Svojstva, proizvodnja i primjena sivog lijeva

Dundjer, Mato

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:809433

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY
SISAK

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Mato Dundjer

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Mato Dundjer

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA SIVOG 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 Jandrlić – zamjenski član

Sisak, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: MATO

PREZIME: DUNDJER

MATIČNI BROJ: BM 2475

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

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA SIVOG LIJEVA

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

Sisak, 18. srpnja 2018.

Mato Dundjer

(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.

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet
Aleja narodnih heroja 3; p.p.1; HR - 44103 Sisak
tel.: +385(0)44 533378; 533379; 533380; 533381
faks: +385(0)44 533378
e-mail: dekanat@simet.hr; url: www.simet.unizg.hr

SAŽETAK

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA SIVOG LIJEVA

Sivi lijev pripada skupini željeznih ljevova koji sadrže grafitne čestice u mikrostrukturi. Grafitne čestice u sivom lijevu imaju listićav oblik i međusobno su povezane, što negativno utječe na njegova vlačna svojstva. Međutim, zbog takvog oblika grafitnih čestica sivi lijev ima visoku sposobnost prigušenja vibracija, visoku toplinsku vodljivost, jako dobra tribološka svojstva i vrlo dobru strojnu obradivost. Specifična kombinacija svojstava sivog lijeva, koja udovoljava za mnoge aplikacije, te jednostavna i jeftina proizvodnja glavni su razlozi njegove vrlo široke primjene. Već dugi niz godina sivi lijev je najviše korišteni materijal za izradu metalnih odljevaka. Gotovo 45 % svjetske proizvodnje odljevaka u 2015. godini čine odljevci od sivog lijeva.

Ovaj pregledni rad prikazuje klasifikaciju, skrućivanje, utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva, proizvodnju taline, svojstva i primjenu sivog lijeva.

Ključne riječi: željezni ljevovi, sivi lijev

ABSTRACT

PROPERTIES, PRODUCTION AND APPLICATION OF GRAY IRON

Gray iron belongs to the group of cast irons containing graphite particles in the microstructure. Flake shaped graphite particles in gray iron are interconnected, which negatively affects its tensile properties. However, because of this form of graphite particles gray iron has high damping capacity, high thermal conductivity, very good tribological properties and very good machinability. A specific combination of properties of gray iron, which is suitable for many applications, and simple and inexpensive production are the main reasons for its widespread use. For many years, gray iron is the most widely used material for the production of metal castings. Grey iron castings cover almost 45 % of world casting production in 2015.

This review paper shows the classification, solidification, the influence of chemical composition on the microstructure and properties, production of melt, properties and application of gray iron.

Key words: cast irons, gray iron

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. KLASIFIKACIJA SIVOG LIJEVA 2

3. SKRUĆIVANJE SIVOG LIJEVA I PRETVORBE U KRUTOM STANJU 4

3.1 Tijek skrućivanja 4
3.2 Tipovi grafitnih listića 6
3.3 Pretvorbe u krutom stanju 9

4. UTJECAJ KEMIJSKOG SASTAVA NA MIKROSTRUKTURU I SVOJSTVA SIVOG LIJEVA 11

4.1 Utjecaj stalnih elemenata 11
4.2 Utjecaj legirnih elemenata 14
4.3 Utjecaj pratećih elemenata 15

5. PROIZVODNJA TALINE SIVOG LIJEVA 17

5.1 Uložni materijali 17
5.2 Taljenje 18
5.3 Cijepljenje 20

6. SVOJSTVA SIVOG LIJEVA 21

7. PRIMJENA SIVOG LIJEVA 26

8. ZAKLJUČAK 27

9. LITERATURA 28

ŽIVOTOPIS 29

1. UVOD

Sivi lijev je jedna od najstarijih vrsta željeznog ljeva [1, 2]. Upotrebljava se za izradu odljevka koji se primjenjuju u raznim područjima, npr. u industriji motornih vozila, strojogradnji, za razne konstrukcije itd. Ako promatramo godišnju proizvodnju željeznih ljevova u svijetu, sivi lijev već dugo godina zauzima prvo mjesto. U 2015. godini svjetska proizvodnja odljevaka od sivog lijeva iznosila je 46,7 mil.t [3]. Gledano u postotcima, sivi lijev u 2015. godini činio je 55,6 % proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova, tj. 44,9 % ukupne svjetske proizvodnje odljevaka. Glavni razlozi velike upotrebe sivog lijeva su jeftina i jednostavna proizvodnja, jako dobra livljivost te povoljna kombinacija svojstava za mnoga područja primjene.

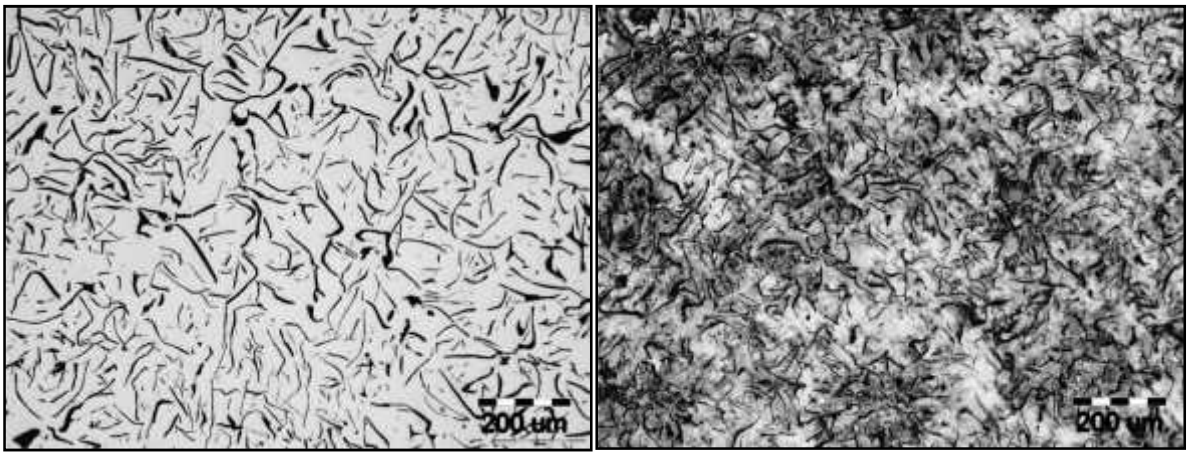
U sivom lijevu ugljik je izlučen u obliku međusobno povezanih grafitnih čestica listićavog oblika koje okružuje metalna osnova. Naziv ovog materijala dolazi od sive boje koja se može uočiti na prijelomoj površini. Listićavi oblik grafitnih čestica u sivom lijevu ima velik utjecaj na njegova mehanička svojstava. Sivi lijev ima nisku granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, istezanje, modul elastičnosti, tvrdoću i žilavost. S druge strane, sivi lijev se jako dobro lijeva, lako se strojno obrađuje, jako dobro vodi toplinu i prigušuje vibracije, otporan je na trošenje klizanjem i koroziju te ima povoljnu tlačnu čvrstoću.

Sivi lijev danas se smatra „istraženim“ materijalom. Jako puno se zna o mehanizmu nukleacije i rasta listićavog grafia, utjecaju kemijskog sastava, mikrostrukture i proizvodnih faktora na njegova svojstva te mogućnostima primjene.

U okviru ovog preglednog rada prikazana je klasifikacija sivog lijeva, njegovo skrućivanje, utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva, proizvodnja taline sivog lijeva, svojstva sivog lijeva te područja primjene odljevaka od sivog lijeva.

2. KLASIFIKACIJA SIVOG LIJEVA

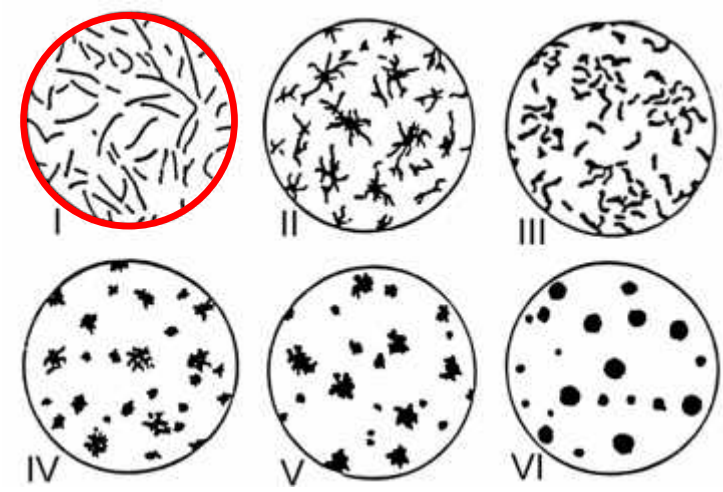
Tipična mikrostruktura sivog lijeva prikazana je na slici 1.



a) b)

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

Oblici grafitnih čestica u željeznim ljevovima definirani su normom EN ISO 945-1:2012 [4]. Listićavi grafit se prema toj normi označuje kao oblik I (slika 2). Oznaka za sivi lijev je GJL, što je definirano normom EN 1560:2011 [5].



Slika 2. Oblici grafitnih čestica u željeznim ljevovima prema normi EN ISO 945-1:2012. Oblik I predstavlja listićavi grafit [4]

Postoji više normi za sivi lijev, kao što su ISO 185:1988, EN 1561:2010, ASTM A48-94a, BS 1452 (1990), JIS G5501 (1995), itd. U okviru hrvatskih normi također postoji norma za sivi lijev, a nosi oznaku HRN EN 1561:2011 [6]. Radi se zapravo o preuzetoj europskoj norma EN 1561:2010.

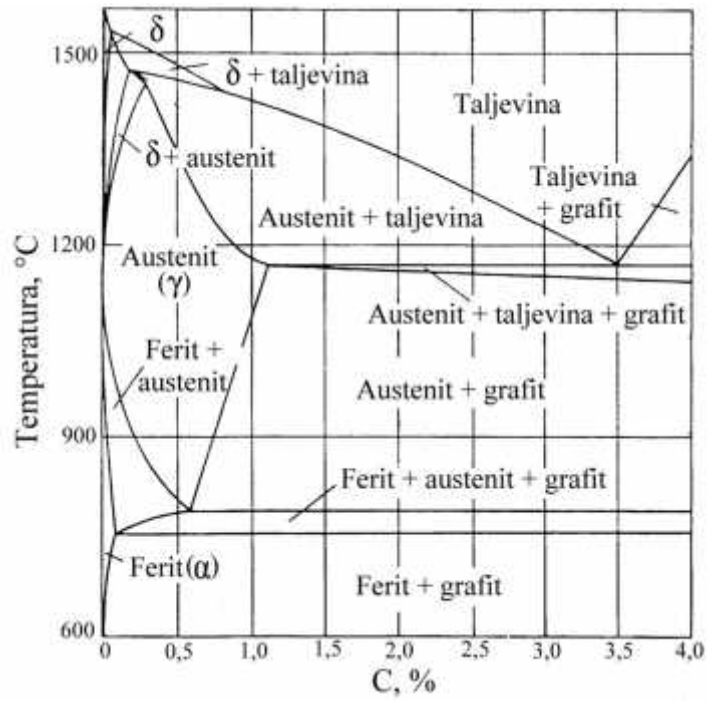
Norma HRN EN 1561:2011 propisuje nekoliko kvaliteta sivog lijeva ovisno o minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće (tablica 1) [6].

