

Mikrostruktura i svojstva nodularnog lijeva legiranog silicijem i molibdenom

Kumer, Fabijan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:833718>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Fabijan Kumer

DIPLOMSKI RAD

Sisak, srpanj 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Fabijan Kumer

**MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA
LEGIRANOG SILICIJEM I MOLIBDENOM**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

doc.dr.sc. Ivan Jandrić - predsjednik
prof.dr.sc. Zoran Glavaš - član
doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović - član
izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić- zamjenski član

Sisak, srpanj 2019.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Zoranu Glavašu na pomoći i vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada. Zahvaljujem se i stručnom suradniku Franji Kozini, mag.ing.met. pri pomoći kod metalografske analize uzoraka.

Najviše zahvaljujem svojim roditeljima pri pružanju bezuvjetne podrške i motivacije tijekom cijelog studiranja i mojoj Ani koja je bila uvijek uz mene.

Ovu diplomu posvećujem ocu i majci.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Fabijan
PREZIME: Kumer
MATIČNI BROJ: M 74/17

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom:

MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA LEGIRANOG SILICIJEM I MOLIBDENOM

izvorni rezultat mog rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 19. srpnja 2019.

(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

SAŽETAK

MIKROSTRUKTURA I SVOJSTVA NODULARNOG LIJEVA LEGIRANOG SILICIJEM I MOLIBDENOM

U ovom diplomskom radu analizirana je mikrostruktura i ispitana su vlačna svojstva, tvrdoća, žilavost i otpornost na oksidaciju na 850 °C nodularnih ljevova legiranih sa 4,28, 4,49 i 4,81 mas. % Si i 0,6 mas. % Mo. Pored toga, ispitana je otpornost na oksidaciju na 850 °C feritnog nodularnog lijeva sa 2,11 mas. % Si i od feritno-perlitnog nodularnog lijeva sa 3 mas. % Si. U analiziranim SiMo nodularnim ljevovima grafitne čestice imaju nodularni oblik. Metalna osnova sastoji se od ferita i malog udjela globularnog perlita koji je izlučen po granicama feritnih zrna i okružuje karbide molibdena. S porastom udjela silicija povećava se granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, omjer $R_{p0,2}/R_m$ i tvrdoća, a smanjuje istezanje i žilavost SiMo nodularnih ljevova jer se povećava intenzitet očvršćivanja ferita. Karbidi molibdena negativno utječu na istezanje i žilavost SiMo nodularnog lijeva. Analizirani SiMo nodularni ljevovi imaju znatno bolju otpornost na oksidaciju na 850 °C od feritnog nodularnog lijeva sa 2,11 mas. % Si i od feritno-perlitnog nodularnog lijeva sa 3 mas. % Si. Otpornost na oksidaciju nodularnog lijeva povećava se s porastom udjela silicija.

Ključne riječi: SiMo nodularni lijev, mikrostruktura, mehanička svojstva, otpornost na oksidaciju

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF DUCTILE IRON ALLOYED WITH SILICON AND MOLYBDENUM

This graduate thesis analyses the microstructure, tensile properties, hardness, toughness and oxidation resistance at 850 °C of ductile irons alloyed with 4.28, 4.49 and 4.81 wt. % Si and 0.6 wt. % Mo. In addition, oxidation resistance at 850 °C of ferritic ductile iron containing 2.11 wt. % Si and ferritic-pearlitic ductile iron containing 3 wt. % Si was also examined. In the analysed SiMo ductile irons, the graphite particles have a nodular shape. The metallic matrix is composed of ferrite and a small share of globular pearlite which is present on the grain boundaries of ferrite and surrounds the molybdenum carbides. With the increase in silicon content, yield strength, tensile strength, ratio $R_{p0,2}/R_m$ and hardness increases, and the elongation and toughness of SiMo ductile irons decreases due to increase in intensity of strengthening of ferrite. Molybdenum carbides negatively affect elongation and toughness of SiMo ductile irons. Analysed SiMo ductile irons have a much better oxidation resistance at 850 °C than the ferritic ductile iron containing 2.11 wt. % Si and from the ferritic-pearlitic ductile iron containing 3 wt. % Si. The oxidation resistance of ductile iron increases with increasing silicon content.

Key words: SiMo ductile iron, microstructure, mechanical properties, oxidation resistance

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Osnovne karakteristike i primjena SiMo nodularnog lijeva	2
2.2. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na svojstva SiMo nodularnog lijeva	4
2.3. Proizvodnja SiMo nodularnog lijeva	15
2.3.1. Proizvodnja i obrada primarne taline (nodulacija)	15
2.3.2. Cijepljenje	17
2.3.3. Ostali proizvodni zahtjevi	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO	19
3.1. Izrada talina SiMo nodularnog lijeva	19
3.2. Lijevanje Y-probi	20
3.3. Ispitivanje vlačnih svojstava	21
3.4. Ispitivanje žilavosti	21
3.5. Ispitivanje tvrdoće	22
3.6. Ispitivanje otpornosti na oksidaciju	22
3.7. Metalografska analiza	23
4. REZULTATI I DISKUSIJA	24
4.1. Kemijski sastav SiMo nodularnih ljevova	24
4.2. Mikrostrukturne značajke SiMo nodularnih ljevova	24
4.3. Vlačna svojstva SiMo nodularnih ljevova	29
4.4. Žilavost SiMo nodularnih ljevova	29
4.5. Tvrdoća SiMo nodularnih ljevova	30
4.6. Otpornost na oksidaciju ispitivanih nodularnih ljevova	31
5. ZAKLJUČAK	36
6. LITERATURA	37
ŽIVOTOPIS	39

1. UVOD

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva u kojem grafitne čestice imaju kuglast, odnosno nodularan oblik [1]. Takav oblik grafitnih čestica omogućuje veću kompaktnost metalne osnove. Zbog toga nodularni lijev ima bolja mehanička svojstva od ostalih željeznih ljevova koji sadrže čestice grafita u mikrostrukturi, tj. od sivog, vermikularnog i tempernog lijeva. Posebno se ističe njegova relativno visoka žilavost i istezljivost, svojstva koja inače nisu tipična za prethodno navedene željezne ljevove. Po pitanju vlačne čvrstoće, može konkurirati mnogim čeličnim ljevovima.

Povoljna kombinacija svojstava koju pruža nodularni lijev pogodna je za mnoge aplikacije, zbog čega zauzima značaj udio u svjetskoj proizvodnji odljevaka. Tijekom 2017. godine u svijetu je proizvedeno 26,43 mil. t. odljevaka od nodularnog lijeva [2]. Udio odljevaka od nodularnog lijeva u ukupnoj svjetskoj proizvodnji odljevaka u toj godini iznosio je 24,06 %, odnosno 30,2 % ako se promatraju samo odljevci od ljevova na osnovi željeza.

Kako bi se ispunili sve veći zahtjevi na vozila u pogledu boljeg iskorištenja goriva i smanjenja štetnog utjecaja na okoliš, za gradnju motora s unutarnjim izgaranjem razvijen je čitav niz novih materijala koji mogu podnijeti novonastala povećana mehanička i toplinska opterećenja. Novi sustavi ubrizgavanja omogućuju efikasnije izgaranje goriva, ali je to dovelo do viših temperatura ispušnih plinova. Zbog toga se za odljevke, kao što su ispušne grane i kućišta turbopunjača moraju koristiti materijali koji na visokim temperaturama imaju dovoljno visoku čvrstoću, otpornost na oksidaciju i puzanje, stabilnu strukturu i nisku ekspanziju te su otporni na naizmjenične cikluse grijanja i hlađenja i toplinske šokove [1, 3].

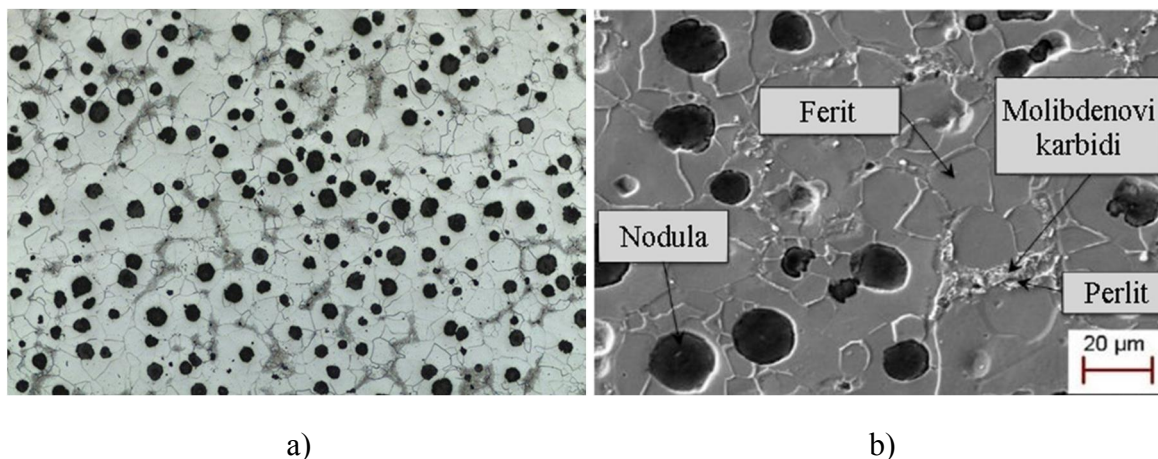
Feritni nodularni lijev legiran silicijem i molibdenom, poznat pod nazivom SiMo nodularni lijev, ispunjava prethodno navedene zahtjeve, s tim da su zadržane proizvodne i ekonomske prednosti uobičajenih kvaliteta nodularnih ljevova [1, 3, 4]. Po pitanju otpornosti na oksidaciju, jedna od ključnih prednosti nodularnog lijeva leži u obliku grafitnih čestica u njemu. Grafitne nodule nisu međusobno povezane, kao što je to slučaj s grafitnim listićima u sivom lijevu. Zbog toga se difuzija kisika u unutrašnjost odljevka, odnosno oksidacija najbrže odvija u sivom lijevu, a najsporije u nodularnom lijevu.

U ovom diplomskom radu proučavana su tri nodularna lijeva s različitim udjelima silicija i molibdena. Analizirana je mikrostruktura i ispitana su vlačna svojstva, žilavost i tvrdoća na sobnoj temperaturi te otpornost na oksidaciju na temperaturi od 850 °C.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Osnovne karakteristike i primjena SiMo nodularnog lijeva

Mikrostruktura SiMo nodularnog lijeva sastoji se od grafitnih nodula i ferita te manjih udjela perlita i molibdenovih karbida (slika 2.1).



Slika 2.1. Mikrostruktura SiMo nodularnog lijeva: a) snimka napravljena svjetlosnim metalografskim mikroskopom [5], b) snimka napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom [6]

Norma EN 16124:2011 definira devet kvaliteta SiMo nodularnog lijeva (tablice 2.1 i 2.2). Prema tome, ne radi se o jednom materijalu već skupini materijala.

Tablica 2.1. Preporučeni udjeli silicija i molibdena u SiMo nodularnim ljevovima prema EN 16124:2011 [7]

Označivanje materijala		Si, mas. %	Mo, mas. %
Oznaka	Broj		
EN-GJS-SiMo25-5	5.3111	2,3 do 2,7	0,4 do 0,6
EN-GJS-SiMo30-7	5.3112	2,8 do 3,2	0,6 do 0,8
EN-GJS-SiMo35-5	5.3113	3,3 do 3,7	0,4 do 0,6
EN-GJS-SiMo40-6	5.3114	3,8 do 4,2	0,5 do 0,7
EN-GJS-SiMo40-10	5.3115		0,8 do 1,1
EN-GJS-SiMo45-6	5.3116	4,3 do 4,7	0,5 do 0,7
EN-GJS-SiMo45-10	5.3117		0,8 do 1,1
EN-GJS-SiMo50-6	5.3118	4,8 do 5,2	0,5 do 0,7
EN-GJS-SiMo50-10	5.3119		0,8 do 1,1

SiMo nodularni ljev upotrebljava se za odljevke koji moraju biti otporni na deformaciju i oksidaciju na visokim temperaturama (800 – 900 °C) i ima superiornija visokotemperaturna svojstva od sivog i vermikularnog lijeva te nelegiranog feritnog nodularnog lijeva (tablica 2.3) [7]. Prve tri kvalitete iz tablica 2.1 i 2.2 uglavnom se upotrebljavaju se za srednje-debele i debelostijene odljevke, kao što su kućišta turbina i dijelovi kompresora [7]. Ostalih šest kvaliteta primjenjuje se za izradu ispušnih grana i dijelova turbopunjača u automobilskoj industriji (slika 2.2) [7].

Tablica 2.2. Mehanička svojstva SiMo nodularnih ljevova na sobnoj temperaturi prema EN 16124:2011 mjerena na ispitnim uzorcima koji su izrađeni strojnom obradom iz odvojeno lijevanih uzoraka [7]

Označivanje materijala		Debljina relevantne stijenke, mm	$R_{p0,2}$ N/mm ² , min.	R_m N/mm ² , min.	A %, min.	HBW ^{a)}
Oznaka	Broj					
EN-GJS-SiMo25-5	5.3111	30 < t ≤ 60	260	420	12	140 do 210
		60 < t ≤ 200	250	400	12	130 do 200
EN-GJS-SiMo30-7	5.3112	30 < t ≤ 60	310	440	10	150 do 220
		60 < t ≤ 200	300	420	10	140 do 210
EN-GJS-SiMo35-5	5.3113	30 < t ≤ 60	330	440	8	160 do 230
		60 < t ≤ 200	320	440	8	150 do 220
EN-GJS-SiMo40-6	5.3114	t ≤ 30	380	480	8	190 do 240
EN-GJS-SiMo40-10	5.3115	t ≤ 30	400	510	6	190 do 240
EN-GJS-SiMo45-6	5.3116	t ≤ 30	420	520	7	200 do 250
EN-GJS-SiMo45-10	5.3117	t ≤ 30	460	550	5	200 do 250
EN-GJS-SiMo50-6	5.3118	t ≤ 30	480	580	4	210 do 260
EN-GJS-SiMo50-10	5.3119	t ≤ 30	500	600	3	210 do 260

^{a)} informativne vrijednosti, mjereno na odljevku

Tablica 2.3. Maksimalne dozvoljene temperature primjene za razne materijale koji se koriste za ispušne grane na motorima s unutarnjim izgaranjem [8]

Materijal	Maksimalna temperatura, °C
Sivi lijev	540
Vermikularni lijev	650
Feritni nodularni lijev	760
SiMo nodularni lijev	870
Austenitni nodularni lijev	925
Feritni nehrđajući čelik	955
Austenitni nehrđajući čelik	1050



a)

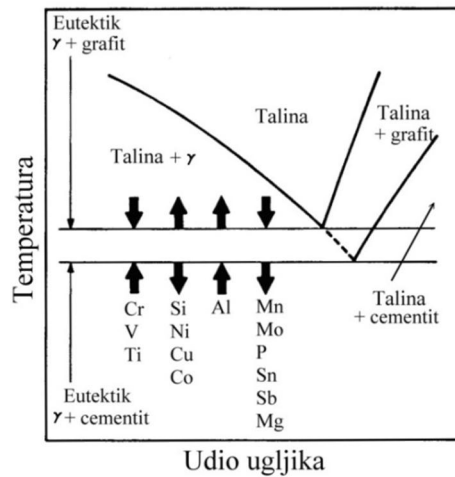


b)

Slika 2.2. Odljevci od SiMo nodularnog lijeva: a) ispušna grana [9], b) kućište turbopunjača [10]

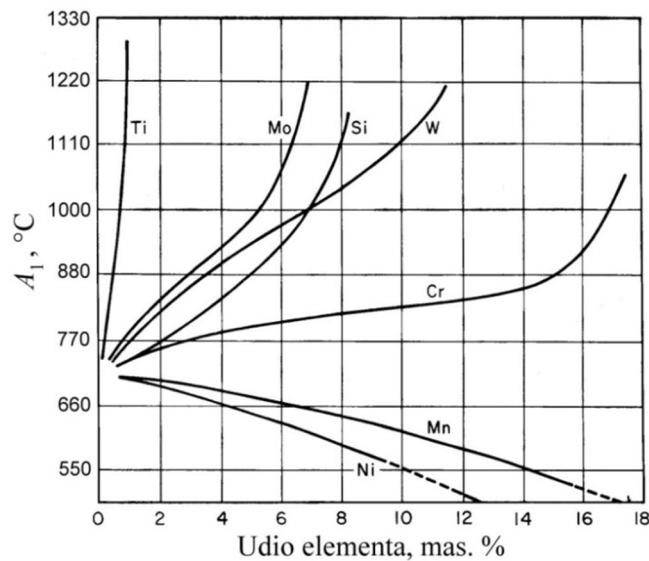
2.2. Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na svojstva SiMo nodularnog lijeva

Silicij povećava temperaturu na kojoj se odvija eutektična reakcija kojom nastaje eutektik austenit + grafit i istovremeno smanjuje temperaturu na kojoj se odvija eutektična reakcija kojom nastaje eutektik austenit + cementit (slika 2.3). Zbog toga silicij pospješuje stvaranje grafitnih čestica i otežava stvaranje karbida tijekom skrućivanja nodularnog lijeva, što je svakako pozitivan učinak [1, 4].



Slika 2.3. Utjecaj elemenata na temperaturu eutektične reakcije kojom nastaje eutektik austenit + grafit i temperaturu eutektične reakcije kojom nastaje eutektik austenit + cementit [11]

Silicij utječe i na metalnu osnovu nodularnog lijeva [1, 4]. Na slici 2.4 može se vidjeti da se temperatura na kojoj se odvija eutektoidna pretvorba povećava s porastom udjela silicija.



