

Utjecaj sastava uložka, debljine stijenke odljevka i cijepljenja na mikrostrukturu sivog lijeva

Hirš, Ana-Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:747599>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ana-Marija Hirš

DIPLOMSKI RAD

Sisak, srpanj 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Ana-Marija Hirš

**UTJECAJ SASTAVA ULOŠKA, DEBLJINE STIJENKE ODLJEVKA I
CIJEPLJENJA NA MIKROSTRUKTURU SIVOG LIJEVA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

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

Sisak, srpanj 2019.

ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru prof.dr.sc. Zoranu Glavašu zbog velike pomoći i stručnih savjeta prilikom pisanja ovog rada.

Također se iznimno zahvaljujem ljevaonici Plamen d.o.o. iz Požege, a posebno mr.sc. Snježani Zeljko na uzorcima sivog lijeva.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Ana-Marija
PREZIME: Hirš
MATIČNI BROJ: M 67/17

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

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom:

UTJECAJ SASTAVA ULOŠKA, DEBLJINE STIJENKE ODLJEVKA I CIJEPLJENJA NA
MIKROSTRUKTURU SIVOG LIJEVA

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

Sisak, 18. srpnja 2019.

(vlastoručni potpis)

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

SAŽETAK

UTJECAJ SASTAVA ULOŠKA, DEBLJINE STIJENKE ODLJEVKA I CIJEPLJENJA NA MIKROSTRUKTURU SIVOG LIJEVA

U ovom diplomskom radu je analiziran utjecaj različitih sastava uloška za izradu taline, debljine stijenke odljevka i cijepljenja na mikrostrukturu sivog lijeva. Izrađene su 3 taline sivog lijeva gotovo istog kemijskog sastava. Korišteni su sljedeći udjeli sirovog željeza (SŽ), čeličnog otpada (ČO), povratnog sivog lijeva (PSL) i SiC u ulošku: talina 1 (39,4 % SŽ, 10 % ČO, 49,2 % PSL, 0,6 % SiC), talina 2 (9,9 % SŽ, 38,8 % ČO, 47,9 % PSL, 1,6 % SiC) i talina 3 (0 % SŽ, 0 % ČO, 99,2 % PSL, 0,06 % SiC). Od svake taline odlivena su 2 stepenasta odljevka sa stijenama debljina 5, 10, 20, 45 i 65 mm, jedan necijepljen i jedan cijepljen (dodatak cjepiva u mlaz taline tijekom ulijevanja u kalup iznosio je 0,23 mas. %). Dobiveni rezultati pokazuju da tip, veličina i raspodjela grafitnih listića u analiziranim stijenama nisu u značajnijoj mjeri ovisili o sastavu uloška. Debljina stijenke imala je veliki utjecaj na tip, veličinu i raspodjelu grafitnih listića, izlučivanje karbida te strukturu metalne osnove. S povećanjem debljine stijenke mijenja se tip grafitnih listića od D i E preko B do A tipa. Karbidi su pronađeni u rubnom dijelu stijenke debljine 5 mm. Udio ferita u metalnoj osnovi povećavao se sa smanjenjem brzine hlađenja te sa povećanjem udjela grafitnih listića D i E tipa. Cijepljenjem je značajno smanjen udio karbida u rubnom dijelu stijenke debljine 5 mm. U sredini stijenke debljine 5 mm te stijenama debljine 10 do 65 mm cijepljenjem je povećan udio grafitnih listića A tipa te su eliminirani grafitni listići B, D i E tipa ili je njihov udio značajno smanjen (učinak ovisi o debljini stijenke).

Ključne riječi: sivi lijev, mikrostruktura

ABSTRACT

THE EFFECT OF CHARGE COMPOSITION, CASTING SECTION THICKNESS AND INOCULATION ON GRAY CAST IRON MICROSTRUCTURE

The effect of different charge compositions for melt production, casting section thickness and inoculation on the gray cast iron microstructure was analysed in this graduate thesis. Three gray cast iron melts of almost the same chemical composition were made. The following shares of pig iron (PI), steel scrap (SS), gray iron return (GIR) and SiC in charge were used: melt 1 (39.4 % PI, 10 % SS, 49.2 % GIR, 0.6 % SiC), melt 2 (9.9 % PI, 38.8 % SS, 47.9 % GIR, 1.6 % SiC) and melt 3 (0 % PI, 0 % SS, 99.2 % GIR, 0.06 % SiC). Two stepped castings with walls thicknesses of 5, 10, 20, 45 and 65 mm are casted from each melt, one uninoculated and one inoculated (the addition of inoculant in the melt stream during the pouring in the mold was 0.23 wt.%). The obtained results show that the type, size and distribution of graphite flakes in the analysed walls did not significantly depend on the composition of the charge. The wall thickness had a great influence on the type, size and distribution of graphite flakes, carbides precipitation and the structure of the metal matrix. The type of graphite flakes is changed from D and E, over B to A type with increasing wall thickness. Carbides were found in the edge part of the wall thickness of 5 mm. The percentage of ferrite in the metal matrix increased with decreasing the cooling rate and with increasing the proportion of graphite flakes D and E type. Inoculation significantly reduced the

proportion of carbides in the edge part of the wall thickness of 5 mm. In the middle of the wall thickness of 5 mm and the walls thicknesses of 10 to 65 mm the inoculation resulted in an increase in the proportion of graphite flakes A type. In addition, the graphite flakes B, D and E types were eliminated or their proportion was significantly reduced (effect depends on the wall thickness).

Key words: gray cast iron, microstructure

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Vrste nelegiranih sivih ljevova	2
2.2. Skrućivanje sivog lijeva	3
2.2.1. Klasifikacija grafitnih listića prema obliku i veličini	6
2.3. Pretvorbe u mikrostrukturi sivog lijeva nakon skrućivanja	8
2.4. Kemijski sastav sivog lijeva i utjecaj elemenata	10
2.5. Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu sivog lijeva	11
2.6. Proizvodnja sivog lijeva	13
2.6.1. Sirovine za izradu taline sivog lijeva	13
2.6.2. Izrada taline sivog lijeva	15
2.6.3. Predobrada taline sivog lijeva	17
2.6.4. Cijepljenje sivog lijeva	19
3. EKSPERIMENTALNI DIO	21
3.1. Izrada talina sivog lijeva	21
3.2. Lijevanje stepenastih ispitnih odljevaka	22
3.3. Metalografska analiza	24
4. REZULTATI I DISKUSIJA	26
4.1. Kemijski sastav talina sivog lijeva	26
4.2. Mikrostrukturne značajke stepenastih ispitnih odljevaka	26
5. ZAKLJUČAK	42
6. LITERATURA	43
ŽIVOTOPIS	45

1. UVOD

Sivi se lijev svrstava u grupu željeznih ljevova u kojima je ugljik izlučen u obliku grafita, zbog čega je njegova prijelomna površina sive boje. Osnovne karakteristike sivog lijeva su: niska vlačna čvrstoća, tvrdoća, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećana osjetljivost na debljinu stijenke, a uzrokovane su listićavom (lamelarnom) strukturom grafita [1]. S druge strane, sivi lijev ima dobru strojnu obradivost, jako dobro prigušuje vibracije, otporan je na toplinske šokove, dobre je livljivosti i visoke tlačne čvrstoće [1]. Najstariji je materijal iz skupine željeznih ljevova s grafitom [1, 2]. Svoju primjenu sivi lijev nalazi u sljedećim područjima: strojogradnji, izradi odljevaka za štednjake i peći, procesnoj industriji i energetici, industriji motornih vozila, za konstrukcije i dekorativne odljevke te u mnogim drugim područjima [1].

Sivi je lijev u odnosu na vermikularni i nodularni dominantniji u pogledu toplinske vodljivosti, livljivosti, prigušenja vibracija i strojne obradivosti. Vrijednosti čvrstoće, tvrdoće, granice razvlačenja, istezljivosti, modula elastičnosti i žilavosti manje su kod sivog lijeva. Znatno je osjetljiviji na debljinu stijenke od vermikularnog i nodularnog lijeva [1].

Ukupna svjetska proizvodnja odljevaka u 2017. godini iznosila je 109,8 mil. t [3]. Od toga se 79,7 % odnosi na odljevke od ljevova na osnovi željeza (željezni ljevovi + čelični ljevovi). Udio odljevaka od sivog lijeva u ukupnoj svjetskoj proizvodnji odljevaka u navedenoj godini iznosio je 44,6 %, odnosno 56 % u proizvedenoj količini odljevaka od ljevova na osnovi željeza.

Svojstva sivog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukturi [1, 2]. Kroz promjene u mikrostrukturi mogu se postići različita svojstva. Zbog toga postoji više kvaliteta sivog lijeva. Brojni faktori utječu na mikrostrukturu sivog lijeva, a najznačajniji su: kemijski sastav, brzina hlađenja odljevka u kalupu za vrijeme i nakon skrućivanja (tj. debljina stijenke odljevka), sirovine za proizvodnju taline, predobrada i cijepljenje taline.

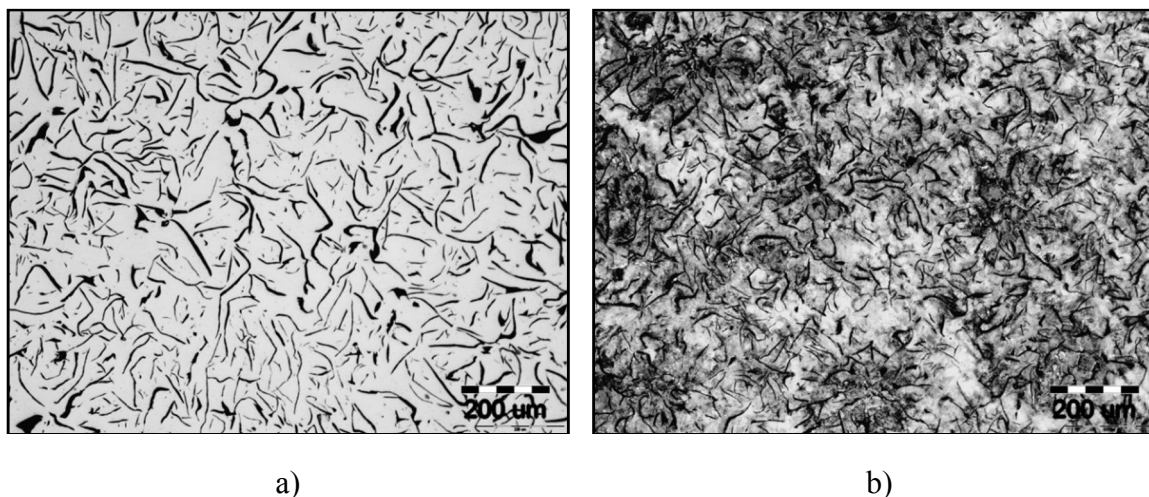
Taline sivog lijeva danas se najčešće proizvode u kupolnim i indukcijskim pećima [1, 2]. Pri tome se koriste različite metalne i nemetalne sirovine, odnosno uložni materijali, kao što su sirovo željezo, čelični otpad, povratni materijal iz ljevaonice (uljevni sustavi, pojila, neispravni odljevci), otpadni sivi lijev, sredstva za naugličenje, sredstva za predobradu (SiC), ferolegure te koks i talitelji (samo u kupolnim pećima) [1, 2]. Udjeli metalnih komponenti u ulošku, posebice čeličnog otpada i sirovog željeza, utječu na mikrostrukturu i svojstva odljevaka od sivog lijeva [4 - 6].

U ovom diplomskom radu je analiziran utjecaj različitih sastava uloška za izradu taline, debljine stijenke odljevka i cijepljenja na mikrostrukturu sivog lijeva.

2. TEORIJSKI DIO

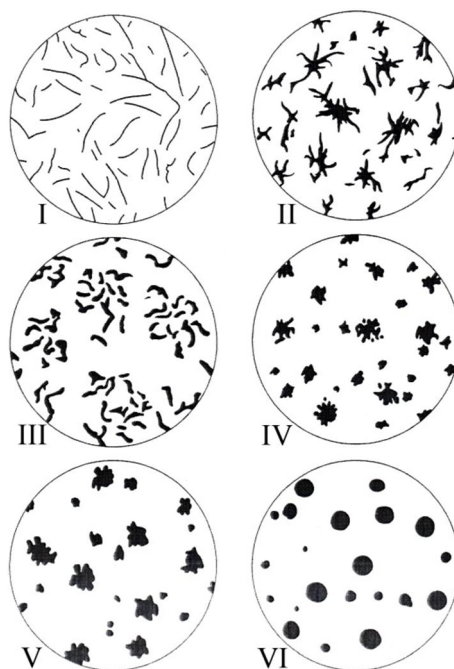
2.1. Vrste nelegiranih sivih ljevova

Slika 2.1 prikazuje uobičajenu mikrostrukturu sivog lijeva.



Slika 2.1. Mikrostruktura sivog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje (sredstvo za nagrivanje – nital) [1]

Norma EN ISO 945-1:2012 definira 6 oblika grafitnih čestica u željeznim ljevovima (slika 2.2) [7]. Oblik I je listićavi grafit. Normom EN 1560:2011 definirana oznaka za sivi lijev je GJL [8].



Slika 2.2. Shematski prikaz oblika grafitnih čestica u željeznim ljevovima prema normi EN ISO 945-1:2012 [9]

Za sivi lijev razvijeno je više normi, kao što su npr. ISO 185:1988, EN 1561:2011, ASTM A48-94a, BS 1452 (1990), JIS G5501 (1995), itd., koje definiraju kvalitete i njihova svojstva. U zemljama Europske unije najčešće se koristi norma EN 1561:2011 (tablica 2.1).

Tablica 2.1. Kvalitete sivog lijeva prema EN 1561:2011 i odgovarajuće vrijednosti vlačne čvrstoće određene na normom definiranim ispitnim uzorcima [10]

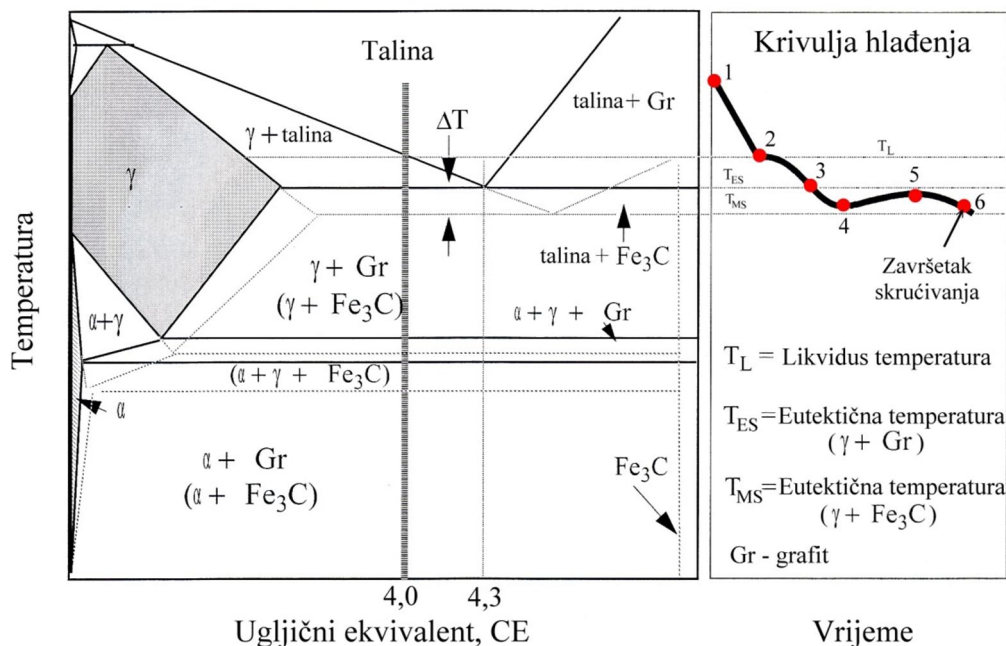
Označivanje materijala		Debljina relevantne stijenke t		Vlačna čvrstoća R_m , propisane vrijednosti u lijevanom uzorku, N/mm^2 , min.
Oznaka	Broj	$>$, mm	$\leq$, mm	
EN-GJL-100	5.1100	5	40	100
EN-GJL-150	5.1200	2,5	50	150
		50	100	130
		100	200	110
EN-GJL-200	5.1300	2,5	50	200
		50	100	180
		100	200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

2.2. Skrućivanje sivog lijeva

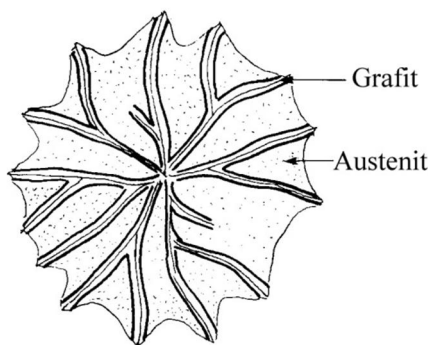
Željezni ljevovi su legure s većim brojem elemenata, ali na mikrostrukturu nakon skrućivanja najviše utječe udio ugljika i silicija [1, 2]. Zbog toga se prilikom razmatranja skrućivanja željeznih ljevova, pa tako i sivog lijeva polazi se od stabilnog dijagrama stanja Fe-C-Si (slika 2.3). Dodatne, potpunije informacije o tijeku skrućivanju i izlučivanju pojedinih faza mogu se dobiti snimanjem krivulje hlađenja, koja predstavlja promjenu temperature s vremenom tijekom skrućivanja (slika 2.3).

U nastavku je opisan tijek skrućivanja podeutektičnog sivog lijeva s ugljičnim ekvivalentom $CE = 4,0$ ($CE = \% C + \% Si/3$) (slika 2.3) [1, 2]. Temperatura taline (točka 1) postepeno opada nakon ulijevanja u kalup i kada se doseže likvidus temperatura (T_L , točka 2) dolazi do izlučivanja dendrita primarnog austenita i njihovog rasta. Taj proces traje sve do točke 3. Budući da je topljivost ugljika u austenitu znatno manja nego u talini i da se zbog izlučivanja austenita smanjuje količina taline, postepeno dolazi do obogaćivanja taline ugljikom. Kada se dostigne eutektična koncentracija ugljika ($CE = 4,3$) i temperatura (T_{ES} , točka 3) počinje se odvijati eutektična reakcija po stabilnom sustavu kojom iz preostale taline

nastaju eutektični austenit (γ) u obliku dendrita i grafit u obliku listića koji zajedno formiraju eutektične ćelije (slika 2.4). Smatra se da je svaka eutektična ćelija rezultat pojedinačnog nukleacijskog događaja. Tijekom skrućivanja eutektične ćelije rastu sve dok se ne dodirnu. Brzine rasta listićavog grafita i eutektičnog austenita su slične, što znači da se radi o povezanom eutektičnom rastu. Zbog toga austenit potpuno ne okružuje grafitne listiće, pa su oni u stalnom kontaktu s talinom. To omogućava da atomi ugljika difundiraju iz taline na grafitne listiće, što dovodi do njihovog rasta.



Slika 2.3. Dijagram stanja Fe-C-Si i krivulja hlađenja podeutektičnog sivog lijeva sa CE = 4,0 [11]



Slika 2.4. Shematski prikaz eutektične ćelije u sivom lijevu [1]

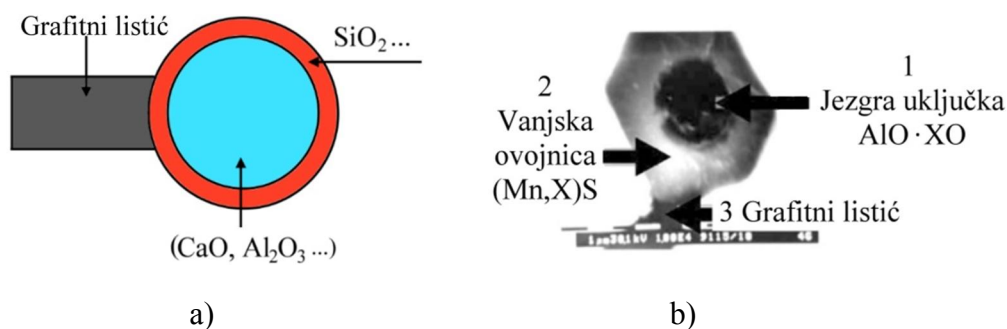
Kako bi se eutektična reakcija intenzivnije odvijala potrebno je određeno pothlađenje taline (područje od točke 3 do točke 4) koje ovisi o nukleacijskom potencijalu taline. Što je u talini više pogodnih mjesta za nukleaciju grafita pothlađenje će biti manje. U točki 4, koja predstavlja temperaturu eutektičnog pothlađenja (T_{EP}) eutektična reakcija počinje se intenzivno odvijati i traje do solidus temperature (T_S , točka 6). Može se vidjeti da u području od točke 4 do točke 5 (koja se naziva temperatura eutektične rekalescencije (T_{ER})) dolazi do porasta temperature jer se oslobađa značajna količina topline (entalpija skrućivanja) zbog naglog izlučivanja veće količine krute faze (eutektičnog austenita i grafita). Temperatura

ponovo pada od točke 5 do točke 6 jer se u završnoj fazi skrućivanja sve manje izlučuje krute faze, odnosno toplina koja se odvede kroz kalup u okolinu veća je od topline koja se oslobodi zbog izlučivanja krute faze. Skrućivanje se završava na solidus temperaturi. Mikrostruktura se sastoji od kristala primarnog austenita koji je okružen kristalima eutektika (eutektični austenit + listićavi grafit).

Tijekom skrućivanja umjesto grafita može doći do stvaranja karbida Fe_3C [1, 2]. To ovisi o debljini stijenke odljevka, odnosno brzini hlađenja te nukleacijskom potencijalu taline. Karbidi se obično mogu pronaći u tankim stijenkama zbog velike brzine skrućivanja. U tom slučaju zbog velikog pothlađenja taline dostiže se temperatura T_{MS} na kojoj se počinje odvijati eutektična reakcija prema metastabilnom sustavu, odnosno iz taline se izlučuju eutektični austenit i cementit Fe_3C .