Tablica 1. Vlačna svojstva sivog lijeva određena na normom propisanim ispitnim uzorcima koji su izrađeni strojnom obradom iz odlivenih uzoraka (prema HRN EN 1561:2011) [6]

Označivanje materijala		Debljina relevantne stijenke t		Vlačna čvrstoća R_m, propisane vrijednosti u lijevanom uzorku, N/mm^2, min.
Oznaka HRN	Broj	>, mm	≤, mm	
EN-GJL-100	5.1100	5	40	**100**
EN-GJL-150	5.1200	2,5 50 100	50 100 200	**150** 130 110
EN-GJL-200	5.1300	2,5 50 100	50 100 200	**200** 180 160
EN-GJL-250	5.1301	5 50 100	50 100 200	**250** 220 200
EN-GJL-300	5.1302	10 50 100	50 100 200	**300** 260 240
EN-GJL-350	5.1303	10 50 100	50 100 200	**350** 310 280

3. SKRUĆIVANJE SIVOG LIJEVA I PRETVORBE U KRUTOM STANJU

Kao i kod ostalih željeznih ljevova koji sadrže grafitne čestice u mikrostruktri, tijekom skrućivanja sivog lijeva odvija se eutektična reakcija kojom iz taline nastaju dvije krute faze - jedna je listićavi grafit, a druga je austenit [1, 2]. U dvokomponentnom sustavu Fe-C eutektična reakcija odvija se kada udio ugljika u talini iznosi 4,3 %, a temperatura 1154 °C. To govori da je eutektična točka na 4,3 %C. S dodatkom drugih elemenata, pored željeza i ugljika, mijenja se položaj eutektične točke. Pri tome dodatak silicija ima najveći utjecaj (slika 3).

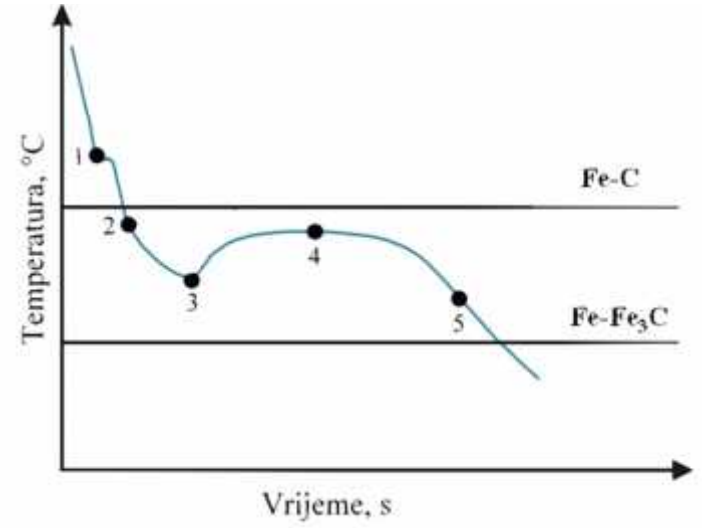


Slika 3. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5 %Si [1]

S porastom dodatka silicija eutektična točka pomiče se u lijevo, tj. ka nižim udjelima ugljika. Dodatkom 1,0 % silicija smanjuje se za 0,31 % udio ugljika u eutektiku, te zbog toga se uvodi koncept ugljičnog ekvivalenta (CE), o kojem će se detaljnije govoriti nešto kasnije.

3.1 Tijek skrućivanja

Snimanjem krivulje hlađenja, odnosno praćenjem promjene temperature s vremenom tijekom skrućivanja može se dobiti uvid u tijek skrućivanja sivog lijeva. Svi procesi koji se odvijaju tijekom skrućivanja rezultiraju odgovarajućim promjenama na krivulji hlađenja, kao što su zastoji na krivulji, promjena nagiba krivulje itd. Krivulja hlađenja podeutektičnog sivog lijeva shematski je prikazana na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz krivulje hlađenja podeutektičnog sivog lijeva [1]

Nakon što se talina sivog lijeva ulije u kalup, sve dok se ne dostigne likvidus temperatura (T_L) ona se kontinuirano hladi (točka 1, slika 4). U toj točci započinje izlučivanje primarnog austenita, koji raste u obliku dendrita s daljnjim padom temperature. Sve se više izlučuje primarnog austenita između točki 1 i 2, što znači da se smanjuje količina taline. Samo određeni udio ugljika može se otopiti u austenitu. Višak ugljika, odnosno ugljik koji se nije otopio u austenitu, ostaje u talini. To znači da se udio ugljika u talini povećava jer se smanjuje njena količina.

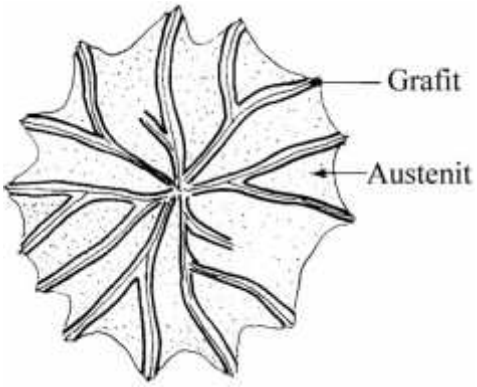
Eutektična reakcija započinje u točci 2, koja predstavlja temperaturu početka eutektičnog skrućivanja (T_{ES}). Dvije krute faze – jedna je eutektični austenit, a druga listićavi grafit nastaju iz preostale taline. Umjesto listićavog grafita mogu nastati karbidi, koji štetno utječu na svojstva sivog lijeva. Zbog toga moramo spriječiti stvaranje karbida tijekom skrućivanja. Karbidi nastaju ako u talini nema dovoljno pogodnih uključaka, odnosno pogodnih mjesta za nukleaciju grafita (što upućuje na loš nukleacijski potencijal taline), ako se skrućivanje odvija brzo te ako je previsok udio karbidotvornih elemenata.

Eutektična reakcija ne odvija se intenzivno na temperaturi (T_{ES}). Razlog za to je nedovoljan broj pogodnih uključaka u talini na kojima se može odvijati nukleacija listićavog grafita. Tijekom daljnjeg pada temperature (područje između točki 2 i 3 na krivulju hlađenja, slika 4), talina se pothlađuje, što daje pokretačku silu za nukleaciju, odnono izlučivanje grafita. Što je veći nukleacijski potencijal taline, tj. što je veći broj pogodnih uključaka u talini za nukleaciju listićavog grafita, potrebno je manje pothlađenje za intenzivno izlučivanje grafita.

Na temperaturi eutektičnog pothlađenja (T_{EP}) (točka 3 na krivulji hlađenja) ostvarena je dovoljna pokretačka sila za intenzivnu nukleaciju listićavog grafita, odnosno intenzivno odvijanje eutektične reakcije. Mjesta za nukleaciju grafita su različiti uključci u talini. Zbog intenzivnog odvijanja eutektične reakcije dolazi do povećanja temperature (područje između točki 3 i 4 na krivulji hlađenja, slika 4) – toplina oslobođena tijekom izlučivanja austenita i listićavog grafita je viša od topline koja se odvodi kroz kalup u okoliš. Naziv ove pojave je rekalescencija. Maksimalna temperatura tijekom eutektičnog skrućivanja naziva se temperatura eutektične rekalescencije (T_{ER}) (točka 4 na krivulji hlađenja).

Rast listićavog grafita i eutektičnog austenita odvija se sličnom brzinom, pa se u tom slučaju radi o povezanom eutektičnom rastu. Rast se odvija u obliku velikog broja eutektičnih ćelija austenit-grafit (slika 5) koje su međusobno razdvojene talinom, te je svaka eutektična ćelija rezultat posebnog nukleacijskog događaja. Eutektične ćelije, tijekom skrućivanja,

kontinuirano rastu i u konačnici dolazi do međusobnog kontakta. Grafitni listići međusobno su povezani u svim eutektičnim ćelijama.



Slika 5. Shematski prikaz eutektične ćelije austenit-grafit u sivom lijevu [7]

Eutektična reakcija se odvija između točaka 2 i 5 (slika 4). S približavanjem ka točki 5 tj. solidus temperaturi (T_S) sve je veći udio krute faze, tj. austenita i listićavog grafita, a količina taline se smanjuje. Smanjenje količine taline s vremenom rezultira opadanjem količine izlučenog austenita i grafita. Time se postepeno smanjuje i količina topline koja nastaje zbog njihovog izlučivanja. To je razlog zašto temperatura ponovo opada nakon temperature eutektične rekalescencije, jer se više topline odvede kroz kalup u okoliš nego što se razvije tijekom izlučivanja austenita i grafita. Skrućivanje završava na solidus temperaturi (T_S). Mikrostruktura sivog lijeva koja je nastala sastoji se od grafitnih listića i austenitne metalne osnove.

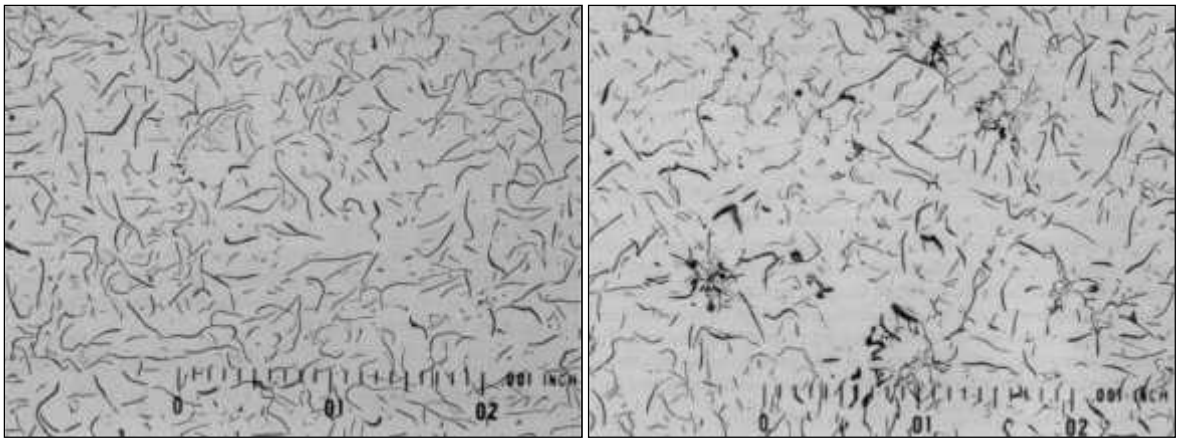
Hlađenje odljevka od solidus do sobne temperature ne utječe na oblik, broj i raspodjelu grafitnih čestica koje su nastale za vrijeme skrućivanja [1]. Međutim, odvijaju se pretvorbe u metalnoj osnovi.

S razlikom da je grafit prva faza koja se izlučuje, na identičan način odvija se skrućivanje sivog lijeva nadeutektičnog sastava. Takav grafit naziva se primarnim grafitom i raste u obliku velikih listića. Preostala talina skrućuje se u obliku eutektičnih ćelija, kad se udio ugljika u talini i temperatura dovoljno snize. Eutektični grafit često je znatno sitniji od primarnog grafita.

