

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**Zoran Glavaš**

**ANALIZA GREŠAKA NA  
ODLJEVCIMA**

**Sisak, 2009.**

# 1. UVOD

Oblikovanje metala lijevanjem poznato je već jako dugo, barem 5 000 godina. Premda je lijevanje postupak čiji su osnovni principi od najstarijih dana ostali isti, to je i danas vrlo konkurentan proizvodni proces budući je po svojim karakteristikama jedan od najefikasnijih načina proizvodnje metalnih, ekološki prihvatljivih predmeta različitih veličina i kompleksnosti uz mogućnost izrade replika i reciklaže. Lijevanje je jedina proizvodna tehnika sposobna da proizvede kompleksne oblike u jednoj operaciji. Kako se kontrola procesa lijevanja poboljšava, povećava se kompleksnost oblika koji se mogu proizvesti procesom lijevanja, a pouzdanost tih odljevaka je značajno pospješena.

Ljevaonice koje danas i ubuduće žele opstati na globalnom tržištu moraju se prilagoditi visokim zahtjevima tog tržišta. To zahtijeva permanentnu implementaciju novih koncepcija, tehnologija i materijala u ljevarskoj industriji, u cilju dobivanja visokokvalitetnih, jeftinih i ekološki prihvatljivih odljevaka.

Proizvodnja odljevaka je vrlo složen proces koji obuhvaća veliki broj faza. Pogreške u bilo kojoj fazi procesa proizvodnje odljevaka, npr. pri izradi kalupa ili taljevine, pri konstruiranju i dimenzioniranju uljevnih sustava i sustava napajanja itd. mogu rezultirati greškama na odljercima. Osim pri lijevanju i skrućivanju odljevaka, greške na odljercima mogu nastati i pri manipulaciji i strojnoj obradi.

Greške na odljercima zahtijevaju određenu doradu odljevaka, a u krajnjem slučaju mogu rezultirati odbacivanjem, odnosno škartiranjem odljevaka, što je svakako najnepovoljniji slučaj gledano s ekonomskog stajališta. Potrebno je naglasiti da se određene nesavršenosti i greške na odljercima mogu prihvatiti ako ne utječu na funkcionalnost odljevka, što ovisi o primjeni odljevka i zahtjevima kupca. Međutim, greške koje mogu dovesti do loma odljevka u radu ili mogu ugroziti njegovu funkcionalnost ne mogu se tolerirati.

Da bi se izbjeglo ili smanjilo pojavljivanje grešaka na odljercima, potrebno je pažljivo kontrolirati sve faze u procesu proizvodnje odljevaka. Ako se greške unatoč tome pojave, potrebno ih je pažljivo analizirati i utvrdi uzroke njihova nastanka te uvesti određene promjene u proizvodni proces. Međutim, često isprepletanje više faktora koji utječu na nastanak greške otežavaju sigurno prepoznavanje i sprječavanje uzroka njenog nastajanja.

U okviru ovog nastavnog teksta najprije se obrađuje klasifikacija grešaka na odljercima od željeznih i neželjeznih legura, a potom metode za detektiranje i analizu nastalih grešaka. Nakon toga detaljno su obrađene greške koje se najčešće pojavljuju na odljercima od željeznih i neželjeznih legura, odnosno dat je njihov opis, objašnjeni mogući uzroci i mehanizmi nastanka te navedene mjere za njihovo sprječavanje.

## 2. KLASIFIKACIJA GREŠAKA NA ODLJEVCIMA

Funkcionalnost odljevaka u velikoj mjeri ovisi o ispravnosti odljevaka. Prema tome, odljevci ne bi smjeli sadržavati greške koje mogu rezultirati prijevremenim oštećenjem i odbacivanjem odljevka, lomom alata tijekom strojne obrade ili lošim mehaničkim svojstvima.

Postoje greške na odljercima koje ne utječu na funkcionalnost i životni vijek odljevaka, ali mogu rezultirati neadekvatnim izgledom odljevka ili mogu poskupiti daljnje faze, kao što je npr. strojna obrada odljevaka. Većina takvih grešaka može se relativno jednostavno korigirati sačmanjem ili brušenjem. Pojedine greške koje se teško mogu ukloniti mogu biti prihvatljive na određenim lokacijama.

Ljevači u praksi često upotrebljavaju prilično jedinstvene nazive, kao što je „štakorski rep“ (engl. *rattail*), „krasta“ (engl. *scab*), „žljebići“ (engl. *buckle*) itd. da bi opisali različite nedostatke, odnosno greške na odljercima. Nažalost, ljevači mogu upotrijebiti različitu nomenklaturu da bi opisali istu grešku. Međutim, Međunarodni odbor tehničkih asocijacija ljevaonica (*International Committee of Foundry Technical Associations*) standardizirao je nomenklaturu i definirao sedam osnovnih kategorija grešaka na odljercima na osnovi kojih je sastavljen i atlas grešaka:

- Metalne izrasline (zadebljanja),
- Šupljine,
- Diskontinuiteti (napukline),
- Površinske greške,
- Nepotpuni odljevci,
- Netočne dimenzije ili oblik
- Uključci i nepravilnosti u strukturi.

Sve greške razvrstane su u jednu od navedenih 7 kategorija koje se mogu dalje razvrstati u grupe ili podgrupe. Na taj način može se svaka greška pronaći u atlasu grešaka. Osim opisa, navedeni su mogući uzroci nastanka i mjere za sprječavanje nastajanja greške.

Pri definiranju oznaka greški u atlasu uzimana je u obzir i vrsta materijala od kojeg je odljevak izrađen te primijenjeni postupak lijevanja. Za označivanje vrste lijeva primjenjuju se slijedeće oznake:

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| • Čelični lijev                 | 1 |
| • Sivi lijev                    | 2 |
| • Nodularni lijev               | 3 |
| • Temperirani lijev             | 4 |
| • Legure lakih metala           | 5 |
| • Legure teških obojenih metala | 6 |

Postupci lijevanja imaju slijedeće oznake:

- |   |   |
|---|---|
| • Lijevanje u sirove pješčane kalupe    | a |
| • Lijevanje u suhe ili očvrsnute kalupe | b |

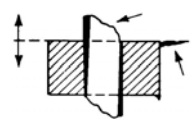
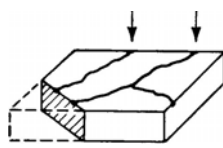

- Lijevanje u jezgrene kalupe c
- Lijevanje u školjke d
- Lijevanje u keramičke školjke e
- Točni lijev f
- Precizni lijev g
- Lijevanje u kokilu h
- Lijevanje pod tlakom i
- Centrifugalno lijevanje k
- Kontinuirano lijevanje l

Oznaka greške u atlasu grešaka sastoji se od brojeva i slova. Npr. slova i brojevi u oznaci greške A 111 – 4 a predstavljaju:

A ----- Kategorija greške  
 1 ----- Grupa greške  
 1 ----- Podgrupa  
 1 ----- Greška  
 |  
 4 ----- Vrsta lijeva  
 a -----Postupak lijevanja

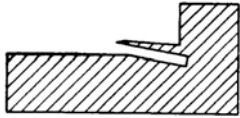
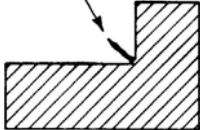

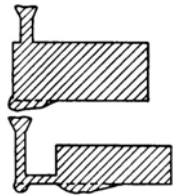
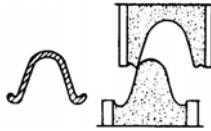
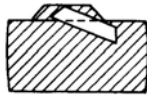
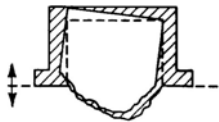
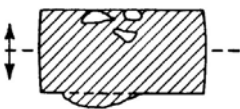

U tablici 2.1. prikazane su neke od najčešćih greški iz svake kategorije Općenito promatrano, najopasnije greške su one koje djeluju kao mjesta povećanog naprezanja ili promotori pukotina. Tu spadaju: postojeće pukotine, unutarnje šupljine i nemetalni uključci.

Tablica 2.1. Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljercima

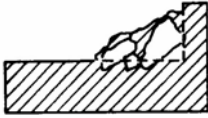
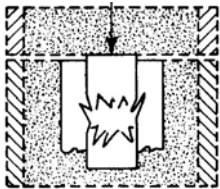
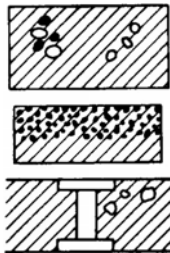
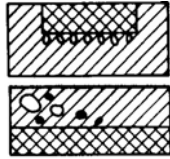

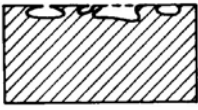
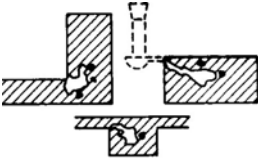
Redni broj	Opis	Skica
<b>Metalne izrasline (zadebljanja)</b>		
<b>A 100</b>	<b>Metalne izrasline u obliku srha</b>	
<i>A 110</i>	<i>Metalne izrasline u obliku srha bez promjene najznačajnijih dimenzija odljevka</i>	
A 111	Tanki srh na diobenoj ravnini ili jezgrenom osloncu	
A 112	Izrasline u obliku žila (pruga) na površini odljevka	
A 113	Mreža izraslina na površini visokotlačno odlivenog odljevka	



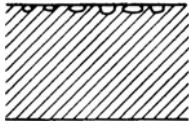
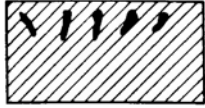

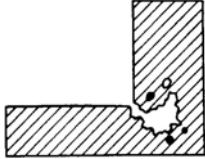


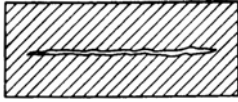
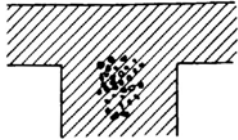
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
A 114(a)	Tanka izraslina paralelna površini odljevka, u uvučenim kutovima	
A 115	Tanka metalna izraslina smještena na uvučenom kutu koja dijeli kut na dva dijela	
A 120	<i>Metalne izrasline u obliku srha uz promjenu najznačajnijih dimenzija odljevka</i>	
A 123(a)	Velike metalne izrasline u obliku srha nastale zbog pukotina u kalupu (precizni lijev); promjena najznačajnijih dimenzija odljevka	
<b>A 200</b>	<b>Masivne izrasline</b>	
A 210	<i>Zadebljanja</i>	
A 212(a)	Višak metala u blizini ušća ili ispod spusta	
A 213(a)	Metalne izrasline na okomitim ili kosim površinama odljevka u smjeru sastavljanja kalupa i postavljanja jezgri	
A 220	<i>Izrasline s grubim površinama</i>	
A 221(a)	Izrasline s grubim površinama na gornjoj površini odljevka	
A 222(a)	Izrasline s grubim površinama na donjoj površini odljevka (masivne izrasline)	
A 223(a)	Izrasline s grubim površinama na donjoj površini odljevka; raspršeni uključci pijeska, posebno na gornjoj površini odljevka	
A 224(a)	Izrasline s grubim površinama na ostalim dijelovima odljevka (bočne stranice, kutovi)	


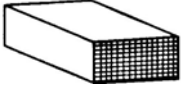
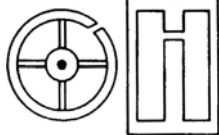
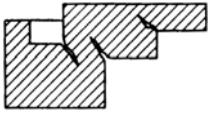
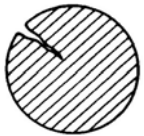
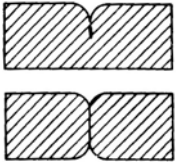
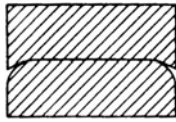
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
A 225(a)	Izrasline s grubim površinama preko velikih područja odljevka	
A 226(a)	Izrasline s grubim površinama u području koje je formirano primjenom jezgre	
<b>Šupljine</b>		
<b>B 100</b>	<b>Šupljine s zaobljenim, glatkim stjenkama vidljive golim okom (mjehuri, pore)</b>	
<i>B 110</i>	<i>Klasa B 100 šupljina unutar odljevka koje se ne protežu do površine, vidljive samo specijalnim metodama, tijekom strojne obrade ili loma odljevka</i>	
B 111(a)	Unutarnje, zaobljene šupljine, obično glatkih stijenki, različite veličine, izolirane ili nepravilno grupirane u svim područjima odljevka	
B 112(a)	Kao B 111(a), samo smještene u blizini metalnih komponenti u kalupu (hladila itd.)	
B 113(a)	Kao B 111(a), samo popraćene uključcima troske (G 122).	
<i>B 120</i>	<i>Klasa B 100 šupljina smještenih na ili blizu površine odljevka, jasno vidljivih na površini ili barem povezanih sa vanjskom okolinom</i>	
B 121(a)	Šupljine različitih veličina, pojedinačne ili grupirane, obično na ili blizu površine, glatkih stijenki	
B 122(a)	Šupljine u kutovima odljevka, često se protežu duboko u odljevak	

Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljercima

Redni broj	Opis	Skica
B 123	Fina poroznost (šupljine) na površini odljevka, pojavljuju se u manjim ili većim područjima	
B 124(a)	Male, uske šupljine u obliku pukotina, koje se pojavljuju na stranicama ili kutovima odljevka, uglavnom samo nakon strojne obrade; većinom okomite na površinu odljevka	
<b>B 200</b>	<b>Šupljine s hrapavim stjenkama, stezanje</b>	
<i>B 210</i>	<i>Otvorena šupljina klase B 200 koja se ponekad duboko proteže u odljevak</i>	
B 211(a)	Otvorena šupljina ljevkastog oblika; dendriti na stjenkama	
B 212(a)	Otvorena šupljina oštih bridova u kutovima debelostjenih odljevaka ili spojevima s ušćima	
B 213(a)	Otvorena šupljina koje se proteže od jezgre prema unutrašnjosti odljevka	
<i>B 220</i>	<i>Šupljina klase B 200 koja je u potpunosti locirana u unutrašnjosti odljevka</i>	
B 221(a)	Unutarnja šupljina nepravilnog oblika; često prisutni dendriti na stjenkama	
B 222(a)	Unutarnja šupljina ili porozno područje uzduž centralne osi	
<b>B 300</b>	<b>Porozne strukture uzrokovane brojnim malim šupljinama</b>	
<i>B 310</i>	<i>Šupljine klase B 300 teško vidljive golim okom</i>	
B 311(a)	Disperzirana poroznost (zbog stezanja) unutar stijenki odljevka; teško uočljiva golim okom	

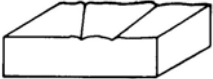
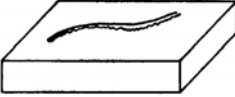
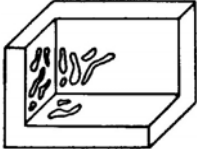

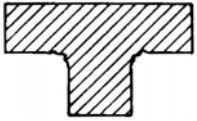

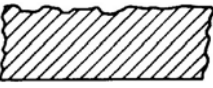
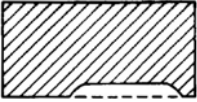
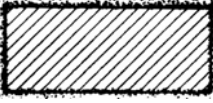
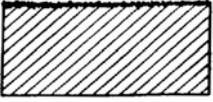
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
<b>Diskontinuiteti (napukline)</b>		
<b>C 100</b>	<b>Diskontinuiteti, uglavnom na sjecištima, uzrokovani mehaničkim utjecajem (prijelom)</b>	
<i>C 110</i>	<i>Lom (prijelom)</i>	
C 111(a)	Prijelom uobičajenog izgleda (hladni prijelom)	
<i>C 120</i>	<i>Lom (prijelom) sa oksidacijom</i>	
C 121(a)	Površina prijeloma potpuno oksidirana oko rubova (topla pukotina)	
<b>C 200</b>	<b>Diskontinuiteti uzrokovani unutarnjim napetostima i ograničenim stezanjem (pukotine)</b>	
<i>C 210</i>	<i>Hladne pukotine</i>	
C 211(a)	Diskontinuiteti u područjima koja su osjetljiva na vlačna naprezanja tijekom hlađenja; površina nije oksidirana	
<i>C 220</i>	<i>Tople pukotine</i>	
C 221(a)	Nepravilno oblikovani diskontinuiteti u područjima koja su osjetljiva na napetosti; oksidirana površina prijeloma, dendritna struktura	
C 222(a)	Prijelom (pukotina) nakon završenog skrućivanja, tijekom hlađenja ili toplinske obrade	
<b>C 300</b>	<b>Diskontinuiteti zbog nedovoljne staljenosti (hladni zavar); rubovi uglavnom zaobljeni, što ukazuje na loš kontakt između struja tekućeg metala (mlazova taljevine) tijekom punjenja kalupa</b>	
<i>C 310</i>	<i>Nedostatak potpune staljenosti u segmentu odljevka koji se zadnji popunjava</i>	
C 311(a)	Potpuno ili djelomično razdvajanje (rastavljanje) stjenke odljevka, često po vertikali	
<i>C 320</i>	<i>Nedostatak staljenosti između dva segmenta odljevka</i>	
C 321(a)	Razdvajanje (rastavljanje) odljevka u horizontalnoj ravnini	

