

Svojstva, proizvodnja i primjena vermikularnog lijeva

Petrović, Zvonimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:484725>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Zvonimir Petrović

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Zvonimir Petrović

**SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA
VERMIKULARNOG LIJEVA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

izv.prof.dr.sc. Stjepan Kožuh - predsjednik
prof.dr.sc. Zoran Glavaš - član
doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović- član
doc.dr.sc. Ivan Jandrić – zamjenski član

Sisak, rujan 2018.

SAŽETAK

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA VERMIKULARNOG LIJEVA

Vermikularni lijev je vrsta željeznog lijeva u kojem je većina ugljika prisutna u obliku vermikularnih grafitnih čestica. Te čestice nalaze se u metalnoj osnovi koja se uglavnom sastoji od ferita, ferita i perlita ili perlita. Po svojim fizikalnim i mehaničkim svojstvima može se svrstati između sivog i nodularnog lijeva.

Proizvodnja vermikularnog lijeva je znatno teža od proizvodnje sivog i nodularnog lijeva jer brojni procesni parametri utječu na stvaranje vermikularnog grafita tijekom skrućivanja. Već vrlo mala odstupanja od njihovih optimalnih vrijednosti mogu rezultirati stvaranjem listićavog ili nodularnog grafita.

Vermikularni lijev odavno je poznat. Međutim, otežani postupak proizvodnje ograničio je njegovu značajniju primjenu u prošlosti. Proširenje spoznaja o vermikularnom lijevu, napredak ljevačke tehnologije i kontrole procesa proizvodnje omogućili su njegovu širu primjenu. Danas se vermikularni lijev primjenjuje za brojne aplikacije. Najširu primjenu ima u industriji motornih vozila za komponente od kojih se istovremeno zahtijeva otpornost na toplinska opterećenja i čvrstoća.

U ovom preglednom radu prikazane su norme za vermikularni lijev, faktori koji utječu na njegova svojstva, proizvodnja vermikularnog lijeva te njegova svojstva i primjena.

Ključne riječi: željezni ljevovi, vermikularni lijev

ABSTRACT

PROPERTIES, PRODUCTION AND APPLICATION OF COMPACTED GRAPHITE IRON

Compacted (vermicular) graphite iron is a type of cast iron in which the majority of the carbon is present in the form of compacted graphite particles. These particles are placed in a metal matrix which consists mainly of ferrite, ferrite and pearlite, or pearlite. According to its physical and mechanical properties, compacted graphite iron can be placed between gray and ductile iron.

Production of compacted graphite iron is more complicated than the production of gray and ductile iron because numerous process parameters influencing the formation of compacted graphite during solidification. Already very small deviations from their optimal values may result in the formation of flake or nodular graphite.

Compacted graphite iron has long been known. However, the difficult process of production has limited its significant application in the past. Increase of knowledge about compacted graphite iron, progress of foundry technology and production process control has enabled its wider application. Today, compacted graphite iron is used for numerous applications. It is mainly used in the motor vehicle industry for components which at the same time must have a resistance to thermal loads and strength.

This review paper shows the standard for compacted graphite iron, the factors that affect its properties, production of compacted graphite iron and its properties and application.

Key words: cast irons, compacted (vermicular) graphite iron

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. NORME ZA VERMIKULARNI LIJEV	2
3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA SVOJSTVA VERMIKULARNOG LIJEVA	4
3.1 Utjecaj kemijskog sastava	4
3.2 Utjecaj mikrostrukture	7
3.3 Utjecaj cijepljenja	9
3.4 Utjecaj brzine hlađenja	10
4. PROIZVODNJA VERMIKULARNOG LIJEVA	12
4.1 Proizvodnja primarne taline	12
4.1.1 Proizvodnja primarne taline u kupolnoj peći	12
4.1.2 Proizvodnja primarne taline u indukcijskoj peći	14
4.2 Obrada primarne taline	15
4.2.1 Podobrada sa sferoidizacijskim elementima	15
4.2.2 Kombinirani dodatak sferoidizacijskih i antisferoidizacijskih elemenata	17
4.2.3 Postupci dodavanja predlegure u primarnu talinu	19
4.3 Cijepljenje	19
4.4 SinterCast [®] postupak proizvodnje vermikularnog lijeva	20
5. SVOJSTVA VERMIKULARNOG LIJEVA	23
6. PRIMJENA VERMIKULARNOG LIJEVA	25
7. ZAKLJUČAK	26
8. LITERATURA	27
ŽIVOTOPIS	29

1. UVOD

Vermikularni lijev je najnoviji član porodice željeznih ljevova koji u svojoj mikrostrukturi sadrže čestice grafita [1, 2]. Te čestice su nasumično orijentirane, izdužene i međusobno povezane, kao i listićavi grafit u sivom lijevu. Međutim, za razliku od listićavog grafita, one su deblje, kraće i imaju zaobljene rubove. Takav vermikularni oblik grafitnih čestica, koje izgledaju poput „crvića“, omogućuje bolje iskorištenje mehaničkih svojstava metalne osnove nego u sivom lijevu [3]. Međusobna povezanost grafitnih čestica povoljno utječe na određena fizikalna svojstva, kao što su toplinska vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija. Zbog toga se vermikularni lijev prema svojim mehaničkim i fizikalnim svojstvima može svrstati između sivog i nodularnog lijeva. U odnosu na sivi lijev, vermikularni lijev ima bolja mehanička i nešto slabija fizikalna svojstva. Nodularni lijev ima superiornija mehanička svojstva od vermikularnog lijeva. Međutim, vermikularni lijev pruža bolja fizikalna svojstva od nodularnog lijeva. Takva kombinacija svojstva koju ima vermikularni lijev pokazala se vrlo pogodna za njegovu primjenu u industriji motornih vozila.

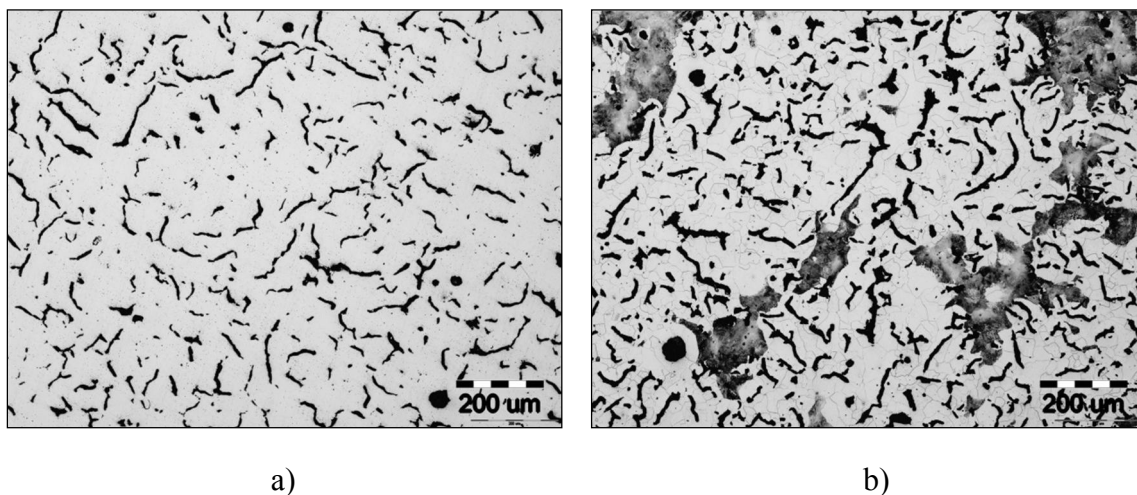
Svojstva vermikularnog lijeva direktno ovise o njegovoj mikrostrukturi, tj. o obliku grafitnih čestica i strukturi metalne osnove [1, 2]. Oblik grafitnih čestica od velikog je značaja. U mikrostrukturi vermikularnog lijeva ne smije biti listićavog grafita jer negativno utječe na njegova svojstva. Određeni udio nodularnog grafita je dozvoljen. Međutim, trebao bi biti što manji jer nodularni grafit negativno utječe na toplinsku vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija. Ta ograničenja i brojni faktori utječu na oblik grafitnih čestica u vermikularnom lijevu i čine njegovu proizvodnju znatno težom od proizvodnje sivog i nodularnog lijeva. Da bi se postigli konzistentni rezultati, odnosno ponovljivost vrlo je važno kontrolirati sve procesne parametre i kvalitetu taline te se strogo pridržavati propisanog postupka proizvodnje.

Otkriće vermikularnog lijeva povezano je s proizvodnjom nodularnog lijeva. U prošlosti vermikularni lijev bio je produkt nepravilno provedenog postupka proizvodnje nodularnog lijeva i nije imao primjenu [1, 3]. Kasnije su uočena njegova povoljna svojstva. Međutim, vrlo zahtjevan postupak proizvodnje i nekonzistentni rezultati onemogućili su širu primjenu vermikularnog lijeva. Tijekom 60-tih i 70-tih godina XX. stoljeća napravljen je značajan napredak na polju proizvodnje vermikularnog lijeva i od tada počinje njegova primjena u industriji motornih vozila. Veliki porast upotrebe vermikularnog lijeva započinje tijekom 90-tih godina XX. stoljeća u industriji motornih vozila, posebno automobila, za proizvodnju toplinski opterećenih dijelova automobila.

U ovom preglednom radu obrađene su norme za vermikularni lijev, faktori koji utječu na njegova svojstva, proizvodnja vermikularnog lijeva te njegova svojstva i primjena.

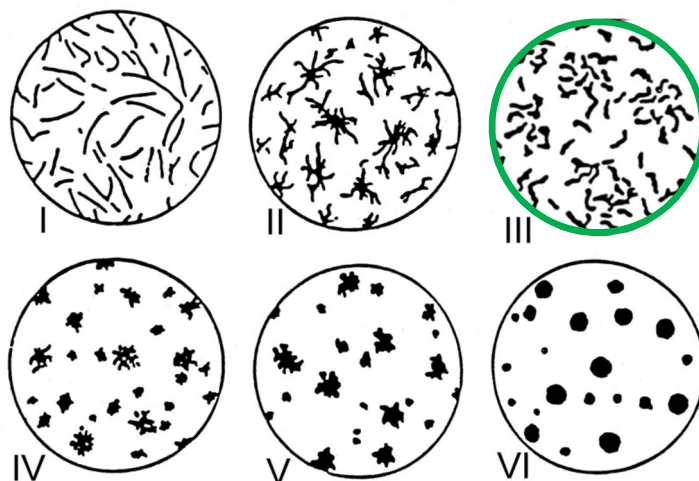
2. NORME ZA VERMIKULARNI LIJEV

Na slici 1 prikazana je mikrostruktura vermikularnog lijeva. Jasno se može vidjeti karakteristični vermikularni oblik grafita.



Slika 1. Metalografske snimke mikrostrukture vermikularnog lijeva u nenagrizenom stanju (a) i nakon nagrizanja u nitalu (b) [2]

Proizvodnja vermikularnog lijeva zasniva se na određenim normama. Prema normi EN 1560:2011, koja definira označivanje željeznih ljevova, oznaka za vermikularni lijev je GJV [4]. Oblik III grafitnih čestica predstavlja vermikularni grafit prema normi EN ISO 945-1:2012 (slika 2) [5].



Slika 2. Oblici grafitnih čestica u željeznim ljevovima prema normi EN ISO 945-1:2012. Oblik III – vermikularni grafit [5]

Postoji veći broj normi za vermikularni lijev prema kojima se dijeli u više kvaliteta. Te norme ujedno propisuju minimalne vrijednosti vlačnih svojstava za svaku kvalitetu vermikularnog lijeva. Najčešću primjenu imaju norme EN 16079:2010 (tablica 1) i ISO 16112:2006 (tablica 2).