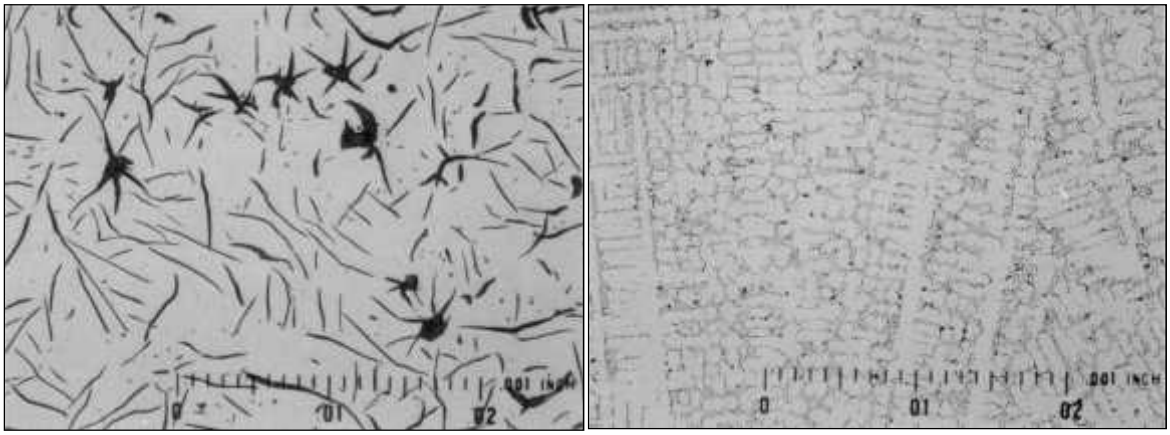
3.2 Tipovi grafitnih listića

Nukleacijski potencijal taline i pothlađenje utječu na oblik, odnosno tip grafitnih listića. Postoji 5 tipova grafitnih listića prema normi ASTM A247 (slika 6) [1, 8, 9].

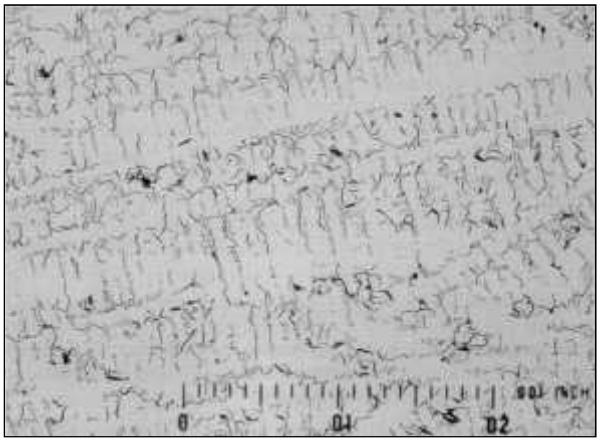
Tip A grafitnih listića (slika 6a) su jednoliko raspodijeljeni listići, slučajne ili statističke orijentacije, u metalnoj osnovi. Ovaj tip grafitnih listića nastaje pri visokom nukleacijskom potencijalu, niskom pothlađenju (slika 7) i sporom skrućivanju taline. Kako bi se dobio visok nukleacijski potencijal, u većini slučajeva talina se mora cijepiti. Optimalna fizikalna i mehanička svojstva odljevaka od sivog lijeva postižu se kada je u mikrostrukturi prisutan A tip grafitnih listića, što je posebno značajno kod odljevaka kao što su kočioni diskovi i bubnjevi u motornim vozilima.



a) b)

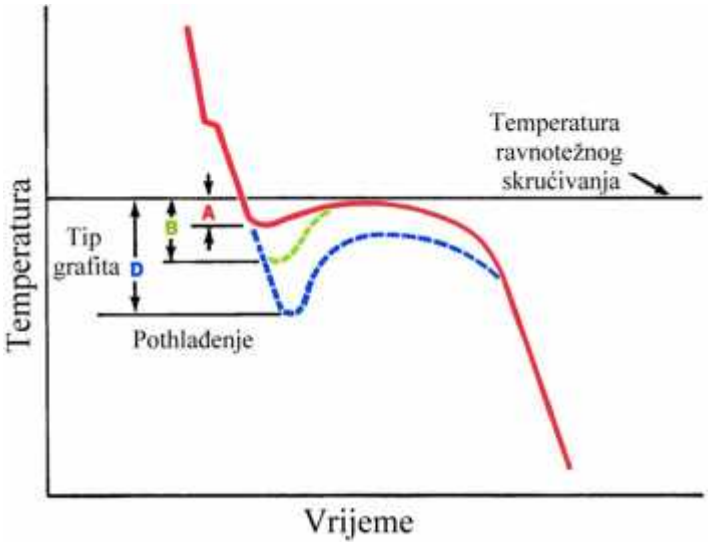


c) d)



e)

Slika 6. Tipovi grafitnih listića prema normi ASTM A247: a) A tip, b) A i B tip, c) C tip, d) D tip, e) E tip [9]



Slika 7. Shematski prikaz krivulje hlađenja sivog lijeva koji sadrži A, B ili D tip grafitnih listića u mikrostrukturi [1]

B tip grafitnih listića (slike 6b i 7) nastaje kod nešto većih brzina hlađenja, nižeg nukleacijskog potencijala taline i većeg pothlađenja. Sitni fini listićavi grafit (slika 6b) izlučuje se u centru rozeta koje nastaju na početku eutektičnog skrućivanja. Rast A tipa grafitnih listića naknadno se odvija i nalaze se po rubu rozeta (slika 6b). Sitni grafit se izlučuje zbog većeg pothlađenja taline, a ono je rezultat nedovoljnog broja mjesta za heterogenu nukleaciju grafitnih čestica i upućuje na nedovoljno cijepljenje taline. Ako promatramo dva odljevka od sivog lijeva istih kemijskih sastava s istom debljinom stjenke, odljevak koji sadrži A tip grafitnih listića u mikrostrukturi imati će veću vlačnu čvrstoću od odljevka s B tipom grafitnih listića.

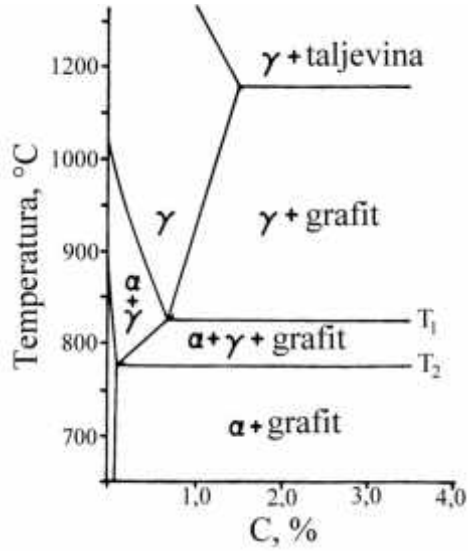
U nadeutektičnim sivim ljevovima, naročito kada imaju visok udio ugljika, pojavljuje se **tip C grafitnih listića** (slika 6c). Radi se o velikim i debelim listićima, što ukazuje da se radi o nadeutektičnom sastavu. Taj tip grafitnih listića u velikoj mjeri smanjuje vlačnu čvrstoću i tvrdoća odljevka od sivog lijeva. Osim toga, odljevci nakon strojne obrade često imaju grubu površinu. Tip C grafitnih listića ima i određene pozitivne učinke, a to je povećanje toplinske vodljivosti i sposobnosti prigušenja vibracija sivog lijeva.

Ako je pothlađenje taline visoko (slika 7), dolazi do izlučivanja **D i E tipa grafitnih listića** (slike 6d i 6e). Ti grafitni listići su vrlo sitni, brojni i razgranati te se nalaze u područjima između dendrita. D tip grafitnih listića ima nasumičnu orijentaciju, a tip E ima usmjerenu orijentaciju s obzirom na smjer primarnih dendrita i odvođenje topline. Metalna osnova sivog lijeva koji sadrži te tipove grafitnih listića često sadrži visok udio ferita. Vlačna čvrstoća odljevaka zbog toga se značajno smanjuje, ali se poboljšava njihova strojna obradivost.

3.3 Pretvorbe u krutom stanju

Tijek skrućivanja i pretvorbe u krutom stanju, odnosno eutektoidna pretvorba određuju izgled mikrostrukture sivog lijeva. Grafitni listići formiraju se tijekom skrućivanja, dok se konačna struktura metalne osnove formira nakon skrućivanja. Najčešće se metalna osnova sastoji od perlita (α + Fe_3C) i ferita (α) [1].

Eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-2 %Si prikazano je na slici 8. Na dijagramu se može vidjeti da s padom temperature nakon skrućivanja opada topljivost ugljika u austenitu (γ).



Slika 8. Eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-2 %Si [1]

Kada završi skrućivanje odljevka od sivog lijeva, njegova mikrostruktura na solidus temperaturi sastoji se od austenita i grafitnih listića [1]. S obzirom da se topljivost ugljika u austenitu smanjuje s padom temperature, austenit odbacuje višak ugljika, koji procesom difuzije u krutom stanju odlazi na grafitne listiće. Sporim hlađenjem produžuje se vrijeme za difuziju ugljiku. Zbog toga se pri sporom hlađenju oko grafitnih listića formiraju austenitnitna područja s niskim udjelom ugljika. Takav austenit se tijekom daljnjeg hlađenja transformira u ferit. U slučaju da se želi postići visok udio ferita u metalnoj osnovi, vrlo je važno da udio elementa koji promoviraju stvaranje perlita bude što niži. Na temperaturi T_1 (slika 8) započinje stvaranje ferita iz austenita, tj. eutektoidna pretvorba, a završava na temperaturi T_2. Udio ferita postepeno se povećava s hlađenjem ispod temperature T_1. Ispod temperature T_2 nema značajnih promjena u mikrostrukturi sivog lijeva. Prema tome, ako se odljevak od sivog lijeva odgovarajućeg kemijskog sastava sporo hladi, može se postići poptuno feritna metalna osnova. Odljevci od sivog lijeva koji imaju debele stijenke sporo se hlade, zbog čega imaju znatno veći udio ferita u metalnoj osnovi od odljevaka koji imaju tanke stijenke.

Ako se odljevak brže hladi, u tom slučaju neće biti dovoljno vremena na raspolaganju za difuziju ugljika iz austenita na listiće grafita. U tom slučaju udio ugljika u austenitu neće se dovoljno smanjiti da bi se kasnije mogao transformirati u ferit, što rezultira njegovom pretvorbom u perlit.

Udio ferita i perlita u metalnoj osnovi u velikoj mjeri ovisi o kemijskom sastavu sivog lijeva [1, 2]. Silicij promovira stvaranje ferita, dok bakar, mangan, kositar, antimon itd. promoviraju stvaranje perlita.

Udio ferita i perlita u metalnoj osnovi sivog lijeva ne ovisi samo o kemijskom sastavu i brzini hlađenja poslije skrućivanja, već i o udjelu i tipu grafitnih listića. Kad sivi lijev sadrži A tip grafitnih listića, metalna osnova u većini slučajeva sadrži vrlo visok udio perlita. S druge strane, sitni i brojni grafitni listići D tipa često dovode do visokog udjela ferita u metalnoj osnovi. Što su grafitni listići sitniji i što je veći njihov broj to su kraći putovi difuzije atoma ugljika iz austenita, odnosno povećava se broj mjesta koja mogu prihvatiti atome ugljika iz austenita.