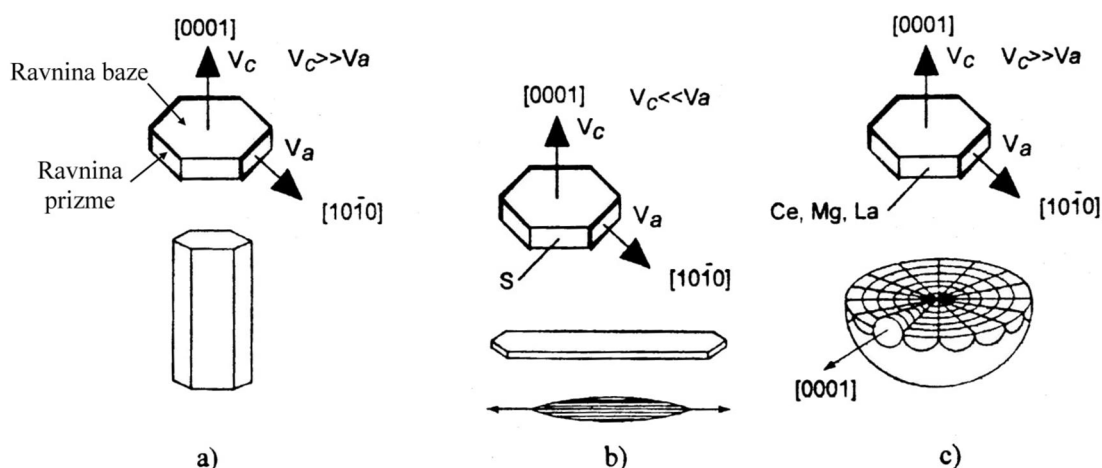
Kod nadeutektičnog sivog lijeva skrućivanje se odvija tako da se iz taline najprije izlučuje primarni listićavi grafit kada se dostigne likvidus temperatura [1, 2]. Nakon toga, kad se ostvari eutektična koncentracija ugljika i temperatura T_{ES} počinje eutektična reakcija i od te točke skrućivanje se odvija kao kod podutektičnog sivog lijeva. Listići primarnog grafita veći su i grublji od listića grafita nastalih eutektičnom reakcijom.

U sivom lijeva odvija se heterogena nukleacija grafita na raznim spojevima, uključujući silikate i okside, kako je prikazano na slici 2.5.a, sulfide, nitrade (borov nitrid), karbide i intermetalne spojeve [12]. Nemetalni uključci pokazuju najveći učinak nukleacije, kao što su naveli Jacobs i suradnici [13]. Elbel [14] smatra da se izlučivanje grafita odvija na česticama silicijevog dioksida. Campbell [15] je predložio koncept dvostrukih filmova kako bi istaknuo ulogu oksida bogatog silicijem u osiguravanju odgovarajućeg supstrata za stvaranje čestica oksisulfida, što osigurava optimalne uvjete za nukleaciju grafita. Prema Riposanu i suradnicima [16, 17], mangan i sumpor imaju najznačajniji utjecaj na nukleaciju listićavog grafita, obzirom da grafitni listići nukleiraju na složenom spoju $(\text{Mn}, \text{X})\text{S}$, kao što se vidi na slici 2.5.b. Snažni dezoksidacijski elementi, kao što su aluminij, silicij, cirkonij, magnezij i titan, formiraju okside koji djeluju kao pogodna mjesta za nukleaciju kompleksnog spoja $(\text{Mn}, \text{X})\text{S}$ na kojem se odvija nukleacija listićavog grafita [17].



Slika 2.5. Nukleacija listićavog grafita: a) na SiO_2 [18], b) na $(\text{Mn}, \text{X})\text{S}$ česticama [16, 17]

Nakon nukleacije slijedi rast grafita [1]. Grafit ima slojevitou strukturu i heksagonalnu kristalnu rešetku s fasetiranim (glatkim) graničnim površinama (slika 2.6). Površina svakog sloja stvara ravninu baze, a rubovi sloja stvaraju ravninu prizme. Ravnina prizme ima najvišu energiju i na nju se adsorbiraju „nečistoće“ (sumpor, kisik) [1, 2]. Kristalografske ravnine pogodne za rast kristala grafita iz taline su $[10\bar{1}0]$, odnosno a-os, te $[0001]$, odnosno c-os [2].



Slika 2.6. Promjena brzine rasta grafita zbog adsorpcije stranih atoma: a) bez nečistoća, b) s površinski aktivnim elementima adsorbiranim na površinu prizme (sumpor i kisik), c) s nodularizirajućim elementima (magnezij, cerij, lantan) [19]

Kisik i sumpor, kao površinski aktivni elementi adsorbiraju se na površinu prizme, koja zbog toga postaje nefasetirana (gruba). Takva površina omogućuje da se na nju priključe atomi ugljika iz taline već pri malim pothlađenjima. U tom slučaju grafit raste u smjeru a-osi pripajanjem atoma ugljika iz taline (slika 2.6.b), što u konačnici rezultira nastankom listićavog grafita. Rast listića kontroliran je difuzijom atoma ugljika iz taline na navedenu graničnu površinu.

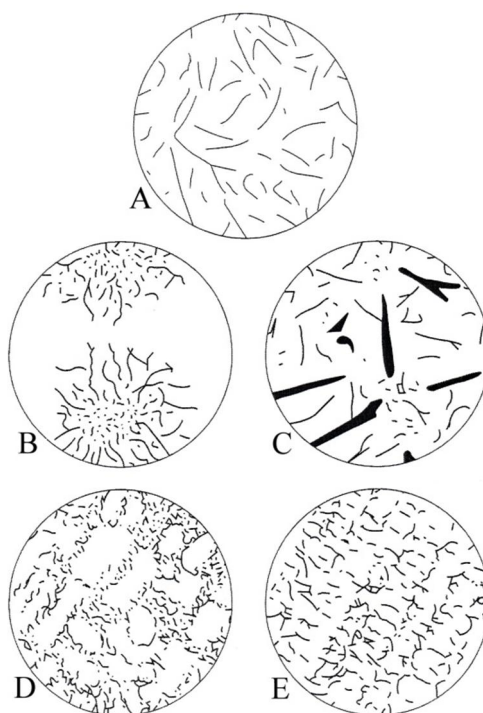
Ako se u talinu dodaju magnezij, cerij ili lantan, odnosno elementi koji imaju visok afinitet prema sumporu i kisiku, oni će vezati sumpor i kisik što će dovesti do ponovnog fasetiranja granične površine kruto-tekuće i ograničenja rasta grafita. Obzirom da je mobilnost fasetirane, odnosno glatke površine slaba, za rast kristala potrebno je veće pothlađenje. U tom slučaju kristali grafita rast će u smjeru c-osi, odnosno nastaje nodularni grafit (slika 2.6.c).

2.2.1. Klasifikacija grafitnih listića prema obliku i veličini

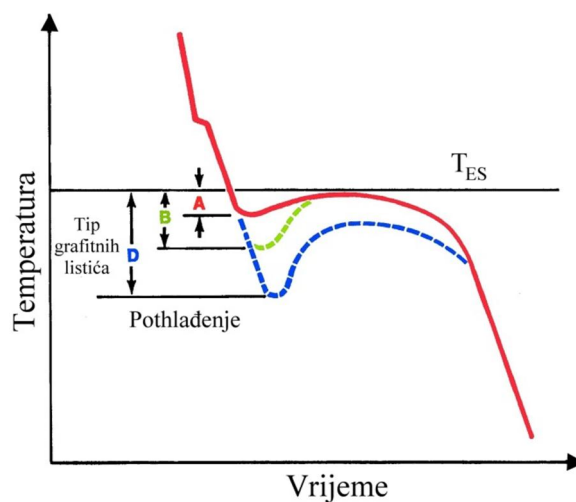
Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva u velikoj mjeri ovise o obliku, veličini, količini i distribuciji grafitnih listića [1, 2, 20]. Prema ASTM A247 razlikuje se 5 tipova grafitnih listića (slika 2.7) [1, 2, 9, 20 - 22].

Tip A grafitnih listića karakteriziran je nasumičnim rasporedom grafitnih listića u metalnoj osnovi. Formira se pri minimalnom pothlađenju taline (slika 2.8), odnosno kad se skrućivanje odvija sporo pri ravnotežnim uvjetima uz veliki nukleacijski potencijal taline [1, 2, 9, 20 - 22]. Ovaj je tip grafitnih listića najčešće najpoželjniji zbog najpovoljnijih mehaničkih i fizikalnih svojstava odljevka. Međutim, teško se postiže, a pogotovo kod odljevaka različitih debljina stijenki. Zbog toga je obično potrebno cijepiti talinu sivog lijeva, jer se tako povećava nukleacijski potencijal [1, 2].

Pri većim brzinama hlađenja i kod nižeg nukleacijskog potencijala taline, tijekom skrućivanja se ne postižu ravnotežni uvjeti te dolazi do nešto većeg pothlađenja taline. Ovakvi uvjeti pogoduju nastanku grafitnih listića B tipa koji se formira u obliku rozeta [1, 2, 9, 20 - 22]. Eutektične ćelije su velike zbog niskog stupnja nukleacije. U centru rozeta nastaju sitni listići grafita zbog većeg pothlađenja. Toplina oslobođena skrućivanjem smanjuje pothlađenje što za posljedicu ima naknadni nastanak grafitnih listića A tipa po rubu rozeta.



Slika 2.7. Shematski prikaz grafitnih listića A, B, C, D i E tipa [9]



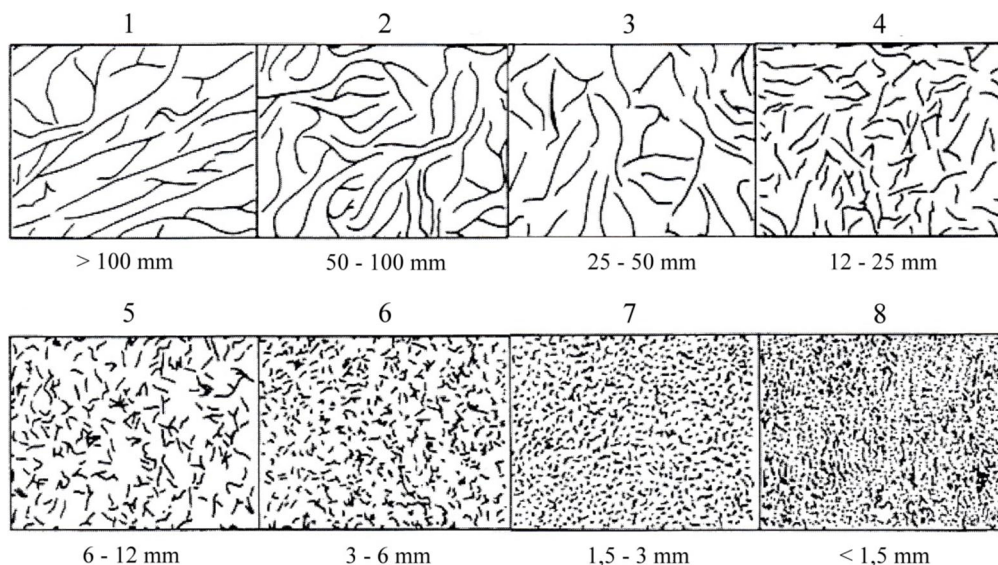
Slika 2.8. Utjecaj pothlađenja taline na tip grafitnih listića [1]

Tip C grafitnih listića pojavljuje se kod nadeutektnih sivih ljevova, osobito kod onih s visokim udjelom ugljika. Radi se o grafitnim listićima koji se prvi izlučuju iz taline i zbog toga neometano rastu sve do dostizanja eutektnog sastava kada se počinje odvijati eutektna reakcija. Zbog neometanog rasta, grafitni listići C tipa su grubi i krupni (poput pločica). Negativno utječu na tvrdoću i čvrstoću, a nakon strojne obrade površina odljevka je gruba. Zbog visoke toplinske vodljivosti pogodni su za odljevke koji moraju biti otporni na toplinske šokove, a osim toga daju i visoku sposobnost prigušenja vibracija [1, 2, 9, 20 - 22].

Kada je pothlađenje taline dosta veliko (slika 2.8), ali ne dovoljno veliko da prouzroči stvaranje karbida, dolazi do stvaranja grafitnih listića D i E tipa [1, 2, 9, 20 - 22]. Oba se tipa pojavljuju u međudendritnim područjima i pri brzom hlađenju odljevka, odnosno u tankim stijenkama. Tip D ima slučajnu orijentaciju, a listići tipa E su preferirane orijentacije u skladu s usmjerenjem primarnih dendrita austenita, odnosno smjerom odvođenja topline. Ovi oblici

grafitnih listića olakšavaju stvaranje ferita u metalnoj osnovi zbog čega dolazi do pada vlačne čvrstoće. Manje štetan utjecaj na mehanička svojstva ima E tip grafitnih listića [1, 2, 9, 20 - 22].

Prema normi ASTM A247 grafitni listići se kategoriziraju i prema veličini u 8 kategorija (slika 2.9). Veliki listići pojavljuju se pri visokim vrijednostima ugljičnog ekvivalenta i sporom hlađenju [22]. Sivi ljevovi izrazito podeutektnog sastava te sivi ljevovi koji se brzo hlade imaju male, kratke listiće. Veliki listići su poželjni za primjene gdje se zahtjeva visoka toplinska vodljivost i visoko prigušenje vibracija. Mali listići u manjoj mjeri slabe metalnu osnovu od velikih listića zbog čega su poželjni kada se zahtijevaju maksimalna vlačna svojstva i fina, glatka površina odljevka.



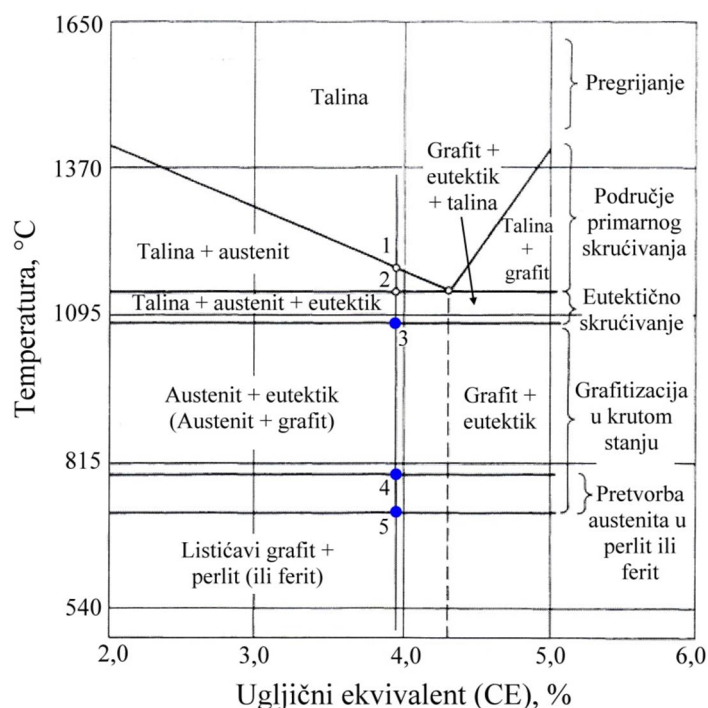
Slika 2.9. Kategorizacija grafitnih listića prema veličini (norma ASTM A 247). Navedene dimenzije odnose se na povećanje 100x [22]

2.3. Pretvorbe u mikrostrukturi sivog lijeva nakon skrućivanja

Mikrostruktura metalne osnove sivog lijeva ovisi o pretvorbama koje se odvijaju nakon skrućivanja, odnosno u čvrstom stanju [1, 2]. Grafitne čestice nastaju tijekom skrućivanja, zbog čega se njihov oblik, veličina i raspodjela ne mijenjaju nakon završetka skrućivanja. Metalna osnova sivog lijeva najčešće se sastoji od ferita (α) i perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), s tim da je u većini slučajeva udio perlita znatno veći od udjela ferita. Udio ferita, odnosno perlita u metalnoj osnovi ovisi o [1, 2]:

- obliku i veličini grafitnih listića,
- ugljičnom ekvivalentu,
- debljini stijenke, odnosno o brzini hlađenja,
- obradi taline,
- te o udjelu legiranih elemenata.

U nastavku su opisane pretvorbe u krutom stanju koje se odvijaju u podeutektnom sivom lijevu sa $\text{CE} = 4,0$ (slika 2.10).

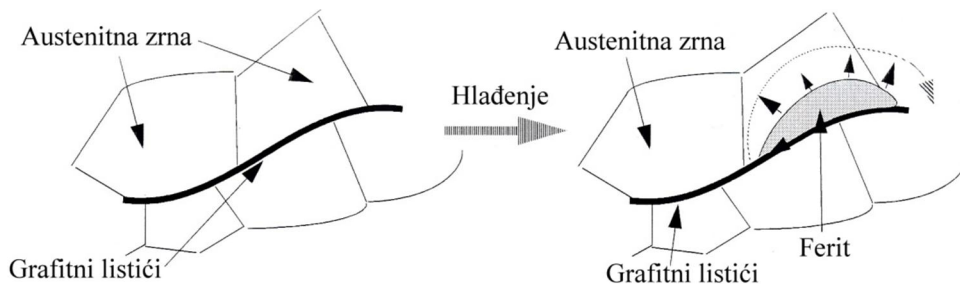


Slika 2.10. Segment dijagrama stanja Fe-C-2 mas. % Si [22]

Na slici 2.10 može se vidjeti da se eutektoidna pretvorba austenita (γ) odvija u temperaturnom intervalu, što je rezultat povišenog udjela silicija u sivom lijevu, kao i u ostalim željeznim ljevovima s grafitom [1, 2].

Nakon završetka skrućivanja, tj. po dostizanju solidus temperature metalna osnova sastoji se od austenita (točka 3). Padom temperature smanjuje se topljivost ugljika u austenitu. Zbog toga austenit odbacuje ugljik koji difundira na grafitne listiće u okruženju [1, 2].

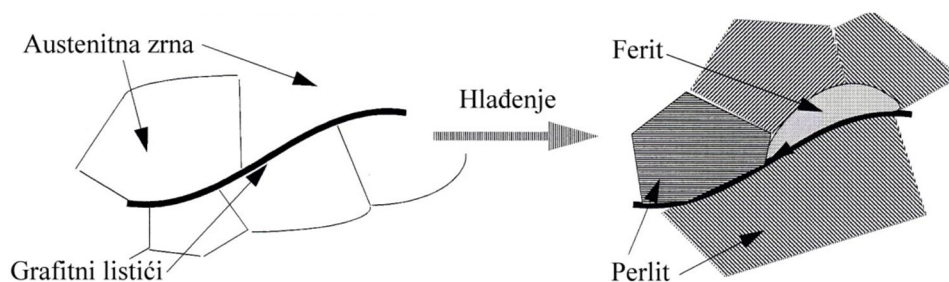
U slučaju vrlo sporog hlađenja (ravnotežni uvjeti) ugljik ima dovoljno vremena da difundira iz austenita na grafitne listiće što rezultira osiromašenjem austenitnih područja ugljikom. Dostizanjem temperature eutektoidne transformacije (točka 4), na tim ugljikom osiromašenim austenitnim područjima počinje nukleacija ferita na graničnoj površini austenit/grafitni listići (slika 2.11). Daljnjim hlađenjem pretvorba austenita u ferit se nastavlja te završava na točki 5. Dakle, pri vrlo sporom hlađenju odnosno kod ravnotežnih uvjeta nastala bi potpuno feritna metalna osnova [1, 2].



Slika 2.11. Shematski prikaz nukleacije ferita u sivom lijevu [11]

No, kako su ravnotežni uvjeti vrlo teško ostvarivi u praksi, tj. kako nije moguće dovoljno sporo hlađenje koje bi omogućilo ugljiku da u dovoljnoj mjeri difundira iz austenita na grafitne listiće da bi nastao ferit, dolazi do neravnotežne pretvorbe i stvaranja perlita (slika 2.12) [1, 2]. Drugim riječima, austenitna područja iz kojih ugljik nije izdifundirao i koja

dostizanjem točke 5 imaju veću koncentraciju ugljika od maksimalne topljivosti ugljika u feritu transformirat će se u perlit.



Slika 2.12. Shematski prikaz nukleacije ferita i perlita [11]

U realnosti se eutektoidna reakcija u sivom lijevu odvija kroz dva paralelna procesa: stabilna pretvorba kojom nastaje ferit ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{grafit}$) i metastabilna pretvorba kojom nastaje perlit ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Ukoliko su u sivom lijevu prisutni grafitni listići A tipa, velika je vjerojatnost da će metalna osnova imati vrlo visok udio perlita. U prisutnosti B, D ili E tipa grafitnih listića nastat će povišen udio ferita u metalnoj osnovi. Grubi raspored listića A tipa (veći su i međusobno udaljeniji nego listići B i D tipa) otežava difuziju ugljika iz austenita te time pospješuje nastajanje perlita u metalnoj osnovi [2].

Kao što je u početku navedeno, na stvaranje perlita i ferita utječu legirni elementi. Tako, npr. silicij pospješuje stvaranje ferita, dok kositar, bakar i mangan pospješuju stvaranje perlita [1, 2].

Debljina stijenke odnosno brzina hlađenja još je jedan bitan faktor koji određuje strukturu metalne osnove. Veća brzina hlađenja pogoduje stvaranju perlita jer nema dovoljno vremena za difuziju ugljika iz austenita na grafitne listiće. Drugim riječima, tanje stijenke u kojima je brzina hlađenja u pravilu veća imat će perlitnu metalnu osnovu, dok će deblje stijenke imati viši udio ferita, jer zbog sporijeg hlađenja ugljik ima više vremena za difuziju iz austenita [1].

2.4. Kemijski sastav sivog lijeva i utjecaj elemenata

Kemijski sastav jedan je od važnih čimbenika koji utječu na mikrostrukturu sivog lijeva, a samim time i na njegova svojstva [1, 2]. U tablici 2.2 za svaku kvalitetu sivog lijeva prikazani su preporučeni udjeli stalno prisutnih elemenata. Utjecaj pojedinih elemenata na skrućivanje taline sivog lijeva i naknadne pretvorbe u krutom stanju prikazan je u tablici 2.3.