Tablica 1. Kvalitete i pripadajuće minimalne vrijednosti vlačnih svojstava vermikularnih ljevova prema normi EN 16079:2010 [6]

Označivanje materijala		Debljina relevantne stijenke t , mm	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, N/mm ² , min.	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ² , min.	Istezanje A , %, min.
Oznaka	Broj				
EN-GJV-300	5.2100	$t \leq 30$	210	300	2,0
		$30 < t \leq 60$	195	275	2,0
		$60 < t \leq 200$	175	250	2,0
EN-GJV-350	5.2200	$t \leq 30$	245	350	1,5
		$30 < t \leq 60$	230	325	1,5
		$60 < t \leq 200$	210	300	1,5
EN-GJV-400	5.2201	$t \leq 30$	280	400	1,0
		$30 < t \leq 60$	260	375	1,0
		$60 < t \leq 200$	230	325	1,0
EN-GJV-450	5.2300	$t \leq 30$	315	450	1,0
		$30 < t \leq 60$	280	400	1,0
		$60 < t \leq 200$	260	375	1,0
EN-GJV-500	5.2301	$t \leq 30$	350	500	0,5
		$30 < t \leq 60$	315	450	0,5
		$60 < t \leq 200$	280	400	0,5

Tablica 2. Kvalitete i pripadajuće minimalne vrijednosti vlačnih svojstava i tvrdoće vermikularnih ljevova prema normi ISO 16112:2006 [7]

Označivanje materijala	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$, N/mm ² , min.	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ² , min.	Istezanje A , %, min.	Tvrdoća HBW 10/30
ISO 16112/JV/300/S	210	300	2,0	140 - 210
ISO 16112/JV/350/S	245	350	1,5	160 - 220
ISO 16112/JV/400/S	280	400	1,0	180 - 240
ISO 16112/JV/450/S	315	450	1,0	200 - 250
ISO 16112/JV/500/S	350	500	0,5	220 - 260

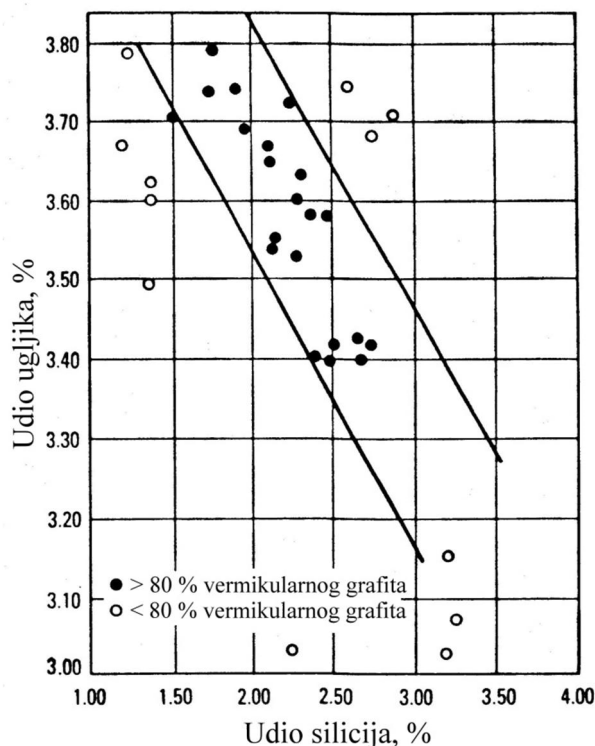
3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA SVOJSTVA VERMIKULARNOG LIJEVA

Kemijski sastav, mikrostruktura, cijepljenje i brzina hlađenja odljevka u kalupu najznačajniji su faktori koji utječu na svojstva vermikularnog lijeva.

3.1 Utjecaj kemijskog sastava

Kemijski sastav ima veliki utjecaj na mikrostrukturu, odnosno na oblik grafitnih čestica i strukturu metalne osnove [1]. S obzirom da utječe na mikrostrukturu, kemijski sastav utječe i na svojstva vermikularnog lijeva.

Ugljik se tijekom skrućivanja vermikularnog lijeva može izlučiti u obliku slobodnih grafitnih čestica, što je poželjno, ili u obliku slobodnih karbida, što je nepoželjno i mora se izbjeći. **Silicij** je vrlo važan element u vermikularnom lijevu jer pospješuje izlučivanje ugljika u obliku grafita i ne stvara karbide. Također utječe i na metalnu osnovu, tako što pospješuje stvaranje ferita. Pomoću dijagrama na slici 3 može se odrediti optimalni udio ugljika i silicija u vermikularnom lijevu.



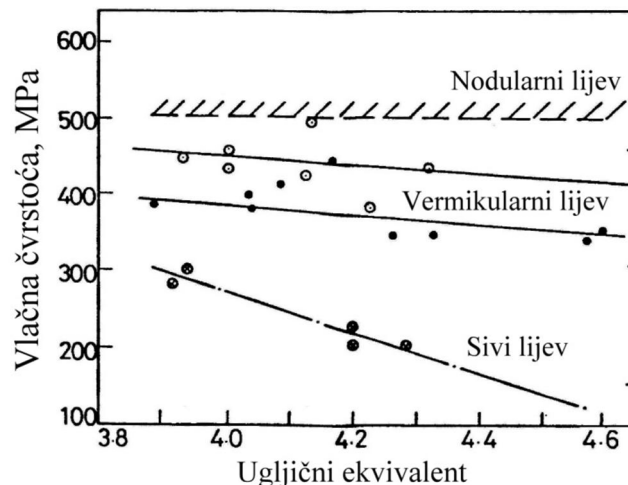
Slika 3. Optimalni udjeli ugljika i silicija za vermikularni lijev [8]

Zajednički utjecaj, ugljika, silicija (i fosfora) na skrućivanje vermikularnog lijeva, može promatrati kao vrijednost CE, odnosno ugljični ekvivalent ugljika:

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

Vrijednost $CE = 4,3$ upućuje da se radi o vermikularnom lijevu eutekličnog sastava. To znači da odmah na početku skrućivanja započinje euteklična reakcija kojom iz taline nastaju dvije krute faze, a to su euteklični austenit i vermikularni grafit. Ako je $CE < 4,3$ radi se o podeutekličnom sastavu. U tom slučaju skrućivanje započinje izlučivanjem primarnog austenita, a naknadno se odvija euteklična reakcija, kada se steknu uvjeti za to. U slučaju kada je $CE > 4,3$ sastav je nadeuteklični. Prva faza koja se izlučuje iz taline je primarni grafit, a potom slijedi euteklična reakcija.

Na slici 4 može se vidjeti da vlačna čvrstoća vermikularnog lijeva opada s porastom ugljičnog ekvivalenta. Međutim, to smanjenje vlačne čvrstoće daleko je manje nego kod sivog lijeva.



Slika 4. Utjecaj ugljičnog ekvivalenta na vlačnu čvrstoću sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva (ispitni uzorci promjera 30 mm) [1]

Mangan promovira stvaranje perlita i karbida. Udio u vermikularnom lijevu obično se kreće od 0,1 do 0,6 %, ovisno da li se želi ostvariti feritna ili perlitna metalna osnova.

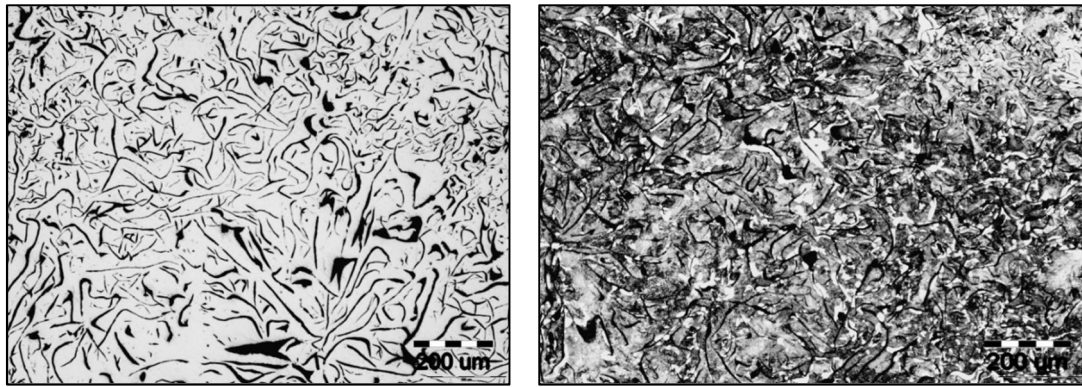
Fosfor tijekom skrućivanja stvara nisko topivi fosfidni eutektik (Fe_3P) koji se izlučuje po granicama zrna. Radi se tvrdoj i krhkoj fazi. Zbog toga udio fosfora treba održavati što je moguće nižim ($< 0,02$ %).

Magnezij je najčešće upotrebljavani element za modifikaciju oblika grafita, odnosno izlučivanje grafita u vermikularnom obliku tijekom skrućivanja. Optimalni udio kreće se od 0,008 do 0,012 % ovisno o debljini stijenke odljevka. Dodaje se u primarnu talinu i to najčešće u obliku predlegure ($FeSiMg$). Ako je udio magnezija prenizak, doći će do stvaranja listićavog grafita, što je vrlo nepovoljno. Previsok udio magnezija rezultira povišenim udjelom nodularnog grafita u mikrostrukturi, što je također nepovoljno.

Sumpor potpomaže stvaranje listićavog grafita, što je nepoželjno u vermikularnom lijevu. Udio u primarnoj talini, odnosno prije dodatka magnezija, treba biti nizak (od 0,01 do 0,025 %) jer magnezij ima visok afinitet prema sumporu. Štetan utjecaj previsokog udjela sumpora može se jasno vidjeti usporedbom mikrostrukture prikazanih na slikama 5 i 6.

Elementi rijetkih zemalja (RE) - cerij, lantan i praseodimij omogućuju stvaranje vermikularnog grafita. Zbog toga se često nalaze u predlegurama $FeSiMg$.

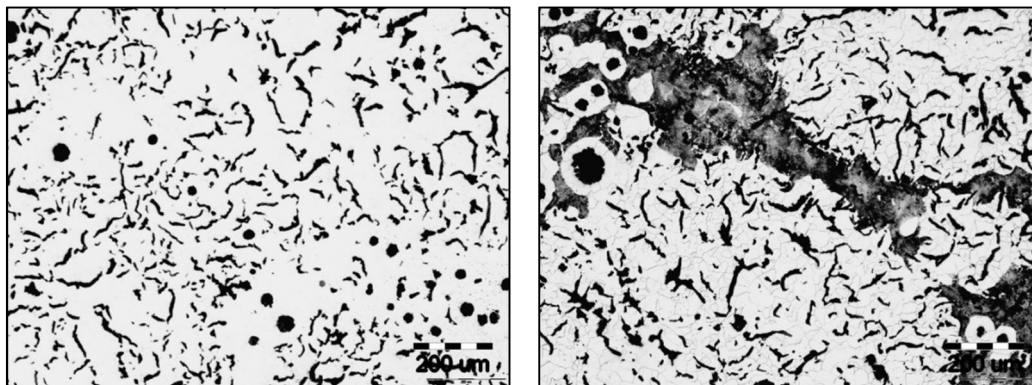
Bakar pospješuje izlučivanje ugljika u obliku grafita. Također utječe i na metalnu osnovu, odnosno promovira stvaranje perlita.



a)

b)

Slika 5. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka vermikularnog lijeva debljine 25,4 mm u nenagrizenom stanju (a) i nakon nagrizanja u nitalu (b) ($Mg = 0,006 \%$, $S = 0,035 \%$) [1]