U sivom lijevu metalna osnova nema kontinuitet jer su grafitni listići međusobno povezani. Oni djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi. Zbog toga sivi lijev iako ima visok udio perlita u metalnoj osnovi nema visoku vlačnu čvrstoću. Uzimajući sve navedeno u obzir, različita svojstva sivog lijeva mogu se postići kroz varijacije u mikrostrukturi.

4. UTJECAJ KEMIJSKOG SASTAVA NA MIKROSTRUKTURU I SVOJSTVA SIVOG LIJEVA

Mikrostruktura sivog lijeva određuje njegova mehanička i fizikalna svojstva. Kemijski sastav ima najznačajniji utjecaj na mikrostrukturu sivog lijeva. Kroz varijacije u kemijskom sastavu može se utjecati na oblik grafitnih čestica i strukturu metalne osnove.

4.1 Utjecaj stalnih elemenata

U sivom lijevu, osim željeza, osnovni element je **ugljik**. Može biti prisutan u slobodnom obliku, tj. u obliku grafitnih čestica, što je poželjno. Pored toga, može biti vezan u karbide (npr. s željezom i kromom). Zbog negativnog utjecaja na svojstva sivog lijeva, stvaranje karbida treba izbjeći. U tablici 2 navedeni su preporučeni udjeli ugljika za različite kvalitete sivog lijeva.

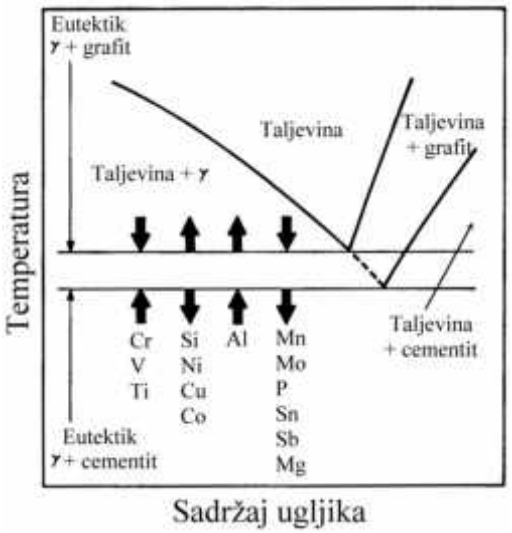
Tablica 2. Preporučeni udjeli stalnih elemenata u kemijskom sastavu kvaliteta sivog lijeva prema HRN EN 1561:2011 [10]

Element	Kvaliteta, HRN					
	EN-GJL-100	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	EN-GJL-350
%C	3,5 - 3,8	3,4 - 3,7	3,2 - 3,5	3,1 - 3,4	3,0 - 3,2	2,9 - 3,1
%Si	2,3 - 2,8	2,1 - 2,6	1,8 - 2,3	1,6 - 2,1	1,3 - 1,9	1,1 - 1,5
%Mn	0,4 - 0,8	0,5 - 0,8	0,6 - 0,8	0,6 - 0,8	0,7 - 0,9	0,8 - 1,0
%P	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,15	maks. 0,10	maks. 0,10
%S	0,06 - 0,15	0,06 - 0,15	0,06 - 0,15	0,06 - 0,12	0,06 - 0,12	0,06 - 0,12
CE	4,2 - 4,6	4,0 - 4,3	3,8 - 4,1	3,6 - 3,9	3.4 - 3,7	3,2 - 3,5

S povećanjem udjela ugljika u sivom lijevu smanjuje se njegova vlačna čvrstoća, jer se povećava mogućnost nastajanja dužih listića grafita [11]. Poboljšanje livljivosti taline i smanjenje sklonosti ka volumnom stezanju i stvaranju usahlina pozitivni su učinci povećanja udjela ugljika.

Silicij promovira stvaranje grafita, tj. otežava stvaranje karbida [1, 2]. Poput ostalih grafitizatora, podiže temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe_3C) (slika 9), tj. proširuje interval između navedenih eutektičkih temperatura.

Silicij utječe i na metalnu osnovu tako da promovira stvaranje ferita [1, 2, 11]. Očito je da previsok udio silicija nepovoljno utječe na vlačnu čvrstoću sivog lijeva.



Slika 9. Utjecaj elemenata na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ + grafit) i metastabilnog (γ + cementit) eutektika [1]

Utjecaj ugljika, silicija (i fosfora) na skrućivanje i rezultirajuću mikrostrukturu može se promatrati zajedno kroz **ugljični ekvivalent, odnosno ekvivalent ugljika (CE)** ili **stupanj zasićenja (S_c)**. Ekvivalent ugljika može se izračunati pomoću nekoliko formula, a najčešće se upotrebljava sljedeća [1]:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \tag{1}$$

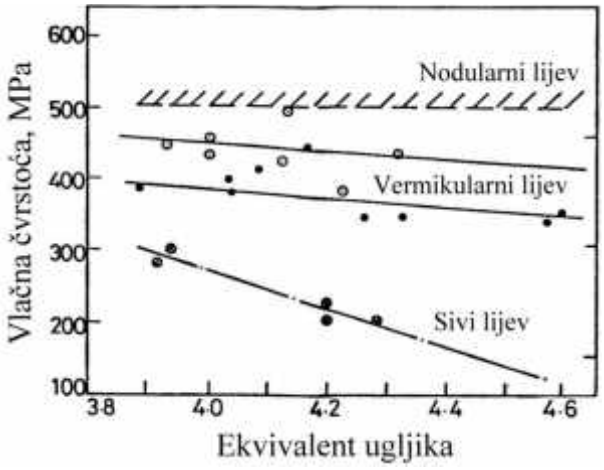
Ako je CE = 4,3 radi se o sivom lijevu eutektičnog sastava. Ukoliko je CE < 4,3 radi se o podeutektičnom sastavu. U tom slučaju austenit je prva faza koja nastaje tijekom skrućivanja. U slučaju kada je CE > 4,3 sivi lijev ima nadeutektični sastav. U tom slučaju primarni grafit je prva faza koja se izlučuje iz taline tijekom skrućivanja.

Stupanj zasićenja određuje se prema slijedećoj formuli [1]:

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

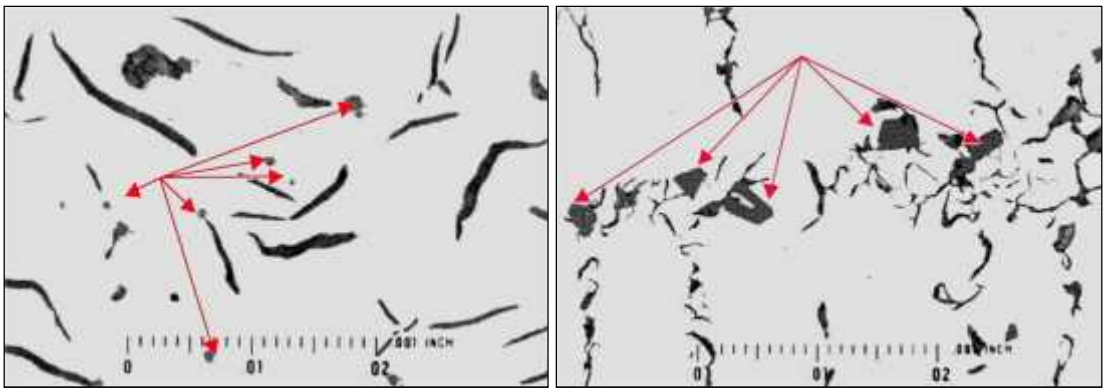
Ako je $S_c = 1$ radi se eutektičnom sastavu. Sivi lijev ima podeutektični sastav ako je $S_c < 1$. Ukoliko je $S_c > 1$, to ukazuje na nadeutektični sastav.

Likvidus temperatura se snižava i postiže se bolja livljivost s povećanjem ekvivalenta ugljika. Međutim, treba uzeti u obzir da povećanje ekvivalenta ugljika negativno utječe na vlačnu čvrstoću sivog lijeva i da je taj efekt znatno izraženiji nego kod vermikularnog i nodularnog lijeva (slika 10). Zbog toga u većini slučajeva sivi lijev ima podeutektični sastav (tablica 2).



Slika 10. Ovisnost vlačne čvrstoće uzoraka promjera 30 mm od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva o vrijednosti ekvivalenta ugljika [1]

Mangan je karbidotvorni element te promovira stvaranje perlita [1, 2]. Ima vrlo značajnu ulogu u sivom lijevu jer neutralizira **sumpor** pri čemu nastaju MnS uključci koji imaju važnu ulogu u procesu nukleacije listićavog grafita [1, 2, 9, 12]. MnS uključci nasumično su distribuirani u metalnoj osnovi i male su veličine (slika 11a). Do njihovog okrupnjavanja dolazi ako se hlađenje odljevka odvija sporo (slika 11b).



a) b)

Slika 11. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva u nenagrizenom stanju. MnS uključci označeni su crvenim strelicama [12]

Mangan sprječava nastajanje željeznog sulfida FeS koji povećava krhkost sivog lijeva jer se izlučuje po granicama eutektičnih zrna. Osim toga, MnS ima višu temperaturu taljenja od FeS (MnS → 1620 °C, FeS → 1193°C) [1].

Stehiometrijska ravnoteža između mangana i sumpora može se prikazati sljedećom formulom [1]:

$$\%Mn = 1{,}7 \cdot \%S \qquad (3)$$

Prema tome, ako to promatramo teorijski, sav sumpor reagirat će s manganom u slučaju kada je udio mangana 1,7 puta veći od udjela sumpora. Pri tome, kao produkt te rekacije nastaje MnS.

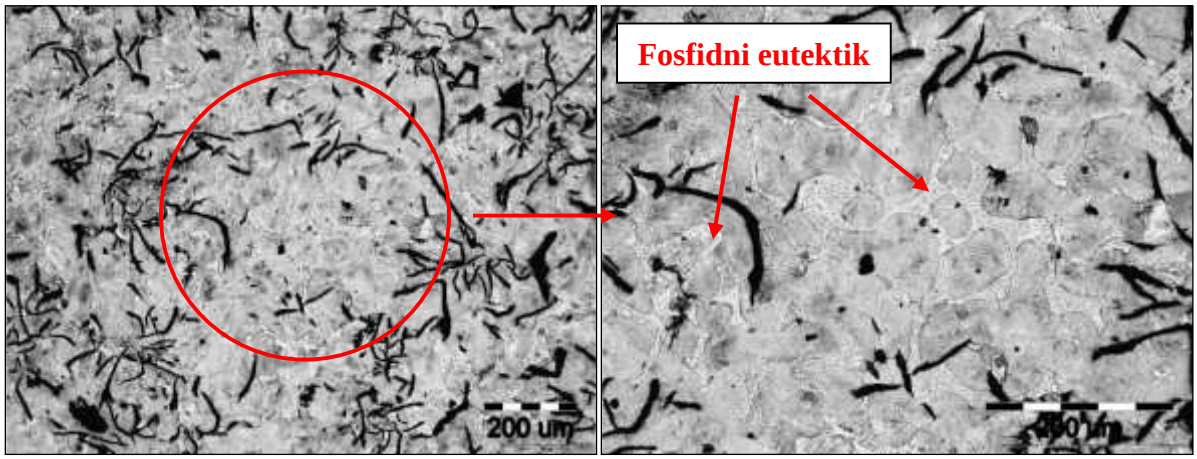
Međutim, u relanim uvjetima, reakcija Mn + FeS ↔ Fe + MnS je reverzibilna, što znači da mora postojati određeni višak mangana da se reakcija odvija u desno [1, 2, 9]:

$$\%Mn = 1{,}7 \cdot \%S + 0{,}3 \qquad (4)$$

To „pravilo“ ima široku primjenu u realnoj proizvodnji sivog lijeva. Ukoliko je višak mangana prevelik, tj. ako je udio mangana značajnije iznad potrebnog prema formuli (4), povećava se mogućnost stvaranja karbida [1].