Slika 2.4. Promjena temperature na kojoj se odvija eutektoidna pretvorba (A_1) ovisno o udjelu pojedinih elemenata [12]

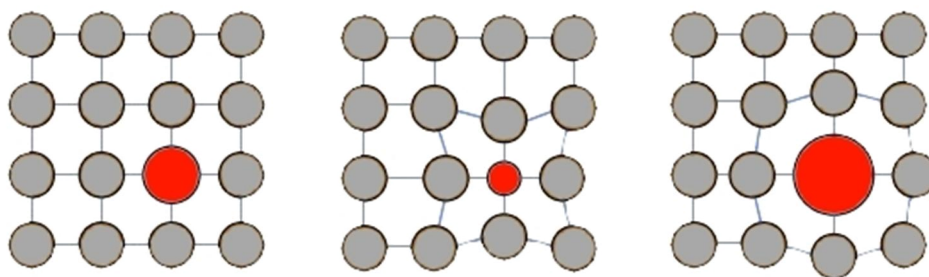
Time se olakšava difuzija atoma ugljika iz austenita na grafitne čestice nastale tijekom skrućivanja nodularnog lijeva, što omogućuje pretvorbu austenita u ferit (tablica 2.4). S porastom udjela ferita i istovremenim smanjenjem udjela perlita u metalnoj osnovi dolazi do povećanja istezljivosti i žilavosti te pada vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i tvrdoće nodularnog lijeva [1, 4].

Tablica 2.4. Utjecaj udjela silicija na udio ferita i perlita u uzorcima nodularnog lijeva debljine 25 mm [13]

Si, mas. %	Udio ferita u metalnoj osnovi, %	Udio perlita u metalnoj osnovi, %
3,11	98,1	1,9
3,55	98,6	1,4
3,80	100	0
4,22	100	0
4,71	100	0
5,42	100	0

Međutim, silicij istovremeno i očvršćuje ferit što značajno utječe na svojstva nodularnog lijeva [3, 14 - 17]. To očvršćivanje u feritnom nodularnom lijevu počinje već pri ~ 2,6 mas. % silicija [17]. Budući da je supstitucijski element, silicij zamjenjuje atome željeza u kristalnoj rešetki ferita. To upućuje da se očvršćivanje nodularnog lijeva silicijem odvija prema mehanizmu očvršćivanja krute otopine supstitucijskim atomima.

Gibanje velikog broja dislokacija kroz kristalnu rešetku rezultira plastičnom deformacijom materijala [18 - 20]. Očito je da treba spriječiti gibanje dislokacija ako se želi povećati granica razvlačenja i vlačna čvrstoća. Silicij kao supstitucijski element dovest će do distorzije kristalne rešetke ferita, jer je atomski radijus silicija (111 pm) manji od atomskog radijusa željeza (126 pm) (slika 2.5) [21, 22]. Na isti način djeluju i elementi koji imaju veći atomski radijus od željeza (slika 2.5).

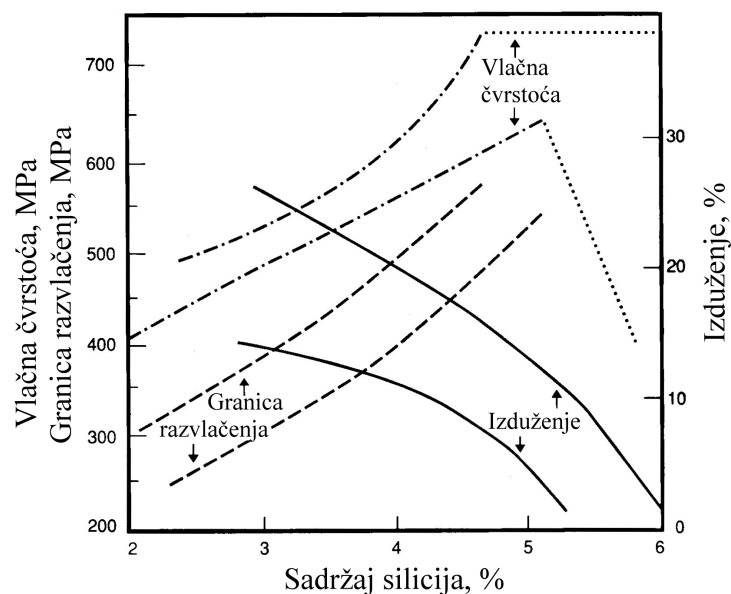


Slika 2.5. Utjecaj veličine supstitucijskog atoma na distorziju kristalne rešetke [18]

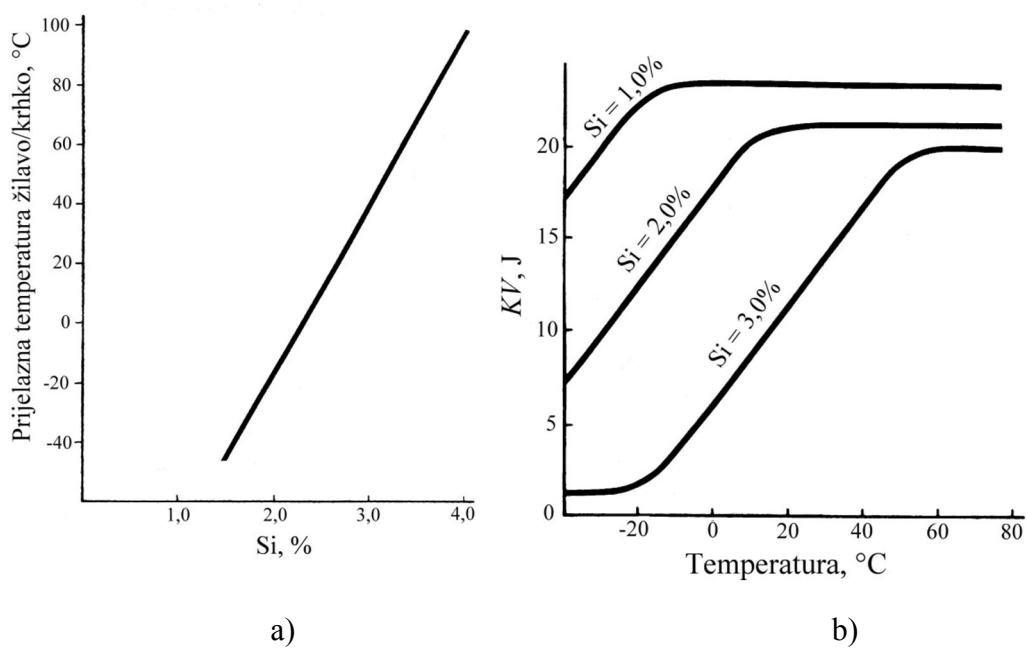
Kao rezultat distorzije kristalne rešetke javljaju se lokalna polja naprezanja, pri čemu dolazi do njihove interakcije s poljima naprezanja koja potječu od dislokacija. Na taj način sprječava se gibanje dislokacija kroz kristalnu rešetku. Kako bi opet došlo do gibanja dislokacija, potrebna su veća naprezanja ili veća temperatura. To ukazuje da je povećana čvrstoća materijala.

S porastom udjela silicija očvršćivanje postaje sve izraženije, što rezultira povećanjem granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i tvrdoće te padom istezljivosti i žilavosti nodularnog lijeva (slike 2.6 i 2.7, tablice 2.5 i 2.6). Međutim, pri udjelima silicija > 6 mas.

% nodularni lijev je jako krhak i nije primjenjiv za odljevke koji moraju imati barem malu žilavost [3].



Slika 2.6. Utjecaj udjela silicija na granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i istezljivost feritnog nodularnog lijeva pri sobnoj temperaturi [3]



Slika 2.7. Utjecaj udjela silicija na: a) prijelaznu temperaturu žilavo/krhko, b) udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva pri različitim temperaturama [4]

Tablica 2.5. Utjecaj udjela silicija na tvrdoću feritnog zrna [23]

Udio silicija u nodularnom lijevu	Tvrdoća $HV_{0,1}$					
	Broj mjerenja					Srednja vrijed.
	1	2	3	4	5	
2,24 mas. %	131	104	113	119	123	118
3,2 mas. %	203	207	186	188	206	198

Tablica 2.6. Utjecaj udjela silicija na granicu razvlačenja, vlačnu tvrdoću, istezljivost, udarni rad loma i tvrdoću i nodularnog lijeva (ispitni uzorci uzeti iz stijenke debljine 25 mm) [13]

Si, mas. %	$R_{p0,2}$ / N/mm ²	R_m / N/mm ²	$R_{p0,2}/R_m$	A , %	KV , J	Tvrdoća HV20
3,11	356	487	0,73	18,5	106	206
3,55	410	509	0,81	17,4	81	212
3,80	468	551	0,85	17,0	63	226
4,22	553	637	0,87	10,5	45	251
4,71	538	592	0,91	3,3	19	282
5,42	531	531	1	-	10	322

Osim utjecaja na metalnu osnovu, silicij utječe i na broj grafitnih čestica i njihovu morfologiju u nodularnom lijevu [13]. Podaci u tablici 2.7 pokazuju da se broj nodula i nodularnost povećavaju s porastom udjela silicija. Međutim, ako se lijevaju odljevci s debelim stijenka, povišeni udjeli silicija u nodularnom lijevu nisu poželjni jer mogu dovesti do stvaranja „*chunky*“ grafita koji izrazito negativno utječe na svojstva nodularnog lijeva [24, 25].

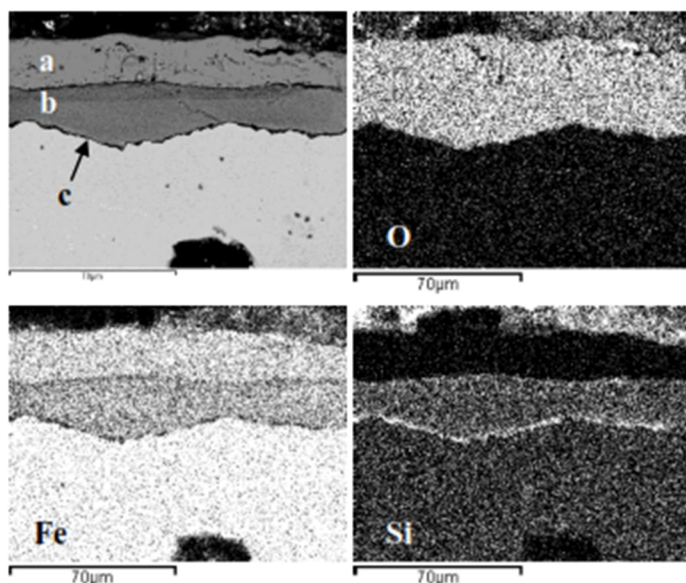
Tablica 2.7. Utjecaj udjela silicija na broj nodula/mm² i nodularnost u uzorcima nodularnog lijeva debljine 25 mm [13]

Si, mas. %	Nodularnost, %	Broj nodula/mm ²
3,11	83,1	177
3,55	84,6	198
3,80	87,1	249
4,22	87,6	305
4,71	87,4	301
5,42	86,1	304

Svojstva nodularnog lijeva na povišenim temperaturama poboljšavaju se dodatkom silicija jer se stabilizira ferit te se na površini odljevka stvara oksidni sloj obogaćen silicijem koji sprječava daljnju oksidaciju [3, 8, 26]. Budući da se temperatura na kojoj se odvija eutektoidna pretvorba povećava s porastom udjela silicija (slika 2.4), ferit je stabilan, odnosno postojan do viših temperatura. Odljevak se može primjenjivati upravo do te temperature. Ako se odljevak naizmjenično zagrijava iznad te temperature i potom hladi ispod nje, volumne promjene koje se dešavaju tijekom pretvorbe ferita u austenit i obrnuto

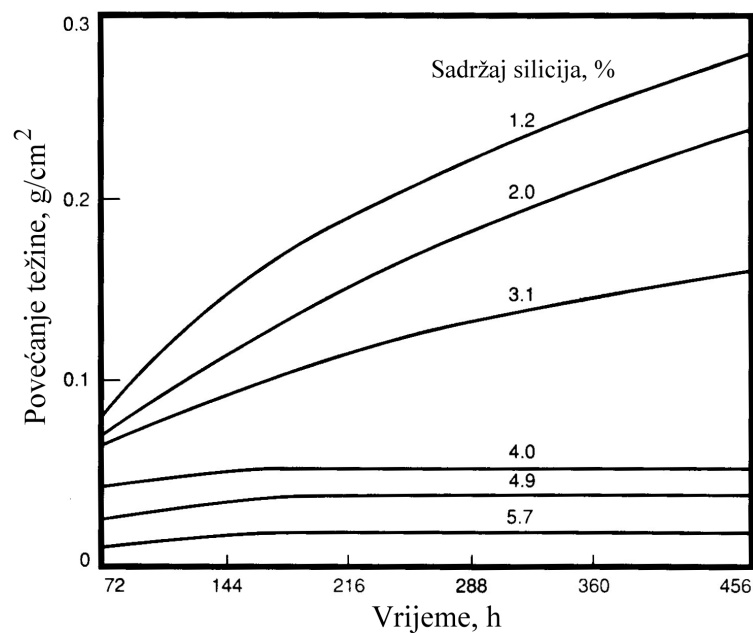
moгу dovesti do distorzije odljevka i pucanja oksidnog sloja na površini [27]. Zbog toga se smanjuje otpornost na oksidaciju i povećava rast. Visoki udjeli silicija značajno otežavaju stvaranje karbida i perlita, čime se smanjuje rast na visokim temperaturama do kojeg dolazi prilikom njihovog razlaganja.

Silicij je najznačajniji i ekonomski najpogodniji element za poboljšanje otpornosti željeznog lijeva na visokotemperaturnu oksidaciju. Ogorina, odnosno oksidni sloj, gledano od površine prema unutrašnjosti odljevka od nodularnog lijeva legiranog silicijem i molibdenom sastoji se od Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ i na kraju $\beta\text{-SiO}_2$ koji razdvaja oksidni sloj od osnovnog metala (slika 2.8) [27].

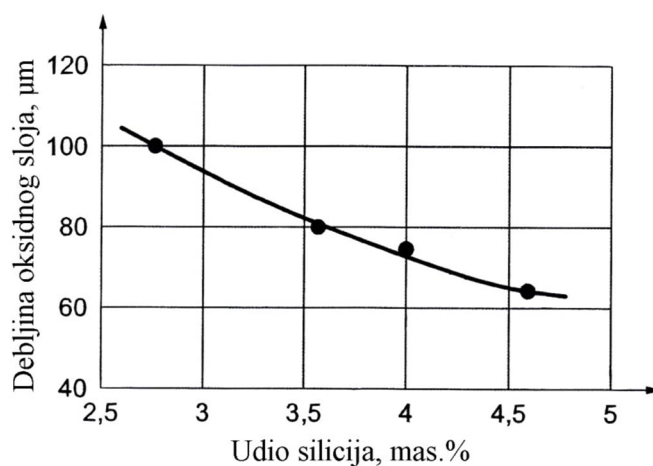


Slika 2.8. Oksidni sloj na površini SiMo nodularnog lijeva koji sadrži 4,15 mas. % Si i 0,86 mas. % Mo nastao tijekom zagrijavanja na 800 °C u trajanju od 96 h u oksidacijskoj atmosferi. Vanjski sloj Fe-oksida označen je slovom (a), unutarnji sloj Fe-Si oksida označen je slovom (b), a slovom (c) označen je sloj SiO_2 na granici oksid/osnovni metal [28]

Sloj SiO_2 je znatno kompaktniji od oksida željeza i predstavlja najznačajniju barijeru za difuziju kisika u unutrašnjost odljevka. Ako je u kemijskom sastavu prisutan i krom, sloj Cr_2O_3 oksida formiran u području SiO_2 sloja značajno smanjuje brzinu oksidacije [27]. S porastom udjela silicija postiže se veća otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju (slike 2.9 i 2.10 i tablica 2.8). Međutim, previsoki udjeli silicija negativno utječu na mehanička svojstva odljevaka. Udjeli silicija iznad 4 mas. % su dovoljni da se spriječi bilo kakvo značajnije povećanje mase odljevka zbog oksidacije nakon stvaranja početnog oksidnog sloja [3].



Slika 2.9. Utjecaj udjela silicija na oksidaciju feritnog nodularnog lijeva na zraku pri temperaturi od 650 °C [3]



Slika 2.10. Utjecaj udjela silicija na debljinu oksidnog sloja nastalog tijekom zagrijavanja nodularnog lijeva s 0,9 mas. % Mo tijekom 96 h na temperaturi od 800 °C [7]

Tablica 2.8. Dubina prodiranja oksidacije u nelegirani sivi lijev i nodularne ljevove s različitim udjelima silicija i molibdena tijekom zagrijavanja na 700 °C u trajanju od 2000 h [7]

Materijal	Dubina prodiranja oksidacije, mm
Nelegirani GJL	0,61
EN-GJS-400-18 (~ 2 mas. % Si)	0,23
GJS, 4 mas. % Si	0,05
GJS, 4 mas. % Si, 1 mas. % Mo	< 0,02
GJS, 4 mas. % Si, 2 mas. % Mo	< 0,02

Iz navedenog prikaza proizlazi da se najbolja kombinacija otpornosti na visoke temperature i mehaničkih svojstava postiže pri udjelima silicija od 4 do 6 mas. % [3].