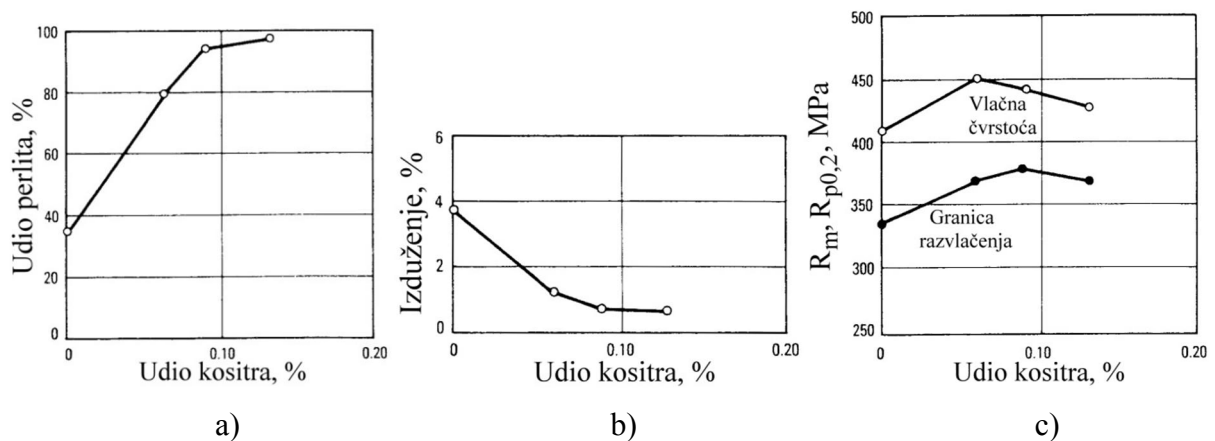


a)

b)

Slika 6. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka vermikularnog lijeva debljine 25,4 mm u nenagrizenom stanju (a) i nakon nagrizanja u nitalu (b) ($Mg = 0,006 \%$, $S = 0,009 \%$) [1]

Kositar ne stvara karbide i pospješuje stvaranje perlita (slika 7a). Znatno je efikasniji perlitizator od bakra. S obzirom da promovira stvaranje perlita, negativno utječe na izduženje vermikularnog lijeva (slika 7b). S druge strane, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća povećavaju se s porastom udjela kositra do određene granice, nakon čega opadaju (slika 7c).



a)

b)

c)

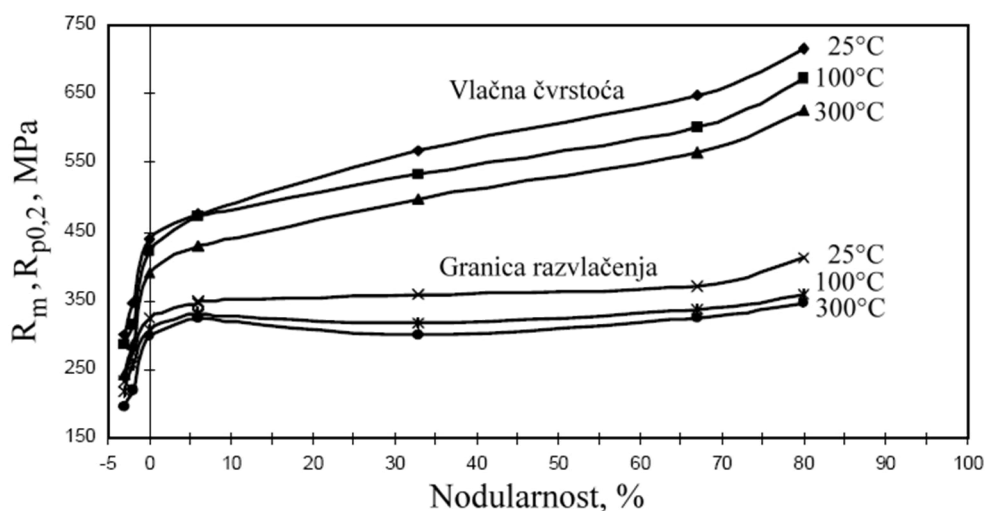
Slika 7. Utjecaj udjela kositra na udio perlita u metalnoj osnovi (a), istežanje (b) te granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću (c) vermikularnog lijeva [9]

Krom i **vanadij** su snažni karbidotvorni elementi. Zbog toga se njihov udio mora održavati niskim.

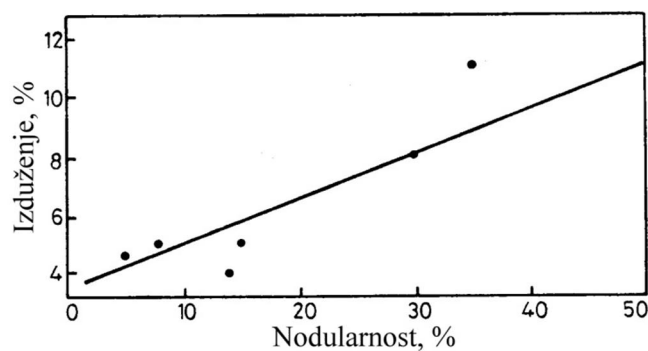
Titan potpomaže stvaranje vermikularnog grafita i otežava stvaranje nodularnog grafita. Olakšava proizvodnju vermikularnog lijeva, jer se udio magnezija može kretati u širim granicama ako se dodaje titan. Međutim, titan stvara vrlo tvrde nitride i karbonitride, što otežava strojnu obradu odljevaka.

3.2 Utjecaj mikrostrukture

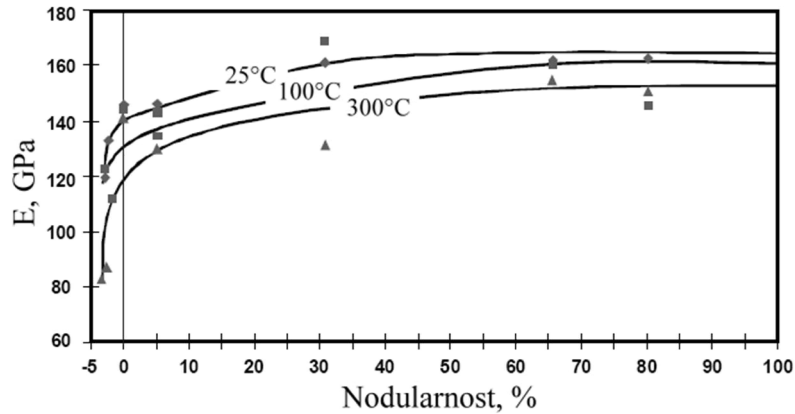
Mikrostruktura vermikularnog lijeva ima presudan utjecaj na njegova svojstva. **Oblik, veličina i raspodjela grafitnih čestica** značajno utječu na svojstva vermikularnog lijeva. Prema normama ISO 16112:2006 [7] i EN 16079:2010 [6] minimalno 80 % grafitnih čestica u mikrostrukтури mora imati vermikularni oblik. Listićavi grafit negativno utječe na mehanička svojstva zbog čega ne smije biti prisutan. S porastom udjela nodularnog grafita povećava se granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istežanje, žilavost i modul elastičnosti, ali opada toplinska vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija (slike 8 do 10). Zbog toga se udio nodularnog grafita ograničava na maksimalno 20 %.



Slika 8. Utjecaj nodularnosti i temperature na granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću vermikularnog lijeva s perlitnom metalnom osnovom [10]



Slika 9. Utjecaj nodularnosti na istežanje vermikularnog lijeva [11]



Slika 10. Utjecaj temperature i nodularnosti na modul elastičnosti perlitnog vermikularnog lijeva [10]

Prema normi ISO 16112:2006 [7] nodularnost se analizira na metalografskim snimkama uzoraka napravljenim prije nagrizanja pri povećanju 100x. Grafitne čestice klasificiraju se na osnovi njihovog faktora oblika, tj. zaokruženosti (tablica 3). Zaokruženost grafitne čestice definirana je sljedećim izrazom [7]:

$$\text{Zaokruženost grafitne čestice} = \frac{A}{A_m} = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot l_m^2} \quad (1)$$

gdje je: A – površina grafitne čestice, A_m – površina kružnice promjera l_m opisane oko grafitne čestice, l_m – maksimalna dužina osi grafitne čestice, odnosno maksimalna udaljenost između dviju točki na opsegu grafitne čestice.

Tablica 3. Klasifikacija grafitnih čestica prema njihovom faktoru oblika, tj. zaokruženosti [7]

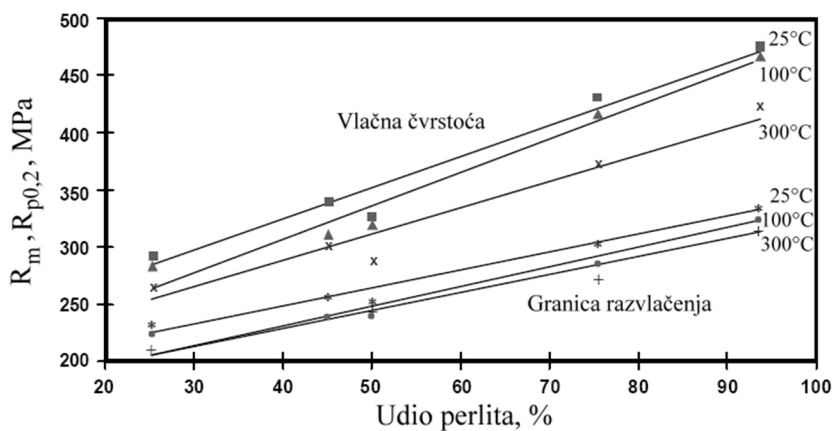
Faktor oblika (Zaokruženost grafitne čestice)	Oblik grafita
0,625 do 1	Nodularni grafit (oblik VI prema normi ISO 945)
0,525 do 0,625	Prijelazni oblici grafita (oblici IV i V prema normi ISO 945)
< 0,525	Vermikularni grafit (oblik III prema normi ISO 945)

Nodularnost se izračunava pomoću sljedeće formule [7]:

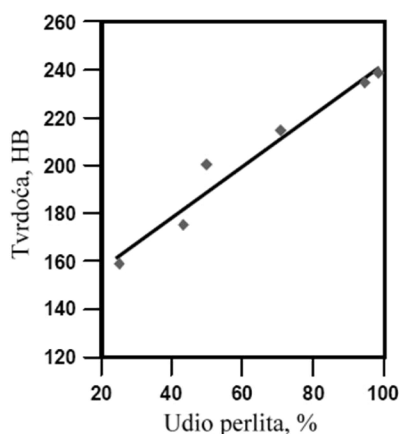
$$\text{Nodularnost} = \frac{\sum A_n + 0,5 \cdot \sum A_{po}}{\sum A_{sgč}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

gdje je: A_n – površina grafitnih čestica koje su klasificirane kao nodule, $A_{sgč}$ – površina svih grafitnih čestica s maksimalnom dužinom osi $> 10 \mu\text{m}$, A_{po} – površina grafitnih čestica koje su klasificirane kao prijelazni oblici grafita.

Povećanje **udjela perlita** u metalnoj osnovi rezultira povećanjem granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i tvrdoće (slike 11 i 12) te smanjenjem istežanja i žilavosti. Porast **udjela ferita** djeluje suprotno.