Za nukleaciju i rast listićavog grafita vrlo je značajan **sumpor,** jer MnS uključci koji nastaju kao produkti reakcije s manganom služe kao moguća mjesta za nukleaciju listićavog grafita. Stoga minimalni udio sumpora u sivom lijevu treba biti 0,06 % [1].

Fosfor sa željezom formira nepoželjni tvrdi i krhki spoj koji se naziva steadit, tj. fosfidni eutektik (slika 12), čija temperatura taljenja je niska i iznosi ~ 950°C [1]. Za vrijeme skrućivanja izlučuje se po granicama eutektičnih ćelija, što negativno utječe na čvrstoću sivog lijeva.



Slika 12. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva koji sadrži 0.1 % fosfora (nagrizeno stanje) [1]

Zbog visoke tvrdoće, fosfidni eutektik otežava strojnu obradivost sivog lijeva. Ako se želi povećati otpornost sivog lijeva na trošenje, onda je poželjno da u mikrostrukturi bude određeni udio fosfidnog eutektika. Sivi lijev za takve primjene može sadržavati i do 1,0 % fosfora.

4.2 Utjecaj legirnih elemenata

Nikal u udjelima od 0,4 do 0,6 % djeluje kao grafitizator, s tim da je učinak znatno slabiji od silicija [9]. Pospješuje stvaranje perlita, premda je taj učinak relativno slab [1, 9]. Ako je prisutan u udjelu od 12 do 14 %, promovira stvaranje austenitne metalne osnove [1].

Krom je, u usporedbi s bakrom i nikom, znatno efikasniji za povećanje vlačne čvrstoće sivog lijeva [1, 9]. Ako se sivi lijev legira kromom dolazi do povećanja tvrdoće i otpornosti na trošenje [1, 9].

Negativna strana kroma je njegova visoka sklonost ka stvaranju karbida. Ako se koristi za povećanje čvrstoće, uz krom treba dodati određeni udio grafitizatora, poput bakra i nikla, kako bi se spriječilo nastajanje karbida.

Krom je vrlo efikasan element za povećanje otpornosti sivog lijeva na visoke temperature, naročito ako se dodaje zajedno s molibdenom [9]. Pored toga, ti elementi smanjenju rast sivog lijeva pri dugom izlaganju povišenim ili visokim temperaturama.

Vanadij je također snažan karbidotvorni element koji blago promovira stvaranje perlita [1]. Najčešće se dodaje u količinama do 0,35 %, što rezultira znatnijim porastom vlačne čvrstoće i tvrdoće sivog lijeva [1, 9].

Često se koristi umjesto molibdena i kroma. Stabilizira perlit na povišenim temperaturama, poput kroma. Vanadij je ~ 2 puta efikasniji od kroma u stabilizaciji perlita i povećanju otpornosti na trošenje na povišenim temperaturama [9].

Dodatkom **molibdena** postižu se sljedeći učinci: povećava se vlačna čvrstoća na sobnoj i visokim temperaturama, raste tvrdoća i otpornost na trošenje, povećava se otpornost na puzanje i toplinski umor, te se smanjuju varijacije mehaničkih svojstava između debelih i tankih stijenki odljevka [1, 9]. Pri dodatku molibdena treba uzeti u obzir da je on karbidotvorni element, ali znatno slabiji od kroma.

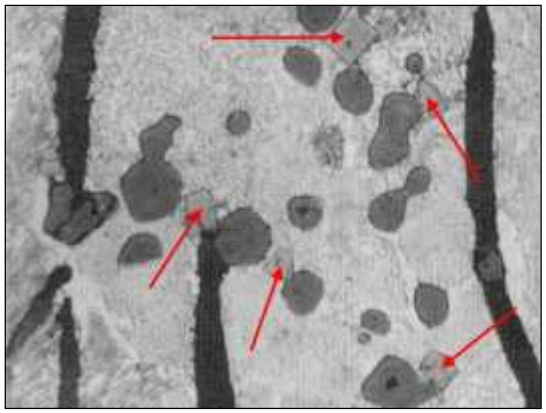
Bakar promovira stvaranje grafita i perlita [1]. Budući da povećava udio perlita u metalnoj osnovi, dodatkom bakra povećava se vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i tvrdoća sivog lijeva.

Antimon i kositar vrlo su efikasni elementi za povećanje udjela perlita u metalnoj osnovi sivog lijeva [1]. Prema tome, dodatkom tih elemenata povećava se vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i tvrdoća sivog lijeva. U usporedbi s bakrom, kositar je ~ 10 – 12 puta efikasniji perlitizator, a antimon je još ~ 2 – 4 puta efikasniji od kositra [1]. Dodatk kositra obično se kreće od 0,04 do 0,1 %, a dodatak antimona od 0,02 do 0,06 % [1].

4.3 Utjecaj pratećih elemenata

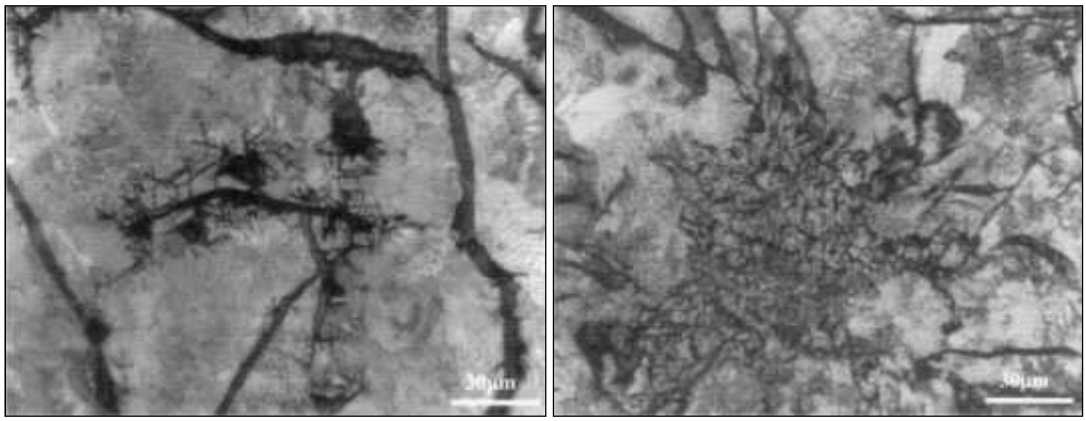
Aluminij je grafitizator i feritizator. Često je prisutan u malim količinama u cjepivima za sivi lijev radi povećanja nukleacijskog potencijala taline. Previsoki udjeli aluminija povećavaju opasnost od plinskih grešaka u odljevcima, jer snižava površinsku napetost taline [1]. Mogućnost nastajanja plinskih grešaka značajno se povećava ako je prisutan sumpor jer on također smanjuje površinsku napetost taline. Negativan učinak aluminija značajno se povećava ako se u talini nalazi titan. Iz navedenih razloga udio aluminija mora se održavati niskim.

Titan pospješuje nastajanje D tipa grafitnih listića [1]. Može neutralizirati štetan učinak dušika jer ima visok afinitet prema tom elementu [1]. Kao produkt rekacije nastaju titanovi nitridi (TiN). Ako dušik nije prisutan u suvišku, titan će reagirati i s ugljikom, pri čemu nastaju titanovi karbidi (TiC) ili titanovi karbonitridi (Ti(CN)), koji imaju specifični kubični oblik (slika 13) [1, 8]. Zbog visoke tvrdoće navedeni spojevi mogu pogoršati strojnu obradivost odljevaka.



Slika 13. Metalografska snimka mikrostrukture sivog lijeva. Titanovi karbonitridi označeni su crvenim strelicama [8]

Olovo već u udjelima od samo 0,0005 % dovodi do izlučivanja Widmannstättenovog grafita (slika 14a) [1, 13]. U tim slučajevima vlačna čvrstoća sivog lijeva opada za ~ 50 %. Zbog prisutnosti olova u sivom lijevu mogu nastati i drugi nepoželjni oblici grafita, kao što je mrežasti grafit (slika 14b).



a) b)

Slika 14. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva: a) Widmannstättenov grafit u debelostijenom odljevku od sivog lijeva (0,0042 %Pb), b) mrežasti grafit u tankostijenom odljevku od sivog lijeva (0,0099 %Pb) [13]

5. PROIZVODNJA TALINE SIVOG LIJEVA

Talina sivog lijeva proizvodi se u odgovarajućim pećima i sastoji se od taljenja uložnih materijala i pripreme taline. Vrlo je važan korak u procesu proizvodnje kvalitetnih odljevaka od sivog lijeva. Uložni materijali, kontrola procesa taljenja, priprema taline i cijepljenje utječu na metaluršku kvalitetu taline.

5.1 Uložni materijali

Sivo sirovo željezo, čelični otpad i povratni materijal unutar ljevaonice metalni su uložni materijali za proizvodnju sivog lijeva [1]. Njihov udio u metalnom ulošku varira, ovisno o zahtjevanoj kvaliteti odljevaka koji se proizvodi te dostupnosti. Uz metalni uložak dodaju se i sredstva na naugljičenje, ferolegure i talitelji, što ovisi o potrebi za pojedinim elementima te vrsti peći u kojoj se provodi taljenje.

Sivo sirovo željezo je najpogodnija sirovina za proizvodnju sivog lijeva zbog niskog udjela karbidotvornih elemenata i vrlo povoljnog učinka na nukleacijski potencijal, odnosno metaluršku kvalitetu taline. Udio u metalnom ulošku može biti različit, od nekoliko postotaka do > 50 %, na što utječu brojni faktori.

Čelični otpad je manje pogodna, ali ekonomski povoljnija sirovina od sivog sirovog željeza. Često sadrži dosta visok udio karbidotvornih elemenata, što je nepovoljno. Previsoki udjeli čeličnog otpada u metalnom ulošku imaju niz negativnih učinaka: povećava se potrošnja energije za taljnje, produžuje se vrijeme taljenja, povećava se dodatak sredstava za naugljičenje, te smanjuje se metalurška kvaliteta taline.

Povratni materijal unutar ljevaonice čine pojila, uljevni sustavi i neispravni odljevci. Njihova pozitivna strana je poznat kemijski sastav.

Sredstva za naugljičenje dodaju se radi povećanja udjela ugljika u talini. U tu svrhu najčešće se upotrebljava petrol koks. Vrlo je važno obratiti pažnju na udio sumpora u sredstvu za naugljičenje.

Ferolegure se dodaju radi povećanja udjela pojedinih elemenata u talini. Najčešće korištena ferolegura u proizvodnji sivog lijeva je FeSi.

Silicijev karbid (SiC) sadrži ~ 30 % ugljika i ~ 70 % silicija. Dodaje se u fazi taljenja radi poboljšanja nukleacijskog potencijala, odnosno metalurške kvalitete taline. Dodatak obično iznosi ~ 1 % u odnosu na masu metalnog uloška.