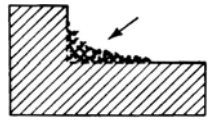
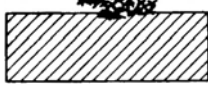
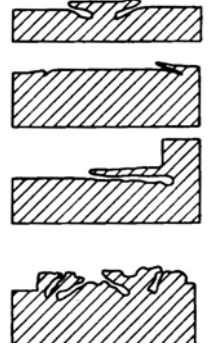
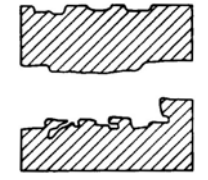
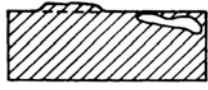
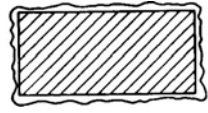
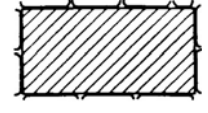
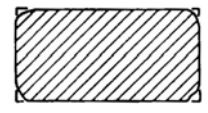
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
<i>C 330</i>	<i>Nedostatak staljenosti oko unutarnjih hladila i umetka</i>	
C 331(a)	Lokalni diskontinuitet u blizini metalnog umetka	
<b>C 400</b>	<b>Diskontinuiteti uzrokovani metalurškim greškama</b>	
<i>C 410</i>	<i>Razdvajanje duž granica zrna</i>	
C 411(a)	Razdvajanje duž granica zrna primarne kristalizacije	
C 412(a)	Mreža pukotina preko čitavog poprečnog presjeka	
<b>Površinske greške</b>		
<b>D 100</b>	<b>Nepravilnosti na površini odljevka</b>	
<i>D 110</i>	<i>Nabori na površini odljevka</i>	
D 111	Nabori preko poprilično velikih područja odljevka	
D 112	Mrežasta nazubljenost ili nabori na površini (nodularni lijev)	
D 113	Valoviti nabori bez diskontinuiteta; rubovi nabora u istoj ravnini, glatka površina odljevka	
D 114	Oznake (šare) po površini odljevka koje pokazuju smjer toka tekućeg metala (legure lakih metala)	
<i>D 120</i>	<i>Hrapavost površine</i>	
D 121	Dubina hrapavosti na površini približno odgovara dimenzijama zrna pijeska	
D 122	Dubina hrapavosti na površini je veća od dimenzija zrna pijeska	

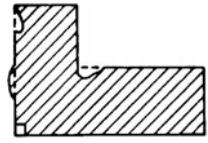
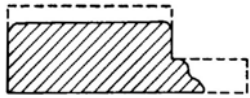
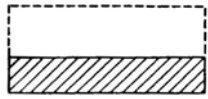
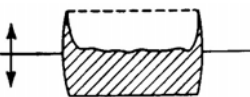

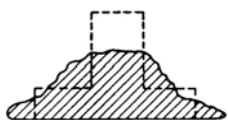
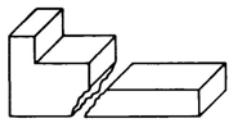
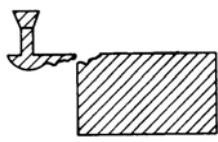
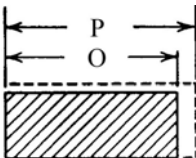
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
<i>D 130</i>	<i>Brazde na površini odljevka</i>	
D 131	Brazde različite dužine, često razgranate, s glatkim dnom i rubovima	
D 132	Brazde dubine do 5,1 mm, jedan rub formira nabor koji u većoj ili manjoj mjeri prekriva brazdu	
D 133	Nepravilno distribuirana uleknuća različitih dimenzija duž površine odljevka, obično uzduž smjera toka metala (čelični lijev)	
D 134	Površina odljevka potpuno rupičasta i izbrazdana	
D 135	Brazde i hrapavost u blizini uvučenih kutova odljevka	
<i>D 140</i>	<i>Uleknuća u površini odljevka</i>	
D 141	Uleknuća u površini odljevka u blizini toplinskog čvorišta	
D 142	Male, zaobljene, plitke površinske šupljine, uglavnom sivo-zelene boje (čelici s visokim sadržajem kroma, precizni lijev)	
<b>D 200</b>	<b>Veće površinske greške</b>	
<i>D 210</i>	<i>Duboko uvlačenje površine odljevka</i>	
D 211	Duboki usjek, često duž velike površine dijela odljevka koji je bio smješten u donju polovicu kalupa	
<i>D 220</i>	<i>Prianjanje pijeska</i>	
D 221	Sloj pijeska čvrsto prilijepljen na površinu odljevka	
D 222	Čvrsto prilijepljen sloj djelomično rastaljenog pijeska	

Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

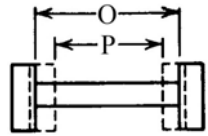
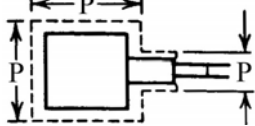
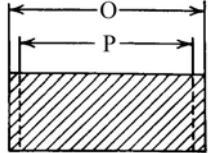
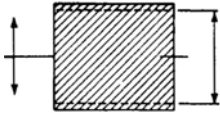
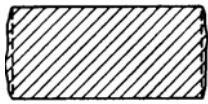
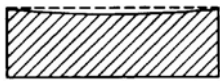
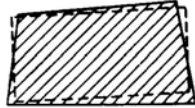
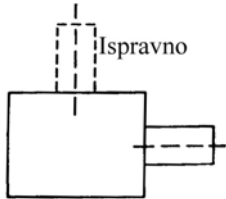
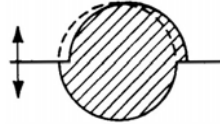
Redni broj	Opis	Skica
D 223	Povezivanje, odnosno stvaranje mješavine snažno prilijepljenog pijeska i metala na najtoplijim mjestima odljevka (uvučeni kutovi i jezgre) – penetracija taljevine	
D 224	Dio kalupnog materijala utisnut u površinu odljevka	
D 230	<i>Metalne izrasline (zadebljanja) pločastog oblika s hrapavim površinama, obično paralelne s površinom odljevka</i>	
D 231(a)	Metalne izrasline (zadebljanja) pločastog oblika hrapavih površina paralelne s površinom odljevka; mogu se ukloniti dljetom	
D 232(a)	Kao D 231(a), s tim da se može ukloniti samo strojnom obradom ili brušenjem	
D 233(a)	Ravne metalne izrasline (zadebljanja) na odljevku gdje je primijenjen premaz za jezgru ili kalup	
D 240	<i>Naljepi oksida nakon toplinske obrade (žarenja, popuštanja, temperiranja)</i>	
D 241	Naljepi oksida nakon žarenja	
D 243	Odvajanje paralelnih slojeva na površini odljevka nakon žarenja u oksidacijskoj atmosferi (temperirani lijev)	
<b>Nepotpuni odljevci</b>		
E 100	<b>Nekompletan odljevak – nedostaje dio (bez prijeloma)</b>	
E 110	<i>Manje varijacije u odnosu na oblik modela</i>	
E 111	Odljevak je u biti kompletan uz manje ili više zaokružene bridove i kutove	

Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima


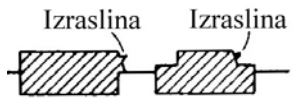
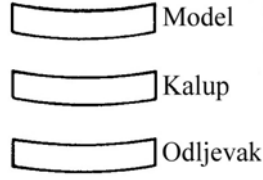
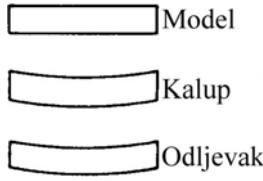
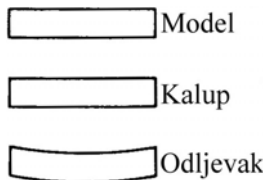

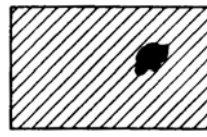
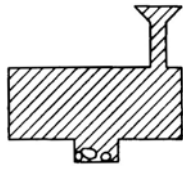
Redni broj	Opis	Skica
E 112	Deformirani rubovi ili konture zbog loše pripremljenog kalupa ili nepažljive primjene kalupnog premaza	
<i>E 120</i>	<i>Značajnije varijacije u odnosu na oblik modela</i>	
E 121	Nekompletan odljevak zbog prijevremenog skrućivanja	
E 122	Nekompletan odljevak zbog nedostatka taljevine	
E 123	Nekompletan odljevak zbog gubitka metala iz kalupa nakon završetka lijevanja.	
E 124	Znatan nedostatak materijala zbog prekomjernog čišćenja odljevka	
E 125	Odljevak djelomično rastaljen ili značajnije deformiran tijekom žarenja	
<b>E 200</b>	<b>Nekompletan odljevak – nedostaje dio (prisutan prijelom)</b>	
<i>E 210</i>	<i>Polomljen odljevak</i>	
E 211	Polomljen odljevak, nedostaje veći komad; površine prijeloma nisu oksidirane	
<i>E 220</i>	<i>Odlomljen manji komad odljevka</i>	
E 221	Odlomljen manji komad odljevka na spoju s ušćem, pojilom itd. Dimenzije prijeloma odgovaraju dimenzijama ušća, pojila itd.	
<b>Netočne dimenzije ili oblik</b>		
<b>F 100</b>	<b>Netočne dimenzije, točan oblik</b>	
<i>F 110</i>	<i>Netočne sve dimenzije odljevka</i>	
F 111	Proporcionalno odstupanje svih dimenzija odljevka (P – propisane (zahtijevane) dimenzije odljevka, O – ostvarene dimenzije odljevka)	



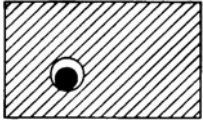


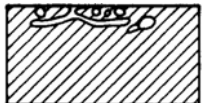
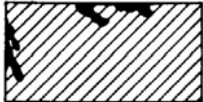
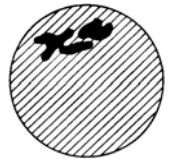
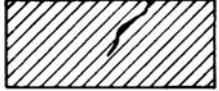

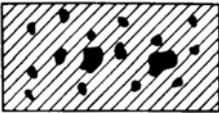
Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
<i>F 120</i>	<i>Netočne određene dimenzije odljevka</i>	
F 121	Prevelika udaljenost između dvaju segmenata odljevka (P – propisane (zahtijevane) dimenzije odljevka, O – ostvarene dimenzije odljevka)	
F 122	Određene dimenzije odljevka netočne (P – propisane (zahtijevane) dimenzije odljevka)	
F 123	Prevelike dimenzije odljevka u smjeru izvlačenja modela (P – propisane (zahtijevane) dimenzije odljevka, O – ostvarene dimenzije odljevka)	
F 124	Prevelike dimenzije odljevka u smjeru okomitom na diobenu ravninu kalupa	
F 125	Prekomjerne dimenzije na pojedinim mjestima na odljevku	
F 126	Tanke stjenke odljevka, posebno na vodoravnim površinama	
<b>F 200</b>	<b>Potpuno ili djelomično netočan oblik odljevka</b>	
<i>F 210</i>	<i>Netočan model</i>	
F 211	Odljevak u cjelini ili u pojedinim dijelovima ne odgovara nacrtom propisanom obliku; isto vrijedi i za model	
F 212	U određenim područjima oblik odljevka je različit u odnosu na nacrt; model točan	
<i>F 220</i>	<i>Pomak</i>	
F 221	Pomak jedne polovice modela u odnosu na drugu u diobenoj ravni	

Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
F 222	Varijacije u obliku unutarnje šupljine u odljevku duž diobene ravnine jezgre	
F 223	Nepravilne izrasline na vertikalnim površinama, uglavnom na jednoj strani samo u blizini diobene ravnine	
<i>F 230</i>	<i>Netočan oblik zbog deformacija</i>	
F 231	Deformiran odljevak, kalup i model obzirom na nacrt	
F 232	Deformiran odljevak i kalup obzirom na nacrt; model točan	
F 233	Deformiran odljevak obzirom na nacrt; model i kalup odgovaraju nacrtu	
F 234	Nakon skladištenja, žarenja ili strojne obrade odljevak deformiran obzirom na nacrt	
<b>Uključci i nepravilnosti u strukturi</b>		
<b>G 100</b>	<b>Uključci</b>	
<i>G 110</i>	<i>Metalni uključci</i>	
G 111(a)	Metalni uključci čiji izgled, kemijska i strukturna analiza upućuju da su uzrokovani prisutnošću stranog elementa u leguri	
G 112(a)	Metalni uključci istog kemijskog sastava kao osnovni metal; uglavnom kuglastog oblika i često prekriveni oksidom	

Tablica 2.1 (nastavak). Međunarodna klasifikacija najčešćih grešaka na odljevcima

Redni broj	Opis	Skica
G 113	Kuglasti metalni uključci unutar mjehura ili ostalih šupljina ili u uleknućima na površini. Sastav različit od sastava legure koja se lijeva, blizak eutektičkom sastavu	
<i>G 120</i>	<i>Nemetalni uključci; troska, uključci koji nastaju u talini zbog kemijskih reakcija, talitelji</i>	
G 121(a)	Nemetalni uključci čiji izgled ili analiza pokazuju da potječu rastaljene troske, produkata obrade taljevine ili talitelja	
G 122(a)	Nemetalni uključci većinom popraćeni plinom i mjehurima	
<i>G 130</i>	<i>Nemetalni uključci; materijali za izradu kalupa i jezgri</i>	
G 131(a)	Uključci pijeska, uglavnom vrlo blizu površine odljevka	
G 132(a)	Uključci koji potječu od kalupnog crnila ili premaza, uglavnom vrlo blizu površine odljevka	
<i>G 140</i>	<i>Nemetalni uključci; oksidi i reakcijski produkti</i>	
G 141	Jasno definirane, nepravilne crne mrlje na prijelomnoj površini odljevaka od nodularnog lijeva	
G 142(a)	Uključci u obliku oksidnih slojeva (oksidni uključci ili slojevi) koji uzrokuju pojavu lokalnih diskontinuiteta u odljevku	
G 143(a)	Naborani filmovi sjajnog grafita u na stjenki odljevka	
G 144	Tvrđi uključci u kokilno i visokotlačno lijevanim odljevcima od aluminijskih legura	

(a) greške koje pod određenim okolnostima mogu, direktno ili indirektno, doprinijeti oštećenju odljevka.

### 3. METODE ZA DETEKCIJU I ANALIZU GREŠAKA NA ODLJEVCIMA

U ljevaonicama se provode uobičajene metode kontrole odljevaka da bi se utvrdilo da li su sukladni zahtjevima kupca, odnosno naručioca. Da bi se osigurala kvaliteta proizvedenih odljevaka, ljevaonice prije svega moraju usmjeriti kontrolu na proces proizvodnje i obrade odljevaka, odnosno primijeniti odgovarajuće mjere za sprječavanje nastanka grešaka.

Kontrola odljevka obično obuhvaća provjeru njegovog oblika i dimenzija, te vizualni pregled radi utvrđivanja vanjskih diskontinuiteta i kvalitete površine. Analiza kemijskog sastava i ispitivanje mehaničkih svojstava mogu se nadopuniti različitim metodama ispitivanja bez razaranja, uključujući ispitivanje propusnosti, da bi se analizirala unutrašnjost odljevka, odnosno utvrdila eventualna prisutnost grešaka. Međutim, ove metode podižu cijenu odljevka. Zbog toga je potrebno odabrati i upotrijebiti samo potrebne metode kontrole. U nekim slučajevima potrebno je provesti kompletnu kontrolu svakog odljevka, dok je u drugom slučaju dovoljno uzeti i analizirati samo jedan reprezentativni odljevak iz serije.