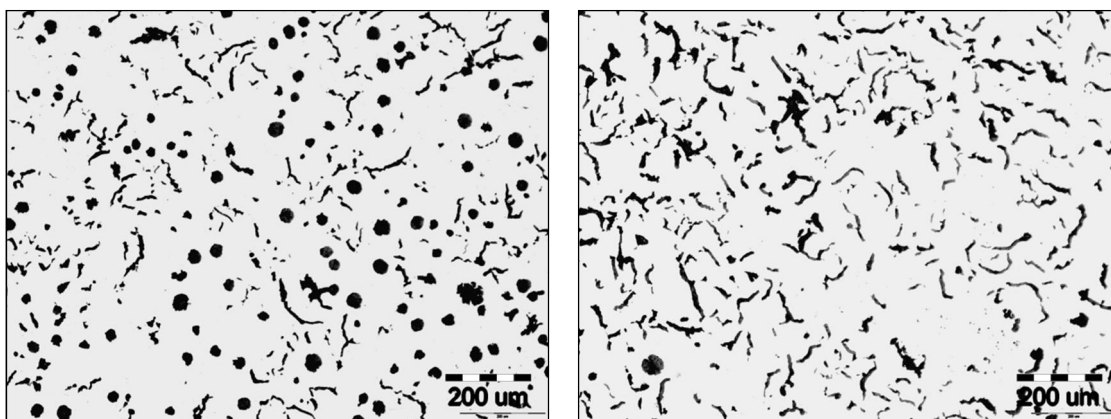
Slika 11. Utjecaj temperature i udjela perlita u metalnoj osnovi na granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću vermikularnog lijeva koji sadrži do 10 % nodularnog grafita [10]



Slika 12. Utjecaj udjela perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću nelegiranog vermikularnog lijeva koji sadrži do 10 % nodularnog grafita [10]

3.3 Utjecaj cijepjenja

Cijepljenje je često potrebno, posebno kod proizvodnje tankostijenih odljevaka, da bi se izbjeglo stvaranje karbida. Međutim, vermikularni lijev je osjetljiv na dodatak cjepiva jer se može značajno povećati nodularnost (slika 13) [1]. Zbog toga posebnu pažnju treba posvetiti izboru i količini dodanog cjepiva.



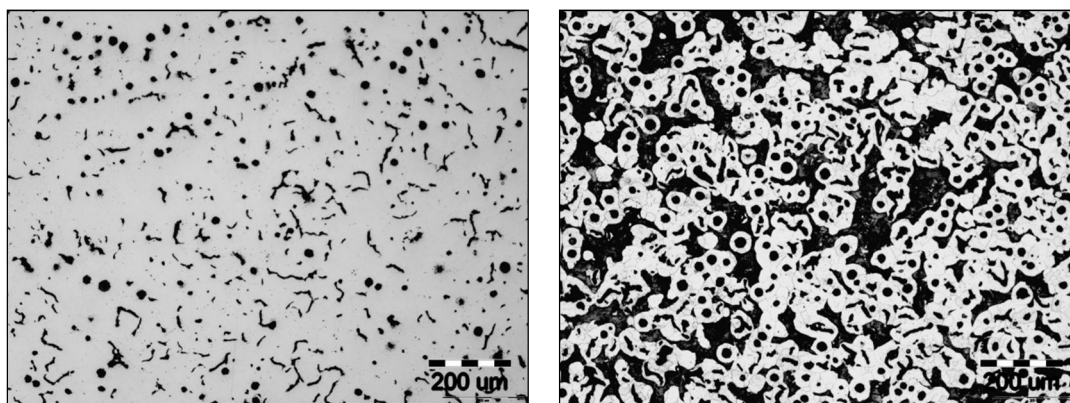
a)

b)

Slika 13. Mikrostruktura vermikularnog lijeva koji sadrži 0,01 %Mg: a) dodatak cjepiva 0,35 %, b) dodatak cjepiva 0,2 % [1]

3.4 Utjecaj brzine hlađenja

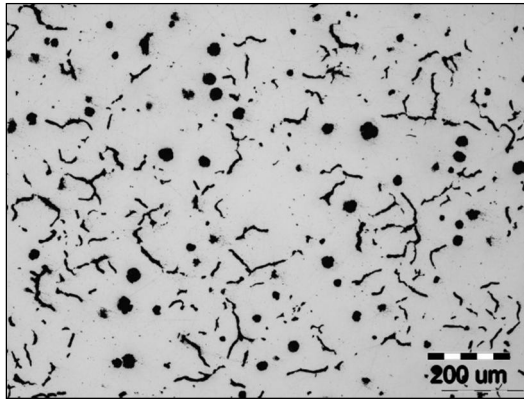
Brzina hlađenja tijekom i nakon skrućivanja ima velik utjecaj na mikrostrukturu odljevka [1, 3]. S porastom brzine hlađenja tijekom skrućivanja povećava se udio nodularnog grafita (slike 14 - 16). Prema tome proizvodnja tankostijenih odljevaka od vermikularnog lijeva je puno zahtjevnija od proizvodnje debelostijenih odljevaka. Udio perlita u metalnoj osnovi povećava se, a udio ferita smanjuje s povećanjem brzine hlađenja odljevka nakon skrućivanja (slike 14 – 16).



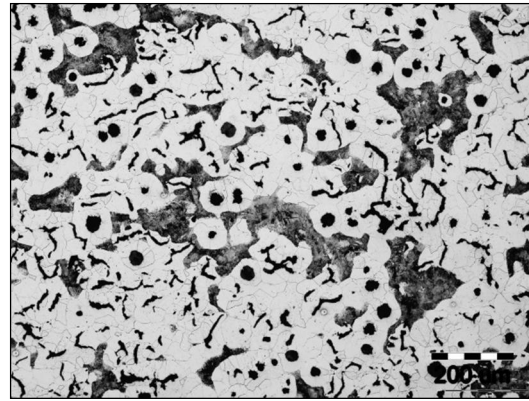
a)

b)

Slika 14. Mikrostruktura stijenke debljine 6,3 mm u odljevku od vermikularnog lijeva koji sadrži 3,4 %C, 2,67 %Si i 0,007 %Mg: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital [1]

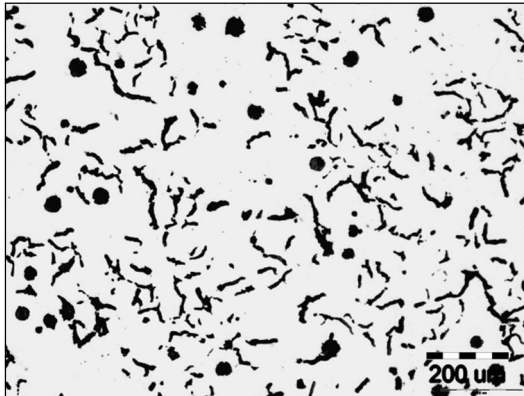


a)

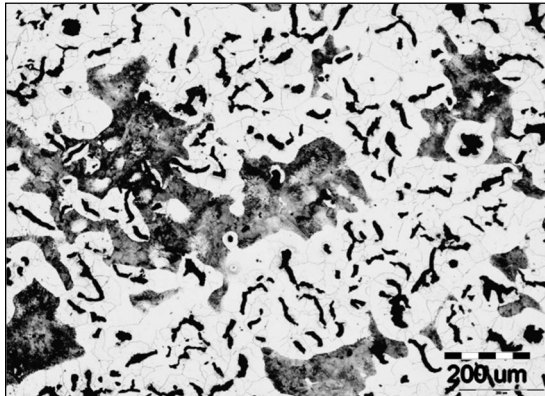


b)

Slika 15. Mikrostruktura stijenke debljine 12,7 mm u odljevku od vermikularnog lijeva koji sadrži 3,4 %C, 2,67 %Si i 0,007 %Mg: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital [1]



a)



b)

Slika 16. Mikrostruktura stijenke debljine 25,4 mm u odljevku od vermikularnog lijeva koji sadrži 3,4 %C, 2,67 %Si i 0,007 %Mg: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital [1]

4. PROIZVODNJA VERMIKULARNOG LIJEVA

Proces proizvodnje vermikularnog lijeva sastoji se od sljedećih faza [1]:

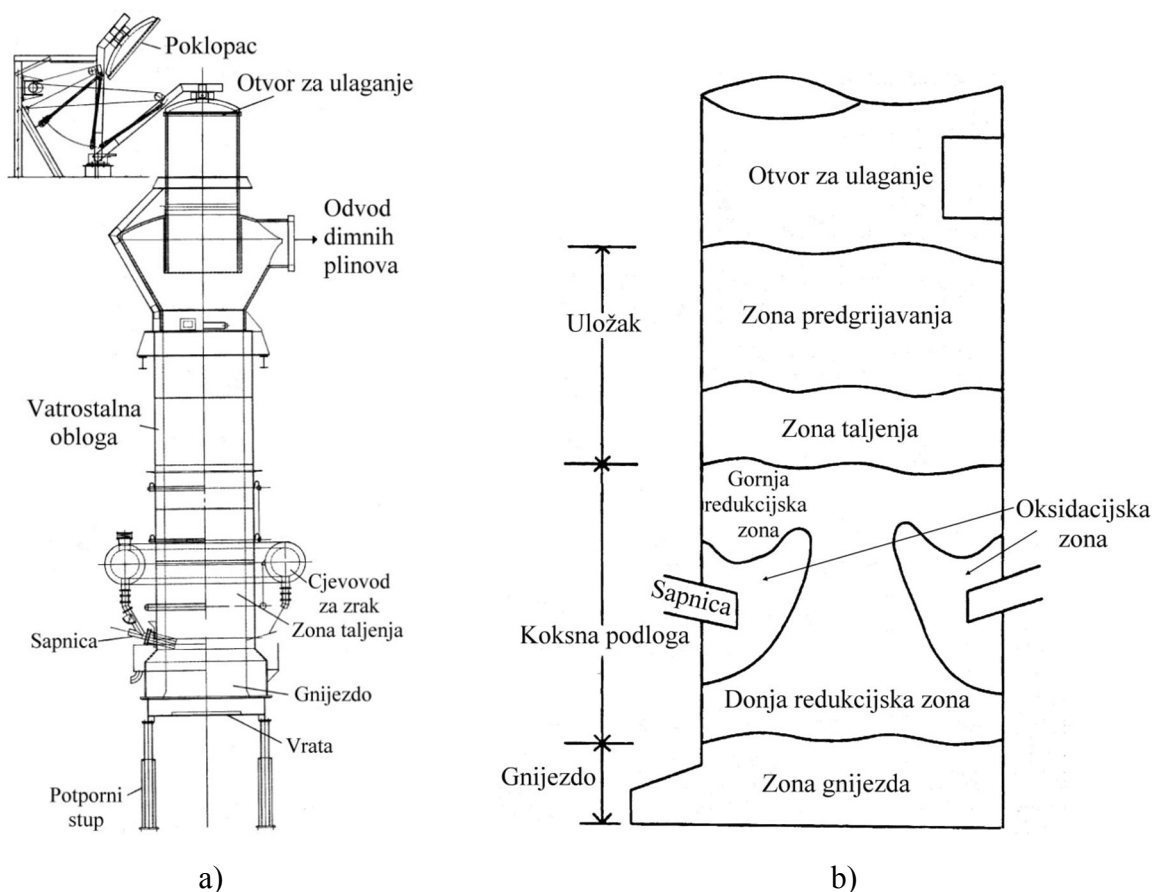
- proizvodnja primarne taline,
- obrada primarne taline.

4.1 Proizvodnja primarne taline

Primarna talina odgovarajućeg kemijskog sastava i temperature najčešće se proizvodi u kupolnim i indukcijskim pećima.

4.1.1 Proizvodnja primarne taline u kupolnoj peći

Na slici 17 shematski je prikazana kupolna peć i zone koje su prisutne u njoj.



Slika 17. a) shematski prikaz suvremene kupolne peći [12], b) zone u kupolnoj peći [13]

Plast peći izrađen je od čelika i ima kružni poprečni presjek. Peć je iznutra obzidana vatrostalnim materijalom (najčešće kiselim) ili se koristi kombinacija vatrostalnog materijala (u donjim jače toplinski opterećenim dijelovima peći) i hlađenja vodom (u gornjim

dijelovima peći). Otvori za ispuštanje tekućeg metala i troske nalaze se u donjem dijelu, tj. u gnijezdu peći. Kroz sapnice koje su raspoređene po obodu plašta u peć se uvodi zrak potreban za izgaranje goriva, tj. koksa. Sirovine se u peć ulažu kroz bočno postavljen otvor u gornjem dijelu peći ili kroz vrh peći.