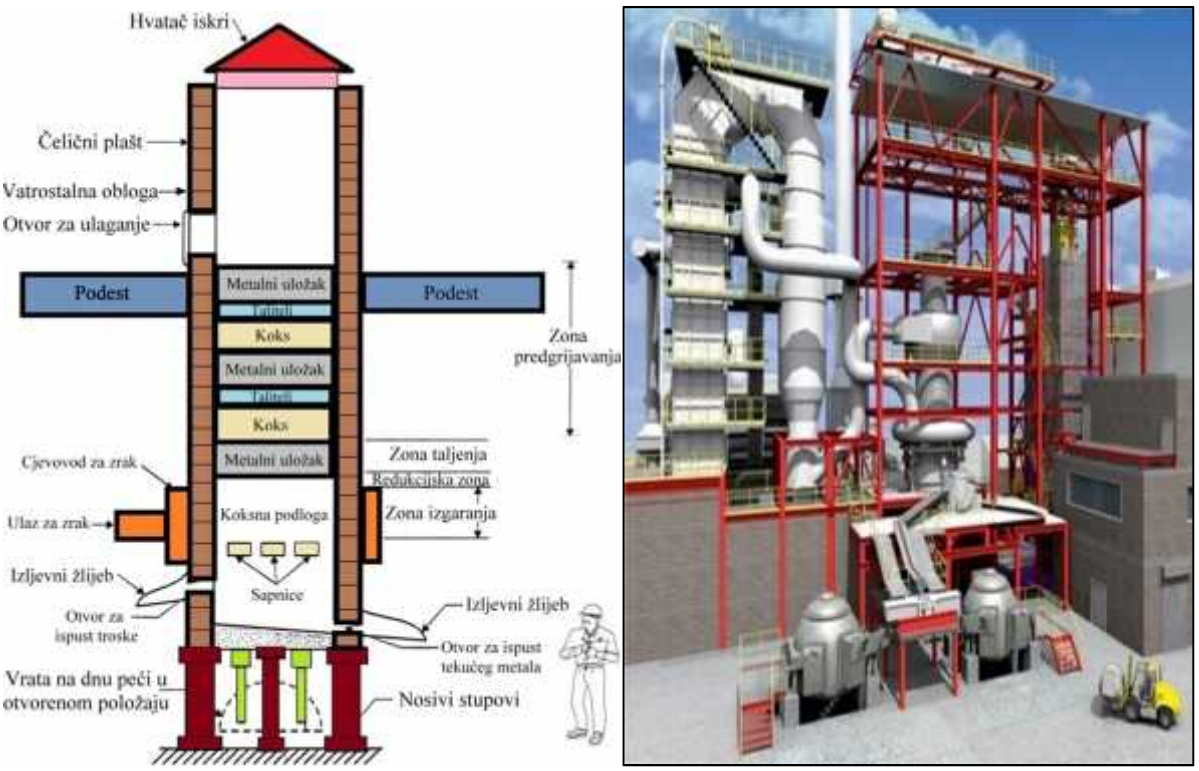
Ljevaonički koks upotrebljava se kao izvor energije za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala u kupolnoj peći. Često sadrži visok udio sumpora.

Talitelji tj. vapnenac ili dolomit dodaju se u kupolnu peć kako bi se formirala troska odgovarajućeg kemijskog sastava koja djeluje kao rafinacijsko sredstvo, tj. veže razne nečistoće kao i određene elemente iz taline (npr. sumpor).

5.2 Taljenje

Za proizvodnju taline sivog lijeva najčešće se upotrebljava kupolna i indukcijska peći [1, 2].

Kupolna peć je šahtni tip peći u kojoj se tale kruti uložni materijali (slika 15).



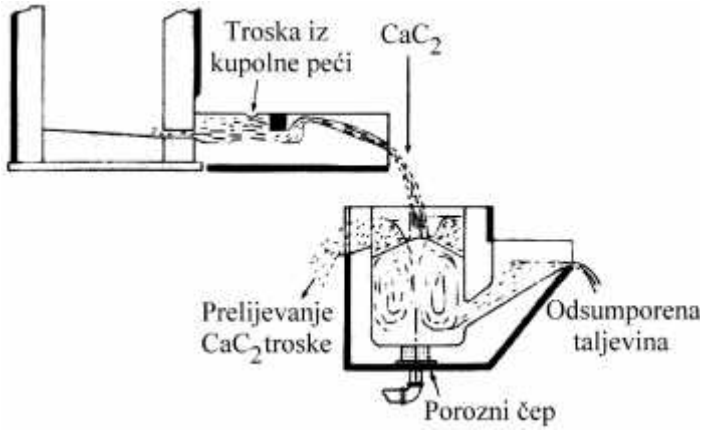
Slika 15. Kupolna peć [14, 15]

Metalni dio uloška čini sivo sirovo željezo, otpadni željezni lijev, čelični otpad i povratni materijal unutar ljevaonice. Ferolegure se također dodaju ako treba nadoknaditi gubitke pojedinih elemenata iz uloška za vrijeme taljenja ili ako njihov unos u peć putem metalnog uloška nije bio dostatan. Troska se formira dodatkom vapnenca ili dolomita. Za poboljšanje viskoznosti troske dodaje se fluorit (CaF_2). Osim navedenih komponenti, u kupolnu peć dodaje se i ljevaonički koks visoke kvalitete. Izgaranjem koksa dobija se toplina koja je potrebna za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala.

Ulaganje materijala u kupolnu peć odvija se sljedećim redoslijedom. Najprije se u peć ubacuje samo koks do određene visine, koji se potom zapali prije ulaganja ostalih sirovina i kada se užari naizmjenično se ulažu ostale sirovine. Kada je peć napunjena, kroz sapnice koje se nalaze u njenom donjem dijelu, u peć se uvodi zrak koji može biti obogaćen kisikom. Tada započinje izgaranje koksa i taljenje uloženih materijala. Tijekom taljenja materijal u peći se spušta prema dolje i zagrijava plinovima koji dolaze iz donjeg dijela peći. Taljenje se odvija neprekidno, što znači da se peć puni kako se materijal u peći spušta prema dolje. Tekući metal ispušta se kroz otvor i žlijeb koji se nalaze u donjem dijelu plašta peći.

Elementi, poput silicija i mangana, u određenoj mjeri odgaraju u kupolnoj peći za vrijeme taljenja. Za razliku od tih elemenata, za vrijeme taljenja u kupolnoj peći dolazi do povećanja udjela ugljika i sumpora.

U slučaju kada talina iz kupolne peći sadrži previsok udio sumpor, prije lijevanja provodi se odsumporavanje. Kalcij-karbid, vapno i fluorit te natrij karbonat najčešće su korištena sredstava za odsumporavanje taline. Dodaju se u mlaz taline tijekom ispuštanja iz peći u lonac (slika 16). Inertni plin (najčešće dušik) uvodi se kroz porozni čep u dnu lonca radi intenzivnog miješanja taline u cilju efikasnijeg odsumporavanja. Kalcij iz kalcij-karbida (ili vapna) reagira sa sumporom u talini, a kao produkt te rekacije nastaje kalcij-sulfid (CaS), tj. troska koja pliva na površini taline u loncu.



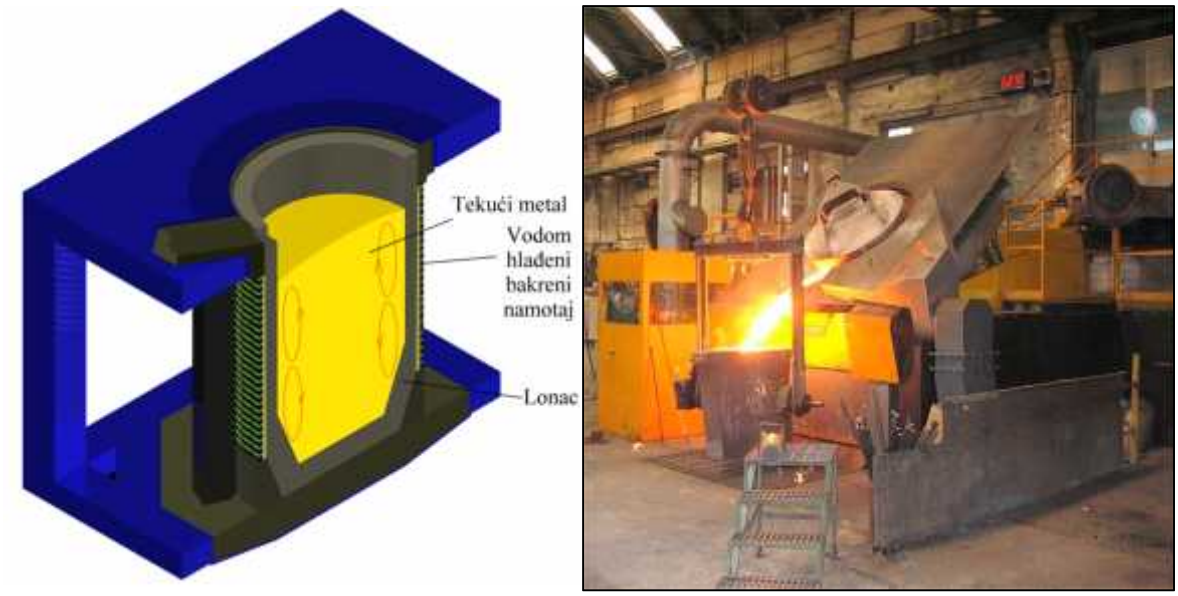
Slika 16. Shematski prikaz odsumporavanja taline iz kupolne peći [1]

Kupolna peć ima niz pozitivnih strana. To je ekonomski najpovoljniji agregat za izradu taline sivog lijeva u velikoserijskoj proizvodnji. Prednost kupolne peći je mogućnost taljenja velikih i masivnih komada uložnog materijala. Uložni materijali ne moraju biti potpuno suhi jer se predgrijavaju tijekom spuštanja kroz peć. Vrlo važna karakteristika kupolnih peći je mogućnost uklanjanja pojedinih nepoželjnih elementa iz uloška (npr. sumpor, cink, olovo), koji prelaze u trosku ili ih odnose pećni plinovi izvan peći. Talina iz kupolne peći ima jako dobru metaluršku kvalitetu, tj. visok nukleacijski potencijal.

I**ndukcijske peći** s loncem danas se sve više upotrebljavaju za proizvodnju taline sivog lijeva, prvenstveno zbog svoje flekibilnosti u radu (slika 17). Električna energija daje toplinu potrebnu za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala.

U odnosu na kupolne peći, indukcijske imaju mnoge prednosti. Jednostavna primjena, brže zagrijavanje i taljenje uloška, mali gubitak, odnosno odgor uložnog materijala (< 1 %) te elemenata iz njega (odgor silicija iznosi samo 5 do 10 %, dok je odgor mangana zanemariv), jednostavna kontrola temperature i kemijskog sastava taline, lakše i sigurnije legiranje taline te mogućnost postizanja viših temperatura neke su od najznačajnijih prednosti [1, 2]. U indukcijskim pećima ne koristi se koks kao izvor energije za taljenje, što omogućuje proizvodnju sivog lijeva s nižim udjelom sumpora.

Međutim, indukcijske peći imaju i određene nedostatke u odnosu na kupolne peći, a to su: viši troškovi taljenja, lošija metalurška kvaliteta taline, nemogućnost uklanjanja sumpora i fosfora, upotreba kvalitetnijih uložnih materijala itd. [1, 2].