Tablica 2.2. Preporučeni udjeli stalnih elemenata u pojedinim kvalitetama sivog lijeva [23]

Element	Udio elemenata, mas. %					
	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
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
P	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,15	maks. 0,10	maks. 0,10
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

Tablica 2.3. Utjecaj pojedinih elemenata na skrućivanje taline sivog lijeva i pretvorbe u krutom stanju [1, 2, 24]

Element	Djelovanje tijekom skrućivanja	Djelovanje na pretvorbe u krutom stanju
Si	Jak grafitizator	Promotor ferita
Mn	Slab karbidotvorac	Promotor perlita
P	Stvara fosfidni eutektik	Stabilizira perlit
Cu	Slab grafitizator	Promotor perlita
Ni	Grafitizator	Slab promotor perlita
Cr	Jak karbidotvorac. Stvara vrlo stabilne kompleksne karbide	Promotor perlita
Mo	Slab karbidotvorac	Promotor ferita i bainita
V	Jak karbidotvorac	Promotor perlita
Al	Jak grafitizator	Promotor ferita
Sn	Slab utjecaj u udjelima u kojima se dodaje	Jak promotor perlita
Sb	Slab utjecaj u udjelima u kojima se dodaje	Jak promotor perlita
Ti	Grafitizator	Promovira ferit
Bi	Promotor karbida	Vrlo slab stabilizator perlita
B (< 0,015 %)	Jak grafitizator	-
B (> 0,015 %)	Stabilizira karbide	Jak promotor perlita

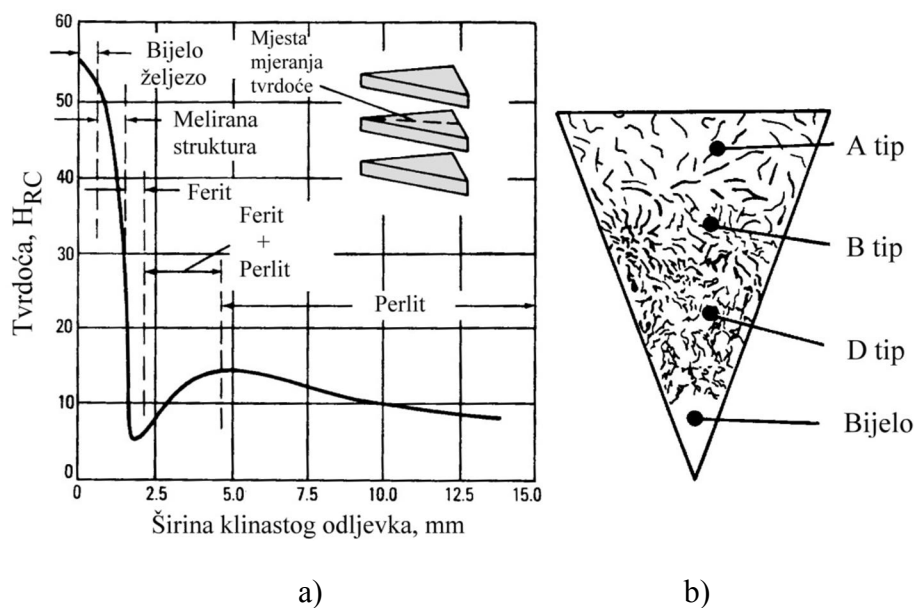
2.5. Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu sivog lijeva

Brzina hlađenja značajno utječe na mikrostrukturu sivog lijeva tijekom i nakon skrućivanja [1]. Debljina stijenke odljevka je ključan faktor koji određuje brzinu hlađenja. Debele stijenke sporije se hlade od tankih stijenki, zbog čega će postojati razlike u mikrostrukturi, a time i svojstvima između debelih i tankih stijenki. U odnosu na druge željezne ljevove, sivi je lijev znatno osjetljiviji na debljinu stijenke [1, 2, 21].

Na slici 2.13 prikazan je utjecaj debljine stijenke na mikrostrukturu i tvrdoću klinastog odljevka od sivog lijeva. U vrhu klinastog odljevka brzina hlađenja je najveća, a to pogoduje metastabilnom skrućivanju pri čemu nastaje mikrostruktura koja sadrži željezni karbid (cementit Fe_3C) i perlit. Zbog navedene mikrostrukture, tvrdoća u ovom području klinastog odljevka je najveća [1, 20].

S udaljavanjem od vrha, brzina hlađenja se smanjuje. Kada se brzina hlađenja smanji dovoljno da se može stvarati grafit, dolazi do pojave melirane zone, što znači da je dio ugljika izlučen u obliku karbida, a dio u obliku grafita zbog čega taj dio ima nižu tvrdoću od vrha [1, 20].

Kako se širina klinastog odljevka kontinuirano povećava, tako se udio cementita sve više smanjuje uz povećanje udjela grafita što dovodi do određenog pada tvrdoće. Nakon potpunog nestanka cementita, mikrostruktura klinastog odljevka sastoji se od grafitnih listića D tipa i ferita, što uzrokuje minimalnu tvrdoću. Ferit se pojavljuje zbog grafitnih listića D tipa, iako je brzina hlađenja u tom dijelu odljevka relativno velika [1, 20].

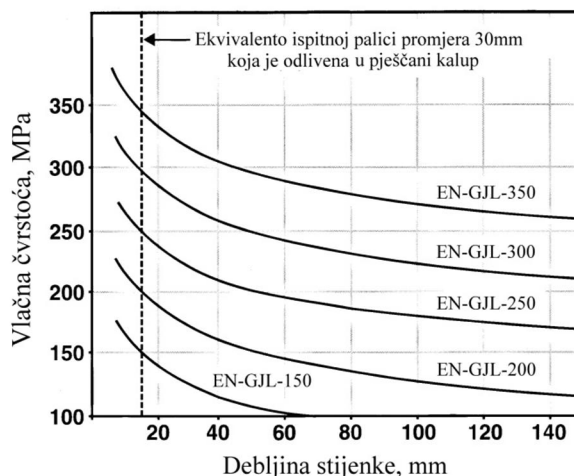


Slika 2.13. a) utjecaj debljine stijenke na mikrostrukturu i tvrdoću klinastog odljevka od sivog lijeva (kemijski sastav: 3,52 mas. % C, 2,55 mas. % Si, 1,01 mas. % Mn, 0,215 mas. % P, 0,086 mas. % S) [20], b) shematski prikaz strukture klinastog odljevka [25]

Daljnje širenje klinastog odljevka rezultira smanjenjem pothlađenja, zbog čega najprije nastaje B tip, a potom A tip grafitnih listića umjesto D tipa. Metalna osnova je perlitna, što u konačnici rezultira porastom tvrdoće. Kod još veće širine klinastog odljevka zbog jako sporog hlađenja dolazi do pretvorbe perlita u ferit i nastanka grublje grafitne strukture, što u konačnici za posljedicu ima pad tvrdoće [1, 20].

Vremenski period potreban za difuziju ugljika iz austenita na grafitne listiće ograničen je brzinom hlađenja. Što je hlađenje sporije, to je više vremena na raspolaganju za difuziju ugljika iz austenita. Smanjenjem udjela ugljika u austenitu povećava se mogućnost stvaranja ferita tijekom eutektoidne pretvorbe.

Zbog utjecaja na mikrostrukturu, brzina hlađenja utječe i na svojstva odljevaka od sivog lijeva. Na slici 2.14 može se vidjeti da se kod svih kvaliteta sivog lijeva vlačna čvrstoća smanjuje s porastom debljine stijenke odljevka, odnosno sa smanjenjem brzine hlađenja. Uzrok je prisutnost većih grafitnih listića i povećanje udjela ferita s povećanjem debljine stijenke.



Slika 2.14. Utjecaj debljine stijenke odljevka na vlačnu čvrstoću sivog lijeva [26]

2.6. Proizvodnja sivog lijeva

Proizvodnja sivog lijeva obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu taline [1]. Priprema taline predstavlja važan korak u procesu proizvodnje odljevaka od sivog lijeva. Metalurška kvaliteta taline, koja utječe na njen nukleacijski i grafitizacijski potencijal, ovisi o sirovinama, odnosno uložnim materijalima od kojih se izrađuje, kontroli procesa taljenja, pripremi taline i cijepljenju [1].

2.6.1. Sirovine za izradu taline sivog lijeva

Za izradu taline sivog lijeva koriste se metalne i nemetalne sirovine. **Sirovo željezo** predstavlja najvažniju i najpogodniju sirovinu za proizvodnju sivog lijeva. Proizvodi se u visokim pećima taljenjem željezne rude. Sadrži visok udio željeza i mali udio nepoželjnih elemenata, prije svega karbidotvoraca [1, 2, 5]. Idealno bi bilo da sirovo željezo ima visok udio ugljika ($\geq 4,0$ mas. %), nizak udio silicija ($< 1,0$ mas. %) i ništa drugo osim željeza [1]. Međutim, obično još sadrži manji udio mangana, fosfora i sumpora. Primjenom sirovog željeza visoke čistoće u odgovarajućem udjelu moguće je smanjiti ukupni udio nepoželjnih elemenata u ulošku (npr. kroma, vanadija itd.). Zbog toga mnoge ljevaonice dodaju određeni udio sirovog željeza u uložak zajedno s čeličnim otpadom. Posebno je značajan njegov povoljan utjecaj na nukleacijski potencijal taline, što znači da se upotrebom sirovog željeza promovira stvaranje grafita i smanjuje mogućnost nastanka karbida [1, 2, 5].

Prednosti koje daje sirovo željezo kao komponenta uloška su sljedeće [2, 5]:

- ugljik se nalazi u Fe_3C obliku i na taj se način gotovo potpuno otapa u tekućoj fazi te je potrebna manja energija kako bi se preveo u tekuću fazu,
- zbog niske koncentracije rezidualnih elemenata sirovo željezo se upotrebljava za razrjeđivanje rezidualnih elemenata u ulošku,
- povećanjem udjela sirovog željeza u ulošku poboljšava se nukleacijski potencijal taline,
- ima nisku temperaturu taljenja,
- poboljšava brzinu taljenja te smanjuje potrošnju energije zbog velike gustoće i visokog udjela ugljika. U indukcijskim pećima može se očekivati ušteda od ~ 50 kWh/t taline. U kupolnim pećima smanjenje potrošnje koksa može iznositi do 50 kg/t taline,
- lakše se postiže feritna metalna osnova u odljevku jer ne sadrži elemente koji promoviraju perlit ili ih sadrži u malim količinama.

Udio sivog sirovog željeza u ulošku može značajno varirati ovisno o vrsti i zahtjevima koje odljevak mora ispuniti te raspoloživosti. Treba istaknuti da se radi o skupljijoj sirovini od čeličnog otpada.

Čelični otpad koji se koristi kao sirovina za proizvodnju sivog lijeva mora biti zadovoljavajuće kvalitete u pogledu čistoće i udjela nepoželjnih elemenata, prije svega karbidotvoraca [1, 2]. Određena količina čeličnog otpada u ulošku je potrebna da bi se snizio udio ugljika i silicija u ulošku jer sirovo željezo često sadrži previsok udio tih elemenata. Međutim, preveliki udjeli donose razne probleme kao što su: porast potrošnje koksa ili električne energije za taljenje, produžetak vremena taljenja, povećana potreba za dodatkom sredstava za naugljčenje, smanjenje metalurške kvaliteta taline i povećanje količine troske (posebno ako se radi o korodiranom čeličnom otpadu), porast opasnosti od kontaminacije

legirnim elementima (krom, mangan, molibden itd.), potreba za naknadnom toplinskom obradom odljevaka koji moraju imati nizak udio perlita u mikrostrukturi (ako otpad ima visok udio perlitizirajućih elemenata) te je potrebno jače cijepljenje taline kod većih udjela čeličnog otpada u ulošku zbog slabijeg grafitizacijskog potencijala [1, 2].

U **povratni materijal** unutar ljevaonice spadaju uljevni sustavi, pojila i škartni odljevci [1, 2]. Količina povratnog materijala u ulošku drugačija je u svakoj ljevaonici, a ovisi o dostupnosti tog materijala. Prednost korištenja vlastitog povratnog materijala je poznat kemijski sastav. S ekonomskog gledišta cilj svake ljevaonice je da količina povratnog materijala bude što manja. Jako je bitno pravilno razvrstavati povratni materijal u ljevaonici prema kemijskom sastavu da bi se kasnije mogao upotrijebiti na način da se što više iskoriste legirni elementi iz njega [1].

Otpadni željezni lijev može se također koristiti kao dio uloška za izradu taline sivog lijeva. U biti radi se o odljercima od željeznih ljevova koji nisu više za upotrebu, npr. istrošeni blokovi (kućišta) motora s unutarnjim izgaranjem, istrošeni kočioni diskovi i bubnjevi od automobila, kućišta raznih sklopova odlivena od željeznih ljevova itd..

Silicij-karbid (SiC) najčešće sadrži 30 mas. % C i 70 mas. % Si. Upotrebljava se za poboljšanje metalurške kvalitete taline, odnosno nukleacijskog potencijala, ali i za naugličenje taline, te povećanje udjela silicija u talini [1, 2].

Ferolegure, poput FeSi, SiMn, FeCr, FeMo itd., dodaju se u peć s uloškom ili u lonac s talinom, a svrha im je legiranje taline određenim elementima [1, 2]. Ključno je poznavanje kemijskog sastava svake dodane ferolegure. Kod dodatka ferolegura u talinu treba paziti da one nisu vlažne i da ne sadrže previše oksida [1, 2].

Sredstva za naugličenje dodaju se kao komponente uloška i kao dodatak nakon taljenja s ciljem postizanja propisanog udjela ugljika u talini. Iskorištenje ugljika iz dodanog sredstva za naugličenje ovisi o sljedećim čimbenicima [2]: veličini komada (prikladno je da komadi budu manje veličine jer se brže otapaju u talini), temperaturi taline (viša temperatura znači brže otapanje), vremenu (duže vrijeme rezultira s više otopljenog ugljika), udjelu pepela (viši udjeli pepela u sredstvu za naugličenje doprinose formiranjem sloja troske koji otežava otapanje grafitnih čestica u talini) i udjelu ugljika u talini (topljivost ugljika iz sredstva za naugličenje u talini je veća pri nižim udjelima ugljika u talini te miješanju taline (mrežno-frekventne i srednje frekventne indukcijske peći postižu bolje miješanje sredstva za naugličenje s talinom nego elektrolučne ili kanalne indukcijske peći)).

Najčešće se u ljevaonicama kao sredstva za naugličenje koriste petrol koks, grafitne elektrode, sintetički grafit itd. [1, 2]. Kvaliteta sredstava za naugličenje ovisi o udjelu ugljika [2]. Prije upotrebe sredstva za naugličenje treba obratiti pažnju na udio dušika, sumpora i pepela u njemu. Dodatkom sredstva za naugličenje s povišenim udjelom sumpora povećava se udio sumpora u talini, što može u pojedinim slučajevima zahtijevati odsumporavanje izvan peći. Prevelik udio dušika u talini može uzrokovati plinsku poroznost u odljercima [1].

Ljevaonički koks koristi se u kupolnim pećima i služi kao izvor energije za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala [1, 2, 27]. Trebao bi sadržavati što manji udio pepela (< 10 %), sumpora (< 0,7 %) i volatila (< 1 %), dok bi udio ugljika trebao biti > 90 % [27]. Dodatak koksa obično se kreće od 8 do 16 % u odnosu na masu metalnog uloška [27].

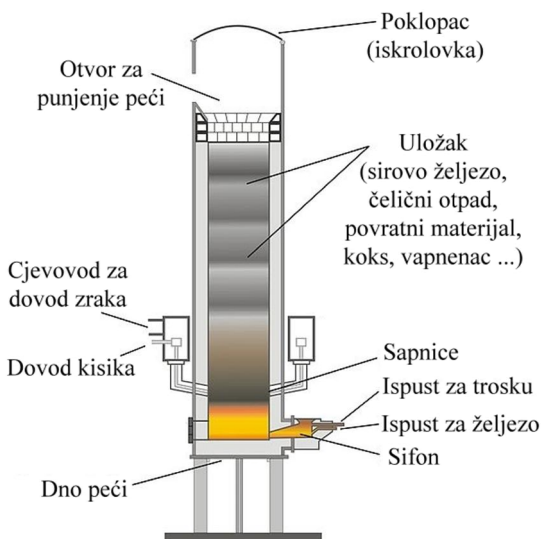
Talitelji (vapnenac ili dolomit) se dodaju u kupolnu peć s ciljem stvaranja tekuće troske koja veže nečistoće (npr. pepeo iz koksa) i nepoželjne elemente iz taline (npr. sumpor) [1, 9, 27]. Vapnenac (ili dolomit) mora sadržavati minimalno 96 % CaCO_3 (i MgCO_3), a veličina komada treba iznositi od 25 do 75 mm [27]. Udio SiO_2 treba biti što manji. Dodatak vapnenca ili dolomita u kupolnu peć s kiselim vatrostalnom oblogom obično iznosi od 2 do 5 % u odnosu na masu metalnog uloška [27]. Premali dodatak talitelja rezultirat će previskoznom troskom, dok prevelika količina dodanih talitelja agresivno djeluje na vatrostalnu oblogu [9]. Viskoznost troske ne smije biti velika jer u tom slučaju opada njena aktivnost. Zbog toga se dodaje fluorit (CaF_2) koji razrjeđuje trosku [27].

2.6.2. Izrada taline sivog lijeva

Talina sivog lijeva najčešće se izrađuje u kupolnim ili indukcijskim pećima [1, 2]. **Kupolna peć** je šahna peć čija je primarna funkcija taljenje krutog uloška za masovnu proizvodnju željeznih ljevova. Na slici 2.15 shematski je prikazana kupolna peć i njeni glavni dijelovi.

Temelj peći služi za postavljanje čeličnih nosača (nogu) peći i pridržavanje cjelokupne konstrukcije peći, a izrađen je od armiranog betona [2]. Na noge peći postavlja se postolje peći odnosno nosiva ploča od lijevanog čelika ili sivog lijeva kružnog ili kvadratnog poprečnog presjeka. Plašt peći (cilindar od čeličnog lima) nalazi se na postolju peći [2]. S donje strane postolja postoji otvor tj. vrata kroz koja se iz peći uklanja neiskorišteni materijal nakon taljenja.

Plašt je glavni dio kupolne peći gdje se odvija izgaranje goriva (koksa) čime se dobiva energija za taljenje uloška. U donjem dijelu plašta peći nalazi se otvor za ispuštanje tekućeg metala i troske. Temperature taline na ispustu iz kupolne peći kreću se oko 1500 °C [2].



Slika 2.15. Shematski prikaz kupolne peći [28]

Na plaštu peći nalaze se sapnice putem kojih se u peć uvodi zrak potreban za izgaranje koksa. U gornjem dijelu plašta peći nalazi se otvor za ulaganje uloška u peć. Iznad tog otvora cilindrični plašt peći prelazi u dimnjak koji odvodi produkte izgaranja. Gornji dio dimnjaka ulazi u iskrolovku čiji je zadatak zadržati užarene čestice koksa i prašine koje s dimnim plinovima dolaze do dimnjaka.

U kupolnoj peći od dna do određene visine iznad sapnica nalazi se koks određene krupnoće koji čini tzv. koksnu podlogu [1]. Osnovni zadatak koksne podloge je da nosi težinu zasipa koji se nalazi iznad nje, a to je moguće zbog visoke temperature taljenja koksne podloge ($\sim 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ugljik iz koksa izgara s kisikom iz zraka pri čemu se oslobađa toplina potrebna za zagrijavanje i taljenje uložnih materijala. Iznad podloge nalazi se zasip peći kojeg čine naizmjenični slojevi metalnog uloška, koksa i talitelja. Peć se puni do otvora za ulaganje i uvijek se održava punom.

U peć se najprije ubacuje samo koks do određene visine kako bi se formirala koksna podloga. Prije daljnjeg ulaganja taj koks se zapali, a kada se užari ulažu se naizmjenično komponente zasipa. Zrak se počinje puštati kroz sapnice kada se peć napuni. Zasip se spušta prema dolje kako se tali. Zagrijavaju ga vrući plinovi koji dolaze iz donjeg dijela peći, a nastaju izgaranjem koksa ispred sapnica. Kapljice tekućeg metala padaju kroz koksnu podlogu i skupljaju se na dnu peći. Zbog stalnog kontakta s koksom, tekući metal veže ugljik i sumpor iz koksa. Troska se nalazi iznad tekućeg metala. Taljenje u kupolnoj peći odvija se kontinuirano tj. peć se neprestano puni kako se materijal spušta prema dolje.

Prednosti kupolnih peći u odnosu na ostale agregate za taljenje u proizvodnji željeznih ljevova su sljedeće [1]:

- najniži radni troškovi pri velikoj proizvodnji,
- mogućnost taljenja komada velikih dimenzija i velike mase,
- nema potrebe za potpuno suhim uložnim materijalima jer se uložak predgrijava u gornjem dijelu peći, odnosno prije taljenja,
- nepoželjni elementi prelaze u trosku, što znači da se odvija rafinacija,
- talina proizvedena u kupolnoj peći ima visoku metaluršku kvalitetu.

Osnovni nedostatak kupolne peći je nemogućnost brzih promjena kemijskog sastava taline [1].

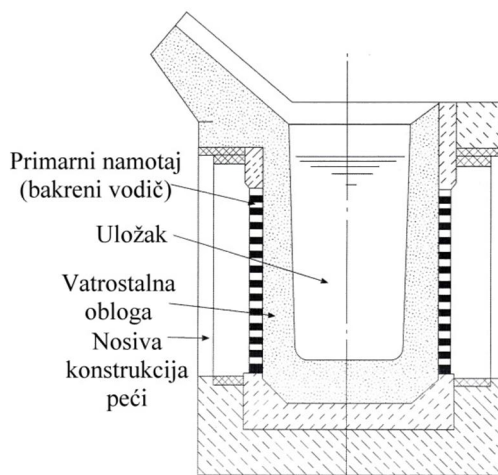
Indukcijske peći su suvremeni agregati za taljenje, a pred kupolnim pećima imaju niz prednosti. Neke od prednosti su [1]: brže zagrijavanje i taljenje uloška, mali odgor elemenata, relativno jednostavna kontrola kemijskog sastava te mogućnost postizanja viših temperatura. Proizvodnja taline s nižim udjelom sumpora i pratećih elementa znatno je lakša. Talina dobivena u indukcijskim pećima treba vrlo male korekcije nakon taljenja, a često korekcije uopće nisu potrebne [1]. Osim prednosti postoje i određeni nedostaci u odnosu na kupolne peći, kao što su: veći investicijski troškovi i veći troškovi taljenja zbog visoke cijene električne energije [1]. Pored toga, fosfor i sumpor ne mogu se ukloniti iz taline, stoga je potrebno obratiti pozornost na uložni materijal. Budući da se ne dodaju talitelji, količina troske je mala i zbog toga se ne može postići rafinacijski učinak kao u kupolnoj peći.

Zagrijavanje i taljenje uloška u indukcijskim pećima provodi se na principu pretvorbe električne energije u toplinu. Metalni uložak okružen je primarnim namotajem (bakrenim vodičem) kroz koji prolazi izmjenična struja koja stvara magnetsko polje. Nastalo magnetsko polje rezultira vrtložnim strujama u metalnom ulošku. Zbog otpora, dio električne energije u obliku vrtložnih struja transformira se u toplinsku energiju zagrijavajući metalni uložak [29].

Taline iz indukcijskih peći obično imaju niži udio plinova pod uvjetom da se ne zadržavaju na povišenim temperaturama duže vrijeme. Međutim, imaju lošiju metaluršku kvalitetu od talina iz kupolnih peći. Dužim zadržavanjem na povišenim temperaturama u indukcijskim pećima povećava se sklonost taline ka pothlađenju tijekom skrućivanja, a to znači da joj se smanjuje nukleacijski potencijal.

