

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Luka Zeljko

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Luka Zeljko

PRAĆENJE PROIZVODNJE I ISPITIVANJE SVOJSTAVA ODLJEVAKA
OD SIVOG LIJEVA KVALITETE EN GJL-200

ZAVRŠNI RAD

	Voditelj:	izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac
Stručni voditelj s Metalurškog fakulteta:		Franjo Kozina, mag.ing.met.
Stručni voditelj iz tvrtke Plamen d.o.o. Požega:		mr.sc. Snježana Zeljko

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

Predsjednik:	izv. prof.dr.sc. Stjepan Kožuh
Član:	izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac
Član:	doc.dr.sc. Ivan Jandrlić
Zamjenski član:	doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović

Sisak, rujan 2018.

PRAĆENJE PROIZVODNJE I ISPITIVANJE SVOJSTAVA ODLJEVAKA OD SIVOG LIJEVA KVALITETE EN GJL-200

Sažetak

Proizvodnja sivog lijeva složen je proces koji obuhvaća sve grane metalurgije i širok spektar aktivnosti. Prema potrebama tržišta te kvalitativnim i kvantitativnim zahtjevima pred gotovim proizvodom, sustavno se planira strategija proizvodnje i prema tome odabire kvaliteta materijala, ekonomski opravdana tehnologija proizvodnje, sastav uložnog materijala, tehnološka razrada procesa lijevanja i završna obrada odljevaka.

U eksperimentalnom dijelu praćen je postupak lijevanja i svojstva proizvoda: okvira vrata kamina od sivog lijeva kvalitete EN GJL-200. Praćena su svojstva kalupne mješavine namijenjene DISAMATIC® liniji za kalupovanje, kemijski sastav taline i parametri lijevanja te mehanička i mikrostrukturalna svojstva odljevaka u sirovom (lijevanom) i površinski obrađenom (emajliranom) stanju.

Utvrđen je utjecaj visokih temperatura pri postupku emajliranja na promjenu mikrostrukture i mehanička svojstva odljevaka od kvalitete sivog lijeva EN GJL-200. Emajliranjem se povećava udio ferita, a dio perlita ide u ferit te se karbidi raspadaju. Utvrđene mikrostrukturne transformacije dovode do smanjenja vlačne čvrstoće i tvrdoće emajliranih uzoraka, ali i pojave duktilno-krhkog loma. Ne-emajlirani uzorci pokazuju krhki lom preko listića grafita i samo djelomično preko većinski feritne metalne osnove.

Ključne riječi: sivi lijev, emajliranje, mikrostruktura, mehanička svojstva

MONITORING OF PRODUCTION AND CASTING PROPERTIES INVESTIGATION OF EN GJL-200 QUALITY OF GRAY CAST IRON

Abstract

Gray cast iron production is a complex process involving all branches of metallurgy and a wide range of activities. According to the market needs and the qualitative and quantitative requirements of the final product, the strategy of production is systematically planned and therefore material quality, the economically justified production technology, the composition of the charge material, the technological elaboration of the casting process and the final surface treatment of the castings.

In the experimental part, the casting process and product properties were followed: the cast iron frame of gray cast iron quality EN GJL-200. The characteristics of the mould mixture used for the DISAMATIC® moulding line, the chemical composition of the melt, casting parameters, as well as mechanical and microstructural properties of castings in the raw (as-cast) and surface treated (enamelled) state were observed.

The influence of high temperature in the enamelling process on the microstructure change and obtained mechanical properties of gray cast iron EN GJL-200 was determined. Enamelling results in an increase in the ferrite ratio in metal matrix, part of perlite transform into ferrite and carbides experience decomposition. Such microstructural transformation resulted in reduced tensile strength and hardness of enamelled samples, as well as mixed tough – brittle fracture. Non-enamelled samples show a brittle fracture across the graphite lamellas and partially across the mostly ferritic metal matrix.

Key words: gray cast iron, enamelling, microstructure, mechanical properties

Zahvala

Zahvaljujem svojoj voditeljici izv. prof. dr. sc. Zdenki Zovko Brodarac na strpljenju i vodstvu pri izradi ovog završnog rada. Srdačno zahvaljujem mag.ing.met. Franji Kozini i Tomislavu Rupčiću, asistentima na Metalurškom fakultetu na susretljivosti i ustupljenim materijalima. Hvala Vam na bezrezervnom trudu i mnogobrojnim savjetima.

Zahvaljujem gospođi mr. sc. Snježani Zeljko iz tvrtke Plamen d.o.o., na pruženoj prilici da unutar Vaše tvrtke odradim stručnu praksu na kojoj se velikom dijelom temelji praktični dio ovog rada, hvala Vam na nesebičnoj pomoći i vremenu koje ste našli za mene.

Najviše zahvaljujem svojim roditeljima, kojima i posvećujem ovaj završni rad. Hvala Vam na beskonačnom strpljenju, razumijevanju i ljubavi. Hvala sestri i bratu na proslijeđenom iskustvu i mudrostima što mi je omogućilo da učim iz tuđeg iskustva, a ne na vlastitim pogreškama.

Hvala dragim kolegama koji su postali prijateljima, a bez kojih studij ne bi prošao tako zabavno. Učinili ste da se Sisak, iz potpuno nepoznatog grada, pretvori u moj drugi dom.