Sirovine za proizvodnju primarne taline u kupolnoj peći mogu se podijeliti na metalne i nemetalne [1, 2]. Metalne sirovine su sivo sirovo željezo, čelični otpad i povratni materijal u ljevaonici (uljevni sustavi, pojila, neispravni odljevci). Udio navedenih sirovina u ulošku varira ovisno o njihovoj raspoloživosti i zahtijevanim svojstvima odljevaka koji se proizvode. Ferolegure se dodaju ako se propisani udjeli pojedinih elemenata u talini ne mogu dobiti iz navedenih komponenti uloška. Nemetalne komponente uloška su koks i talitelji. Izgaranjem koksa dobiva se toplina koja je potrebna za zagrijavanje i taljenje komponenti uloška te zagrijavanje tekućeg metala i troske. Udio koksa u ulošku obično se kreće od 8 do 16 % od mase metalnog dijela uloška [12]. Talitelji formiraju trosku koja djeluje rafinacijski. U trosku odlaze nečistoće fizički vezane na sirovine, zatim pepeo iz koksa, oksidi raznih elemenata (npr. silicija, mangana, željeza itd.) nastali tijekom taljenja, čestice vatrostalnog materijala itd. Najčešće korišteni talitelji su vapnenac i dolomit. Dodatak u peć kiselom oblogom kreće se od 2 do 8 % od mase metalnog dijela uloška [12]. Bazična obloga omogućuje veći dodatak talitelja, a time i veći stupanj odsumporavanja u peći.

U praznoj peći najprije se formira koksna podloga čiji je zadatak da drži sav uložak koji se nalazi iznad nje. Iz tog razloga u peć se od dna do određene visine iznad sapnica (obično 1 do 1,5 m) ubacuje samo koks [14]. Nakon što se taj koks zapali i užari, u peć se naizmjenično ubacuju metalne i nemetalne komponente uloška do otvora za ulaganje. Potom se u peć dovodi zrak kroz sapnice i dolazi do izgaranja koksa.

Vrući plinovi nastali izgaranjem koksa kreću se prema gornjim dijelovima peći i pri tome zagrijavaju uložne materijale koji se spuštaju prema dolje. Metalni uložni materijali i talitelji započinju se taliti u zoni taljenja (slika 17b). Nastale kapljice taline prolaze kroz koksnu podlogu pri čemu se intenzivno zagrijavaju. Koksna podloga ostaje u krutom stanju do temperature od ≈ 2000 °C, što omogućuje da drži uložne materijale u peći koji se nalaze iznad nje [14]. Koks koji dolazi sa uloškom zamjenjuje koks koji je sagorio u koksnoj podlozi. Prema tome, taljenje se odvija kontinuirano sve dok se u peć upuhuje zrak.

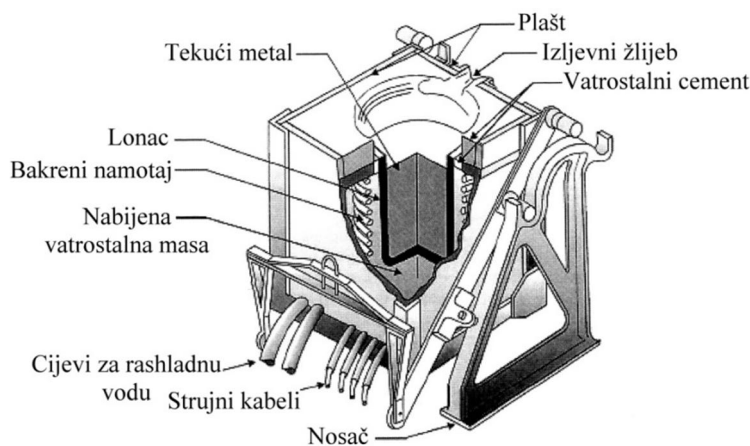
S obzirom da koks sadrži visok udio ugljika i povišen udio sumpora, kapljice tekućeg metala naugljčuju se i nasumporavaju prilikom prolaza kroz koksnu podlogu. U području iznad sapnica dolazi do blage oksidacije željeza. Nastali oksidi željeza reduciraju se u području ispod sapnica. Dio silicija i mangana iz uložnih materijala također se oksidira. Ti oksidi djelomično se reduciraju s ugljikom iz koksa, pri čemu se oslobađa silicij i mangan koji završavaju u tekućem željezu. Svi oksidi metala koji nisu reducirani u nižim dijelovima peći završavaju u troski. Tekuća troska i metal sakupljaju se u gnijezdu peći gdje se razdvajaju zbog razlike u gustoći. Tekući metal ispušta se iz peći kontinuirano ili povremeno ovisno o načinu rada peći.

Kemijski sastav taline iz kupolne peći ovisi o kemijskom sastavu svih uložnih materijala i stupnju oksidacije elemenata tijekom taljenja. Tipična iskorištenja elemenata iz uloška u kupolnoj peći s kiselom oblogom su: silicij 90 %, mangan 85 %, nikal 100 %, krom 90 %, molibden 95 %, bakar 100 %, kositar 100 %, magnezij 0 %, elementi rijetkih zemalja 0 %, fosfor 100 % [13]. S druge strane, zbog primjene koksa, udio ugljika u talini se povećava za 0,4 do 0,8 %, a udio sumpora od 0,03 do 0,05 % [13].

Talina iz kupolne peći često ima visok udio sumpora koji najvećim dijelom potječe iz koksa. S obzirom da taline s visokim udjelom sumpora nisu pogodne za proizvodnju vermikularnog lijeva, treba ih prije obrade odsumporiti izvan peći pomoću CaC_2 ili $\text{CaO} + \text{CaF}_2$ [13].

4.1.2 Proizvodnja primarne taline u indukcijskoj peći

Indukcijska peć s loncem vrlo se često koristi za proizvodnju primarne taline (slika 18) [1]. Lonac je obložen vatrostalnom oblogom. Oko lonca s vanjske strane namotan je bakreni vodič koji se hladi vodom. Bakreni namotaj povezan je s transformatorom, odnosno izvorom električne energije.



Slika 18. Shematski prikaz indukcijske peći s loncem [12]

Zbog toka struje kroz bakreni vodič stvara se magnetsko polje koje prolazi kroz metalni uložak u peći. Taljenje u indukcijskoj peći rezultat je konverzije električni induciranog magnetskog polja u toplinu unutar metalnih uložnih materijala. Prolaz magnetskog polja kroz uložni materijal generira električne struje u njemu koje se konvertiraju u toplinu zbog otpora kojeg pruža metalni uložak. Do taljenja dolazi kad se dovoljna energija unese u metalni uložak. Kad se metalni uložak rastali, zbog djelovanja magnetskog polja dolazi do miješanja taline u peći. Time se postiže visoka homogenost kemijskog sastava i temperature. Daljnji dotok energije rezultira povećanjem temperature tekućeg metala. U indukcijskoj peći unos energije može se striktno kontrolirati. To omogućuje preciznu kontrolu temperature tekućeg metala u peći.

Metalni uložak za indukcijsku peć obično se sastoji od sivog sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog materijala u ljevaonici [1]. Udio navedenih komponenti može značajno varirati ovisno o njihovoj dostupnosti i zahtjevima koje odljevci moraju ispuniti. Ferolegure se dodaju po potrebi. S obzirom da se u indukcijskim pećima često koristi visok udio čeličnog otpada u ulošku, najčešće korištena ferolegura je FeSi da bi se ostvario potreban udio silicija u talini. Iz istog razloga te činjenice da se u indukcijskoj peći ne koristi koks, sredstvo za naugljičenje često je sastavni dio uloška za peć.

Indukcijske peći pružaju veliku fleksibilnost u radu [1]. Sva talina iz peći može se izliti i potom se peć ponovo puni uložnim materijalima. Peć može raditi i tako da se samo dio taline izlijeva, a nakon toga se u preostalu talinu dodaju uložni materijali. Na taj način se ubrzava taljenje.

Kemijski se sastav može znatno preciznije kontrolirati u indukcijskoj nego u kupolnoj peći zbog znatno manjeg gubitka elemenata uslijed oksidacije tijekom taljenja i eliminacije koksa kao goriva. S obzirom da se ne koristi koks, udio sumpora u talini je znatno niži nego u talini iz kupolne peći. Rafinacija u indukcijskoj peći nije moguća jer se ne dodaju talitelji za formiranje troske. Zbog toga kemijski sastav komponenti metalnog uloška direktno utječe na kemijski sastav taline u peći. Prema tome, točno vaganje prije ulaganja u peć i poznavanje kemijskog sastava sirovina od velike su važnosti za postizanje ciljanog kemijskog sastava taline u peći.

4.2 Obrada primarne taline

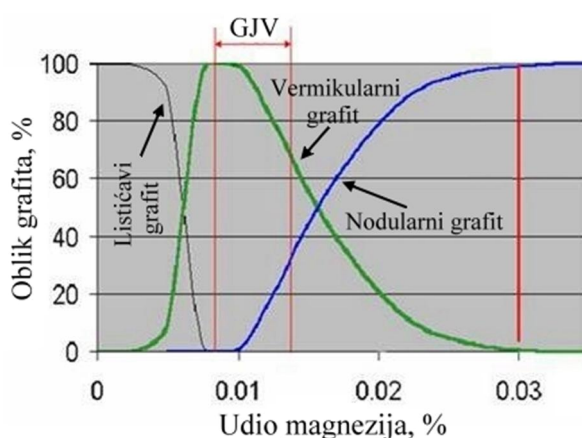
Pod obradom primarne taline smatra se dodatak određenih elemenata u talinu koji omogućuju formiranje vermikularnog grafita tijekom skrućivanja. Zbog toga, ta faza proizvodnje često se naziva vermikularizacija. U principu, sve metode obrade mogu se svrstati u dvije skupine [15]:

- podobrada sa sferoidizacijskim elementima,
- kombinirani dodatak sferoidizacijskih i antisferoidizacijskih elemenata.

4.2.1 Podobrada sa sferoidizacijskim elementima

Kod ove metode u primarnu talinu dodaju se sferoidizacijski elementi, s tim da je dodatak niži nego kod proizvodnje nodularnog lijeva. Zbog toga dolazi do stvaranja vermikularnog, a ne nodularnog grafita tijekom skrućivanja. Sferoidizacijski elementi koji se koriste u ovoj metodi proizvodnje su magnezij, cerij i kalcij [15].

Dodatak male točno određene količine magnezija u primarnu talinu omogućuje formiranje vermikularnog grafita tijekom skrućivanja. Danas je to najčešće upotrebljavana metoda za proizvodnju vermikularnog lijeva [15]. Međutim, ta metoda zahtijeva striktnu kontrolu udjela sumpora u primarnoj talini jer magnezij ima visok afinitet prema tom elementu. Pored toga, magnezij ima visok afinitet i prema kisiku. Magnezij u primarnoj talini prvo reagira sa sumporom i kisikom. Ako se tim reakcijama magnezij „potroši“, u talini neće ostati dovoljno “slobodnog“ (rezidualnog) magnezija koji je potreban za formiranje vermikularnog grafita [16]. U tom slučaju doći će do stvaranja listićavog grafita koji je nepoželjan u mikrostrukturi vermikularnog lijeva. S druge strane, previsok udio magnezija u talini dovest će do stvaranja nodularnog grafita, čiji se udio ograničava na maks. 20 % [6, 7]. Vrlo male promjene udjela magnezija u talini mogu rezultirati značajnim varijacijama udjela pojedinog oblika grafita u mikrostrukturi (slika 19). Pri određivanju optimalnog dodatka magnezija treba uzeti u obzir i brzinu hlađenja odljevka, odnosno debljinu njegove stijenke.