**Metode za određivanje kvalitete površine odljevaka.** Pukotine i ostale greške na površini odljevka mogu se detektirati brojnim metodama kontrole, kao što su: vizualni pregled, kemijsko nagrizanje, ispitivanje tekućim penetrantom, ispitivanje vrtložnim strujama i ispitivanje feromagnetnim prahom, koje ujedno otkriva greške, odnosno diskontinuitete koji se nalaze neposredno ispod površine. Sve ove metode zahtijevaju čistu i relativno glatku površinu da bi osigurala točnost rezultata.

**Metode za otkrivanje unutarnjih diskontinuiteta (grešaka).** Najznačajnije metode kontrole, odnosno ispitivanja bez razaranja koje se upotrebljavaju za detekciju unutarnjih grešaka u odljercima su: radiografsko ispitivanje (ispitivanje pomoću X-zraka), ultrazvučno ispitivanje i ispitivanje vrtložnim strujama. Od navedenih metoda, radiografsko ispitivanje je najrazvijenija metoda za detaljnu kontrolu unutrašnjosti odljevka, odnosno otkrivanje diskontinuiteta u odljercu. Ultrazvučno ispitivanje, kao manje univerzalna metoda kontrole, može pružiti kvalitativnu indiciju mnogih diskontinuiteta. Posebno je upotrebljivo za kontrolu jednostavnih odljevaka jer se dobiveni rezultati mogu pouzdano interpretirati. Ultrazvučno ispitivanje može se upotrijebiti za određivanje oblika grafitnih čestica u željeznim ljevovima.

**Metode za kontrolu dimenzija odljevaka.** Postoje brojne metode za određivanje dimenzijske točnosti odljevaka. One uključuju ručnu provjeru sa mikrometrima, ručnu ili automatsku kontrolu šablonama, trodimenzionalnu automatsku kontrolu na odgovarajućim uređajima itd.

#### 3.1 Uobičajene metode kontrole odljevaka

Kontrola odljevaka često je ograničena samo na vizualnu i dimenzijsku kontrolu, ispitivanje mase te ispitivanje tvrdoće. Međutim, odljevci za posebne primjene, kao što su npr. komponente aviona, moraju se dodatno kontrolirati metodama bez razaranja da bi se utvrdila njihova kvaliteta.

**Vizualna kontrola** omogućuje utvrđivanje grešaka na odljercima koje potječu od nepravilno izrađenog kalupa, nedolivenosti ili neadekvatnog čišćenja. Ovom metodom moguće je detektirati većinu površinskih grešaka te hrapavost površine.

Početni (prvi) odljevci koji su izrađeni primjenom nove modelne opreme moraju se pažljivo kontrolirati zbog mogućih grešaka. Ispitivanje tekućim penetrantom može se

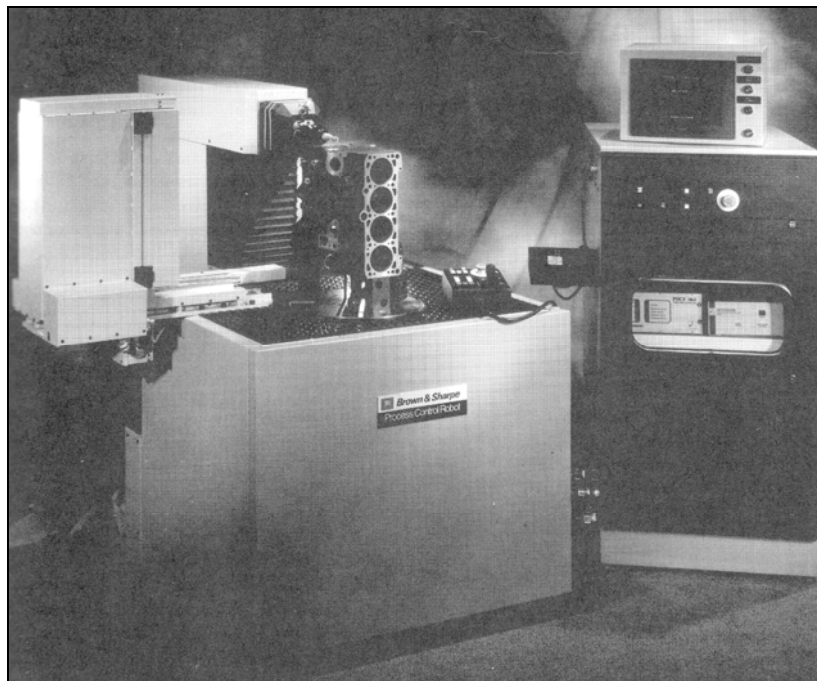
upotrijebiti za detektiranje grešaka na površini odljevka. Površinske greške, kao što su usahline, pukotine, mjehuri ili uključci troske obično ukazuju da je potrebno napraviti određene promjene u procesu proizvodnje odljevka. Nakon što je odljevak prošao vizualnu kontrolu, radiografskim ili ultrazvučnim ispitivanjem moguće je analizirati njegovu unutrašnjost.

Prva vizualna kontrola odljevaka obično se provodi odmah nakon vađenja iz kalupa. Na taj način mogu se odmah utvrditi veće greške. To omogućuje promptno poduzimanje korektivnih mjera u ljevaonici da bi se izbjeglo njihovo ponovno pojavljivanje i smanjio broj neispravnih (škartnih) odljevaka.

**Kontrola dimenzija odljevaka.** Dimenzijska odstupanja na obrađenim površinama odljevka relativno je lako odrediti i točno specificirati. Međutim, kompliciranije je odrediti prihvatljivost dimenzija koje obuhvaćaju jednu ili više neobrađenih površina. Dimenzije odljevka u lijevanom te obrađenom stanju moraju se kontrolirati, a mogu se odrediti pomoću raznih mjernih naprava ili primjenom odgovarajućih šablona i kalibara.

Površine odljevka koje se strojno obrađuju moraju imati odgovarajuću točnost već u lijevanom stanju te položaj u odnosu na ostale površine odljevka koje se obrađuju ili ne obrađuju. U protivnom povećavaju se troškovi strojne obrade, a može doći i do odbacivanja odljevka zbog značajnijeg odstupanja od propisane konfiguracije.

Danas se sve više kontrola dimenzija odljevaka koji moraju imati strogu dimenzijsku točnost provodi na specijaliziranim računalom potpomognutim uređajima za kontrolu dimenzija odljevaka (slika 3.1).



Slika 3.1. Uređaj za računalom potpomognutu kontrolu dimenzija odljevaka

**Kontrola mase odljevka.** Točno određivanje dimenzija kompleksnih odljevaka je izrazito teško, posebno unutarnjih presjeka. Važno je osigurati da ti segmenti odljevka imaju odgovarajuću debljinu, jer u protivnom može doći do:

- prekoračenja dozvoljene mase odljevka,
- smanjenja čvrstoće odljevka u slučaju nedovoljne debljine stijenki,
- nedovoljne dimenzije otvora u odljevku zbog prekomjerne debljine stijenki.

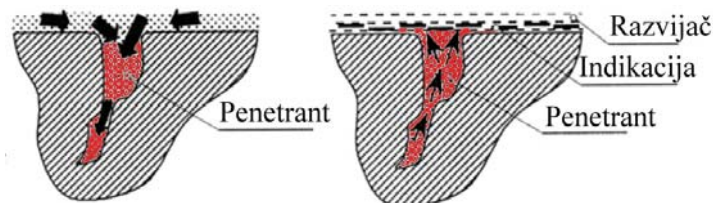
Navedene neusklađenosti mogu se utvrditi točnim vaganjem svakog odljevka ili uranjanjem odljevka u posudu s tekućinom i mjerenjem volumena istisnute tekućine. U određenim slučajevima kada se zahtijeva izrazita točnost, dopušteno odstupanje mase odljevka može iznositi  $\pm 1\%$ .

**Ispitivanje tvrdoće odljevka** često se provodi da bi se utvrdila efikasnost primijenjene toplinske obrade. Kod mnogih ljevova na bazi željeza moguće je na osnovi izmjerene tvrdoće procijeniti vlačnu čvrstoću.

Ispitivanje tvrdoće najčešće se provodi Brinellovom metodom. Preferira se primjena kuglice velikog promjera (5 do 10 mm) i velikih opterećenja jer se dubokim otiskom minimalizira utjecaj površinskog sloja i relativno grube mikrostrukture. Brinellova metoda nije pogodna za materijale velike tvrdoće (iznad  $\sim 600$  HB) jer deformacija kuglice može utjecati na oblik otiska.

### 3.2 Ispitivanje tekućim penetrantom

Ispitivanje tekućim penetrantom upotrebljava se za detektiranje površinskih grešaka na odljevku. Na dobro očišćenu površinu odljevka nanosi se odgovarajući tekući medij (penetrant) uranjanjem, četkom ili prskanjem. Razlikuju se tri vrste penetranta: obojeni, fluorescentni i miješani (fluorescentni/obojeni). Penetrant se rasprostire po površini odljevka i formira kontinuiranu i jednoličnu prevlaku te ulazi u otvorene pukotine i šupljine na površini. Zbog male površinske napetosti penetrant može ući i u vrlo sitne otvore (0,01 mm). Nakon nekoliko minuta, uklanja se prevlaka s površine odljevka, a potom na površinu nanosi odgovarajuće sredstvo (razvijatelj) koje „izvlači“ penetrant iz pukotina, odnosno šupljina na površinu da bi se istaknule površinske greške u koje je ušao tekući penetrant (slika 3.2).



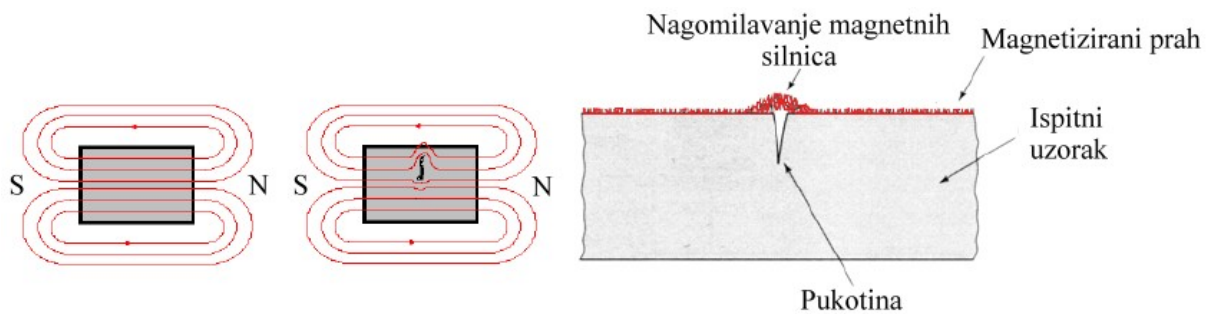
Slika 3.2 . Ispitivanje tekućim penetrantom

### 3.3 Ispitivanje feromagnetnim prahom

Ispitivanje feromagnetnim prahom je vrlo efikasna i osjetljiva metoda za otkrivanje pukotina i sličnih grešaka na ili neposredno (do 10 mm) ispod površine odljevka načinjenog od feromagnetnog materijala. Sposobnost detekcije diskontinuiteta neposredno ispod površine je posebno značajna jer se čišćenjem odljevka mogu zatvoriti površinske pukotine koje se potom ne bi uočile tijekom vizualne kontrole ili kontrole tekućim penetrantom. Bazirana je na činjenici da na mjestu greške dolazi do gomilanja magnetnih silnica.

Postupak se sastoji od dvije osnovne operacije: magnetiziranja odljevka i naknadne upotrebe magnetnog praha. Da bi se generiralo magnetno polje u i oko odljevka provodi se magnetizacija odljevka stalnim magnetom ili elektromagnetom. Greške koje se nalaze na površini ili neposredno ispod površine odljevka prekidaju tok magnetnih silnica i otklanjaju ih

(slika 3.3), odnosno na obje strane greške induciraju se magnetni polovi. Zbog toga na mjestu greške ili iznad nje (ukoliko se radi o unutarnjoj greški) dolazi do gomilanja (zgrušnjavanja) magnetnih silnica. Rezultirajuće lokalno ometanje magnetnog toka može se detektirati pomoću njegovog utjecaja na čestice feromagnetnog praha koje se nanese na čistu površinu odljevka, jer bivaju privučene u područje greške (slika 3.3), odnosno dolazi do njihovog nagomilavanja u području greške. Maksimalna sposobnost detekcije dobiva se kada je greška orijentirana okomito na primijenjeno magnetno polje i kada je odabrana dovoljna jakost magnetnog polja.

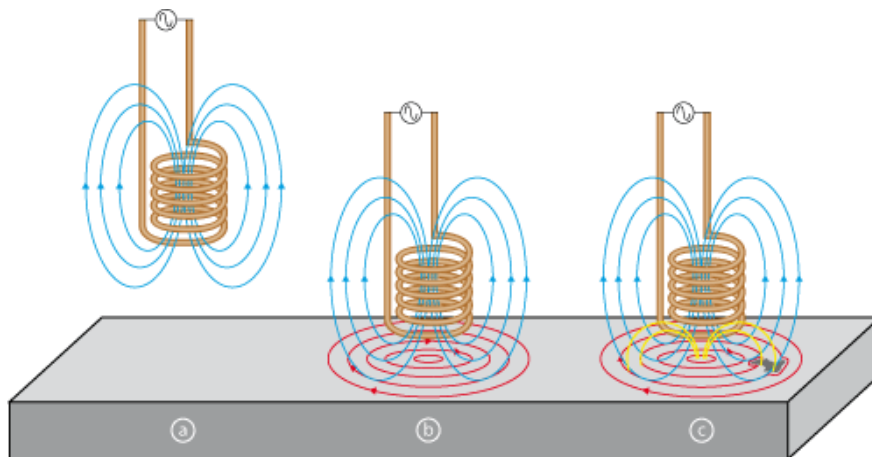


Slika 3.3. Ispitivanje feromagnetnim prahom

Za nanošenje magnetnih čestica po odljevku ili dijelu odljevka koji se ispituje primjenjuju se dva načina: mokri i suhi. Mokri postupak sastoji se u tome da se odljevak prska tekućom suspenzijom magnetnih čestica s npr. mineralnim uljem. Da bi se olakšalo otkrivanje greški, često se dodaje i fluorescentni materijal. U tom slučaju osim izvora struje za magnetizaciju potrebno je imati izvor svjetlosti vrlo blizak valnim duljinama ultraljubičastog svjetla. Kod suhog postupka, po dijelovima odljevka koji se ispituju raspršuju se magnetne čestice većeg zrna nego kod mokrog postupka. Ovaj postupak znatno je osjetljiviji za pronalaženje grešaka ispod površine.

### 3.4 Ispitivanje vrtložnim strujama

Ispitivanje vrtložnim strujama (slika 3.4) zasniva se na promatranju interakcije između elektromagnetnih polja i metala.



Slika 3.4. Ispitivanje vrtložnim strujama

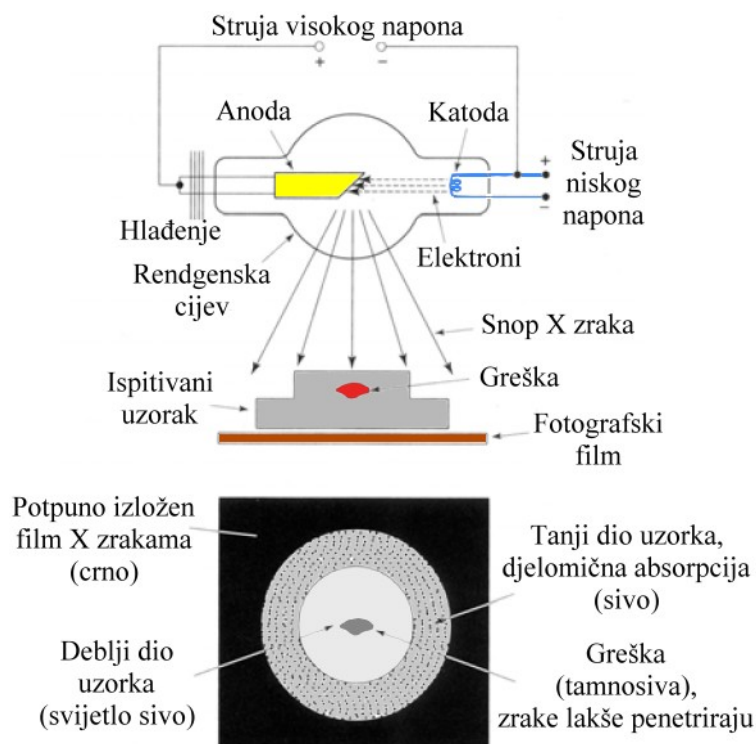
Izmjenična struja određene frekvencije prolazi kroz svitak i inducira primarno elektromagnetno polje oko svitka (označeno plavom bojom na slici 3.4a)). Kada se svitak postavi blizu električki vodljivog materijala dolazi do stvaranja vrtložnih strujama u tom materijalu (označeno crvenom bojom na slici 3.4b) i stvaranja sekundarnog elektromagnetnog polja koje je suprotno primarnom elektromagnetnom polju. Greške u ispitivanom materijalu ometaju tok vrtložnih struja (označeno žutom bojom na slici 3.4c) što se registrira svitkom kao promjena električne impedancije.