Posebna zahvala mojoj djevojci, hvala ti što šutke podnosiš trenutke moje odsutnosti i vjeruješ u mene i kad sam to dovodim u pitanje.

Hvalu na podršci najbolje ću izraziti daljnjim postizanjem uspješnih rezultata što je uz ovoliku potporu neizostavno.

Sadržaj:

1.0 UVOD.....	1
2.0 TEORIJSKI DIO	2
2.1 Općenito o sivom lijevu.....	2
2.2 Klasifikacija sivog lijeva.....	2
2.3 Pretvorbe u krutom stanju.....	6
2.3.1 Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke) na mikrostrukturu	8
2.4 Proizvodnja taline sivog lijeva	8
2.4.1 Uložni materijali.....	8
2.4.2 Vrste peći za taljenje.....	9
2.4.2.1 Indukcijske peći	9
2.5 Obrada taline sivog lijeva cijepljenjem.....	11
2.5.1 Učinak cijepjenja	11
2.5.2 Kemijski sastav cjevica	11
2.5.3 Metode cijepjenja.....	12
2.6 Svojstva sivog lijeva	12
2.6.1 Mehanička svojstva.....	12
2.6.2 Fizikalna svojstva.....	13
2.7 Kontrola kvalitete.....	13
2.8 Metalografska analiza.....	14
2.9 Završna obrada emajliranjem	14
2.9.1 Svojstva i primjena emajla.....	15
3.0 EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1 Proizvodnja odljevaka	16
3.1.1 Priprema kalupne mješavine	16
3.1.1.1 Analiza i tok kalupne mješavine	17
3.1.1.2 Priprema i tok taline	19
3.1.1.3 Lijevanje u kalupe	20
3.1.1.4 Čišćenje odljevka.....	21
3.2 Tehnološki proces emajliranja.....	22

3.2.1 Priprema emajla.....	22
3.2.2 Kontrola kvalitete emajla.....	22
3.2.2.1 Priprema odljevaka.....	23
3.2.2.2 Nanošenje emajla.....	24
3.2.2.3 Sušenje emajla.....	24
3.2.2.4 Pečenje emajla.....	24
3.3 Ispitivanje svojstava odljevaka.....	24
3.3.1 Ispitivanje mehaničkih svojstava.....	25
3.3.2 Ispitivanje mikrostrukturnih svojstava.....	26
4.0 REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA.....	30
4.1 Analiza kalupne mješavine.....	30
4.2 Kemijski sastav taline kvalitete EN GJL-200.....	30
4.3 Tvrdća uzoraka.....	30
4.4 Vlačna čvrstoća.....	31
4.5 Mikrostruktura uzoraka.....	31
4.5.1 Analiza oblika i raspodjele izlučenog grafita.....	32
4.5.2 Analiza metalne osnove.....	34
4.5.3 Fraktografska analiza prijelomnih površina epruveta.....	37
5.0 Zaključak.....	39
6.0 Literatura.....	41
Životopis.....	42

1.0 UVOD

Proizvodnja metalnih odljevaka je postupak koji seže duboko u povijest ljudskog roda. Neki metalni predmeti datiraju čak iz vremena od 5000 do 3000 godina prije nove ere. Metalurgija je, prije svega znanost, struka i zanat, koja se bavi proučavanjem, dobivanjem i preradom metala. Njen je značaj za čovječanstvo toliki da su najznačajnija vremenska razdoblja dobila imena prema metalima (kamenno, bakreno, brončano i željezno doba). Razvoj metalurgije kroz povijest temeljio se na eksperimentalnim i empirijskim tehnikama, jer do početka 19. st. za to nije postojala jasna teorijska podloga poput termodinamičkih zakona. Drastičan razvoj započinje u 20. st. kada se teorijski, odnosno zakoni prirode sveopće primjenjuju u metalurgiji i postaju njezin čvrsti temelj. Opseg i kompleksnost metalurških procesa usporavali su daljnji napredak, koji je bio vezan uz čovjekove sposobnosti da ih izvodi i prati. Kada se krajem 20. st. u metalurgiji počela primjenjivati računalna tehnologija, vođenje metalurških procesa je postalo znatno lakše, brže i preciznije.

U početku su to bile metode pokušaja i pogreške zbog slabog poznavanja procesa taljenja, lijevanja i skrućivanja odljevaka u kalupima. Iako se principi lijevanja nisu kroz povijest značajno promijenili znanstvene spoznaje pojedinih procesa u ljevarstvu se neprekidno nadograđuju te su rezultirale velikim opusom materijala i postupaka koji nastaju lijevanjem. Lijevanje u suvremenom svijetu je jedna od najistraživanijih grana industrije. Lijevanje možemo definirati kao učinkovit i konkurentan proces proizvodnje metalnih predmeta različitih oblika, veličina i kompleksnosti geometrije čija kvaliteta mora udovoljavati suvremenim zahtjevima tržišta.