Slika 19. Utjecaj udjela magnezija na udio listićavog, vermikularnog i nodularnog grafita u vermikularnom lijevu [1]

Još jedan problem koji se javlja kod metode točnog dodatka magnezija je smanjenje njegovog udjela s vremenom. Taj odgor magnezija obično iznosi 0,001 %/5 min. [1]. Zbog

toga talinu treba što prije odliti u kalupe nakon dodatka magnezija. Pored toga, vrlo je važno da početni udio magnezija u talini bude dovoljno visok, jer u protivnom u zadnje lijevanim odljevcima zbog odgora magnezija može doći do stvaranja listićavog grafita.

Čisti cerij ili predlegure elemenata rijetkih zemalja (RE) koje uglavnom sadrže cerij, također omogućuju formiranje vermikularnog grafita. Potreban rezidualni udio cerija za stvaranje vermikularnog grafita obično se kreće od 0,02 do 0,05 %, što ovisi o udjelu sumpora u talini [1]. Upotreba predlegura na osnovi elemenata rijetkih zemalja (koje se većinom sastoje od cerija) ima određene prednosti pred magnezijem, a to su: manja emisija plinova (dima) tijekom obrade, manji odgor i veća topljivost u željezu [17]. Međutim, s druge strane, elementi rijetkih zemalja imaju veću sklonost ka stvaranju karbida od magnezija, što ograničava njihovu upotrebu u proizvodnji tankostijenih odljevaka, te višu cijenu [17]. Efikasnost elemenata rijetkih zemalja za formiranje vermikularnog grafita povećava se prema sljedećem nizu: $Nd < Pr < Ce < La$ [15]. Očito je da je lantan najefikasniji od navedenih elemenata za stvaranje vermikularnog grafita i njegov rezidualni udio može se nalaziti u širim granicama nego kod ostalih elemenata. Iz navedenih razloga za proizvodnju vermikularnog lijeva upotrebljavaju se predlegure koje sadrže magnezij i elemente rijetkih zemalja.

Kalcij je slabiji sferoidizacijski element od magnezija i elemenata rijetkih zemalja [15]. Zbog toga se produžuje proces pretvorbe vermikularnog u nodularni grafit i povećava dozvoljeni dodatak predlegure koja sadrži kalcij. Pored toga, kalcij ima manju sklonost ka stvaranju karbida od magnezija i elemenata rijetkih zemalja zbog čega se može upotrijebiti u proizvodnji tankostijenih odljevaka. Jedan od nedostataka kalcija je taj što on stvara okside i sulfide s visokom temperaturom taljenja koji prekrivaju površinu predlegure čime sprečavaju njenu daljnju reakciju s talinom. Osim toga, veličina atoma kalcija je relativno velika što otežava njegovu difuziju. To zahtijeva visoku temperaturu primarne taline ako se dodaju predlegure koje sadrže kalcij.

Magnezij, kao najčešće korišteni sferoidizacijski element, ima nisku temperaturu isparavanja. To znatno otežava njegovo usvajanje u talini željeznih ljevova i rezultira niskim iskorištenjem. Da bi se postiglo bolje iskorištenje i efikasnost sferoidizacijskih elemenata, u primarnu talinu dodaju se u obliku legura različitog kemijskog sastava. S obzirom da cilj nije legirati talinu, već se samo dodati sferoidizacijske elemente koji su potrebni za stvaranje vermikularnog grafita, upotrebljava se termin predlegura. U tablici 4 prikazane su najčešće predlegure koje se upotrebljavaju u procesu proizvodnje vermikularnog lijeva metodom podobrade sferoidizacijskim elementima.

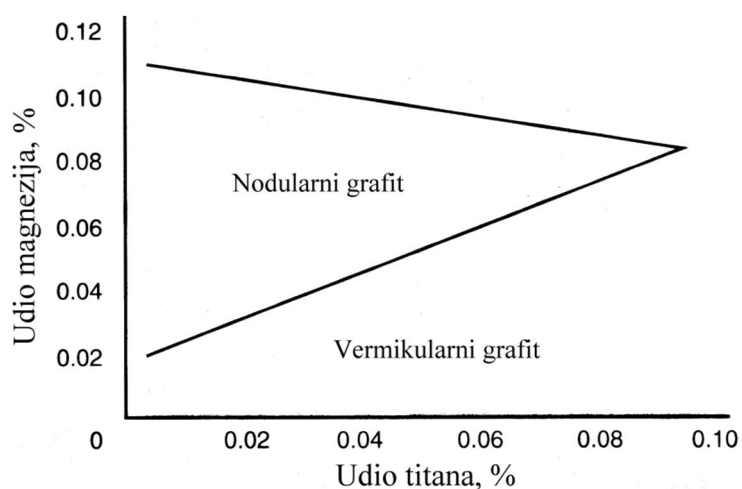
Tablica 4. Predlegure za proces proizvodnje vermikularnog lijeva metodom podobrede sferoidizacijskim elementima [15]

Vrsta predlegure		Sastav
Mg skupina		Mg5 ili Mg5RE1
		Mg6Ca5RE3
Ca skupina		Ca5
		Ca24Mg5RE3
		Ca20RE10
RE skupina	Ce Mischmetal	Ce90La5Nd4
		Ce50La33Nd12Pr4
	RE-FeSi	RE28Si45
		RE34Si42 sa bazi La
	RE-Mg	RE7Mg8
		RE18Mg8
		RE25Mg3
		RE15Mg5Ca10
		RE20Mg1Ca2
RE-Ca	RE20Ca10	

4.2.2 Kombinirani dodatak sferoidizacijskih i antisferoidizacijskih elemenata

Glavna karakteristika ove metode proizvodnje vermikularnog lijeva je upotreba antisferoidizacijskih elemenata, odnosno elemenata koji otežavaju formiranje nodularnog grafita. Na taj način se olakšava dobivanje vermikularnog grafita kako u debelim tako i u tankim stjenkama odljevka, jer se udio magnezija, odnosno sferoidizacijskih elemenata može kretati u širim granicama.

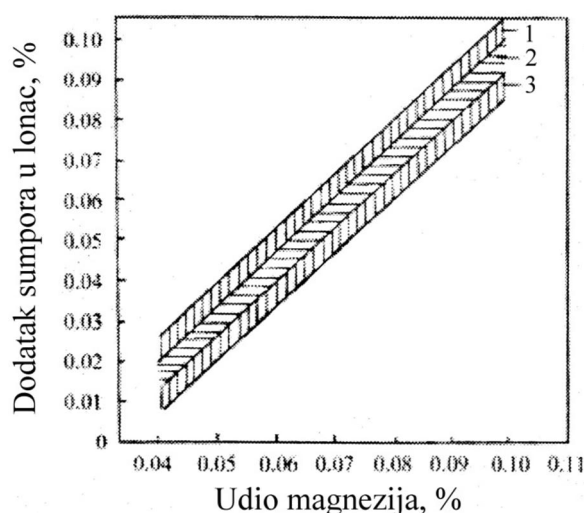
Titan i aluminij najčešće su korišteni antisferoidizacijski elementi u proizvodnji vermikularnog lijeva [15, 17]. S obzirom da se ne radi o elementima s jakim antisferoidizacijskim učinkom, njihov udio može se kretati u širim granicama, što omogućuje lakšu kontrolu. Iz dijagrama prikazanog na slici 20 može se odrediti potreban dodatak titana ovisno o udjelu magnezija.



Slika 20. Utjecaj titana na nodularizacijski učinak magnezija [18]

Premda se dodatkom titana olakšava proces proizvodnje vermikularnog lijeva, postoje i neki nedostaci takvog pristupa [1, 18]. Jedan od nedostataka je svakako visoka cijena titana. Povratni materijal nastao u procesu proizvodnje odljevaka od vermikularnog lijeva sadrži titan, zbog čega ne može koristiti kao uložni materijal u procesu proizvodnje odljevaka od nodularnog lijeva. Titan stvara nitrde i karbonitrde visoke tvrdoće, što otežava strojnu obradu odljevaka.

Sumpor je tipičan antisferoidizacijski element [15]. Dodatak male količine sumpora može promijeniti oblik grafita iz nodularnog u vermikularni. Obično se dodaje kao FeS₂ ili u čistom obliku. Potreban dodatak sumpora je manji od potrebnog dodatka titana i aluminija, a ovisi o udjelu magnezija i brzini hlađenja odljevka. Prednost u odnosu na titan je i ta da se povratni materijal može koristiti za proizvodnju nodularnog lijeva. Ako se udio magnezija nalazi u granicama od 0,025 do 0,04 %, udio sumpora treba se kretati u intervalu od 0,005 do 0,015 % [15]. Dijagram prikazan na slici 21 omogućuje detaljnije određivanje potrebnog dodatka sumpora ovisno o udjelu magnezija.



Slika 21. Potreban dodatak sumpora ovisno o udjelu magnezija kako bi se u stjenkama debljine od 10 do 20 mm dobio vermikularni grafit (lijevanje u jednokratni pješčani kalup; 1 – 5 min., 2 – 10 min., 3 – 15 min. nakon dodatak magnezija) [15]

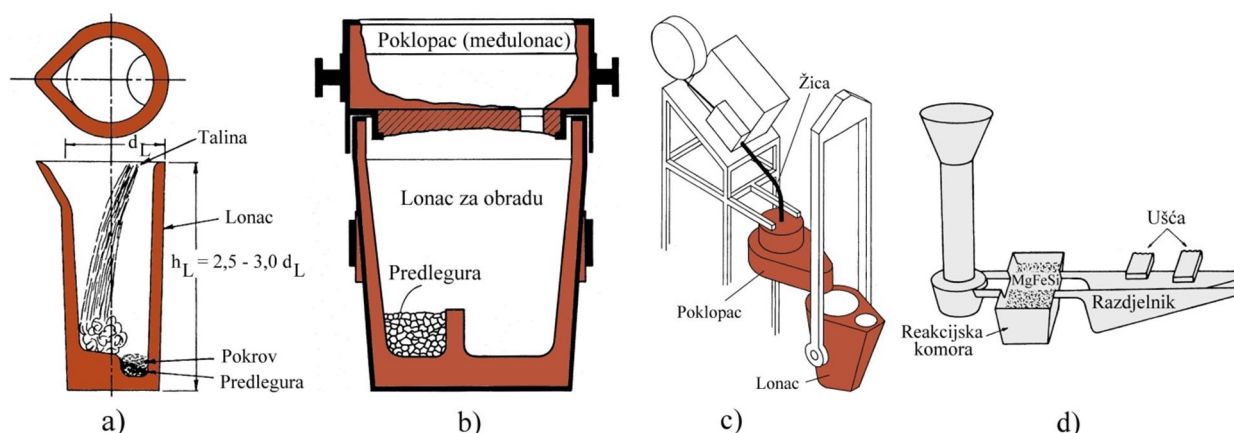
U tablici 5 prikazane su najčešće predlegure koje se upotrebljavaju u procesu proizvodnje vermikularnog lijeva metodom kombiniranog dodatka sferoidizacijskih i antisferoidizacijskih elemenata.

Tablica 5. Predlegure za proces proizvodnje vermikularnog lijeva metodom kombiniranog dodatka sferoidizacijskih i antisferoidizacijskih elemenata [15]

Vrsta predlegure	Sastav
Mg (Ca) + Ti (Al) skupina	Mg8Ti10Si50
	Mg8Ti4Al12Ca2Ce0,4
	Mg5Ti8Al12Ca5RE1
	Mg5Ti4Ca4RE2
RE-Mg (Ca) + Ti (Al)	RE10Mg5Ca2Al2
	RE20Mg5Ti2Al2
	RE25Mg3Ti5
Mg (RE) + S	Mg(RE) + S

4.2.3 Postupci dodavanja predlegure u primarnu talinu

Najčešće korišteni postupci za dodavanje predlegure u primarnu talinu prikazani su na slici 22.



