbida.

Prekomjerni sadržaj cerija u tankostjenim ili debelostjenim odljevcima od nodularnog lijeva treba svakako izbjeći zbog niza štetnih djelovanja. U tankostjenim odljevcima postoji opasnost stvaranja karbida, dok u debelostjenim postoji povećana opasnost flotacije grafita, pojave degeniranih oblika grafita i to posebno u toplinskom centru debelih stjenki odljevka nastajanje chunky grafita.

Lantan se preferira više od cerija u FeSiMg predlegurama za obradu. Obradom taljevine predlegurom koja u sebi ima čisti lantan umjesto uobičajene smjese rijetkih zemalja rezultira u konačnici superiornijim svojstvima nodularnog lijeva (veći broj nodula, viša nodularnost,

manji udio perlita, manji odbjel) i bez naknadnog cijepjenja u odnosu na nodularni lijev proizveden obradom taljevine predlegurom koja u sebi sadrži čisti cerij.

Bor je jedan od najsnažnijih karbidotvornih elemenata. Karbidi bora su stabilni i ne mogu se ukloniti žarenjem. Već pri sadržaju od 0,002 % može doći do stvaranja interčelijastih karbida i značajnog pada mehaničkih svojstava. Npr. pri sadržaju bora od 0,01 % izduženje može sesmanjiti s 14,0 % na 1,0 %.

Postoji niz elementa koji već s minimalnim sadržajima otežavaju stvaranje grafitnih nodula, a samim tim utječu i na pad mehaničkih svojstava nodularnog lijeva. To su: aluminij, antimon, arsen, bizmut, kadmij, olovo i titan. Ovi elementi su snažni površinsko aktivni elementi koji se nastoje koncentrirati na graničnoj površini grafit/taljevina i grafit/kruta faza, zbog čega imaju značajan utjecaj na morfologiju grafita. Često se nazivaju antinodularizatori.

Maksimalni sadržaj aluminijskog u nodularnom lijevu trebao bi biti <0,03 % jer pospješuje stvaranje listićavog i vermikularnog grafita te utječe na nastanak mikroporoznosti. Primjenom FeSiMg predlegure za obradu koja sadrži cerij može se neutralizirati štetno djelovanje aluminijskog.

Antimon iznad 0,004 % onemogućuje stvaranje nodularnog grafita, posebno u debelostjenim odljevcima. Cerij efikasno sprječava štetno djelovanje antimona, dok je antimon efikasan u sprječavanju sklonosti cerija ka stvaranju chunky grafita u debelim stjenkama. Antimon spada u grupu elemenata koji snažno promoviraju stvaranje perlita. Legure s visokim silicijom sadrže krupni grafit u količini koja se može smanjiti dodavanjem antimona. Za sadržaj silicija do 4 %, zrnasti grafit značajno utječe i na udarni rad loma i istežljivost. [2,11]

Bizmut već kod vrlo niskih koncentracija pospješuje stvaranje listićavog grafita. Negativan utjecaj bizmuta može se spriječiti upotrebom predlegure za obradu FeSiMg koja sadrži cerij. Međutim, dodatkom bizmuta u vrlo malim koncentracijama (0,005 % – 0,01 %) može se značajno povisiti broj nodula/mm², jer bizmut snažno promovira nukleaciju grafita. Prekomjerni dodatci bizmuta imaju negativan učinak na broj nodula/mm². Veći broj grafitnih nodula utječe pozitivno na proizvodnju tankostjenih odljevaka, zbog smanjenja mogućnosti za

nastanak karbida. Zbog toga, bizmut je često sastavni dio cjepiva gdje je njegov sadržaj izbalansiran dodatkom rijetkih zemalja.

Kadmij potiče stvaranje listićavog grafita, zbog čega se njegov sadržaj u nodularnom lijevu ograničava na $<0,002$ %. Štetno djelovanje kadmija može se spriječiti primjenom predlegure za obradu FeSiMg koja sadrži cerij.

Olovo već pri sadržaju od $0,002$ % može rezultirati nastankom listićavog grafita. Ovaj efekt izraženiji je u debljim stjenkama. Primjenom predlegure FeSiMg koja sadrži cerij može se spriječiti štetno djelovanje olova.

Titan pospješuje stvaranja vermikularnog grafita i sužava područje između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Negativan utjecaj titana izraženiji je u debljim stjenkama. Zbog štetnog djelovanja, sadržaj titana trebao bi biti $<0,035$ %. [2]

2.5.4. Utjecaj nodularnosti grafita [2]

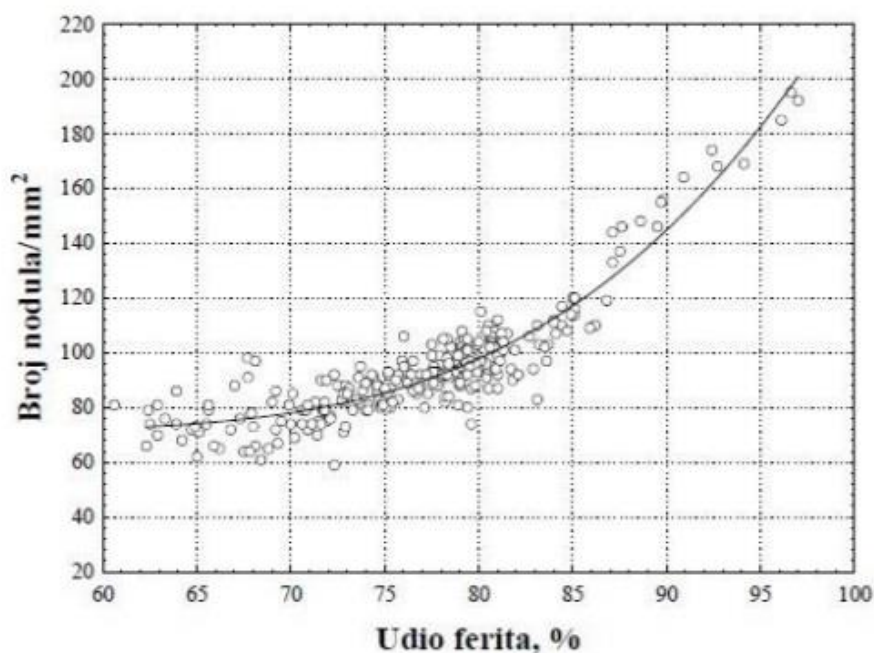
Nodularnost i morfologija nesferičnih čestica ima značajan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Sa smanjenjem nodularnosti grafita opada vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i udarna žilavost nodularnog lijeva. Što je grafitna čestica bliže savršenom krugu (kugli) to ona za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukтури, odnosno manje utječe na slabljenje metalne osnove.

To u konačnici rezultira višim vrijednostima mehaničkih svojstava. Očito je da nastanak nodula slabe sferičnosti, vermikularnog, te eventualno degeneriranih oblika grafita utječe na sniženje udarne žilavosti nodularnog lijeva.

2.5.5. Utjecaj broja i veličine nodula

Broj grafitnih nodula (izražen kao broj grafitnih nodula/mm²) ima značajan utjecaj na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi, a samim time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Povećanje broja nodula rezultira većim udjelom ferita u mikrostrukturi (slika 12), jer se skraćuju putevi difuzije ugljika iz austenita pri eutektoidnoj pretvorbi. Ovaj utjecaj broja nodula na udio ferita ne treba shvatiti jednoznačno. Naime, u tankim stjenkama, gdje su prisutne velike brzine hlađenja, prisutan je veliki broj manjih nodula, ali i povišeni udio perlita, velike brzine hlađenja otežavaju difuziju ugljika na nodule, što rezultira višim udjelom austenita s visokim sadržajem ugljika na eutektoidnoj temperaturi, odnosno višim udjelom perlita nakon eutektoidne pretvorbe.