U proizvodnji ljevova na bazi željeza sažima se u dvije ili više grana metalurgije: procesna s aspekta proizvodnje taline i tehnološke razrade postupka lijevanja, fizikalna sa svojim zakonitostima i konačnim utjecajem na mehanička svojstva u okviru mehaničke metalurgije. Unutar grupacije ljevova na bazi željeza prepoznata je razdioba na željezne i čelične ljevove. Sivi lijev, kao ključni pojam ovog završnog rada, vrsta je željeznog lijeva u kojem je ugljik izlučen u obliku listića grafita. Iz mnogobrojnih prednosti valja istaknuti dobru livljivost, strojnu obradivost i ekonomičnost zbog čega je raširena njegova primjena u brojnim granama industrije. Jedna od najširih primjena je upravo proizvodnja u domeni grijaćih tijela, a u čemu predvodi jedna od najvećih ljevaonica u Republici Hrvatskoj Plamen d.o.o smještena u Požegi. U 97-godisnjoj tradiciji proizvodnje i obrade sivog lijeva proces je optimiziran kako bi zadovoljavao najviše standarde propisane normom, te pri tome bio financijski isplativ i ekološki prihvatljiv. Pored teorijske osnove rad prikazuje proces proizvodnje, ispitivanja, obrade sivog lijeva koji svoju krajnju primjenu pronalazi kao sastavni dio određene peći ili kamina.

2.0 TEORIJSKI DIO

2.1 Općenito o sivom lijevu

Sivi lijev pripada željeznim ljevovima kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Zbog listićave strukture grafita, sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, žilavost, istežanje i modul elastičnosti. Razlozi veoma česte uporabe sivog lijeva dobra su strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove, livljivost i ekonomičnost. Mikrostruktura sivog lijeva sastoji se od grafitnih listića i feritno-perlitne metalne osnove. Listići grafita svojom morfologijom djeluju zarezno u metalnoj osnovi te upravo o njihovom udjelu, veličini i raspodjeli ovise postignuta mehanička svojstva [1].

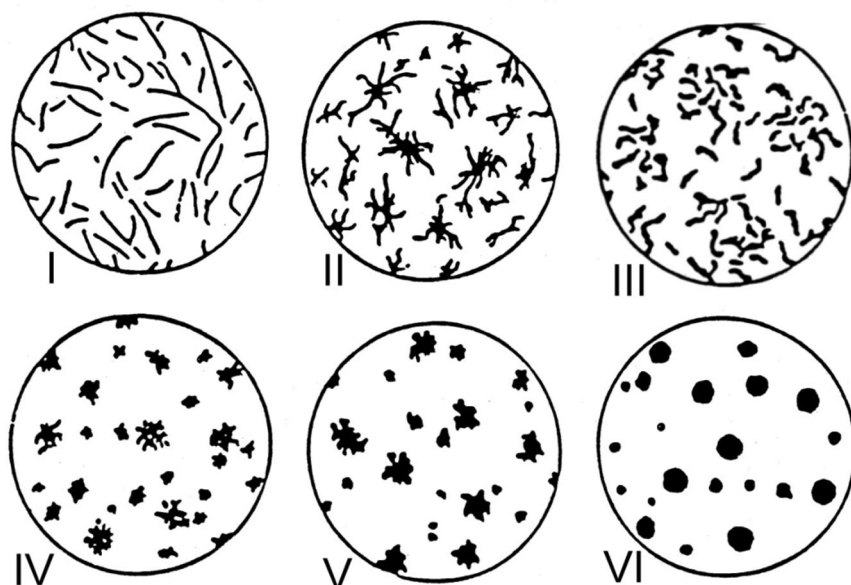
Tijekom 2016. godine u svijetu je proizvedeno 46,2 milijuna tona odljevka od sivog lijeva, što je 55,7 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova [2]. U Hrvatskoj je tijekom 2016. godine od ukupno 42.900 tona odljevaka od željeznih ljevova, proizvedeno 31.100 tona odljevka od sivog lijeva. Sivi lijev najviše se primjenjuje u strojogradnji, odljevcima za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesnu industriju i energetiku, industrija motornih vozila, dekorativni odljevci itd. Primjeri gotovih proizvoda u ljevaonici Plamen d.o.o prikazani su slikom 1.



Slika 1. Primjeri proizvoda od sivog lijeva u ljevaonici Plamen d.o.o [3]

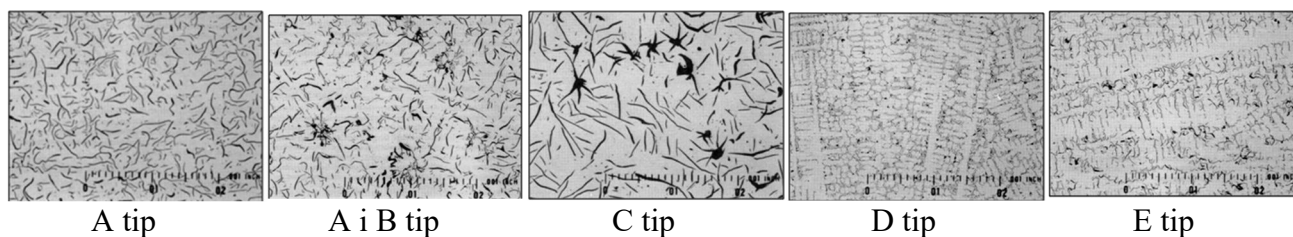
2.2 Klasifikacija sivog lijeva

Osnovna karakteristika sivog lijeva je izlučivanje grafita u listićavom, lamelarnom obliku sukladno HRN EN ISO 945-1:2018 [4]. Listićavi oblik grafita označen je kao oblik I. Označavanje ovog materijala GJL (G= *njem. Gusswerkstoff* = lijev, J= *eng. Iron* = željezo, L= *eng. Lamellar* = listićav) provodi se na osnovu norme HRN EN 1560:2012 [5].