Slika 22. Postupci za dodavanje predlegure u primarnu talinu: a) postupak obrade u otvorenom loncu, b) postupak obrade u pokrivenom loncu, c) postupak obrade punjenom žicom, d) postupak obrade u kalupu [1]

Najjednostavniji način je dodatak predlegure u džep na dnu otvorenog lonca i potom prelijevanje primarnom talinom (slika 22a). Postavljanjem poklopca na lonac zadržavaju se pare magnezija, što u konačnici rezultira njegovim većim iskorištenjem (slika 22b). Predlegura se može dodati i u uljevni sustav u kalupu (slika 22d). Nakon toga u kalup se ulijeva primarna talina i dolazi do otapanja predlegure i obrade. Time se postiže visoko iskorištenje magnezija. Međutim, u tom slučaju svaki odljevak je slučaj za sebe.

Postupak obrade punjenom žicom (slika 22c) omogućuje preciznu kontrolu udjela magnezija u talini. Zbog toga se pokazao najpogodnijim za proizvodnju vermikularnog lijeva kada se zahtijeva da se magnezij nalazi u uskim granicama. Lonac s primarnom talinom postavlja se u uređaj za obradu i na njega se stavlja poklopac. Prije uvođenja čelične žice u kojoj se nalazi predlegura u talinu potrebno je u regulacijski sustav uređaja unijeti masu primarne taline u loncu i udio sumpora. Temperatura taline mora se striktno kontrolirati kako bi se ostvarili konzistentni rezultati obrade. Žica se pomoću odgovarajućeg mehanizma određenom brzinom uvodi okomito u primarnu talinu u loncu. Pri dnu lonca žica se rastali i potom dolazi do reakcije primarne taline s predlegurom. Time je spriječeno da nastale pare magnezija brzo odu iz lonca u atmosferu, što u konačnici rezultira boljim usvajanjem magnezija.

4.3 Cijepljenje

Cijepljenjem taline vermikularnog lijeva utječe se na mikrostrukturu, a time i svojstva odljevaka. Najznačajniji učinci cijepljenja na mikrostrukturu su [1]:

- povećanje nukleacijskog potencijala taline, odnosno broja pogodnih uključaka na kojima dolazi do izlučivanja vermikularnog grafita tijekom skrućivanja i
- smanjenje mogućnosti stvaranja karbida tijekom skrućivanja.

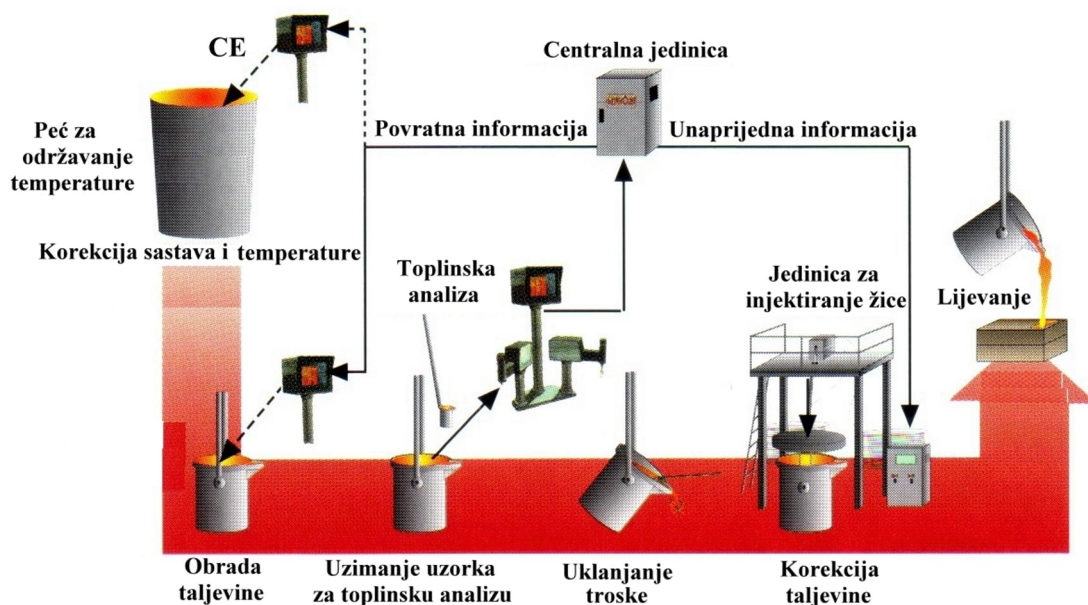
Kao cjepivo koristi se FeSi sitne granulacije koji sadrži određene elemente, kao što su aluminij, kalcij, barij, stroncij itd., značajne za formiranje pogodnih uključaka za izlučivanje vermikularnog grafita tijekom skrućivanja. Količina dodanog cjepiva ovisi o brojnim faktorima, a obično iznosi do 0,5 % od mase taline vermikularnog lijeva u koju se dodaje. U praksi se primjenjuju različite metode cijepjenja, a najčešće su [1]:

- dodatak cjepiva u lonac s predlegurom,
- dodatak cjepiva u mlaz taline prilikom lijevanja u kalup,
- dodatak cjepiva u lonac s predlegurom i potom u mlaz taline prilikom lijevanja u kalup,
- dodatak cjepiva u uljevni sustav u kalupu.

Najbolji rezultati uz najmanji dodatak postižu se kada se cjepivo doda u mlaz taline prilikom lijevanja u kalup ili ako se doda u uljevni sustav u kalupu.

4.4 SinterCast® postupak proizvodnje vermikularnog lijeva

SinterCast® postupak je jedan od najstarijih i najčešće korištenih pouzdanih postupaka za proizvodnju vermikularnog lijeva [19]. Shematski je prikazan na slici 23. Karakterizira ga poseban sustav kontrole procesa zasnovan na toplinskoj analizi taline koji omogućuje postizanje konzistentnih rezultata. Toplinskom analizom snima se krivulja hlađenja taline tijekom skrućivanja. Krivulje hlađenja sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva razlikuju se, što omogućuje procjenu mikrostrukture odljevaka prije lijevanja taline u kalupe.



Slika 23. Shematski prikaz SinterCast® postupka proizvodnje vermikularnog lijeva [19]

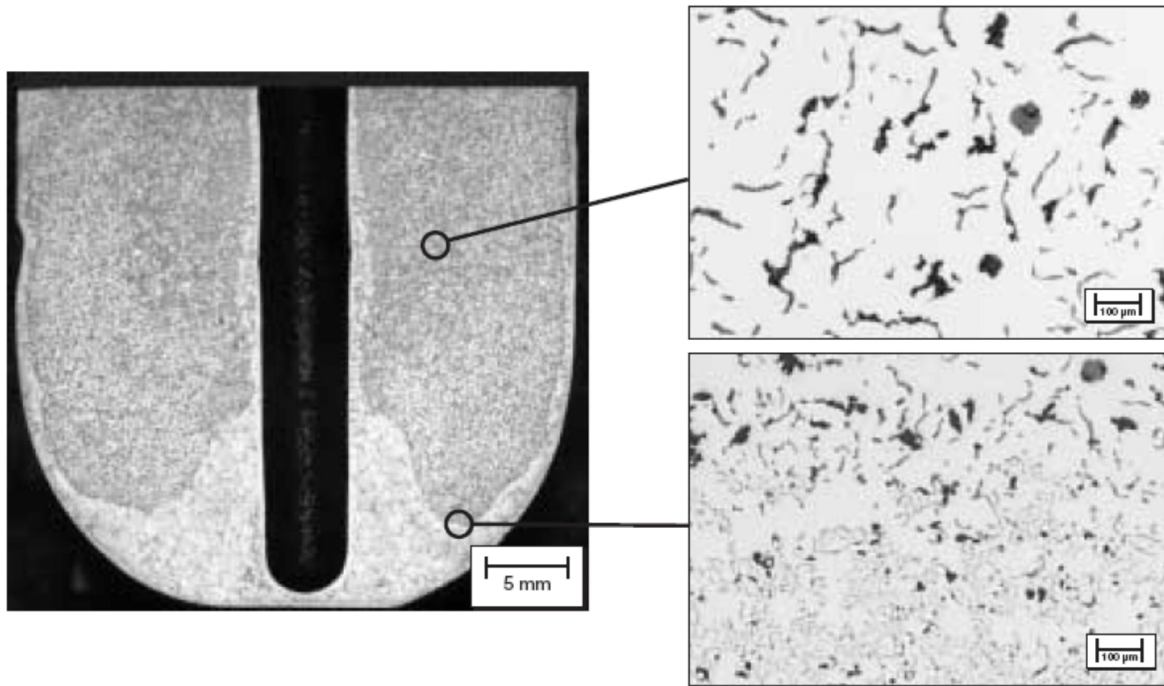
Proces proizvodnje odvija se na sljedeći način. Obrada primarne taline odvija se u dva koraka. U prvom koraku primarna talina s niskim udjelom sumpora obrađuje se i cijepi u otvorenom loncu. Dodatak predlegure koja sadrži magnezij i cjepiva podešen je tako da se

dobije „podobrađena“ talina, odnosno udio magnezija koji nije puno veći od donje granice za vermikularni lijev. Na taj način izbjegava se previsok udio magnezija u talini u slučajevima kada je njegovo iskorištenje veliko i s tim povezan visok udio nodularnog grafita u mikrostrukturi odljevaka. Nakon prvog koraka obrade, u obrađenu talinu uranja se posebno razvijena SinterCast[®] proba radi uzimanja uzorka za toplinsku analizu.

SinterCast[®] proba u sredini ima čeličnu cjevčicu u koju se smještaju dva više puta upotrebljiva termoelementa (slika 24). Prvi termoelement nalazi se u toplinskom centru probe, a drugi blizu dna. Na unutarnje stijenke probe nanosena je posebna reaktivna prevlaka s kojom magnezij reagira i pri tome se u određenoj mjeri troši. Time je postignuto da je udio magnezija u talini na dnu probe za 0,003 % manji nego u centru probe, što zapravo simulira odgor magnezija za vrijeme lijevanja odljevaka [19]. Od završetka obrade do kraja lijevanja odljevaka obično proteče 10 do 15 minuta i pri tome se udio magnezija u talini smanji za 0,003 %. Prema tome, oko termoelementa koji se nalazi u toplinskom centru probe nalazi se talina koja nije reagirala s reaktivnom prevlakom, dok je termoelement na dnu probe okružen talinom koja je reagirala s reaktivnom prevlakom. To znači da termoelement u toplinskom centru probe pruža informacije o skrućivanju odljevaka na početku lijevanja, dok termoelement na dnu probe simulira skrućivanje odljevaka na kraju lijevanja (slika 25). Centralna jedinica, odnosno sustav kontrole analizira obje snimljene krivulje hlađenja i uspoređuje ih s prethodno definiranim parametrima u bazi koji osiguravaju dobivanje željene mikrostrukture odljevaka. Na osnovi toga određuje da li i koliko treba naknadno dodati magnezija i cjepiva u talinu. Ako treba dodati magnezij i cjepivo, slijedi drugi korak obrade za koji se koristi postupak s punjenom žicom i potom lijevanje.



Slika 24. SinterCast[®] proba za toplinsku analizu taline vermikularnog lijeva [19]



Slika 25. Mikrostruktura u toplinskom centru i na dnu SinterCast[®] probe (reaktivna prevlaka reagira s magnezijem i na taj način simulira njegov odgor tijekom lijevanja) [19]

5. SVOJSTVA VERMIKULARNOG LIJEVA

Vermikularni lijev se po svojim svojstvima može smjestiti između sivog i nodularnog lijeva (tablica 6).