Slika 11 prikazuje utjecaj broja nodula /mm² na nodularnost grafita



Slika 11. Utjecaj broja nodula/mm² na nodularnost grafita [2]

Povećanje broja nodula utječe na smanjenje njihove veličine, što poboljšava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, udarnu žilavost i otpornost na umor. Cijepljenjem taljevine povećava se broj grafitnih nodula i poboljšava nodularnost. Prema tome, veliki broj nodula povezan je s

poboljšanjem nodularnosti. Za svaki presjek odljevka, odnosno debljinu stijenke postoji optimalno područje broja nodula. Odstupanje od tog područja može rezultirati smanjenjem mehaničkih svojstava. Potrebno je obratiti pažnju na nukleacijski potencijal i cijepljenje taljevine.

Broj nodula direktno je proporcionalan brzini hlađenja i obrnuto proporcionalan sadržaju degeneriranog grafita. Prema tome, kada je postignut visok broj nodula, sadržaj degeneriranih oblika grafita značajno je smanjena ili je potpuno eliminirana. [2, 15]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj različite brzine hlađenja na morfologiju grafita i mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva s povišenim sadržajem silicija. Kao ispitna taljevina korišten je nodularni lijev kvalitete EN-GJS-400-15 s 3,5 % Si. Radi mogućnosti ispitivanja različitih brzina hlađenja lijevane su Y probe tipa II (debljine stjenke 25 mm) te Y probe tipa III (debljine stjenke 50 mm). Iz odlivenih Y proba uzeti su uzorci za metalografsku analizu te uzorci za statičko vlačno ispitivanje.

Eksperimentalni dio rada rađen je u tri faze. U prvoj fazi napravljeni su kalupi za lijevanje Y proba, po dva kalupa za Y probu tipa II (debljine stjenke 25 mm) i dva kalupa za Y probu tipa III (debljine stjenke 50 mm). Kalupi su izrađeni No bake postupkom –postupkom sa hladnim samoočvršćivanjem.

Druga faza istraživanja uključivala je lijevanje ispitnih uzoraka, Y proba. Tijekom druge faze proizvedena je primarna taljevina za proizvodnju nodularnog lijeva. Nakon korekcije kemijskog sastava primarne taljevine, provedena je nodulacija u loncu za obradu pomoću FeSiMg predlegure sa cerijem. Istovremeno s nodulacijom provedeno je i cijepljenje taljevine u loncu za obradu. Za nodulaciju i cijepljenje korišten je Sandwich postupak. Tijekom ove faze napravljena je jednostavna toplinska analiza pomoću sustava ATAS® radi korekcije sadržaja silicija i ugljika u primarnoj taljevini te radi dobivanja uvida u tijek skrućivanja primarne i obrađene taljevine. U svrhu karakterizacije primarne taljevine te taljevine nodularnog lijeva provedena je kemijska analiza optičkom emisijskom spektroskopijom s tinjajućim izbojem (GDOES).

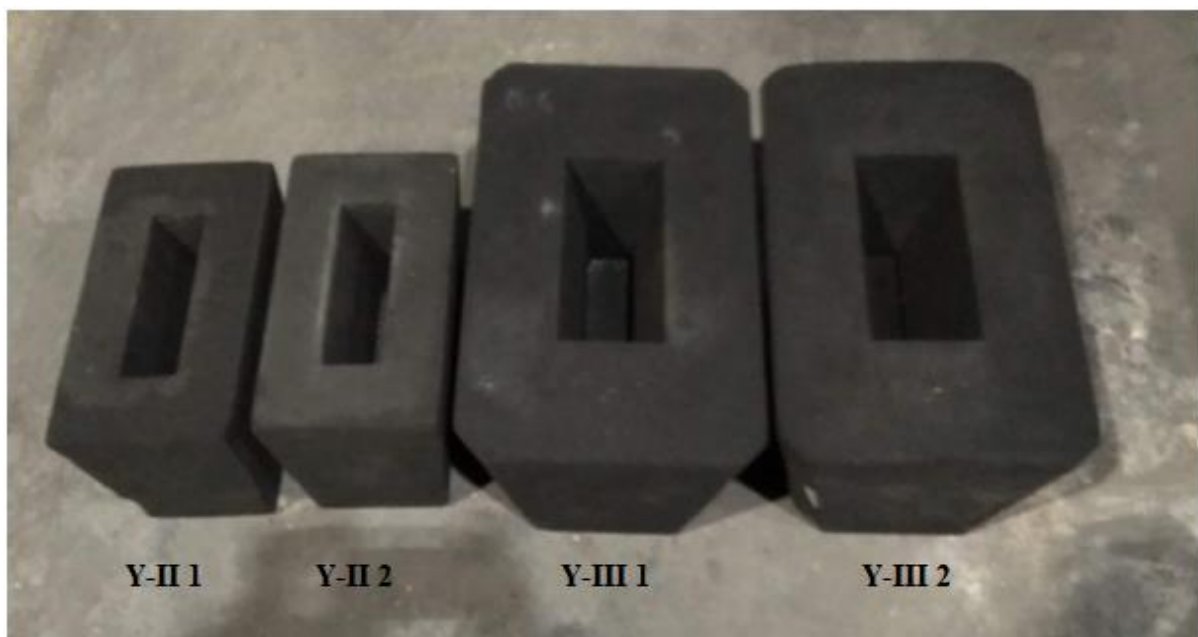
Tijekom treće faze ispitivanja, koja se odvijala u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, provedena su laboratorijska ispitivanja na pripremljenim uzorcima te su analizirani dobiveni rezultati. Laboratorijska ispitivanja uključivala su:

- statičko vlačno ispitivanje,
- metalografska ispitivanja.

3.1 Izrada kalupa

Kalupi za lijevanje navedenih Y-probi izrađeni su u tvrtki Ferro-preis d.o.o. Kalupi su izrađeni No bake postupkom. Kalupna mješavina za ovaj postupak sastojala se od suhog kvarcnog pijeska, dok je kao vezivo korištena furanska smola i katalizator radi ubrzavanja samoočvršćivanja.

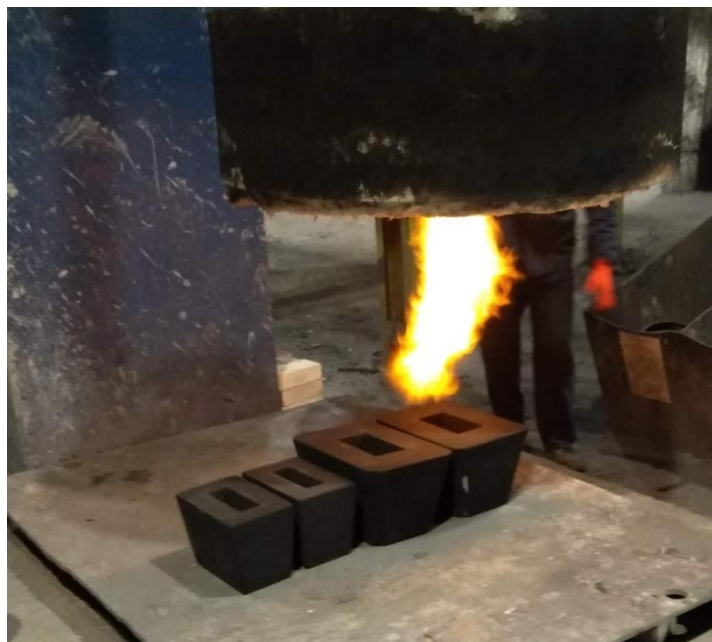
Na slici 12 prikazani su kalupi za Y probe, od toga su dva kalupa za Y-II probu (25 mm) i dva za Y-III probu (50 mm).



Slika 12. Kalupi za lijevanje ispitnih uzoraka

Uz kalupe, dana je i uputa da se kalupi prije lijevanja trebaju posušiti zbog isparavanja kondenzata, hladnoće itd. Sušenje kalupa trajalo je 60 minuta.

Slika 13 prikazuje sušenje kalupa.



Slika 13. Sušenje kalupa

3.2 Proizvodnja taljevine nodularnog lijeva

Proizvodnja taljevine nodularnog lijeva provedena je u ljevaonici MIV d.d. Varaždin. Primarna taljevina za proizvodnju nodularnog lijeva proizvedena je u srednjefrekventnoj indukcijskoj peći kapaciteta 5,7 t. U tablici 2 prikazan je sastav metalnog zasipa.