Postoje dvije vrste indukcijskih peći, a to su indukcijske peći s loncem (bez jezgre) (slika 2.16) i kanalne indukcijske peći (s jezgrom). Obje su vrste zasnovane na sličnim

električnim principima, ali se dosta razlikuju prema mogućnostima i namjeni. Indukcijske peći s luncem upotrebljavaju se za taljenje i zagrijavanje taline, dok se kanalne indukcijske peći koriste za držanje taline i zagrijavanje te za dupleks postupak u kombinaciji s kupolnom peći.



Slika 2.16. Shematski prikaz indukcijske peći s luncem [9]

U tablici 2.4 prikazan je tipični sastav metalnog uloška za indukcijsku peć ovisno o kvaliteti sivog lijeva koja se proizvodi.

Tablica 2.4. Tipični sastavi metalnog uloška za proizvodnju sivog lijeva u indukcijskoj peći [5]

	Kvaliteta		
	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250
Sirovo željezo	25 %	30 %	25 %
Povratni materijal	40 %	35 %	35 %
Otpadni željezni lijev	30 %	20 %	15 %
Čelični otpad	5 %	15 %	25 %

2.6.3. Predobrada taline sivog lijeva

Predobrada (predpriprema) se provodi s ciljem smanjenja varijacija metalurške kvalitete talina i povećanja učinkovitosti naknadnog cijepljenja kako bi se dobile manje varijacije svojstava odljevaka [1, 30]. Predobradom se povećava grafitizacijski i nukleacijski potencijal taline [1, 2, 30].

Za predobradu talina sivih željeznih ljevova u kupolnim i indukcijskim pećima najčešće se upotrebljava silicij-karbid (SiC) [1]. Obično sadrži do 92 % SiC [31]. Pored toga, sadrži još i manje udjele slobodnog ugljika i silicija, SiO_2 , ali i vrlo niske udjele dušika, vodika, sumpora i aluminija [31].

Silicij-karbid dodaje se u peć zajedno s metalnim uloškom u količinama do 1 % jer se vrlo sporo otapa [31]. Brzina otapanja zavisi od miješanja taline, veličine čestica SiC , te udjela ugljika i silicija. On se otapa sporo i endotermno u talini željeznog lijeva za razliku od FeSi . Obzirom da ima visoko talište ($\sim 2700^\circ\text{C}$), ne tali se u talinama željeznih ljevova, nego samo otapa kao šećer u kavi [31]. Zbog toga stabilne sitne čestice silicij-karbida u talini

djeluju kao potencijalna mjesta za nukleaciju grafita duže vrijeme zbog visoke temperature taljenja.

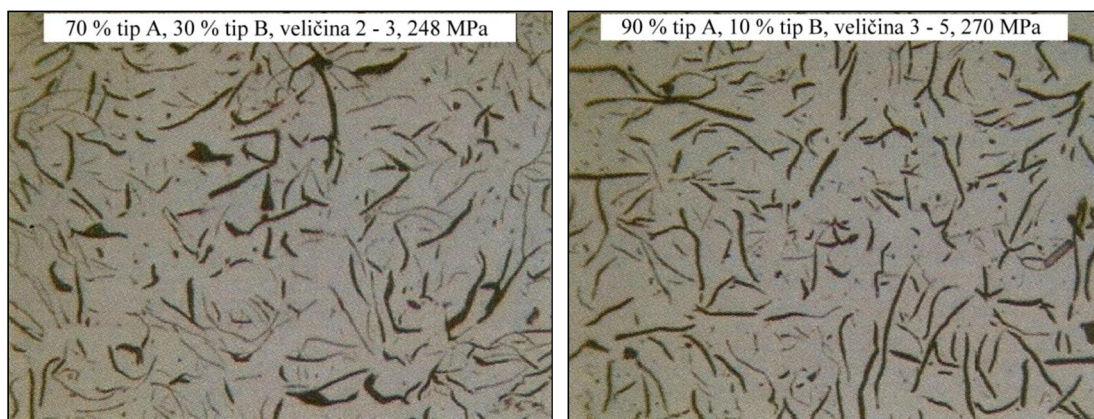
Silicij-karbid potpomaže grafitizaciju stvaranjem većeg broja klica, odnosno potencijalnih mjesta za nukleaciju grafita. To je moguće zbog prisutnosti lokalnih visokih koncentracija ugljika i silicija tijekom otapanja silicij-karbida [31]. Mnogobrojna područja visoke koncentracije ugljika i silicija imat će nadeutektni sastav čime se potpomaže grafitizacija. Na taj način smanjuje se pothlađenje i sklonost prema stvaranju cementita te pospješuje djelotvornost cjepljenja.

U novije je vrijeme razvijeno sredstvo za predobradu na bazi FeSi koje osim silicija (62 do 69 %) sadrži 3 do 5 % aluminija, 3 do 5 % cirkonija i 0,6 do 1,9 % kalcija (ostatak do 100 % je željezo) [32, 33]. Prvenstveno je namijenjeno za predobradu, odnosno povećanje nukleacijskog potencijala talina sivog lijeva.

Prema novijim spoznajama o nukleaciji listićavog grafita u sivom lijevu aluminij i cirkonij imaju značajnu ulogu u stvaranju jezgre uključaka za nukleaciju grafita [17, 33]. Složeni spojevi (Mn,X)S, gdje je X = željezo, aluminij, kalcij, silicij, fosfor, cirkonij, titan, stroncij itd., nukleiraju na mikrouključcima (stabilnim oksidima) i djeluju kao nukleacijska mjesta za grafitne listiće.

Ovo sredstvo je naročito efikasno u indukcijskim pećima. Dodaje se nakon uklanjanja troske prije ispusta u količini od 0,1 % [32]. Ne smije se dodati u trosku jer bi se smanjila njegova učinkovitost.

Dodatkom sredstva za predobradu na bazi FeSi koji sadrži aluminij i cirkonij u proizvodnji sivog lijeva potpomaže se stvaranje grafitnih listića A tipa (slika 2.17), smanjuje se mogućnost stvaranja grafitnih listića B, D i E tipa, pothlađenje taline i rekalescencija također se smanjuju, a vlačna čvrstoća povećava za 10 do 15 % [34]. Ovo sredstvo smanjuje potrebnu količinu sirovog željeza u ulošku, smanjuje tendenciju prema stvaranju karbida i volumnom stezanju tijekom skrućivanja, a pad metalurške kvalitete taline s vremenom zadržavanja je manji [34].



a)

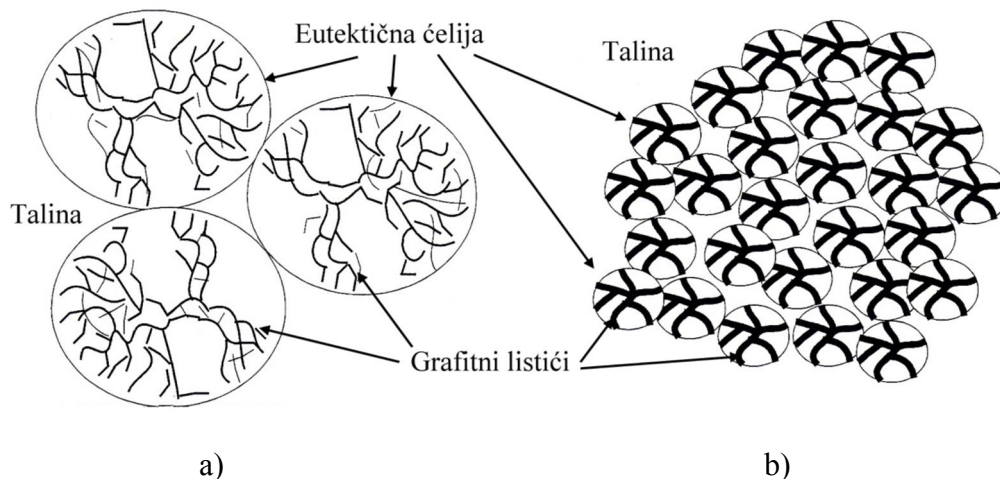
b)

Slika 2.17. Mikrostruktura sivog lijeva: a) bez dodatka sredstva za predobradu, cijepljenje u mlaz taline pri ispustu s 0,3 % cjepljenja koje sadrži do 1 % Sr, b) dodatak sredstva za predobradu na bazi FeSi koje sadrži aluminij i cirkonij (do 5 %) te manji udio kalcija (do 2 %), cijepljenje s 0,3 % cjepljenja koje sadrži do 1 % Sr u mlaz taline pri ispustu. Sastav uloška: čelični otpad 50 %, povratni materijal 50 %, uz mali dodatak FeSi, FeMn, FeS i sredstva za naugličenje. Kemijski sastav: 3,36 mas. % C, 2,13 mas. % Si, 0,64 mas. % Mn, 0,042 mas. % P, 0,094 mas. % S, 0,13 mas. % Cu, 0,01 mas. % Ni, 0,097 mas. % Cr, 0,011 mas. % Mo, 0,005 mas. % Sn, 0,01 mas. % Al [34]

2.6.4. Cijepljenje sivog lijeva

Cijepljenje značajno utječe na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva [1, 2]. Najznačajniji učinci koji se postižu cijepljenjem sivog lijeva su [1]:

- modifikacija uključaka u talini s ciljem formiranja pogodnih mjesta za nukleaciju grafita,
- smanjenje pothlađenja jer se povećava broj pogodnih mjesta za nukleaciju grafita, što rezultira većim brojem manjih eutektičnih ćelija (slika 2.18) te sitnijim, jednolično raspoređenim grafitnim listićima A tipa,
- smanjenje sklonosti ka stvaranju eutektičnih karbida (Fe_3C) tijekom skrućivanja jer se smanjuje pothlađenje taline tijekom skrućivanja,
- smanjenje rekalescencije tijekom eutektičnog skrućivanja (cjepivo povišuje temperaturu eutektičnog pothlađenja (T_{EP}) i tako snižava temperaturu eutektične rekalescencije (T_{ER})),
- smanjuje se osjetljivost na debljinu stijenke tj. brzinu hlađenja te se tako postižu manje razlike u svojstvima između tankih i debelih stijenki odljevka,
- poboljšava se niz svojstava (vlačna čvrstoća, itd.).



Slika 2.18. Utjecaj cjepiva na broj eutektičnih ćelija tijekom skrućivanja sivog lijeva: a) bez dodatka cjepiva, b) s dodatkom cjepiva [11]

U praksi se primjenjuju različita cjepiva za sivi lijev (tablica 2.5). Može se vidjeti da se u biti radi o FeSi koji sadrži manji udio elemenata značajnih za formiranje uključaka pogodnih za izlučivanje listićavog grafita, kao što su aluminij, kalcij, stroncij, barij i cirkonij.

Količina dodanog cjepiva u talinu ovisi o kemijskom sastavu cjepiva, načinu dodavanja (u lonac, u kalup, u mlaz taline prilikom ulijevanja u kalup itd.), učinku koji se želi postići, vremenu zadržavanja taline u loncu itd. U većini slučajeva ukupni dodatak cjepiva iznosi od 0,1 do 0,4 % (0,5 %) u odnosu na masu taline [1].

Tablica 2.5. Kemijski sastav najčešćih cjevica za sivi lijev [1]

Redni broj	Element, mas. %								
	Si	Al	Ca	Sr	Ce	Mn	Ba	Zr	Ostali
1	74 – 79	0,6 – 1,25	0,5 – 1	-	-	-	-	-	-
2	74 – 79	0,4 – 0,5	0,1 – 0,2	-	-	-	-	-	-
3	74 – 79	0,6 – 1,1	1 – 2	-	-	-	-	-	-
4	46 – 50	maks. 1,2	0,6 – 0,9	-	-	-	-	-	-
5	60 – 65	0,9 – 1,1	28 – 32	-	-	-	-	-	-
6	50 – 55	1 – 3	0,5 – 1,5	-	-	-	-	-	Ti 9 – 11
7	60 – 65	1 – 1,5	1,5 – 3	-	-	9 – 11	4 – 6	-	-
8	60 – 65	0,75 – 1,25	0,6 – 0,9	-	-	5 – 7	0,6 – 0,9	5 – 7	-
9	36 – 40	maks. 0,5	maks. 0,5	-	9 – 11	-	-	-	Ukupno RE 11 – 15
10	73 – 78	maks. 0,5	maks. 0,1	0,6 – 1	-	-	-	-	-
11	46 – 50	maks. 0,5	maks. 0,1	0,6 – 0,9	-	-	-	-	-
12	78 – 82	1,0 – 3,0	2,25 – 2,5	-	-	-	-	1,25 – 1,75	-
13	74 – 79	maks. 1,25	0,75 – 1,25	-	-	-	0,75 – 1,25	-	-
14	74 – 79	maks. 1,25	1	-	-	-	2	-	-
15	67	-	1,0	-	-	-	2,0	-	Ti 9,0

* ostatak do 100 % predstavlja udio željeza u cjeviku

** RE – elementi rijetkih zemalja

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu je analiziran utjecaj različitih sastava uloška za izradu taline, debljine stijenke odljevka i cijepjenja na mikrostrukturu sivog lijeva. Izrada talina sivog lijeva i lijevanje ispitnih odljevaka provedeno je u ljevaonici Plamen d.o.o. u Požegi. Mikrostruktura odljevaka je analizirana na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

3.1. Izrada talina sivog lijeva

Tri taline sivog lijeva izrađene su u srednje-frekventnoj indukcijskoj peći radnog kapaciteta 8 t i snage 5500 kW (slika 3.1). Sastav uloška prikazan je u tablici 3.1. Udjeli sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog sivog lijeva u ukupnom ulošku i metalnom ulošku prikazani su u tablici 3.2. Kemijski sastav komponenti uloška prikazan je u tablici 3.3. Metalni uložak sastoji se od sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog sivog lijeva.



Slika 3.1. Ispust taline sivog lijeva iz srednje-frekventne indukcijske peći

Tablica 3.1. Sastav uloška za izradu talina sivog lijeva

Komponenta	Masa, kg		
	Talina 1	Talina 2	Talina 3
Sirovo željezo	3210	832	0
Čelični otpad	820	3268	0
Povratni sivi lijev	4004	4034	8998
SiC	50	135	5
FeP	49	58	5
FeS	0	7	6
Sredstvo za naugljičenje	10	90	50

Tablica 3.2. Udjeli sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog sivog lijeva u ukupnom ulošku i metalnom ulošku

Komponenta	Udio u ukupnom ulošku, mas. %		
	Talina 1	Talina 2	Talina 3
Sirovo željezo	39,4	9,9	0
Čelični otpad	10	38,8	0
Povratni sivi lijev	49,2	47,9	99,3
	Udio u metalnom ulošku, mas. %		
Sirovo željezo	40	10,2	0
Čelični otpad	10,2	40,2	0
Povratni sivi lijev	49,8	49,6	100

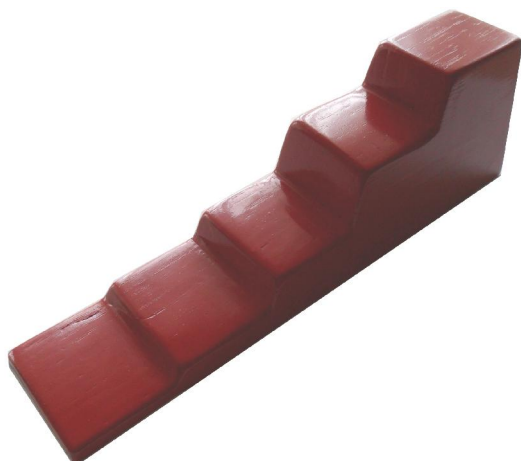
Tablica 3.3. Kemijski sastav komponenti uloška

	Udio, mas. %						
	Sirovo željezo	Čelični otpad	Povratni sivi lijev	SiC	FeP	FeS	Sredstvo za naugljčenje
C	4,41	0,09	3,56	2,90	0,1	0,3	min. 98
Si	1,25	0,13	2,05	-	1,86	0,96	-
Mn	0,13	0,71	0,43	-	1,91	-	-
P	0,08	0,024	0,32	-	25,72	0,01	-
S	0,02	0,014	0,091	0,05	0,04	49,37	maks. 1,2
Cu	0,01	0,03	0,19	-	-	-	-
Cr	0,01	0,027	0,071	-	-	-	-
Al	-	-	-	0,06	-	0,01	-
Ti	-	-	-	-	1,2	-	-
SiC	-	-	-	90,04	-	-	-
SiO ₂	-	-	-	2,8	-	-	-
Fe	ost.	ost.	ost.	0,4	ost.	ost.	-

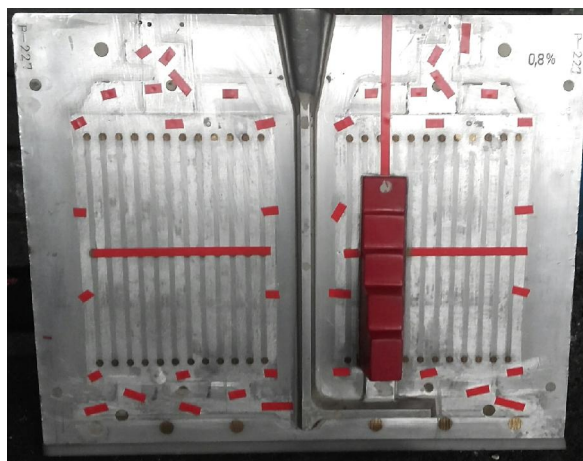
Nakon što je ostvaren ciljani kemijski sastav, taline sivog lijeva izlivena su iz peći u lonac. Temperatura talina u peći neposredno prije ispusta iznosila je 1510 °C.

3.2. Lijevanje stepenastih ispitnih odljevaka

Ispitivanja su provedena na odljevcima stepenastog oblika koji sadrže stijenke (stepenice) debljina 5, 10, 20, 45 i 65 mm (slika 3.2). Kalupi s vertikalnom diobenom ravninom dimenzije 600 x 480 x 210 mm izrađeni su od svježe kalupne mješavine na liniji za izradu kalupa (slika 3.3.a). Taline sivog lijeva izlivena su iz lonca u uređaj za lijevanje koji se nalazi pored linije za izradu kalupa (slika 3.3.b). Iz uređaja za lijevanje, koji u biti predstavlja specijalno konstruiranu indukcijsku peć, talina se potiskuje prema kalupima zbog pritiska zraka na njenu površinu. Čepnom motkom regulira se protok taline prema kalupu. Vrijeme lijevanja iznosilo je 3 s, a temperatura lijevanja kretala se od 1357 do 1369 °C. Masa ispitnog odljevka iznosila je 2,1 kg, odnosno 3,98 kg s uljevnim sustavom.

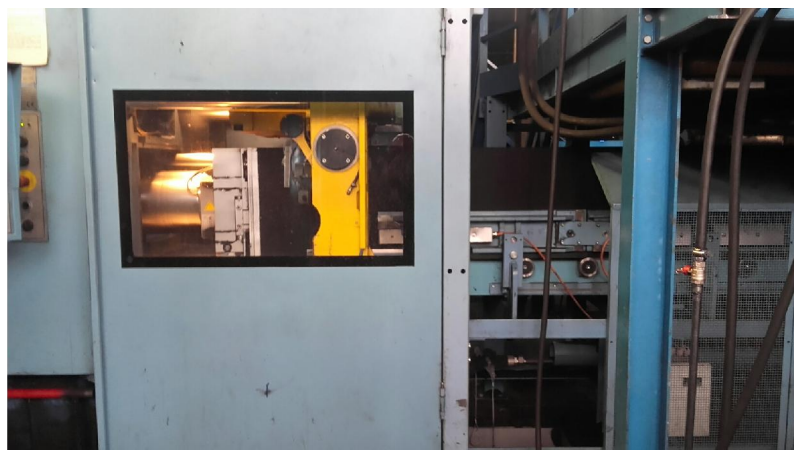


a)

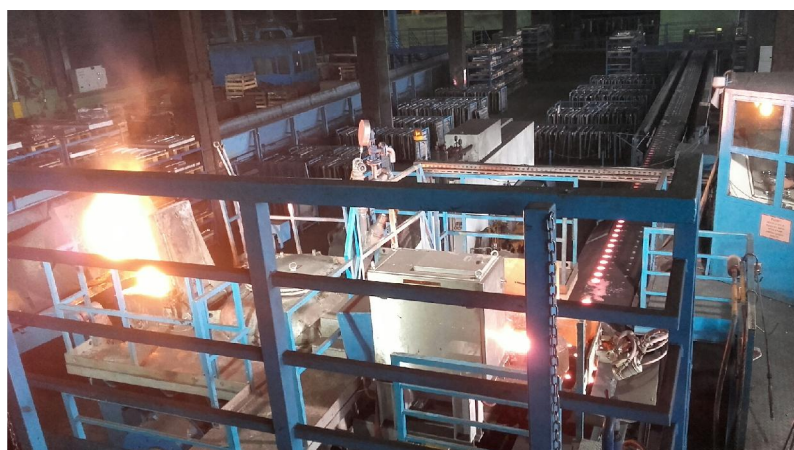


b)

Slika 3.2. a) model stepenastog ispitnog odljevka izrađen od drveta, b) model pričvršćen na modelnu ploču



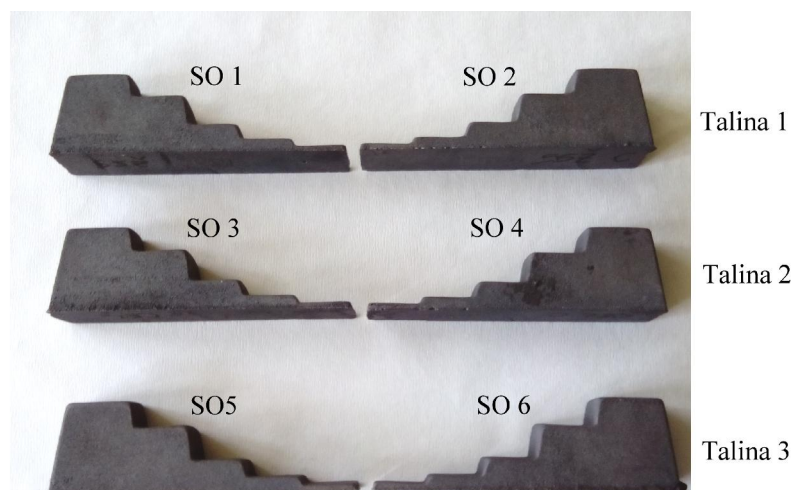
a)



b)

Slika 3.3. a) linija za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom (Disamatic® D131 A), b) lijevanje stepenastih ispitnih odljevaka iz uređaja za lijevanje (Junker RGD 4, kapacitet 4 t)

Od svake taline odlivena su dva stepenasta ispitna odljevka (SO) (slika 3.4). Jedan odljevak lijevan je bez, a drugi s dodatkom cjepiva u mlaz taline tijekom ulijevanja u kalup. Dodatak cjepiva iznosio je 0,23 % u odnosu na ukupnu masu taline u kalupu. Upotrijebljeno je cjepivo sljedećeg kemijskog sastava: 73 - 78 mas. % Si, 0,1 mas. % Ca, 0,6 - 1 mas. % Sr, 0,5 mas. % Al, a ostatak je Fe. Iz navedenog proizlazi da su stepenasti ispitni odljevci 1, 3 i 5 necijepljeni, a stepenasti ispitni odljevci 2, 4 i 6 cijepljeni.