Slika 17. Indukcijska peć s loncem [16, 17]

5.3 Cijepljenje

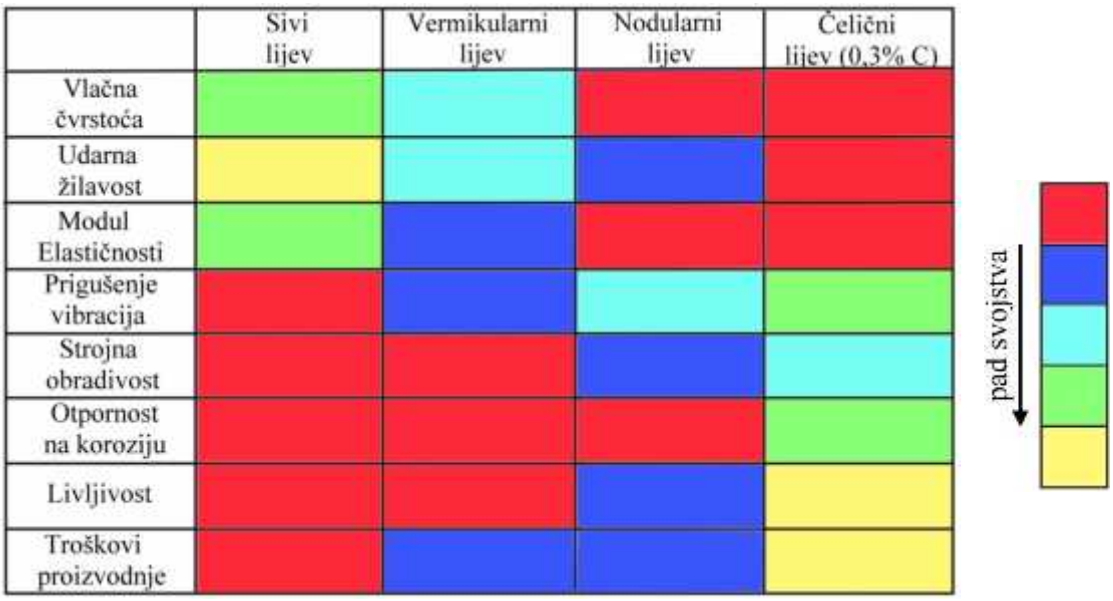
Cijepljenje je vrlo važan korak u proizvodnji kvalitetnih odljevaka od sivog lijeva, jer utječe na njegovu mikrostrukturu, a time i na svojstva [1, 8, 9]. Njznačajniji učinci cijepljenja su:

- modificiranje uključaka u talini, što rezultira povećanjem broja pogodnih mjesta za nukleaciju listićavog grafita,
- smanjenje pothlađenja taline,
- smanjenje sklonosti ka nastajanju karbida za vrijeme skrućivanja,
- smanjenje varijacija svojstva između stijenki različitih debljina,
- poboljšanje svojstava.

Cjepivo se dodaje u maloj količini u talinu prije ili tijekom lijevanja taline u kalup. Dodatak cjepiva obično se kreće od 0,1 do 0,4 % (0,5%), što ovisi o nizu faktora, kao što su: jačina učinka koji se želi postići, vrsta cjepiva, metoda dodatka cjepiva, vrijeme zadržavanja taline u loncu prije lijevanja itd. [1]. Kao cjepivo za sivi lijev najčešće se upotrebljava FeSi koji sadrži određeni udio elemenata, poput aluminija, kalcija, barija, stroncija i cirkonija, značajnih za poboljšanje nukleacijskog potencijala taline [1].

6. SVOJSTVA SIVOG LIJEVA

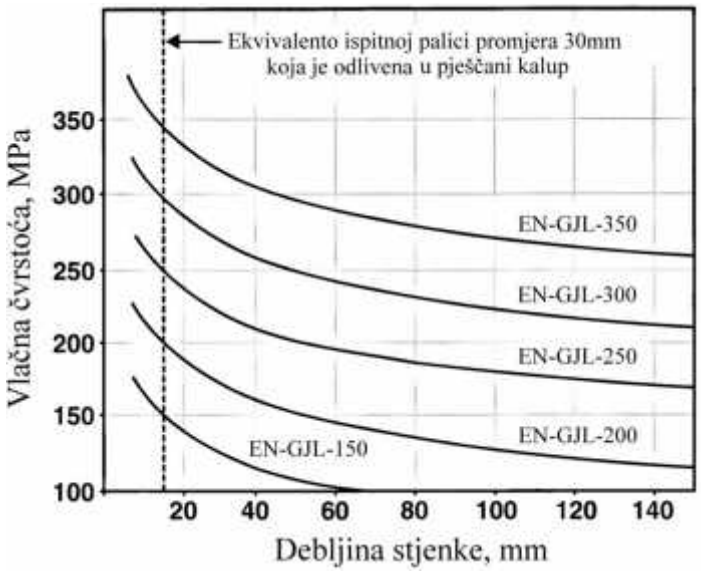
Usporedba svojstava sivog vermikularnog i nodularnog lijeva prikazana je na slici 18. Može se vidjeti da po pitanju vlačne čvrstoće, žilavosti i modula elastičnosti sivi lijev ne može konkurirati čeličnom, nodularnom i vermikularnom lijevu. Međutim, sivi lijev bolje prigušuje vibracije, bolje vodi toplinu i lakše se lijeva od navedenih materijala.



Slika 18. Usporedba svojstava sivog ,vermikularnog, nodularnog i čeličnog lijeva [1]

Mehanička i fizikalna svojstva nelegiranih kvaliteta sivog lijeva propisanih normom HRN EN 1561:1997 prikazana su u tablicama 3 i 4.

Sivi lijev pokazuje veliku osjetljivost na debljnu stijenke odljevka. Zbog toga **vlačna čvrstoća** unutar odljevka varira ovisno o debljini stjenke, odnosno brzini hlađenja (slika 19).



Slika 19. Ovisnost vlačne čvrstoće sivog lijeva o debljini stijenke odljevka [18]

Tablica 3. Mehanička svojstva sivog lijeva određena na ispitnim uzorcima koji su izrađeni strojnom obradom odvojeno lijevanih uzoraka promjera 30 mm u lijevanom stanju (dodatne informacije o mehaničkim svojstvima pored onih danih u tablici 1) [19]

Svojstvo	Oznaka	Jedinica	Označivanje materijala[1)]				
			EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
			Struktura				
			Feritno /perlitna		Perlitna		
Vlačna čvrstoća	R_m	N/mm^2	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Granica razvlačenja (0,1%)	$R_{p0,1}$	N/mm^2	98-165	130-195	165-228	195-260	228-285
Istezanje	A	%	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3
Tlačna čvrstoća	R_m^c	N/mm^2	600	720	840	960	1080
Granica tečenja pod tlakom (0,1%)	$R_{p0,1}^c$	N/mm^2	195	260	325	390	455
Savojna čvrstoća	σ_f	N/mm^2	250	290	340	390	490
Smična čvrstoća	τ_s	N/mm^2	170	230	290	345	400
Čvrstoća na uvijanje	τ_t	N/mm^2	170	230	290	345	400
Modul elastičnosti[2)]	E	kN/mm^2	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Poissonov broj	υ	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Dinamička savojna čvrstoća[3)]	R_{df}	N/mm^2	70	90	120	140	145
Čvrstoća pri izmjeničnom vlačno-tlačnom opterećenju[4)]	R_d^{-1}	N/mm^2	40	50	60	75	85
Prijelomna žilavost	K_{Ic}	N/mm$^{3/2}$	320	400	480	560	650

[1)] Kada postoje posebni zahtjevi na strojnu obradivost ili magnetska svojstva, primjenjuje se kvaliteta EN-GJL-100. Zahtijevana svojstva mogu se ostvariti toplinskom obradom. Podaci za kvalitetu EN-GJL-100 nisu prikazani.

[2)] Ovisi o količini i obliku grafita te opterećenju.

[3)] Primjenjuje se slijedeća aproksimacija: $R_{df} \approx 0{,}35\text{-}0{,}5 \cdot R_m$.

[4)] Primjenjuje se slijedeća aproksimacija: $R_d^{-1} \approx 0{,}53 \cdot R_{df} \approx 0{,}26 \cdot R_m$

Tablica 4. Fizikalna svojstva sivog lijeva određena na ispitnim uzorcima koji su izrađeni strojnom obradom odvojeno lijevanih uzoraka promjera 30 mm u lijevanom stanju [19]

Svojstvo	Oznaka	Jedinica	Označivanje materijala[1)]				
			EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
Gustoća	ρ	g/cm^3	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Specifični toplinski kapacitet; između 20 i 200°C, između 20 i 600°C	c	J/(kgK)			460 535		
Koeficijent linearne ekspanzije; između -100 i +20°C između 20 i 200°C između 20 i 400°C	α	µm/(m·K)			10,0 11,7 13,0		
Toplinska vodljivost pri 100°C pri 200°C pri 300°C pri 400°C pri 500°C	λ	W/(m·K)	 52,5 51,0 50,0 49,0 48,5	 50,0 49,0 48,0 47,0 46,0	 48,5 47,5 46,5 45,0 44,5	 47,5 46,0 45,0 44,0 43,0	 45,5 44,5 43,5 42,0 41,5
Koercitivnost	H_0	A/m	560-720				
Maksimalna permeabilnost	μ	µH/m	220-330				

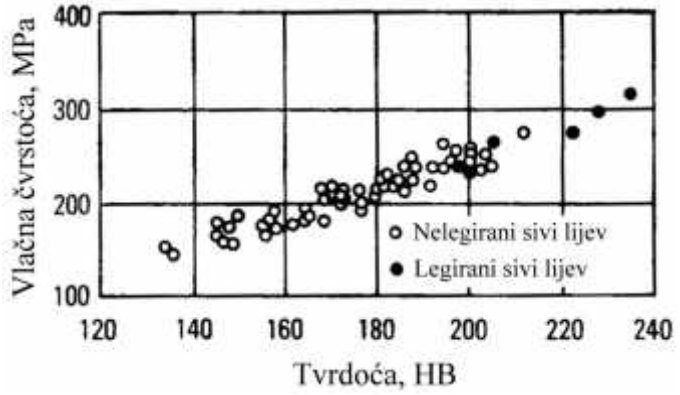
[1)] Kada postoje posebni zahtjevi na strojnu obradivost ili magnetska svojstva, primjenjuje se kvaliteta EN-GJL-100. Zahtijevana svojstva mogu se ostvariti toplinskom obradom. Fizikalna svojstva kvaliteta EN-GJL-100 nisu prikazana.

Tlačna čvrstoća sivog lijeva je ~ 3 do 4 puta veća od njegove vlačne čvrstoće (tablica 3), što je znatno više nego kod nodularnog i vermikularnog lijeva [1, 8, 9]. Upravo zbog visoke tlačne čvrstoće sivi lijev često se upotrebljava za konstrukcije koje su tlačno opterećene.

Grafitni listići mjesta su na kojima se lako stvaraju pukotine već pri niskim naprezanjima. Zbog toga sivi lijev ne pokazuje uobičajeno elastično ponašanje.

Modul elastičnosti sivog lijeva povećava se s porastom vlačne čvrstoće (tablica 3) [1, 9]. Sivi ljevovi s višim modulom elastičnosti lošije apsorbiraju vibracije od materijala s niskim modulom elastičnosti. Sivi lijev koji ima nizak modul elastičnosti pokazuje dobru otpornost na toplinske šokove [1, 8, 9].