Tablica 2. Metalni zasip za proizvodnju primarne taljevine

Ukupna masa	Sorelmetal®	Čelični lim	Povrat	FeSi	Karburit
5,7 t	70%	9%	21%	0,20%	0,10%

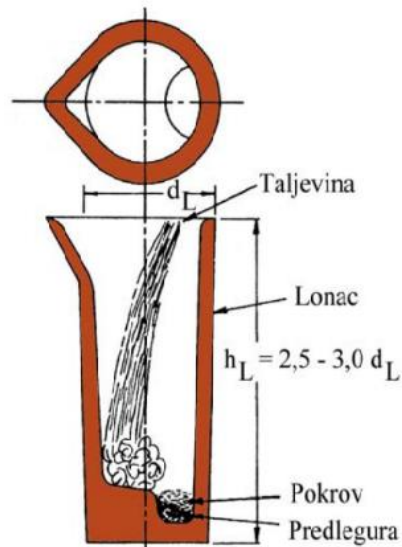
S obzirom da je početno u primarnoj taljevini sadržaj silicija bio 0,8 %, naknadno se u peć dodalo još 120 kg FeSi (na 2 t taljevine), kako bi se sadržaj silicija povisio na ciljanih 2,6 %. Potom se ispitni uzorak od novonastale taljevine slao na kemijsku analizu, nakon koje je utvrđen kemijski sastav, sadržaj silicija iznosio je 2,64 %.

Zatim je taljevina izlivena iz peći u lonac za obradu kapaciteta 420 kg. Korišten je Sandwich postupak, odnosno postupak obrade u otvorenom loncu, slika 14.



Slika 14. Ispust primarne taljevine u lonac za obradu

Obrada taljevine napravljena je pri temperaturi od 1480 °C do 1500 °C. Prije ulijevanja, u džep na dnu predgrijanog lonca smješteno je 1,8 % FeSiMg predlegure (nodulator) i prekriveno s 0,5 % pokrovne predlegure (predcijepljenje). U lonac je također bilo smješteno 0,2 % cjepiva sa cerijem. Sandwich postupak prikazan je na slici 15.



Slika 15. Sandwich postupak

Tablica 3 prikazuje kemijski sastavi predlegura za obradu.

Tablica 3. Kemijski sastavi predlegura za obradu

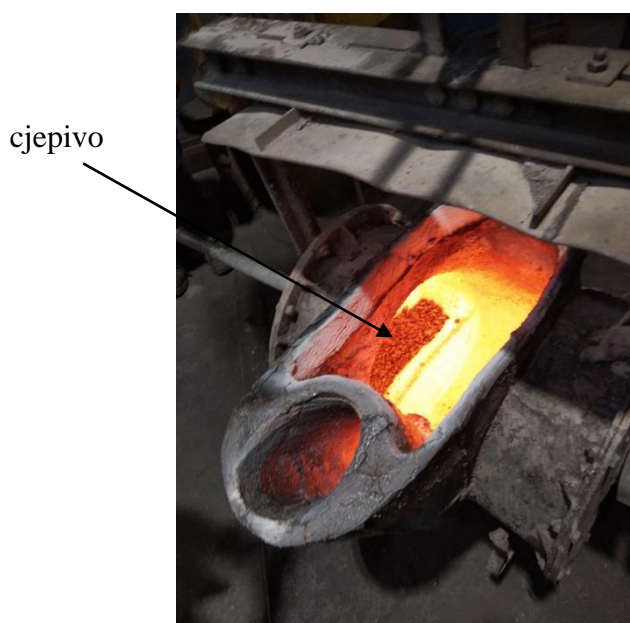
Predlegura	Kemijski sastav, %						
	Si	Mg	Ba	Ca	Al	RE	Fe
nodulator	44-48	3,5-3,8	-	0,9-1,1	0,5-1,2	0,6.0,8	ostatak
pokrov (predcjepivo)	46-50	-	1,8-2,2	0,4-0,6	0,5-1,0	-	ostatak

3.2.1 Cijepljenje

Cijepljenje u lonac napravljeno je u Sandwich loncu, gdje je cjepivo stavljeno na dno lonca, slika 16. Kemijski sastav cjepiva prikazan je u tablici 4.

Tablica 4. Kemijski sastav cjepiva

Kemijski sastav, %				
Si	Ce	Al	O i S	Fe
70-76	1,5-2,0	0,75-1,25	> 1	ostatak



Slika 16. Prikaz cjepiva u loncu za obradu

3.3 Lijevanje u kalupe

Lijevanje je rađeno pri temperaturi od 1380 °C. Svi kalupi lijevani su iz istog lonca.

Slika 17 prikazuje kalupe nakon lijevanja.



Slika 17. Kalupi nakon lijevanja

3.4. Jednostavna toplinska analiza

Jednostavna toplinska analiza, odnosno snimanje krivulja hlađenja provedeno je pomoću sustava za toplinsku analizu ATAS[®] u ljevaonici MIV d.d. Varaždin.

Postupak se provodi ulijevanjem taljevine u Quik-cup[®] čašicu koja je preko računala povezana sa sučeljem ATAS[®]. Jednostavna toplinska analiza provedena je radi karakterizacije primarne taljevine i taljevine nodularnog lijeva. U ovom istraživanju jednostavna toplinska analiza provedena je radi određivanja sadržaja ugljika i silicija u primarnoj taljevini kako bi se provela korekcija kemijskog sastava, ukoliko je potrebna, te radi dobivanja uvida u tijek skrućivanja primarne i obrađene taljevine. Slika 18 prikazuje Quik-cup[®] čašicu.



Slika 18. Quik-cup® čašica za provođenje jednostavne toplinske analize

3.5 Analiza kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava napravljena je u Laboratoriju ljevaonice MIV d.d. Varaždin. Kemijski sastav taljevine određen je pomoću optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem (GDOES) na uređaju ARL 3460. Kemijski sastav određen je za primarne i nodulirane taljevine uzimanjem uzorka iz peći, odnosno lonca nakon obrade. Uzorak za određivanje kemijskog sastava lijevan je u bakrenu kokilu promjera približno 50 mm i debljine približno 3 mm, slika 19. Bakrena kokila koristila se radi bržeg odvođenja topline.



Slika 19. Uzorak za određivanje kemijskog sastava

Na slici 20 prikazan je uređaj za analizu kemijskog sastava.



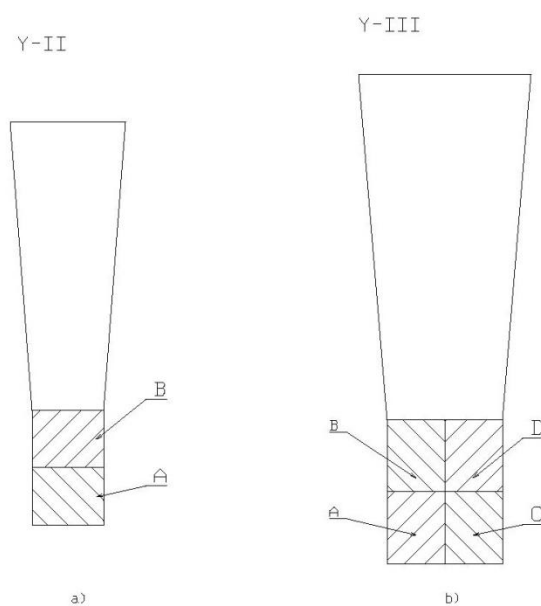
Slika 20. Spektrometar ARL 3460

3.6 Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva ispitnih uzoraka određena su statičkim vlačnim ispitivanjem. Za ovo ispitivanje izrađene su epruvete sukladno normi EN 1563:2012.

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Zagreb. Korištena je univerzalna kladalica EU 40mod proizvođača WMP. Određena su sljedeća mehanička svojstva: R_m , $R_{p0,2}$ i A_5 .

Epruvete su izrađene strojnom obradom iz Y probi. Iz Y-II probe uzetesu po dvije epruvete iz svake probe, a iz Y-III probe uzete su po četiri epruvete iz svake probe. Mjesta uzimanja epruveta iz Y probi prikazana su na slici 21.