Slika 3.4. Odliveni stepenasti ispitni odljevci

3.3. Metalografska analiza

Uzorci za metalografsku analizu izrezani su iz sredine svih stijenki na ispitnim odljercima i uloženi su u polimernu smolu. Pored toga, uzorci su uzeti i iz ruba stijenki debljine 5 mm iz svih stepenastih ispitnih odljevaka. Prva faza u procesu pripreme uzoraka je bilo brušenje na brusnim papirima gradacije 120, 240, 400 i 600 (slika 3.5.a). Nakon toga, uzorci su polirani na filcu uz dodatak vodene otopine glinice (slika 3.5.b). Na slici 3.6 prikazani su uzorci nakon pripreme.



a)



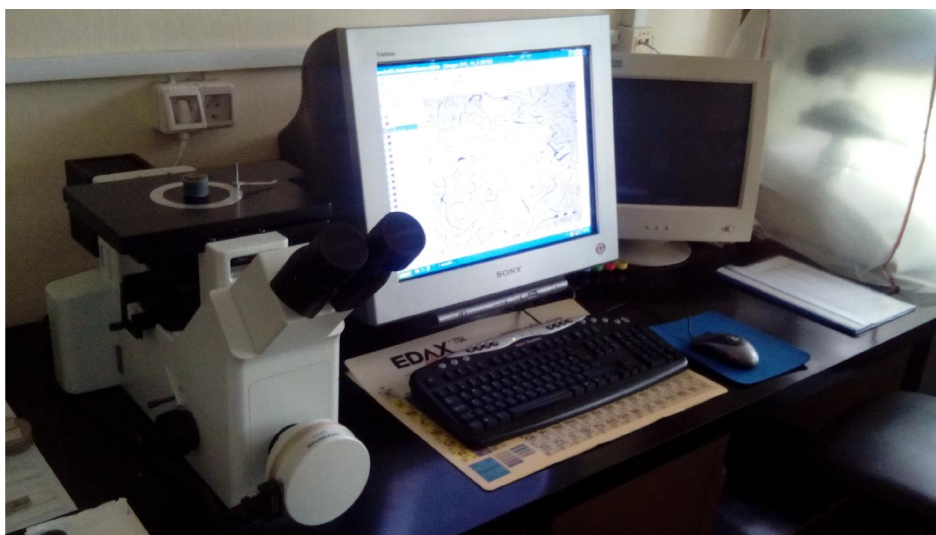
b)

Slika 3.5. Priprema uzoraka za metalografsku analizu: a) brušenje, b) poliranje



Slika 3.6. Pripremljeni uzorci za metalografsku analizu

Mikrostruktura uzoraka analizirana je pomoću svjetlosnog metalografskog mikroskopa OLYMPUS GX 51 s digitalnom kamerom i programskim paketom AnalySIS[®] Materials Research (slika 3.7).



Slika 3.7. Svjetlosni metalografski mikroskop OLYMPUS GX 51 s digitalnom kamerom i programskim paketom AnalySIS[®] Materials Research Lab za određivanje mikrostrukturnih značajki uzoraka

Uzorci su najprije analizirani u nenagrizenom stanju kako bi se utvrdio tip, veličina i raspodjela grafitnih listića. Nakon toga, uzorci su nagrizeni u 5 %-tnom nitalu ($\text{HNO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) kako bi se analizirala struktura metalne osnove, tj. odredio udio ferita i perlita te utvrdila eventualna prisutnost karbida i fosfidnog eutektika u mikrostrukтури.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Kemijski sastav talina sivog lijeva

Kemijski sastav talina sivog lijeva prikazan je u tablici 4.1.

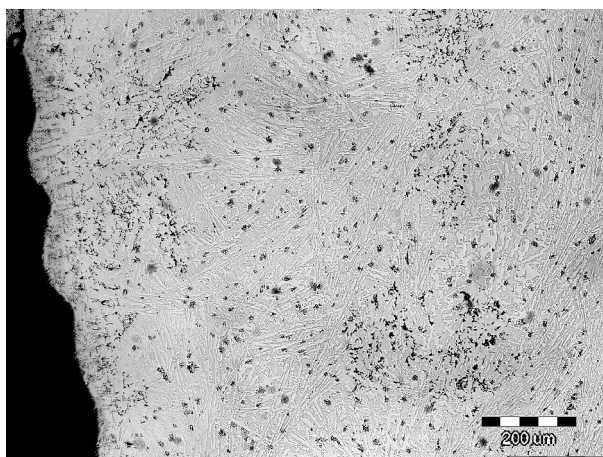
Tablica 4.1. Kemijski sastav talina sivog lijeva

	Kemijski sastav, mas. %							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	CE
Talina 1 (Stepenasti odljevci 1 i 2)	3,5	2,1	0,46	0,33	0,084	0,15	0,07	4,31
Talina 2 (Stepenasti odljevci 3 i 4)	3,53	2,12	0,4	0,36	0,1	0,18	0,07	4,36
Talina 3 (Stepenasti odljevci 5 i 6)	3,57	2,08	0,45	0,32	0,1	0,19	0,1	4,37

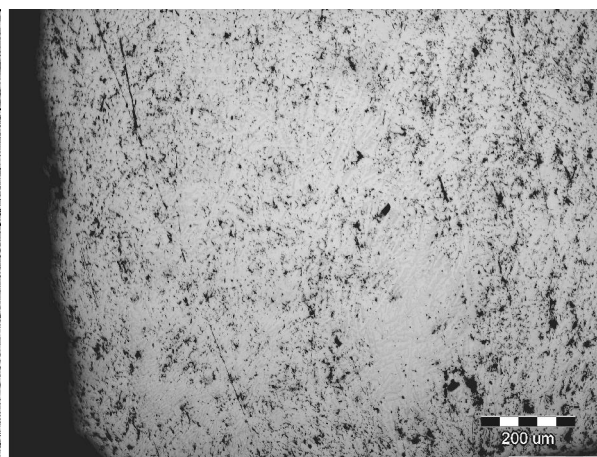
Podaci u tablici 4.1 pokazuju da su sve taline vrlo sličnog i blago nadeutektnog sastava. Iz toga razloga može se očekivati određeni udio grafitnih listića C tipa u mikrostrukturi koji nastaju tijekom skrućivanja talina nadeutektnog sastava. Udio silicija je relativno nizak, što može rezultirati stvaranjem karbida u stijenci debljine 5 mm zbog velike brzine hlađenja, posebno u odljevcima koji nisu cijepljeni. Zbog dodatka FeP u uložak, udio fosfora je relativno visok u svim talinama. Povišeni udjeli fosfora poboljšavaju livljivost. Međutim, mogu dovesti do stvaranja fosfidnog eutektika koji povećava krhkost i tvrdoću odljevaka. Ostvareni udjeli sumpora su optimalni za sivi lijev, što je značajno zbog njegove uloge u procesu nukleacije listićavog grafita. Udio mangana je dovoljan s obzirom na udio sumpora, što s jedne strane povoljno djeluje na nukleaciju listićavog grafita, jer MnS uključci djeluju kao potencijalna mjesta za nukleaciju grafita, a s druge strane sprječava formiranje FeS koji se izlučuje po granicama zrna i time povećava krhkost sivog lijeva. Sve tri taline ne sadrže povišen udio karbidotvornih i perlitizirajućih elemenata.

4.2. Mikrostrukturne značajke stepenastih ispitnih odljevaka

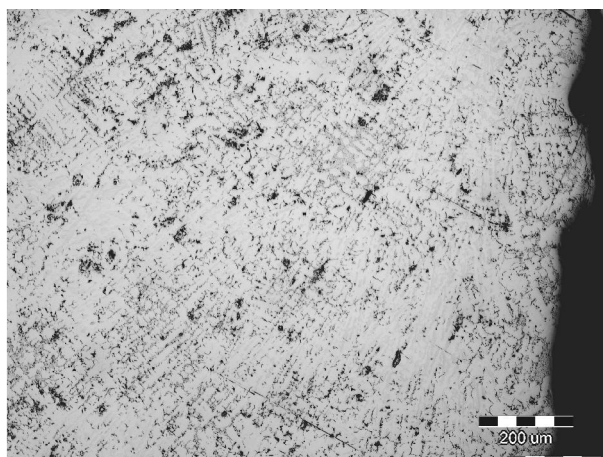
Na slikama 4.1 do 4.6 prikazane su metalografske snimke mikrostrukture svih stijenki iz ispitivanih stepenastih odljevaka (SO 1 do SO 6) u nenagrizenom stanju pri povećanju 100x. Za svaki stepenasti odljevak naznačeno je da li je cijepljen (CJ) te je navedena struktura metalnog uložka, tj. udio sirovog željeza (SŽ), čeličnog otpada (ČO) i povratnog sivog lijeva (PSL), kao i dodatak SiC.



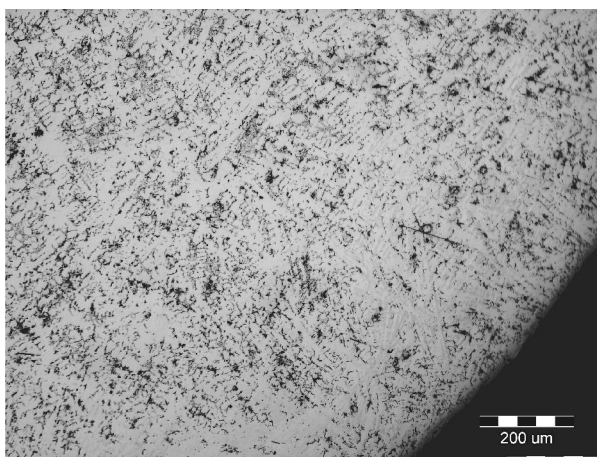
a)



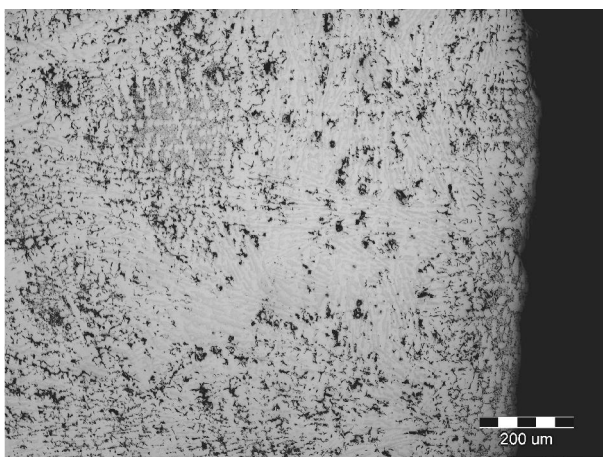
b)



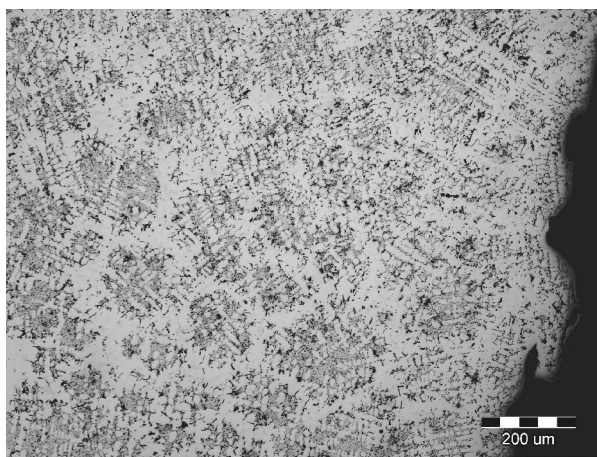
c)



d)

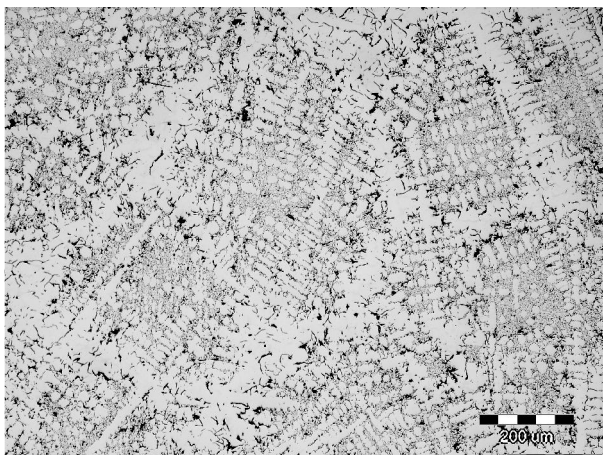


e)

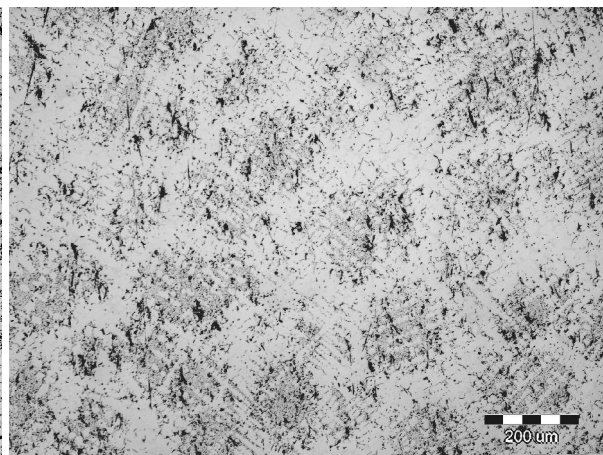


f)

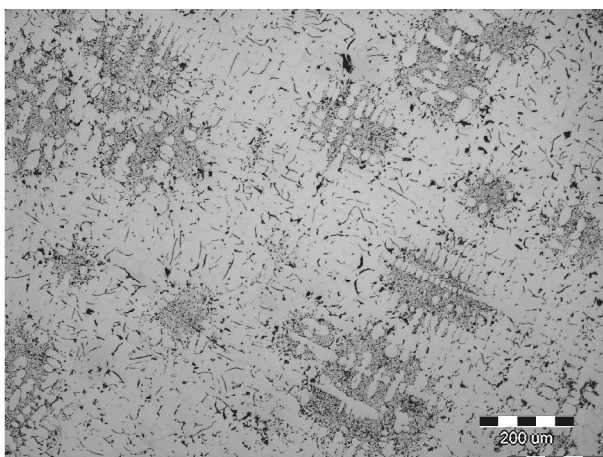
Slika 4.1. Metalografske snimke mikrostrukture ruba stijenke debljine 5 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



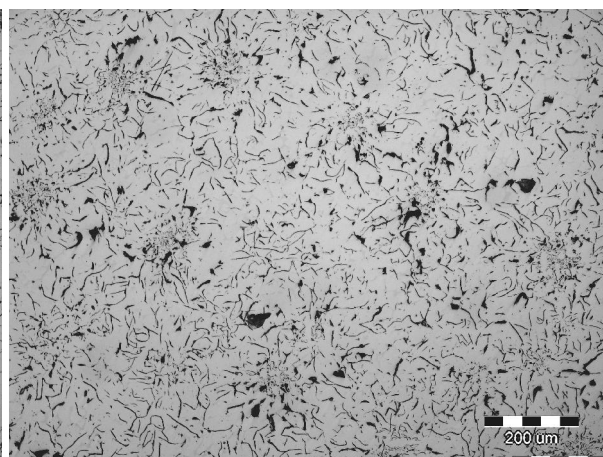
a)



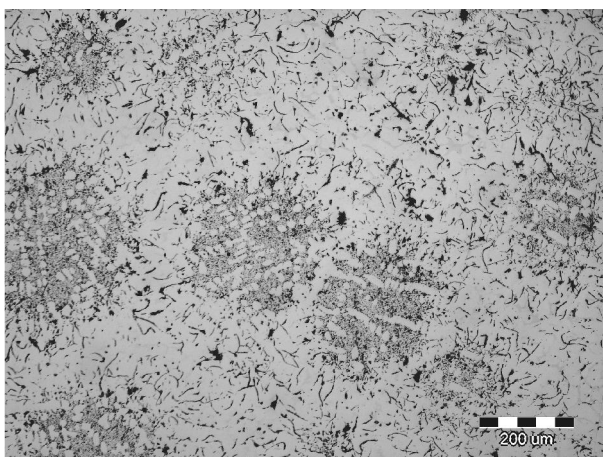
b)



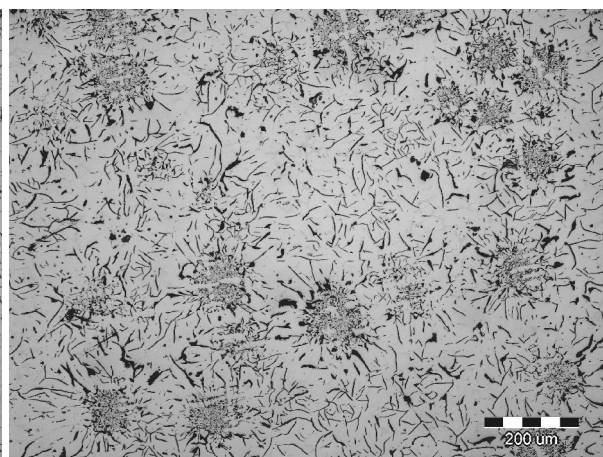
c)



d)

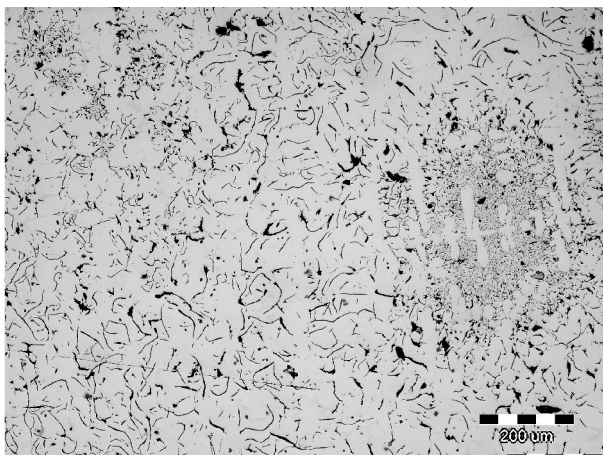


e)

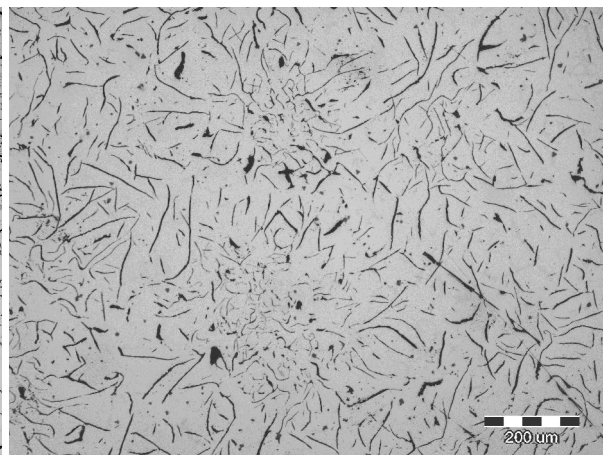


f)

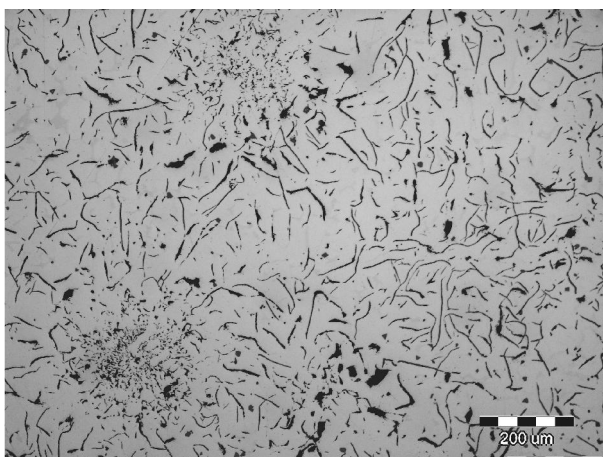
Slika 4.2. Metalografske snimke mikrostrukture sredine stijenke debljine 5 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



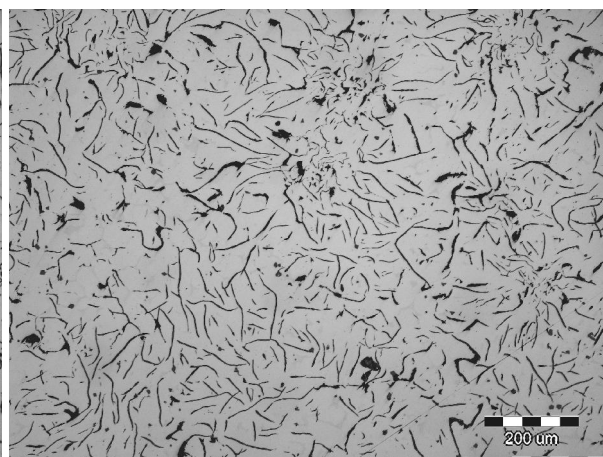
a)



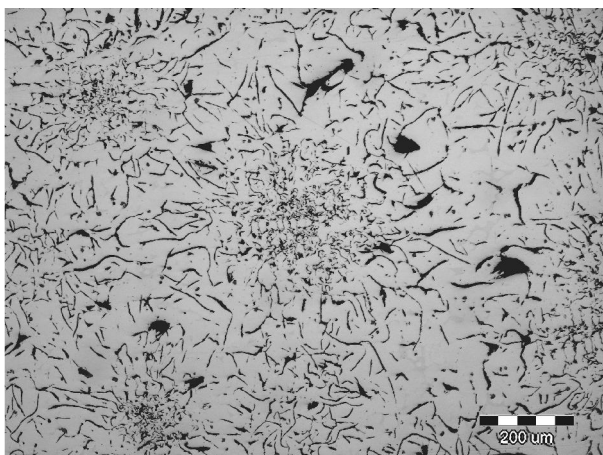
b)