Slika 2. Klasifikacija oblika grafita prema normi HRN EN ISO 945-1:2018 [4]

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva jednim dijelom ovise o obliku, veličini, količini i raspodjeli grafitnih listića. Distribucija, tip i veličina grafitnih listića ovisi o temperaturi i brzini skrućivanja, te nukleacijskom potencijalu taline. Prema normi EN ISO 945-1:2018., odnosno američkom normom ASTM A247 definirano je 5 tipova listićavog grafita kako je prikazano slikom 3 [6,7].



Slika 3. Tipovi listićavog grafita prema normi ASTM A247 - 17 [6,7].

Tip A grafitnih listića ima jednoliko raspodijeljene listiće, slučajne ili statističke orijentacije, u metalnoj osnovi. Taj tip grafita nalazimo kod željeznih ljevova s minimalnim pothlađenjem. Manji listići postižu se kod odljevaka s tanjim stjenkama (veća brzina hlađenja) i većim brojem centara nukleacije, što u konačnici rezultira većom vlačnom čvrstoćom. Ovaj tip grafita teško se ostvaruje, naročito kod odljevaka različitih debljina stjenki. Iz tog razloga talina sivog lijeva obično se mora cijepiti u cilju povećanja nukleacijskog potencijala tj. poboljšanja metalurške kvalitete taline.

B tip grafitnih listića stvara se kod sastava blizu eutektičkog i rezultat je većeg pothlađenja taline u odnosu na A tip grafitnih listića. Na početku eutektičkog skrućivanja formiraju se rozete u čijem se centru izlučuje sitni fini listićavi grafit, jer eutektičko skrućivanje započinje pri većim pothlađenjima. Toplina oslobođena tijekom skrućivanja povisuje temperaturu preostale taline, odnosno smanjuje pothlađenje, što rezultira naknadnim rastom A tipa grafitnih listića koji je izražen po rubu rozeta. Veće pothlađenje zbog kojeg se javlja sitni grafit uvjetovano je nedostatkom centara heterogene nukleacije i govori o nedostatnom cijepljenju taline. Kod istog kemijskog sastava i iste debljine stjenke, odljevak od sivog lijeva s B tipom grafitnih listića imati će nižu vlačnu čvrstoću od odljevka s A tipom grafitnih listića male veličine. To je posebno izraženo kod sivih ljevova podeutektičkog sastava.

Tip C grafitnih listića pojavljuje se u nadeutektskim sivim ljevovima, posebno u onima s visokim udjelom ugljika. Karakteriziraju ga veliki, grubi listići izlučenog grafita, što govori o nadeutektskom sastavu. Ovaj tip grafitnih listića izlučuje se tijekom primarnog skrućivanja, zbog čega se često naziva primarnim grafitom. Po dostizanju eutektskog sastava u talini nastupa izlučivanje A tipa grafitnih listića. Prisustvo C tipa grafitnih listića u mikrostrukturi značajno smanjuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću odljevka od sivog lijeva i rezultira grubom površinom odljevka nakon strojne obrade. Međutim, zbog niskog modula elastičnosti i visoke toplinske vodljivosti, sivi lijev ovim tipom grafitnih listića pogodan je za lijevanje odljevaka kod kojih se zahtijeva visoka otpornost na izmjenične cikluse grijanja i hlađenja (toplinske šokove) i visoka sposobnost prigušenja vibracija, a čvrstoća nije presudan faktor. Pored toga, rezultira odličnim ljevarskim svojstvima i strojnom obradivošću.

Tip D i E grafitnih listića nastaje kada je pothlađenje visoko, ali ne dovoljno da prouzrokuje stvaranje karbida. Oba tipa se susreću u interdendritnim područjima. Tip D grafitnih listića statistički je raspodijeljen, dok E tip pokazuje usmjerenu orijentaciju obzirom na odvođenje topline i usmjerenje primarnih dendrita. Tip E grafitnih listića povezan je s jače izraženim podedutektskim sastavima sivih ljevova (CE od 3,3 do 3,5) koji su podvrgnuti prilično visokim brzinama hlađenja. Kod tih sivih ljevova na temperaturi eutektskog skrućivanja preostaje mala količina taline za skrućivanje. Talina u tom slučaju skrućuje između austenitnih dendrita koji su usmjereni u pravcu skrućivanja. E tip grafitnih listića ima manje štetan utjecaj na mehanička svojstva od D tipa grafitnih listića.

Prema normi HRN EN 1561:2011 [6] sivi lijev se klasificira prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. U tablici 1 prikazana je klasifikacija prema navedenoj normi.