Ispitivanje vrtložnim strujama efikasno je kako za feromagnetne tako i za ne feromagnetne materijale, a koristi za kontrolu područja dubine do 6 mm. Međutim, metoda nije tako osjetljiva za male, otvorene greške kao što je to metoda ispitivanja tekućim penetrantom ili metoda ispitivanja feromagnetnim prahom.

Ispitivanje vrtložnim strujama uglavnom se upotrebljava za detektiranje greški blizu površine odljevka, kao što su pukotine, šupljine, uključci i mjehuri. Primjena ispitivanja vrtložnim strujama omogućuje provjeru strukture odljevka bez razaranja.

### 3.5 Radiografsko ispitivanje

Radiografsko ispitivanje je metoda ispitivanja materijala bez razaranja kojom se pomoću radiografskih snimki (radiograma) otkrivaju greške u materijalu (slika 3.5).



Slika 3.5. Radiografsko ispitivanje

Za ispitivanje se koriste X-zrake ili još prodornije  $\gamma$ -zrake uz primjenu podesnog materijala kao indikatora zračenja. X i  $\gamma$  zrake štetno djeluju na organizam čovjeka, zbog čega veliku pažnju treba posvetiti adekvatnoj zaštiti pri radu sa ovakvim uređajima.



Izvor X-zraka je rendgenska cijev koja se nalazi pod visokim naponom (slika 3.5). Najmanja greška koja se može jasno detektirati radiografijom pomoću X-zraka iznosi 2% debljine uzorka koji se ispituje.

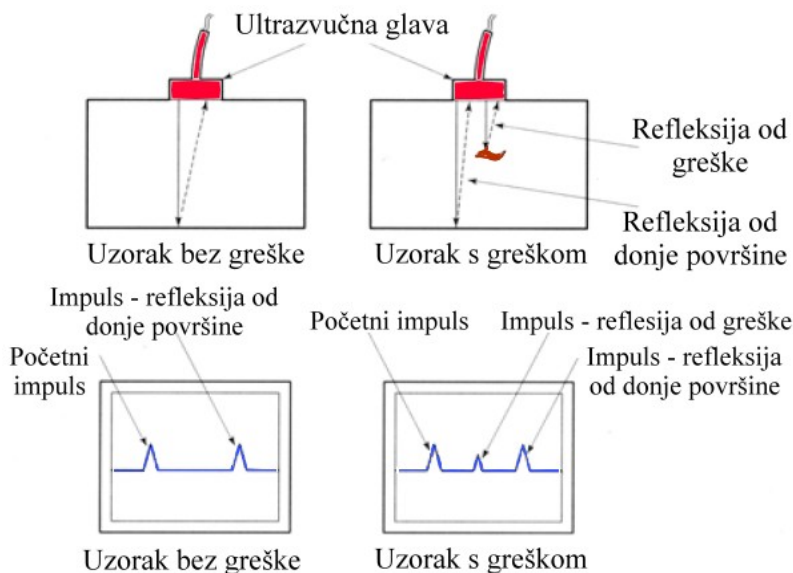
Izvor  $\gamma$ -zraka je radioaktivni materijal, kao što je  $\text{Ir}^{192}$ ,  $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  itd. Radioaktivni materijal kontinuirano emitira zračenje i mora se smjestiti u zaštitni kontejner.

Ispitivanje materijala upotrebom X ili  $\gamma$  zraka zasniva se na činjenici da se tijekom prolaza kroz materijal ove zrake djelomično apsorbiraju u materijalu ovisno o svojstvima ispitivanog materijala i njegove debljine. Apsorbiranjem dolazi do promjene intenziteta izlaznog zračenja. Izlazno zračenje obično se detektira na fotografskom filmu ili fluorescentnom mediju postavljenom ispod ispitivanog uzorka.

Prema tome, prodiranjem kroz materijal dolazi do slabljenja zraka. Pri tome je slabljenje zraka manje, odnosno manja je apsorpcija ako su naišle na grešku u materijalu (slika 3.5). Svaka nehomogenost u materijalu pokazuje se na radiogramu kao dijelovi različite gustoće zacrnjenja. Manja apsorpcija zraka tijekom prolaza kroz materijal rezultira većim zacrnjenjem na radiogramu.

### 3.6 Ispitivanje ultrazvukom

Ispitivanje ultrazvukom je zasnovano na sposobnosti ultrazvučnih titraja da u vidu usmjerenog snopa prodiru kroz materijal reflektirajući se pri tome od raznih nehomogenosti (slika 3.6). To omogućuje da se ovom metodom ispitivanja bez razaranja otkriju razne greške u odljevcima u slučajevima kad primjena metode s feromagnetnim prahom nije moguća, a primjena radiografskog ispitivanja ograničena debljinom materijala.



Slika 3.6. Ispitivanje ultrazvukom

Ultrazvukom se smatraju elastični, odnosno zvučni valovi čije su frekvencije veće od 20 kHz. Ultrazvučne oscilacije čovjek ne može registrirati osjetilom sluha. Za ultrazvučno ispitivanje primjenjuju se frekvencije između 0,5 i 15 MHz, ovisno o materijalu koji se ispituje. Frekvencije između 1 i 3 MHz pogodne su za ispitivanje čelika.

Ultrazvuk se dobiva i detektira pomoću piezoelektričnog efekta sa ultrazvučnom glavom. Piezoelektrični efekt zasniva se na činjenici da se pojedini kristali (npr. kvarc)

dimenzijski mijenjaju kada električna struja protječe kroz njih. Da bi se nastale oscilacije kristala mogle prenijeti na ispitivani predmet, mora se izbjeći zračni prostor između kvarca, odnosno ultrazvučne glave i površine ispitivanog predmeta. Kontakt se postiže pomoću uljnog filma između ultrazvučne glave i površine uzorka.

Pri ultrazvučnom ispitivanju obično se upotrebljavaju tri metode:

- metoda prozvučivanja,
- metoda odjeka i
- metoda rezonancije.

Metoda prozvučivanja je zasnovana na principu apsorpcije ultrazvuka na unutarnjim nehomogenostima (greškama) u materijalu i analogna je radiografskom ispitivanju. Kod ove metode u ispitivani predmet dovode se ultrazvučni valovi iz predajnika (odašiljača, ultrazvučne glave), a količinu energije koja je prošla kroz ispitivani predmet detektira prijemnik, odnosno druga ultrazvučna glava. Ako se na putu nalazi greška ultrazvučni valovi djelomično će se ili u potpunosti reflektirati ili apsorbirati, a prijemnik će registrirati samo preostali dio.

Metoda odjeka zasniva se na odbijanju ultrazvuka od raznih nehomogenosti (greški) u materijalu i najviše je zastupljena u praksi. Metoda se sastoji u tome da ultrazvučni valovi (impulsi) poslani iz predajnika prolaze kroz materijal, reflektiraju se od grešaka i zadnje stjenke i registriraju prijemnikom. (slika 3.6). Često predajnik i prijemnik čine jednu cjelinu. Prednost metode odjeka je u tome da se ispitivanje provodi samo s jedne strane ispitivanog predmeta. U odnosu na metodu prozvučivanja, metoda odjeka je osjetljivija i manje ovisi o kontaktu. Pri ispitivanju metodom odjeka pored normalnih ultrazvučnih glava upotrebljavaju se i kose ultrazvučne glave jer omogućuju detektiranje greški koje su paralelne sa putem ultrazvučnih valova koje emitiraju normalne glave. Uvijek treba raditi s baždarenim aparatom, tj. dužinska skala na ekranu mora odgovarati debljinama ispitivanog materijala.

Metoda rezonancije zasniva se na podešavanju frekvencije predajnika dok ne nastupi rezonancija po debljini ispitivanog materijala. Ova metoda rijetko se upotrebljava.

Sumarno se može reći da su prednosti ultrazvučnog ispitivanja visoka osjetljivost metode, velika moć prodiranja (što omogućuje ispitivanje izrazito debelih presjeka), točnost mjerenja položaja i veličine greške, brzina ispitivanja te mogućnost ispitivanja na osnovi pristupa samo jednoj površini ispitivanog komada. Ultrazvučno ispitivanje ima i određene nedostatke, a to su: otežana interpretacija rezultata ispitivanja u slučaju kompleksnih kontura i nepovoljno orijentiranih diskontinuiteta, otežana interpretacija rezultata u slučaju nepoželjne unutarnje strukture ispitivanog predmeta (npr. veličina zrna, poroznost, sadržaj uključaka, fini disperzirani precipitati) i potreba za referentnim standardima.

Prisutnost troske, poroznosti, hladni zavari, pukotine i razni uključci mogu se efikasno detektirati ovom metodom, posebno u odljevcima koji nisu kompleksnog oblika. Debljina stjenke odljevka također se može efikasno odrediti ovom metodom. Ultrazvučno ispitivanje nije pogodno za odljevke od visokougličnog sivog lijeva jer oni imaju visoku sposobnost prigušenja i apsorbiraju veliki dio unesene energije.

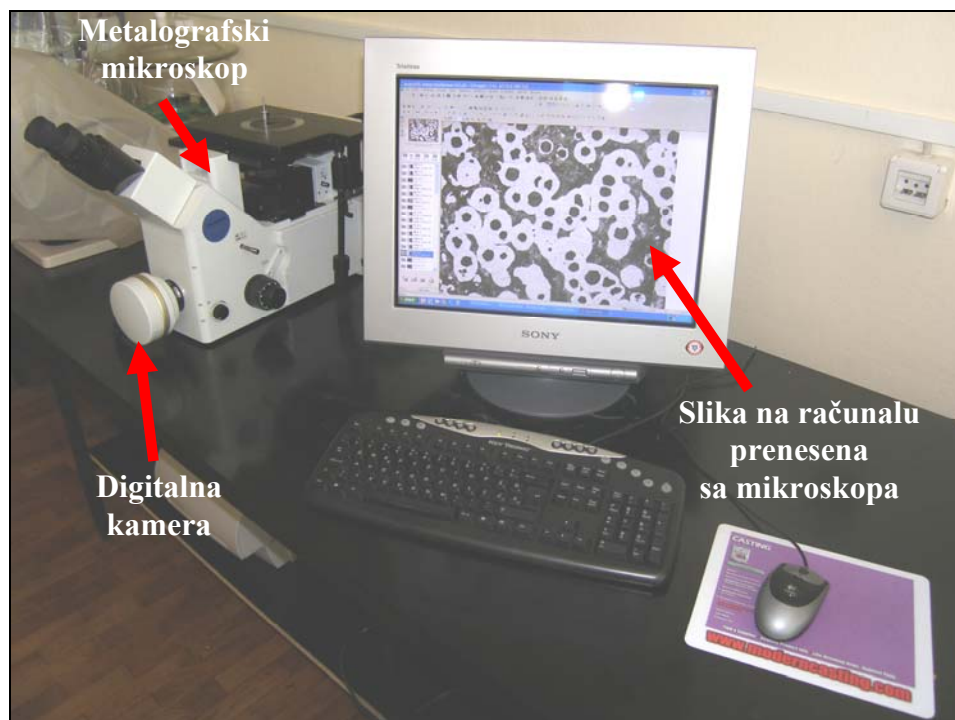
Prethodno navedene metode ispitivanja materijala omogućuju otkrivanje grešaka na i u odljevcima. U nastavku govorit će se o metodama koje omogućuju analizu nastalih grešaka, odnosno definiranje vrste greške i otkrivanje mogućih uzroka nastanka greške. Metalografska analiza i analiza pretražnim elektronskim mikroskopom najčešće se primjenjivane metode u

praksi za analizu nastalih grešaka. Za razliku od do sada spomenutih metoda, ove metode zahtijevaju uzimanje uzoraka iz odljevaka u području greške.

### 3.7 Metalografska analiza

Metalografska analiza omogućuje kvalitativnu i kvantitativnu analizu makro i mikro strukture materijala. Analiza strukture pruža informacije o količini i vrsti mikrokonstituenata koji su odvojeni graničnim (razdjelnim) površinama (granice zrna i granice faza, uključci) te geometrijskim parametrima, kao što je veličina, oblik, raspodjela i orijentacija. Ona također daje informacije o stvarnoj strukturi svih mikrokonstituenata. Metalografskom analizom mogu se kvalitetno analizirati otkriveni uključci, pukotine, greške zbog zarobljenih plinova, nepoželjni mikrostrukturni konstituenti, nepravilni oblika grafita (u željeznim ljevovima), poroznost, greške zbog reakcije taljevine s kalupnim materijalom itd. Na osnovi rezultata metalografske analize mogu se procijeniti i uporabna svojstva odljevaka.

Metalografska analiza provodi se pomoću svjetlosnog metalografskog mikroskopa na prethodno za to pripremljenim uzorcima. Maksimalno moguće povećanje iznosi 1000x. Današnji moderni metalografski mikroskopi opremljeni su digitalnom kamerom kojom se slika sa mikroskopa prenosi na računalo (slika 3.7). Na računalu je instaliran odgovarajući specijalizirani programski paket koji omogućuje opsežnu i detaljnu analizu snimljene mikrostrukture.

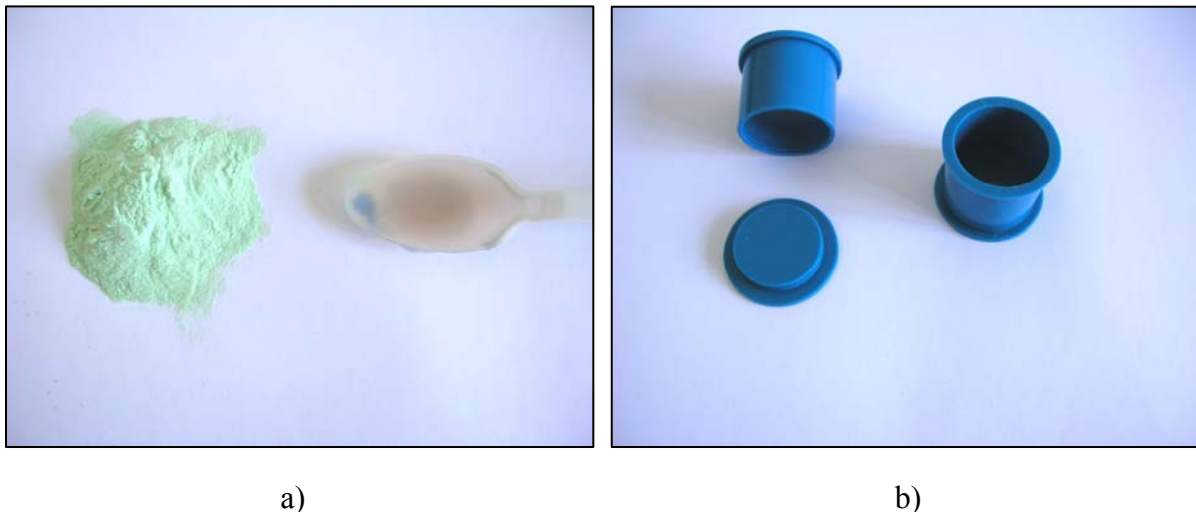


Slika 3.7. Svjetlosni metalografski mikroskop s digitalnom kamerom i računalo s instaliranim programskim paketom za analizu mikrostrukture

Za metalografsku analizu preporučuje se uzimanje uzoraka veličine 15 x 15 x 10 mm. Uzorci za metalografsku analizu najčešće se uzimaju iz odljevka ili iz ispitnih uzoraka nakon ispitivanja mehaničkih svojstava. Pri rezanju uzorci se ne smiju izložiti značajnijem toplinskom djelovanju jer može doći do strukturnih promjena, stvaranja pukotina, deformacije

i raznih drugih oštećenja. Zbog toga se često upotrebljavaju specijalne rezalice kod kojih se pri rezanju uzorci intenzivno prskaju vodenom emulzijom da ne bi došlo do njihovog zagrijavanja.

