

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 Lovreni -Jugovi - član
doc.dr.sc. Ivan Jandrli – 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.

(vlastoručni potpis)

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

SAŽETAK

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA SIVOG LIJEVA

Sivi lijev pripada skupini željeznih ljevova koji sadrže grafitne estice u mikrostrukturi. Grafitne estice u sivom lijevu imaju listi av oblik i me usobno su povezane, što negativno utje e na njegova vla na svojstva. Me utim, zbog takvog oblika grafitnih estica sivi lijev ima visoku sposobnost prigušenja vibracija, visoku toplinsku vodljivost, jako dobra tribološka svojstva i vrlo dobru strojnu obradivost. Specifi na kombinacija svojstava sivog lijeva, koja udovoljava za mnoge aplikacije, te jednostavna i jeftina proizvodnja glavni su razlozi njegove vrlo široke primjene. Ve dugi niz godina sivi lijev je najviše korišteni materijal za izradu metalnih odljevaka. Gotovo 45 % svjetske proizvodnje odljevaka u 2015. godini ine odljevci od sivog lijeva.

Ovaj pregledni rad prikazuje klasifikaciju, skru ivanje, 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. SKRU IVANJE SIVOG LIJEVA I PRETVORBE U KRUTOM STANJU	4
3.1 Tijek skru ivanja	4
3.2 Tipovi grafitnih listi a	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 prate ih 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. ZAKLJU AK	27
9. LITERATURA	28
ŽIVOTOPIS	29

1. UVOD

Sivi lijev je jedna od najstarijih vrsta željeznog lijeva [1, 2]. Upotrebljava se za izradu odljevaka 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.

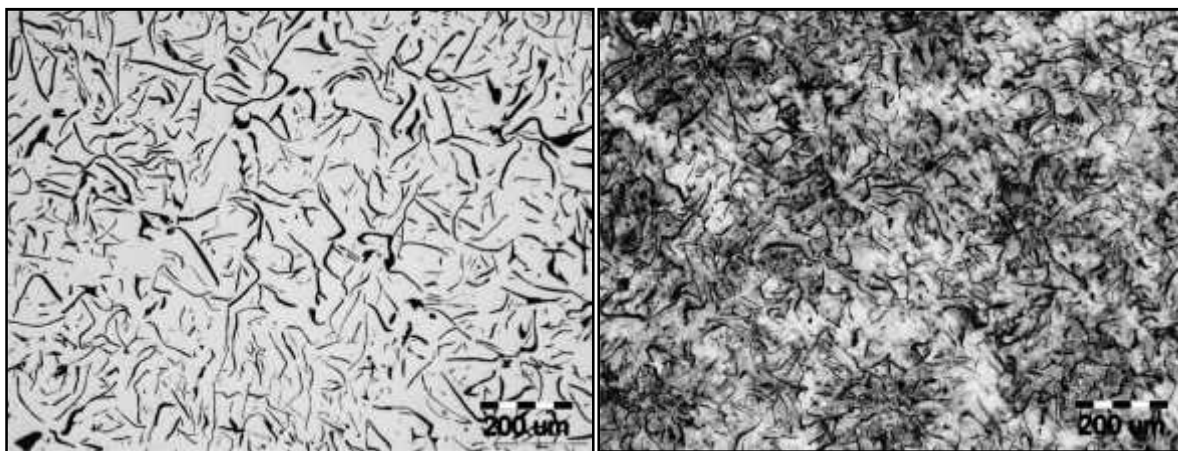
U sivom lijevu ugljik je izlučen u obliku međusobno povezanih grafitnih čestica lističavog oblika koje okružuje metalna osnova. Naziv ovog materijala dolazi od sive boje koja se može uočiti na prijelomnoj površini. Lističavi oblik grafitnih čestica u sivom lijevu ima velik utjecaj na njegova mehanička svojstva. Sivi lijev ima nisku granicu razvlačenja, malu vrstovnu, 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 vrstovnu.

Sivi lijev danas se smatra „istraženim“ materijalom. Jako puno se zna o mehanizmu nukleacije i rasta lističavog grafita, utjecaju kemijskog sastava, mikrostrukture i proizvodnih faktora na njegova svojstva te mogući nastimi 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

Tipi na mikrostruktura sivog lijeva prikazana je na slici 1.

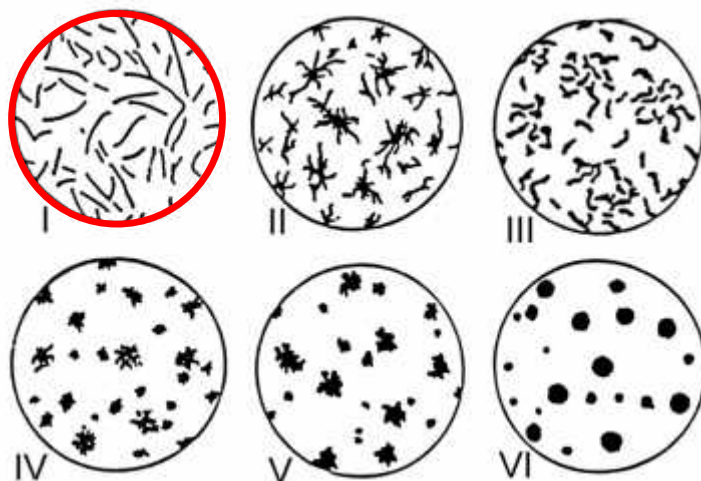


a)

b)

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

Oblici grafitnih estica u željeznim ljevovima definirani su normom EN ISO 945-1:2012 [4]. Listi avi 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 estica u željeznim ljevovima prema normi EN ISO 945-1:2012. Oblik I predstavlja listi avi 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 normi EN 1561:2010.

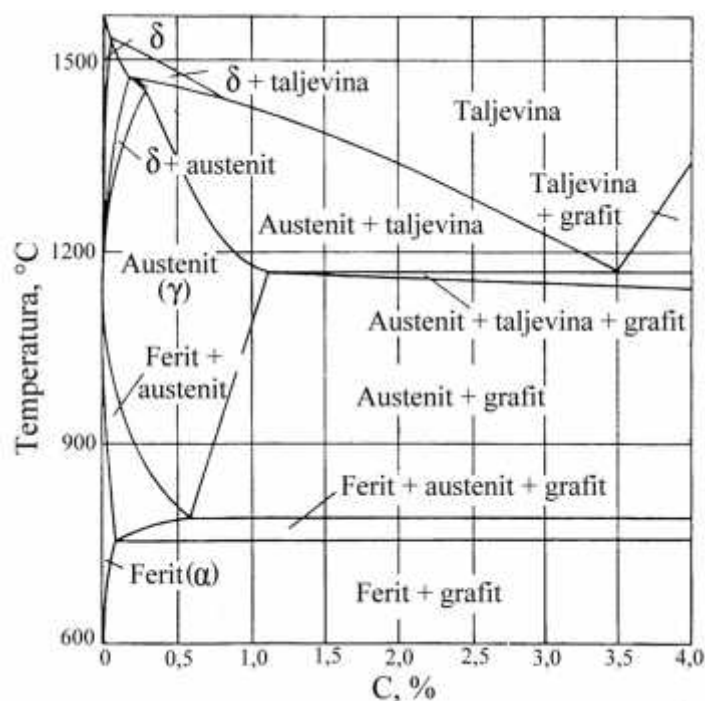
Norma HRN EN 1561:2011 propisuje nekoliko kvaliteta sivog lijeva ovisno o minimalnoj vrijednosti vlažne vrste (tablica 1) [6].

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]

Označavanje materijala		Debljina relevantne stijenke t		Vlačna vrstovna 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. SKRU IVANJE SIVOG LIJEVA I PRETVORBE U KRUTOM STANJU

Kao i kod ostalih željeznih ljevova koji sadrže grafitne estice u mikrostruktri, tijekom skru ivanja sivog lijeva odvija se eutekti na reakcija kojom iz taline nastaju dvije krute faze - jedna je listi avi grafit, a druga je austenit [1, 2]. U dvokomponentnom sustavu Fe-C eutekti na reakcija odvija se kada udio ugljika u talini iznosi 4,3 %, a temperatura 1154 °C. To govori da je eutekti na to ka na 4,3 %C. S dodatkom drugih elemenata, pored željeza i ugljika, mijenja se položaj eutekti ne to ke. Pri tome dodatak silicija ima najve i utjecaj (slika 3).

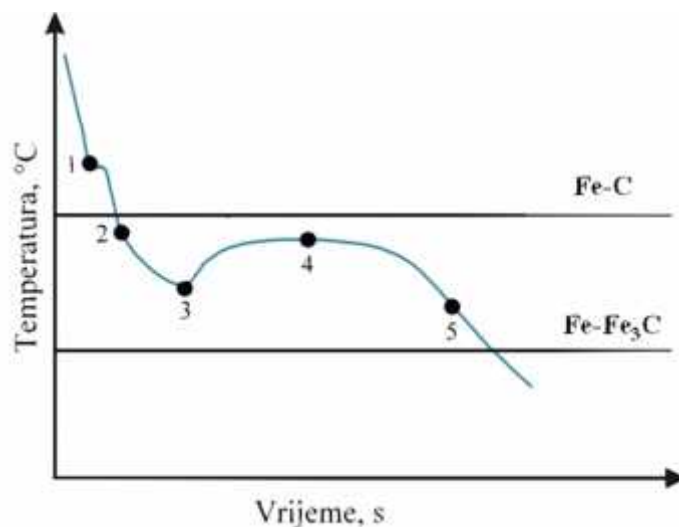


Slika 3. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5 %Si [1]

S porastom dodatka silicija eutekti na to ka pomi e 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 uglji nog ekvivalenta (CE), o kojem e se detaljnije govoriti nešto kasnije.

3.1 Tijek skru ivanja

Snimanjem krivulje hla enja, odnosno pra enjem promjene temperature s vremenom tijekom skru ivanja može se dobiti uvid u tijek skru ivanja sivog lijeva. Svi procesi koji se odvijaju tijekom skru ivanja rezultiraju odgovaraju im promjenama na krivulji hla enja, kao što su zastoji na krivulji, promjena nagiba krivulje itd. Krivulja hla enja podeutekti nog sivog lijeva shematski je prikazana na slici 4.



Slika 4. Shematski prikaz krivulje hlađenja pod eutektičnim uvjetima sivog lijeva [1]

Nakon što se talina sivog lijeva ulije u kalup, sve dok se ne dostigne likvidusna temperatura (T_L) ona se kontinuirano hladi (točka 1, slika 4). U toj točki započinje izlučivanje primarnog austenita, koji raste u obliku dendrita s daljnjim padom temperature. Sve se više izlučuje primarnog austenita izmeću 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.

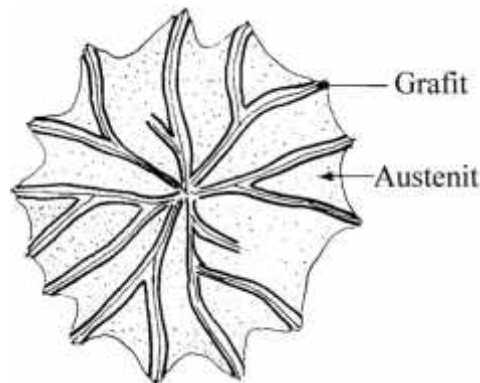
Eutektična reakcija započinje u točki 2, koja predstavlja temperaturu početka eutektične reakcije (T_{ES}). Dvije krute faze – jedna je eutektični austenit, a druga listavi grafit nastaju iz preostale taline. Umjesto listavih avog grafitu mogu nastati karbidi, koji štetno utječu na svojstva sivog lijeva. Zbog toga moramo spriječiti stvaranje karbida tijekom skrućivanja. Karbidi nastaju ako u talini nema dovoljno pogodnih mjesta za nukleaciju grafitu (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 mjesta za nukleaciju listavih avog grafitu. Tijekom daljnjeg pada temperature (područje između točki 2 i 3 na krivulju hlađenja, slika 4), talina se pothlađuje, što daje pokretnu silu za nukleaciju, odnosno izlučivanje grafitu. Što je veći nukleacijski potencijal taline, tj. što je veći broj pogodnih mjesta za nukleaciju listavih avog grafitu, potrebno je manje pothlađivanje za intenzivno izlučivanje grafitu.

Na temperaturi eutektične pothlađivanja (T_{EP}) (točka 3 na krivulji hlađenja) ostvarena je dovoljna pokretna sila za intenzivnu nukleaciju listavih avog grafitu, odnosno intenzivno odvijanje eutektične reakcije. Mjesta za nukleaciju grafitu su različiti uključujući 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 listavih avog grafitu je viša od topline koja se odvodi kroz kalup u okoliš. Naziv ove pojave je rekalescencija. Maksimalna temperatura tijekom eutektične skrućivanja naziva se temperatura eutektične rekalescencije (T_{ER}) (točka 4 na krivulji hlađenja).

Rast listavih avog grafitu 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 kolonija austenit-grafit (slika 5) koje su međusobno razdvojene talinom, te je svaka eutektična kolonija rezultat posebnog nukleacijskog događaja. Eutektične kolonije, tijekom skrućivanja,

kontinuirano rastu i u kona nici dolazi do me usobnog kontakta. Grafitni listi i me usobno su povezani u svim eutekti nim elijama.



Slika 5. Shematski prikaz eutekti ne elije austenit-grafit u sivom lijevu [7]

Eutekti na reakcija se odvija izme u to aka 2 i 5 (slika 4). S približavanjem ka to ki 5 tj. solidus temperaturi (T_S) sve je ve i udio krute faze, tj. austenita i listi avog grafita, a koli ina taline se smanjuje. Smanjenje koli ine taline s vremenom rezultira opadanjem koli ine izlu enog austenita i grafita. Time se postepeno smanjuje i koli ina topline koja nastaje zbog njihovog izlu ivanja. To je razlog zašto temperatura ponovo opada nakon temperature eutekti ne rekalescencije, jer se više topline odvede kroz kalup u okoliš nego što se razvije tijekom izlu ivanja austenita i grafita. Skru ivanje završava na solidus temperaturi (T_S). Mikrostruktura sivog lijeva koja je nastala sastoji se od grafitnih listi a i austenitne metalne osnove.

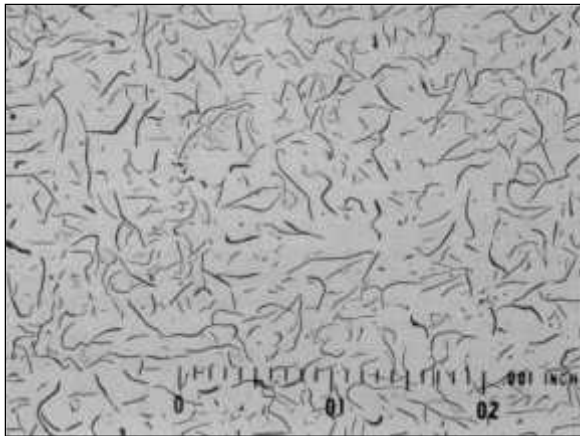
Hla enje odljevka od solidus do sobne temperature ne utje e na oblik, broj i raspodjelu grafitnih estica koje su nastale za vrijeme skru ivanja [1]. Me utim, odvijaju se pretvorbe u metalnoj osnovi.

S razlikom da je grafit prva faza koja se izlu uje, na identi an na in odvija se skru ivanje sivog lijeva nadeutekti nog sastava. Takav grafit naziva se primarnim grafitom i raste u obliku velikih listi a. Preostala talina skru uje se u obliku eutekti nih elija, kad se udio ugljika u talini i temperatura dovoljno snize. Eutekti ni grafit esto je znatno sitniji od primarnog grafita.

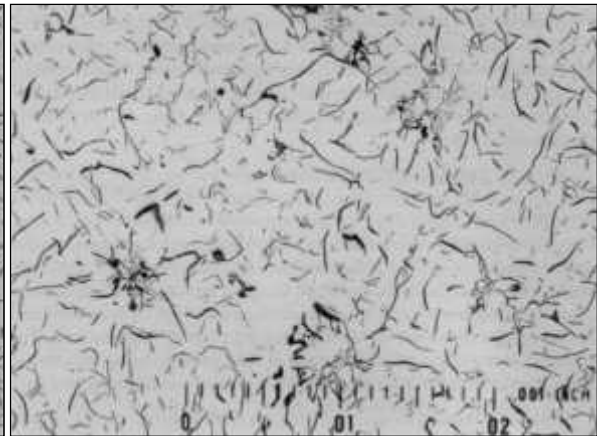
3.2 Tipovi grafitnih listi a

Nukleacijski potencijal taline i pothla enje utje u na oblik, odnosno tip grafitnih listi a. Postoji 5 tipova grafitnih listi a prema normi ASTM A247 (slika 6) [1, 8, 9].

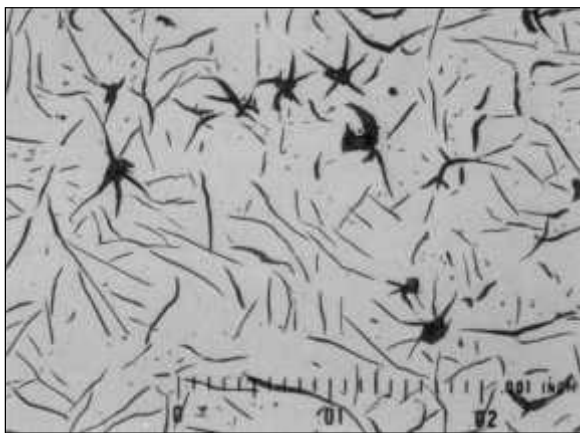
Tip A grafitnih listi a (slika 6a) su jednoliko raspodijeljeni listi i, slu ajne ili statisti ke orijentacije, u metalnoj osnovi. Ovaj tip grafitnih listi a nastaje pri visokom nukleacijskom potencijalu, niskom pothla enju (slika 7) i sporom skru ivanju taline. Kako bi se dobio visok nukleacijski potencijal, u ve ini slu ajeva talina se mora cijepiti. Optimalna fizikalna i mehani ka svojstva odljevaka od sivog lijeva postižu se kada je u mikrostrukturi prisutan A tip grafitnih listi a, što je posebno zna ajno kod odljevaka kao što su ko ioni diskovi i bubnjevi u motornim vozilima.



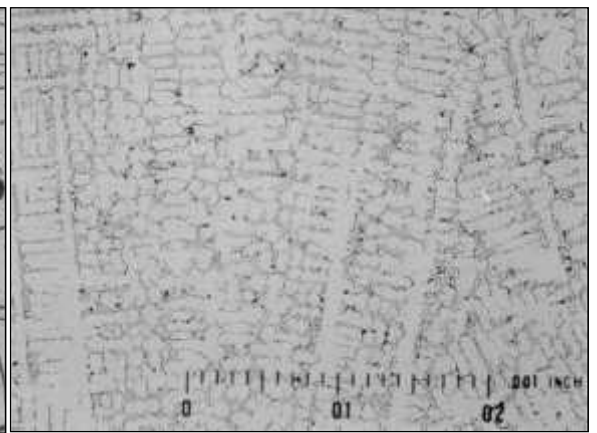
a)



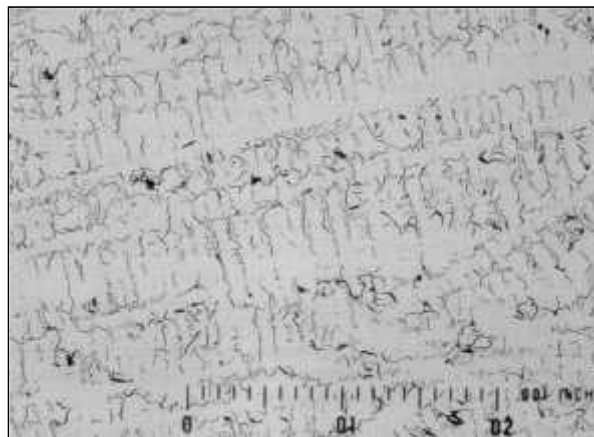
b)



c)

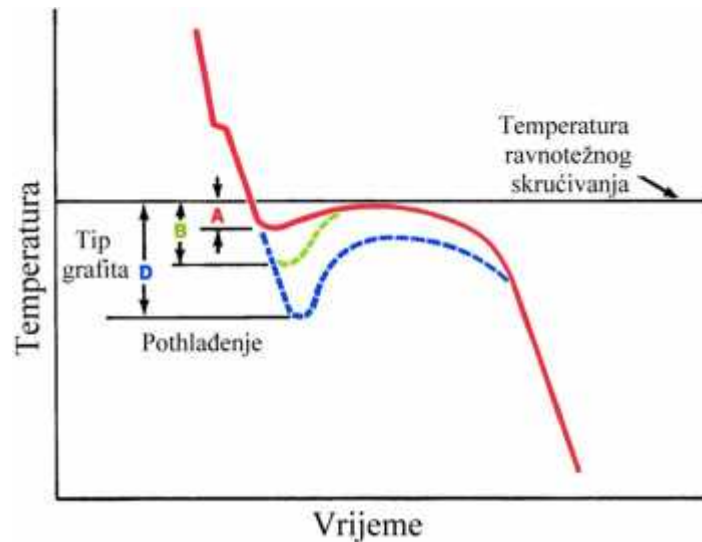


d)



e)

Slika 6. Tipovi grafitnih listi a 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 veće brzine hlađenja, nižeg nukleacijskog potencijala taline i većeg pothlađenja. Sitni fini listići grafit (slika 6b) izlaze 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 izlaze zbog većeg pothlađenja taline, a ono je rezultat nedovoljnog broja mjesta za heterogenu nukleaciju grafitnih estica 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 vrstu u odljevka s B tipom grafitnih listića.

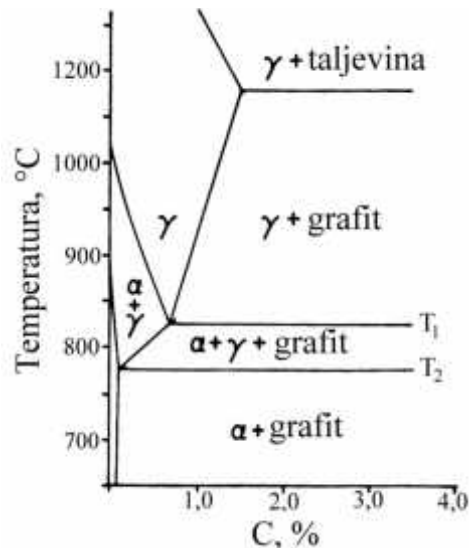
U nadeutektičnim sivim ljevovima, naročito kada imaju visok udio ugljika, pojavljuje se **tip C grafitnih listića** (slika 6c). Radi se o velikim i debelim listićima, što ukazuje da se radi o nadeutektičnom sastavu. Taj tip grafitnih listića u velikoj mjeri smanjuje vrstu u i tvrdoću odljevka od sivog 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 izlivanja **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. Vrsta odljevaka zbog toga se značajno smanjuje, ali se poboljšava njihova strojna obradivost.

3.3 Pretvorbe u krutom stanju

Tijekom skruivanja i pretvorbe u krutom stanju, odnosno eutektoidna pretvorba određuje izgled mikrostrukture sivog lijeva. Grafitni listi i formiraju se tijekom skruivanja, dok se konačna struktura metalne osnove formira nakon skruivanja. Najčešće se metalna osnova sastoji od perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) 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 skruivanja opada topljivost ugljika u austenitu (γ).



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

Kada završi skruivanje 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 ugljika. Zbog toga se pri sporom hlađenju oko grafitnih listića formiraju austenitna područja s niskim udjelom ugljika. Takav austenit se tijekom daljnjeg hlađenja transformira u ferit. U slučaju da se želi postići i 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 mikrostrukтури sivog lijeva. Prema tome, ako se odljevak od sivog lijeva odgovarajućeg kemijskog sastava sporo hladi, može se postići i potpuno 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 ne bude 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 putevi 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 mikrostrukтури.

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.

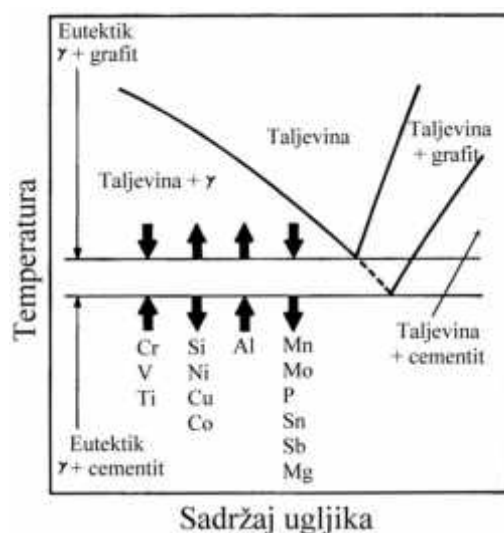
Tablica 2. Preporučeni udjeli stalnih elemenata u kemijskom sastavu kvaliteta sivog lijeva prema HRN EN 1561:2011 [10]

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 listi grafitnog eutektika [11]. Poboljšanje livljivosti taline i smanjenje sklonosti ka volumnom stezanju i stvaranju usahlina pozitivni su učinci povećanja udjela ugljika.

Silicij promovira stvaranje grafitnog eutektika, tj. otežava stvaranje karbida [1, 2]. Poput ostalih grafitizatora, podiže temperaturu stvaranja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu stvaranja metastabilnog eutektika (Fe-Fe₃C) (slika 9), tj. proširuje interval između navedenih eutektičkih temperatura.

Silicij utječe i na metalnu osnovu tako da promovira stvaranje ferita [1, 2, 11]. Osim toga, da previsok udio silicija nepovoljno utječe na vlačnu čvrstoću u sivom lijevu.



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

Utjecaj ugljika, silicija (i fosfora) na skruivanje i rezultiraju u mikrostrukturu može se promatrati zajedno kroz **uglji ni ekvivalent, odnosno ekvivalent ugljika (CE)** ili **stupanj zasi enja (S_c)**. Ekvivalent ugljika može se izračunati pomoću nekoliko formula, a najčešće se upotrebljava sljedeća [1]:

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

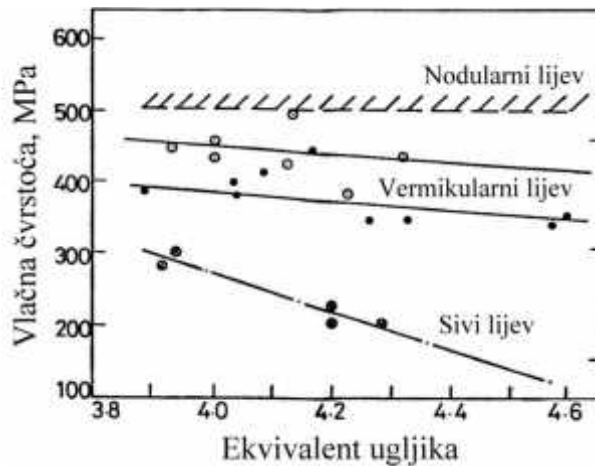
Ako je $CE = 4,3$ radi se o sivom lijevu eutektičnog sastava. Ukoliko je $CE < 4,3$ radi se o podeutektičnom sastavu. U tom slučaju austenit je prva faza koja nastaje tijekom skruivanja. U slučaju kada je $CE > 4,3$ sivi lijev ima nadeutektični sastav. U tom slučaju primarni grafit je prva faza koja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

Stupanj zasi enja određuje se prema sljedećoj formuli [1]:

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

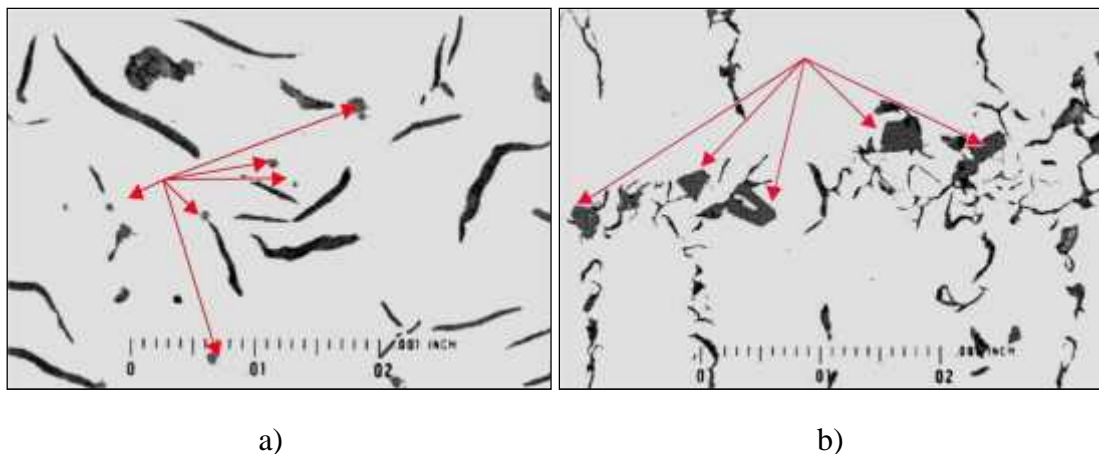
Ako je $S_c = 1$ radi se eutektičnom sastavu. Sivi lijev ima podeutektični sastav ako je $S_c < 1$. Ukoliko je $S_c > 1$, to ukazuje na nadeutektični sastav.

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 vlažnu vrstu u 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 i uzorka 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 važnu ulogu u sivom lijevu jer neutralizira **sumpor** pri čemu nastaju MnS uključci koji imaju važnu ulogu u procesu nukleacije listi avog 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).



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 veću temperaturu taljenja od FeS (MnS 1620 °C, FeS 1193°C) [1].

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

$$\%Mn = 1,7 \cdot \%S \quad (3)$$

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 reakcije nastaje MnS.

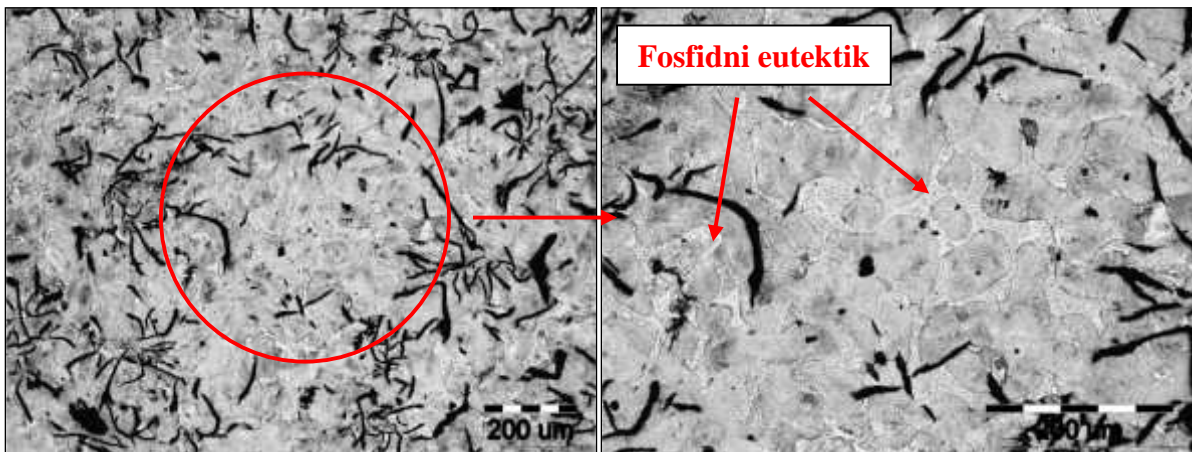
Me utim, u relanim uvjetima, reakcija $Mn + FeS \rightleftharpoons Fe + MnS$ je reverzibilna, što znači da mora postojati određeni višak mangana da se reakcija odvija u desno [1, 2, 9]:

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

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 listi avog grafita vrlo je važan **sumpor**, jer MnS uključci koji nastaju kao produkti reakcije s manganom služe kao moguća mjesta za nukleaciju listi avog 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 $\sim 950^{\circ}\text{C}$ [1]. Za vrijeme skrućivanja izljuje se po granicama eutektiknih čestica, što negativno utječe na vrstu u sivog lijeva.



Slika 12. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva koji sadrži 0.1 % fosfora (nagrizenog stanja) [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 mikrostrukтури 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 u inak znatno slabiji od silicija [9]. Pospješuje stvaranje perlita, premda je taj u inak 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 vlažne vrstoće 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 pove anje vrsto e, uz krom treba dodati odre eni udio grafitizatora, poput bakra i nikla, kako bi se sprije ilo nastajanje karbida.

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

Vanadij je tako er snažan karbidotvorni element koji blago promovira stvaranje perlita [1]. Naj eš e se dodaje u koli inama do 0,35 %, što rezultira znatnijim porastom vla ne vrsto e i tvrdo e sivog lijeva [1, 9].

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

Dodatkom **molibdena** postižu se sljede i u inci: pove ava se vla na vrsto a na sobnoj i visokim temperaturama, raste tvrdo a i otpornost na trošenje, pove ava se otpornost na puzanje i toplinski umor, te se smanjuju varijacije mehani kih svojstava izme u debelih i tankih stijenci odljevka [1, 9]. Pri dodatku molibdena treba uzeti u obzir da je on karbidotvorni element, ali znatno slabiji od kroma.

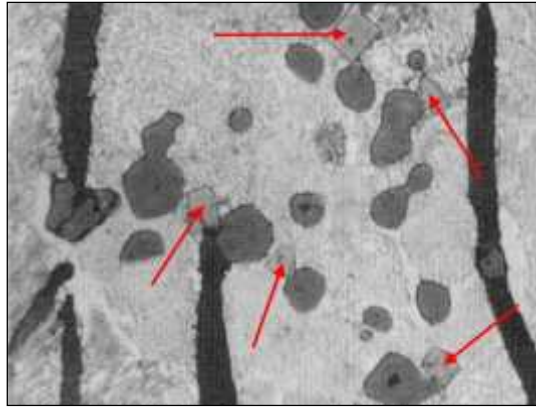
Bakar promovira stvaranje grafita i perlita [1]. Budu i da pove ava udio perlita u metalnoj osnovi, dodatkom bakra pove ava se vla na vrsto a, granica razvla enja i tvrdo a sivog lijeva.

Antimon i kositar vrlo su efikasni elementi za pove anje udjela perlita u metalnoj osnovi sivog lijeva [1]. Prema tome, dodatkom tih elemenata pove ava se vla na vrsto a, granica razvla enja i tvrdo a sivog lijeva. U usporedbi s bakrom, kositar je ~ 10 – 12 puta efikasniji perlitizator, a antimon je još ~ 2 – 4 puta efikasniji od kositra [1]. Dodatak kositra obi no se kre e od 0,04 do 0,1 %, a dodatak antimona od 0,02 do 0,06 % [1].

4.3 Utjecaj prate ih elemenata

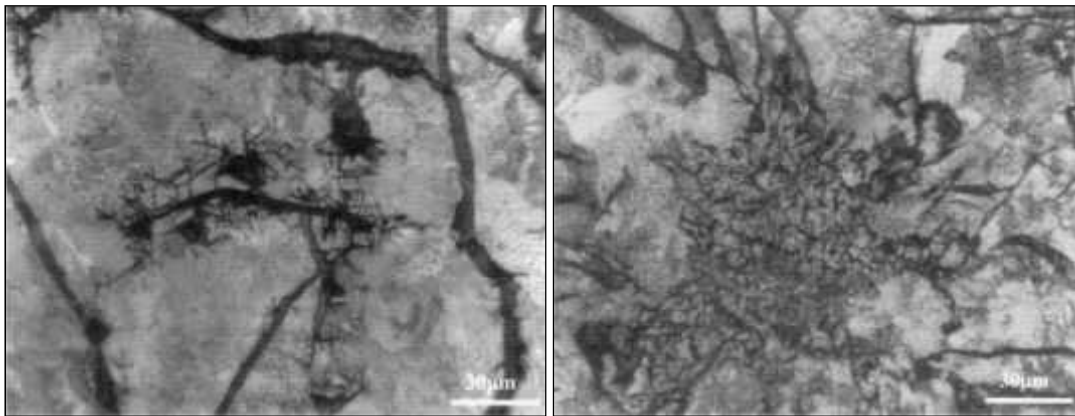
Aluminij je grafitizator i feritizator. esto je prisutan u malim koli inama u cjepivima za sivi lijev radi pove anja nukleacijskog potencijala taline. Previsoki udjeli aluminija pove avaju opasnost od plinskih grešaka u odljercima, jer snižava površinsku napetost taline [1]. Mogu nost nastajanja plinskih grešaka zna ajno se pove ava ako je prisutan sumpor jer on tako er smanjuje površinsku napetost taline. Negativan u inak aluminija zna ajno se pove ava ako se u talini nalazi titan. Iz navedenih razloga udio aluminija mora se održavati niskim.

Titan pospješuje nastajanje D tipa grafitnih listi a [1]. Može neutralizirati štetan u inak dušika jer ima visok afinitet prema tom elementu [1]. Kao produkt reakcije nastaju titanovi nitridi (TiN). Ako dušik nije prisutan u suvišku, titan e reagirati i s ugljikom, pri emu nastaju titanovi karbidi (TiC) ili titanovi karbonitridi (Ti(CN)), koji imaju specifi ni kubi ni oblik (slika 13) [1, 8]. Zbog visoke tvrdo e navedeni spojevi mogu pogoršati strojnu obradivost odljevaka.



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

Olovo ve u udjelima od samo 0,0005 % dovodi do izlučivanja Widmannstättenovog grafitu (slika 14a) [1, 13]. U tim slučajevima vlažna vrsta grafitu sivog lijeva opada za ~ 50 %. Zbog prisutnosti olova u sivom lijevu mogu nastati i drugi nepoželjni oblici grafitu, 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, ali ni 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 za 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 udjela na nukleacijski potencijal, odnosno metaluršku kvalitetu taline. Udio u metalnom ulošku može biti različit, od nekoliko postotaka do > 50 %, na što utječu brojni faktori.

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

Povratni materijal unutar ljevaonice uključuje pojava, 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.

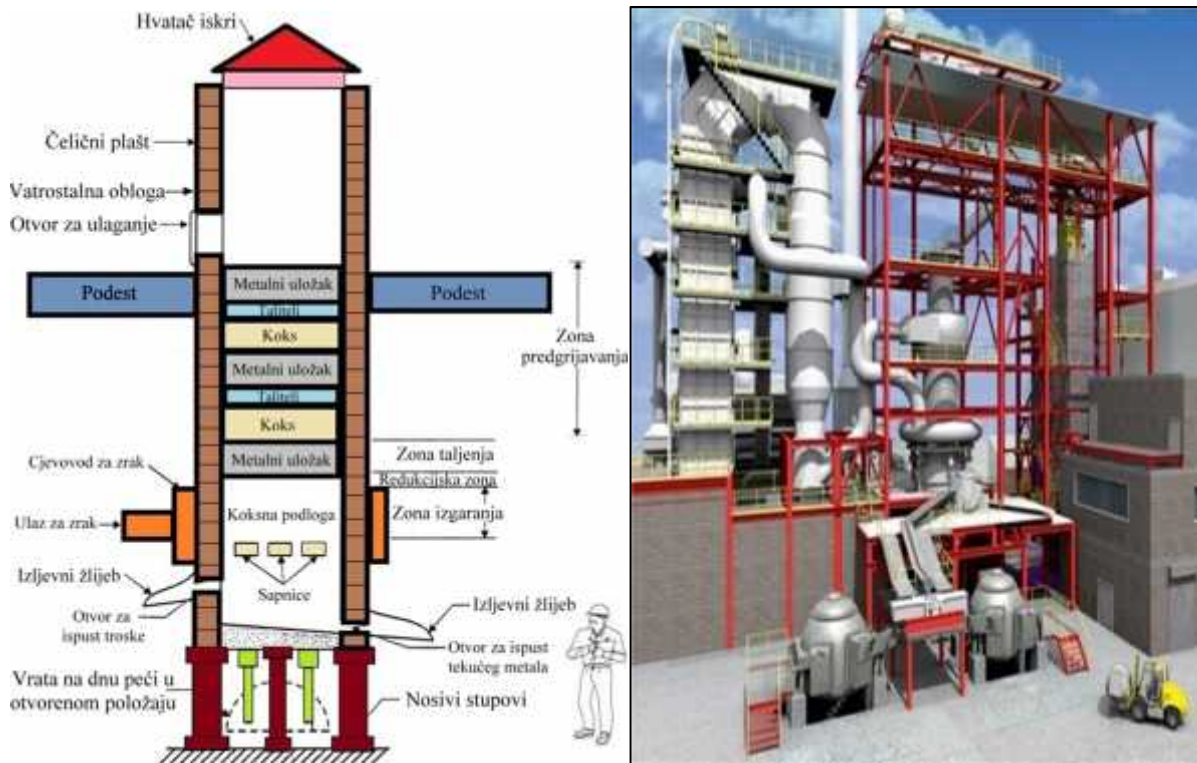
Ljevaoniki koks upotrebljava se kao izvor energije za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala u kupolnoj peći. Iako sadrži visok udio sumpora.

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 neželjene elemente iz taline (npr. sumpor).

5.2 Taljenje

Za proizvodnju taline sivo lijeva naj eš e se upotrebljava kupolna i indukcijska pe i [1, 2].

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



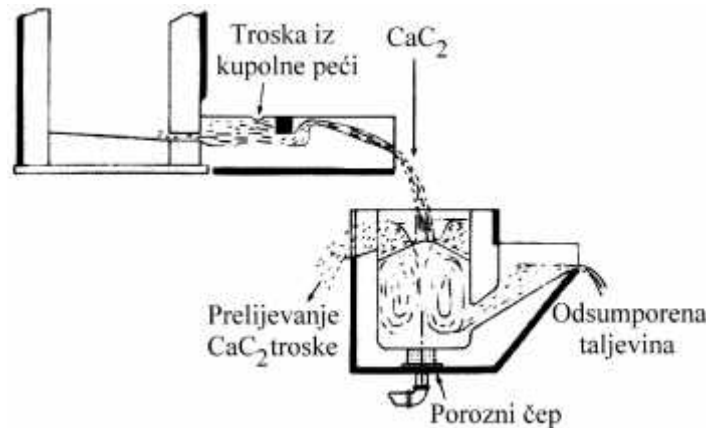
Slika 15. Kupolna pe [14, 15]

Metalni dio uloška ini sivo sirovo željezo, otpadni željezni lijev, eli ni otpad i povratni materijal unutar ljevaonice. Ferolegure se tako er dodaju ako treba nadoknaditi gubitke pojedinih elemenata iz uloška za vrijeme taljenja ili ako njihov unos u pe 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 pe dodaje se i ljevaoni ki koks visoke kvalitete. Izgaranjem koksa dobija se toplina koja je potrebna za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala.

Ulaganje materijala u kupolnu pe odvija se sljede im redoslijedom. Najprije se u pe ubacuje samo koks do odre ene visine, koji se potom zapali prije ulaganja ostalih sirovina i kada se užari naizmjeni no se ulažu ostale sirovine. Kada je pe napunjena, kroz sapnice koje se nalaze u njenom donjem dijelu, u pe se uvodi zrak koji može biti oboga en kisikom. Tada zapo inje izgaranje koksa i taljenje uložnih materijala. Tijekom taljenja materijal u pe i se spušta prema dolje i zagrijava plinovima koji dolaze iz donjeg dijela pe i. Taljenje se odvija neprekidno, što zna i da se pe puni kako se materijal u pe i spušta prema dolje. Teku i metal ispušta se kroz otvor i žlijeb koji se nalaze u donjem dijelu plašta pe i.

Elementi, poput silicija i mangana, u odre enoj mjeri odgaraju u kupolnoj pe i za vrijeme taljenja. Za razliku od tih elemenata, za vrijeme taljenja u kupolnoj pe i dolazi do pove anja udjela ugljika i sumpora.

U slučaju kada talina iz kupolne peći i sadrži previsok udio sumpor, prije lijevanja provodi se odsumporavanje. Kalcij-karbid, vapno i fluorit te natrij karbonat najčešće su korištena sredstva 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 reakcije nastaje kalcij-sulfid (CaS), tj. troska koja pliva na površini taline u loncu.



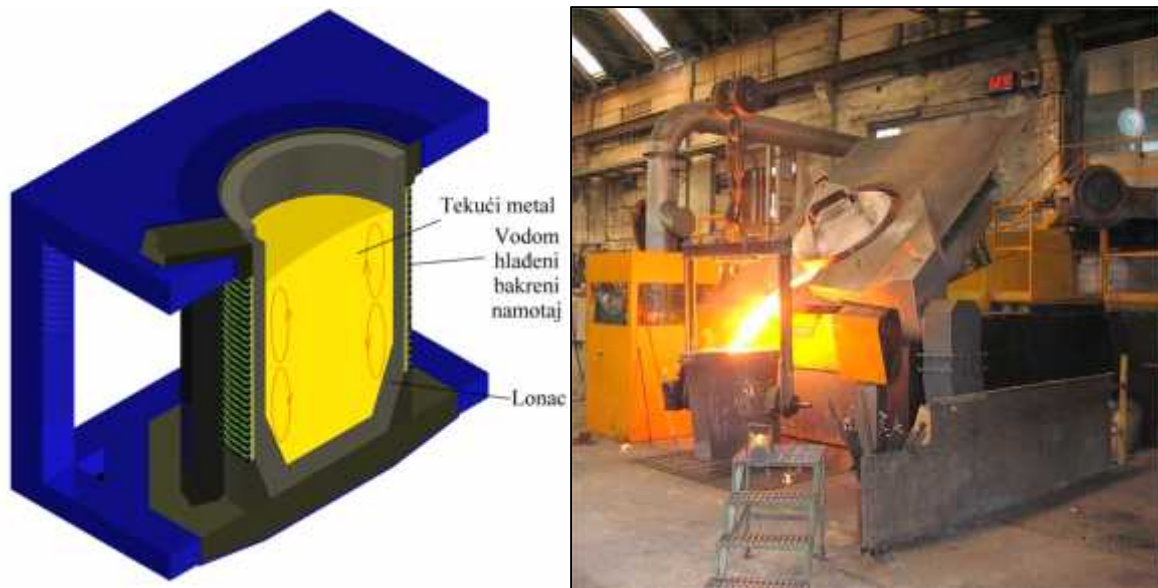
Slika 16. Shematski prikaz odsumporavanja taline iz kupolne peći [1]

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 spuštavanja kroz peć. Vrlo važna karakteristika kupolnih peći je mogućnost uklanjanja pojedinih nepoželjnih elementa iz uložka (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.

Indukcijske peći s loncem danas se sve više upotrebljavaju za proizvodnju taline sivog lijeva, prvenstveno zbog svoje fleksibilnosti 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 uložka, 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 najvažnijih 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 peš 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]. Najznačajniji u inicijaciji cijepljenja su:

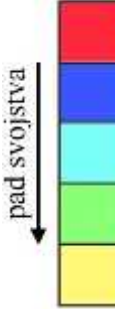
- modificiranje uključaka u talini, što rezultira povećanjem broja pogodnih mjesta za nukleaciju listićavog grafitu,
- smanjenje poroznosti taline,
- smanjenje sklonosti ka nastajanju karbida za vrijeme skrućivanja,
- smanjenje varijacija svojstva između stijenki različitih debljina,
- poboljšanje svojstava.

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: vrsta cjepiva, vrsta cjepiva, metoda dodatka cjepiva, vrijeme zadržavanja taline u loncu prije lijevanja itd. [1]. Kao cjepivo za sivi ljevak 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 sli nodularnom i vermikularnom lijevu. Međutim, sivi lijev bolje prigušuje vibracije, bolje vodi toplinu i lakše se lijeva od navedenih materijala.

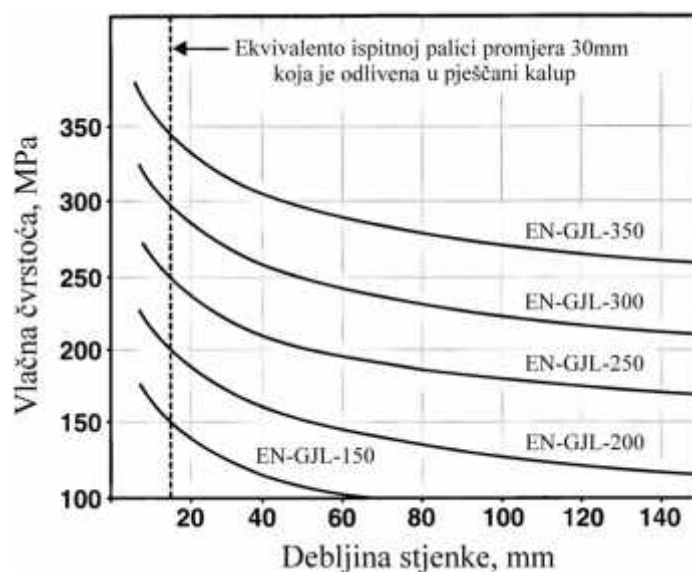
	Sivi lijev	Vermikularni lijev	Nodularni lijev	Čelični lijev (0,3% C)
Vlačna čvrstoća	Green	Cyan	Red	Red
Udarna žilavost	Yellow	Cyan	Blue	Red
Modul elastičnosti	Green	Blue	Red	Red
Prigušenje vibracija	Red	Blue	Cyan	Green
Strojna obradivost	Red	Red	Blue	Cyan
Otpornost na koroziju	Red	Red	Red	Green
Livljivost	Red	Red	Blue	Yellow
Troškovi proizvodnje	Red	Blue	Blue	Yellow



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 debljinu stijenke odljevka. Zbog toga **vlačna čvrstoća** unutar odljevka varira ovisno o debljini stijenke, odnosno brzini hlađenja (slika 19).



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

Tablica 3. Mehani ka svojstva sivog lijeva odre ena na ispitnim uzorcima koji su izra eni strojnom obradom odvojeno lijevanih uzoraka promjera 30 mm u lijevanom stanju (dodatne informacije o mehani kim svojstvima pored onih danih u tablici 1) [19]

Svojstvo	Oznaka	Jedinica	Ozna ivanje 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	
Vla na vrsto a	R_m	N/mm ²	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Granica razvla enja (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
Tla na vrsto a	R_m^c	N/mm ²	600	720	840	960	1080
Granice te enja pod tlakom (0,1%)	$R_{p0,1}^c$	N/mm ²	195	260	325	390	455
Savojna vrsto a	f	N/mm ²	250	290	340	390	490
Smi na vrsto a	s	N/mm ²	170	230	290	345	400
vrsto a na uvijanje	t	N/mm ²	170	230	290	345	400
Modul elasti nosti ²⁾	E	kN/mm ²	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Poissonov broj		-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Dinami ka savojna vrsto a ³⁾	R_{df}	N/mm ²	70	90	120	140	145
vrsto a pri izmjeni nom vlna nom optere enju 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 koli ini i obliku grafita te optere enju.

³⁾ Primjenjuje se slijede a aproksimacija: $R_{df} = 0,35-0,5 \cdot R_m$.

⁴⁾ Primjenjuje se slijede a aproksimacija: $R_d^{-1} = 0,53 \cdot R_{df} = 0,26 \cdot R_m$

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		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	<i>c</i>	J/(kgK)	460				
			535				
Koeficijent linearne ekspanzije; između -100 i +20°C između 20 i 200°C između 20 i 400°C		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		W/(m·K)	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5
			51,0	49,0	47,5	46,0	44,5
			50,0	48,0	46,5	45,0	43,5
			49,0	47,0	45,0	44,0	42,0
			48,5	46,0	44,5	43,0	41,5
Koercitivnost	<i>H₀</i>	A/m	560-720				
Maksimalna permeabilnost	<i>μ</i>	μH/m	220-330				

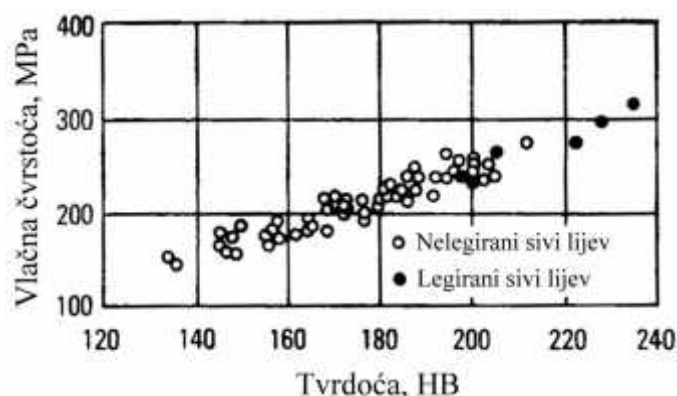
¹⁾ Kada postoje posebni zahtjevi na strojnu obradivost ili magnetska svojstva, primjenjuje se kvaliteta EN-GJL-100. Zahtijevana svojstva mogu se ostvariti toplinskom obradom. Fizikalna svojstva kvaliteta EN-GJL-100 nisu prikazana.

Tlačna vrsto a sivog lijeva je ~ 3 do 4 puta ve a od njegove vla ne vrsto e (tablica 3), što je znatno više nego kod nodularnog i vermikularnog lijeva [1, 8, 9]. Upravo zbog visoke tlačne vrsto e sivi lijev esto se upotrebljava za konstrukcije koje su tlačno optere ene.

Grafitni listi i mjesta su na kojima se lako stvaraju pukotine ve pri niskim naprezanjima. Zbog toga sivi lijev ne pokazuje uobi ajeno elasti no ponašanje.

Modul elasti nosti sivog lijeva pove a se s porastom vla ne vrsto e (tablica 3) [1, 9]. Sivi ljevovi s višim modulom elasti nosti lošije apsorbiraju vibracije od materijala s niskim modulom elasti nosti. Sivi lijev koji ima nizak modul elasti nosti pokazuje dobru otpornost na toplinske šokove [1, 8, 9].

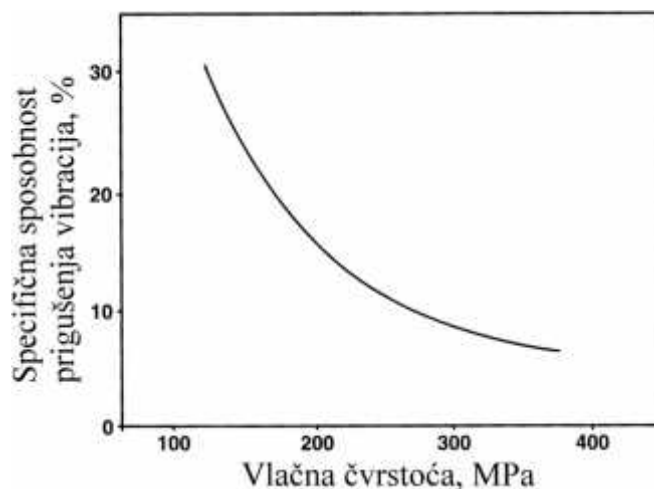
Tvrdo a sivog lijeva pove a se s porastom vla ne vrsto e (slika 20).



Slika 20. Odnos tlačne vrsto e i tvrdo e sivog lijeva [8]

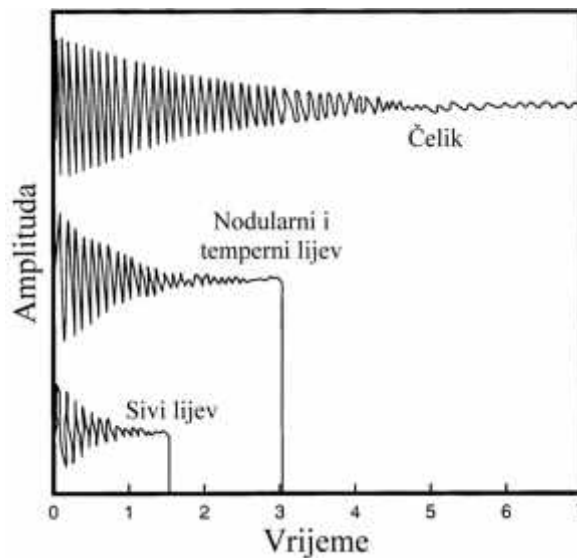
Zbog listavog oblika grafita, sivi lijev ima vrlo nisku **žilavost i istežanje** [1]. Udarni rad loma, kao mjera žilavosti, odre en na epruvetama bez zareza, obi no se kre e od 1,4 do 6,8 J [18]. U tablici 3 može se vidjeti da žilavost sivog lijeva pove a se s rastom tlačne vrsto e, što je suprotno u odnosu na nodularni lijev. Istežanje sivog lijeva u ve ini slu ajeva je od 1% (tablica 3).

Sivi lijev ima vrlo veliku **spособnost prigušenja vibracija** zbog me usobno povezanih grafitnih listi a u metalnoj osnovi [1]. Na slici 21 može se vidjeti kako sposobnost prigušenja vibracija sivog lijeva opada s pove anjem njegove tlačne vrsto e.



Slika 21. Utjecaj tlačne vrsto e na specifi nu sposobnost prigušenja vibracija sivog lijeva [18]

Slika 22 pokazuje da sivi lijev ima znatno ve u sposobnost prigušenja vibracija od nodularnog i tempnog lijeva te elika.



Slika 22. Sposobnost prigušenja vibracija sivo, nodularnog i tempnog lijeva te elika [1]

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

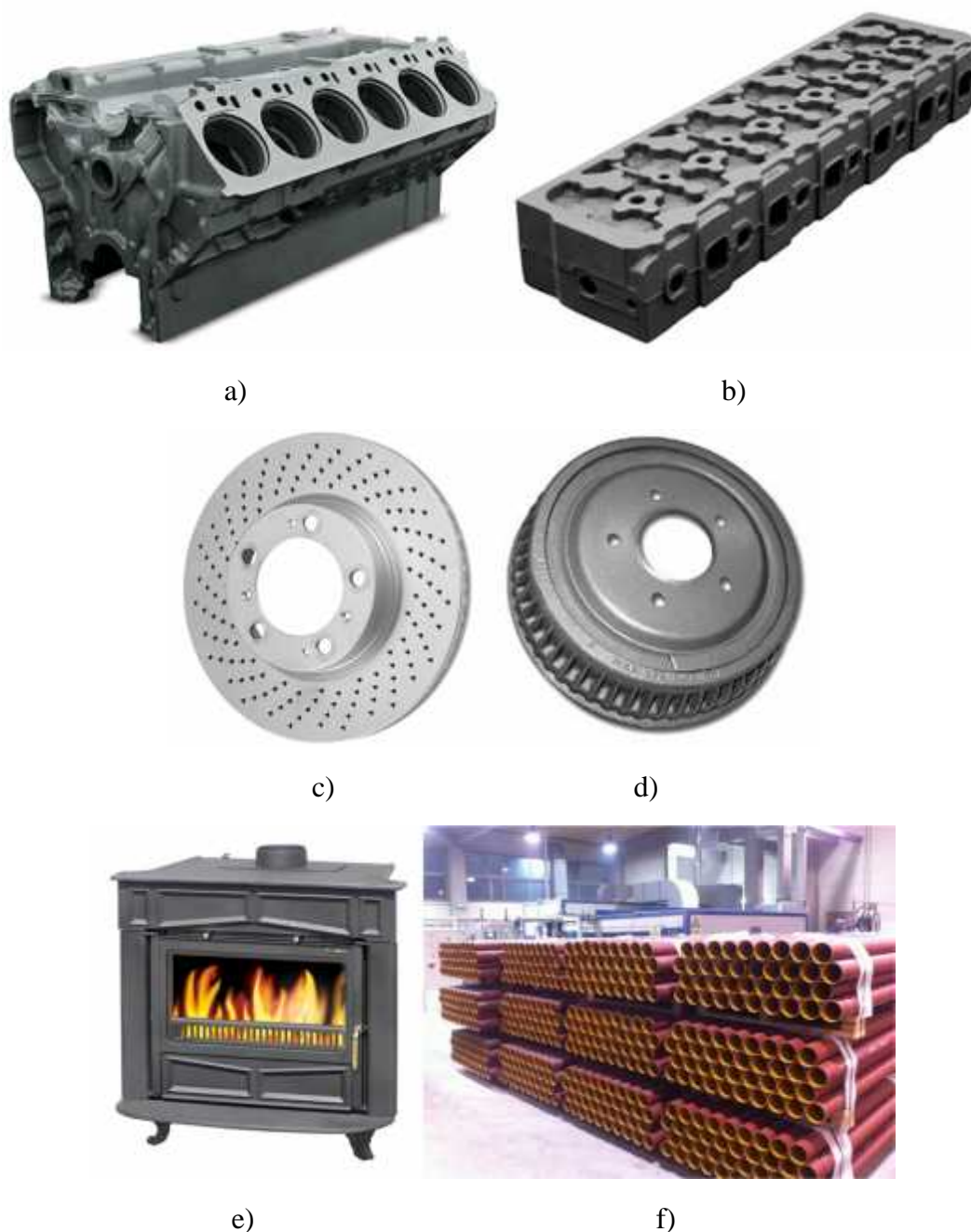
Pove anje udjela grafitnih estica rezultira smanjenjem **gusto e** sivog lijeva. Zbog toga gusto a sivog lijeva raste s pove anjem vla ne vrsto e (tablica 4).

Zbog me usobne povezanosti grafitnih listi a, sivi lijev ima ve u **toplinsku vodljivost** od vermikularnog i nodularnog lijeva [1]. S porastom koli ine, grubosti i dužine grafitnih listi a pove ava se toplinska vodljivost sivog lijeva [8]. Ve ina legirnih elemenata smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva, a najve i u inak ima silicij. Pove anje udjela ferita u metalnoj osnovi rezultira pove anjem toplinske vodljivosti. Iz podataka u tablici 4 može se vidjeti da toplinska vodljivost opada s porastom vla ne vrsto e 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. ko ioni bubnjevi i diskovi, eli anske kokile itd.

Od ostalih svojstva sivog lijeva, treba istaknuti jako dobru **otpornost ka toplinskom umoru**, odnosno naizmjeni nim ciklusima grijanja i hla enja koji mogu dovesti do zna ajnih naprezanja u odljevku i pojave pukotina [1]. Rezultat je to visoke toplinske vodljivosti i niskog modula elasti nosti. Osim toga, sivi ljev ima odli nu **otpornost na trošenje**, posebno na trošenje klizanjem, što je rezultat prisutnosti grafitnih listi a u mikrostrukturi [1, 8, 9]. Još jedna vrlo zna ajna karakteristika sivog lijeva je odli na **strojna obradivost**, jer se nastala strugotina lomi na grafitnim listi ima, 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, koilni diskovi, zamašnjaci, razni zupčanički sklopovi itd.), dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja [1, 2]. Slika 23 prikazuje nekoliko odljevaka od sivog lijeva.



Slika 23. Odljevci od sivog lijeva: a) blok motora, b) glava motora, c) koilni disk, d) koilni 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, veću vrstovinu, istežanje, žilavost, modul elastičnosti i tvrdoću od ostalih ljevova te ostalih željeznih ljevova koji u strukturi sadrže grafitne estice, 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, tlaćna vrstovina, tribološka svojstva i otpornost na koroziju te niski troškovi proizvodnje.

Svojstva sivog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukturi, tj. o tipu, veličini i raspodjeli 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 korišten materijal za proizvodnju metalnih odljevaka.

9. LITERATURA

- [1] Z. Glavaš, F. Unki , Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveu ilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [2] Z. Glavaš, Osnove lijevanje metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveu ilište 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 lijevovi, 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