Tablica 1. Mehanička svojstva sivog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova ili mehaničkom obradom priljevnih proba (prema HRN EN 1561:2011) [1,8]

Označivanje materijala		Relevantna debljina stjenke ¹⁾		Vlačna čvrstoća R_m ²⁾ , propisane vrijednosti		Vlačna čvrstoća R_m ⁴⁾ , očekivane vrijednosti u odljevku ⁵⁾ , MPa, min.
Oznaka	Broj	>, mm	≤, mm	u odvojeno lijevanom uzorku ³⁾ , MPa	u priljevnoj probi, MPa, min.	
EN-GJL-100	EN-JL1010	5 ⁶⁾	40	100-200 ⁷⁾	-	-
EN-GJL-150	EN-JL1020	2,5 ⁶⁾	5	150-250 ⁷⁾	-	180
		5	10		-	155
		10	20		-	130
		20	40		120	110
		40	80		110	95
		80	150		100	80
		150	300		90 ⁵⁾	-
		2,5 ⁶⁾	5		-	230
		5	10		-	205
		10	20		-	180

Označivanje materijala		Relevantna debljina stjenke ¹⁾		Vlačna čvrstoća R_m ²⁾ , propisane vrijednosti		Vlačna čvrstoća R_m ⁴⁾ , očekivane vrijednosti u odljevku ⁵⁾ , MPa, min.
Oznaka	Broj	>, mm	≤, mm	u odvojeno lijevanom uzorku ³⁾ , MPa	u priljevnoj probi, MPa, min.	
EN-GJL-200	EN-JL1030	20	40	200-300 ⁷⁾	170	155
		40	80		150	130
		80	150		140	115
		150	300		130 ⁵⁾	-
EN-GJL-250	EN-JL1040	56 ⁶⁾	10	250-350 ⁷⁾	-	250
		10	20		-	225
		20	40		210	195
		40	80		190	170
		80	150		170	155
		150	300		160 ⁵⁾	-
EN-GJL-300	EN-JL1050	10 ⁶⁾	20	300-400 ⁷⁾	-	270
		20	40		250	240
		40	80		220	210
		80	150		210	195
		150	300		190 ⁵⁾	-
EN-GJL-350	EN-JL1060	106 ⁶⁾	20	350-450 ⁷⁾	-	315
		20	40		290	280
		40	80		260	250
		80	150		230	225
		150	300		210 ⁵⁾	-

1) Ako se upotrebljava priljevna proba, relevantna debljina stjenke odljevka trebala bi biti ugovorena prilikom prihvaćanja narudžbe.

2) Ako se prilikom prihvaćanja narudžbe ugovori ispitivanje vlačne čvrstoće, mora se utvrditi i tip ispitnog uzorka. Ukoliko nije definiran, proizvođaču se prepušta slobodna odluka o tipu ispitnog uzorka.

3) U cilju prihvaćanja, vlačna čvrstoća određene kvalitete mora biti između nominalne vrijednosti n (pozicija 5 u oznaci materijala) i (n + 100) (MPa).

4) U ovom stupcu prikazane su vjerojatne varijacije vlačne čvrstoće za različite debljine stjenke odljevka u slučaju jednostavnog oblika odljevka i jednolične debljine stjenke. Za odljevke s ne jednoličnom debljinom stjenke ili odljevke koji sadrže šupljine za jezgre, podaci u tablici predstavljaju samo aproksimaciju vjerojatnih vrijednosti vlačne čvrstoće u različitim stjenkama i dizajn odljevka trebao bi biti baziran na izmjerenoj vlačnoj čvrstoći u kritičnim dijelovima odljevka.

5) Ove vrijednosti su informativne. Ne radi se o propisanim vrijednostima.

6) Ova vrijednost je uključena kao donja granica područja relevantne debljine stjenke.

7) Ove vrijednosti odnose se na uzorke promjera 30 mm u lijevanom stanju, što odgovara relevantnoj debljini stjenke od 15mm.

S obzirom na tvrdoću, sivi se lijev klasificira u šest kvaliteta. Određivanje Brinellove tvrdoće provodi se prema normi HRN EN 1561:2011 [8], kako je prikazano tablicom 2.

Tablica 2. Brinellova tvrdoća odljevaka od sivog lijeva na ugovorenom mjestu ispitivanja (prema HRN EN 1561:2011) [1,8]

Označivanje materijala		Relevantna debljina stjenke,		Tvrdoća po Brinellu ^{1), 2)} HB30	
Oznaka	Broj	> mm	≤ mm	min.	maks.
EN-GJL-HB155	EN-JL2010	40 ³⁾	80	-	155
		20	40	-	160
		10	20	-	170
		5	10	-	185
		2,5	5	-	210
EN-GJL-HB175	EN-JL2020	40 ³⁾	80	100	175
		20	40	110	185
		10	20	125	205
		5	10	140	225
		2,5	5	170	260
EN-GJL-HB195	EN-JL2030	40 ³⁾	80	120	195
		20	40	135	210
		10	20	150	230
		5	10	170	260
		4	5	190	275
EN-GJL-HB215	EN-JL2040	40 ³⁾	80	145	215
		20	40	160	235
		10	20	180	255
		5	10	200	275
EN-GJL-HB235	EN-JL2050	40 ³⁾	80	165	235
		20	40	180	255
		10	20	200	275
EN-GJL-HB255	EN-JL2060	40 ³⁾	80	185	255
		20	40	200	275