Da bi se olakšalo rukovanje uzorcima i njihova priprema za metalografsku analizu, uzorci se zalijevaju u polimerni materijal. Miješanjem odgovarajuće praškaste komponente s tekućim očvršćivačem (slika 3.8a) dobiva se viskozni tekući polimerni materijal. Uzorak se postavlja u odgovarajući kalup (slika 3.8b) i zalijeva pripremljenim tekućim polimernim materijalom. Nakon očvršćivanja polimernog materijala u kalupu, uzorci se zajedno sa očvrstnutim polimernim materijalom vade iz kalupa.



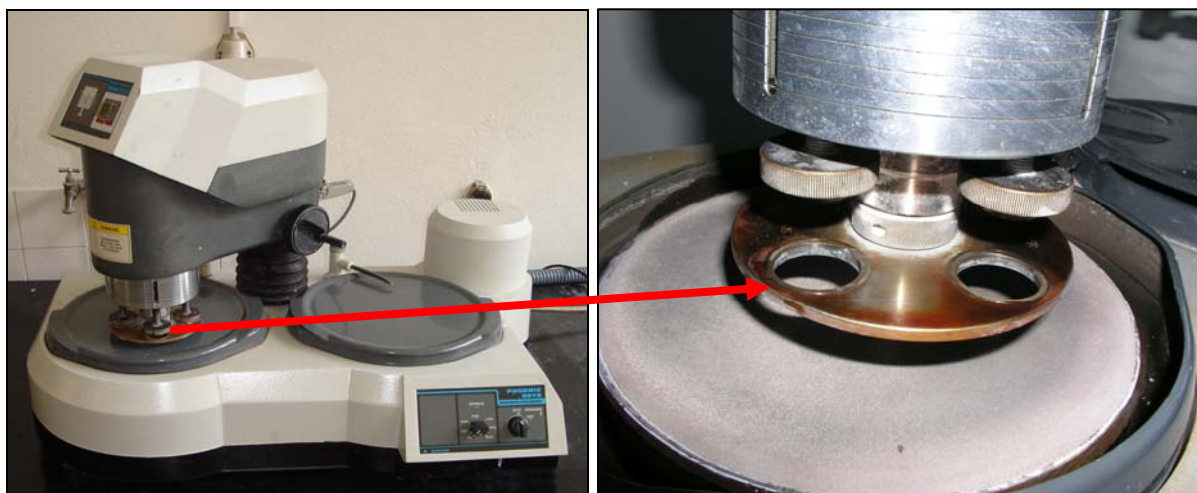
Slika 3.8. a) praškasta komponenta i tekući očvršćivač, b) kalupi za ulaganje uzoraka u polimerni materijal

Tražene informacije o strukturi (npr. greške, uključci, metalna osnova) dobivaju se na osnovi reflektiranog svjetla od površine pripremljenog uzorka. Zbog toga analizirana površina uzorka mora biti strogo ravna, ispolirana, bez ogrebotina i nečistoća.

Priprema uzoraka za metalografsku analizu sastoji se od brušenja i poliranja. Brušenje i poliranje može se provesti ručno ili na automatskim uređajima za pripremu uzoraka (slika 3.9).

Uzorci se smještaju u za to predviđeni nosač na uređaju za pripremu uzoraka i pritišću odgovarajućom tlačnom silom (koja ovisi o vrsti materijala uzorka) prema rotacionom disku na kojem se nalazi brusni papir. Brušenje se provodi brusnim papirima raznih gradacija (krupnoće zrna), i to od grubljih (npr. gradacija 120) prema finijim (npr. gradacija 600 ili 800) uz konstantno hlađenje vodom da bi se spriječile eventualne strukturne promjene uslijed zagrijavanja. Podloga (abrazivno sredstvo) brusnog papira je najčešće SiC. Rotacioni disk okreće se u suprotnom smjeru od smjera okretanja uzoraka. Prije svake promjene gradacije brusnog papira uzorci se ispiraju destiliranom vodom. Vrijeme brušenja i broj okretaja rotacionog diska u minuti ovisi o materijalu koji se priprema i kvaliteti površine prije pripreme.

Nakon brušenja uzorci se poliraju na posebnoj podlozi od filca koja se smješta na rotacioni disk na uređaju za pripremu uzoraka uz dodatak vodene otopine glinice ( $Al_2O_3$ ). Vrijeme poliranja, broj okretaja rotacionog diska u minuti i tlačna sila kojom se uzorci pritišću na filc ovise o vrsti materijal koji se polira. Nakon poliranja uzorci se ispiraju destiliranom vodom i etilnim alkoholom te suše vrućim zrakom.



a)

b)

Slika 3.9. a) uređaj za pripremu uzoraka za metalografsku analizu, b) nosač uzoraka na uređaju za pripremu uzoraka za metalografsku analizu

Da bi se istaknula mikrostruktura, odnosno mikrostrukturni konstituenti na metalografskoj snimci potrebno je provesti nagrivanje uzoraka u odgovarajućim sredstvima (reagensima) čime se utječe na refleksiju svjetlosti od površine uzorka. Kada se na ispoliranu površinu uzorka djeluje nekim reagensom dolazi do nagrivanja strukture zbog selektivnog razlaganja površine uzorka. Danas postoji velik broj različitih sredstava za nagrivanje (reagensa) ovisno o materijalu koji se nagriva i mikrostrukturnim konstituentima koji se žele istaknuti. U tablici 3.1. prikazan je kemijski sastav nekoliko sredstava za nagrivanje uzoraka.

Tablica 3.1. Kemijski sastav i područje primjene nekoliko sredstava za nagrivanje

Sredstvo za nagrivanje	Sastav i vrijeme nagrivanja	Učinak
Nital	96 – 98 ml $C_2H_5OH$ 2 – 4 ml $HNO_3$ 5 – 7 s pri sobnoj temp.	Nelegirani i niskolegirani željezni ljevovi i čelici
Picral	4 g $((NO_2)_3C_6H_2OH)$ 100 ml $C_2H_5OH$	Nagrivanje željeznih ljevova - jednoličnije nagrivanje perlita
Klemm I	50 ml hladne zasićene vodene otopine $(N_2S_2O_3 \cdot 5H_2O)$ 1 g $(K_2S_2O_5)$ ; 40 – 100 s	Željezni ljevovi - obojeno nagrivanje – segregacije fosfora
...	28 g NaOH 4 g $((NO_2)_3C_6H_2OH)$ 1 g $(K_2S_2O_5)$ 100 ml dest. $H_2O$ 30 – 60 min., temp. blizu vrenja	Željezni ljevovi - obojeno nagrivanje – segregacije silicija
...	0,1 – 10 ml HF 90,0 – 100,0 ml $H_2O$	Nagrivanje aluminijskih legura
Kellerov reagens	2,5 ml $HNO_3$ 1,5 ml HCl 1,0 ml HF 95,0 ml $H_2O$	Nagrivanje aluminijskih legura
Elektrolitičko nagrivanje istosmjernom strujom u Barkerovom reagensu	$HBF_4 + H_2O$	Nagrivanje aluminijskih legura

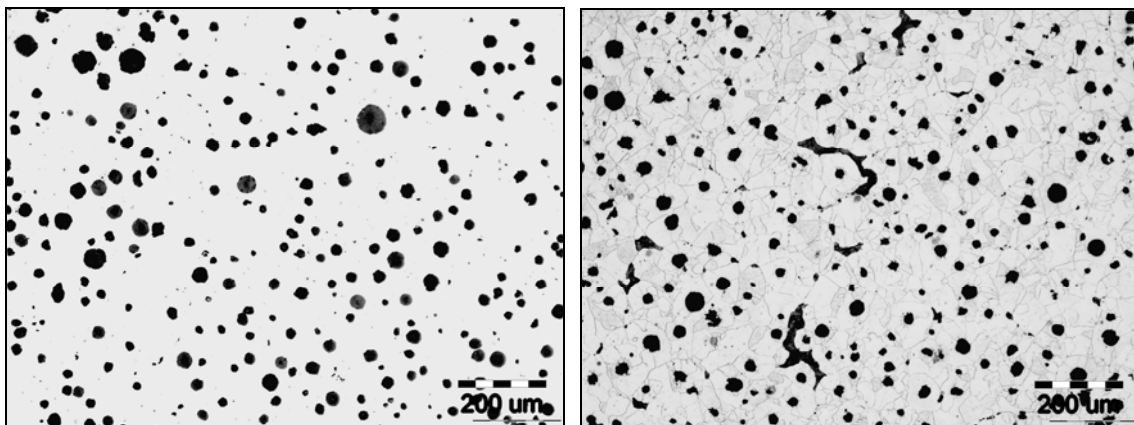


Za nagrizanje željeznih ljevova i čelika najčešće se primjenjuje nital, a za nagrizanje aluminijskih legura HF te Kellerov i Barkerov reagens.

Na slici 3.10 prikazan je izgled uzoraka zalivenih u plastičnu masu nakon pripreme i nagrizanja, a na slikama 3.11 – 3.13 nekoliko snimki mikrostrukture nodularnog lijeva.



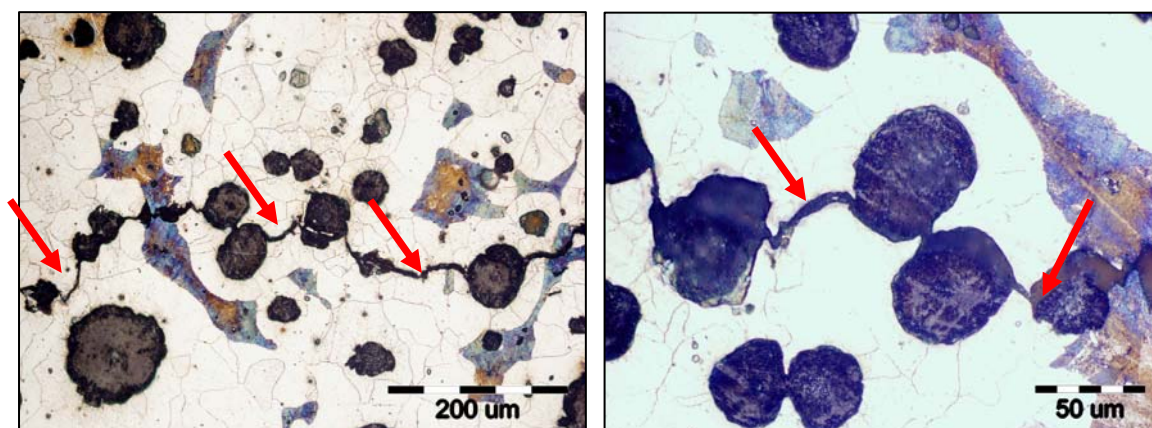
Slika 3.10. Uzorci nodularnog lijeva za metalografsku analizu nakon pripreme i nagrizanja



a)

b)

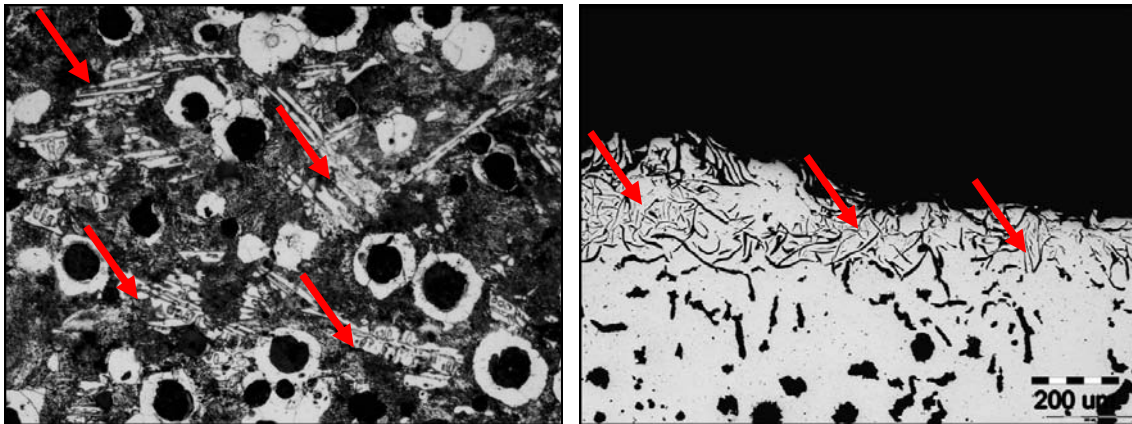
Slika 3.11. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka feritnog nodularnog lijeva u nenagrizenom (a) i nagrizenom (b) stanju (nital) pri povećanju 100x



a)

b)

Slika 3.12. Metalografska analiza napredovanja pukotine u nodularnom lijevu



a)

b)

Slika 3.13. a) karbidi u mikrostrukturi nodularnog lijeva, b) listićavi grafit u mikrostrukturi površinskog dijela odljevka od nodularnog lijeva zbog reakcije taljevine s kalupnim materijalom

Metalografska analiza pruža mnogo korisnih informacija o strukturi odljevka i prisutnim greškama u strukturi i najčešće je primjenjivana metoda za analizu mikrostrukture odljevaka i prisutnih grešaka. Međutim, potrebno je imati na umu i određene nedostatke ove metode: kvalitetne metalografske uzorke nije jednostavno pripremiti, prisutni uključci mogu se ukloniti tijekom pripreme uzoraka, promatrani uzorak samo je mali segment odljevka, nedovoljna egzaktnost (često se koriste relativni pojmovi kao što je „manje“ ili „veće“, „više“ ili „manje“ itd.) itd.

### 3.8 Analiza pretražnim elektronskim mikroskopom

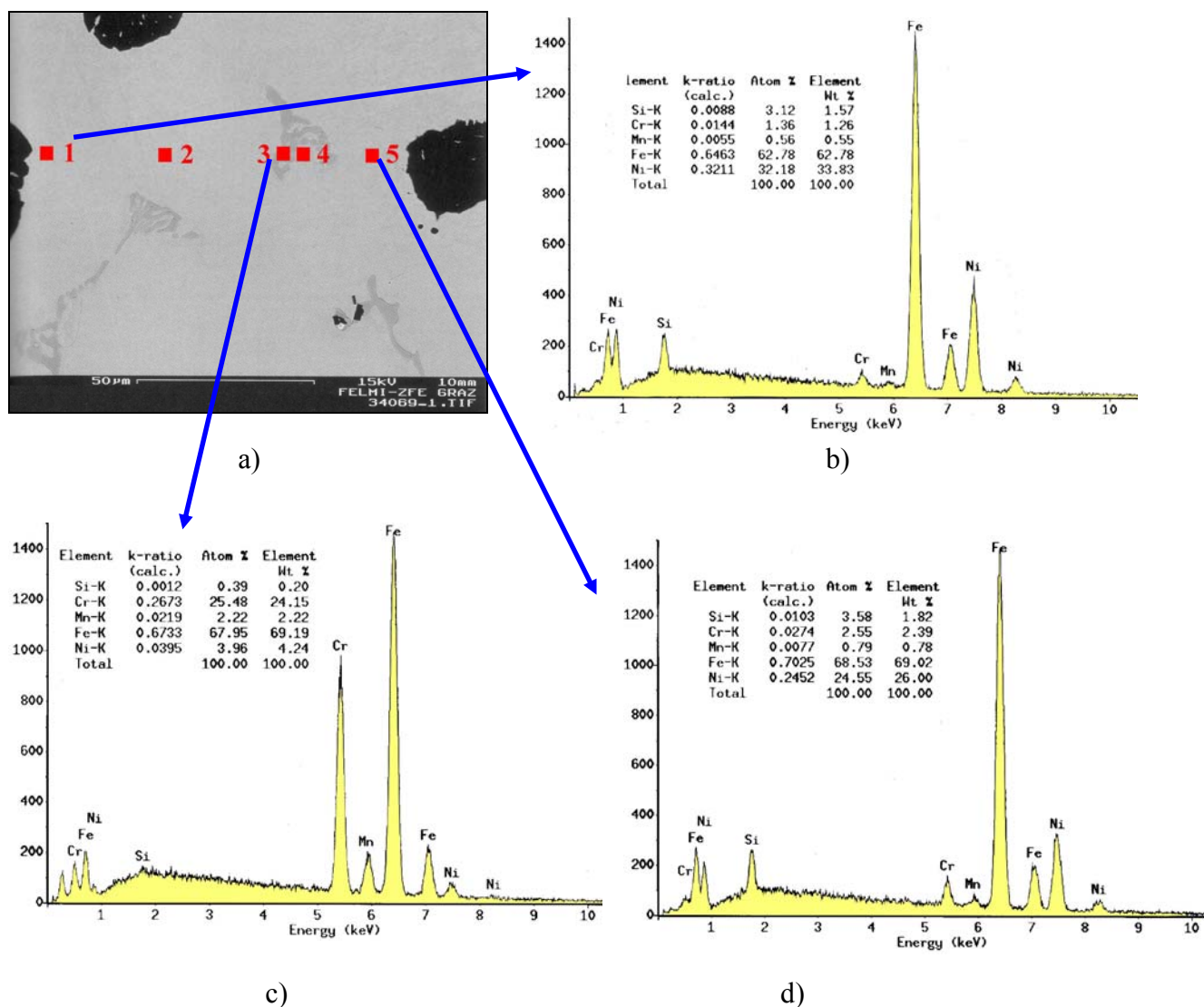
Analiza pretražnim elektronskim mikroskopom uglavnom se primjenjuje kada se zahtijeva potpunija analiza mikrostrukture ili greški, odnosno kada povećanja koja omogućuje metalografska analiza nisu dovoljna.

Pretražni elektronski mikroskop (eng. *scanning electron microscope – SEM*) je najšire upotrebljavani tip elektronskog mikroskopa (slika 3.14). Rad uređaja zasniva se na skeniranju površine uzorka fokusiranim snopom elektrona iz odgovarajućeg izvora. Sa površine uzorka koja je skenirana elektronskim snopom mogu se detektirati povratni raspršeni elektroni (engl. *backscattered electrons – BSE*) čime se dobiva topografska, odnosno kompozicijska slika površine. Sekundarni elektroni, koji nastaju kada elektronski snop koji pada na površinu uzorka pobudi njihovu emisiju i izbije ih iz elektronskog omotača atoma uzorka, omogućuju dobivanje informacija o reljefu površine uzorka (SEI). Uzorci moraju biti odgovarajuće veličine da bi se mogli postaviti u držač uzoraka u uređaju i električni vodljivi (barem na površini).

Pretražni elektronski mikroskop često se oprema sa energetske disperzivnim spektrometrom (EDS) da bi se mogao odrediti kemijski sastav željenog mjesta u uzorku, npr. karbida (slika 3.15). U tom slučaju analizira se spektar rendgenskih zraka koje emitira uzorak kada na njega padne snop elektrona. Atomi različitih elemenata emitiraju karakterističan spektar rendgenskog zračenja, a pomoću analize njihovog spektra može se odrediti o kojem se elementu radi.



Slika 3.14. Pretražni elektronski mikroskop (SEM) s energetske disperzivnim spektr. (EDS)



Slika 3.15. a) snimka karbida u mikrostrukтури nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom, b) koncentracija elemenata u točki br. 1 (EDS analiza), c) koncentracija elemenata u točki br. 3 (EDS analiza), d) koncentracija elemenata u točki br. 5 (EDS analiza)

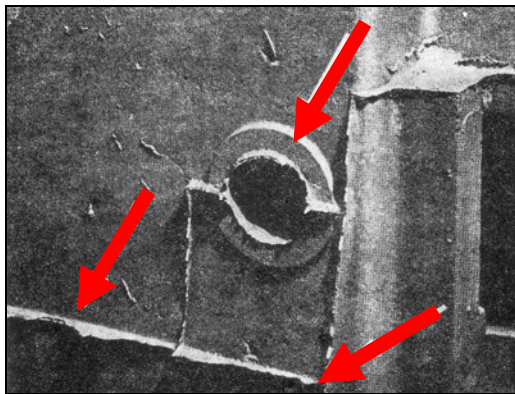


## 4. METALNE IZRASLINE

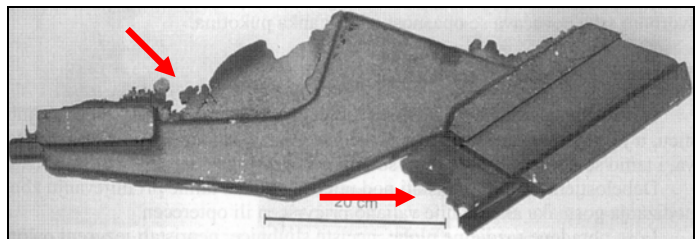
### 4.1 Srh

#### *Opis*

Srh je tankostijena, a katkad i debelostijena metalna izraslina koja nastaje u ravnini površine dijeljenja kalupa, a može se pojaviti i na jezgrenim osloncima (slika 4.1). Glavne dimenzije odljevka ostaju očuvane. Srh najčešće nastaje okomito na stranicu odljevka, nejednake je visine i ne smije se zamijeniti s greškom koja nastaje zbog pukotine u kalupu.



a)



b)

Slika 4.1. a) srh nastao na diobenoj ravnini kalupa i osloncu jezgre, b) srh nastao zbog loše spojene gornje i donje polovice kalupa

Ljevarski se srh može pojaviti kod svih ljevarskih legura, bez obzira na postupak kalupljenja i lijevanja. Srh je na odljevku vidljiv golim okom i obično se može odstraniti pažljivim čišćenjem, a odljevak se zbog ove greške ne škartira.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Srh nastaje kada taljevina uđe u prazan prostor između gornje i donje polovice kalupa, u jezgrene oslonce ili druge dosjedne spojeve kalupnih i jezgrenih dijelova i tamo skrutne. Debelostijeni srh može nastati pod utjecajem tlaka taljevine pri ulijevanju zbog podizanja gornje polovice kalupa ako nije pravilno pričvršćena ili opterećena.

Pri ručnom kalupljenju prazan prostor (zračnost) između gornje i donje polovice kalupa može se pojaviti zbog nepravilne obrade kalupa, a pri strojnom kalupljenju zbog iskrivljenosti modelne ploče, pohabanosti modelne ploče na mjestu nalijeganja kalupnika i neravne površine nalijeganja kalupnika.

Nastajanje srha pri visokotlačnom lijevanju može biti posljedica trenutnog znatnog porasta tlaka zbog naglog usporavanja stapa i svih masa koje se s njime gibaju na kraju punjenja kalupne šupljine. Nedostatna i/ili nejednolična sila zatvaranja kalupa na stroju za visokotlačno lijevanje glavni je uzrok nastanka srha pri tom postupku lijevanja.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) izraditi model, kalupa i jezgre prema mjeri,
- b) pravilna obrada površina dijeljenja kalupa i što veća čistoća,
- c) osigurati dobro spajanje (nalijeganje) gornje i donje polovice kalupa,
- d) zamijeniti istrošene i iskrivljene modelne ploče,
- e) upotrijebiti ispravne kalupnike,
- f) minimalizirati zračnost u jezgrenim osloncima i kalupu,
- g) pri visokotlačnom lijevanju primijeniti adekvatnu silu zatvaranja kalupa, osigurati optimalno brtvljenje svih naprava za zatvaranje na stroju za visokotlačno lijevanje i eventualno smanjiti tlak lijevanja.

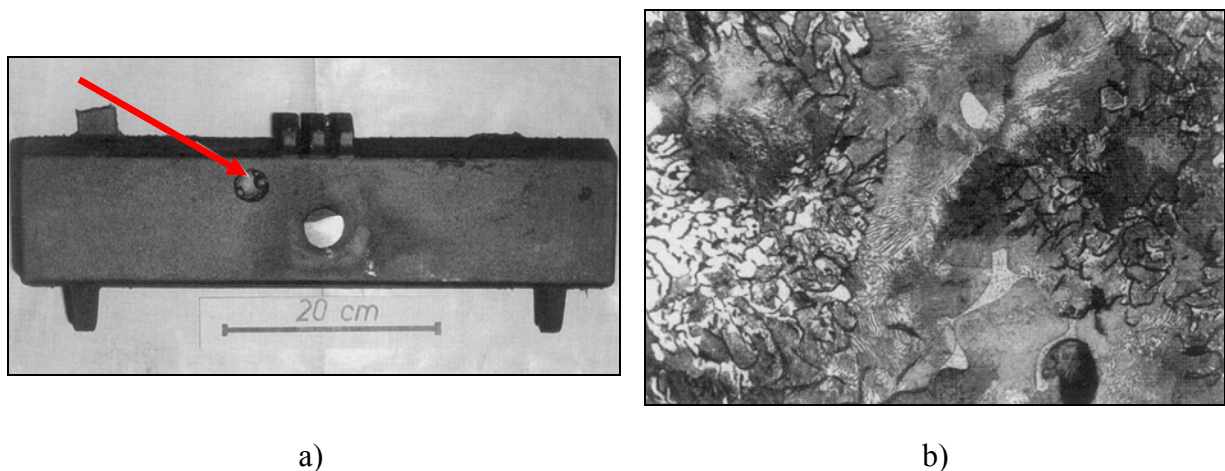
## **4.2 Metalne izrasline kuglastog oblika u šupljinama i na površini odljevka**

### *Opis*

Metalne izrasline približno kuglastog oblika s glatkom površinom, malih dimenzija, promjera najviše do 10 mm, koje se u pravilu pojavljuju pojedinačno (slika 4.2). Često se u ljevačkoj praksi nazivaju i „znojne kuglice“ te „fosfidne perle“. U odnosu na odljevak uglavnom imaju drugačiji kemijski sastav i strukturne sastojke. Pojavljuju se u unutrašnjosti površinskog plinskog mjehura, u usahlinama, šupljinama, ali i na površini odljevka i čvrsto su povezane s odljevkom. Greška je vidljiva golim okom i može se pojaviti, bez obzira na postupak kalupljenja, kod svih ljevačkih legura koje sadrže faze s niskim talištem, odnosno eutektike. Uobičajeni su primjeri kod odljevaka od bakreno-kositrenih legura, aluminijskih legura koje sadrže bakar i željeznih ljevova bogatih fosforom.

Kod sivog i nodularnog lijeva uglavnom se sastoje od fosfidnog eutektika, zbog čega se i nazivaju „fosfidne perle (kuglice)“.

Kod aluminijskih legura koje sadrže bakar sastoje se od eutektika Al-Al<sub>2</sub>-Cu.



Slika 4.2. a) metalne izrasline kuglastog oblika u plinskom mjehuru u odljevku od sivog lijeva, b) metalografska snimka mikrostrukture metalne izrasline kuglastog oblika sa slike a): jasno vidljiv fosfidni eutektik, povećanje 100x, nagrizeno nitalom

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Stvaranje „znojnih kuglica“ jedan je oblik makrosegregacije. Kod odljevaka od sivih željeznih ljevova, odnosno željeznih ljevova s grafitom, nakon skrućivanja temeljne strukture tlak koji nastaje uslijed stezanja ili tlak plinova koji se eventualno oslobađaju pri skrućivanju istiskuje sastojke nižeg tališta na površinu odljevka. Ova greška može nastati i tijekom toplinske obrade ako je temperatura viša od 900 °C.

Kod legura na osnovi lakih metala tijekom toplinske obrade pri previsokoj temperaturi mogu nastati višekomponentni eutektici s niskim talištem.

Prema tome, svakako je riječ o ostatku taljevine koju istiskuje povišeni tlak na mjestima gdje su skrtnuti slojevi još tanki.

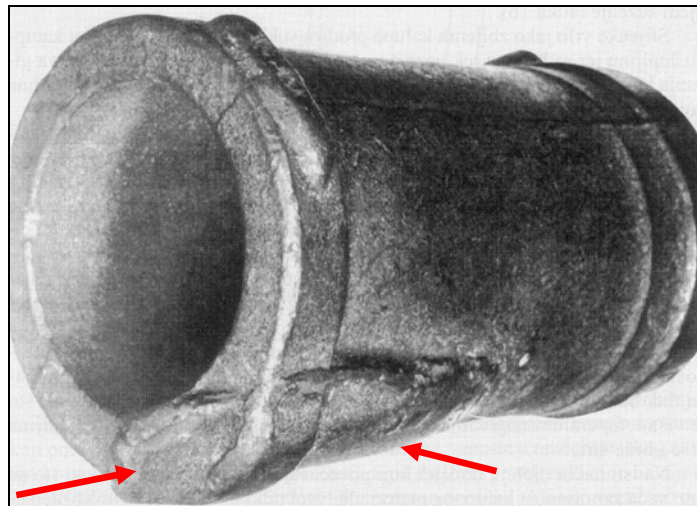
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) izbjeći stvaranje plinskih mjehura; provesti adekvatno otplinjavanje taljevine,
- b) smanjiti sadržaj fosfora kod sivih željeznih ljevova,
- c) osigurati brzo, usmjereno skrućivanje odljevka,
- d) kontrolirati temperaturu toplinske obrade.

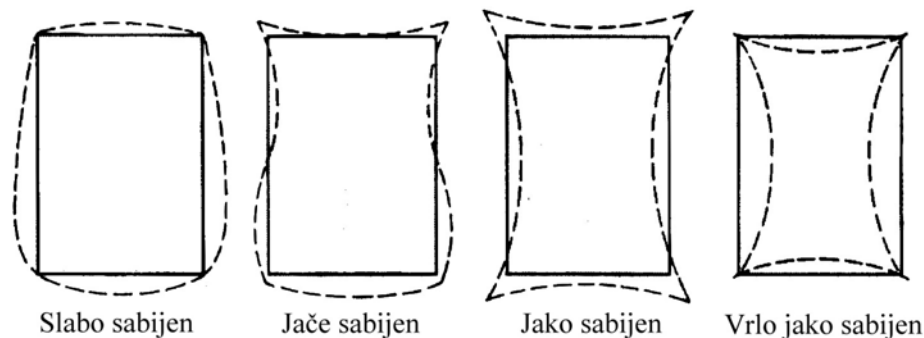
## **4.3 Masivne metalne izrasline**

### *Opis*

Metalne izrasline (zadebljanja) na vanjskim ili unutarnjim površinama odljevka, dijelom i na rubovima, zbog kojih dolazi do promjene dimenzija i oblika odljevka (slika 4.3). Moguće promjene oblika kalupne šupljine shematski su prikazane na slici 4.4. Često se javlja zajedno s hrapavom površinom odljevka, odnosno penetracijom i prigorjelim pijeskom.



Slika 4.3. Masivna metalna izraslina (zadebljanje) na odljevku od nodularnog lijeva zbog neujednačene i nedovoljne zbijenosti kalupa



Slika 4.4. Moguće promjene oblika kalupne šupljine u pješčanim kalupima ovisno o sabijenosti kalupa

Mogu se pojaviti na odljercima od svih ljevačkih legura koji se lijevaju u pješčane te školjkaste kalupe. Najčešće se javljaju na odljercima od željenih ljevova, čelika te na odljercima od teških metala. Kod visokotlačnog lijevanja i gravitacijskog lijevanja u kokile (kokilno lijevanje) ove greške se ne pojavljuju.

Ovoj vrsti greške posebno su skloni masivni, debelostjeni odljevci velikih modula. Zadebljanja su uvijek uočljiva golim okom i uzrokuju škartiranje odljevka.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Toplina taljevine uzrokuje širenje kalupnog materijala. Zbog temperaturnih razlika u pojedinim područjima kalupa nastaju značajne razlike naprezanja koje djeluju na površinske slojeve kalupa odnosno kalupne stjenke. Ako mehaničko-toplinska opterećenja, odnosno naprezanja premaše plastičnost i čvrstoću kalupa, na odljevku se mogu pojaviti greške.

Tlačna naprezanja kojima odljevak djeluje na kalup od svježe kalupne mješavine toliko su velika da mogu izazvati dodatno sabijanje kalupa tako da ga mogu i izobličiti. To ne ovisi samo o početnom sabijanju i njegovoj jednoličnosti, već uvijek i o geometrijskom obliku, zbog čega to dodatno sabijanje nikad nije jednolično. Opseg širenja kalupa ovisi o sastavu upotrijebljene kalupne mješavine, njezinoj sabijenosti i svojstvima veziva. Kalupna šupljina mijenja svoje dimenzije sve dok rastu tlačna naprezanja odljevka koja uzrokuju dodatno sabijanje kalupa. Taljevina slijedi to gibanje sve dok se ne stvori nosiva površinska kora.

Osušeni kalupi vezani glinom i kalupi vezani sintetičnom smolom odlikuju se velikom stabilnošću.

S porastom udjela vlage u kalupnoj mješavini povećava se njena sabitljivost i naglo raste čvrstoća. Zbog toga se s porastom udjela vode povećava tlak na kalupne stjenke pa prema tome i njihovo gibanje, i to tim više što je viša temperatura lijevanja. Prema tome, s porastom udjela vlage kalupna se šupljina više i brže širi.