Molibden je karbidotvorni element jer snižava temperaturu eutektične reakcije kojom nastaje eutektik austenit + grafit i temperaturu eutektične reakcije kojom nastaje eutektik austenit + cementit (slika 2.3). Međutim, nije tako snažan karbidotvorac kao što su krom i vanadij.

Temperatura na kojoj se odvija eutektoidna pretvorba povećava se s porastom udjela molibdena (slika 2.4). On promovira stvaranje ferita ako je prisutan u udjelu od 0,1 do 0,3 mas. %, dok pri udjelima > 0,3 mas. % pospješuje stvaranje perlita [29].

Vlačna čvrstoća i otpornost na puzanje nodularnog lijeva na visokim temperaturama te otpornost na toplinski umor mogu se povećati dodatkom molibdena jer stvara karbide u feritnoj metalnoj osnovi [3, 7, 8, 26, 27]. Pri tome treba imati na umu da molibden istovremeno smanjuje istežanje i žilavost, zbog čega nisu pogodni visoki dodaci.

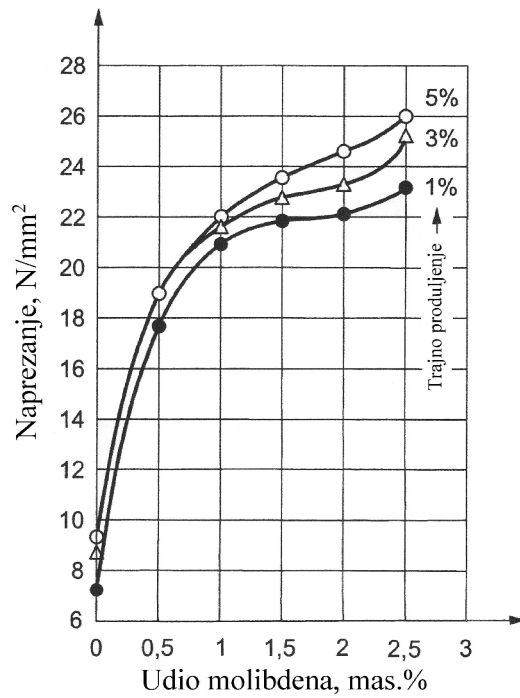
Podaci u tablici 2.9 pokazuju da udjeli do 2 mas. % molibdena u nodularnom lijevu koji sadrži 4 mas. % silicija rezultiraju višim vrijednostima vlačne čvrstoće na visokim temperaturama. Feritni nodularni lijev koji sadrži 0,5 mas. % molibdena ima slična visokotemperaturna svojstva kao čelik koji sadrži 0,2 mas. % ugljika i 0,6 mas. % mangana [3].

Tablica 2.9. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću feritnog nodularnog lijeva s različitim udjelima silicija i molibdena [3]

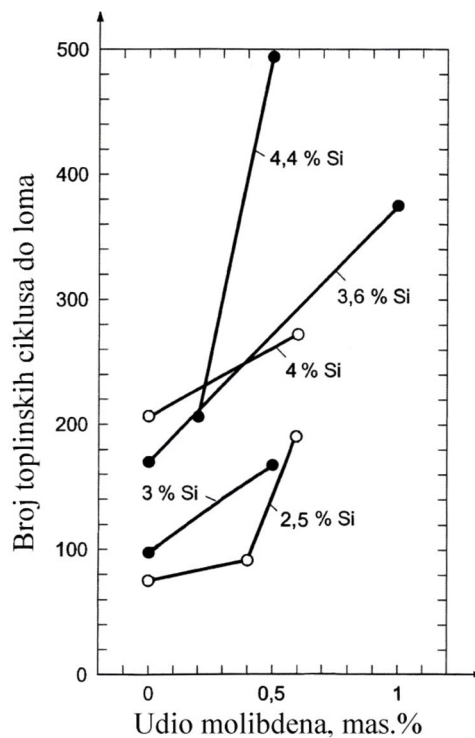
Materijal	Vlačna čvrstoća, N/mm ²		
	425 °C	540 °C	650 °C
EN-GJS-400-18	276	173	90
GJS, 4 mas. % Si	386	248	90
GJS, 4 mas. % Si, 1 mas. % Mo	421	304	131
GJS, 4 mas. % Si, 2 mas. % Mo	449	317	138

Na slici 2.11 može se vidjeti da molibden značajno povećava otpornost feritnog nodularnog lijeva na puzanje pri visokim temperaturama.

Toplinski umor pojavljuje se kada se odljevak izlaže čestim i brzim promjenama temperature. Zbog toga u odljevku nastaju toplinska naprezanja koja mogu dovesti do stvaranja pukotina. Promjene u mikrostrukтури, kao što su volumne promjene, oksidacija na površini i u unutrašnjosti odljevka, mogu također povećati naprezanja nastala promjenama temperature. Na slici 2.12 može se vidjeti da se dodatkom molibdena značajno povećava otpornost na toplinski umor feritnih nodularnih ljevova.



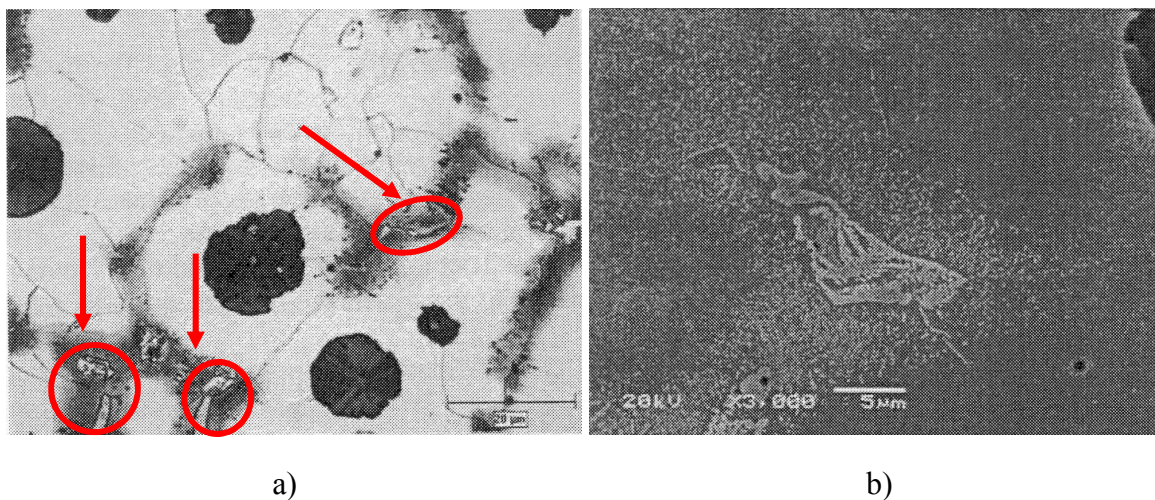
Slika 2.11. Utjecaj udjela molibdena na otpornost feritnog nodularnog lijeva sa 4 mas. % Si k puzanju (1000 h na 705 °C) [7]



Slika 2.12. Utjecaj molibdena na otpornost feritnog nodularnog lijeva na toplinski umor (naizmjenično zagrijavanje i hlađenje u temperaturnom području od 200 do 650 °C) [7]

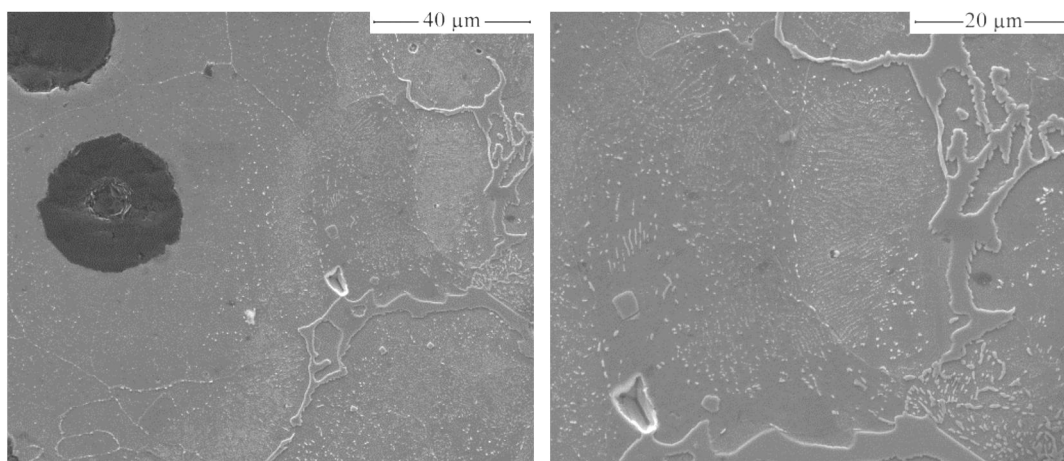
Povišeni udjeli molibdena u nodularnom lijevu s visokim udjelom silicija dovode do izlučivanja sitnih primarnih karbida po granicama zrna tijekom skrućivanja (slika 2.13)

[7, 30]. Radi se o karbidima Fe_2MoC ili $\text{Fe}_2\text{MoC}/\text{M}_6\text{C}$ tipa [27]. Ti karbidi su stabilni i ne razlažu se na temperaturama na kojima se primjenjuju odljevci od SiMo nodularnog lijeva.



Slika 2.13. Molibdenovi karbidi po granicama feritnih zrna u SiMo nodularnom lijevu:
a) metalografska snimka mikrostrukture, b) snimka mikrostrukture pretražnim elektronskim mikroskopom [30]

Istraživanja [26] su pokazala da se nakon feritizacijskog žarenja SiMo nodularnog lijeva koji sadrži 4 mas. % silicija i 1,4 mas. % molibdena na 800 °C u trajanju od 3,5 h i hlađenja brzinom od 0,6 °C/min u intervalu od 800 do 650 °C te brzinom od 3 °C/min u intervalu od 650 do 300 °C u mikrostrukтури pojavljuju sitni sekundarni karbidi molibdena u feritnim zrnima (slika 2.14).



Slika 2.14. Snimke mikrostrukture SiMo nodularnog lijeva (4 mas. % Si, 1,4 mas. % Mo) pretražnim elektronskim mikroskopom. U feritnim zrnima mogu se uočiti fini sekundarni karbidi molibdena [26]

Zbog korisnih učinaka, udio molibdena u SiMo nodularnom lijevu kreće se od 0,4 do 1,1 mas. % (tablica 2.1).

Odljevci od SiMo nodularnih ljevova moraju imati što nižu ekspanziju na visokim temperaturama. Podaci u tablici 2.10 pokazuju kako udjeli silicija i molibdena nemaju

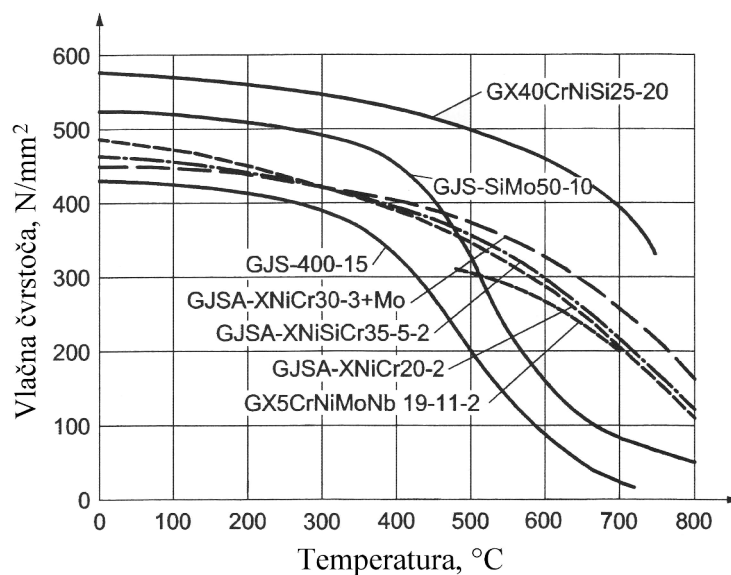
značajniji utjecaj na koeficijent toplinske ekspanzije feritnih nodularnih ljevova. Pored toga, može se vidjeti kako se koeficijent toplinske ekspanzije povećava s porastom temperature.

Tablica 2.10. Prosječna vrijednost koeficijenta toplinske ekspanzije feritnih nodularnih ljevova [7]

Udio elemenata, mas. %				Prosječna vrijednost koeficijenta toplinske ekspanzije ($\cdot 10^{-6}/K$) između 20 °C i					
C	Si	Mn	Mo	100 °C	200 °C	300 °C	540 °C	760 °C	815 °C
3,78	2,16	0,5	-	-	-	-	13,0	13,9	-
3,78	2,28	0,49	0,95	-	-	-	12,1	13,3	-
3,39	3,59	0,38	-	9,89	11,83	12,41	-	-	12,96
3,79	4,00	0,37	-	9,89	11,83	12,81	-	-	14,16
3,34	4,02	0,36	1,97 ^{a)}	-	-	-	12,2	-	13,9
3,45	4,03	0,39	-	8,33	11,68	12,87	-	-	13,3
3,36	4,06	0,36	1,98	-	-	-	12,9	-	14,3
3,79	4,12	0,38	-	10,67	12,66	13,42	-	-	13,55
3,07	4,15	0,34	-	-	-	-	12,2	-	13,9
3,05	4,18	0,35	0,98	-	-	-	12,1	-	13,3
3,06	4,21	0,34	4,09	-	-	-	11,9	-	13,3
3,05	4,23	0,34	2,04	-	-	-	12,1	-	13,3

^{a)} dodatak 1,05 mas.% Al

SiMo nodularni ljevovi imaju višu vlačnu čvrstoću na visokim temperaturama od nelegiranih feritnih nodularnih ljevova. Međutim, na slici 2.15 može se vidjeti da se njihova vlačna čvrstoća naglo smanjuje na temperaturama > 400 °C.

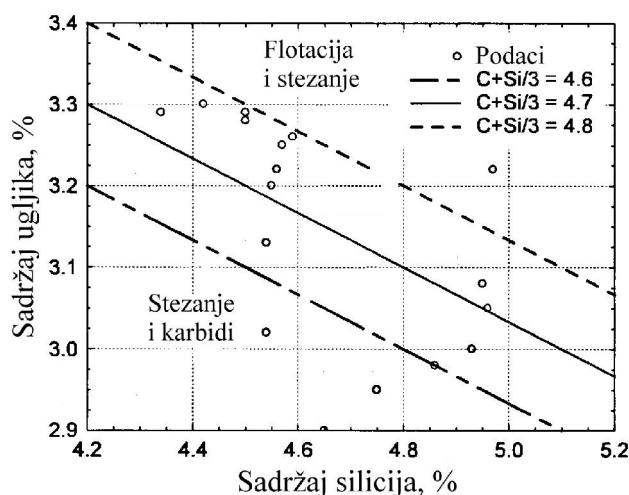


Slika 2.15. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću feritnih i austenitnih nodularnih ljevova te dvije kvalitete legiranog čeličnog lijeva [7]

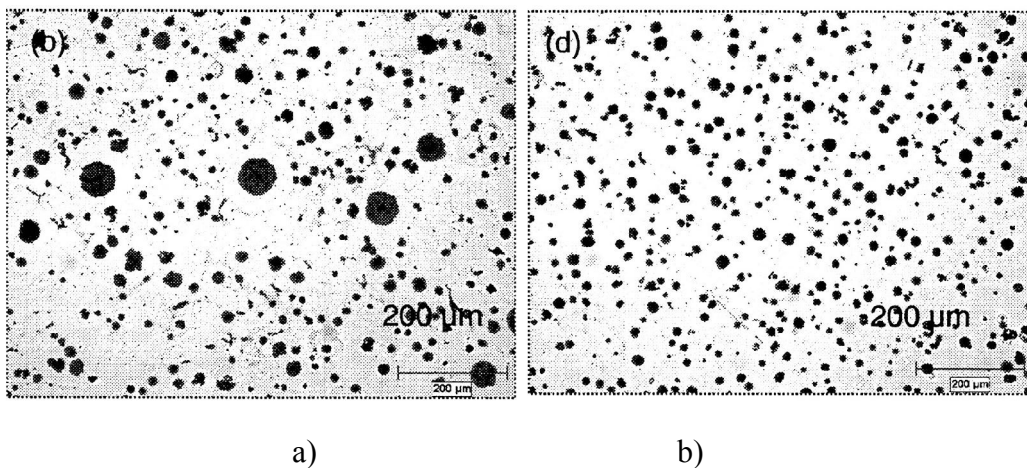
U usporedbi s austenitnim nodularnim ljevovima, SiMo nodularni ljevovi imaju veću toplinsku vodljivost i manji koeficijent toplinske ekspanzije, što je prednost kada su odljevci izloženi visokim temperaturama ispušnih plinova [28]. Međutim, austenitni nodularni ljevovi i legirani čelični ljevovi pokazuju manji pad vlačne čvrstoće na visokim temperaturama od SiMo nodularnih ljevova (slika 2.15). Pored toga, vlačna čvrstoća opada

konstantno a ne naglo kao kod SiMo nodularnih ljevova. Iz navedenih razloga austenitni nodularni ljevovi i legirani čelični ljevovi povoljniji su izbor za odljeve koji se primjenjuju na temperaturama $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zbog visokih udjela silicija, udio **ugljika** se treba kretati u granicama od 2,5 do 3,4 mas. % da bi se izbjegle previsoke vrijednosti ugljičnog ekvivalenta (CE) i s tim povezana flotacija grafitnih čestica te izlučivanje velikih grafitnih nodula prije eutektične reakcije (slike 2.16 i 2.17.a) [3, 8]. Udio ugljika treba se smanjivati s povećanjem udjela silicija i debljine stijenke odljevka. Ukoliko se proizvode odljevci s debljinom stijenke $< 25\text{ mm}$, optimalna vrijednost ugljičnog ekvivalenta iznosi $\sim 4,7$ [31]. Na slici 2.17.b može se vidjeti da se u tom slučaju tijekom skrućivanja izlučuju nodule podjednake veličine.