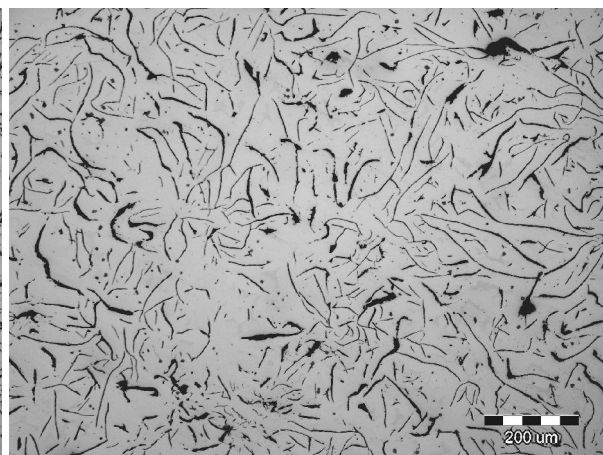
c)



d)

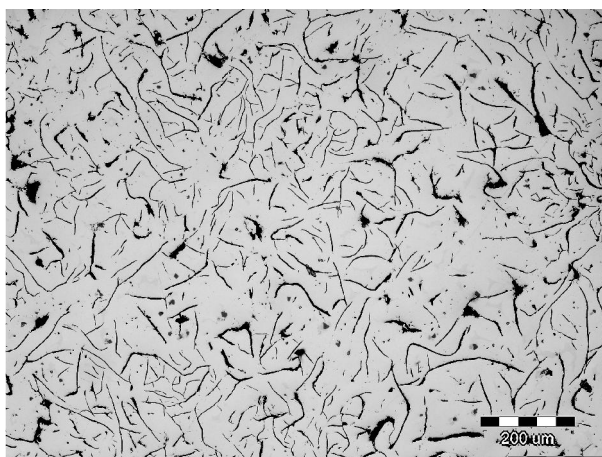


e)

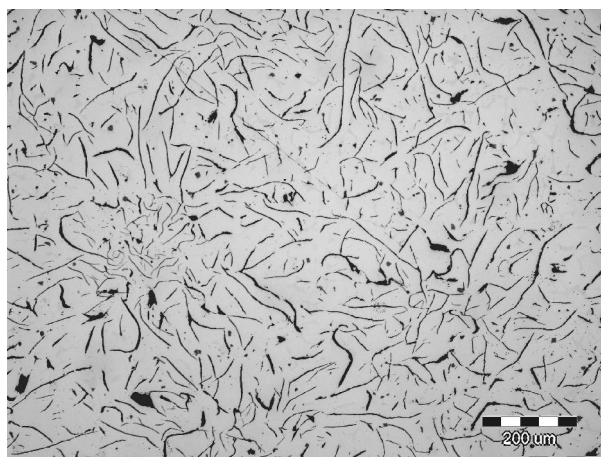


f)

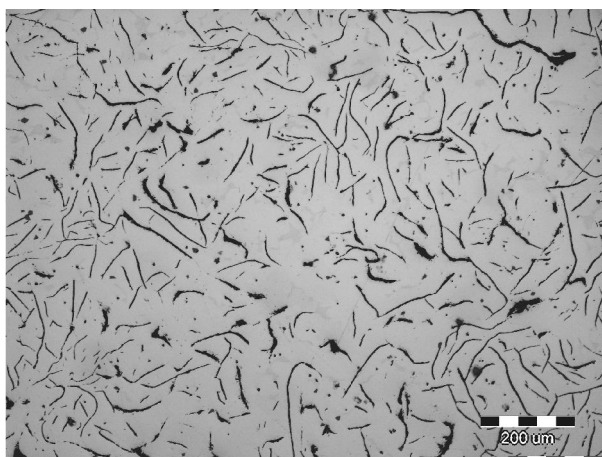
Slika 4.3. Metalografske snimke mikrostrukture stijenki debljine 10 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



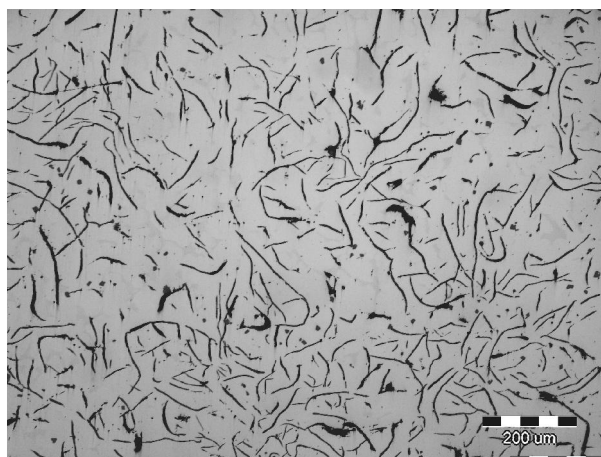
a)



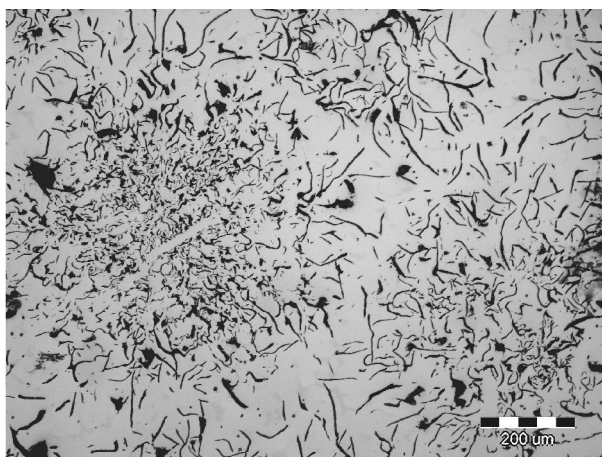
b)



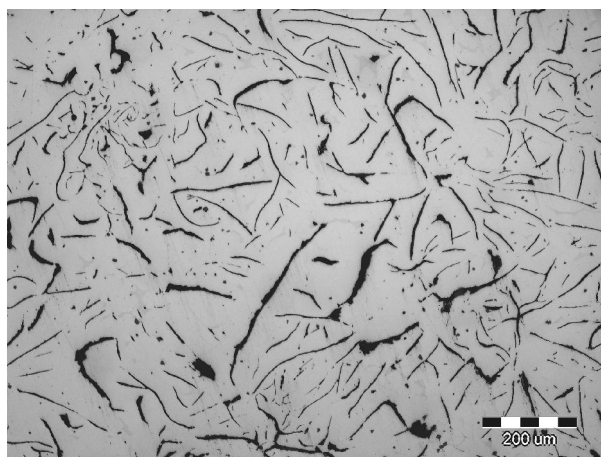
c)



d)

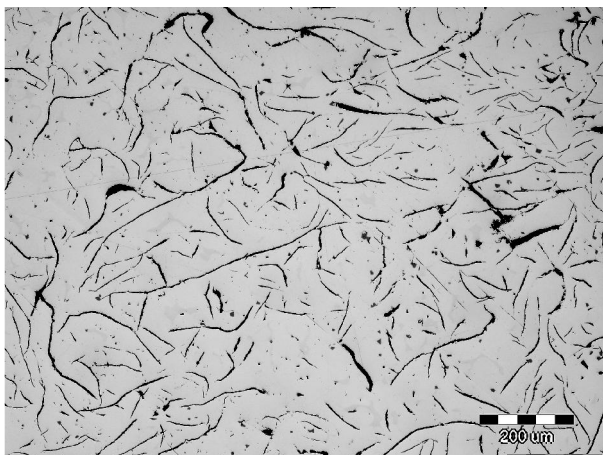


e)

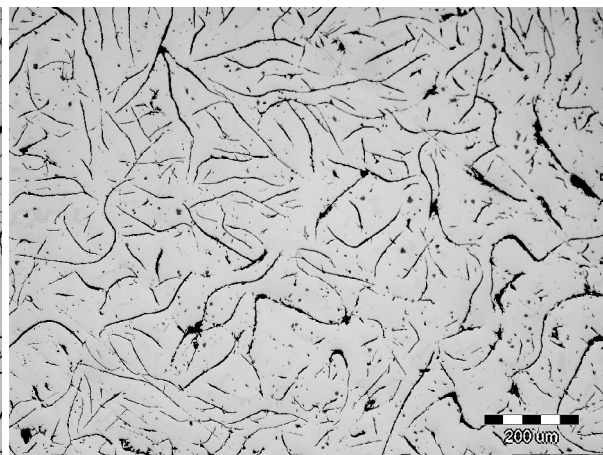


f)

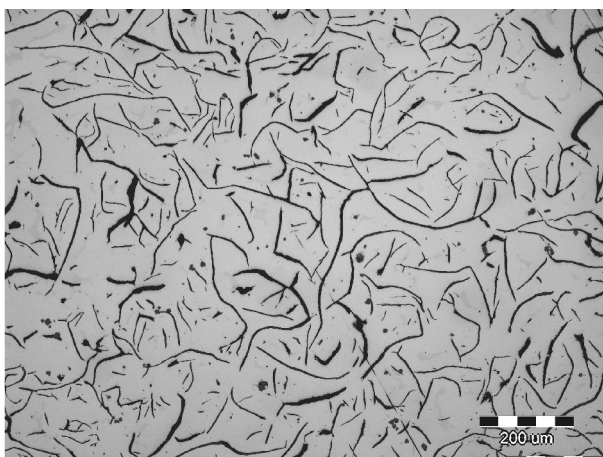
Slika 4.4. Metalografske snimke mikrostrukture stijenke debljine 20 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



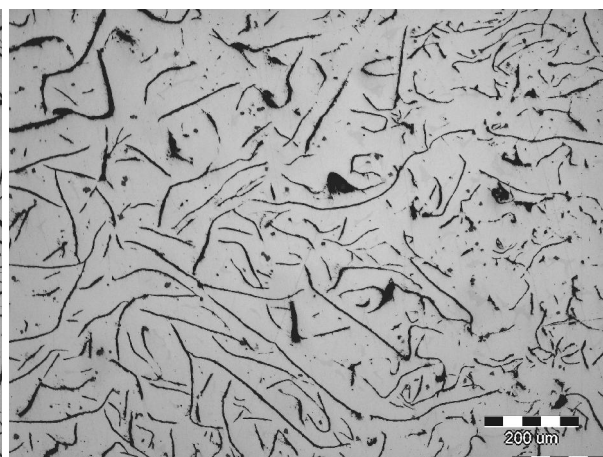
a)



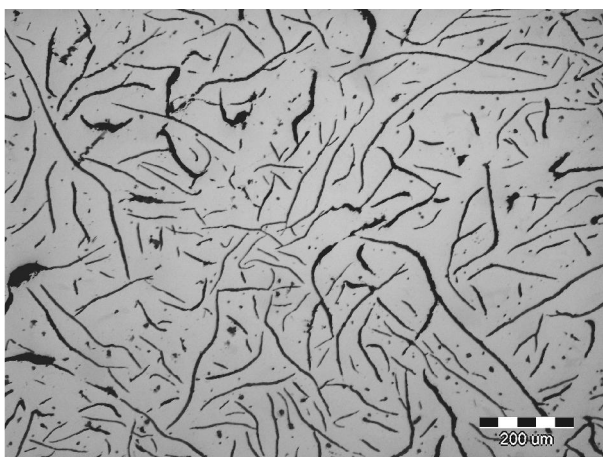
b)



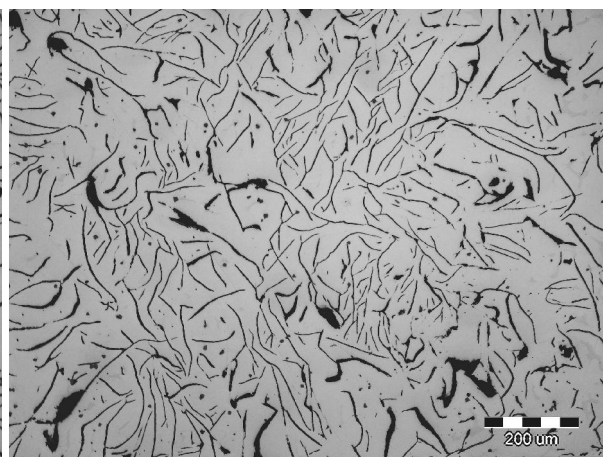
c)



d)

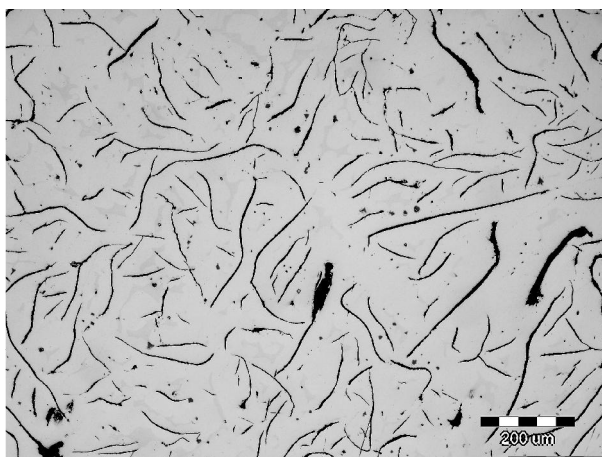


e)

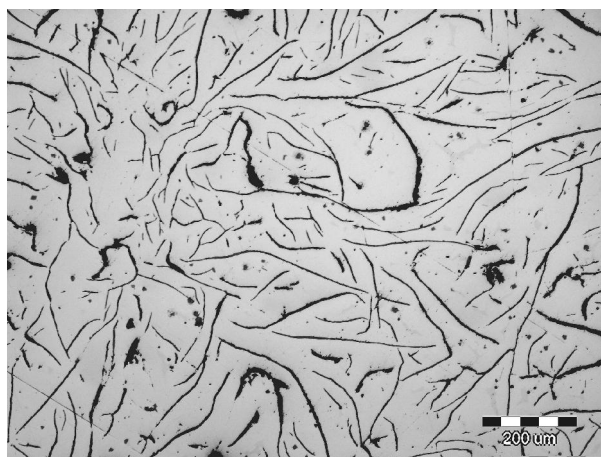


f)

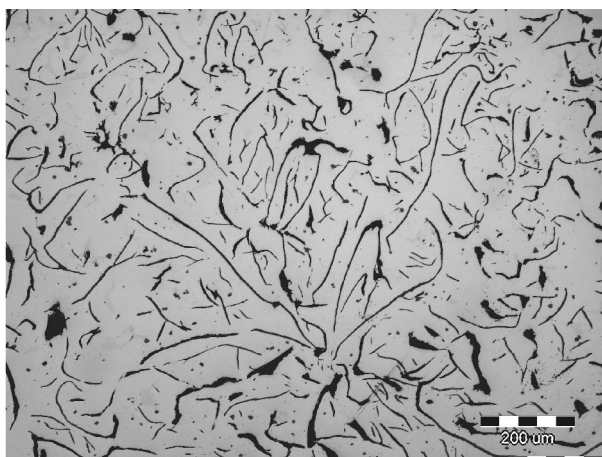
Slika 4.5. Metalografske snimke mikrostrukture stijenke debljine 45 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



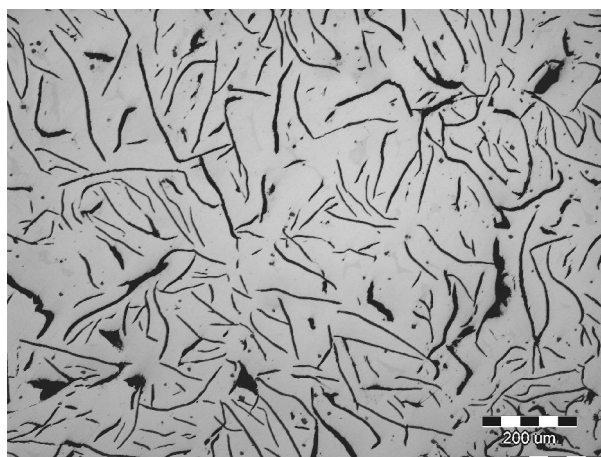
a)



b)



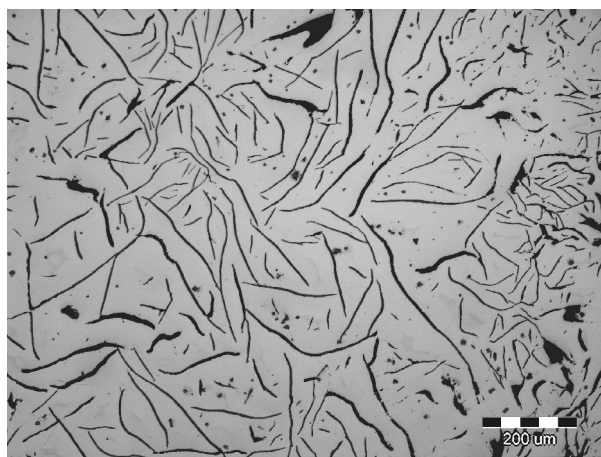
c)



d)



e)



f)

Slika 4.6. Metalografske snimke mikrostrukture stijenke debljine 65 mm u nenagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)

Na slikama 4.1.a, 4.1.c i 4.1.e može se vidjeti da su u mikrostrukturi ruba stijenke debljine 5 mm iz necijepljenih stepenastih odljevaka 1, 3 i 5 prisutni sitni grafitni listići D i E tipa te visok udio karbida (uz sam rub stijenke). Najveći udio karbida i najmanji udio grafitnih čestica prisutan je u stepenastom odljevku 1 odlivenom od taline koja je izrađena iz uložka s najvećim udjelom sirovog željeza. Velika brzina skrućivanja rubne zone uzrokovala je veliko pothlađenje taline, što je u kombinaciji s neadekvatnim nukleacijskim i grafitizacijskim potencijalom (koji potječe od niskog udjela silicija) rezultiralo stvaranjem karbida. Pored toga, brzo skrućivanje i veće pothlađenje taline pogoduju stvaranju grafitnih listića D i E tipa. Cijepljenjem je poboljšana nukleacijski potencijal talina, zbog čega stijenka debljine 5 mm iz stepenastih odljevaka 2, 4 i 6 sadrži veći udio grafitne faze i manji udio karbida, koji su u stepenastom odljevku 6 gotovo potpuno eliminirani (slike 4.1.b, 4.1.d i 4.1.f). Grafitni listići su i dalje D i E tipa.

U mikrostrukturi sredine stijenke debljine 5 mm iz stepenastog odljevka 1 prevladavaju grafitni listići D tipa, uz manji udio grafitnih listića E tipa (slika 4.2.a). Stepnasti odljevci 3 i 5 također sadrže grafitne listiće D tipa, ali je njihov udio manji nego u stepenastom odljevku 1 (slike 4.2.c i 4.2.e). Pored toga, u njihovoj mikrostrukturi prisutan je određeni udio grafitnih listića B tipa te grafitnih listića A tipa (posebno u stepenastom odljevku broj 6). Prisutnost grafitnih listića A i B tipa ukazuje na povoljniji nukleacijski potencijal i manje pothlađenje taline (posebno u slučaju A tipa grafitnih listića). U sredini stijenke debljine 5 mm nisu prisutni karbidi ni u jednom od navedenih stepenastih odljevaka, iako nisu cijepljeni. Sporije skrućivanje sredine u odnosu na rub stijenke debljine 5 mm spriječilo je stvaranje karbida. Slike 4.2.b, 4.2.d i 4.2.f pokazuju da je poboljšanje nukleacijskog potencijala putem cijepljenja povoljno utjecalo na morfologiju grafitnih listića. Stepnasti odljevak 2 sadrži manje grafitnih listića D tipa u usporedbi sa stepenastim odljevkom 1. Stepnasti odljevak 4 sadrži grafitne listiće A i B tipa, a ne grafitne listiće D tipa kao stepnasti odljevak broj 2 koji je odliven od iste taline ali bez dodatka cjepljiva. U stepenastom odljevku 6 također su prisutni grafitni listići A i B tipa te vrlo mali udio grafitnih listića D tipa (znatno manji nego u stepenastom odljevku 5).

Stijenka debljine 10 mm iz stepenastog odljevka 1 sadrži grafitne listiće A i B tipa te manji udio grafitnih listića D tipa (slika 4.3.a). Cijepljenjem su eliminirani grafitni listići D tipa i povećan je udio grafitnih listića A tipa (stepnasti odljevak 2, slika 4.3.b). Brzina skrućivanja stijenke debljine 10 mm je manja od brzine skrućivanja stijenke debljine 5 mm, što rezultira manjim pothlađenjem taline. To pogoduje stvaranju grafitnih listića B tipa, ali i A tipa ako je pothlađenje malo i ako je povoljan nukleacijski potencijal taline. Stepnasti odljevci 3 i 5 sadrže grafitne listiće A i B tipa, te manji udio grafitnih listića C tipa koji se pojavljuju zbog nadeutektnog sastava talina (slike 4.3.c i 4.3.e). Cijepljenjem je povećan udio grafitnih listića A tipa i smanjen udio grafitnih listića B tipa (stepnasti odljevci 4 i 6, slike 4.3.d i 4.3.f).

U mikrostrukturi stijenke debljine 20 mm iz stepenastih odljevaka 1, 3 i 5 prisutni su grafitni listići A tipa, s tim da stepnasti odljevak 5 sadrži i određeni udio grafitnih listića B tipa (slike 4.4.a, 4.4.c i 4.4.e). To ukazuje na povoljan nukleacijski potencijal i sporije skrućivanje. Poboljšanjem nukleacijskog potencijal putem cijepljenja povećan je udio grafitnih listića A tipa i eliminirani su grafitni listići B tipa (slike 4.4.b, 4.4.d i 4.4.f).

Slika 4.5 pokazuje da svi ispitivani stepnasti odljevci u stijenci debljine 45 mm sadrže grafitne listiće A tipa te manji udio grafitnih listića C tipa. Sporije hlađenje i dovoljno pogodan nukleacijski potencijal taline pogodovali su stvaranju grafitnih listića A tipa. Cijepljenjem se dodatno povećao udio grafitnih listića A tipa te se u određenoj mjeri smanjila njihova veličina.

U mikrostrukturi stijenke debljine 65 mm iz svih ispitivanih stepenastih odljevaka prisutni su grafitni listići A i C tipa (slika 4.6). Učinak cijepjenja je sličan kao i u slučaju stijenke debljine 45 mm.

Usporedbom metalografskih snimki mikrostrukture prikazanih na slikama 4.1 do 4.6 može se vidjeti da se s povećanjem debljine stijenke mijenja tip grafitnih listića od D i E preko B do A tipa jer se smanjuje brzina hlađenja i pothlađenje taline, čime se stvaraju pogodni uvjeti za nastanak grafitnih listića A tipa, koji su ujedno i najpogodniji. Pored toga, može se vidjeti da se broj grafitnih listića A i C tipa smanjuje, a njihova veličina povećava s povećanjem debljine stijenke što je rezultat sporijeg skrućivanja.