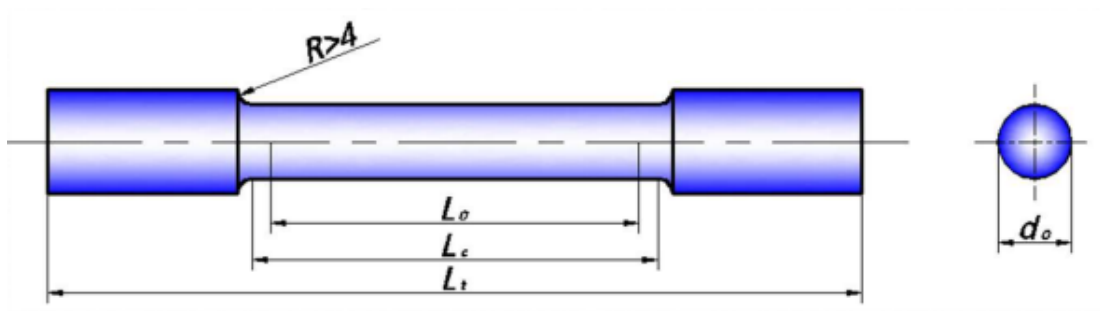
Slika 21. Y probe, a) debljina stijenke 25 mm b) debljina stijenke 50 mm

Šrafirana područja na slici 21 su odrezana i potom strojno obrađena. Slika 22 prikazuje gotove epruvete.



Slika 22. Epruvete za statičko vlačno ispitivanje

Na slici 23 prikazana je epruveta s glavnim veličinama koje karakteriziraju dimenzije epruvete.



Slika 23. Epruveta s glavnim veličinama za statičko vlačno ispitivanje

Dimenzije epruvete su:

- $d_0 = 12 \text{ mm}$,
- $L_0 = 60 \text{ mm}$,
- $L_c = 70 \text{ mm}$,
- $L_t = 160 \text{ mm}$,
- R6,
- navoj M16.

Slika 24 prikazuje kidalicu EU 40mod proizvođača WMP na kojoj su ispitane epruvete.



Slika 24. Kidalica

3.7 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja svjetlosnim mikroskopom rađena su u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Pripremljena su 4 uzorka, po dva iz Y-II probe i dva iz Y-III probe. Uzorci su uzimani na mjestima gdje su uzimani uzorci za statičko vlačno ispitivanje, slika 13 i slika 21.

Uzorci koji su ispitivani:

- Y-II 2A,
- Y-II 2B,
- Y-III 2A,
- Y-III 2B.

Uzorci su dimenzija $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Da bi se pripremio uzorak, on se zalijeva polimernom masom. Priprema uzorka provodi se u uređaju za toplo ulijevanje prikazanom na slici 25.



Slika 25. Uređaj za toplo ulijevanje uzorka

Na slici 26su prikazani uzorci u polimernoj masi.



Slika 26. Uzorci za metalografsko ispitivanje

Postupci pripreme uzorka za metalografsko ispitivanje su:

- brušenje,
- poliranje,
- nagrivanje.

3.7.1 Brušenje

Brušenje uzoraka rađeno je na stroju Phoenix Alpha - grinder/polisher proizvođača Buehler, slika 27, a odvijalo se u 5 faza, odnosno koristilo se pet brusnih papira sa različitim granulacijama. Nakon svake izmjene papira, uzorci su zakretani za 90° radi uklanjanja tragova prethodnog brušenja. Brušenje je rađeno pri 300 okr/min, a kao sredstvo za hlađenje korištena je voda.



Slika 27. Stroj za brušenje

Korišteni su vodootporni brusni papiri s brusnim zrnima od silicijevog karbida, sljedećih granulacija:

- P 320,
- P 500,
- P 1000,
- P 2400,
- P 4000.

Između svakog brušenja uzorak je bio ispiran vodom i potom osušen.

3.7.2 Poliranje

Poliranje uzoraka provodi se na uređaju Struers DAP-V prikazanom na slici 28.



Slika 28. Uređaj za poliranje

Za poliranje je korištena tkanina MD-DAC, a postupak se odvijao pri brzini 150 okr/min. Kao sredstvo za hlađenje koristio se lubrikant.

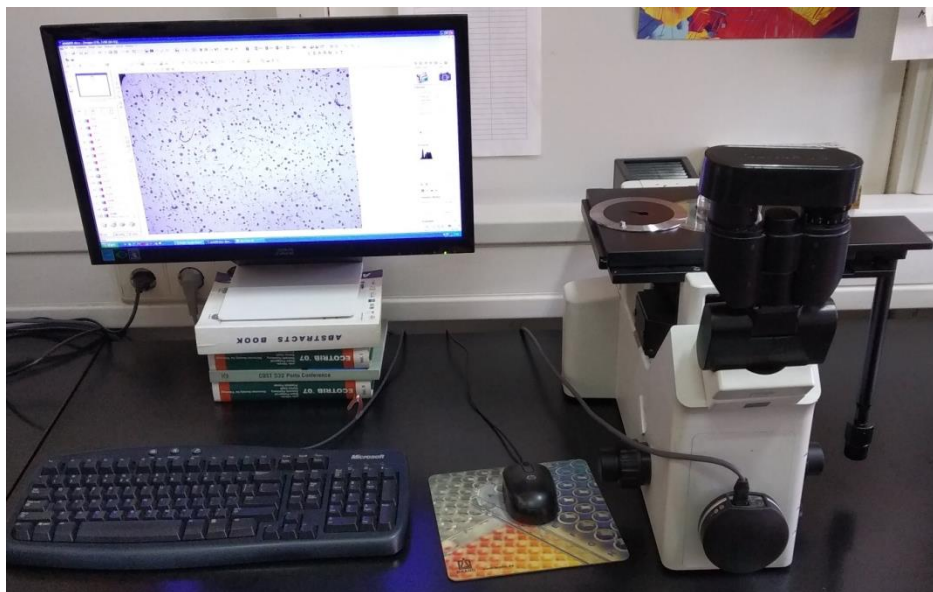
Postupak se odvijao u dvije faze:

- poliranje dijamantom pastom granulacije 3 μm u trajanju od 3 min, sila pritiska iznosila je 30 N,
- poliranje dijamantom pastom granulacije 1 μm u trajanju od 2 min, sila pritiska iznosila je 25 N.

3.7.3 Nagrizanje

Završna faza u pripremi uzorka je njegovo nagrizanje kako bi se vidjela mikrostruktura ,tj.prisutne faze. Nagrizanje je napravljeno u 3%-tnoj otopini Nitala i to utrajanju od dvije sekunde.

Na pripremljenim uzorcima provedena je analiza mikrostrukture.Pri ovoj analizi korišten je mikroskop Olympus GX 51, slika 29, opremljen videokamerom Olympus DP 25 i programskim paketom za analizu slike ImageJ.



Slika 29. Mikroskop Olympus GX 51

Mikrostruktura je snimana pri povećanjima od 50x, 100x, 200x i 500x na nenagrizenim uzorcima, a potom se isti postupak s istim uvećanjima proveo i na nagrizenim uzorcima.Ispitivanje na nenagrizenim uzorcima zorno je prikazalo oblik izlučenog grafita, dok je snimanje nagrizenih uzoraka prikazalo granice zrna.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1 Rezultati kemijska analize

Rezultati kemijske analize primarnih taljevina nakon povišenja sadržaja silicija dani su u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav primarne taljevine

Maseni udio, %								
C*	Si	Cu	Mg	Mn	Mo	P	S	ACEL*
3,88	2,64	0,0385	0,0006	0,1906	0,0022	0,03	0,015	4,33

Napomena: C* i ACEL* određeni su jednostavnom toplinskom analizom provedenom pomoću sustava za analizu ATAS®.

U tablici 6 dani su rezultati kemijske analize obrađene taljevine (nakon nodulacije i cijepljenja).