Tablica 6. Usporedba svojstava sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva [18, 20]

Vrsta lijeva	Metalna osnova	Tvrdoća, HB	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Granica razvlačenja, N/mm ²	Istezanje, %	Dinamička čvrstoća, N/mm ²	Modul elastičnosti, kN/mm ²	Toplinska vodljivost, W/mK
GJL	perlitna	175-230	230-300	115-210	0 – 1	95–110	105-115	44-52
GJV	feritna	130-190	330-410	240-305	5 - 10	155–185	130-150	40-50
	perlitna	215-250	400-580	345-415	2 - 5	190–225	130-155	31-42
GJS	feritna	140-200	400-600	285-315	15 - 25	185–210	155-156	32-38
	perlitna	240-300	600-700	375-482	3 - 10	245-290	160-170	25-32

U usporedbi sa sivim lijevom, vermikularni lijev ima sljedeće prednosti [3]:

- viša vlačna čvrstoća pri istoj vrijednosti ugljičnog ekvivalenta čime se smanjuje potreba za skupim legirnim elementima, kao što su nikal, krom, bakar i molibden,
- viši omjer vlačne čvrstoće i tvrdoće,
- znatno viša duktilnost i žilavost čime se povećava sigurnost komponente s obzirom na lom,
- niža oksidacija i rast na visokim temperaturama,
- manja osjetljivost vlačne čvrstoće na debljinu stijenke odljevka.

Prednosti vermikularnog lijeva nad nodularnim lijevom su [3]:

- niži koeficijent toplinske ekspanzije,
- viša toplinska vodljivost,
- bolja otpornost na toplinski šok,
- veća sposobnost prigušenja vibracija,
- bolja livljivost, što daje bolji izvadak odljevaka i omogućuje lijevanje odljevaka koji imaju kompleksne oblike,
- lakša strojna obrada odljevaka.

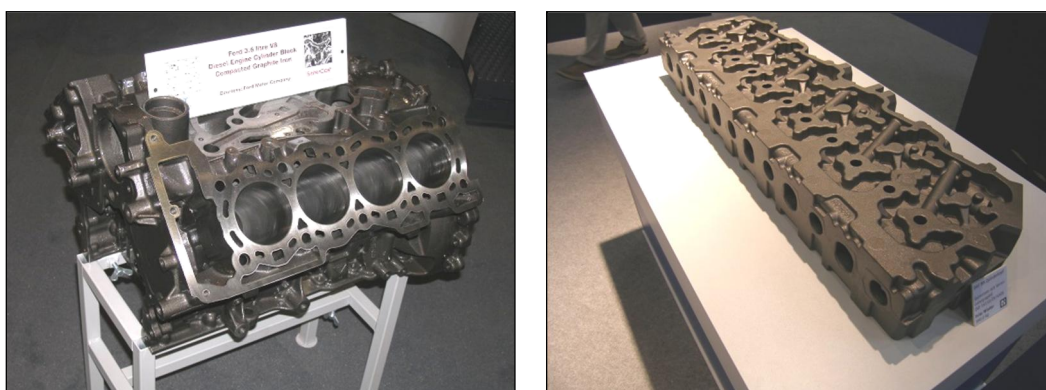
Svojstva svih kvaliteta vermikularnog lijeva koje su specificirane u normi EN 16079:2010, odnosno ISO 16112:2006 prikazana su u tablici 7.

Tablica 7. Svojstva vermikularnih ljevova specificiranih normom EN 16079:2010, odnosno ISO 16112:2006 [6, 7]

Oznaka prema normi EN 16079:2010 (ISO 16112:2006)	Svojstva
EN-GJV-300 (ISO 16112/JV/300/S)	Najniža čvrstoća i najviša duktilnost. Visoka toplinska vodljivost i nizak modul elastičnosti minimaliziraju akumulaciju toplinski induciranih naprezanja. Pretežno feritna metalna osnova minimalizira rast tijekom dužeg izlaganja povišenim temperaturama.
EN-GJV-350 (ISO 16112/JV/350/S)	Viša čvrstoća u odnosu na legirani sivi ljev. Dobra duktilnost. Bolja livljivost i strojna obradivost od nodularnog lijeva.
EN-GJV-400 (ISO 16112/JV/400/S)	Kombinacija čvrstoće, krutosti i toplinske vodljivosti. Dobra otpornost na trošenje.
EN-GJV-450 (ISO 16112/JV/450/S)	Viša čvrstoća, krutost i otpornost na trošenje u odnosu na EN-GJV-400 (ISO 16112/JV/400/S), ali teža strojna obradivost.
EN-GJV-500 (ISO 16112/JV/500/S)	Najviša čvrstoća i najniža duktilnost. Najviša otpornost na trošenje i najteža strojna obradivost.

6. PRIMJENA VERMIKULARNOG LIJEVA

Industrija motornih vozila najveće je područje primjene vermikularnog lijeva [1, 2, 18, 21, 22]. Osim što zamjenjuje sivi i nodularni lijev u pojedinim aplikacijama, vermikularni lijev može u određenim područjima zamijeniti i čelični lijev. Masa pojedine komponente automobila može se smanjiti za 15 do 20 % primjenom vermikularnog lijeva umjesto čelika [21]. Od vermikularnog lijeva izrađuju se mnoge komponente motora s unutarnjim izgaranjem, kao što su kućišta i glave motora, ispušne grane, klipni prsteni i cilindri (slika 26). Zamjenom sivog lijeva s vermikularnim može se ostvariti smanjenje mase kućišta motora za 10 do 15 % [22]. Osim toga, vermikularni lijev može se upotrijebiti za izradu pojedinih komponenti kočionog sustava, kao što kočioni diskovi i bubnjevi.



a)

b)



c)

Slika 26. Dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem odliveni od vermikularnog lijeva:
a) kućište motora [2], b) glava motora [2], c) cilindri [23]

Pored industrije motornih vozila, vermikularni lijev primjenjuje se i za izradu kokila za lijevanje čeličnih i aluminijskih ingota, kućišta valjaka u valjaonicama čelika, komponenti peći i opreme u koksarama, kokila za izradu staklene ambalaže, pojedinih dijelova u hidrauličkim uređajima i alatnim strojevima, kućišta zupčanika i prijenosnih mehanizama, raznih komponenti strojeva u tekstilnoj industriji, valjaka za usitnjavanje šećera itd. [21].

7. ZAKLJUČAK

Vermikularni lijev poput sivog i nodularnog lijeva sadrži grafitne čestice u mikrostrukturi. Međutim, oblik tih čestica u vermikularnom lijevu drugačiji je nego u sivom i nodularnom lijevu. Grafitne čestice imaju vermikularni oblik (poput „crvića“), što vermikularnom lijevu daje drugačija svojstva od sivog i nodularnog lijeva. Vermikularni lijev ima bolja mehanička svojstva od sivog lijeva, ali lošija od nodularnog lijeva. Fizikalna svojstva vermikularnog lijeva, poput toplinske vodljivosti i sposobnosti prigušenja vibracija nešto su slabija u odnosu na sivi lijev, ali su bolja nego kod nodularnog lijeva. Može se reći da vermikularni lijev ima jednu specifičnu kombinaciju svojstava sivog i nodularnog lijeva. To mu je omogućilo široku primjenu u industriji motornih vozila za odljevke za koje nije pogodan sivi i nodularni lijev, odnosno za izradu dijelova koji moraju biti otporni na toplinska opterećenja te istovremeno imati dobra mehanička svojstva.

Mikrostruktura vermikularnog lijeva određuje njegova svojstva. Struktura metalne osnove, a posebno oblik grafitnih čestica ovise o kemijskom sastavu, brzini hlađenja i količini dodanog cjepiva u talinu. Već vrlo mala odstupanja od optimalnog područja vrijednosti navedenih faktora mogu dovesti do izlučivanja nepoželjnog listićavog ili nodularnog grafita (čiji se udio do određene granice može tolerirati). Očito je da je proizvodnja vermikularnog lijeva znatno zahtjevnija od proizvodnje sivog i nodularnog lijeva.

8. 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] Z. Glavaš, Osnove lijevanje metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2014.
- [3] ..., Compacted Graphite Iron Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 872 - 883.
- [4] ..., EN 1560:2011, Founding – Designation system for cast iron – Material symbols and material numbers, CEN, Brussels, 2011.
- [5] ..., EN ISO 945-1:2012, Microstructure of cast Irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis, ISO, Switzerland, 2012.
- [6] ..., EN 16079:2010, Founding - Compacted (vermicular) graphite cast irons, CEN, Brussels, 2010.
- [7] ..., ISO 16112: 2006, Compacted (vermicular) graphite cast irons – Classification, ISO, Switzerland, 2006.
- [8] H. H. Cornell, C. R. Loper, Jr., Variables Involved in the Production of Compacted Graphite Cast Iron Using Rare Earth-Containing Alloys, AFS Transactions 93(1985), 435 – 440.
- [9] D. M. Stefanescu, R. Hummer, E. Nechtelberger, Compacted Graphite Irons, poglavlje u knjizi Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio 1988, 667 - 677.
- [10] S. Dawson, I. Hollinger, P. Smiles, The Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron, Proceedings book of Global Powertrain Congress 1998., New Powertrain Materials & Processes, October 6 - 8, 1998., Detroit Michigan, USA, 115 - 130.
- [11] J. Powell, A Review of Some Recent Work on Compacted Graphite Irons, The British Foundryman, 77(1984), 472 - 483.
- [12] ..., Melting and Remelting, poglavlje u knjizi ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 85 – 170.
- [13] ..., Cupola Handbook, 6th Edition, editor: S. P. Thomas, American Foundry Society, Illinois, USA, 2006.
- [14] D. B. Craig, M. J. Hornung, T. K. McCluhan, Gray Iron, poglavlje u knjizi Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1988., 629 – 646.
- [15] Z. Jiyang, Colour Metallography of Cast Iron, Chapter 4, Vermicular Graphite Cast Iron, Part I, China Foundry 8(2011) 1, 154- 164.
- [16] Elkem Foundry Products, Magnesium Contents in Ductile Iron, Technical Information 7, <http://documents.mx/documents/technical-information.html>.
- [17] M. König, Literature Review of Microstructure Formation in Compacted Graphite Iron, International Journal of Cast Metals Research 23(2010) 3, 185 – 192.
- [18] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 2004.
- [19] www.sintercast.com
- [20] C. M. Ecob, C. Hartung, An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons, Foundry Trade Journal, 177(2003) 3600, 6 - 11.
- [21] H-Q. Qiu, Z-D. Chen, The Forty Years of Vermicular Graphite Cast Iron Development in China (Part III), China Foundry 4(2007) 4, 261 – 269.

- [22] S. Dawson, Compacted Graphite Iron – A Material Solution for Modern Diesel Engine Cylinder Blocks and Heads, China Foundry 6(2009) 3, 241 – 246.
- [23] <http://news.cision.com/market-engineering/r/ultra-high-strength-materials-reduce-heavy-duty-cylinder-liner-distortion,c2049005>

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime: Zvonimir Petrović
Datum i mjesto rođenja: 15. travnja 1993., Zagreb
Adresa: Ljubuška 14
Telefon: 0919516297
E-mali: zvonimir93.p@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2001.g. - 2009.g. -	Osnovna škola: Mato Lovrak, Zagreb
2009.g. - 2013.g. -	Srednja škola: Prva tehnička škola TESLA, Zagreb
2013.g. – 2017.g.-	Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

VJEŠTINE:

Rad na računalu
Strani jezik: Engleski, pasivno u govoru i pismu

NAGRADE I PRIZNANJA:

AKTIVNOSTI: