

# 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/um:nbn:hr:115:809433>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-10**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Mato Dundjer

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2018.

SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Mato Dundjer

**SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA SIVOG LIJEVA**

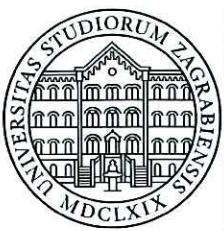
**ZAVRŠNI RAD**

Voditelj: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Izatori Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

izv.prof.dr.sc. Stjepan Kožuh - predsjednik  
prof.dr.sc. Zoran Glavaš - lan  
doc.dr.sc. Martina Lovreni - Jugovi - lan  
doc.dr.sc. Ivan Jandrli – zamjenski lan

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 LIJAVA

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 utječe na njegova vla na svojstva. Međutim, zbog takvog oblika grafitnih estica 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 je odljevci od sivog lijeva.

Ovaj pregledni rad prikazuje klasifikaciju, skruivanje, 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

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b>  | 1  |
| <b>2. KLASIFIKACIJA SIVOГ LIJEVA</b>  | 2  |
| <b>3. SKRU IVANJE SIVOГ LIJEVA I PRETVORBE U KRUTOM STANJU</b>                | 4  |
| 3.1 Tijek skru ivanja   | 4  |
| 3.2 Tipovi grafitnih listi a  | 6  |
| 3.3 Pretvorbe u krutom stanju   | 9  |
| <b>4. UTJECAJ KEMIJSKOG SASTAVA NA MIKROSTRUKTURU I SVOJSTVA SIVOГ LIJEVA</b> | 11 |
| 4.1 Utjecaj stalnih elemenata   | 11 |
| 4.2 Utjecaj legirnih elemenata  | 14 |
| 4.3 Utjecaj prate ih elemenata  | 15 |
| <b>5. PROIZVODNJA TALINE SIVOГ LIJEVA</b>                                     | 17 |
| 5.1 Uložni materijali   | 17 |
| 5.2 Taljenje  | 18 |
| 5.3 Cijepljenje   | 20 |
| <b>6. SVOJSTVA SIVOГ LIJEVA</b>   | 21 |
| <b>7. PRIMJENA SIVOГ LIJEVA</b>   | 26 |
| <b>8. ZAKLJU AK</b>   | 27 |
| <b>9. LITERATURA</b>  | 28 |
| <b>ŽIVOTOPIS</b>  | 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 ljeva iznosila je 46,7 mil.t [3]. Gledano u postotcima, sivi lijev u 2015. godini inio je 55,6 % proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova, tj. 44,9 % ukupne svjetske proizvodnje odljevaka. Glavni razlozi velike upotrebe sivog ljeva su jeftina i jednostavna proizvodnja, jako dobra livljivost te povoljna kombinacija svojstava za mnoga područja primjene.

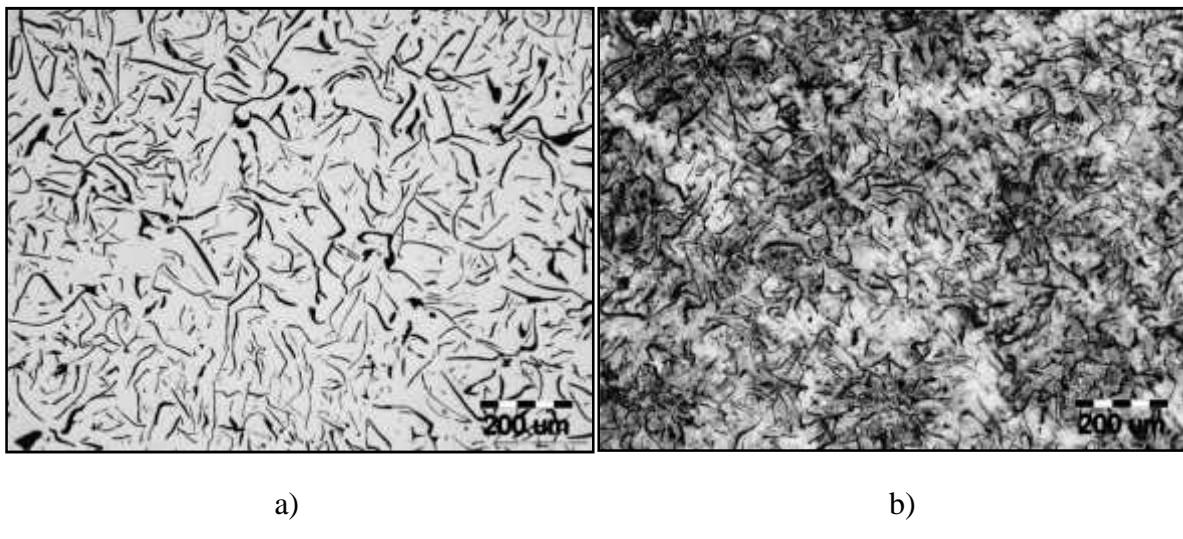
U sivom lijevu ugljik je izlučen u obliku međusobno povezanih grafitnih estica listi avoga oblika koje okružuje metalna osnova. Naziv ovog materijala dolazi od sive boje koja se može uočiti na prijelomoj površini. Listi avog oblik grafitnih estica u sivom lijevu imaju velik utjecaj na njegova mehanička svojstava. Sivi lijev ima nisku granicu razvlačenja, vlastitu vrsto istezanja, modul elastičnosti, tvrdo u 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 povoljniju tlučnu vrsto.

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

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

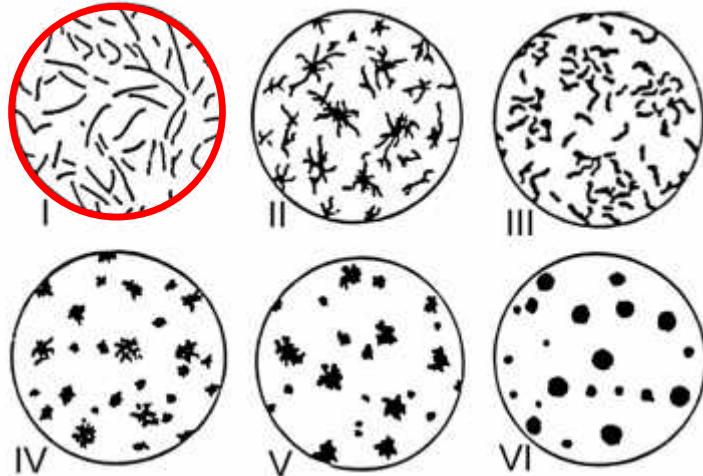
## 2. KLASIFIKACIJA SIVOG LIJEVA

Tipi na mikrostruktura sivog lijeva prikazana je na slici 1.



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 ozna uje 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.

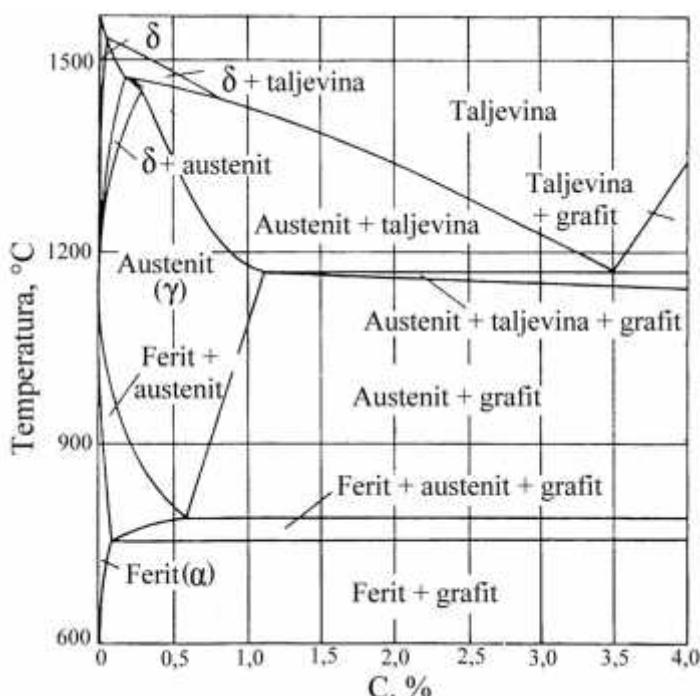
Norma HRN EN 1561:2011 propisuje nekoliko kvaliteta sivog lijeva ovisno o minimalnoj vrijednosti vlastite vrste (tablica 1) [6].

Tablica 1. Vla na svojstva sivog lijeva odre ena na normom propisanim ispitnim uzorcima koji su izra eni strojnom obradom iz odlivenih uzoraka (prema HRN EN 1561:2011) [6]

| Ozna ivanje materijala |        | Debljina relevantne stijenke<br>$t$ |         | Vla na vrsto a<br>$R_m$ ,<br>propisane vrijednosti<br>u lijevanom<br>uzorku,<br>$N/mm^2$ ,<br>min. |
|------------------------|--------|-------------------------------------|---------|--|
| Oznaka<br>HRN          | Broj   | >,<br>mm                            | ,<br>mm |  |
| EN-GJL-100             | 5.1100 | 5                                   | 40      | <b>100</b>   |
| EN-GJL-150             | 5.1200 | 2,5                                 | 50      | <b>150</b>   |
|                        |        | 50                                  | 100     | 130  |
|                        |        | 100                                 | 200     | 110  |
| EN-GJL-200             | 5.1300 | 2,5                                 | 50      | <b>200</b>   |
|                        |        | 50                                  | 100     | 180  |
|                        |        | 100                                 | 200     | 160  |
| EN-GJL-250             | 5.1301 | 5                                   | 50      | <b>250</b>   |
|                        |        | 50                                  | 100     | 220  |
|                        |        | 100                                 | 200     | 200  |
| EN-GJL-300             | 5.1302 | 10                                  | 50      | <b>300</b>   |
|                        |        | 50                                  | 100     | 260  |
|                        |        | 100                                 | 200     | 240  |
| EN-GJL-350             | 5.1303 | 10                                  | 50      | <b>350</b>   |
|                        |        | 50                                  | 100     | 310  |
|                        |        | 100                                 | 200     | 280  |

### 3. SKRU IVANJE SIVOG LIJAVA 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  $1154^{\circ}\text{C}$ . 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).

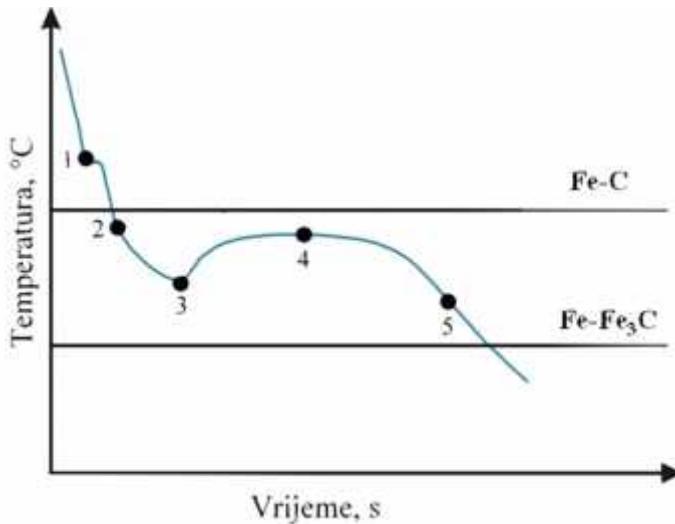


Slika 3. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5 %Si [1]

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 pravojenjem 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 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 hla enja podeutekti nog sivog lijeva [1]

Nakon što se talina sivog lijeva ulije u kalup, sve dok se ne dostigne likvidus temperatura ( $T_L$ ) ona se kontinuirano hlađi (to ka 1, slika 4). U toj točci započinje izlučivanje primarnog austenita, koji raste u obliku dendrita s dalnjim padom temperature. Sve se više izlučuje primarnog austenita između točki 1 i 2, što znači da se smanjuje količina taline. Samo odredeni 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.

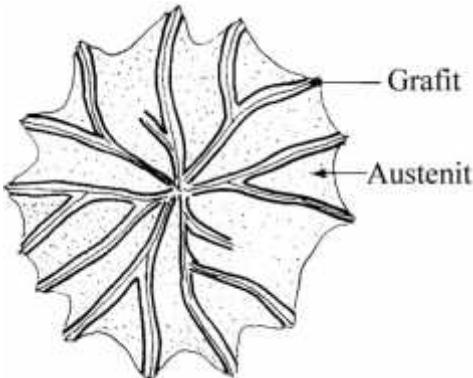
Eutekti na reakciju započinje u točci 2, koja predstavlja temperaturu početka eutekti nog skručivanja ( $T_{ES}$ ). Dvije krute faze – jedna je eutekti ni austenit, a druga listi avog grafit nastaju iz preostale taline. Umjesto listi avog grafita mogu nastati karbidi, koji štetno utječu na svojstva sivog lijeva. Zbog toga moramo spriječiti stvaranje karbida tijekom skručivanja. Karbidi nastaju ako u talini nema dovoljno pogodnih uključaka, odnosno pogodnih mesta za nukleaciju grafita (što upravo učešće na lošu nukleacijski potencijal taline), ako se skručivanje odvija brzo te ako je previsok udio karbidotvornih elemenata.

Eutekti na reakciju ne odvija se intenzivno na temperaturi ( $T_{ES}$ ). Razlog za to je nedovoljan broj pogodnih uključaka u talini na kojima se može odvijati nukleacija listi avog grafita. Tijekom daljnog pada temperature (područje između točki 2 i 3 na krivulji hla enja, slika 4), talina se pothlačuje, što daje pokretačku silu za nukleaciju, odnosno izlučivanje grafita. Što je veći nukleacijski potencijal taline, tj. što je veći broj pogodnih uključaka u talini za nukleaciju listi avog grafita, potrebno je manje pothlačenje za intenzivno izlučivanje grafita.

Na temperaturi eutekti nog pothlačenja ( $T_{EP}$ ) (točka 3 na krivulji hla enja) ostvarena je dovoljna pokretna sila za intenzivnu nukleaciju listi avog grafita, odnosno intenzivno odvijanje eutekti ne reakcije. Mesta za nukleaciju grafita su različiti uključaci u talini. Zbog intenzivnog odvijanja eutekti ne reakcije dolazi do povećanja temperature (područje između točki 3 i 4 na krivulji hla enja, slika 4) – toplina oslobođena tijekom izlučivanja austenita i listi avog grafita je viša od topline koja se odvodi kroz kalup u okoliš. Naziv ove pojave je rekalescencija. Maksimalna temperatura tijekom eutekti nog skručivanja naziva se temperatura eutekti ne rekalescencije ( $T_{ER}$ ) (točka 4 na krivulji hla enja).

Rast listi avog grafita i eutekti nog austenita odvija se slijedom brzinom, pa se u tom slučaju radi o povezanom eutekti nom rastu. Rast se odvija u obliku velikog broja eutekti nih elija austenit-grafit (slika 5) koje su međusobno razdvojene talinom, te je svaka eutekti na eliju rezultat posebnog nukleacijskog događaja. Eutekti ne elije, tijekom skručivanja,

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 grafta, a koli ina taline se smanjuje. Smanjenje koli ina taline s vremenom rezultira opadanjem koli ina izlu enog austenita i grafta. 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 grafta. Skru ivanje završava na solidus temperaturi ( $T_S$ ). Mikrostruktura sivog lijeva koja je nastala sastoji se od grafitnih listi a i austenitne metalne osnove.

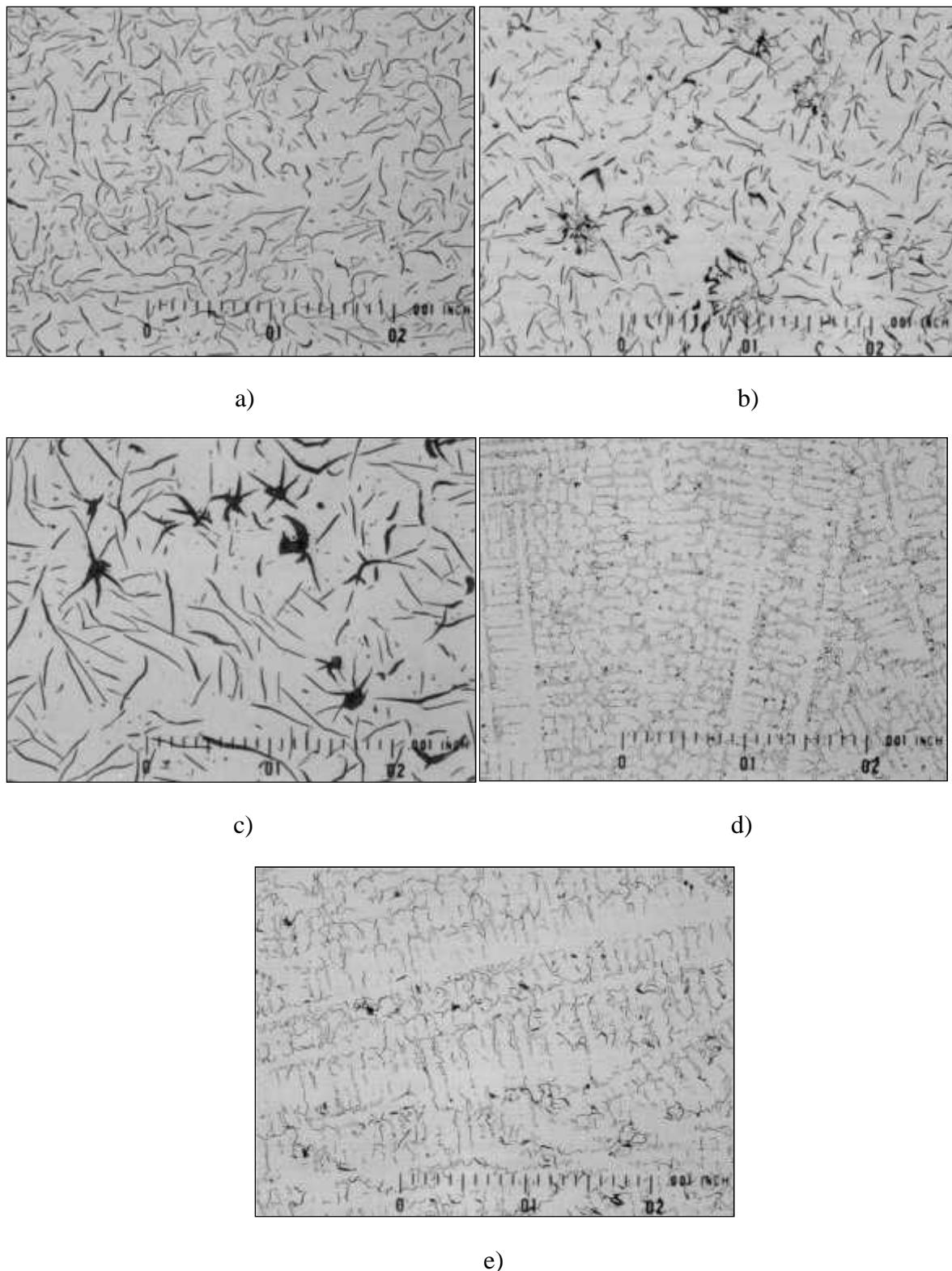
Hla enje odljevka od solidus do sobne temperature ne utje e na oblik, broj i raspodjelu grafitnih estica koje su nastale za vrijeme skru ivanja [1]. Me utim, odvijaju se pretvorbe u metalnoj osnovi.

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 grafta.

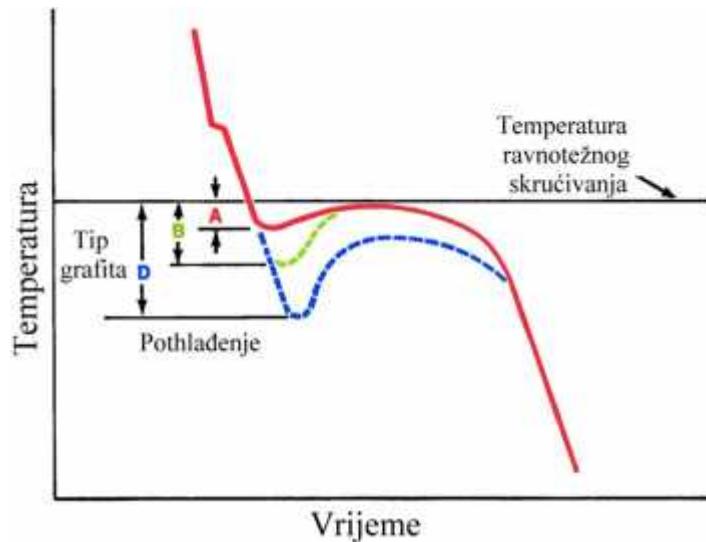
### 3.2 Tipovi grafitnih listi a

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 ion diskovi i bubenjevi u motornim vozilima.



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 hla enja sivog lijeva koji sadrži A, B ili D tip grafitnih listi a u mikrostrukturi [1]

**B tip grafitnih listi a** (slike 6b i 7) nastaje kod nešto većih brzina hla enja, nižeg nukleacijskog potencijala taline i većeg pothla enja. Sitni fini listi avu grafit (slika 6b) izlju uje se u centru rozeta koje nastaju na početku eutektičnog skrućivanja. Rast A tipa grafitnih listi a naknadno se odvija i nalaze se po rubu rozeta (slika 6b). Sitni grafit se izlju uje zbog većeg pothla enja taline, a ono je rezultat nedovoljnog broja mesta za heterogenu nukleaciju grafitnih estica i upu uje na nedovoljno cijepljenje taline. Ako promatramo dva odljevka od sivog lijeva istih kemijskih sastava s istom debljinom stjenke, odljevak koji sadrži A tip grafitnih listi a u mikrostrukturi imati će u vlastitu vrsto u odnosu na odljevka s B tipom grafitnih listi a.

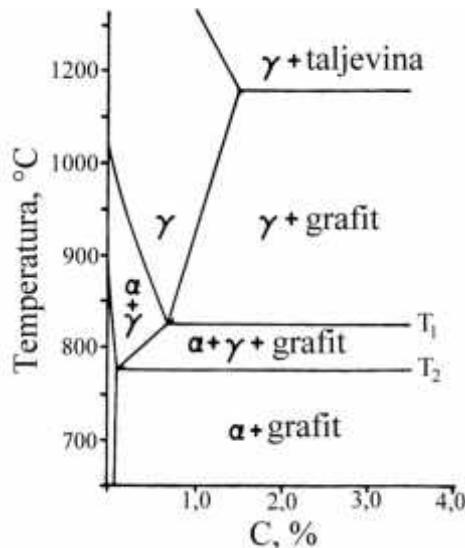
U nadeutektičnim sivim ljevovima, narođito kada imaju visok udio ugljika, pojavljuje se **tip C grafitnih listi a** (slika 6c). Radi se o velikim i debelim listiima, što ukazuje da se radi o nadeutektičnom sastavu. Taj tip grafitnih listi a u velikoj mjeri smanjuje vlastitu tvrdinu i odljevka od sivog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

Ako je pothla enje taline visoko (slika 7), dolazi do izljuvanja **D i E tipa grafitnih listi a** (slike 6d i 6e). Ti grafitni listi su vrlo sitni, brojni i razgranati te se nalaze u području između dendrita. D tip grafitnih listi a ima nasumičnu orientaciju, a tip E ima usmjerenu orientaciju s obzirom na smjer primarnih dendrita i odvođenje topline. Metalna osnova sivog lijeva koji sadrži te tipove grafitnih listi a esto sadrži visok udio ferita. Vlastita tvrdost odljevaka zbog toga se znatno smanjuje, ali se poboljšava njihova strojna obradivost.

### 3.3 Pretvorbe u krutom stanju

Tijek skru ivanja i pretvorbe u krutom stanju, odnosno eutektoidna pretvorba određuje izgled mikrostrukture sivog lijeva. Grafitni listi i formiraju se tijekom skru ivanja, dok se kona na struktura metalne osnove formira nakon skru ivanja. Najčešće se metalna osnova sastoji od perlita ( $\alpha + Fe_3C$ ) i ferita ( $\gamma$ ) [1].

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



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

Kada završi skru ivanje odljevka od sivog lijeva, njegova mikrostruktura na solidus temperaturi sastoji se od austenita i grafitnih listi a [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 listi e. Sporim hlačem produžuje se vrijeme za difuziju ugljiku. Zbog toga se pri sporom hlačem oko grafitnih listi a formiraju austenitnitna područja s niskim udjelom ugljika. Takav austenit se tijekom daljnog hlačenja 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 hlačem ispod temperature  $T_1$ . Ispod temperature  $T_2$  nema znatnih promjena u mikrostrukturi sivog lijeva. Prema tome, ako se odljevak od sivog lijeva odgovarajući kemijskog sastava sporo hlači, može se postići i popotpuna feritna metalna osnova. Odljevci od sivog lijeva koji imaju debele stijenke sporo se hlađe, zbog čega imaju znatno veći udio ferita u metalnoj osnovi od odljevaka koji imaju tanke stijenke.

Ako se odljevak brže hlači, u tom slučaju ne će biti dovoljno vremena na raspolaganju za difuziju ugljika iz austenita na listi e i grafta. U tom slučaju udio ugljika u austenitu neće 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, antimон itd. promoviraju stvaranje perlita.

Udio ferita i perlita u metalnoj osnovi sivog lijeva ne ovisi samo o kemijskom sastavu i brzini hla enja poslije skru ivanja, ve i o udjelu i tipu grafitnih listi a. Kad sivi lijev sadrži A tip grafitnih listi a, metalna osnova u ve ini slu ajeva sadrži vrlo visok udio perlita. S druge strane, sitni i brojni grafitni listi i D tipa esto dovode do visokog udjela ferita u metalnoj osnovi. Što su grafitni listi i sitniji i što je ve i njihov broj to su kra i putovi difuzije atoma ugljika iz austenita, odnosno pove ava se broj mjesta koja mogu prihvati atomi ugljika iz austenita.

U sivom lijevu metalna osnova nema kontinuitet jer su grafitni listi i me usobno povezani. Oni djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi. Zbog toga sivi lijev iako ima visok udio perlita u metalnoj osnovi nema visoku vla nu vrsto u. Uzimaju i sve navedeno u obzir, razli ita svojstva sivog lijeva mogu se posti i 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 estica 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 estica, 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 izbjegavati. U tablici 2 navedeni su preporučeni udjeli ugljika za različite kvalitete sivog lijeva.

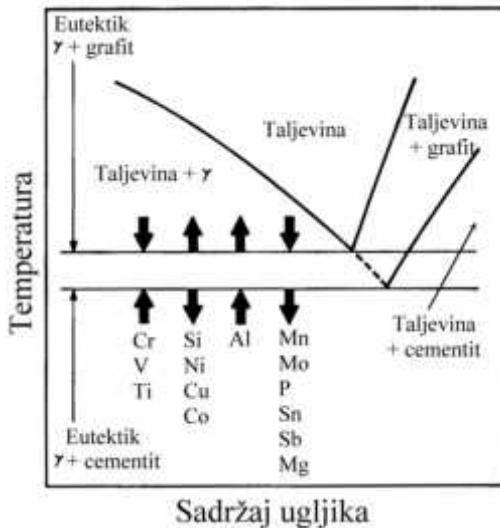
Tablica 2. Preporučeni udjeli stalnih elemenata u kemijskom sastavu kvaliteta sivog lijeva prema HRN EN 1561:2011 [10]

| 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 vlastita tvrdina, jer se povećava mogućnost nastajanja dužih listova grafita [11]. Poboljšanje livljivosti taline i smanjenje sklonosti ka volumnom sticanju i stvaranju usahlina pozitivni su učinci povećanja udjela ugljika.

**Silicij** promovira stvaranje grafita, tj. otežava stvaranje karbida [1, 2]. Poput ostalih grafitizatora, podiže temperaturu skretanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skretanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (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 je da previsok udio silicija nepovoljno utječe na vlastitu tvrdinu sivog lijeva.



Slika 9. Utjecaj elemenata na temperaturu skru ivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog ( $\gamma + \text{cementit}$ ) eutektika [1]

Utjecaj ugljika, silicija (i fosfora) na skru ivanje 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 izra unati pomo u nekoliko formula, a naj eš e se upotrebljava sljede a [1]:

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

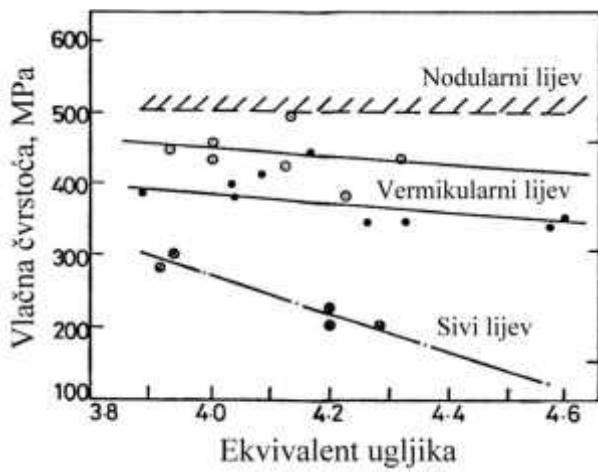
Ako je  $CE = 4,3$  radi se o sivom lijevu eutekti nog sastava. Ukoliko je  $CE < 4,3$  radi se o podeutekti nom sastavu. U tom slu aju austenit je prva faza koja nastaje tijekom skru ivanja. U slu aju kada je  $CE > 4,3$  sivi lijev ima nadeutekti ni sastav. U tom slu aju primarni grafit je prva faza koja se izlu uje iz taline tijekom skru ivanja.

Stupanj zasi enja odre uje se prema slijede oj formuli [1]:

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

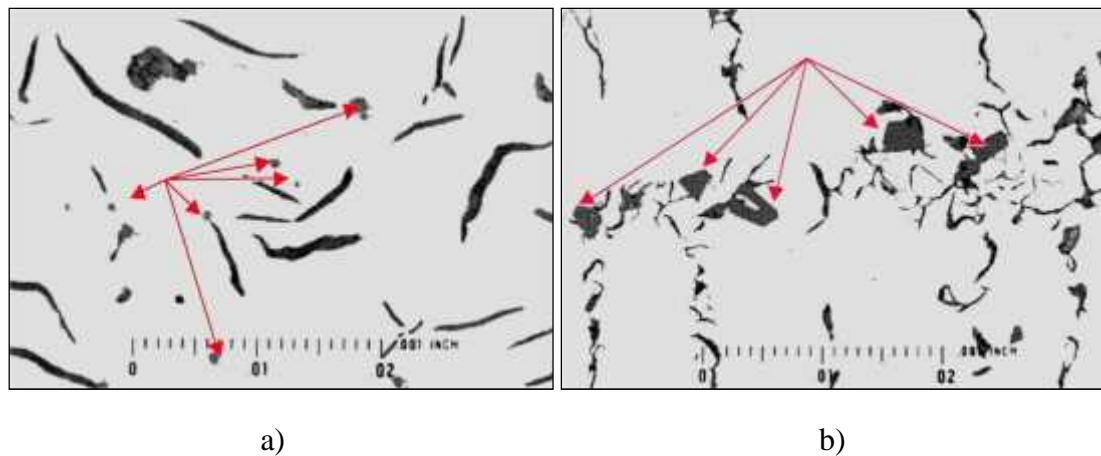
Ako je  $S_c = 1$  radi se eutekti nom sastavu. Sivi lijev ima podeutekti ni sastav ako je  $S_c < 1$ . Ukoliko je  $S_c > 1$ , to ukazuje na nadeutekti ni sastav.

Likvidus temperatura se snižava i postiže se bolja livljivost s pove anjem ekvivalenta ugljika. Me utim, treba uzeti u obzir da pove anje ekvivalenta ugljika negativno utje e na vla nu vrsto u sivog lijeva i da je taj efekt znatno izraženiji nego kod vermkularnog i nodularnog lijeva (slika 10). Zbog toga u ve ini slu ajeva sivi lijev ima podeutekti ni 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 uključujući koji imaju važnu ulogu u procesu nukleacije listi avog grafita [1, 2, 9, 12]. MnS uključujući nasumično su distribuirani u metalnoj osnovi i male su veličine (slika 11a). Do njihovog okrupnjavanja dolazi ako se hlađenje odljevke sporo (slika 11b).



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

Mangan sprjećava 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]:

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

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

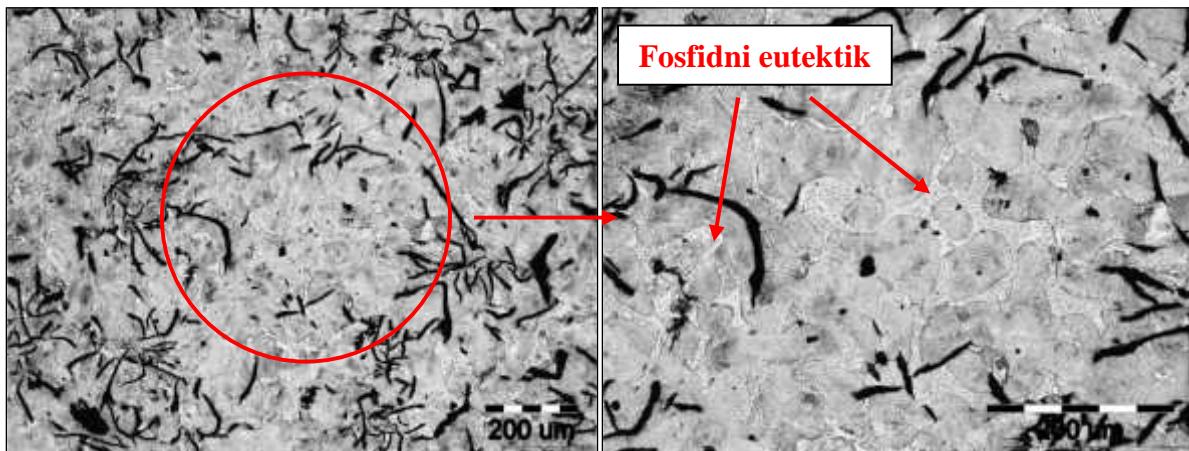
Međutim, u relanim uvjetima, reakcija  $Mn + FeS \rightarrow Fe + MnS$  je reverzibilna, što znači da mora postojati odredeni višak mangana da se reakcija odvija u desno [1, 2, 9]:

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

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

Za nukleaciju i rast listi avoga grafita vrlo je značajan **sumpor**, jer MnS uključi koji nastaju kao produkti reakcije s mangansom služe kao moguća mesta za nukleaciju listi avoga 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 steudit, tj. fosfidni eutektik (slika 12), ija temperatura taljenja je niska i iznosi  $\sim 950^{\circ}C$  [1]. Za vrijeme skrućivanja izlaza se po granicama eutektičnih elija, što negativno utječe na vrstotu u 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 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 vlastitosti 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 znatnjim porastom vla ne vrsto e i tvrdo e sivog lijeva [1, 9].

esto se koristi umjesto molibdена 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 **molibdена** 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 stijenki odljevka [1, 9]. Pri dodatku molibdена treba uzeti u obzir da je on karbidotvorni element, ali znatno slabiji od kroma.

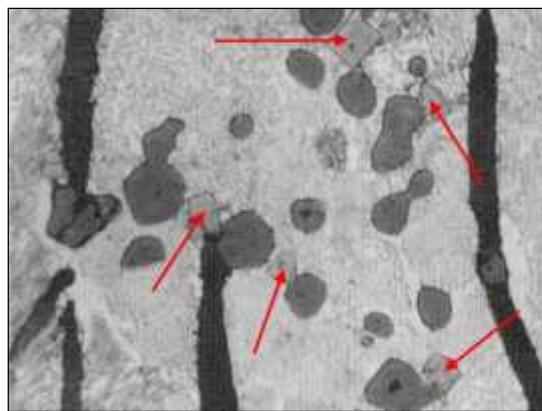
**Bakar** promovira stvaranje grafita i perlita [1]. Budu i da pove ava udio perlita u metalnoj osnovi, dodatkom bakra pove ava se vla na vrsto a, granica razvla enja i tvrdo a sivog lijeva.

**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 perlitzator, a antimon je još ~ 2 – 4 puta efikasniji od kositra [1]. Dodatk 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

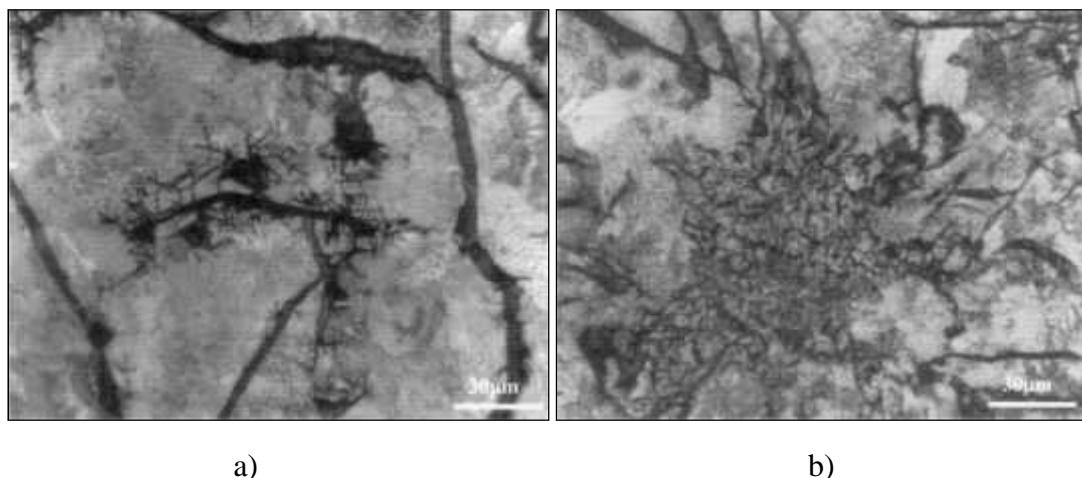
**Aluminij** je grafitizator i feritizator. esto je prisutan u malim koli inama u cjepivima za sivi lijev radi pove anja nukleacijskog potencijala taline. Previsoki udjeli aluminija pove avaju opasnost od plinskih grešaka u odljevcima, jer snižava površinsku napetost taline [1]. Mogu nost nastajanja 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 rekacije 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** već u udjelima od samo 0,0005 % dovodi do izlučivanja Widmannstättenovog grafita (slika 14a) [1, 13]. U tim slučajevima vlastivina vrsto a 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).



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 odgovaraju im pe ima 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 utje u na metaluršku kvalitetu taline.

### 5.1 Uložni materijali

Sivo sirovo željezo, eli 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 na nauglji enje, ferolegure i talitelji, što ovisi o potrebi za pojedinim elementima te vrsti pe i u kojoj se provodi taljenje.

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

**Eli ni otpad** je manje pogodna, ali ekonomski povoljnija sirovina od sivog sirovog željeza. esto sadrži dosta visok udio karbidotvornih elemenata, što je nepovoljno. Previsoki udjeli eli nog otpada u metalnom ulošku imaju niz negativnih u inaka: pove ava se potrošnja energije za taljenje, produžuje se vrijeme taljenja, pove ava se dodatak sredstava za nauglji enje, te smanjuje se metalurška kvaliteta taline.

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

**Sredstva za nauglji enje** dodaju se radi pove anja udjela ugljika u talini. U tu svrhu naj eš e se upotrebljava petrol koks. Vrlo je važno obratiti pažnju na udio sumpora u sredstvu za nauglji enje.

**Ferolegure** se dodaju radi pove anja udjela pojedinih elemenata u talini. Naj eš e 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 obi no iznosi ~ 1 % u odnosu na masu metalnog uloška.

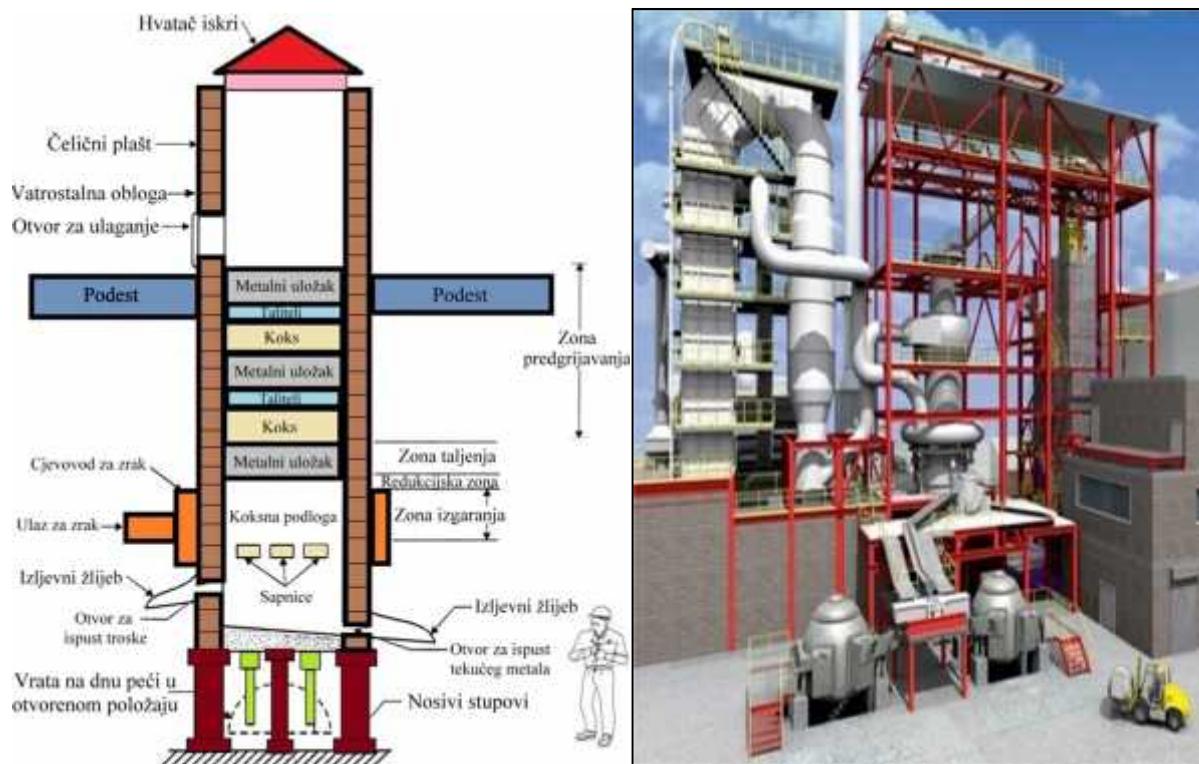
**Ljevaoni ki koks** upotrebljava se kao izvor energije za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala u kopolnoj pe i. esto sadrži visok udio sumpora.

**Talitelji** tj. vapnenac ili dolomit dodaju se u kopolnu pe kako bi se formirala troska odgovaraju eg kemijskog sastava koja djeluje kao rafinacijsko sredstvo, tj. veže razne ne isto e kao i odre ene elemente iz taline (npr. sumpor).

## 5.2 Taljenje

Za proizvodnju taline sivog lijeva najčešće se upotrebljava kopolna i induksijska peć [1, 2].

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



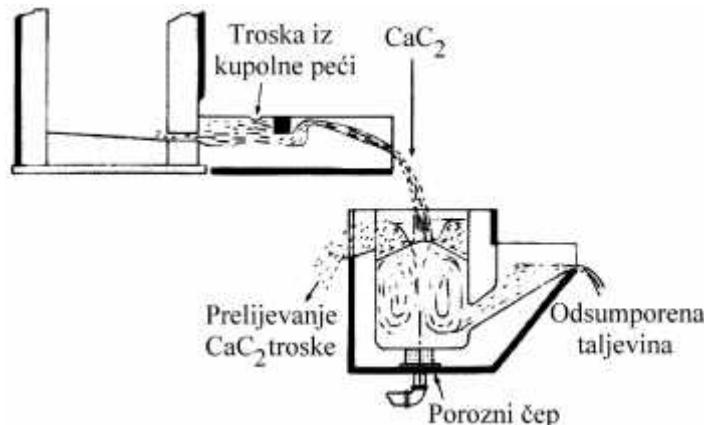
Slika 15. Kopolna peć [14, 15]

Metalni dio uloška ini sivo sirovo željezo, otpadni željezni lijevi, eli ni otpad i povratni materijal unutar ljevaonice. Ferolegure se takođe dodaju ako treba nadoknaditi gubitke pojedinih elemenata iz uloška za vrijeme taljenja ili ako njihov unos u peć putem metalnog uloška nije bio dostanan. Troska se formira dodatakom vapnenca ili dolomita. Za poboljšanje viskoznosti troske dodaje se fluorit ( $\text{CaF}_2$ ). Osim navedenih komponenti, u kopolnu peć 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 kopolnu 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 naizmjeni no 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 plasti peći.

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

U slučaju kada talina iz kupolne peći sadrži previšok udio sumpora, prije lijevanja provodi se odsumporavanje. Kalcij-karbidi, 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 reakcije nastaje kalcij-sulfid ( $\text{CaS}$ ), tj. troska koja pliva na površini taline u loncu.



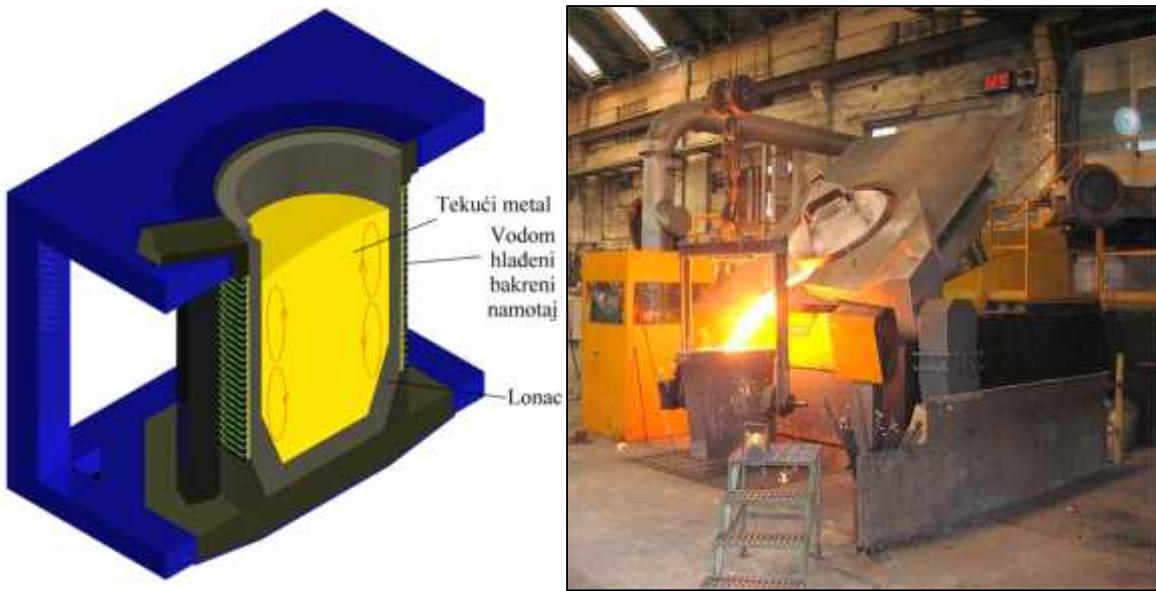
Slika 16. Shematski prikaz odsumporavanja taline iz kupolne peći [1]

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 peća je mogućnost uklanjanja pojedinih nepoželjnih elemenata iz uloška (npr. sumpor, cink, oovo), koji prelaze u trosku ili ih odnose peći ni plinovi izvan peći. Talina iz kupolne peći ima jako dobru metaluršku kvalitetu, tj. visok nuklearcijski 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, induksijske 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 zanemarivo), 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 induksijskim pećima ne koristi se koks kao izvor energije za taljenje, što omogućuje proizvodnju sivog lijeva s nižim udjelom sumpora.

Međutim, induksijske 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 peščoncem [16, 17]

### 5.3 Cijepljenje

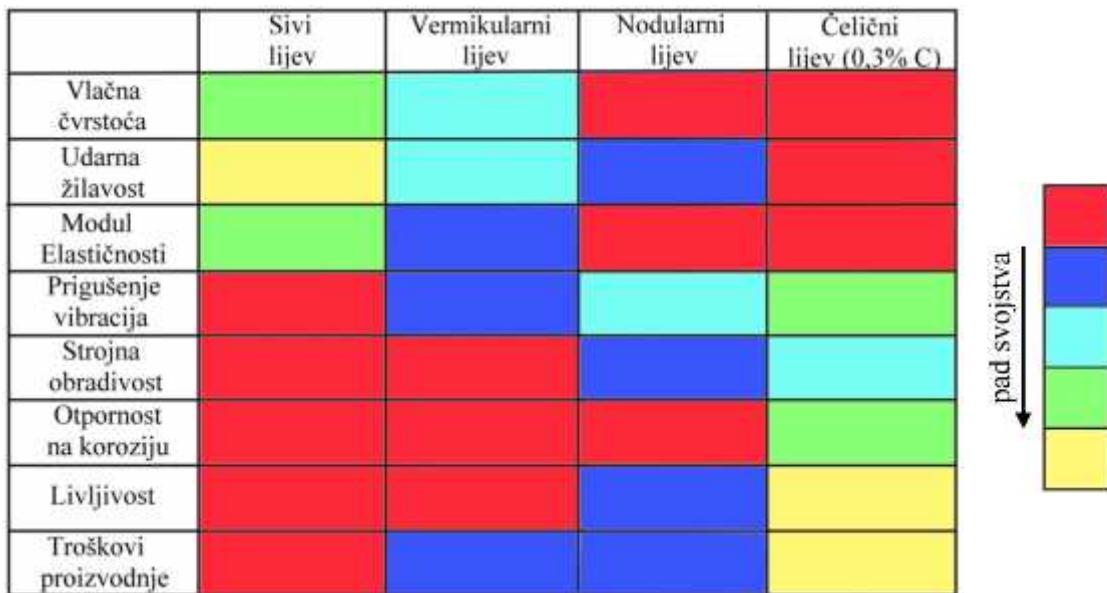
Cijepljenje je vrlo važan korak u proizvodnji kvalitetnih odljevaka od sivog lijeva, jer utječe na njegovu mikrostrukturu, a time i na svojstva [1, 8, 9]. Njegova uloga u procesu cijepljenja su:

- modificiranje uključujući u talini, što rezultira povećanjem broja pogodnih mjesto za nuklearaciju listići avog grafita,
- smanjenje pothlačenja taline,
- smanjenje sklonosti ka nastajanju karbida za vrijeme skraćivanja,
- smanjenje varijacija svojstva između stijenki različitih debeljina,
- 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 inkazija 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 nuklearacijskog potencijala taline [1].

## 6. SVOJSTVA SIVOG LIJEVA

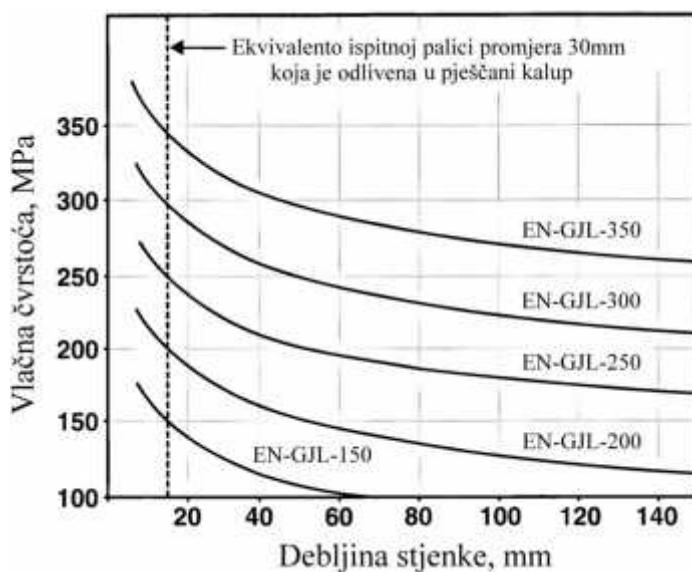
Usporedba svojstava sivog vermicularnog i nodularnog lijeva prikazana je na slici 18. Može se vidjeti da po pitanju vlačne vrstoće, žilavosti i modula elastičnosti sivi lijev ne može konkurirati s nodularnom i vermicularnom lijevu. Međutim, sivi lijev bolje prigušuje vibracije, bolje vodi toplinu i lakše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



Slika 18. Usporedba svojstava sivog, vermicularnog, 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 vrstoća** unutar odljevka varira ovisno o debljini stijenke, odnosno brzini hlađenja (slika 19).



Slika 19. Ovisnost vlačne vrstoće 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 (dodatane informacije o mehaničkim svojstvima pored onih danih u tablici 1) [19]

| Svojstvo  | Oznaka       | Jedinica            | Oznaka i vanje materijala <sup>1)</sup> |                           |                           |                           |                           |
|---|--------------|---------------------|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|   |              |                     | EN-GJL-150<br>(EN-JL1020)               | EN-GJL-200<br>(EN-JL1030) | EN-GJL-250<br>(EN-JL1040) | EN-GJL-300<br>(EN-JL1050) | EN-GJL-350<br>(EN-JL1060) |
|   |              |                     | Struktura                               |                           |                           |                           |                           |
| Feritno/<br>perlitna  |              |                     | Perlitna                                |                           |                           |                           |                           |
| Vlačna<br>vrstota   | $R_m$        | N/mm <sup>2</sup>   | 150-250                                 | 200-300                   | 250-350                   | 300-400                   | 350-450                   |
| Granica<br>razvlačenja<br>(0,1%)  | $R_{p0,1}$   | N/mm <sup>2</sup>   | 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<br>vrstota   | $R_m^c$      | N/mm <sup>2</sup>   | 600                                     | 720                       | 840                       | 960                       | 1080                      |
| Granica<br>teženja pod<br>tlakom<br>(0,1%)                                  | $R_{p0,1}^c$ | N/mm <sup>2</sup>   | 195                                     | 260                       | 325                       | 390                       | 455                       |
| Savojna<br>vrstota  | $f$          | N/mm <sup>2</sup>   | 250                                     | 290                       | 340                       | 390                       | 490                       |
| Smišljena<br>vrstota  | $s$          | N/mm <sup>2</sup>   | 170                                     | 230                       | 290                       | 345                       | 400                       |
| Vrstota na<br>uvijanje  | $t$          | N/mm <sup>2</sup>   | 170                                     | 230                       | 290                       | 345                       | 400                       |
| Modul<br>elastičnosti <sup>2)</sup>   | $E$          | kN/mm <sup>2</sup>  | 78-103                                  | 88-113                    | 103-118                   | 108-137                   | 123-143                   |
| Poissonov<br>broj   |              | -                   | 0,26                                    | 0,26                      | 0,26                      | 0,26                      | 0,26                      |
| Dinamička<br>savojna<br>vrstota <sup>3)</sup>                               | $R_{df}$     | N/mm <sup>2</sup>   | 70                                      | 90                        | 120                       | 140                       | 145                       |
| Vrstota pri<br>izmjeni nom<br>vlačne<br>tlačne<br>opterećenju <sup>4)</sup> | $R_d^{-1}$   | N/mm <sup>2</sup>   | 40                                      | 50                        | 60                        | 75                        | 85                        |
| Prijelomna<br>žilavost  | $K_{lc}$     | N/mm <sup>3/2</sup> | 320                                     | 400                       | 480                       | 560                       | 650                       |

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Ovisi o količini i obliku grafita te opterećenju.

<sup>3)</sup> Primjenjuje se slijedeća aproksimacija:  $R_{df} = 0,35 - 0,5 \cdot R_m$ .

<sup>4)</sup> Primjenjuje se slijedeća 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          | Oznakivanje materijala <sup>1)</sup> |                           |                           |                           |                           |
|--|--------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|  |        |                   | EN-GJL-150<br>(EN-JL1020)            | EN-GJL-200<br>(EN-JL1030) | EN-GJL-250<br>(EN-JL1040) | EN-GJL-300<br>(EN-JL1050) | EN-GJL-350<br>(EN-JL1060) |
| Gustoća  |        | g/cm <sup>3</sup> | 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                 |        |                   |                                      |                           | 10,0                      |                           |                           |
| između 20 i 200°C  |        | μm/(m·K)          |                                      |                           | 11,7                      |                           |                           |
| između 20 i 400°C  |        |                   |                                      |                           | 13,0                      |                           |                           |
| Toplinska vodljivost   |        |                   |                                      |                           |                           |                           |                           |
| pri 100°C  |        | W/(m·K)           | 52,5                                 | 50,0                      | 48,5                      | 47,5                      | 45,5                      |
| pri 200°C  |        |                   | 51,0                                 | 49,0                      | 47,5                      | 46,0                      | 44,5                      |
| pri 300°C  |        |                   | 50,0                                 | 48,0                      | 46,5                      | 45,0                      | 43,5                      |
| pri 400°C  |        |                   | 49,0                                 | 47,0                      | 45,0                      | 44,0                      | 42,0                      |
| pri 500°C  |        |                   | 48,5                                 | 46,0                      | 44,5                      | 43,0                      | 41,5                      |
| Koercitivnost  | $H_0$  | A/m               |                                      |                           | 560-720                   |                           |                           |
| Maksimalna permeabilnost   | $\mu$  | μH/m              |                                      |                           | 220-330                   |                           |                           |

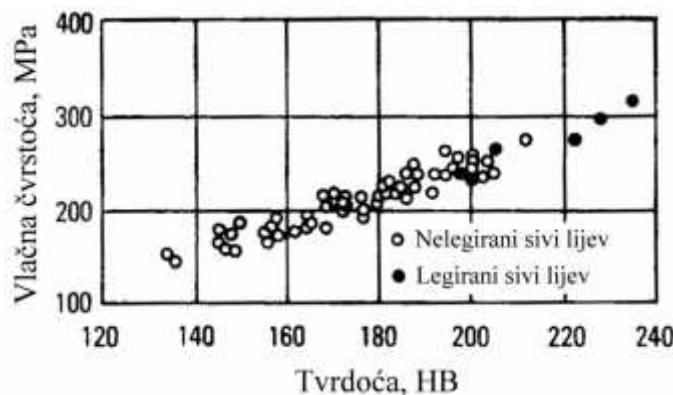
<sup>1)</sup> Kada postoje posebni zahtjevi na strojnu obradivost ili magnetska svojstva, primjenjuje se kvaliteta EN-GJL-100. Zahtijevana svojstva mogu se ostvariti toplinskom obradom. Fizikalna svojstva kvaliteta EN-GJL-100 nisu prikazana.

**Tla na vrsto a** sivog lijeva je ~ 3 do 4 puta veća od njegove vlastite vrste (tablica 3), što je znatno više nego kod nodularnog i vermicularnog lijeva [1, 8, 9]. Upravo zbog visoke tla na vrsto je sivi lijev često se upotrebljava za konstrukcije koje su tla no opterećene.

Grafitni listi i mesta 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 vlastite vrste (tablica 3) [1, 9]. Sivi lijevi 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].

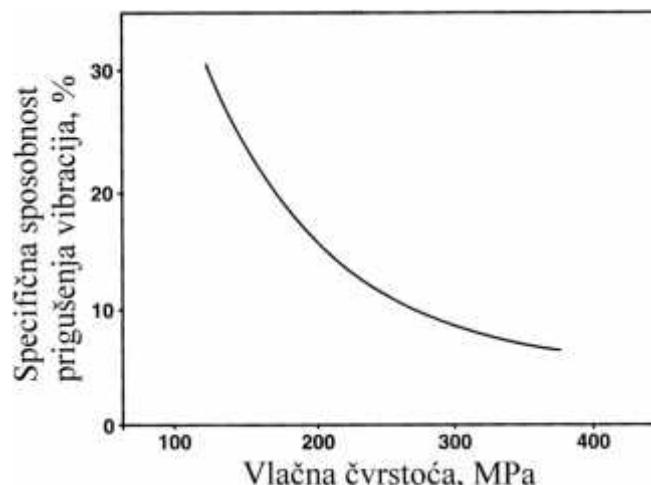
**Tvrdoće** sivog lijeva povećava se s porastom vlastite vrste (slika 20).



Slika 20. Odnos vlastite vrstoće i tvrdoće sivog lijeva [8]

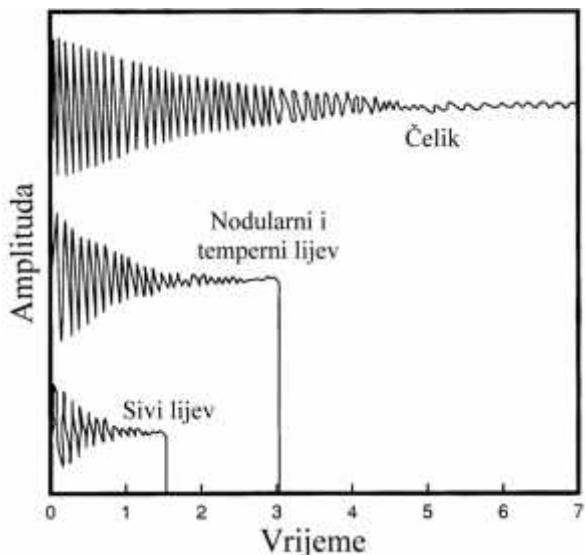
Zbog listi avoga oblika grafita, sivi lijev ima vrlo nisku **žilavost i istezanje** [1]. Udarni rad loma, kao mjera žilavosti, određen na epruvetama bez zareza, obično se kreće od 1,4 do 6,8 J [18]. U tablici 3 može se vidjeti da žilavost sivog lijeva povećava se s rastom vlastite vrste, što je suprotno 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 listi u metalnoj osnovi [1]. Na slici 21 može se vidjeti kako sposobnost prigušenja vibracija sivog lijeva opada s povećanjem njegove vlastite vrste.



Slika 21. Utjecaj vlastite vrstoće 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 elika.



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

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

Povećanje udjela grafitnih estica rezultira smanjenjem **gustoće** sivog lijeva. Zbog toga gustoća sivog lijeva raste s povećanjem vlastite težine (tablica 4).

Zbog međusobne povezanosti grafitnih listića, sivi lijev ima veću **toplinsku vodljivost** od vermikularnog i nodularnog lijeva [1]. S porastom koncentracije, grubosti i dužine grafitnih listića povećava se toplinska vodljivost sivog lijeva [8]. Većina legirnih elemenata smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva, a najviše i u inak nema 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 vlastite težine 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. kionički bubnjevi i diskovi, ili anske kokile itd.

Od ostalih svojstava sivog lijeva, treba istaknuti jako dobru **otpornost ka toplinskom umoru**, odnosno naizmjenični ciklusima grijanja i hlađenja koji mogu dovesti do značajnih naprezanja u odljevku i pojavu pukotina [1]. Rezultat je to visoke toplinske vodljivosti i niskog modula elastičnosti. Osim toga, sivi lijev ima odličnu **otpornost na trošenje**, posebno na trošenje klizanjem, što je rezultat prisutnosti grafitnih listića u mikrostrukturi [1, 8, 9]. Još jedna vrlo značajna karakteristika 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. Tipi na području primjene su: strojogradnja (razni dijelovi i postolja strojeva, kućišta, odljevci za pribor 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.



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 izluden u obliku grafitnih listi a oko kojih se nalazi metalna osnova. Budući da su grafitni listi i međusobno povezani, metalna osnova je u velikoj mjeri diskontinuirana. Zbog toga sivi lijev ima nižu granicu razvlačenja, vlastitu vrsto u istezanje, žilavost, modul elastičnosti i tvrdoću u odnosu na druga željezna lijeva te ostalih željeznih lijeva koji u strukturi sadrže grafitne estice, kao što su nodularni, temperirani i vermicularni lijevi. 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 vrsto i tribološka svojstva i otpornost na koroziju te niski troškovi proizvodnje.

Svojstva sivog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukturi, tj. o tipu, veličini i raspodjeli grafitnih listi i strukturi metalne osnove te prisutnosti karbida i fosfidnog eutektika. Različita svojstva mogu se postići i kroz varijacije mikrostrukture. Kemijski sastav i brzina hlađenja odljevka tijekom i nakon skraćivanja ključa 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. 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, 50<sup>th</sup> 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 ljevovi, 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, poglavje 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, TechnicalInformation 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](http://www.mm-china.german-pavilion.com/content/en/exhibitors/exhibitors_detail.php?exhibitor_id=58998)
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_furnace](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](mailto: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