Stepenasti odljevci 1 i 2 odliveni od taline izrađene iz uložka s 40 % sirovog željeza nisu se pokazali superiorniji po pitanju morfologije grafitnih listića u odnosu na ostale stepenaste odljevke koji su odliveni od talina izrađenih bez ili s vrlo niskim udjelom sirovog željeza. Pri tome treba uzeti u obzir da je uložak za izradu taline 2, koji je ujedno imao i najveći udio čeličnog otpada, sadržavao i najveći udio SiC. Na taj način je provedena snažna predobrada taline, što je svakako povoljno utjecalo na njen nukleacijski potencijal, a time i na tip, veličinu i raspodjelu grafitnih listića te stvaranje karbida.

Na slikama 4.7 do 4.12 prikazane su metalografske snimke mikrostrukture svih stijenki iz ispitivanih stepenastih odljevaka (SO 1 do SO 6) u nagrizenom stanju pri povećanju 100x. Za svaki stepenasti odljevak naznačeno je da li je cijepljen (CJ) te je navedena struktura metalnog uložka, tj. udio sirovog željeza (SSŽ), čeličnog otpada (ČO) i povratnog sivog lijeva (PSL), kao i dodatak SiC.

Slika 4.7 pokazuje da u stepenastim odljegovcima 1, 3 i 5 rub stijenke debljine 5 mm ima perlitnu metalnu osnovu, dok je u stepenastim odljegovcima 2, 4 i 6 metalna osnova perlitno-feritna. Udio perlita je znatno viši od ferita zbog velike brzine skrućivanja. Ferit je prisutan u područjima gdje se nalaze grafitni listići D tipa (slika 4.13). Budući da se radi o izrazito sitnim i razgranatim listićima, značajno se skraćuju putovi difuzije ugljika iz austenita čime se olakšava smanjenje udjela ugljika u austenitu i time njegova pretvorba u ferit. Osim navedenih konstituenata, jasno se mogu uočiti karbidi (slika 4.14) i mreža fosfidnog eutektika (slika 4.15) koji je nastao zbog povišenog udjela fosfora u talinama.

Sredina stijenke debljine 5 mm u svim stepenastim odljegovcima (cijepljenim i necijepljenim) ima perlitno-feritnu metalnu osnovu (slika 4.8). Kao i u rubnom dijelu, udio perlita je veći od udjela ferita koji se nalazi oko grafitnih listića D tipa. U svim uzorcima jasno se može uočiti mreža fosfidnog eutektika. Zbog sporijeg hlađenja nego u rubnom dijelu, karbidi nisu prisutni u sredini ove stijenke, ali ni u ostalim debljim stijenkama.

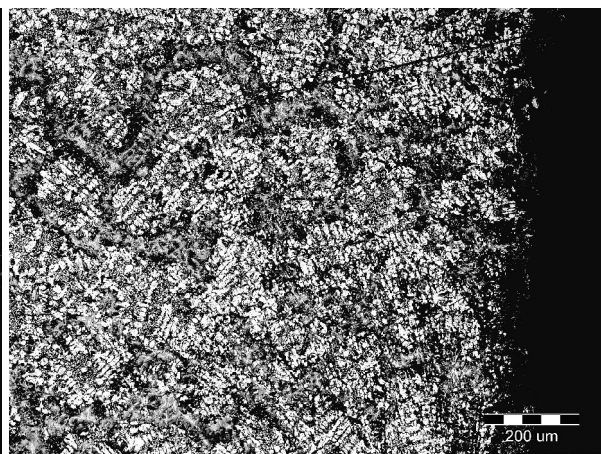
Metalna osnova stijenke debljine 10 mm iz svih stepenastih odljevaka sadrži visok udio perlita (slika 4.9). Ferit je prisutan u manjem udjelu, uglavnom u područjima gdje se nalaze sitni listići grafita (B i D tipa), te u manjoj mjeri oko grafitnih listića A tipa. Kao i u prethodnim stijenkama, i u ovoj stijenci je prisutan fosfidni eutektik koji je izlučen po granicama zrna.

Stijenka debljine 20 mm u svim ispitivanim stepenastim odljegovcima ima perlitno-feritnu metalnu osnovu s visokim udjelom perlita (slika 4.10). Ferit se nalazi oko grafitnih listića. U mikrostrukturi je prisutan i fosfidni eutektik, koji je okružen perlitom kao i u prethodno navedenim stijenkama.

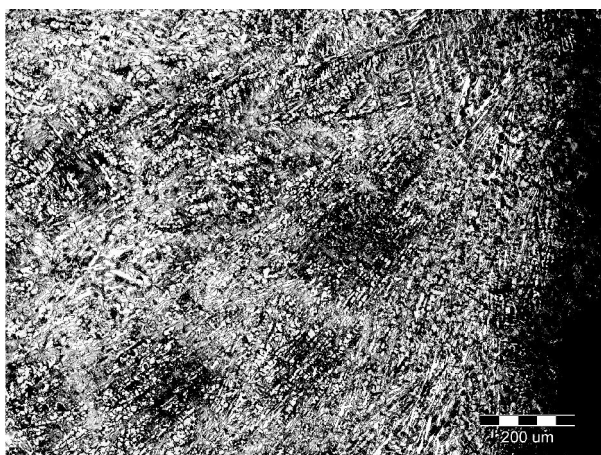
Stijenka debljine 45 i 65 mm u svim ispitivanim stepenastim odljegovcima također ima perlitno-feritnu metalnu osnovu i sadrži fosfidni eutektik (slike 4.11 i 4.12). Udio ferita je veći nego u prethodnim stijenkama zbog sporijeg hlađenja koje je rezultat veće debljine stijenki.



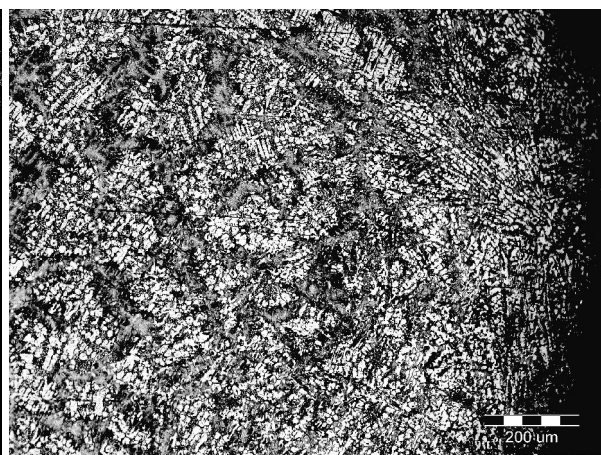
a)



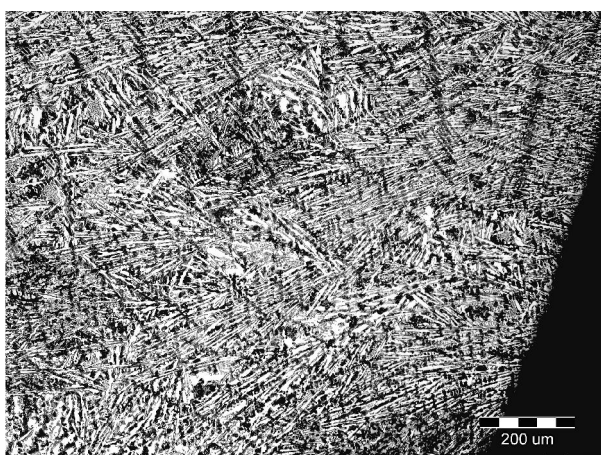
b)



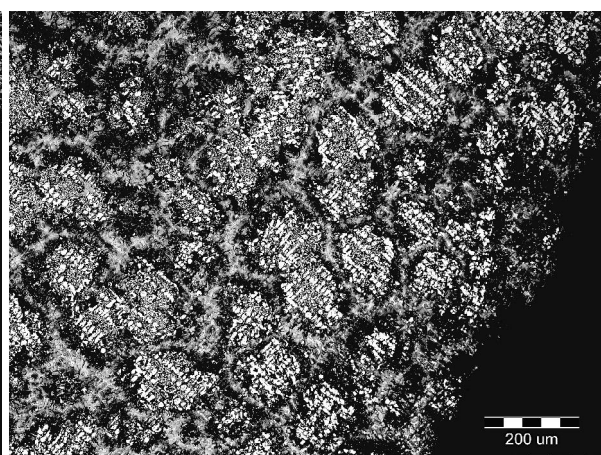
c)



d)

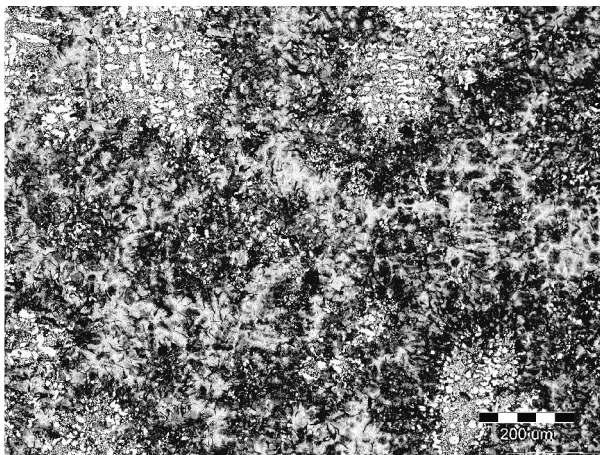


e)

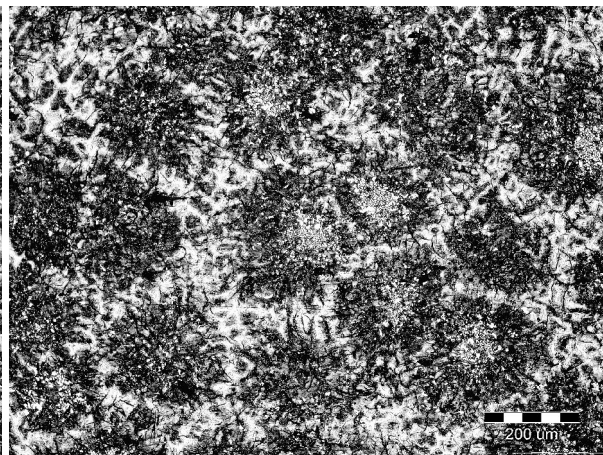


f)

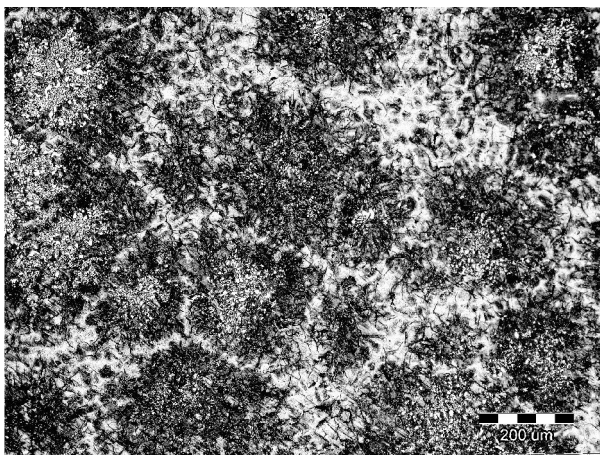
Slika 4.7. Metalografske snimke mikrostrukture ruba stijenke debljine 5 mm u nagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



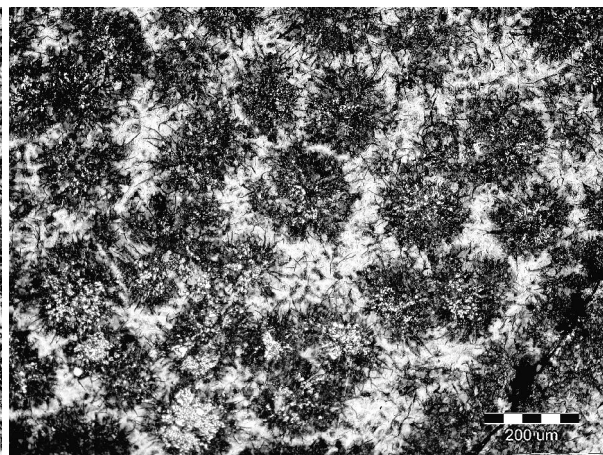
a)



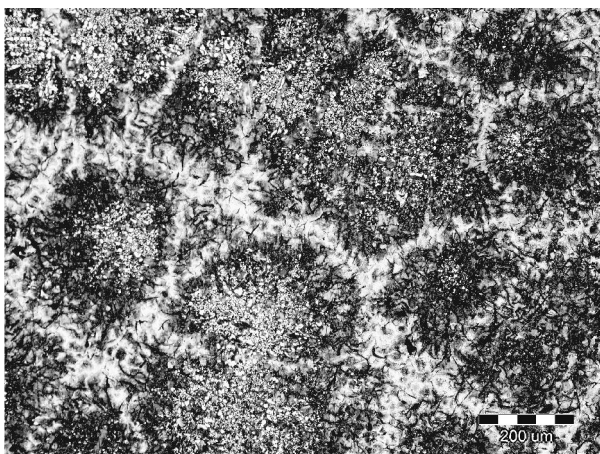
b)



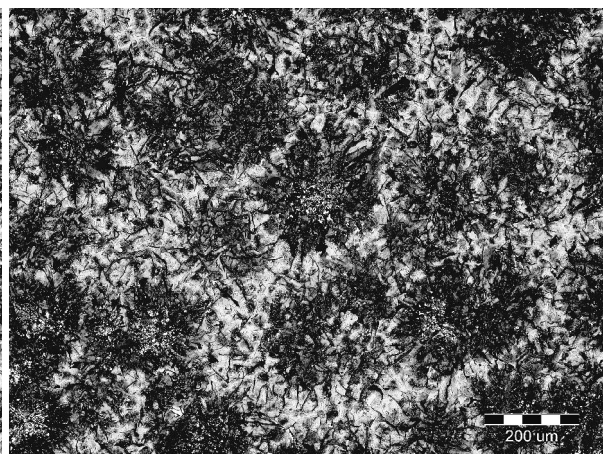
c)



d)

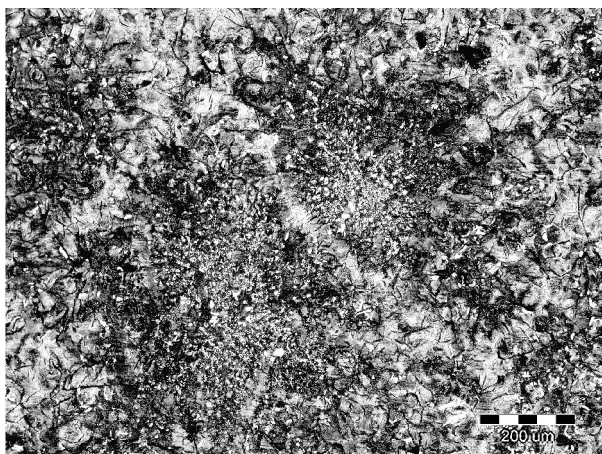


e)

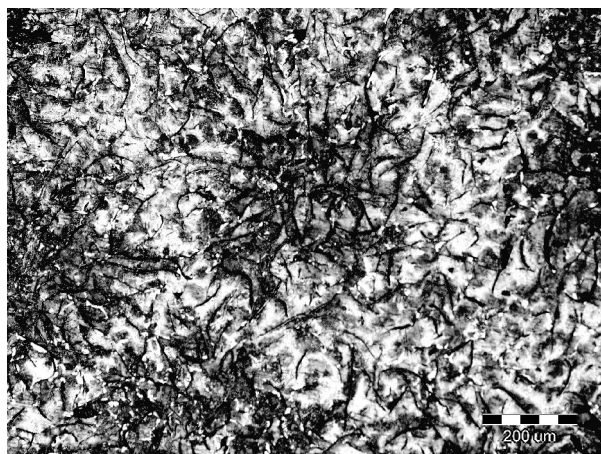


f)

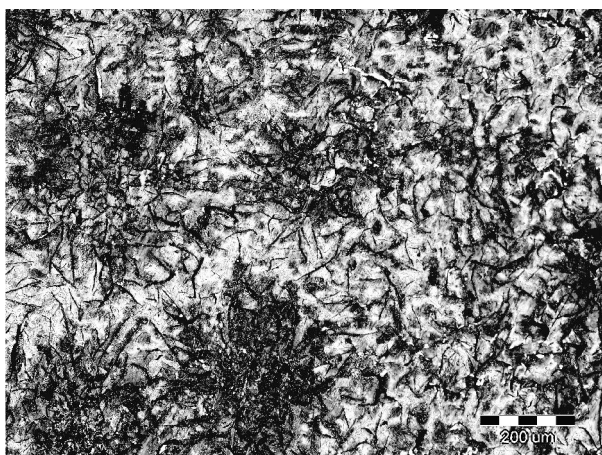
Slika 4.8. Metalografske snimke mikrostrukture sredine stijenke debljine 5 mm u nagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



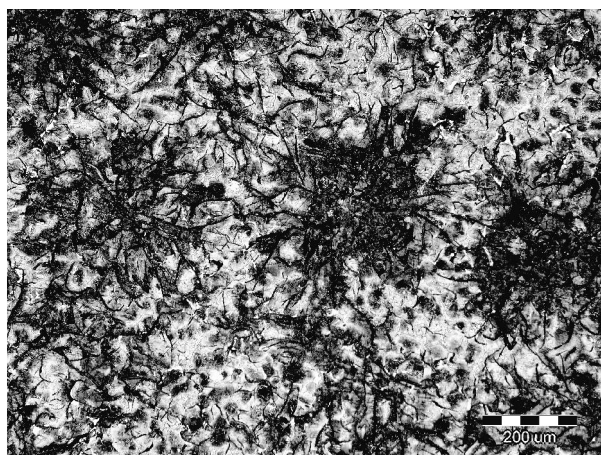
a)



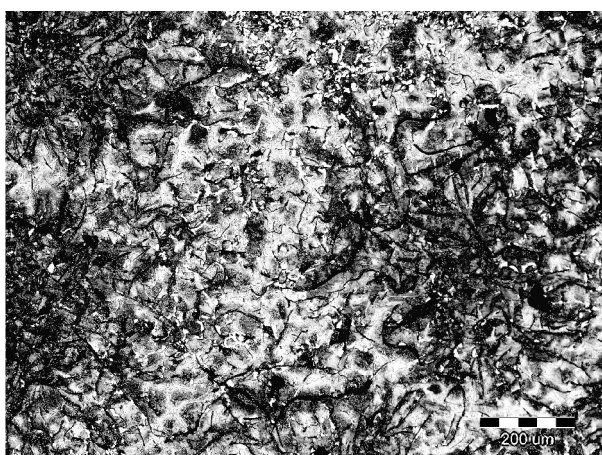
b)



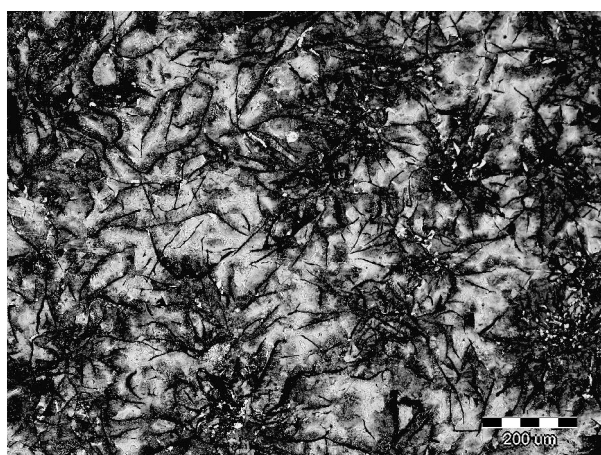
c)



d)

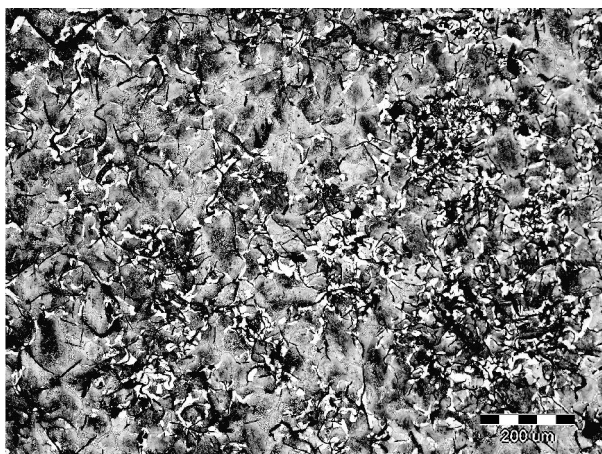


e)



f)

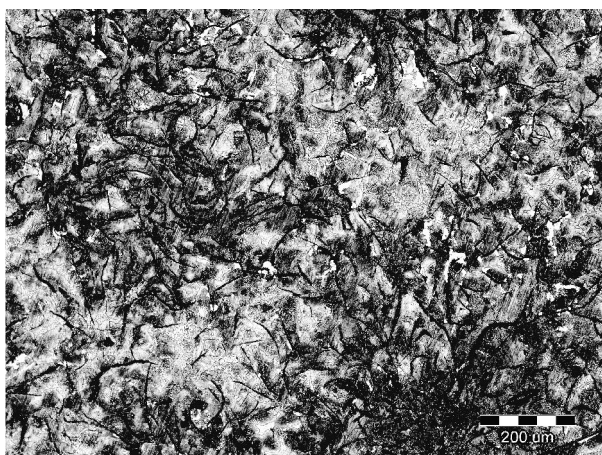
Slika 4.9. Metalografske snimke mikrostrukture stijenki debljine 10 mm u nagrizenom stanju:
a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), e) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



a)



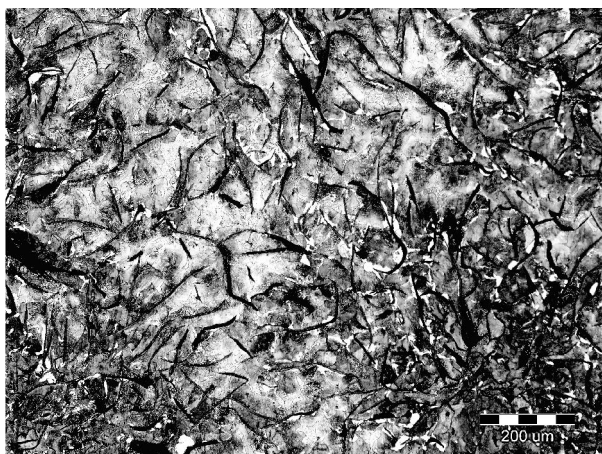
b)



c)



d)