Slika 2.16. Utjecaj udjela silicija na udio ugljika u SiMo nodularnom lijevu [31]



Slika 2.17. Metalografske snimke mikrostrukture SiMo nodularnog lijeva koji sadrži 4,95 mas. % Si: a) CE= 4,89, b) CE = 4,7 [31]

Preniske vrijednosti ugljičnog ekvivalenta povećavaju volumno stezanje te mogućnost nastanka karbida tijekom skrućivanja. Osim toga, prenizak udio ugljika ili/i previsok udio silicija rezultiraju smanjenjem toplinske vodljivosti, što može dovesti do smanjenja otpornosti na toplinski umor.

Magnezij je ključan element koji omogućuje formiranje nodularnog oblika grafitnih čestica tijekom skrućivanja. Optimalni udio kreće se od 0,035 do 0,05 mas. % [1, 4].

Previsoki udjeli **sumpora** nisu poželjni jer magnezij ima visok afinitet prema tom elementu. Određeni udio sumpora je potreban jer je spoj MgS sastavni dio uključaka na kojima se izlučuju grafitne čestice tijekom skrućivanja. Optimalni udio **sumpora** kreće se od 0,008 do 0,015 mas. % [1, 4].

Fosfor je element koji sa željezom stvara spoj Fe_3P koji se izlučuje po granicama zrna, što u konačnici povećava krhkost nodularnog lijeva [1, 4]. Zbog toga udio fosfora treba biti što niži.

Udjeli **elemenata koji pospješuju stvaranje karbida i perlita** moraju se održavati što nižima da bi se dobila feritna metalna osnova bez karbida [3]. Udio mangana trebao bi biti $< 0,3$ mas. % [27].

Otpornost na stvaranje odgora i pukotina može se dodatno poboljšati dodatnim legiranjem s elementima kao što su **krom, aluminij, vanadij i titan** [27]. Primjer takvog kompleksnog legiranog materijala je nodularni lijev koji se označava kao SiMo1000 i može se primjenjivati na temperaturama do $945\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27, 32].

Udio ferita u metalnoj osnovi SiMo nodularnog lijeva trebao bi iznositi min. 85 %, a udio molibdenovih karbida maks. 5 % [7, 27]. **Udio perlita** trebao bi biti što manji. Perlit nema tipičnu lamelarnu strukturu, već globularnu i nalazi se po granicama feritnih zrna (slika 2.13) [8]. Takva struktura perlita rezultat je precipitacije ugljika po granicama zrna zbog visokog udjela silicija u austenitu (silicij otežava difuziju ugljika ka grafitnim nodulama) [8].

Nodularnost u SiMo nodularnom lijevu trebala bi biti $\geq 80\%$, kao i kod ostalih vrsta nodularnog lijeva [8, 27]. **Broj nodula** trebao bi biti ≥ 100 nodula/ mm^2 , zbog čega treba cijepiti talinu [8, 27]. Brzina difuzije ugljika u austenitu smanjuje se s porastom udjela silicija [8]. Ako je broj nodula visok, manja je udaljenost između njih, čime se nadoknađuje smanjena difuzija. Time se olakšava difuzija ugljika iz austenita na nodule, što u konačnici omogućava stvaranje ferita.

2.3. Proizvodnja SiMo nodularnog lijeva

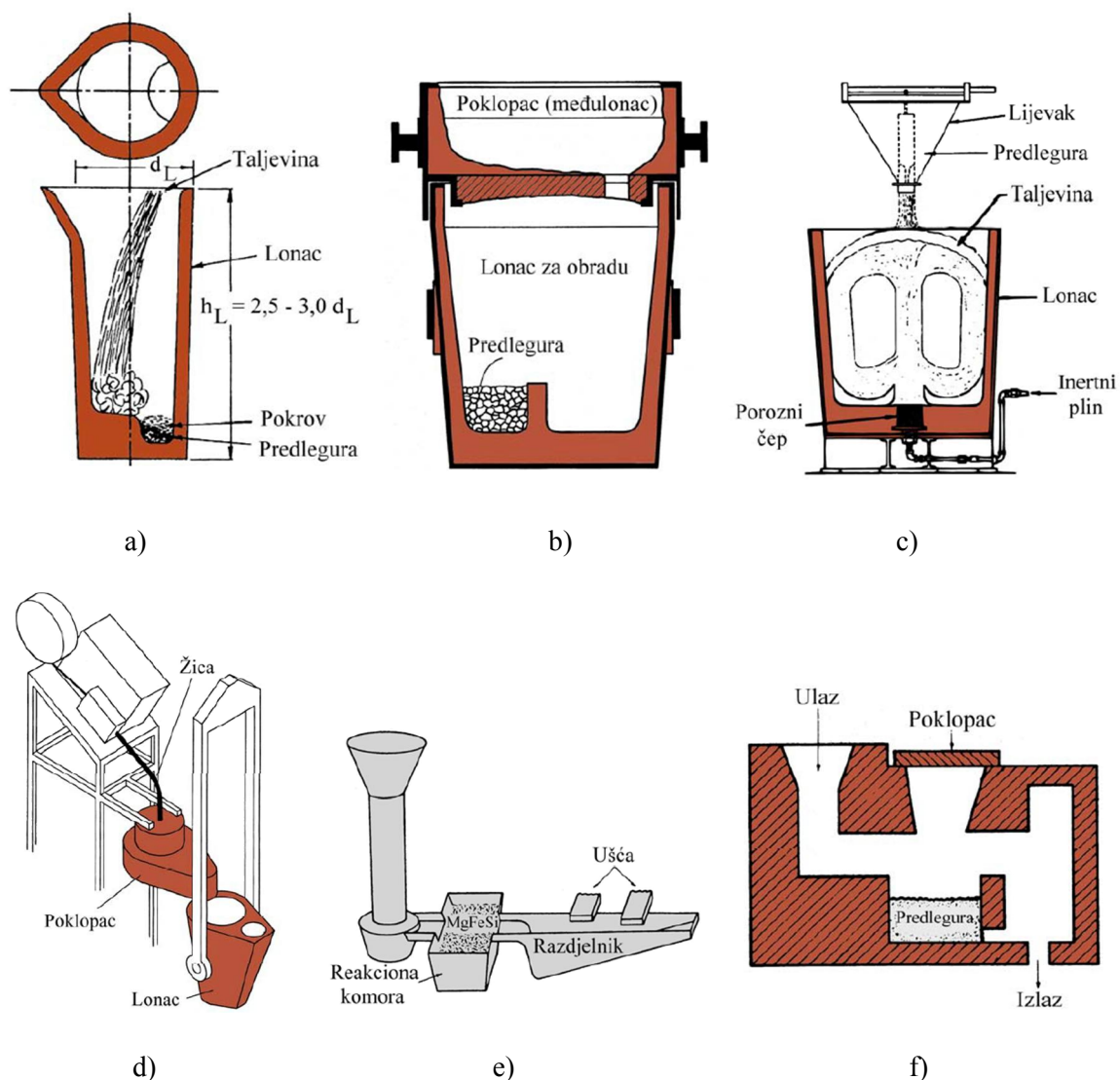
2.3.1. Proizvodnja i obrada primarne taline (nodulacija)

Prva faza u procesu proizvodnje Si-Mo nodularnog lijeva je izrada primarne taline odgovarajućeg kemijskog sastava, najčešće u indukcijskim ili kupolnim pećima [1]. Kao sirovine koriste se sirovo željezo, čelični otpad, povratni nodularni lijev (uljevnj sustavi, pojila, neispravni odljevci), otpadni nodularni lijev, ferolegure (FeSi , FeMo), SiC i sredstvo za naugličenje. U kupolnim pećima, pored navedenih sirovina, još se koristi i lijevaonički koks i talitelji (vapnenac). Posebnu pažnju treba posvetiti kemijskom sastavu sirovina. Udio karbidotvornih elementa (npr. kroma, mangana, vanadija) i perlitizatora

(npr. bakra, kositra, antimona) treba biti što niži kako bi se izbjeglo izlučivanje karbida navedenih elemenata te perlita. Ako je udio sumpora visok, što može biti slučaj kada se primarna talina izrađuje u kupolnoj peći, potrebno je provesti odsumporavanje izvan peći.

Druga, ključna faza u procesu proizvodnje nodularnog lijeva je obrada primarne taline, tzv. nodulacija [1]. U toj fazi u primarnu talinu dodaju se elementi, tzv. nodulatori ili sferoidizatori, koji omogućavaju da se grafit tijekom skrućivanja izluči u obliku nodula. Najčešće se radi o magneziju, koji se može dodati u čistom obliku ili u obliku legure (FeSiMg, FeNiMg) radi boljeg iskorištenja. Navedene legure, koje se u praksi nazivaju predlegurama (jer nije cilj legiranje taline već samo unos elemenata koji djeluju kao nodulatori), često sadrže i manji udio cerija i elemenata rijetkih zemalja (npr. lantana) jer ti elementi također omogućavaju stvaranje nodularnog oblika grafitnih čestica tijekom skrućivanja.

Dodatak nodulatora, odnosno obrada primarne taline može se provesti na različite načine (slika 2.18).



Slika 2.18. Shematski prikaz postupaka obrade primarne taline (nodulacije): a) „Sandwich“ postupak, b) „Tundish cover“ postupak, c) „Osmose“ postupak, d) „Cored Wire“ postupak, e) „In Mould“ postupak, f) „Flotret“ postupak [1]

Postupak obrade u otvorenom loncu („Sandwich“ postupak) najčešće se koristi za proizvodnju nodularnog lijeva [1]. Predlegura se stavlja u džep na dnu lonca, koji je prethodno predgrijan, i pokriva čeličnom strugotinom kako ne bi odmah došlo do otapanja predlegure kada se ulije primarna talina. Na taj način postiže se veće iskorištenje predlegure, odnosno magnezija. Ovaj postupak obrade je jednostavan i niski su troškovi. Negativna strana je velika količina dima i prašine, intenzivno bljeskanje te manje iskorištenje magnezija u usporedbi s ostalim postupcima.

„Tundish Cover“ postupak je karakterističan po poklopcu na vrhu lonca u koji se ulijeva talina [1]. Kroz otvor u dnu poklopca talina odlazi u lonac gdje otapa predleguru. Poklopac onemogućava da pare magnezija odlaze u atmosferu, što rezultira njegovim boljim iskorištenjem u odnosu na prethodno opisani postupak. Pored toga, takva konstrukcija bolje prigušuje emisiju dima i bljeskanje tijekom obrade zbog čega je manja štetnost za ljude.

Kod „Osmose“ postupka inertni plin uvodi se kroz porozni čep ugrađen u dno lonca s ciljem miješanja taline i predlegure za obradu, čime se pospješuje njeno otapanje i usvajanje magnezija u talinu [1]. Iznad lonca nalazi se žlijeb kroz koji se predlegura dodaje na površinu primarne taline u loncu.

„Cored Wire“ postupak koristi žicu u kojoj se u obliku punjenja nalazi predlegura [1]. Žica je namotana na kolut. Pomoću odgovarajućeg mehanizma žica se odozgo okomito uvodi u primarnu talinu koja se nalazi u loncu. Kako bi se dobilo što veće iskorištenje predlegure, odnosno magnezija, žica se treba taliti pri samom dnu lonca. Na taj se način postiže maksimalno vrijeme kontakta taline s parama magnezija koje nastaju tijekom otapanja predlegure. Dodatak žice obično se izražava u metrima i ovisi o udjelu sumpora u primarnoj talini.

„In Mould“ postupak obrade provodi se u kalupu [1]. Predlegura se stavlja u reakcijsku komoru koja je sastavni dio uljevnog sustava. Primarna talina ulijeva se u kalup i otapa predleguru pri čemu se obrađuje. Dolazi do visokog iskorištenja magnezija (~ 90 %). Budući da se sve reakcije odvijaju u kalupu, emisija dima i reakcijskih para je minimalna.

„Flotret“ postupak ili postupak obrade protjecanjem koristi reakcijsku komoru koja se smješta između peći i kalupa ili lonca [1]. Po koncepciji je sličan postupku obrade u kalupu. Površine reakcijske komore obložene su vatrootpornim materijalom kako bi se izbjegli visoki padovi temperature taline. Primarna talina ulijeva se u reakcijsku komoru i otapa predleguru što rezultira obradom.

2.3.2. Cijepljenje

Cijepljenje je važan korak u procesu proizvodnje SiMo nodularnog lijeva jer ima niz pozitivnih učinaka na njegovu mikrostrukturu, a time i svojstva odljevaka [1, 4]. Adekvatnim cijepljenjem poboljšava se nukleacijski potencijal taline, jer se povećava broj pogodnih mikro-uključaka u talini na kojima se može odvijati heterogena nukleacija grafitnih čestica. To rezultira većim brojem nodula i većom nodularnošću. Veći broj nodula olakšava pretvorbu austenita u ferit.

Budući se cijepljenjem poboljšava nukleacijski potencijal, smanjuje se pothlađenje taline tijekom skrućivanja. Time se značajno smanjuje mogućnost stvaranja nepoželjnog željeznog karbida, odnosno cementita, što je poseban problem kod skrućivanja tankostijenih odljevaka.

Cijepljenjem se postiže sitnozrnata struktura. Budući da karbidotvorni elementi, kao što su krom, vanadij, molibden, mangan itd., segregiraju po granicama zrna, očito je da se cijepljenjem povećava njihova raspršenost. To u konačnici smanjuje mogućnost stvaranja međučelijastih karbida, odnosno karbida po granicama zrna. Međutim, ako je visok udio karbidotvornih elemenata u kemijskom sastavu, cijepljenjem se neće spriječiti stvaranje navedenih karbida.

Kao cjepivo najčešće se upotrebljava FeSi koji sadrži 70 do 75 mas. % silicija te 1 do 2 mas. % aluminijski i 0,2 do 0,5 mas. % kalcija [4]. Osim navedenih elemenata, cjepivo može sadržavati i druge elemente kako bi se povećala njegova učinkovitost. Barij i cirkonij produžuju djelovanje cjepiva, što je posebno značajno ako se talina duže zadržava te u slučaju sporog skrućivanja, kao što je slučaj kod debelostijenih odljevaka. Cjepivo koje sadrži bizmut u kombinaciji s cerijem, odnosno elementima rijetkih zemalja povećati će broj nodula, što je posebno značajno kod proizvodnje tankostijenih odljevaka. Cerij, kao sastavni dio cjepiva, neutralizira antinodularizatore, odnosno elemente koji sprječavaju stvaranje nodularnog grafita. Cijepljenjem s cjepivom koje osim aluminijski i kalcija sadrži sumpor i kisik postiže se visok broj nodula te se poboljšava nodularnost i smanjuje sklonost k stvaranju željeznog karbida, odnosno cementita tijekom skrućivanja.

Cjepivo se može dodati u lonac zajedno s FeSiMg predlegurom, zatim u mlaz taline tijekom ulijevanja u kalup ili se može staviti u kalup. U praksi se obično kombiniraju ove metode. Količina cjepiva ovisi o metodi dodatka, debljini stijenke odljevka i kemijskom sastavu cjepiva.

2.3.3. Ostali proizvodni zahtjevi

Uzimajući u obzir da visok ugljični ekvivalent negativno utječe na livljivost te da postoji povećana sklonost ka stvaranju oksida zbog visokog udjela silicija, lijevanje treba provesti brzo, ali uz što manje turbulencija [4]. Temperatura lijevanja trebala bi biti za ~ 40 °C viša od temperature koja se obično primjenjuje kod lijevanja odljevka slične debljine stijenke od nodularnih ljevova koji ne sadrže visok udio silicija [4].

Zbog veće količine troske (koja potječe od visokog udjela silicija), pažnju treba obratiti na konstrukciju uljevnog sustava. Visok udio silicija povećava volumno stezanje tijekom skrućivanja, što zahtijeva veća pojila.

Istresanje odljevaka iz kalupa i rukovanje mora biti pažljivo radi izbjegavanja pukotina i mogućih lomova zbog povišene krhkosti. Odljevci se trebaju toplinski obraditi da bi se poboljšala žilavost. Obično se provodi žarenje na 790 °C u trajanju od 4 h, nakon čega slijedi hlađenje u peći do 200 °C [3]. Ako je u strukturi prisutna veća količina karbida i perlita, temperatura žarenja mora se povećati.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru ovog diplomskog rada analizirana je mikrostruktura i ispitana su vlačna svojstva, tvrdoća i žilavost na sobnoj temperaturi te otpornost na oksidaciju na temperaturi od 850 °C nodularnih ljevova s različitim udjelima silicija i molibdena.

3.1. Izrada talina SiMo nodularnog lijeva

Taljenje i izrada primarnih talina odgovarajućeg kemijskog sastava provedeni su u srednje-frekventnoj indukcijskoj peći. Uložak se sastojao od čeličnog otpada (ČO), povratnog materijala iz ljevaonice (PM), sirovog željeza (SŽ), FeSi, FeMo, sredstva za naugljichenje i sredstva za predobradu (tablica 3.1). Omjer masa ČO : masa PM : masa SŽ iznosio je 0,4 : 0,6 : 1. Dodatak sredstva za predobradu iznosio je 0,1 % u odnosu na masu primarne taline.

Tablica 3.1. Kemijski sastav komponenti uloška

Element, mas. %	Komponenta uloška						
	ČO	PM	SŽ	FeSi	FeMo	Sredstvo za naugljichenje	Sredstvo za predobradu
C	0,035	3,62	4,14	0,03	0,08	99,2	-
Si	0,012	2,76	0,18	73,03	1,1	-	62 - 69
Mn	0,203	0,18	0,025	-	-	-	-
P	0,016	0,035	0,032	0,03	0,005	-	-
S	0,015	0,016	0,003	0,01	0,004	0,02	-
Mg	-	0,035	-	-	-	-	-
Cu	0,019	-	-	-	0,05	-	-
Cr	0,022	-	-	-	-	-	-
Mo	0,002	-	-	-	68	-	-
Ni	0,017	-	-	-	-	-	-
Nb	0,003	-	-	-	-	-	-
V	<0,001	-	-	-	-	-	-
Sn	0,002	-	-	-	-	-	-
Al	0,026	-	-	1,29	-	-	3 - 5
Ti	0,001	-	-	-	-	-	-
W	0,005	-	-	-	-	-	-
Co	0,002	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	-	-	-	-	0,6 -1,9
Zr	-	-	-	-	-	-	3 - 5
N	-	-	-	-	-	0,01	-
Pepeo	-	-	-	-	-	0,5	-
Fe	ost.	ost.	ost.	ost.	ost.	-	ost.

Primarne taline ispuštene su iz indukcijske peći u predgrijani lonac (slika 3.1.a), nakon čega je provedena nodulacija (slika 3.1.b) postupkom sa žicom punjenom s predlegurom FeSiMg koja sadrži 42 mas. % Si, 29 mas. % Mg, 0,5 mas. % Ce, 0,2 mas. % La, 1,4 mas. % Ca, 0,9 mas. % Al, a ostatak do 100 % čini Fe. Za cijepljenje u loncu

upotrijebljeno je cjepivo sljedećeg kemijskog sastava: 70 mas. % Si, 1,5 mas. % Ca, 1,9 mas. % Al i 2,2 mas. % Ba (Fe čini ostatak do 100 %). Dodatak je iznosio 0,6 % u odnosu na masu taline. Ukupno su izrađene tri taline nodularnog lijeva legiranog silicijem i molibdenom koje su označene na sljedećim oznakama: SiMo-1, SiMo-2 i SiMo-3. Ciljani udjeli silicija i molibdena bili su: SiMo-1 = 4,2 mas. % Si, 0,6 mas. % Mo; SiMo-2 = 4,5 mas. % Si, 0,6 mas. % Mo; SiMo-3 = 4,8 mas. % Si, 0,6 mas. % Mo.



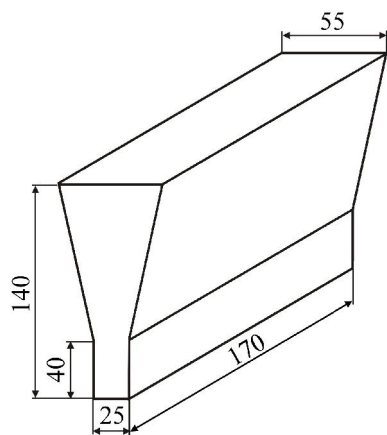
a)

b)

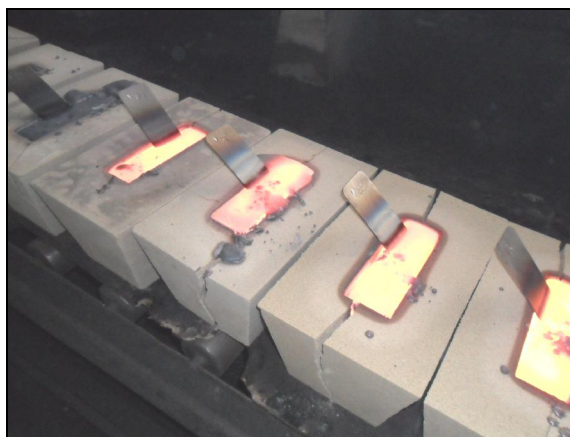
Slika 3.1. a) ispušt primarne taline iz srednje-frekventne indukcijske peći u predgrijani lonac, b) nodulacija postupkom sa žicom punjenom s predlegurom FeSiMg

3.2. Lijevanje Y-probi

Jednokratni kalupi za lijevanje Y-probi izrađeni su od kvarcnog pijeska, dok je natrijev silikat korišten kao vezivo, a CO₂ kao katalizator. Od svake taline SiMo nodularnog lijeva odlivene su tri Y-probe koje odgovaraju tipu II prema normi EN 16124:2011 (slika 3.2). Temperatura lijevanja kretala se u intervalu od 1390 do 1420 °C.



a)



b)

Slika 3.2. a) oblik i dimenzije Y-probi, b) Y-probe odlivene u jednokratne kalupe

Tijekom ulijevanja talina SiMo nodularnog lijeva u kalupe, u mlaz svake taline dodano je cjepivo koje sadrži 73 mas. % Si, 1 mas. % Ca, 1 mas. % Al i 1,8 mas. % Ce (ostatak do 100 % je Fe). Dodatak cjepiva je iznosio 0,25 % u odnosu na masu taline.

3.3. Ispitivanje vlačnih svojstava

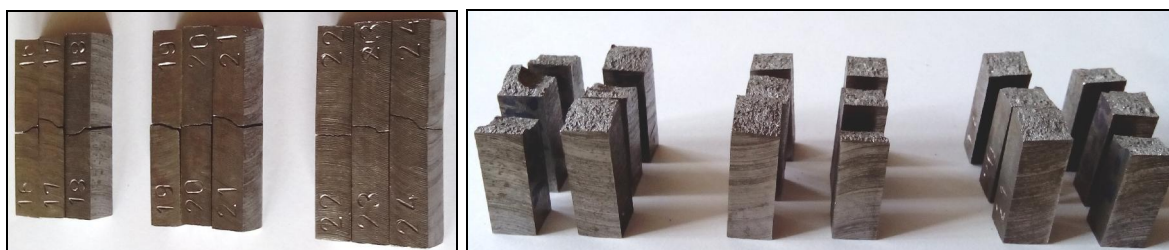
Ispitivanje vlačnih svojstava provedeno je na sobnoj temperaturi prema normi EN ISO 6892-1:2009. Po jedan ispitni uzorak za svaki SiMo nodularni lijev izrađen je iz odlivenih Y-probi. Njihov oblik i dimenzije usklađeni su s normom EN 16124:2011. Promjer ispitnih uzoraka iznosio je 14 mm. Na slici 3.3 prikazani su ispitni uzorci nakon provedenog vlačnog ispitivanja.



Slika 3.3. Ispitni uzorci nakon provedenog vlačnog ispitivanja

3.4. Ispitivanje žilavosti

Žilavost je ispitana pri sobnoj temperaturi na Charpy-evom batu s maksimalnim udarnim radom loma od 150 J. Za svaki SiMo nodularni lijev korištena su tri ispitna uzorka dimenzije 10 x 10 x 55 mm bez zareza koji su izrađeni iz odlivenih Y-probi. Ispitivanje je provedeno prema normi EN ISO 148-1:2010. Žilavost je određena kao srednja vrijednost tri mjerenja. Ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja žilavosti prikazani su na slici 3.4.



Slika 3.4. Ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja žilavosti

3.5. Ispitivanje tvrdoće

Kako bi se utvrdio utjecaj udjela silicija i molibdena na tvrdoću, ispitivanje tvrdoće je provedeno na sva tri SiMo nodularna lijeva te još dodatno na jednom feritnom nodularnom lijevu (GJS-1) koji sadrži 2,11 mas. % Si i 0,002 mas. % Mo i jednom feritno-perlitnom nodularnom lijevu (GJS-2) koji sadrži 3 mas. % Si i 0,009 mas. % Mo. Od svakog od navedenih nodularnih ljevova uzet je jedan komad ispitnog uzorka koji je upotrijebljen za ispitivanje žilavosti i na njemu su napravljena tri mjerenja tvrdoće metodom prema Vickersu u skladu s normom EN ISO 6507-1 (slika 3.5). Sila utiskivanja piramide u uzorke iznosila je 196,1 N, a vrijeme utiskivanja iznosilo je 15 s. Tvrdoća je određena kao srednja vrijednost tri mjerenja.



Slika 3.5. Ispitivanje tvrdoće metodom prema Vickersu

3.6. Ispitivanje otpornosti na oksidaciju

Ispitivanje otpornosti na oksidaciju je provedeno na sva tri SiMo nodularna lijeva te na jednom feritnom nodularnom lijevu koji sadrži 2,11 mas. % Si (GJS-1) i jednom feritno-perlitnom nodularnom lijevu koji sadrži 3 mas. % Si (GJS-2) kako bi se mogao utvrditi utjecaj udjela silicija na otpornost ka oksidaciji. Uzorci su stavljeni u porculanske zdjelice, koje su prije toga odžarene do konstantne mase na temperaturi od 850 °C, i držani 32 sata u peći na temperaturi od 850 °C (slika 3.6).

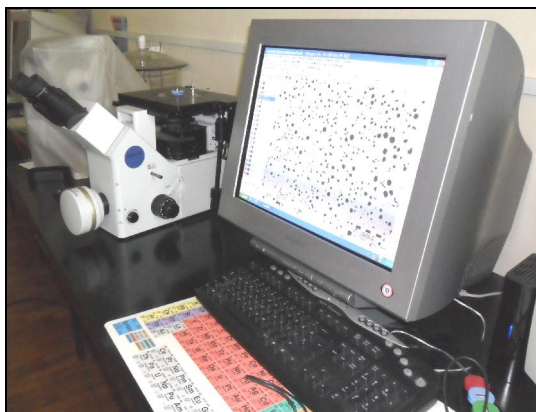


Slika 3.6. Zagrijavanje uzoraka u porculanskim zdjelicama u peći

Vaganje uzoraka zajedno sa zdjelicama provedeno je na digitalnoj vagi prije i nakon zagrijavanja u peći.

3.7. Metalografska analiza

Metalografska analiza SiMo nodularnih ljevova provedena je pomoću svjetlosnog metalografskog mikroskopa (slika 3.7.a) i pretražnog elektronskog mikroskopa (slika 3.7.b).



a)



b)

Slika 3.7. a) analiza uzoraka na svjetlosnom metalografskom mikroskopu OLYMPUS GX 51 koji je opremljen digitalnom kamerom i programskim paketom AnalySIS® Materials Research Lab za obradu slike, b) analiza uzoraka na pretražnom elektronskom mikroskopu TESCAN VEGA 5136MM koji je opremljen energijsko disperzijskim spektrometrom

Analiza mikrostrukture uzoraka na svjetlosnom metalografskom mikroskopu obuhvatila je određivanje broja grafitnih čestica i broja nodula/mm², nodularnosti grafita, udjela ferita u metalnoj osnovi te prisutnosti karbida. Broj nodula/mm² i nodularnost određeni su prema normi ASTM 2567-11 kao srednja vrijednost tri mjerenja. Udio ferita također je određen kao srednja vrijednost tri mjerenja. Nakon zagrijavanja, na svjetlosnom metalografskom mikroskopu određena je debljina oksidnog sloja na površini uzoraka. Priprema uzoraka sastojala se od brušenja i poliranja. Uzorci su nagrizeni u nitalu.

Na pretražnom elektronskom mikroskopu s energijsko disperzijskim spektrometrom analizirani su uzorci prije zagrijavanja radi utvrđivanja elemenata koji su prisutni u karbidima. Priprema uzoraka također se sastojala od brušenja i poliranja. Prijelomne površine na ostacima ispitnih uzoraka nakon ispitivanja žilavosti također se analizirane na pretražnom elektronskom mikroskopu s energijsko disperzijskim spektrometrom.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Kemijski sastav SiMo nodularnih ljevova

Kemijski sastav ispitivanih SiMo nodularnih ljevova prikazan je tablici 4.1.

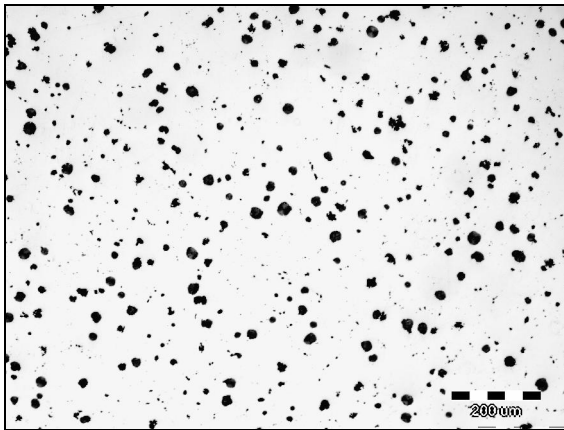
Tablica 4.1. Kemijski sastav SiMo nodularnih ljevova

Element	Udio elementa, mas. %		
	SiMo-1	SiMo-2	SiMo-3
C	3,32	3,15	3,05
Si	4,28	4,49	4,81
Mo	0,63	0,63	0,61
Mn	0,11	0,11	0,11
P	0,032	0,03	0,029
S	0,012	0,012	0,009
Mg	0,066	0,065	0,045
Cu	0,02	0,02	0,02
Cr	0,04	0,04	0,04
Ni	0,02	0,01	0,02
Nb	0,002	0,001	0,002
V	0,009	0,009	0,009
Sn	0,007	0,006	0,007
Al	0,009	0,009	0,012
Ti	0,01	0,01	0,01
CE	4,75	4,65	4,65

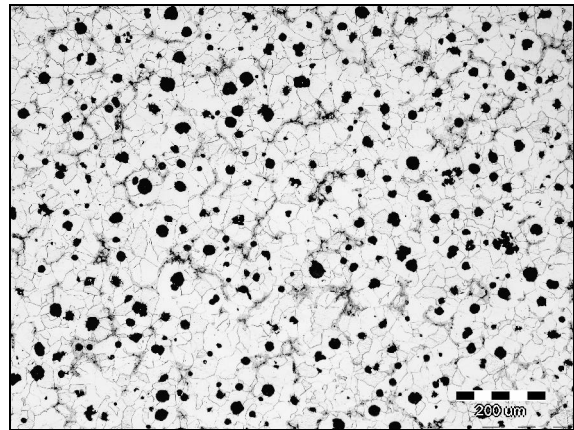
Iz tablice 4.1 može se vidjeti da su postignuti ciljani udjeli silicija i molibdena. Sva tri nodularna lijeva imaju nadeutektni sastav zbog visokih udjela silicija. Vrijednost ugljičnog ekvivalenta (CE) kreće se oko optimalne vrijednosti za ovu vrstu nodularnog lijeva, koja iznosi 4,7. U mikrostrukturi ne bi trebalo biti fosfidnog eutektika niti karbida kroma, vanadija, niobija i titana jer su udjeli tih elemenata niski. Udjeli sumpora i magnezija se nalaze u optimalnom području za nodularni lijev. Budući je udio perlitizatora, tj. bakra, kositra i mangana nizak, a udio silicija visok, metalna osnova sva tri nodularna lijeva trebala bi imati vrlo visok udio ferita, premda je moguć i određeni udio perlita s obzirom da molibden pospješuje njegovo stvaranje. Po granicama zrna mogu se očekivati karbidi molibdena jer je njegov udio povišen.

4.2. Mikrostrukturne značajke SiMo nodularnih ljevova

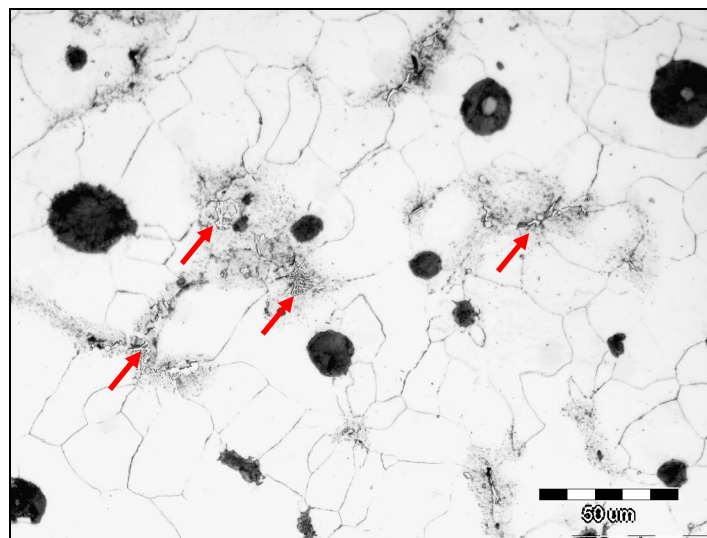
Metalografske snimke mikrostrukture SiMo nodularnih ljevova prikazane su na slikama 4.1 do 4.4, a u tablici 4.2 prikazane su njihove mikrostrukturne značajke.



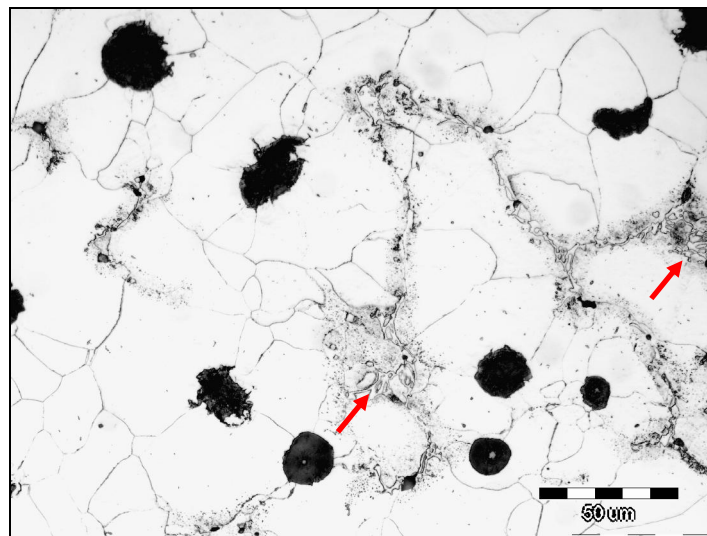
a)



b)

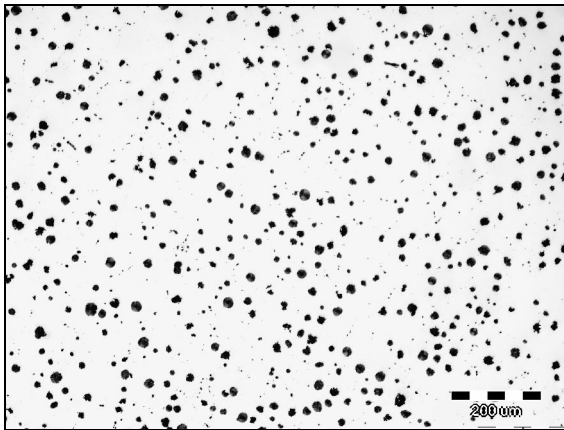


c)

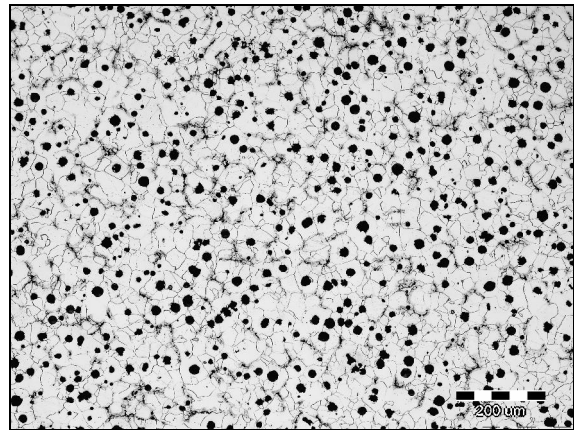


d)

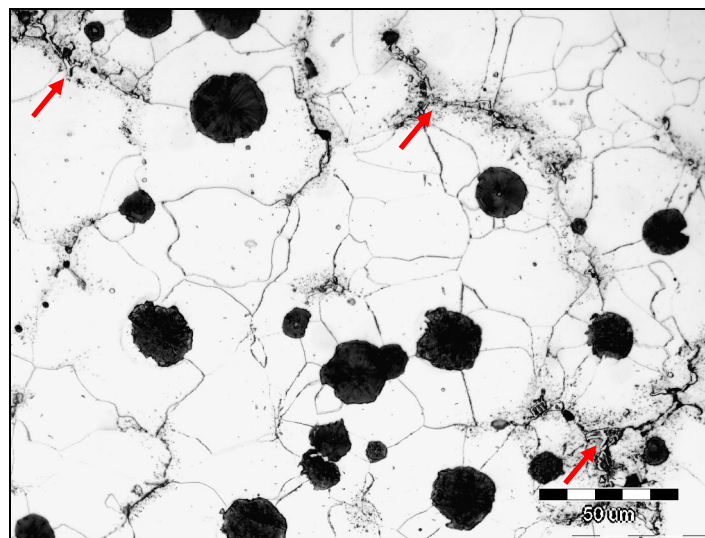
Slika 4.1. Metalografske snimke mikrostrukture SiMo-1: a) nenagrizeno stanje, b), c) i d) nagrizeno stanje, nital



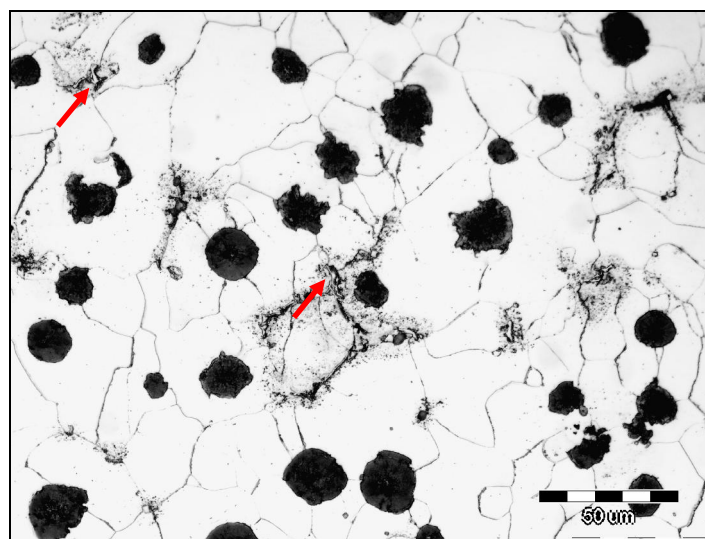
a)



b)

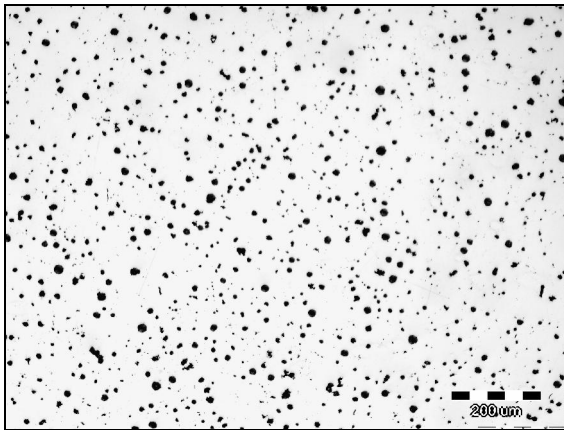


c)

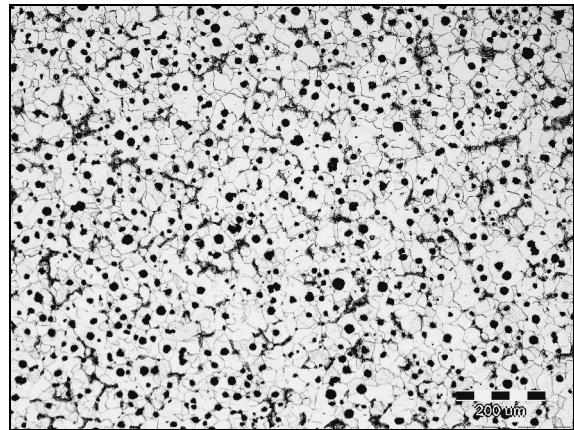


d)

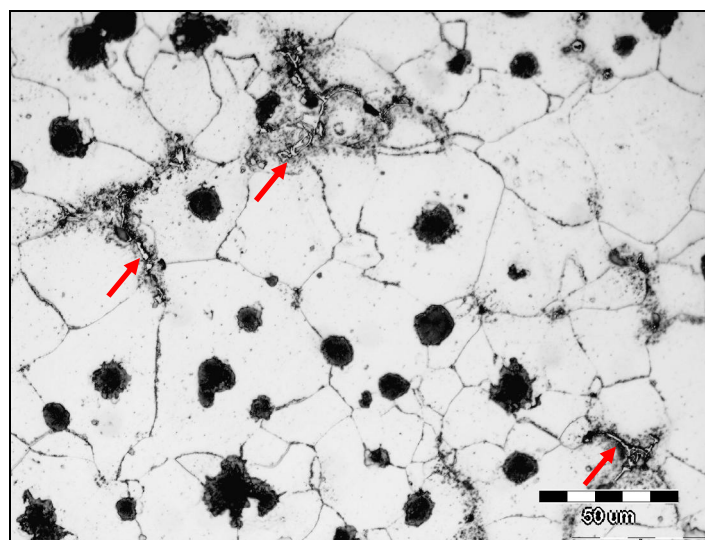
Slika 4.2. Metalografske snimke mikrostrukture SiMo-2: a) nenagrizeno stanje, b), c) i d) nagrizeno stanje, nital



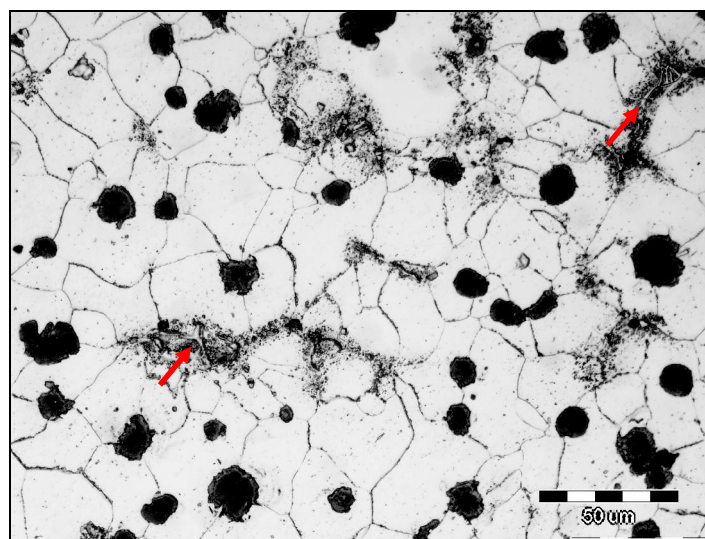
a)



b)

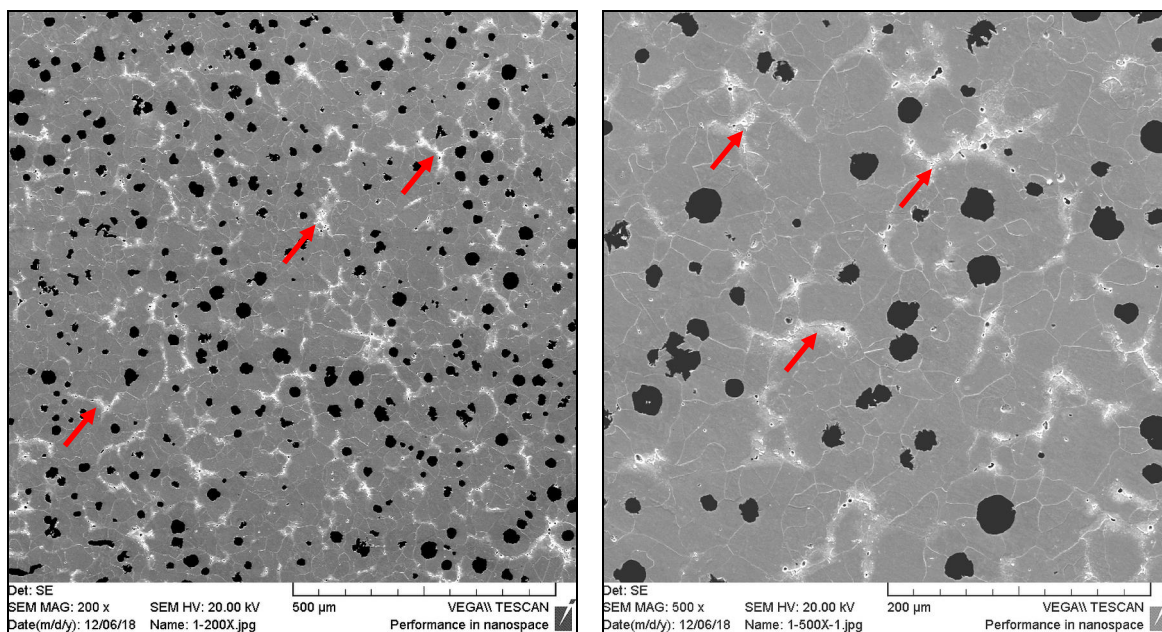


c)



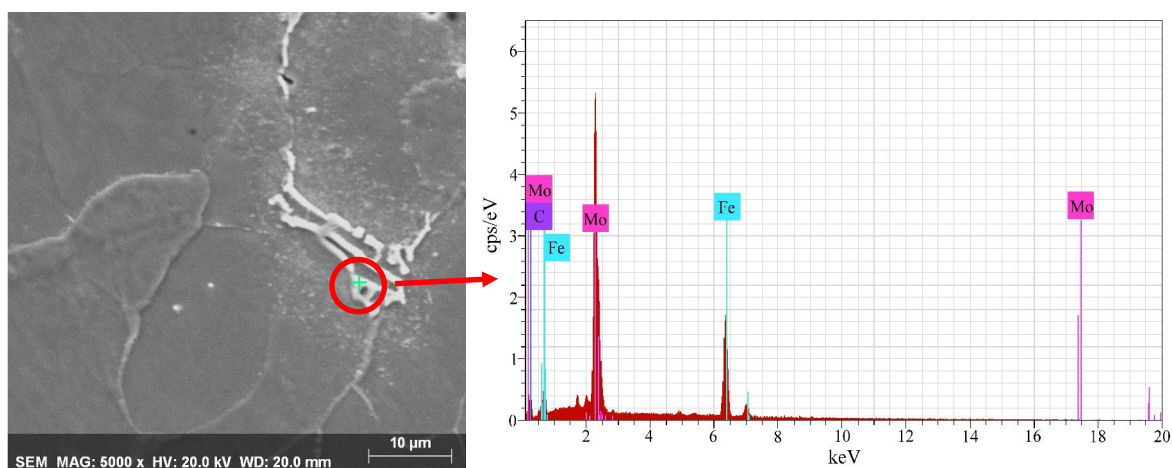
d)

Slika 4.3. Metalografske snimke mikrostrukture SiMo-3: a) nenagrizeno stanje, b), c) i d) nagrizeno stanje, nital



a)

b)



c)

Slika 4.4. a) i b) snimke mikrostrukture SiMo-1 nodularnog lijeva dobivene pretraženim elektronskim mikroskopom (SEM), c) rezultati točkaste analize karbida u SiMo-1 nodularnom lijevu dobiveni pretražnim elektronskim mikroskopom s energijsko disperzijskim spektrometrom (SEM + EDS)

Tablica 4.2. Mikrostrukturne značajke ispitivanih SiMo nodularnih lijevova

Nodularni lijev	Nodularnost, %	Broj nodula/mm ²	Udio ferita u metalnoj osnovi, %
SiMo-1 (4,28 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	78,46	176	94,6
SiMo-2 (4,49 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	82,93	299	95,8
SiMo-3 (4,81 mas. % Si, 0,61 mas. % Mo)	84,01	329	97,6

Na slikama 4.1 do 4.4 i u tablici 4.2 može se vidjeti da sva tri SiMo nodularna lijeva imaju visok broj nodula/mm² što ukazuje na visok nukleacijski potencijal taline koji potječe od visokog dodatka cjepiva i visokog udjela sirovog željeza u ulošku. Nodularnost se nalazi u prihvatljivim granicama za nodularni lijev. Udio ferita u metalnoj osnovi je visok i kreće se od 94,6 do 97,6 % što je rezultat visokog udjela silicija i niskog udjela elemenata koji pospješuju stvaranje perlita. Veliki broj nodula potpomogao je stvaranje ferita. Po granicama feritnih zrna prisutni su karbidi molibdena koji su nastali tijekom skrućivanja (slika 4.4). Perlit se također nalazi po granicama feritnih zrna i ima globularnu strukturu karakterističnu za ovu vrstu nodularnog lijeva. U većini slučajeva perlit okružuje karbide molibdena.

4.3. Vlačna svojstva SiMo nodularnih ljevova

U tablici 4.3 prikazana su vlačna svojstva ispitivanih SiMo nodularnih ljevova.

Tablica 4.3. Vlačna svojstva SiMo nodularnih ljevova

Nodularni lijev	$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A , %
SiMo-1 (4,28 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	523	587	3,8
SiMo-2 (4,49 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	532	596	3,3
SiMo-3 (4,81 mas. % Si, 0,61 mas. % Mo)	615	660	2,5

Podaci u tablici 4.3 pokazuju da sva tri SiMo nodularna lijeva imaju visoku vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja, što se prvenstveno može povezati s visokim udjelima silicija, ali i povišenim udjelima molibdena. Omjer $R_{p0,2}/R_m$ je također visok i kreće se od 0,891 do 0,932, što su znatno više vrijednosti nego kod uobičajenih feritnih, perlitnih i feritno-perlitnih nodularnih ljevova (omjer $R_{p0,2}/R_m$ kod tih ljevova kreće se 0,55 do 0,65) [33]. S povećanjem udjela silicija povećava se vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i omjer $R_{p0,2}/R_m$ jer se povećava intenzitet očvršćivanja ferita silicijem. Karbidi molibdena glavni su razlog niskih vrijednosti istezanja. Pored toga, porast udjela silicija također negativno utječe na istezanje zbog sve većeg očvršćivanja ferita.

4.4. Žilavost SiMo nodularnih ljevova

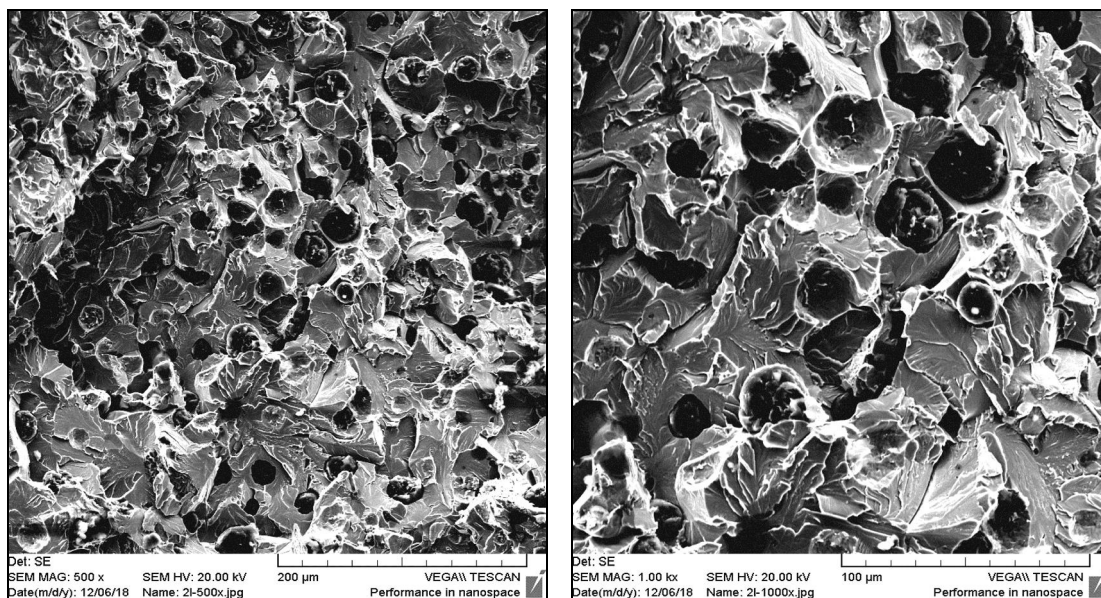
Rezultati ispitivanja žilavosti SiMo nodularnih ljevova prikazani su u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Žilavost SiMo nodularnih ljevova

Nodularni lijev	K , J/cm ²
SiMo-1 (4,28 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	15,2
SiMo-2 (4,49 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	13,6
SiMo-3 (4,81 mas. % Si, 0,61 mas. % Mo)	9,5

Iz tablice 4.4 može se vidjeti da ispitivani SiMo nodularni ljevovi imaju nisku žilavost. Glavni razlog za to su karbidi molibdena. Porast udjela silicija također negativno utječe na žilavost jer se povećava očvršćivanje ferita i smanjuje njegovu plastičnost.

Analizom prijelomnih površina uzoraka SiMo nodularnih ljevova nakon ispitivanja žilavosti (slika 4.5) ustanovljeno je da se radi o krhkom lomu, što je vidljivo po ravnim ploham koje su karakteristične za tu vrstu loma. Očito je da karbidi molibdena i očvršćivanje ferita silicijem povećavaju krhkost nodularnog lijeva i samim tim negativno utječu na njegovu žilavost.



Slika 4.5. Snimke prijelomne površine uzorka SiMo-1 nodularnog lijeva nakon ispitivanja udarnog rada loma dobivene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

4.5. Tvrdća SiMo nodularnih ljevova

U tablici 4.5 prikazane su izmjerene tvrdoće SiMo nodularnih ljevova.

Tablica 4.5. Tvrdća SiMo nodularnih ljevova

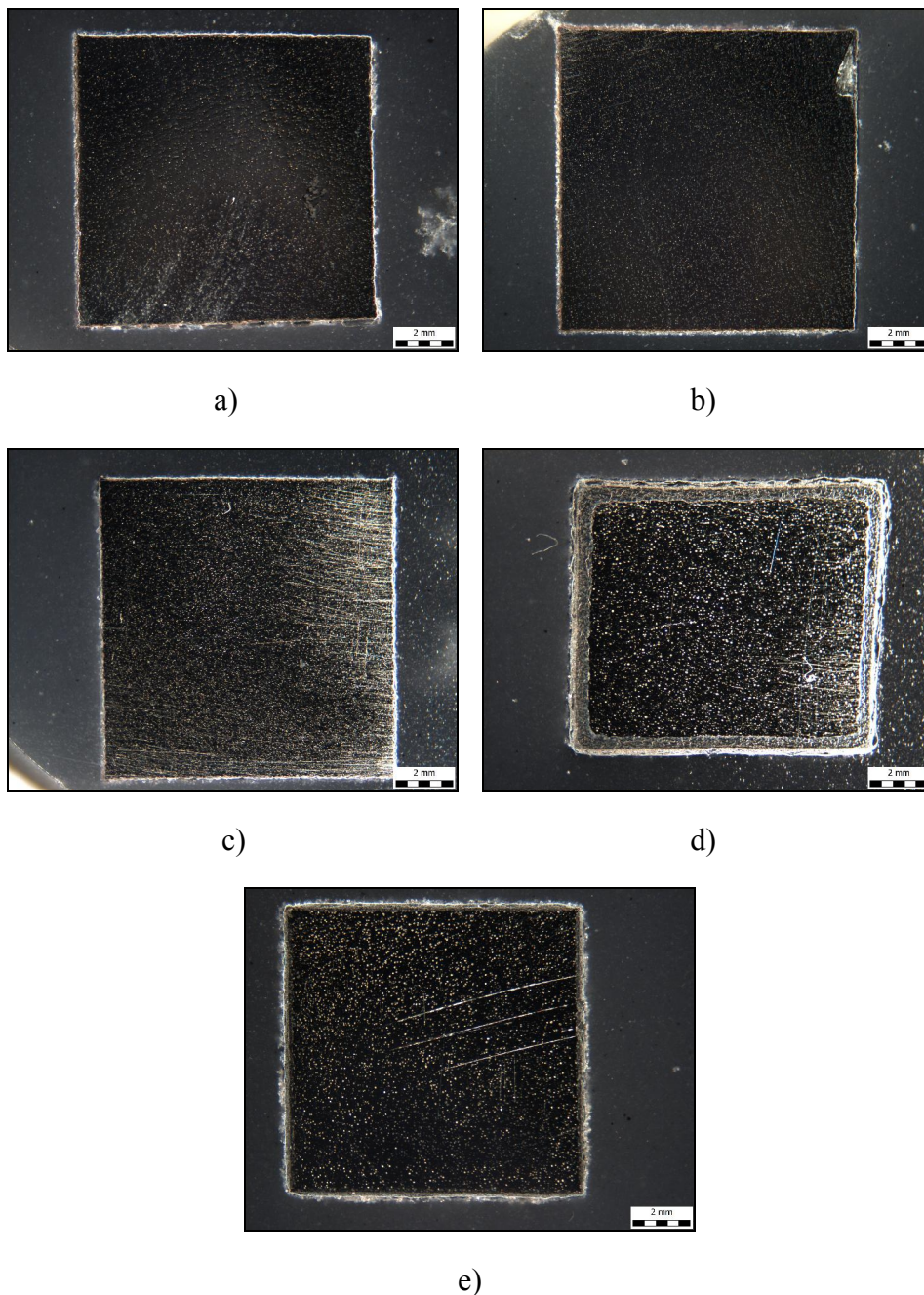
Nodularni lijev	Tvrdoća, HV 20
SiMo-1 (4,28 mas.% Si, 0,63 mas.% Mo)	240
SiMo-2 (4,49 mas.% Si, 0,63 mas.% Mo)	246
SiMo-3 (4,81 mas.% Si, 0,61 mas.% Mo)	258

Radi usporedbe, izmjerena je tvrdoća jednog feritnog nodularnog lijeva koji sadrži 2,11 mas. % Si (GJS-1) i jednog feritno-perlitnog nodularnog lijeva koji sadrži 3. mas. % Si (GJS-2). Dobivene su sljedeće vrijednosti tvrdoće: GJS-1 = 149 HV, GJS-2 = 185 HV.

Podaci u tablici 4.5 pokazuju da SiMo nodularni ljevovi imaju višu tvrdoću od feritnog nodularnog lijeva GJS-1 i feritno-perlitnog nodularnog lijeva GJS-2 jer u mikrostrukturi imaju karbide molibdena, a ferit je očvrstnut visokim udjelima silicija. Usporedbom svih izmjerenih tvrdoća može se zaključiti da tvrdoća raste s porastom udjela silicija.

4.6. Otpornost na oksidaciju ispitivanih nodularnih ljevova

Na slici 4.6 prikazane su snimke makrostrukture ispitivanih nodularnih ljevova nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h.



Slika 4.6. Snimke makrostrukture ispitivanih nodularnih ljevova nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h: a) SiMo-1, b) SiMo-2, c) SiMo-3, d) GJS-1, e) GJS-2

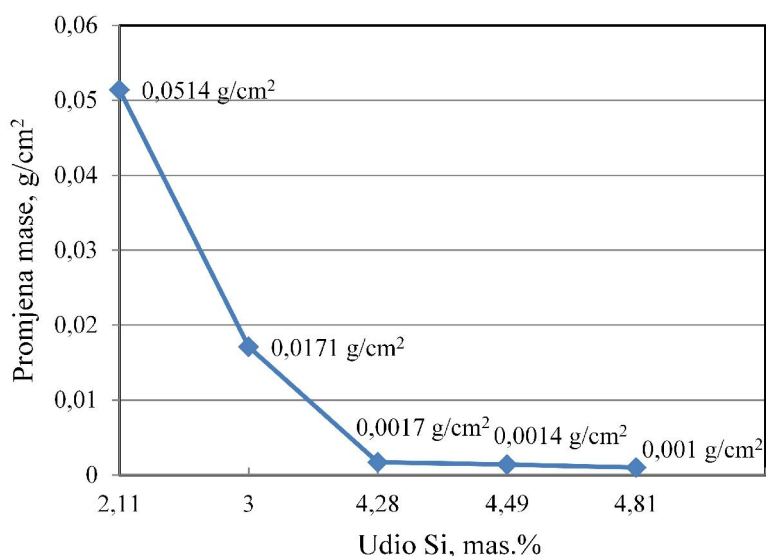
Na slici 4.6 može se vidjeti da su svi uzorci oksidirali tijekom zagrijavanja. Međutim, jasno se vidi da je debljina ogorjeline, odnosno oksidnog sloja daleko najveća na uzorku nodularnog lijeva GJS-1 koji sadrži 2,11 mas. % Si, te da SiMo nodularni ljevovi imaju vrlo tanak oksidni sloj na površini.

U tablici 4.6 prikazani su rezultati mjerenja mase uzoraka ispitivanih nodularnih ljevova prije i nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h.

Tablica 4.6. Masa ispitivanih uzoraka nodularnih ljevova prije i nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h

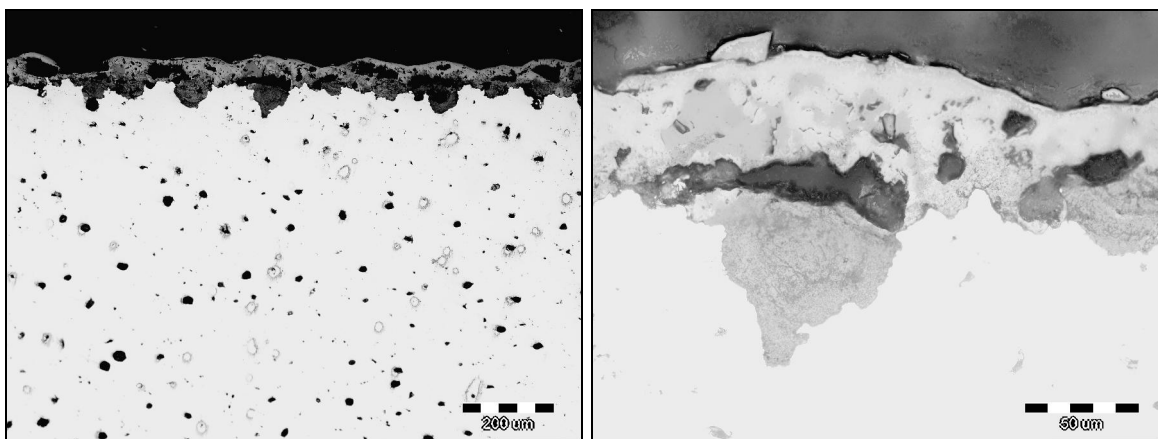
Nodularni ljev	Površina uzorka, cm ²	Masa (uzorak + zdjelica), g		Promjena mase,	
		Prije zagrijavanja	Nakon zagrijavanja	g	g/cm ²
SiMo-1 (4,28 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	8,7066	34,4732	34,4883	0,0151	0,0017
SiMo-2 (4,49 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	8,5156	36,2749	36,2875	0,0126	0,0014
SiMo-3 (4,81 mas. % Si, 0,61 mas. % Mo)	8,6074	35,1738	35,1831	0,0093	0,001
GJS-1 (2,11 mas. % Si)	7,5508	35,3230	35,7114	0,3884	0,0514
GJS-2 (3 mas. % Si)	8,3195	37,2380	37,3799	0,1419	0,0171

U tablici 4.6 može se vidjeti da se tijekom zagrijavanja povećala masa svih ispitivanih uzoraka nodularnih ljevova zbog oksidacije, odnosno vezanja kisika iz zraka i stvaranja oksidnog sloja na površini. Međutim, zbog visokih udjela silicija, SiMo nodularni ljevovi imaju znatno manje povećanje mase od uobičajenih feritnih (GJS-1) i feritno-perlitnih (GJS-2) nodularnih ljevova, što je u skladu sa snimkama mikrostrukture uzoraka prikazanim na slici 4.6. Ako se usporede dobiveni rezultati prikazani u tablici 4.6 za SiMo-3 koji sadrži 4,81 mas. % Si i GJS-1 koji sadrži 2,11 mas. % Si, može se vidjeti za je povećanje mase kod SiMo-3 za 51,4 puta manje. Sve to jasno ukazuje da SiMo nodularni ljevovi imaju znatno bolju otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju od uobičajenih feritnih i feritno-perlitnih nodularnih ljevova. Pored toga, dobiveni rezultati pokazuju da se otpornost na oksidaciju na visokim temperaturama povećava s porastom udjela silicija u nodularnom lijevu (slika 4.7).

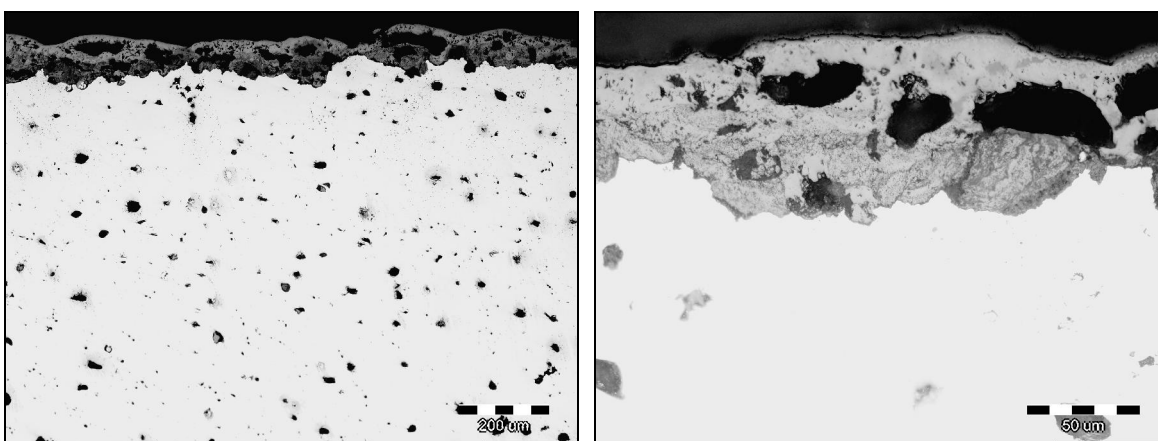


Slika 4.7. Utjecaj udjela silicija u ispitivanim nodularnim ljevovima na promjenu mase uzoraka tijekom zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h

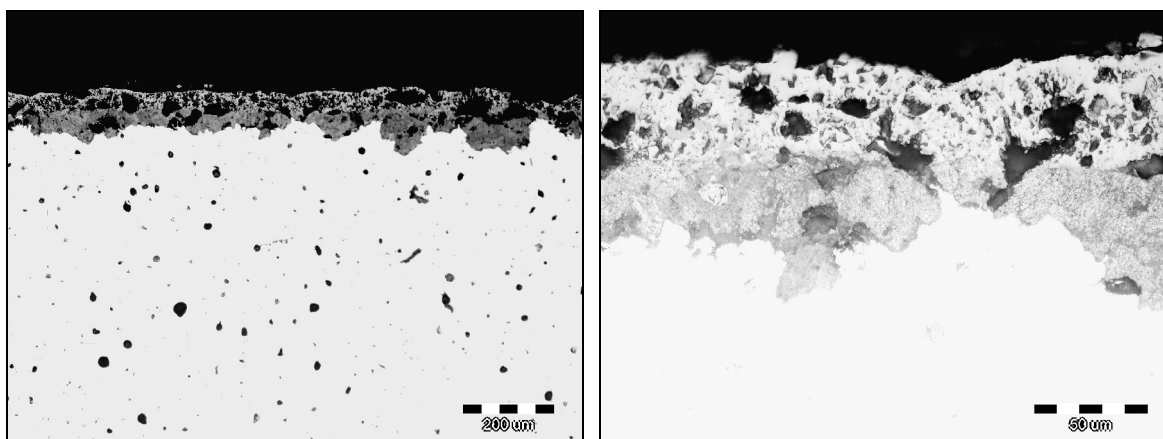
Na slikama 4.8 do 4.12 prikazane su metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela analiziranih nodularnih ljevova nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h.



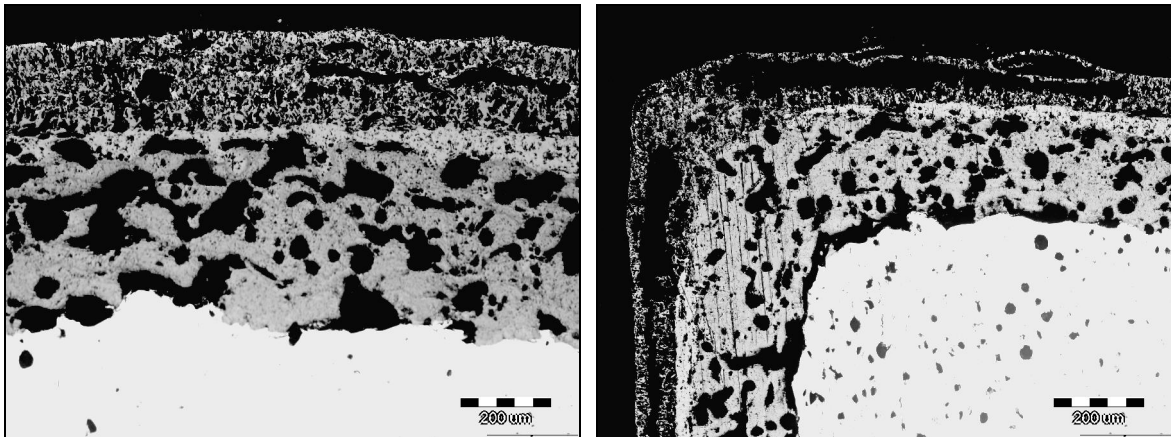
Slika 4.8. Metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela SiMo-1 nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h (nenagrizeni stanje)



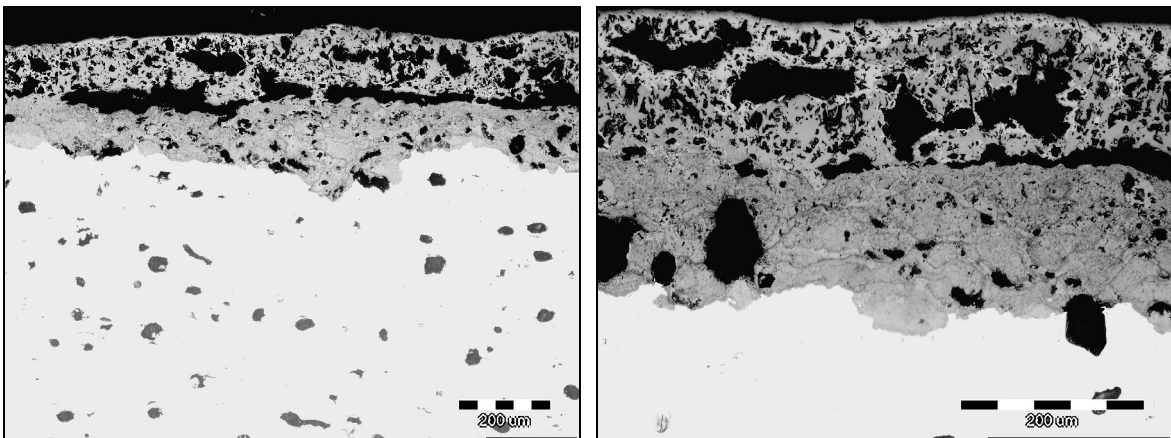
Slika 4.9. Metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela SiMo-2 nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h (nenagrizeni stanje)



Slika 4.10. Metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela SiMo-3 nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h (nenagrizeni stanje)



Slika 4.11. Metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela GJS-1 nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h (nenagrizeno stanje)



Slika 4.12. Metalografske snimke mikrostrukture površinskog dijela GJS-2 nakon zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h (nenagrizeno stanje)

Može se vidjeti da se oksidni sloj na površini svih nodularnih ljevova sastoji od dva dijela. Kod Si-Mo nodularnih ljevova unutarnji dio oksidnog sloja, koji se nalazi uz osnovni materijal, je kompaktan i čvrsto povezan s osnovnim materijalom, što otežava prodor kisika u unutrašnjost. S porastom udjela silicija u SiMo nodularnim ljevovima povećava se debljina unutarnjeg dijela oksidnog sloja. Vanjski dio oksidnog sloja je manje kompaktan, ali se ne odvaja od njegovog unutarnjeg dijela. Njegova kompaktnost je daleko veća od kompaktnosti vanjskog dijela oksidnog sloja na GJS-1 i GJS-2.

Unutarnji dio oksidnog sloja na nodularnom lijevu GJS-1 nije kompaktan, odnosno u znatnoj mjeri je porozan i nije čvrsto povezan s osnovnim materijalom. Vanjski dio oksidnog sloja također je nekompaktan i odvaja se od unutarnjeg dijela oksidnog sloja. Takva struktura oksidnog sloja ne predstavlja značajnu barijeru za ulaz kisika u unutrašnjost materijala. Očito je da odljevci s niskim udjelom silicija nisu pogodni za primjenu na visokim temperaturama.

Nodularni lijev GJS-2 ima viši udio silicija od nodularnog lijeva GJS-1, što je utjecalo na otpornost ka oksidaciji. Unutarnji dio oksidnog sloja na nodularnom lijevu GJS-2 je kompaktiji od unutarnjeg dijela oksidnog sloja na nodularnom lijevu GJS-1 i čvršće je povezan s osnovnim materijalom. Međutim, njegova kompaktnost i povezanost s osnovnim materijalom je manja nego u SiMo nodularnim ljevovima. Vanjski dio oksidnog sloja po karakteristikama je vrlo sličan onom na GJS-1 nodularnom lijevu. Iz navedenih

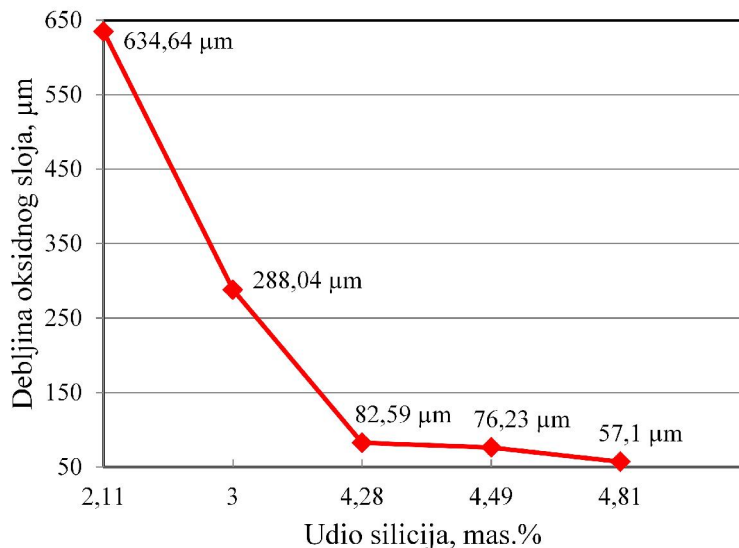
razloga nodularni lijev GJS-2 ima bolju otpornost na oksidaciju od nodularnog lijeva GJS-1, ali manju od SiMo nodularnih ljevova.

Prosječne debljine oksidnog sloja na ispitivanim nodularnim ljevovima nastalog tijekom zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h prikazane su u tablici 4.7.

Tablica 4.7. Prosječne debljine oksidnog sloja na ispitivanim nodularnim ljevovima nastalog tijekom zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h

Nodularni lijev	Prosječna debljina oksidnog sloja, μm
SiMo-1 (4,28 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	82,59
SiMo-2 (4,49 mas. % Si, 0,63 mas. % Mo)	76,23
SiMo-3 (4,81 mas. % Si, 0,61 mas. % Mo)	57,1
GJS-1 (2,11 mas. % Si)	634,64
GJS-2 (3 mas. % Si)	288,04

Na slikama 4.8 do 4.12 i u tablici 4.7 može se vidjeti da je debljina oksidnog sloja daleko manja na SiMo nodularnim ljevovima nego na nodularnim ljevovima GJS-1 i GJS-2. Najveća debljina oksidnog sloja prisutna je na nodularnom lijevu GJS-1 koji sadrži najmanji udio silicija (2,11 mas. %). Oksidni sloj je najtanji na SiMo-3 nodularnom lijevu koji sadrži najviši udio silicija (4,81 mas. %). Dijagram na slici 4.13 jasno pokazuje da se debljina oksidnog sloja na površini uzoraka smanjuje s porastom udjela silicija u nodularnom lijevu.



Slika 4.13. Utjecaj udjela silicija u ispitivanim nodularnim ljevovima na debljinu oksidnog sloja na površini uzoraka nastalog tijekom zagrijavanja na 850 °C u trajanju od 32 h

5. ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata analize mikrostrukture i ispitivanja vlačnih svojstva, tvrdoće i žilavosti na sobnoj temperaturi te otpornosti na oksidaciju na temperaturi od 850 °C nodularnih ljevova legiranih sa 4,28, 4,49 i 4,81 mas. % Si i 0,6 mas. % Mo može se zaključiti sljedeće:

- mikrostruktura ispitivanih SiMo nodularnih ljevova sastoji se od grafitnih nodula i feritne metalne osnove. Osim navedenih konstituenata, u mikrostrukтури je prisutan i manji udio karbida molibdena koji su izlučeni po granicama feritnih zrna, te manji udio globularnog perlita koji okružuje karbide molibdena,
- ispitivani SiMo nodularni ljevovi imaju visoku vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja te visok omjer $R_{p0,2}/R_m$ zbog visokih udjela silicija te povišenih udjela molibdena,
- s porastom udjela silicija povećava se vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i omjer $R_{p0,2}/R_m$ jer se povećava intenzitet očvršćivanja ferita silicijem,
- istezanje i žilavost SiMo nodularnih ljevova su niski zbog prisutnosti karbida molibdena u mikrostrukтури te očvršćivanja ferita silicija. S porastom udjela silicija opadaju navedena svojstva,
- ispitivani SiMo nodularni ljevovi imaju veću tvrdoću od feritnog nodularnog lijeva sa 2,11 mas. % Si, ali i od feritno-perlitnog nodularnog lijeva sa 3 mas. % Si što je rezultat očvršćivanja ferita silicijem te prisutnosti karbida molibdena u mikrostrukтури. S poratom udjela silicija povećava se tvrdoća jer raste intenzitet očvršćivanja ferita,
- ispitivani SiMo nodularni ljevovi imaju znatno bolju otpornost na oksidaciju na 850 °C od feritnog nodularnog lijeva sa 2,11 mas. % Si, te od feritno-perlitnog nodularnog lijeva sa 3 mas. % Si što se očituje kroz znatno manje povećanje mase uzoraka po jedinici površine te značajno manju debljinu oksidnog sloja na površini,
- oksidni sloj na površini uzoraka SiMo nodularnih ljevova je kompaktan zbog čega se otežava protok kisika u unutrašnjost uzoraka i napredovanje oksidacije,
- otpornost na oksidaciju nodularnog lijeva povećava se s porastom udjela silicija.

6. LITERATURA

- [1] Z. Glavaš, F. Unkić, Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [2] ..., A Modern Casting Staff Report, Census of World Casting Production, Global Casting Production Expands, Modern Casting 108(2018) 12, 23 – 26.
- [3] ..., Ductile Iron Data for Design Engineers, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 1998.
- [4] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 2004.
- [5] http://www.eisenwerk-erla.de/eng_werkstoffe.php (10. svibnja 2019.).
- [6] I. Hervas, A. Thuault, E. Hug, Damage Analysis of a Ferritic SiMo Ductile Cast Iron Submitted to Tension and Compression Loadings in Temperature, Metals 5(2015) 4, 2351 – 2369.
- [7] ..., European standard EN 16124:2011, Founding – Low-alloyed ferritic spheroidal graphite cast iron for elevated temperature applications, European Committee for standardization, 2011.
- [8] G. Weber, G. Faubert, M. Rothwell, A. Tagg, D.J. Wirth, High Si-Mo Ductile Iron: Views from Users and Producers, Modern Casting 88(1998) 3, 48 - 51.
- [9] <http://www.nws.cn/news/Enimginfo/599> (10. svibnja 2019.).
- [10] <http://www.nws.cn/news/Enimginfo/577> (10. svibnja 2019.).
- [11] K. Röhring, Djelovanje i izbor legiranih elemenata za niskolegirani sivi lijev s lisnatim i kuglastim grafitom, Ljevarstvo 31(1984) 2, 25 - 41.
- [12] E.C. Bain, H. W. Paxton, Alloying Elements in Steel, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1966.
- [13] Z. Glavaš, A. Štrkalj, A. Stojaković, The Properties of Silicon Alloyed Ferritic Ductile Irons, Metalurgija 55(2016) 3, 293 – 296.
- [14] R. Larker, Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron ISO 1083/JS/500-10 Provides Superior Consistent Properties in Hydraulic Rotators, China Foundry 6(2009) 4, 343 – 351.
- [15] ..., European standard EN 1563:2011, Founding - Spheroidal Graphite Cast Iron, European Committee for Standardization, 2011.
- [16] L.E. Björkegren, K. Hamberg, Silicon Alloyed Ductile Iron with Excellent Ductility and Machinability, Proceedings of 2003 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Crown Plaza Resort, Hilton Head, South Carolina, 20 - 23 October, 2003, 70 – 90.
- [17] K. Herfurth, R. Gorski, K. Beute, M. Hering, GOPAG® C 500 F, 1 – 8. http://www.sangermetal.com/dane/pliki/b2/09/b209c3f42efad11/Fachartikel_GOPAG_engl.pdf (10. svibnja 2019.).
- [18] M. Gedeon, Solid Solution Hardening & Strength, Technical Tidbits, Issue No. 16, April 2010, Brush Wellman <http://materion.com/~media/Files/PDFs/Alloy/Newsletters/Technical%20Tidbits/Issue%20No%2016%20Solid%20Solution%20Hardening%20%20Strength> (10. svibnja 2019.).
- [19] ..., Solid Solution Strengthening, http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_solution_strengthening (10. svibnja 2019.).
- [20] Strengthening Mechanisms of Materials, http://en.wikipedia.org/wiki/Strengthening_mechanisms_of_materials (10. svibnja 2019.).

- [21] ..., Silicon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon> (10. svibnja 2019.).
- [22] ...Iron, <http://en.wikipedia.org/wiki/Iron> (10. svibnja 2019.).
- [23] Z. Glavaš, Optimizacija udarne žilavosti nodularnog lijeva metodama umjetne inteligencije, doktorski rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2007.
- [24] P. Ferro, A. Fabrizi, R. Cervo, C. Carollo, Effect of Inoculants Containing Rare Earth Metals and Bismuth on Microstructure and Mechanical Properties of Heavy-Section Near-Eutectic Ductile Iron Castings, *Journal of Materials Processing Technology* 213(2013) 9, 1601 – 1608.
- [25] J. Zhou, Spheroidal Graphite Cast Iron (III), *China Foundry*, 7(2010) 3, 292 – 307.
- [26] P. Matteis, G. Scavino, A. Castello, D. Firrao, High Temperature Fatigue Properties of a Si-Mo Ductile Cast Iron, *Procedia Materials Science* 3(2014), 2154 – 2159.
- [27] J. Roučka, E. Abramová, V. Kaňa, Properties of Type SiMo Ductile Irons at High Temperatures, *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(2018) 2, 601 – 607.
- [28] M. Ekström, Development of a Ferritic Ductile Cast Iron for Increased Life in Exhaust Applications, Licentiate Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Division of Mechanical Metallurgy, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2013.
- [29] D. Venugopalan, A. Alagarsamy, Influence of Microstructure and Chemical Composition on the Mechanical Properties of Ductile Iron, *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron*, Physical Metallurgy of Cast Iron IV, ur. G. Ohira, T. Kusakawa, E. Niyama, Materials Research Society, Tokyo, 4 - 6 September, 1989., 321 - 328.
- [30] B. Black, G. Burger, R. Logan, R. Perrin, Microstructure and Dimensional Stability in Si-Mo Ductile Irons for Elevated Temperature Applications, *SAE International*, 2002-01-2115.
- [31] D. Li, R. Perrin, G. Burger, D. McFarlan, B. Black, R. Logan, R. Williams, Solidification Behavior, Microstructure, Mechanical Properties, Hot Oxidation and Thermal Fatigue Resistance of High Silicon SiMo Nodular Cast Irons, 2004 SAE World Congress, Detroit, March 8-11, 2004, 2004-01-0792.
- [32] <https://www.gfcs.com/com/en/competences/research-and-development/leichtbau-im-material.html> (10. svibnja 2019.).
- [33] ..., European standard EN 1563:2011, Founding - Spheroidal Graphite Cast Iron, European Committee for Standardization, 2011.

ŽIVOTOPIS

OSOBNİ PODATCI:

Ime i prezime:	Fabijan Kumer
Datum i mjesto rođenja:	21.07.1994., Koprivnica
Adresa:	Avenija Marina Držića 64a, 10000, Zagreb
Telefon:	099/821-5950
E-mali:	fkumer84@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2001.g. - 2009.g.:	Osnovna škola Kalnik, Kalnik
2009.g. - 2013.g.:	Gimnazija Ivana Zakmardija Dijankovečkoga, Križevci
2013.g. – 2017.g.:	Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, Preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija
2017.g. -	Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, Diplomski sveučilišni studij Metalurgija

VJEŠTINE:

Rad na računalu	Vrlo dobro poznavanje MS Office paketa, iskustva rada u SolidWorks-u i ProCast-u.
Strani jezik	Engleski (aktivno), njemački (aktivno)