Općenito gledano, nedovoljno sabijanje nesušanih pješčanih kalupa uzrokuje nastajanje zadebljanja.

Zadebljanja na unutarnjim površinama odljevka nastaju zbog premalog dodatka veziva (smola) pri izradi jezgre, upotrebe neodgovarajućeg veziva za izradu jezgri te nedovoljnog otvrdnjavanja.

Posebnu pažnju treba obratiti na izradu kalupa za lijevanje odljevaka od sivih željeznih ljevova zbog razvijanja značajnog tlaka na stjenke kalupa koji nastaje tijekom skrućivanja zbog izlučivanja grafita.

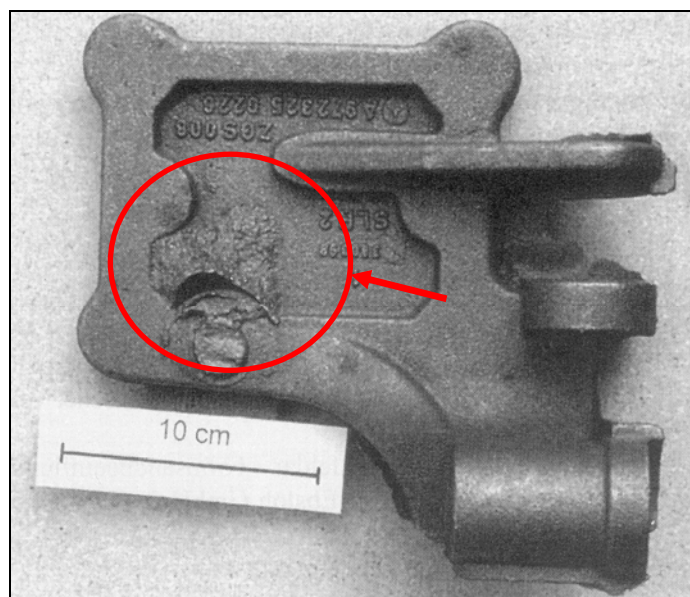
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) osigurati dovoljnu sabijenost kalupa,
- b) uspoređivati i eventualno povećati tvrdoću kalupa,
- c) smanjiti stlačivost kalupnog materijala smanjenjem udjela vode,
- d) smanjiti udio sitnih frakcija u sustavu kalupnog materijala,
- e) optimizirati i eventualno smanjiti udio bentonita (ovisno o udjelu vode).  
Upotrijebiti Na bentonit,
- f) optimizirati dodatke kalupnom materijalu,
- g) optimizirati udio smolom vezanih jezgrenih ostataka , eventualno smanjiti njihovu količinu ili promijeniti vezivo,
- h) smanjiti metalostatički tlak (visinu ulijevanja),
- i) smanjiti stupanj zasićenja kod sivih željeznih ljevova da bi se smanjila ekspanzija tijekom skrućivanja,
- j) osigurati odgovarajuću čvrstoću i tvrdoću jezgri.

## **4.4 Metalne izrasline nastale zbog odloma jednokratnog kalupa ili jezgre te pukotina u jednokratnom kalupu i jezgri**

### *Opis*

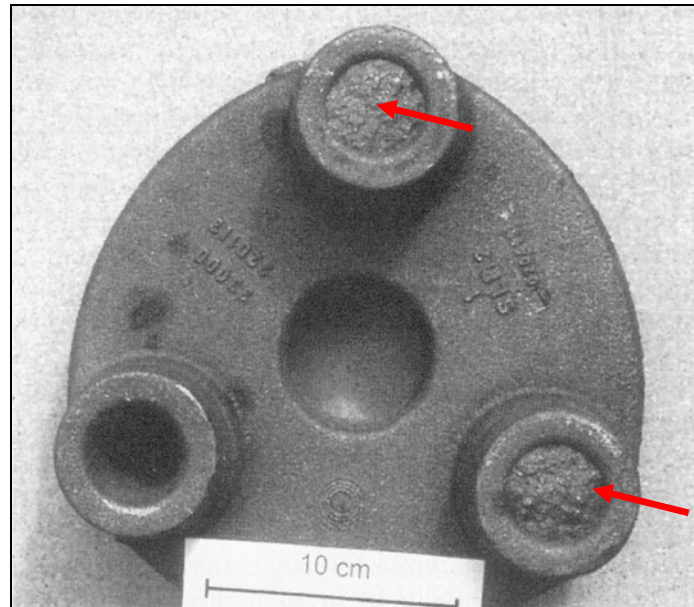
Kod odloma jednokratnog (pješčanog) kalupa dolazi do odvajanja jednog dijela kalupa. Taljevina popunjava otvor koji je nastao zbog odlamanja kalupa. Na odljevku je golim okom vidljiva masivna metalna izraslina nepravilnog oblika (slika 4.5). U odljevku se mogu naći uključci odlomljenog kalupnog dijela. U većini slučajeva rezultira škartiranjem odljevka. Pojavljuje se neovisno o osnovnom kalupnom materijalu, ljevarskoj leguri i postupku lijevanja.



Slika 4.5. Metalne izrasline na odljevku zbog odloma kalupa (premali udio bentonita u kalupnoj mješavini)

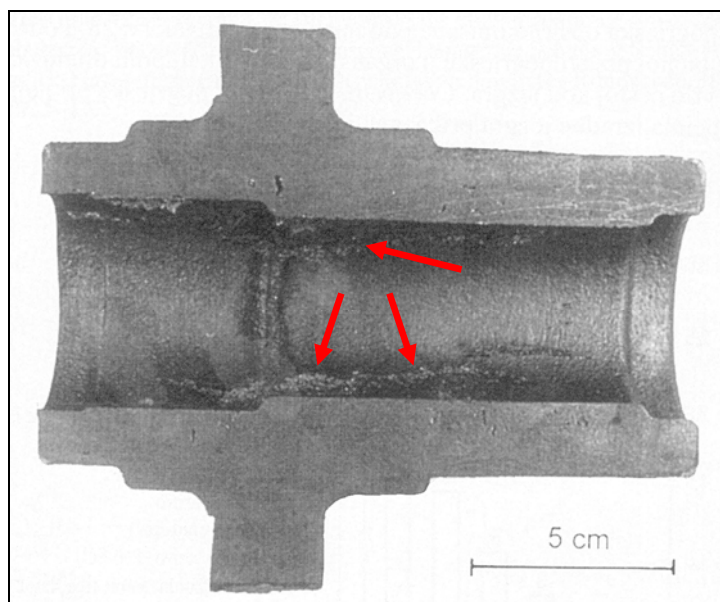


Kod odloma jednokratne (pješčane) jezgre dolazi do odvajanja jednog dijela jezgre ili do njenog loma. Taljevina popunjava nastali prostor, što se u konačnici očituje nastankom nepravilnih masivnih metalnih izraslina u šupljinama odljevka koje su vidljive golim okom (slika 4.6). Odlomljeni komadi jezgre pronalaze se obično u gornjim područjima odljevka. Pojavljuje se nezavisno o ljevarskoj leguri i postupku lijevanja.



Slika 4.6. Metalne izrasline u otvorima na odljevku zbog loma jezgri

Pucanjem kalupa ili jezgre dolazi do nastanka nepravilnih pukotina u kalupu, odnosno jezgri. Nastale pukotine popunjava taljevina, što u konačnici rezultira nastankom rebrastih metalnih izraslina (slika 4.7). Kalupne (jezgrene) pukotine povećavaju opseg dorade odljevka.



Slika 4.7. Metalne izrasline na odljevku zbog pukotina u jezgri

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Odlamanje dijela kalupa događa se pri kalupljenju, sastavljanju kalupa i ulaganju jezgri kada plastičnost i čvrstoća kalupnog materijala nije dovoljna. Odlomljeni dio ne može izdržati tlak i temperaturu lijevanja pa se ispire u kalupnu šupljinu.

Tečljivost kalupnog materijala utječe na punjenje kalupa i razdiobu kalupnog materijala u kalupu. Slaba tečljivost i nejednolična sabijenost koja nakon toga slijedi mogu doprinijeti odlamanju kalupa.

Povećana sabijenost kalupnog materijala može također pridonijeti odlamanju kalupa jer je potrebna veća mehanička sila za odvajanje modela od kalupa.

Odlamanje kalupa može se dogoditi tijekom vađenja modela ako se model ne odvaja od kalupa paralelno, već dolazi do naginjanja modela. U tom slučaju kalupni materijal mora imati visoku plastičnost da ne dođe do odlamanja. Plastičnost kalupne mješavine može se poboljšati dodatkom veće količine veziva (bentonita).

Jezgre moraju biti otporne na mehanička i toplinska naprezanja kao i kalupi. Uzroci odloma i pucanja pješčane jezgre su: nedovoljna čvrstoća, preveliko toplinsko naprezanje izazvano ljevarskom legurom, preopterećenje nestručnim rukovanjem pri transportu ili pri ulaganju u kalup, netočni jezgri oslonci zbog čega dolazi do naprezanja koja mogu prouzročiti pukotine i odlamanje, prevelik tlak na jezgrene oslonce pri sastavljanju kalupa, prerano ulaganje jezgre u kalup (jezgra još nije dostigla svoju konačnu čvrstoću), gubitak čvrstoće jezgre zbog utjecaja vlage pri skladištenju ili zbog nestručnog premazivanja te pogrešan sastav mješavine za izradu jezgri (malen udio veziva).

Pukotine u kalupu ili jezgri mogu se svrstati u skupinu grešaka koje nastaju zbog širenja pijeska. Taljevina koja okružuje jezgru stvara temperaturni gradijent između površine i središta jezgre. Uz pretpostavku upotrebe kvarcnog pijeska, pri tome nastaju značajna naprezanja zbog ekspanzije kvarca.

Razaranjem veziva na površini jezgre zbog toplinskog djelovanja taljevine mogu nastati vlasaste pukotine u koje može prodrijeti taljevina.

Na nastanak kalupnih pukotina utječe ponašanje veziva na visokim temperaturama (plastičnost, vlačna čvrstoća).

### *Sprečavanje nastajanja greške*

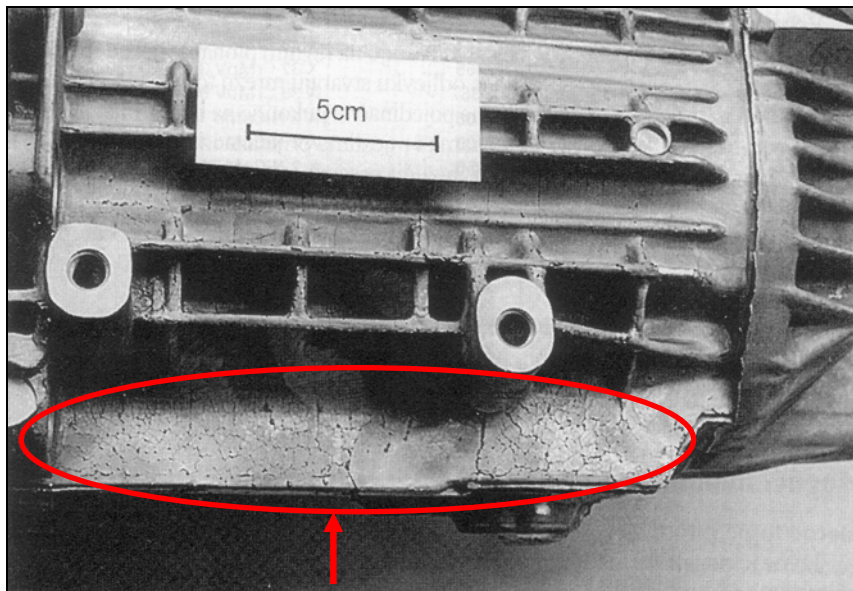
- a) osigurati optimalnu pripremu kalupnog materijala, odnosno što bolju razdiobu bentonita uz što niži udio vlage i tako poboljšati tečljivost kalupnog materijala te optimizirati plastičnost kalupnog materijala,
- b) uporabiti bentonit sa što višim udjelom montmorilonita,
- c) uporabiti sredstva za razdvajanje kalupa i modela da bi se model mogao lakše izvaditi iz kalupa,
- d) osigurati jednoličnu razdiobu kalupnog materijala u kalupu,
- e) provjeriti tlak kalupljenja na strojevima za kalupljenje; izbjegavati previsoke lokalne tlakove kalupljenja,
- f) provjeriti način uklanjanja modela iz kalupa (okomito podizanje),
- g) provjeriti ljevarska skošenja na modelu da bi se omogućilo lakše vađenje modela iz kalupa,
- h) provjeriti sastav mješavine za izradu jezgri, uskladiti udjele veziva i očvršćivača,
- i) odabrati sastav jezgrene mješavine ovisno o leguri koja se lijeva i time uskladiti toplinsko naprezanje jezgre s njezinom vlačnom čvrstoćom u vrućem stanju,
- j) obratiti pažnju na skladištenje jezgri i negativan utjecaj vlage na njihova svojstva,

- k) provjeriti modelni sklop zajedno s jezgrenom zbog zračnosti jezgrenog oslonca,
- l) ukloniti srh s jezgri,
- m) kod pojave pukotina u kalupu ili jezgri provjerit sadržaj aditiva čijim se dodatkom kompenzira širenje kvarcnog pijeska.

#### 4.5 Metalne izrasline nastale zbog toplih pukotinama na kalupima (alatima) za kokilno i visokotlačno lijevanje

##### *Opis*

Pukotine na površini kalupa za kokilno ili visokotlačno lijevanje koje mogu nastati pri velikim toplinskim opterećenjima, posebno pri stalnim temperaturnim promjenama. U te pukotine prodire taljevina, a nakon njenog skrućivanja na odljevku ostaju greške u obliku mrežasto razgranatog srha, nazvanog i mreža žila (slika 4.8).



Slika 4.8. Greške na visokotlačno lijevanom odljevku od magnezijske legure zbog toplih pukotina na kalupu

Prema obliku pukotina razlikuju se:

- alatne tople pukotine – najčešće nastaju na ravnim plohama, a kad ih ima više na odljevku stvaraju mrežu toplinskih pukotina,
- pukotine od naprezanja – pojedinačne pukotine na bridovima, urezima, prečkama i mjestima prijelaza iz jednog presjeka u drugi nastale zbog koncentriranog naprezanja u kalupu,
- runjenje – zbog pojačanog stvaranja pukotina od kalupne se stijenke odvajaju površinske čestice.



## *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

### Alatne tople pukotine

Nagle temperaturne promjene uzrokuju toplinska naprezanja koja tijekom vremena mogu dovesti do oštećenja materijala, a time i do razaranja metalnog kalupa. Pritom se nastale vlasaste površinske pukotine (pukotine zbog temperaturnih promjena) mogu dalje širiti uz istodobni porast njihove dubine. U konačnici se stvara mreža pukotina i pojavljuju otvorene pukotine. Te pukotine ostavljaju tragove na odljevku i pogoršavaju izgled njegove površine. Dio kalupa na kojem su se pojavile pukotine mora se zamijeniti. Ako je kalupni materijal jako žilav, stvaranje pukotina biti će usporeno.

### Pukotine od naprezanja

Toplinska naprezanja koja nastaju u kalupnom materijalu zbog učestalih temperaturnih promjena ovise o njegovom modulu elastičnosti, koeficijentu toplinskog istežanja, otpornosti prema puzanju, temperaturnom intervalu i geometrijskom obliku dijela kalupnog dijela.

Pukotine od naprezanja uglavnom nastaju u područjima velike koncentracije naprezanja, kao što su oštri bridovi ili nagle promjene debljine stjenke. Premala žilavost također može potaknuti stvaranje pukotina od naprezanja.

Vrlo je važno kako se brzo događaju temperaturne promjene, koliko se dugo maksimalna temperatura mora održavati i kojom se brzinom odvija zagrijavanje i hlađenje. Prema tome, odlučujući faktori su trajanje ciklusa i hlađenje kalupa, a isto tako i puzanje kalupnog materijala.

### Runjenje

Runjenje se najčešće može uočiti na plinom nitriranim, kaljenim martenzitnim čelicima. Plinskim nitriranjem nastaju krhke faze na granicama zrna u zoni nitriranja koje smanjuju deformabilnost (duktilnost) pri opterećenju temperaturnim promjenama. Na taj način nastaju interkristalne pukotine u nitriranom površinskom području, nakon čega se pojedini dijelovi mogu odlomiti. Zbog toga kalupni materijali moraju biti vrlo postojani pri temperaturnim promjenama.