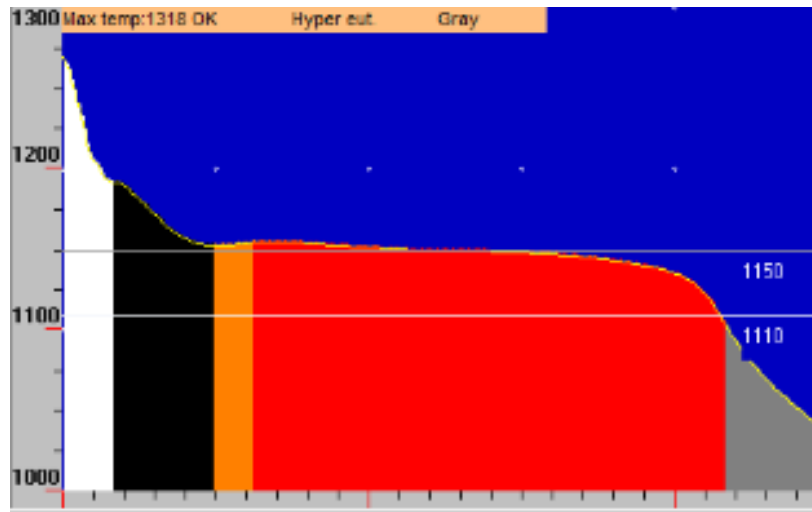
Tablica 6. Kemijski sastav nodularnog lijeva

Maseni udio, %								
C	Si	Cu	Mg	Mn	Mo	P	S	ACEL*
3,145	3,43	0,0367	0,0379	0,1919	0,0015	0,03	0,014	4,3

Iz tablice 6 može se vidjeti da je sadržaj silicija nešto niži od zadanih 3,5 % i iznosi 3,43 %. Prema vrijednosti ACEL može se vidjeti da se radi o taljevini nadeutektičkog sastava. Ostali elementi su u dopuštenim granicama.

4.2 Rezultati jednostavne toplinske analize

Na slici 30 prikazana je krivulja hlađenja taljevine nodularnog lijeva.



Slika 30. Krivulja hlađenja nodularnog lijeva

Za ovu taljevinu temperatura likvidusa iznosi 1192 °C, a temperatura solidusa 1102 °C. Pošto je taljevina nadeutektičkog sastava prvo se izlučuje primarni grafit, a onda pri dostizanju temperature eutektičkog skrućivanja i eutektik. Jednostavna toplinska analiza dala je sadržaje ugljika, silicija i ACEL pomoću čega je podešena primarna taljevina.

Na slici 28 vidi se da krivulja hlađenja ne ulazi u područje metastabilnog skrućivanja tako da u mikrostrukturi nema karbida.

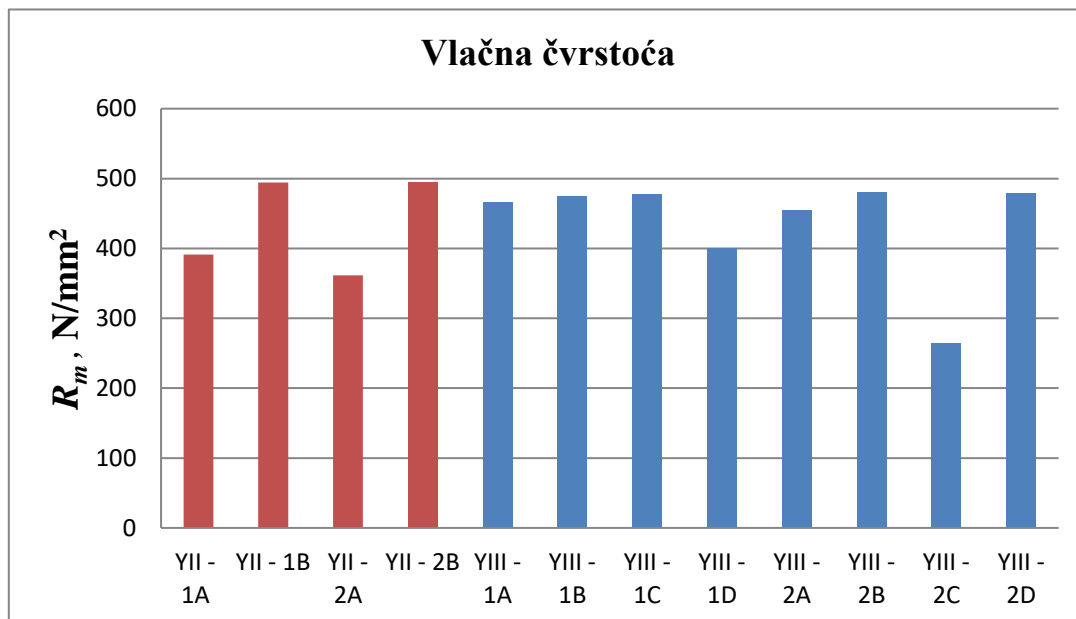
4.3 Rezultati mehaničkih ispitivanja

Dobiveni rezultati mehaničkog ispitivanja prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati mehaničkih ispitivanja

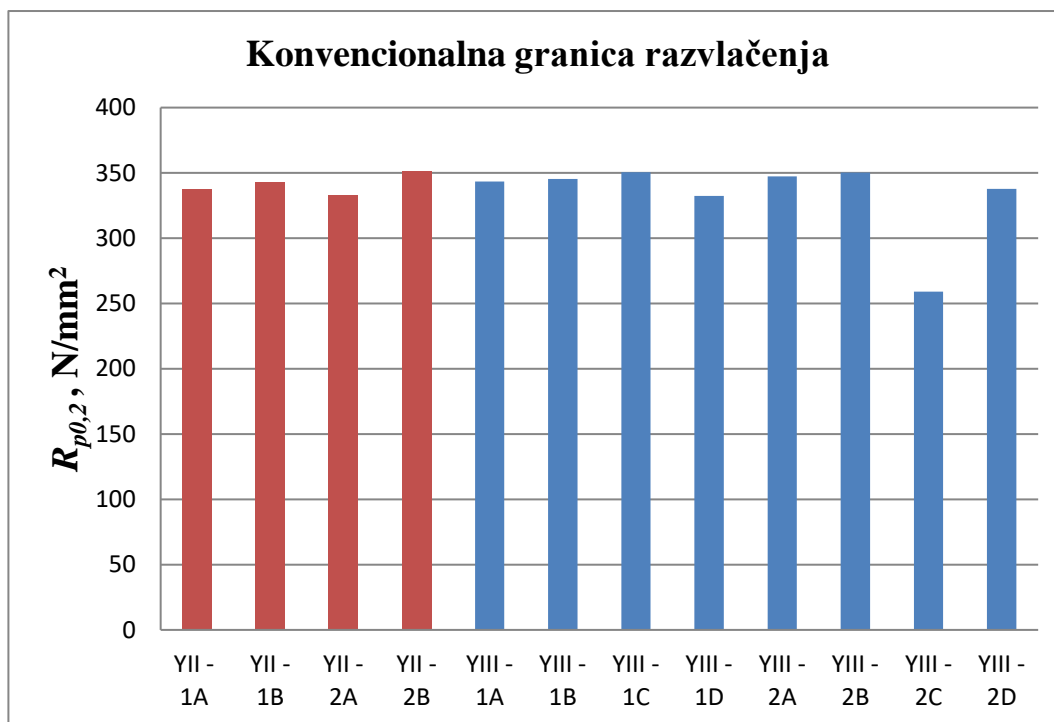
Redni broj	Oznaka uzorka	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	$R_{p0,2}/R_m$	A_5 %	Napomena
1.	YII - 1A	391,36	337,23	0,8617	-	Lom izvan L ₀
2.	YII - 1B	494,35	342,42	0,6927	17,42	
3.	YII - 2A	361,25	332,65	0,9208	3,5	
4.	YII - 2B	493,97	351,4	0,7114	15,47	
5.	YIII - 1A	465,58	343,37	0,7375	9,17	
6.	YIII - 1B	474,19	345,45	0,7285	10,92	
7.	YIII - 1C	476,93	350,53	0,7350	10,17	
8.	YIII - 1D	400,64	332,27	0,8293	3,75	
9.	YIII - 2A	455,04	347,21	0,7630	-	Lom izvan L ₀
10.	YIII - 2B	479,59	350,24	0,7303	9,83	
11.	YIII - 2C	263,85	259,14	0,9821	1,17	
12.	YIII - 2D	478,08	337,65	0,7063	10,33	

Slika 31 prikazuje izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće.