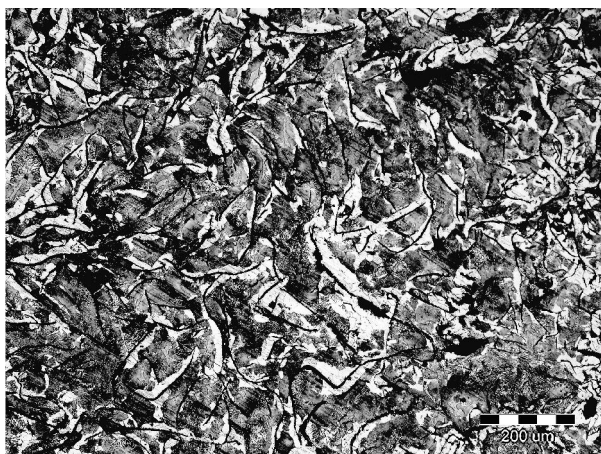


e)

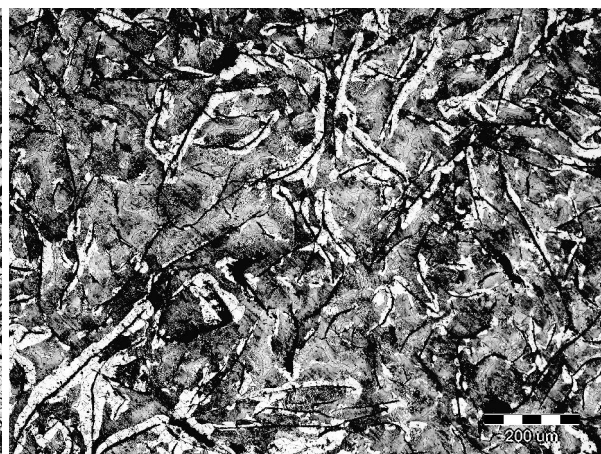


f)

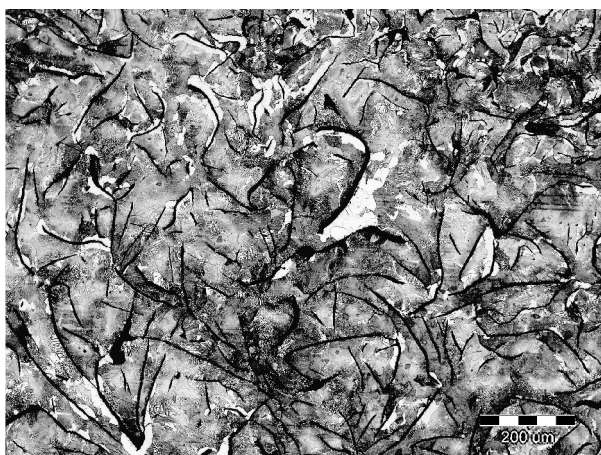
Slika 4.10. Metalografske snimke mikrostrukture stijenki debljine 20 mm u nagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



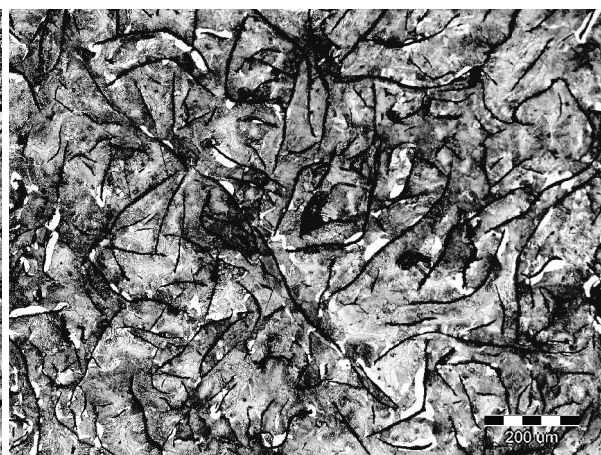
a)



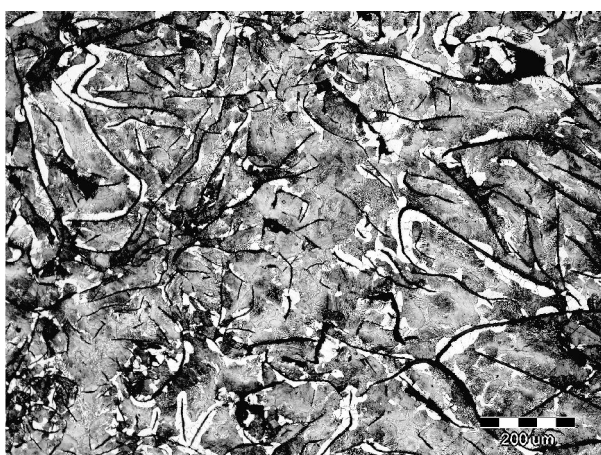
b)



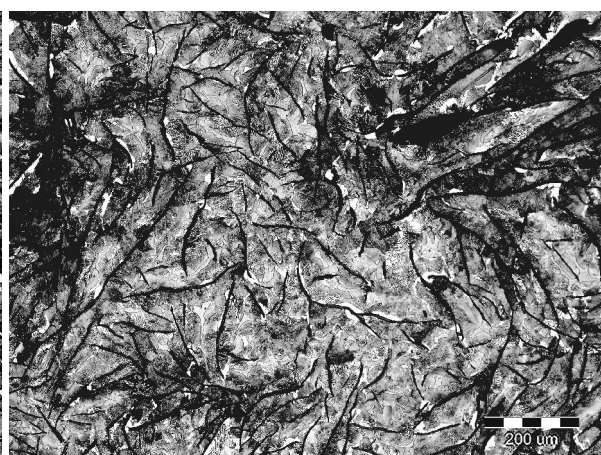
c)



d)

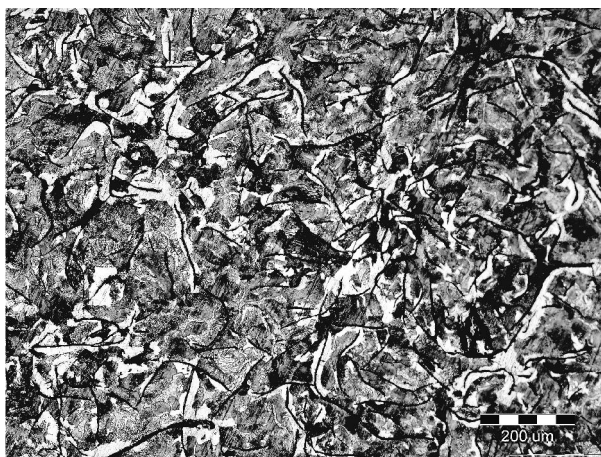


e)



f)

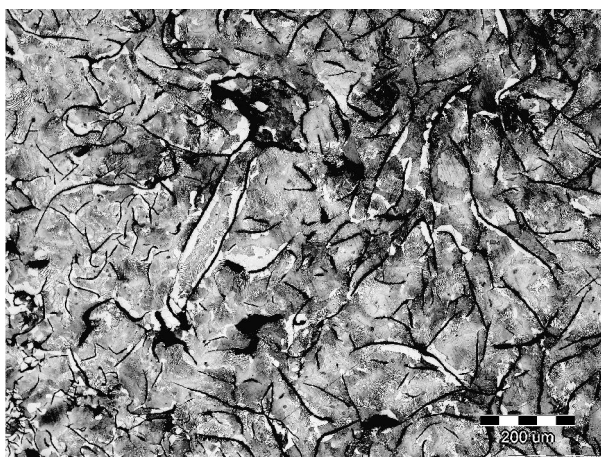
Slika 4.11. Metalografske snimke mikrostrukture stijenki debljine 45 mm u nagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



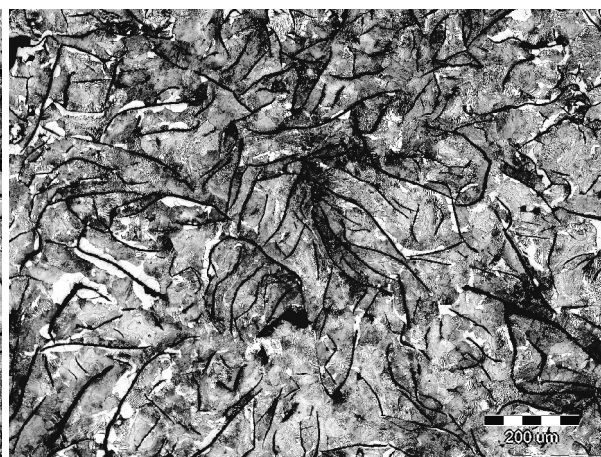
a)



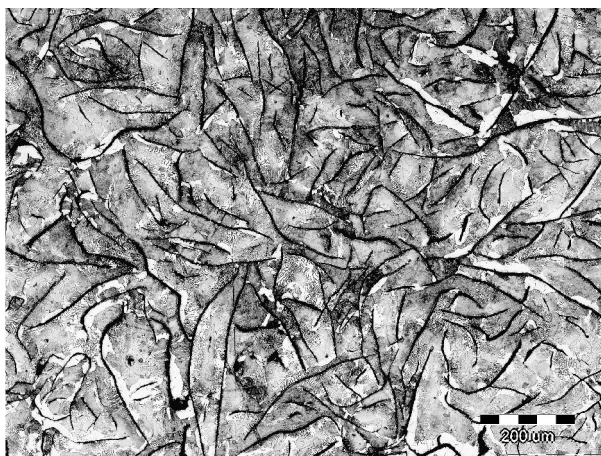
b)



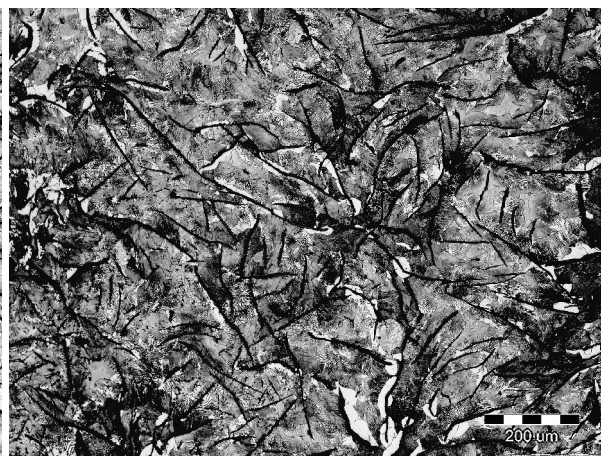
c)



d)

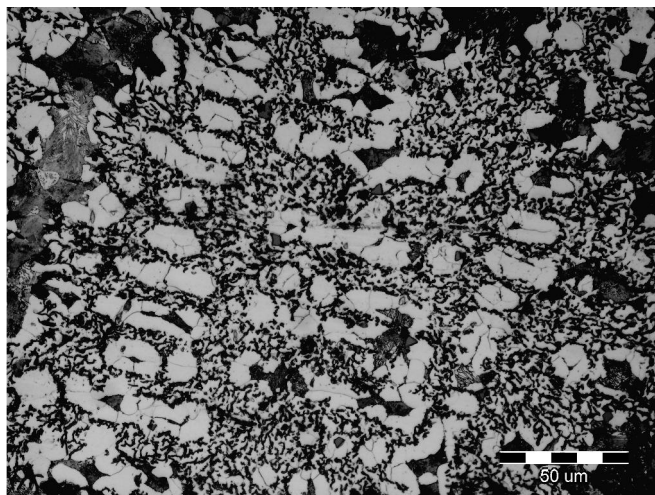


e)

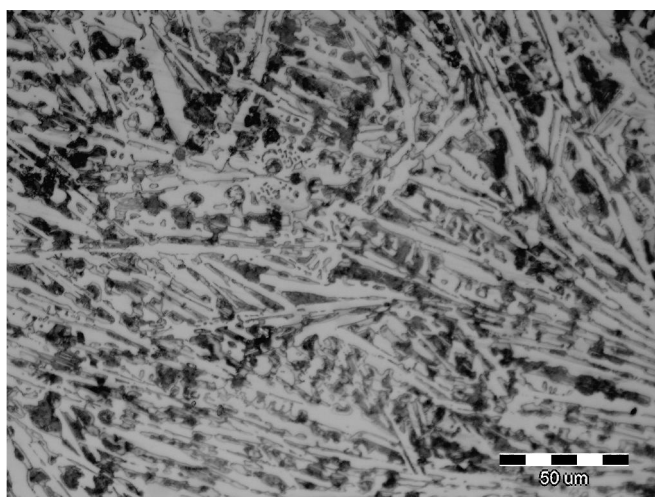


f)

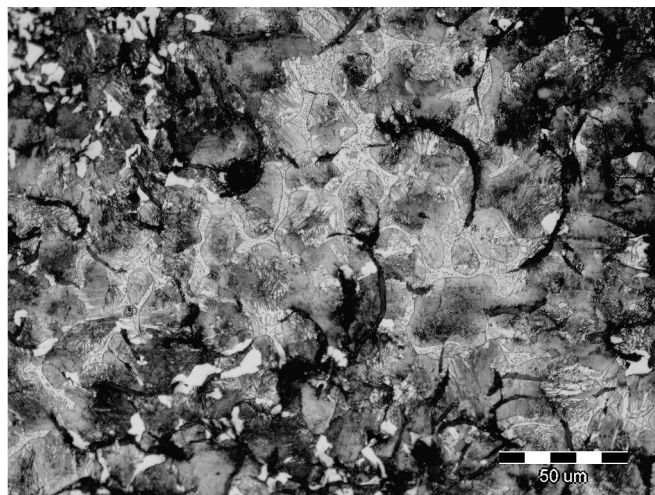
Slika 4.12. Metalografske snimke mikrostrukture stijenke debljine 65 mm u nagrizenom stanju: a) SO 1 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC), b) SO 2 (40 % SŽ + 10 % ČO + 50 % PSL + 50 kg SiC; CJ), c) SO 3 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC), d) SO 4 (10 % SŽ + 40 % ČO + 50 % PSL + 135 kg SiC; CJ), e) SO 5 (100 % PSL + 5 kg SiC), f) SO 6 (100 % PSL + 5 kg SiC; CJ)



Slika 4.13. Metalografska snimka mikrostrukture ruba stijenke debljine 5 mm iz SO 2 u nagrizenom stanju (grafitni listići D tipa i ferit)



Slika 4.14. Metalografska snimka mikrostrukture ruba stijenke debljine 5 mm iz SO 1 u nagrizenom stanju (karbidi okruženi perlitom)



Slika 4.15. Metalografska snimka mikrostrukture ruba stijenke debljine 5 mm iz SO 2 u nagrizenom stanju (fosfidni eutektik okružen perlitom)

5. ZAKLJUČAK

Na osnovi dobivenih rezultata ispitivanja utjecaja različitih sastava uloška za izradu taline, debljine stijenke odljevka i cijepljenja na mikrostrukturu sivog lijeva može se zaključiti sljedeće:

- tip, veličina i raspodjela grafitnih listića u analiziranim stijenkama debljina 5, 10, 20, 45 i 65 mm nisu u značajnijoj mjeri ovisili o udjelu sirovog željeza, čeličnog otpada i povratnog materijala u ulošku,
- predobradom sa SiC poboljšava se nukleacijski potencijal taline sivog lijeva, što je posebno vidljivo kod taline izrađene od uloška koji je sadržavao relativno visok udio čeličnog otpada (~ 40 %),
- brzina skrućivanja, tj. debljina stijenke u velikoj mjeri utječe na tip, veličinu i raspodjelu grafitnih listića, izlučivanje karbida te strukturu metalne osnove,
- u tankim stijenkama (5 mm) zbog velike brzine skrućivanja i s tim povezanog velikog pothlađenja taline nastaju grafitni listići D i E tipa,
- s porastom debljine stijenke (od 10 do 65 mm), odnosno sa smanjenjem brzine skrućivanja stvaraju se uvjeti za izlučivanje grafitnih listića A i B tipa,
- u tankim stijenkama (5 mm) može se očekivati prisutnost karbida, posebno u rubnom dijelu gdje je brzina skrućivanja najveća,
- sa smanjenjem brzine hlađenja i povećanjem udjela grafitnih listića D i E tipa povećava se udio ferita u metalnoj osnovi sivog lijeva,
- cijepljenje značajno utječe na mikrostrukturu sivog lijeva jer poboljšava nukleacijski potencijal taline. Odgovarajućim dodatkom cjepiva smanjuje se ili gotovo potpuno eliminira stvaranje karbida u tankim stijenkama, smanjuje se udio grafitnih listića B, D i E tipa te se povećava udio grafitnih listića A tipa,
- udio fosfora $> 0,3$ mas. % rezultira stvaranjem fosfidnog eutektika u stijenkama debljina 5, 10, 20, 45 i 65 mm.

6. LITERATURA

- [1] Z. Glavaš, F. Unkić, Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2009.
- [2] H. Avdušinović, Željezni liv –knjiga I, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica 2015.
- [3] ..., A Modern Casting Staff Report, Census of World Casting Production: Global Casting Production Expands, Modern Casting 108(2018) 12, 23 - 26.
- [4] E. Weiss, G. Fedorko, P. Futáš, A. Pribulová, I. Vasková, Dependence of Quality Properties for Grey Iron on Used Raw Materials, Metalurgija 48(2009) 1, 43 - 45.
- [5] ..., The Use of Foundry Pig Iron in Grey Iron Castings, https://www.metallics.org/assets/files/Public-Area/Fact-Sheets/ 7_Foundry_Pig_Iron_Fact_Sheet_rev3.pdf (19. lipnja 2019.)
- [6] D. Bartocha, K. Janerka, J. Suchoń, Charge Materials and Technology of Melt and Structure of Gray Cast Iron, Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005), 465–470.
- [7] ..., EN ISO 945-1:2012, Microstructure of Cast Irons – Part 1: Graphite Classification by Visual Analysis, ISO, Switzerland, 2012.
- [8] ..., EN 1560:2011, Founding – Designation System for Cast Iron – Material Symbols and Material Numbers, CEN, Brussels, 2011.
- [9] J.R. Brown, Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [10] ..., EN 1561:2011, Founding. Grey Cast Irons, CEN, Brussels, 2011.
- [11] K.B. Rundman, Metal Casting, Reference Book for MY4130, Michigan Tech. University, 1986.
- [12] J. Dawson, S. Maitra, Recent Research On the Inoculation of Cast Iron. British Foundryman 60(1967) 4, 117 - 127.
- [13] M. Jacobs, T. Law, D. Melford, M. Stowell, Basic Processes Controlling the Nucleation of Graphite Nodules in Chill Cast Iron, Metals Technology 1(1974) 1, 490 -500.
- [14] T. Elbel, J. Senberger, A. Zadera, J. Hampl, Behaviour of Oxygen in Cast Irons, Archives of Materials Science and Engineering 33(2008) 2, 111 - 116.
- [15] J. Campbell, A Hypothesis for Cast Iron Microstructures, Metallurgical and Materials Transactions B 40(2009) 6, 786 - 801.
- [16] M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, C. Militaru, I. Anton, M. Barstow, Inoculated Slightly Hypereutectic Grey Cast Irons, Journal of Materials Engineering and Performance 21(2012) 3, 331 – 338.
- [17] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, T. Skaland, A New Approach to Graphite Nucleation Mechanism in Gray Irons, Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, September, 29-30, 2005, Schaumburg, Illinois, 31 – 41.
- [18] W. Weis, The Metallurgy of Cast Iron, Proceedings of the Second International Symposium on the Metallurgy of Cast Iron, The Metallurgy of Cast Iron, ur. B. Lux, I. Minkoff, F. Mollard, Georgi Publishing, Geneva, Switzerland, 29 – 31 May 1974., 69 – 79.
- [19] D.M. Stefanescu, Science and Engineering of Casting Solidification, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2002.
- [20] D.B. Craig, M.J. Hornung, T.K. McCluhan, Gray Iron, poglavlje u knjizi Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1988., 629 – 646.

- [21] 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.
- [22] D.B. Craig, M.J. Hornung, T.K. McCluhan, Gray Iron, poglavlje u knjizi ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1998., 1365 - 1404.
- [23] ..., Recommended Target Analysis for Gray iron, Tehnical Information 17, Elkem ASA, Oslo, Norway, 1997.
<https://wenku.baidu.com/view/4691331214791711cc791782.html> (19. lipnja 2019.)
- [24] ... Overview of Alloying Elements and their Effects in Grey Iron, Tehnical Information 12A, Elkem ASA, Oslo, Norway, 2011.
<http://foundrygate.com/upload/artigos/7ZmcrE9zgVGm6iKwHxeNNjbEdqt1.pdf>. (19. lipnja 2019.)
- [25] V.H. Patterson, R. Smart, Molten Metal Handling and Treatments for Metallurgical Control, poglavlje u knjizi Cupola Handbook, 6th Edition, American Foundry Society, 2006.
- [26] ..., Data Handbook for Grey Irons, The Castings Development Centre, England, 1997.
- [27] S.F. Carter, Melting Furnaces: Cupolas, poglavlje u knjizi ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, 1998., 835 - 855.
- [28] http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=4578&tx_contagged%5BbackPid%5D=3&cHash=455f13632bff149b0ff41495488bb8b2, (19.lipnja 2019.).
- [29] I. Katavić, Ljevarstvo, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1983.
- [30] M.I. Onsoinen, T. Skaland: Preconditioning of Gray Iron Melts Using Ferrosilicon or Silicon Carbide, AFS Transactions 109(2001), Paper 01-093.
- [31] H. Rödter: Silicon Carbide – Improvements of the Metallurgical Quality of the Ductile Iron Melt by Using Silicon Carbide – SiC, Zbornik radova 3. međunarodnog savjetovanja ljevača, Suvremeni postupci proizvodnje odljevaka od željeznog lijeva, uredio F. Unkić, Sisak, 11. – 12. listopada 2001., 1 – 9.
- [32] ..., Preseed Preconditioner, Elkem, Foundry Products, Oslo, 2012.
<https://www.yumpu.com/en/document/view/32276377/preseedtm-preconditioner-elkem> (19. lipnja 2019.)
- [33] I. Riposan, M. Chisamera, S. Stan, Enhanced Quality in Electric Melt Grey Cast Irons, ISIJ International 53(2013) 10, 1683 – 1695.
- [34] Z. Glavaš, F. Unkić, J. Martišković, Predobrada i metalurška kvaliteta talina sivih željeznih ljevova, Ljevarstvo 51(2009) 2, 47 - 56.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime:	Ana-Marija Hirš
Datum i mjesto rođenja:	25.03.1993., Sisak
Adresa:	Sisačka ulica 12, Pula
Telefon:	091/602-5878
E-mail:	am.zamarija@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2008.g. - 2012.g.	Gimnazija Sisak
2014.g. - 2017.g.	Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, Preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija
2017.g. -	Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, Diplomski sveučilišni studij Metalurgija

VJEŠTINE:

Rad na računalu (Word, Excel, Power Point)
Strani jezik: Engleski i njemački