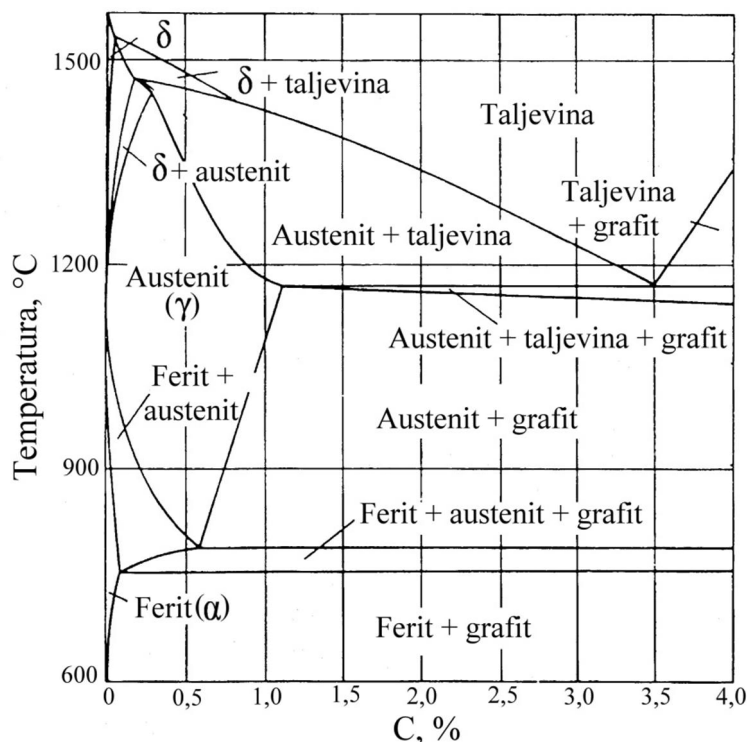
1) Kod svake kvalitete Brinellova tvrdoća smanjuje se s porastom debljine stjenke.

2) Dogovorom proizvođača i kupca može se definirati uže područje tvrdoće na ugovorenom mjestu u odljevku, osiguravajući da nije manje od 40 jedinica po Brinellu.

3) Relevantna debljina stjenke za pojedinu kvalitetu.

2.3 Pretvorbe u krutom stanju

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova je ravnotežni dijagram Fe-C. Pri skrućivanju sivog lijeva značajno je odvijanje eutektičke reakcije kojom se izdvaja grafit. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si prikazan je na slici 4.



Slika 4. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si [1, 9]

Tijekom skrućivanja dobiva se ciljana mikrostruktura željeznih ljevova. Pri sobnoj temperaturi tipični sivi lijev sastoji se od listića grafita i metalne osnove koju predstavljaju smjesa perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) i ferita (α). Na početku skrućivanja pri likvidus temperaturi (T_L) nukleira austenit koji raste u obliku dendrita. Pri dostizanju eutektičke temperature (T_{ES}) nukleira grafit između dendritnih grana. Pri tome se u talini dostiže eutektička koncentracija ugljika (4,3%). Sadržaj ugljika od 4,3% i 1148°C predstavlja invarijantnu točku pri kojoj se odvija eutektička reakcija koja rezultira razvojem dviju krutih faza: jedna je eutektički austenit, a druga grafit [1].

Eutektički austenit u kasnijim fazama skrućivanja prelazi u ferit i/ili perlit. Udio ferita odnosno perlita u metalnoj osnovi ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja u eutektoidnom području te udjelu grafitnih listića. Ferit nastaje pri vrlo sporom hlađenju i prisutan je kod B i D tipa grafita. Perlit se javlja pri neravnotežnim uvjetima, većim brzinama hlađenja i najčešće se susreće kod A tipa grafita. Legirajući elementi i brzina hlađenja utječu na stvaranje ferita i/ili perlita. Silicij je promotor ferita, dok su mangan, bakar i kositar promotori perlita.

Silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utvrđeno je da 1% Si snižava eutektički sastav za 0,31% C. Zbog toga se prati ekvivalent ugljika CE:

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

kada je:

CE = 4,3 – eutektički sastav

CE < 4,3 – podetektički sastav

CE > 4,3 – nadeutektički sastav

2.3.1 Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke) na mikrostrukturu

Uz kemijski sastav, svojstva odljevaka od sivog lijeva ovise o brzini hlađenja. Brzinu hlađenja određuje poprečni presjek i debljina stjenke tijekom i nakon skrućivanja. To ukazuje na postojanje razlike između tankih i debelih stjenki u istom odljevku. Skrućivanje debelih stjenki traje duže od skrućivanja tankih stjenki. Ukoliko je brzina hlađenja veća, veći je i udio perlita u mikrostrukturi što rezultira većom tvrdoćom i čvrstoćom. Kod vrlo velikih brzina hlađenja može doći do stvaranja martenzita (prezasićena kruta otopina ugljika). Kod odljevaka sa stjenkama debljine od 12,7 mm do 50,00 mm moguće je da se u tankim stjenkama 12,7 mm metalna osnova sastoji od martenzita i perlita, dok se u debelim stjenkama većim od 50,00 mm sastoji od perlita i ferita. Sivi lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. Vlačna se čvrstoća smanjuje s porastom debljine stjenke. Smanjenje vlačne čvrstoće uzrokovano je prisustvom većih grafitnih listića te smanjenjem količine vezanog ugljika. Smanjenje količine vezanog ugljika rezultira porastom udjela ferita, te povećanjem razmaka lamela u perlitu [1].

2.4 Proizvodnja taline sivog lijeva

Proizvodnja taline sivog lijeva jedan je od najvažnijih koraka u procesu proizvodnje kvalitetnih odljevaka, a obuhvaća taljenje i pripremu. Kvaliteta taline ovisi o kvaliteti uloženog materijala, kontroli procesa taline te cijepljenju [1].

2.4.1 Uložni materijali

Sirovo željezo važan je dio metalnog uloška za kontrolu kemijskog sastava. Dodatak sirovog željeza utječe povoljno na nukleacijski sadržaj taline. Udio sirovog željeza kreće se od nekoliko postotaka do >90 % ovisno o procesu i tehnologiji.

Čelični otpad upotrebljava se za proizvodnju željeznih ljevova. Upotreba određene količine čelika prihvatljiva je za snižavanje ukupnog sadržaja ugljika i silicija u ulošku. U slučaju da metalni uložak sadrži previše čelika raste potrošnja koksa ili električne energije pri taljenju, produžuje se vrijeme trajanja taline, smanjuje metalurška kvaliteta, povećava se količina troske i potrebno je snažnije cijepljenje taline.

Sredstva za naugljičavanje dodaju se kao komponente uloška, te kao dodatak taljenja u svrhu podešavanja ugljika u talini. Za naugljičavanje u indukcijskim pećima koristi se kristalni grafit, komadi elektroda i petrol koks. Pri odabiru sredstava pozornost treba obratiti na sadržaj dušika, sumpora i pepela. Ako je potrebna korekcija sadržaja ugljika nakon taljenja, potrebno je u talinu dodati sredstvo za naugljičenje visoke čistoće. Manje korekcije provode se dodavanjem u mlaz taline prilikom ispusta iz peći. Silicij smanjuje topljivost ugljika u talini. Ukoliko je potrebno povišiti sadržaj ugljika i silicija u talini, prvo treba provesti naugljičavanje, a zatim dodati sredstvo za povišenje sadržaja silicija.

Silicij-karbid sadrži približno 30 % ugljika i približno 70 % silicija i pogodno je sredstvo za naugljičenje taline i povišenje sadržaja silicija u talini. Silicij-karbid poboljšava metaluršku kvalitetu taline, te je iskorištenje silicija i ugljika iz silicij-karbida vrlo visoko. Silicij-karbid je potrebno dodati u ranijoj fazi taljenja, nikada u lonac, ograničen je na ~1,0 % mase

metalnog uloška. Pri prekomjernom dodatku dolazi do povećanog trošenja obloge peći, nagomilavanja na stjenkama peći i grešaka u odljevcima.

Ferolegure koristimo za legiranje taline i dodaju se u peć ili lonac. Bitno je poznavati kemijski sastav svake od dodavanih legura. Kada se želi podići sadržaj silicija u talini ili je zahtijevano legiranje taline silicijem primjenjuju se kvalitete FeSi koje nisu namijenjene za cijepljenje taline. Visok sadržaj aluminiya može dovesti do nastajanja mjehura u odljevcima [1].

2.4.2 Vrste peći za taljenje

Kupolna peć predstavlja najekonomičniji agregat za taljenje, odnosno proizvodnju većih količina sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva.

Indukcijska peć se sve više upotrebljava u lijevaonicama sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva zbog jednostavnosti proizvodnje, fleksibilnosti i mogućnosti proizvodnje taline s niskim sadržajem sumpora.

Elektrolučna peć ne upotrebljava se u velikom opsegu u proizvodnji vermikularnog, sivog i nodularnog lijeva.

Rotacijska peć, za razliku od elektrolučne, upotrebljava se u velikom opsegu za proizvodnju vermikularnog, sivog i nodularnog lijeva.

Od gore navedenih peći, najviše se primjenjuje indukcijska i kupolna peć za proizvodnju sivog lijeva [1].

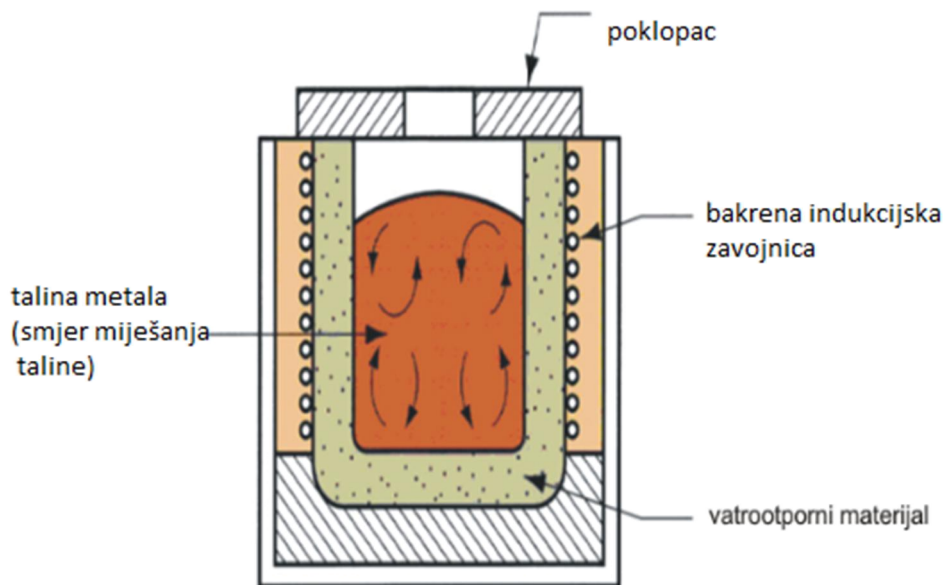
2.4.2.1 Indukcijske peći

Indukcijske peći suvremeni su agregati za taljenje i imaju velike prednosti pred kupolnim pećima. Karakterizirane su bržim zagrijavanjem i taljenjem uloška, te vrlo malim odgorom elemenata. Odgor silicija iznosi 5 do 10 %, a odgor mangana je zanemariv, kao i odgor ukupnog materijala koji je manji od 1 %. Relativno jednostavna kontrola kemijskog sastava i primjena, sigurnije legiranje, mogućnost pravovremenih promjena kemijskog sastava taline, kvalitete ili sadržaja legirajućih elemenata, mogućnost postizanja viših temperatura [1].

Nedostatci indukcijske peći u odnosu na kupolnu peć jesu veći investicijski troškovi, veći troškovi taljenja zbog visoke cijene električne energije, lošija kvaliteta taline te niska reaktivnost troske zbog niske temperature [1].

Zagrijavanje se provodi na principu transformacije električne energije u toplinu. Kruti uložak pretvara se u talinu uz nizak gubitak legirajućih elemenata i bez nasumporavanja. Nema primjene koksa kao što je slučaj kod kupolne peći. Fosfor i sumpor se ne mogu ukloniti iz taline, te je potrebno obratiti pažnju na uložni materijal. Razlikujemo dvije vrste indukcijske peći, a to su indukcijske peći s loncem (bez jezgre) i kanalne indukcijske peći (s jezgrom) [1].

Najčešće se primjenjuje indukcijska peć s loncem koja je shematski prikazana na slici 5.



Slika 5. Indukcijska peć s loncem [10]

Glavni dijelovi peći su lonac obložen vatrootpornim materijalom i induktor. Induktor je bakrena cijev koja je u obliku spirale i namotana je oko lonca. Kada peć radi, kroz bakrenu cijev teče voda koja služi za hlađenje jer se induktor izlaže visokim temperaturama. Na vrhu lonca je žlijeb za izlivanje taline iz peći, koji se povremeno mora očistiti, jer se talina na žlijebu ohladi i sprječava pravilno istjecanje taline u lonac. Peć je postavljena u masivnu čeličnu konstrukciju koja se nagiba tijekom ispuštanja taline iz peći. Prolaskom struje u induktoru stvara se izmjenično magnetsko polje koje inducira tok struje kroz uložni materijal. Uslijed induciranih struja i suprotnog smjera nastaje drugo magnetsko polje. Djelovanjem tih dvaju magnetskih polja dolazi do potiskivanja struje prema površini i do samog zagrijavanja.

U praksi se danas upotrebljavaju dvije vrste indukcijskih peći s loncem: nisko frekventne ili mrežno frekventne i srednje frekventne indukcijske peći s loncem [1].

Mrežno frekventne indukcijske peći rade na frekvenciji kojom se doprema električna energija, a to je 50 Hz. U indukcijskim pećima uvijek mora biti prisutna određena količina taline i to je ono što te peći najviše karakterizira. To znači da nakon izlivanja taline u peći ostaje 20 do 35 % taline u koji se ulaže kruti uložak. Pravilan red dodavanja krutog uložka podrazumijeva redom najprije sredstvo za naugljčavanje, čelični otpad, povratni materijal iz ljevaonice, te sirovo željezo. Ukoliko se lonac potpuno isprazni, vrijeme taljenja je produženo. Glavni nedostaci nisko frekventnih peći upravo su problemi s pražnjenjem lonca, odnosno produženim taljenjem ako u peći nije prisutna talina.

Kod srednje frekventne indukcijske peći s loncem, mrežna se frekvencija elektroničkim putem konvertira u više frekvencije preko generatora frekvencije. One mogu raditi na frekvencijama do 5000 Hz. Prednost srednje frekventnih u odnosu na nisko frekventne indukcijske peći je mogućnost povećanja snage bez potrebe za povećanjem njihove veličine. One ne zahtijevaju prisustvo rastaljenog metala za početak taljenja. Nakon taljenja u potpunosti se prazne i ponovo pune hladnim uloškom čime se postiže veća fleksibilnost. Danas su srednje frekventne peći više zastupljene od nisko frekventnih indukcijskih peći.

Kao obloga u samoj peći najčešće se koristi silikatna vatrootpalna obloga. Nije osjetljiva na toplinske šokove, što znači da se peć nakon gašenja i hlađenja može ponovo lako pokrenuti