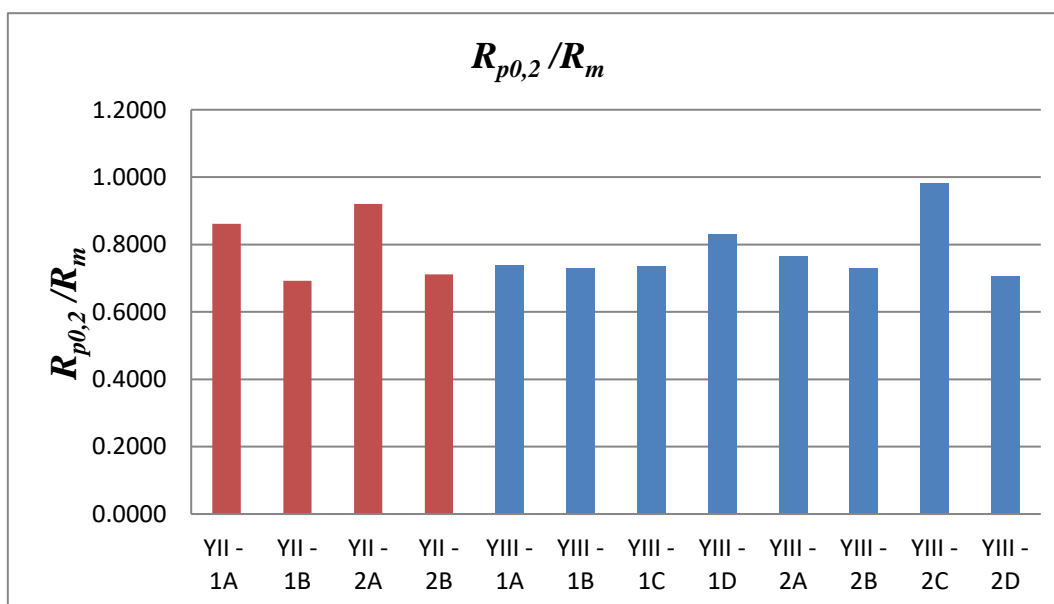
Slika 31. Izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće

Slika 32 prikazuje izmjerene vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja.



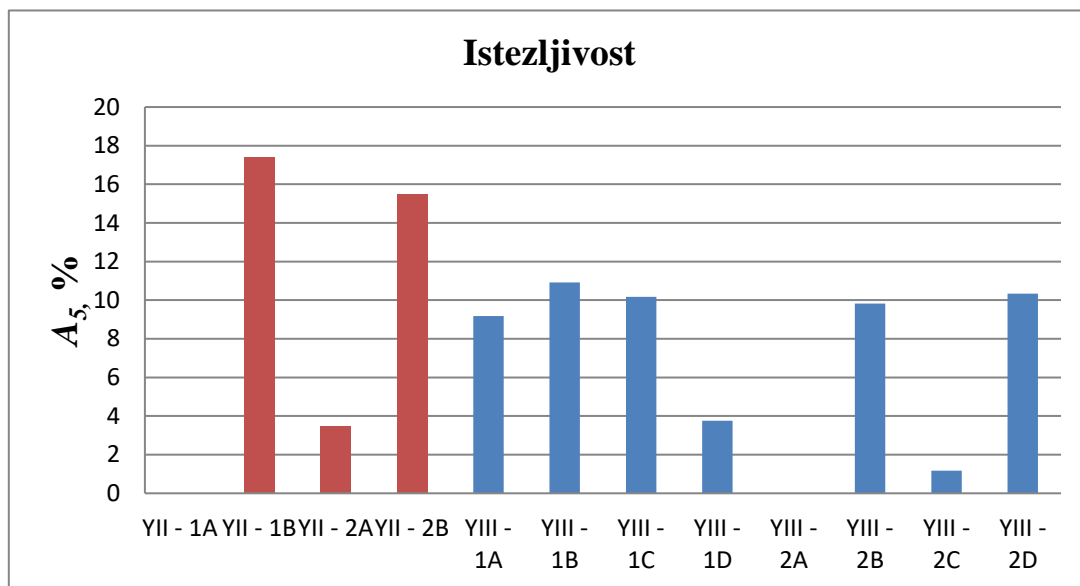
Slika 32. Izmjerene vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja

Slika 33 prikazuje omjer konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.



Slika 33. Omjer konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće

Slika 34 prikazuje vrijednosti istezljivosti.



Slika 34. Izmjerene vrijednosti istezljivosti

Prema normi HRN EN 1563:1997 minimalna vrijednost vlačne čvrstoće za ovu kvalitetu nodularnog lijeva iznosi 400 N/mm^2 za debljinu stjenke do 30 mm (Y-II proba), odnosno 390 N/mm^2 za debljinu stjenke od 30 mm do 60 mm (Y-III proba). Dijagram na slici 30 pokazuje da su izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće kod većine ispitnih uzoraka u ovom radu iznad 400 N/mm^2 . Na uzorcima Y-II 1A i Y-II 2A uočena su manja odstupanja od normom propisane vrijednosti, dok je na uzorku Y-III 2C uočeno značajno odstupanje, na ovom uzorku vrijednost vlačne čvrstoće iznosi tek 264 N/mm^2 . Najviše vrijednosti vlačne čvrstoće izmjerene su na uzorcima iz Y proba debljine stjenke 25 mm, Y-II 1B i Y-II 2B, nešto ispod 500 N/mm^2 . Veća brzina hlađenja povećava vrijednost vlačne čvrstoće kod B epruveta Y-II dok je slaba nodularnost i pojava drugih oblika grafita kod A epruveta značajno snizila vlačnu čvrstoću. Veća brzina hlađenja također povećava vrijednost vlačne čvrstoće kada se usporede rezultati Y-II i Y-III proba sa nodularnim grafitom.

Prema istoj normi minimalna vrijednost konvencionalne granice razvlačenja iznosi 250 N/mm^2 . Izmjerene vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja na svim uzorcima su iznad konvencionalne granice razvlačenja naznačene u normi, dok je za uzorak Y-III 2C izmjerena vrijednost nešto iznad konvencionalne granice razvlačenja naznačene u normi. To je najniža izmjerena vrijednost i iznosi 259 N/mm^2 , što je znatno niže od ostalih izmjerenih vrijednosti (iznad 330 N/mm^2). Utjecaj brzine hlađenja pri skrućivanju i različitih oblika grafita u strukturi nije vidljiv na ovom svojstvu.

Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da je povišeni sadržaj silicija na 3,43 % uzrokovao povišenje vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja putem očvršćenja ferita. Slični rezultati djelovanja povišenog sadržaja silicija vidljivi su u radovima. [9,11]

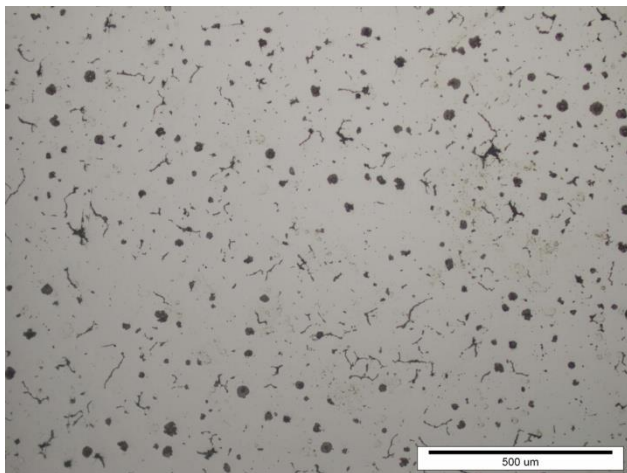
Omjer $R_{p0,2}/R_m$ prema navedenoj normi za ovu kvalitetu nodularnog lijeva iznosi 0,625, dok se omjer izmjerenih vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće u ovom ispitivanju kreće u intervalu od 0,69 do 0,98. Iz navedenih rezultata može se zaključiti da je uslijed povišenja sadržaja silicija došlo do povećanja navedenog omjera. Na temelju toga može se zaključiti da očvršćenje ferita silicijem ima veći učinak na konvencionalnu granicu razvlačenja nego na vlačnu čvrstoću, što je u skladu s literaturom. [9,11]

Minimalna vrijednost istežljivosti prema normi iznosi 15 % za debljinu stjenke do 30 mm, odnosno 14 % za debljinu stjenke do 60 mm. Na uzorcima Y-II 1B i Y-II 2B izmjerena je veća istežljivost nego što je navedena u normi, dok je na uzorcima Y-II 1A i Y-III 2A došlo do

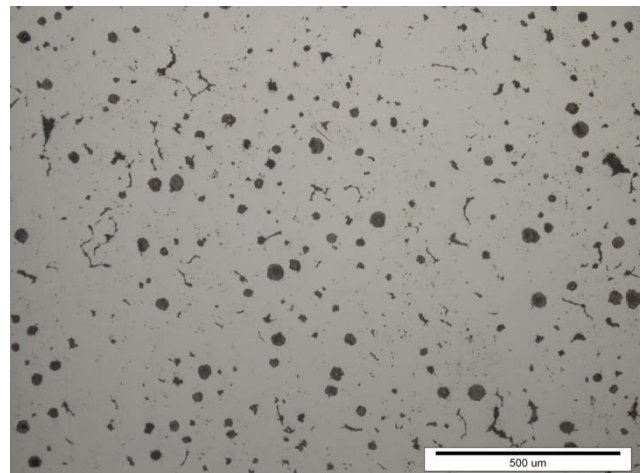
loma izvan L_0 područja tako da zate uzorke istezljivost nije izmjerena. Na preostalim uzorcima istezljivost je značajno manja nego što je propisano normom. S povećanjem sadržaja silicija dolazi do očvršćenja ferita zbog čega dolazi do smanjenja žilavosti ferita što je uz pojavu oblika grafita koji nije nodularni razlog smanjenja istezljivosti. Utjecaj povećanja sadržaja silicija na smanjenje istezljivosti izraženiji je kod uzoraka s manjim brzinama hlađenja (uzorci iz Y-III proba).

4.4. Rezultati metalografske analize

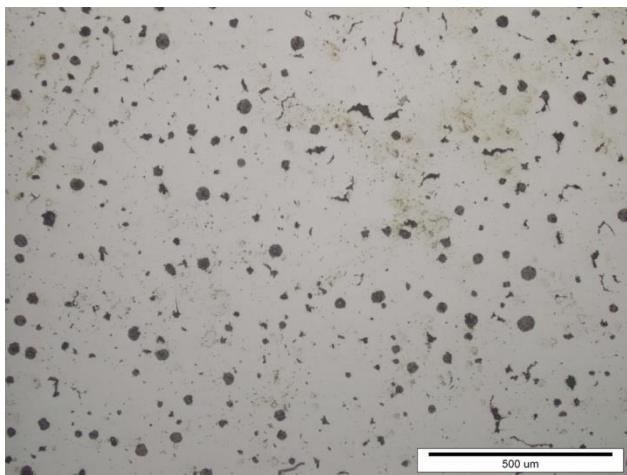
Na slici 35 prikazane su mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju, pri povećanju 100x.



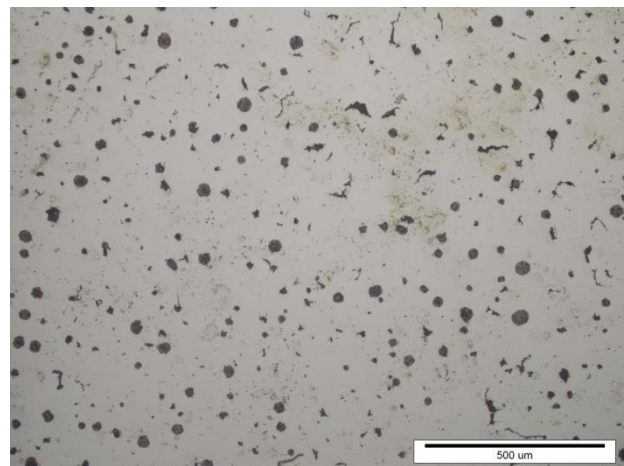
Y-II 1A



Y-II 1B



Y-III 2A



Y-III 2B

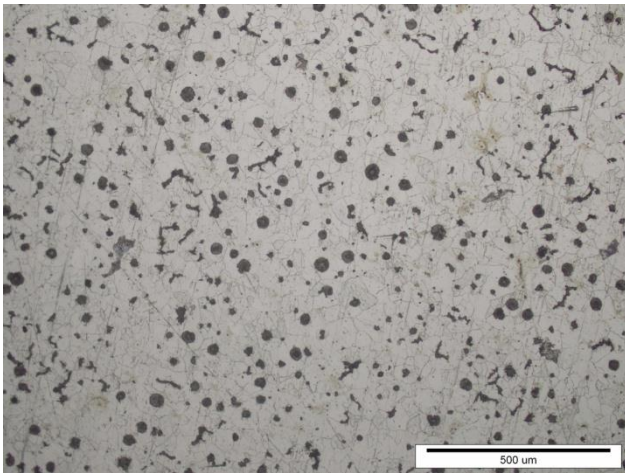
Slika 35. Mikrostruktura uzoraka u poliranom stanju

Na slikama mikrostrukture može se vidjeti da se u svim uzorcima ugljik izlučio u obliku grafita. Pregledom norme HRN EN ISO 945:2002 može se zaključiti da je izlučeni grafit u uzorcima Y-II 1A i Y-II 1B prisutan u oblicima III (vermikularni) i VI (nodularni). U uzorcima Y-III 2A i Y-III 2B prevladava nodularni oblik grafita. Uz nodularni grafit pojavljuje se i vermikularni, ali u manjem udjelu.

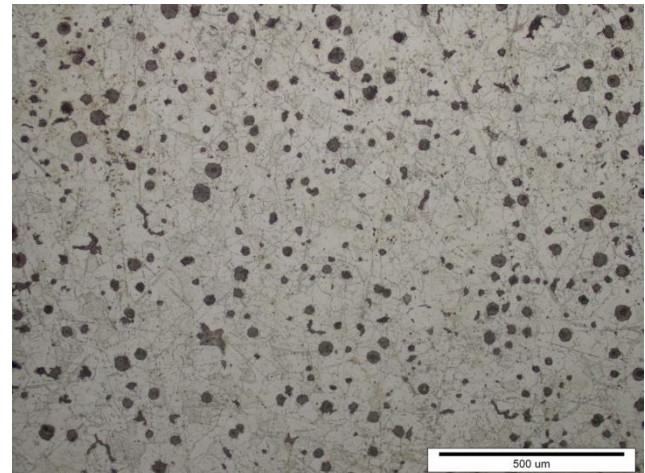
U svim uzorcima nodule su pravilnog oblika i pravilno raspoređene u metalnoj matrici. Prevladavaju nodule jednake veličine, a u uzorku Y-II 1B one su nešto većih dimenzija u odnosu na ostale uzorke. U uzorku Y-II 1A broj nodula je znatno manji u odnosu na ostale uzorke, s puno većim udjelom grafita u vermikularnom obliku.

Razlozi izlučivanja grafita u vermikularnom obliku mogu biti nizak rezidualni sadržaj magnezija i/ili elemenata rijetkih zemalja, visoke temperatura ili dugo vrijeme držanja nakon obrade, točno izbalansiran sadržaj elemenata rijetkih zemalja u predleguri za obradu na bazi magnezija.[2,16]

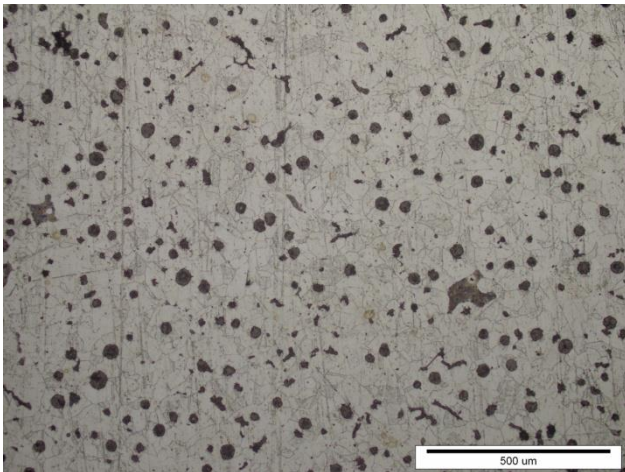
Na slici 36 prikazane su mikrostrukture uzoraka u nagriženom stanju.



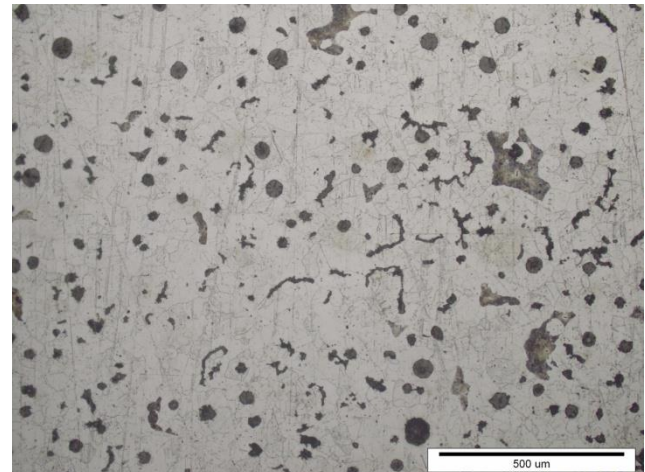
Y-II 1A



Y-II 1B



Y-III 2A



Y-III 2B

Slika 36. Mikrostruktura uzoraka u nagriženom stanju

Pregledom mikrostruktura u nagriženom stanju može se vidjeti da prevladava feritna metalna matrica. Prema literaturi [9] povećanjem sadržaja silicija u leguri povećava se sadržaj ferita u metalnoj matrici jer je silicij promotor ferita. Potpuno feritna metalna matrica nastupa iznad 3,8 % Si [9].

Odstupanja u vrijednostima vlačne čvrstoće na pojedinim uzorcima mogu biti uzrokovana prisustvom vermikularnog oblika grafita u većem udjelu u mikrostrukturi. Naime, iz literature

je poznato da vermikularni lijev u usporedbi sa nodularnim ima nižu vlačnu čvrstoću. Isto vrijedi i za istežljivost [2].

5. ZAKLJUČAK

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg se ugljik izlučuje u obliku nodula grafita. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na nivou vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva.

Nodularni lijev s povišenim sadržajem silicija nova je grupa materijala. S povišenjem sadržaja silicija dolazi do očvršćenja ferita što uzrokuje povišenje vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja. Uz to, feritni nodularni lijev očvršćen silicijem ima veći omjer $R_{p0,2}/R_m$ i veću istezljivost od konvencionalnog feritnog, feritno-perlitnog i perlitnog nodularnog lijeva, pri istoj vrijednosti vlačne čvrstoće, što je vrlo povoljno svojstvo.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitan je utjecaj različite brzine hlađenja na morfologiju grafita i mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva s povišenim sadržajem silicija. Kao ispitna taljevina korišten je nodularni lijev kvalitete EN-GJS-400-15 s 3,5 % Si. Radi mogućnosti ispitivanja različitih brzina hlađenja lijevane su Y probe tipa II (debljine stjenke 25 mm) te Y probe tipa III (debljine stjenke 50 mm). Iz odlivenih Y proba uzeti su uzorci za metalografsku analizu te uzorci za statičko vlačno ispitivanje.

Rezultati mehaničkih ispitivanja pokazuju da je povišeni sadržaj silicija od 3,43 % uzrokovao povišenje vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja putem očvršćenja ferita. Na uzorcima Y-II 1A i Y-II 2A uočena su manja odstupanja od normom propisane vrijednosti, dok je na uzorku Y-III 2C uočeno značajno odstupanje. Najviše vrijednosti vlačne čvrstoće izmjerene su na uzorcima iz Y proba debljine stjenke 25 mm, nešto ispod 500 N/mm². Veća brzina hlađenja povećava vrijednost vlačne čvrstoće.

Izmjerene vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja na svim uzorcima su iznad konvencionalne granice razvlačenja naznačene u normi te utjecaj brzine hlađenja pri skrućivanju nije vidljiv na ovom svojstvu.

Brzina hlađenja utječe na R_m i A_5 , a ne utječe na $R_{p0,2}$.

Uslijed povećanja sadržaja silicija u nodularnom lijevu došlo je do povećanja omjera $R_{p0,2}/R_m$, što znači da očvršćenje ferita silicijem ima veći učinak na konvencionalnu granicu razvlačenja nego na vlačnu čvrstoću.

S povećanjem sadržaja silicija dolazi do očvršćenja ferita zbog čega dolazi do smanjenja žilavosti ferita što je uz pojavu oblika grafita koji nije nodularni razlog smanjenja istezljivosti. Utjecaj povećanja sadržaja silicija na smanjenje istezljivosti izraženiji je kod uzoraka s manjim brzinama hlađenja

Na slikama mikrostruktura poliranih uzoraka vidi se da je grafit izlučen u obliku nodula i manjim dijelom vermikula. U svim uzorcima nodule su pravilnog oblika i pravilno raspoređene u metalnoj matrici. Prevladavaju nodule jednakih veličina, osim u uzorku Y-III B gdje su znatno veće.

Pregledom mikrostruktura u nagriženom stanju može se vidjeti da prevladava feritna metalna matrica. Odstupanja u vrijednostima vlačne čvrstoće na pojedinim uzorcima mogu biti uzrokovana prisustvom vermikularnog oblika grafita u većem udjelu u mikrostrukturi.

LITERATURA

- [1] Bauer B., Mihalic Pokopec I., Ljevarstvo, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Unkić F., Glavaš Z., Lijevanje željeznih metala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [3] Unkić F., Glavaš Z., Osnove lijevanja metala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
- [4] Bonačić Mandinić Z., Budić I., Osnove tehnologije kalupljenja, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [5] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J., Svojstva i primjene materijala, Zagreb, 2011.
- [6] ..., Ljevački priručnik, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 1985.
- [7] Žmak I.: Modeliranje strukture i svojstva nodularnog lijeva neuronskim mrežama, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [8] ..., HRN EN 1563:2012 – Hrvatska norma: Ljevarstvo – Nodularni ljevovi.
- [9] Glavaš Z., Štrkalj A., Stojaković A., The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons, *Metalurgija* 55, (2016) 3, 293-296.
- [10] Hammersberg P., Hamberg K., Borgström H., Lindkvist J., Björkegren L.E., Variation of tensile properties of high silicon ductile iron, *Materials science forum*, vol. 925, 2018, 280-287.
- [11] Martínez R. G., de la Torre U., Lacaze J., Sertucha J., Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I– Microstructure, *Materials science and engineering*, A712 (2018) 794-802.
- [12] Martínez R. G., de la Torre U., Lacaze J., Sertucha J., Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II– Mechanical properties, *Materials science and engineering*, A712 (2018) 803-811.

[13] de la TorreU., LoizagaA., LacazeJ., SertuchaJ., As cast high silicon ductile irons with optimised mechanical properties and remarkable fatigue properties, *Materials science and technology*, 12, vol. 30, 2014, 1425-1431.

[14]..., *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Kanada, 2004.

[15] Mihalic PokopecI.: Utjecaj brzine hlađenja i dodatka cerija i bizmuta na morfologiju grafita u debelostijenim odljevcima od nodularnoga lijeva, *Doktorski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2016.

[16] *Common Metallurgical defects in ductile iron*, dostupno na www.foundry.elkem.com.
Preuzeto [11.01.2019.]

PRILOZI

1. CD-R disc