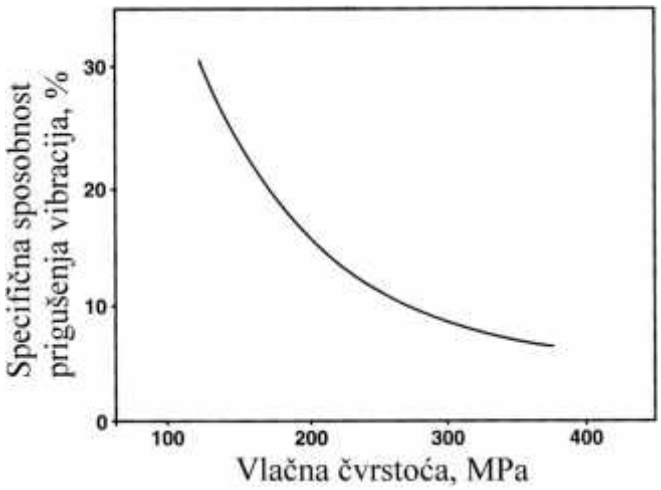
Tvrdoća sivog lijeva povećava se s porastom vlačne čvrstoće (slika 20).



Slika 20. Odnos vlačne čvrstoće i tvrdoće sivog lijeva [8]

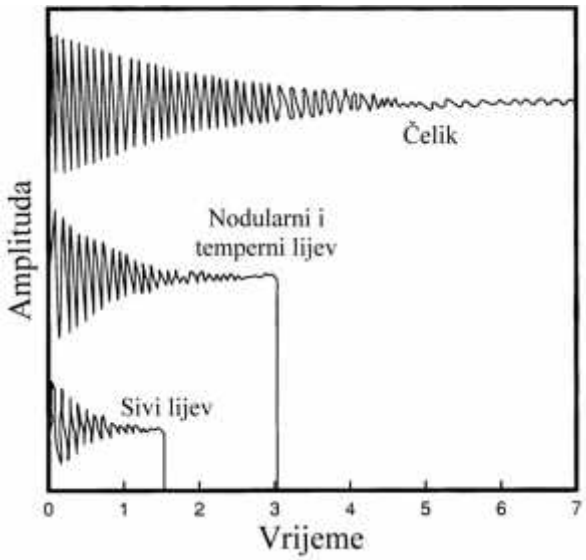
Zbog listićavog oblika grafita, sivi lijev ima vrlo nisku **žilavost i istezanje** [1]. Udarni rad loma, kao mjera žilavosti, određen na epruvetama bez zareza, obično se kreće od 1,4 do 6,8 J [18]. U tablici 3 može se vidjeti da žilavost sivog lijeva povećava s rastom vlačne čvrstoće, što je suprotno u odnosu na nodularni lijev. Istezanje sivog lijeva u većini slučajeva je od 1% (tablica 3).

Sivi lijev ima vrlo veliku **sposobnost prigušenja vibracija** zbog međusobno povezanih grafitnih listića u metalnoj osnovi [1]. Na slici 21 može se vidjeti kako sposobnost prigušenja vibracija sivog lijeva opada s povećanjem njegove vlačne čvrstoće.



Slika 21. Utjecaj vlačne čvrstoće na specifičnu sposobnost prigušenja vibracija sivog lijeva [18]

Slika 22 pokazuju da sivi lijev ima znatno veću sposobnost prigušenja vibracija od nodularnog i tempernog lijeva te čelika.



Slika 22. Sposobnost prigušenja vibracija sivog, nodularnog i tempernog lijeva te čelika [1]

Zbog visoke sposobnosti prigušenja vibracija, sivi lijev se upotrebljava za izradu blokova i glava motora s unutarnjim izgaranjem, bubnjeva i kočionih diskova, kućišta ležajeva, postolja raznih strojeva, itd.

Povećanje udjela grafitnih čestica rezultira smanjenjem **gustoće** sivog lijeva. Zbog toga gustoća sivog lijeva raste s povećanjem vlačne čvrstoće (tablica 4).

Zbog međusobne povezanosti grafitnih listića, sivi lijev ima veću **toplinsku vodljivost** od vermikularnog i nodularnog lijeva [1]. S porastom količine, grubosti i dužine grafitnh listića povećava se toplinska vodljivost sivog lijeva [8]. Većina legirnih elemenata smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva, a najveći učinak ima silicij. Povećanje udjela ferita u metalnoj osnovi rezultira povećanjem toplinske vodljivosti. Iz podataka u tablici 4 može se vidjeti da toplinska vodljivost opada s porastom vlačne čvrstoće i da se tek neznatno smanjuje s porastom temperature do 500°C. Visoka toplinska vodljivost važno je svojstvo za odljevke koji moraju brzo odvoditi toplinu, kao što su npr. kočioni bubnjevi i diskovi, čeličanske kokile itd.

Od ostalih svojstva sivog lijeva, treba istaknuti jako dobru **otpornost ka toplinskom umoru**, odnosno naizmjeničnim ciklusima grijanja i hlađenja koji mogu dovesti do značajnih naprezanja u odljevku i pojave pukotina [1]. Rezultat je to visoke toplinske vodljivosti i niskog modula elastičnosti. Osim toga, sivi ljev ima odličnu **otpornost na trošenje**, posebno na trošenje klizanjem, što je rezultat prisutnosti grafitnih listića u mikrostrukturi [1, 8, 9]. Još jedna vrlo značajna karakterstika sivog lijeva je odlična **strojna obradivost**, jer se nastala strugotina lomi na grafitnim listićima, koji ujedno podmazuju alat za obradu [1, 8, 9].

7. PRIMJENA SIVOG LIJEVA

Široka primjena sivog lijeva je rezultat niske cijene i specifične kombinacije svojstava. Tipična područja primjene su: strojogradnja (razni dijelovi i postolja strojeva, kućišta, odljevci za peći i štednjake itd.), razne konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesnu industriju i energetiku, kanalske armature za vodovodne i kanalizacijske sustave, industrija motornih vozila (cilindri, klipni prstenovi, blokovi i glave motora, kočioni diskovi, zamašnjaci, razni zupčanici, kućišta sklopova itd.), dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja [1, 2]. Slika 23 prikazuje nekoliko odljevaka od sivog lijeva.



a) b) c) d) e) f)

Slika 23. Odljevci od sivog lijeva: a) blok motora, b) glava motora, c) kočioni disk, d) kočioni bubanj, e) peć na kruta goriva, f) centrifugalno lijevane cijevi [20 – 24]

8. ZAKLJUČAK

Sivi lijev je vrsta željeznog lijeva u kojem je ugljik izlučen u obliku grafitnih listića oko kojih se nalazi metalna osnova. Budući da su grafitni listići međusobno povezani, metalna osnova je u velikoj mjeri diskontinuirana. Zbog toga sivi lijev ima nižu granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, istezanje, žilavost, modul elastičnosti i tvrdoću od čeličnih ljevova te ostalih željeznih ljevova koji u strukturi sadrže grafitne čestice, kao što su nodularni, temperirani i vermikularni lijev. Međutim, zbog takve strukture sivi lijev ima znatno veću toplinsku vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija od navedenih konkurentnih materijala. Osim toga, postoje i druge pozitivne strane sivog lijeva, a to su: odlična strojna obradivost, visoka livljivost, tlačna čvrstoća, tribološka svojstva i otpornost na koroziju te niski troškovi proizvodnje.

Svojstva sivog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukturi, tj. o tipu, veličini i raspodijeli grafitnih listića, strukturi metalne osnove te prisutnosti karbida i fosfidnog eutektika. Različita svojstva mogu se postići kroz varijacije mikrostrukture. Kemijski sastav i brzina hlađenja odljevka tijekom i nakon skrućivanja ključni su faktori o kojima ovisi mikrostruktura sivog lijeva.

Za mnoge aplikacije sivi lijev i danas ima zadovoljavajuća svojstva. Zbog toga i niskih troškova proizvodnje, sivi lijev je najviše korišteni materijal za proizvodnju metalnih odljevaka.

9. 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] …, A Modern Casting Staff Report, 50th Census of World Casting Production, Global Casting Production Stagnant, Modern Casting 106(2016) 12, 25 – 29.

[4] ..., EN ISO 945-1:2012, Microstructure of cast Irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis, ISO, Switzerland, 2012.

[5] ..., EN 1560:2011, Founding – Designation system for cast iron – Material symbols and material numbers, CEN, Brussels, 2011.

[6] …, HRN EN 1561:2011, Ljevarstvo – Sivi željezni lijevovi, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2011.

[7] R. Elliott, Cast Iron Technology, Butterwort & Co, London, 1988.

[8] D. B. Craig, M. J. Hornung, T. K. McCluhan, Gray Iron, poglavlje u knjizi MetalsHandbook, NinthEdition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1988., 629 – 646.

[9] T. Fugal, G. M. Goodrich, V. Patterson, M. Mroczek, J. Ward, G. Goodrich, C. Callison, C. A. Bhaskaran, L. Helm, A. Shturmakov, J. Way, Introduction to Gray Cast Iron Processing, American Foundry Society, Des Plaines, Illinois, SAD 2000.

[10] Elkem Foundry Products, Recommended Target Analysis for Gray iron, TehnicalInformation 17, http://documents.mx/documents/technical-information.html

[11] C. E. Bates, Alloy Element Effects on Gray Iron Properties: Part II, AFS Transactions 94(1986), 889 – 912.

[12] G. M. Goodrich, A Microview od Some Factors That Impact Cast Iron (Or the Little Things That Mean a Lot), AFS Transactions109(2001), paper 01-121.

[13] C. R. Loper, Jr., J. Y. Park, W. L. Powell, C. Shirvani, Recovery od LeadinCupolaMelting of Cast Iron, AFS Transactions106(1998), 545 – 551.

[14] https://rohitmehta355.wordpress.com/2014/12/30/what-are-cupola-furnaces/

[15] http://www.mm-china.german-pavilion.com/content/en/exhibitors/exhibitors_detail.php?exhibitor_id=58998

[16] https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_furnace

[17] http://www.directindustry.com/prod/fomet/product-63750-538460.html

[18] …, Data Handbook for Grey Irons, The Castings Development Centre, England, 1997.

[19] …, HRN EN 1561:1997, Ljevarstvo – Sivi željezni ljevovi, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 1997.

[20] http://www.doosaninfracore.com/engine/en/castings/lineuphead.do

[21] https://www.boschautoparts.com/en/auto/brakes/quietcast-premium-disc-brake-rotors

[22] https://www.performanceonline.com/Brake-Drums-and-Rotors-60-87-Chevy-GMC-Truck/

[23] http://www.plamen.hr/Proizvod.aspx?ProdID=6

[24] http://www.preisgroup.com/lijevani-proizvodi.html

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime: Mato Dundjer
Datum i mjesto rođenja: 23.03.1996., Sisak
Adresa: Božidara Adžije 1, 44000 Sisak
E-mail: dundjer.mato@hotmail.com

OBRAZOVANJE:

2002.g. - 2010.g.	Osnovna škola: Braća Bobetko, Sisak
2010.g. - 2014.g.	Srednja škola: Tehnička škola, Sisak
2014.g. -	Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

VJEŠTINE:

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