## *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) za izradu kalupa za kokilno i visokotlačno lijevanje upotrijebiti adekvatne legirane alatne čelike za rad u toplom stanju. Najčešće se radi o čelicima koji su legirani kromom, molibdenom i vanadijem, te eventualno dodatno wolframom, niklom i kobaltom, ovisno o primjeni,
- b) obratiti pažnju na površinsku i toplinsku obradu kalupa, provesti uklanjanje napetosti,
- c) pravilno zagrijati kalup prije početka lijevanja,
- d) provesti međuzarenje kalupa nakon određenog perioda uporabe.

## 5. ŠUPLJINE

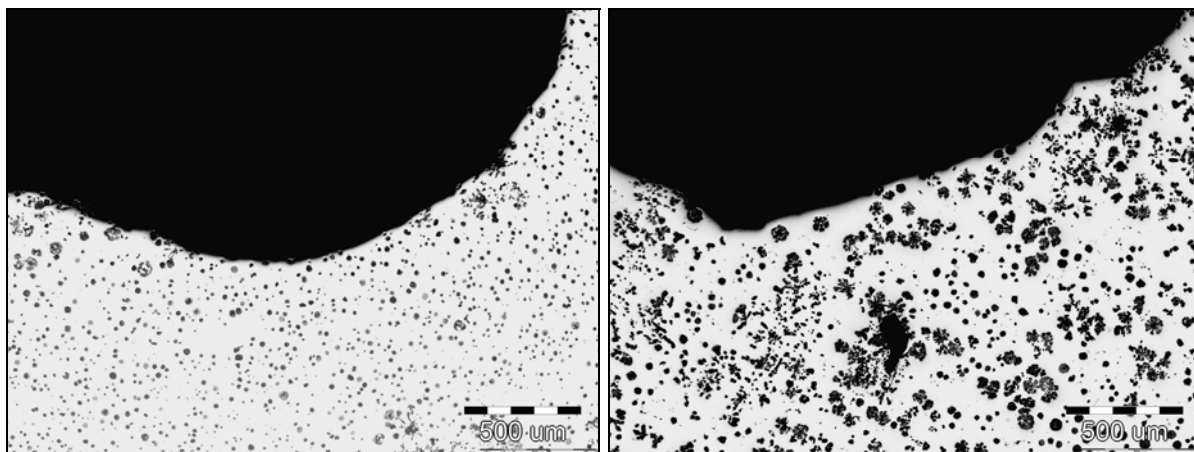
### 5.1 Plinski mjehuri

#### *Opis*

Šupljine (engl. *blowholes*) s zaobljenim, najčešće glatkim stjenkama, koje zauzimaju veće površine (slike 5.1 i 5.2). Prisutne su kao pojedinačne, ali i u skupinama, a ponekad ih prate uključci troske i/ili oksidni uključci. Gotovo uvijek se nalaze u gornjem dijelu odljevka, u nedovoljno odzračenim prostorima.



Slika 5.1. Plinski mjehuri na odljevku od nodularnog lijeva



Slika 5.2. Metalografske snimke mikrostrukture odljevka od nodularnog lijeva sa slike 5.1 u području plinskih mjehura

Plinski mjehuri povećavaju doradu kad se nađu na površini odljevka, pa se moraju zavariti. Ako se nalaze u unutrašnjosti konstrukcijskog dijela uzrokuju škart. Ovisno o skrućivanju (brzina hlađenja, debljina stijenke), mjehuri mogu nastati i u unutrašnjosti odljevka.

Plinski mjehuri mogu se pojaviti kod lijevanja u jednokratne i višekratne kalupe te kod svih ljevarskih legura.

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Načelno se mogu razlikovati dva uzroka nastanka plinskih mjehura:

- a) plinovi nastaju iz kalupnog materijala zbog ulijevanja vruće taljevine u kalup. Ako je propusnost kalupnog materijala nedovoljna, tlak plina može toliko porasti da plinovi u obliku mjehura prodiru u taljevinu,
- b) plinovi se otapaju u taljevini, a izlučuju se tijekom skrućivanja zbog opadanja topljivosti.

Plinski mjehuri mogu nastati u prvom redu kod odljevaka koji se proizvode u kalupnim materijalima, neovisno o samom materijalu, ali i kod kokilnog i visokotlačnog lijeva zbog smanjenja topljivosti plinova tijekom skrućivanja.

Plinski mjehuri koji su prodrli u taljevinu i oni koji su se u njoj otopili, mogu se u početku skrućivanja taljevine u njoj dizati i iščeznuti kroz još neskrutnutu površinsku koru odljevka. S porastom viskoznosti taljevine, odnosno napredovanjem skrućivanja, usporava se dizanje plinskih mjehura. Zbog toga oni ostaju zarobljeni ispod krute površinske kore ili neposredno na graničnoj površini između metala i kalupa, odnosno na mjestima gdje je materijal još kašast, što rezultira greškama na odljercima.

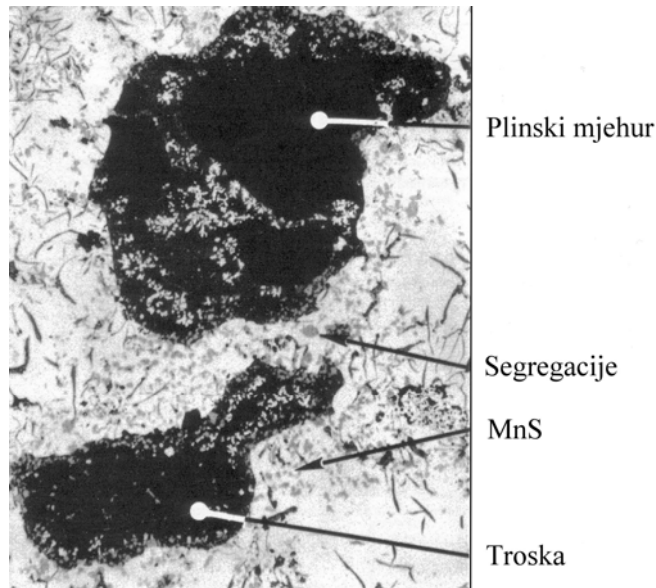
Na zaostajanje plinova u metalu presudno utječe gustoća, odnosno razlika u gustoći između taljevine i plina. Što je razlika u gustoći veća, to je veća i brzina dizanja mjehura. Odljerci od legura sa širokim intervalom skrućivanja i malom gustoćom (npr. legure aluminijske) posebno su izloženi stvaranju grešaka zbog plinskih mjehura.

U kalupnim mješavinama kod kojih se koristi bentonit kao vezivo plin se razvija u znatno manjoj mjeri nego u kalupima i jezgrama kod kojih se razne smole upotrebljavaju kao veziva, a samo razvijanje plina ovisi u prvom redu o udjelu vode i organskih dodataka (ugljena prašina). Obzirom na malu propusnost za plin bentonitom vezanih kalupa zbog danas uobičajene vrlo velike sabijenosti i niske srednje zrnitosti, pojava plinskih mjehura može biti pojačana.

Uzrok nastanka plinskih mjehura u visokotlačno lijevanim odljercima može biti i zahvaćeni zrak tijekom punjenja kalupa. Prevelike brzine stapa u prvoj fazi tlačenja, a premale brzine taline na ušću te nedovoljan vremenski slijed hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa, premali prelivni obujam i nedovoljna ispunjenost uljevne komore važni su uzroci nastanka plinskih mjehura kod visokotlačnog lijevanja.

Plinski mjehuri praćeni uključcima troske čest su slučaj kod odljevaka od sivog lijeva. Uglavnom se nalaze ispod gornjih površina odljevka, a otkrivaju se tijekom strojne obrade ili čišćenja. Nastale šupljine imaju sferičan ili nepravilan oblik, a karakterizira ih siva ili sivo-plava boja. U mnogim šupljinama nalaze se uključci troske. Nakupine uključaka manganovog sulfida često se mogu pronaći u metalnoj osnovi u blizini ove greške (slika 5.3).

Hladna taljevina, odnosno preniska temperatura lijevanja primarni je uzrok nastanka ove greške kod sivog lijeva. Prekomjerni sadržaj mangana i sumpora pospješuje nastajanje ove greške. S porastom sadržaja sumpora i mangana mora se povećavati i temperatura lijevanja da bi se izbjeglo nastajanje greške. S padom temperature taljevine dolazi do formiranja manganovih sulfida i njihovog izdvajanja iz taljevine. Potom manganovi sulfidi isplivavaju na površinu taljevine gdje se miješaju s troskom (željezni i manganovi silikati) pri čemu nastaje troska koja ima poboljšanu tečljivost. Ta troska dospijeva u kalupnu šupljinu i reagira s grafitom, pri čemu nastaje ugljični monoksid i dolazi do stvaranja mjehura.



Slika 5.3. Plinski mjehuri u mikrostrukturi sivog lijeva povezani sa segregacijom MnS

### *Sprečavanje nastajanja greške*

1. Za kalupne materijale vezane bentonitom:
  - a) osigurati dovoljno veliku propusnost za plinove u sabijenom kalupu – smanjiti udio vode, smanjiti udio veziva (upotrijebiti bentonit s visokim udjelom montmorilonita), smanjiti dodatak organskih tvari (ugljene prašine, dekstrina, škroba), smanjiti udio sitnih frakcija koje začepljuju pore i smanjuju propusnost za plinove, eventualno upotrijebiti pijesak s krupnijim zrnima,
  - b) po mogućnosti smanjiti sabijenost kalupa, osigurati bolju i ravnomjerniju sabijenost jednoličnom razdiobom pijeska tijekom punjenja,
  - c) u uljevnom sustavu i sustavu napajanja osigurati dovoljno odzračivanje kalupa.
  
2. Za organski vezane kalupne (jezgrene) materijale:
  - a) osigurati što bolje odzračivanje jezgri (najbolje preko jezgrenih oslonaca),
  - b) koristi minimalne udjele veziva i manje reaktivna veziva,
  - c) premazivati jezgre, ali paziti da se pri tome ne premažu jezgri oslonci i da se jezgre temeljito osuše,
  - d) ako je moguće rabiti krupniji pijesak,
  - e) spriječiti navlaživanje jezgri zbog nestručnog skladištenja,
  - f) ako je moguće produljiti vrijeme lijevanja da bi se plinovi iz jezgre mogli prirodnim putem ukloniti kroz kalup,
  - g) kalup i jezgre koje se ulažu kalup moraju imati približno istu temperaturu, jer razlike u temperaturi mogu dovesti do stvaranja kondenzirane vode u sastavljenom kalupu.
  
3. Za lijevani materijal:
  - a) taljevinu aluminijskih legura, bakra i bakrenih legura te čeličnog lijeva treba optimalno otpliniti radi uklanjanja otopljenih plinova,

- b) ako je moguće povisiti temperaturu i brzinu lijevanja,
- c) sprječavati apsorpciju plinova od taljenja sve do kraja lijevanja,
- d) ljevačke lonce dobro čistiti, sušiti i predgrijavati,
- e) rabiti čiste uložne materijale,
- f) kod lijevanja sivog lijeva osigurati dovoljno visoku temperaturu lijevanja, obratiti pažnju na sadržaj mangana i sumpora te uklanjati trosku sa površine taljevine.

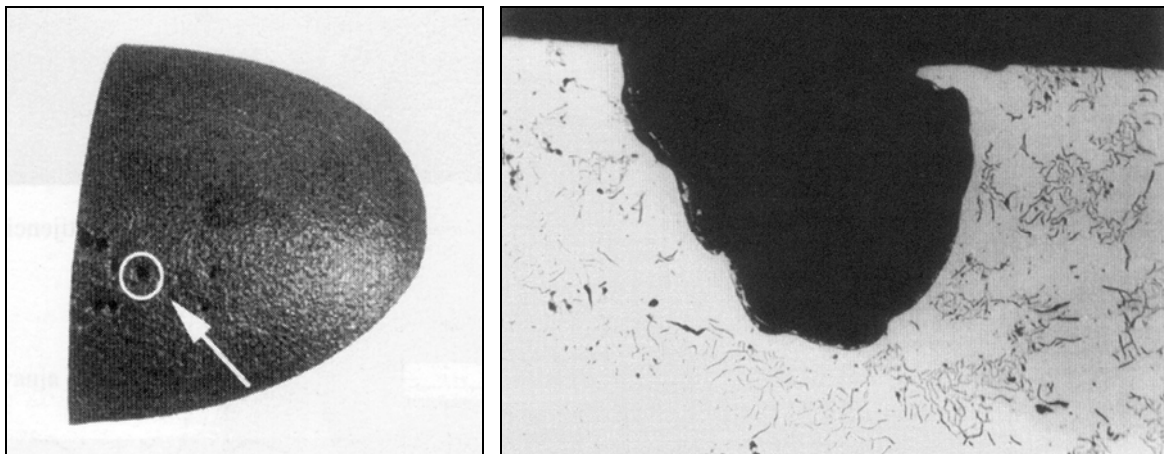
4. Kod kokilnog i visokotlačnog lijeva:

- a) redovito provjeravati odzračivanje kokila, odnosno kalupa kod visokotlačnog lijevanja, obradu taljevine i otplinjivanje,
- b) izbjeći zahvaćanje troske iz peći za održavanje taljevine,
- c) izbjeći uvlačenje zraka u spust tijekom lijevanja u kokilu,
- d) povećati tlak lijevanja i promijeniti vremenski slijed hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa,
- e) neizbježne promjene smjera toka taljevine u uljevnom sustavu izvesti s dovoljno velikim polumjerima,
- f) izbjegavati „prijeskočni val“ malom brzinom stapa u prvoj fazi tlačenja,
- g) osigurati dobru ispunjenost uljevne komore prije kretanja stapa.

## 5.2 Plinske pore

### Opis

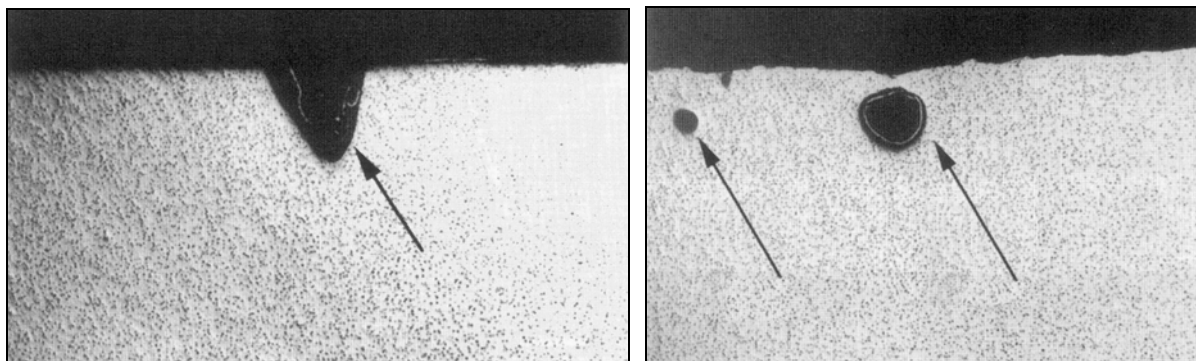
Sitne šupljine, odnosno pore ili rupice (engl. *pinholes*) najčešće na vanjskoj strani ili odmah ispod površine odljevka od sivog, nodularnog i vermikularnog lijeva te čeličnog i temperiranog lijeva (slike 5.4 i 5.5).



a)

b)

Slika 5.4, a) plinske pore vidljive golim okom na odsječku odljevka, povećanje 2x, b) metalografska snimka mikrostrukture segmenta odljevaka prikazanog na slici a) u području greške



Slika 5.5. Plinske pore na odljevku od nodularnog lijeva na površini ili ispod površine, povećanje 15x, nenagrizen

Često se nazivaju i potpovršinska poroznost ili površinski mjehuri. Pojavljuju se pojedinačno i na velikim površinama, a moguće su u svim područjima odljevka. U mnogim slučajevima vidljive su tek nakon strojne obradbe, i to uvijek golim okom. Mogu potjecati od vodika, kombinacije vodika i dušika te reakcije CO i troske. Nepovoljno djeluju na emajliranje, pocinčavanje, prevlačenje prahom itd. Gotovo da ne utječu na statičku nosivost, posebno kod nodularnog lijeva. Na obrađenim funkcionalnim površinama, koje uz to moraju biti i nepropusne, ta greška uzrokuje škartiranje odljevka. Ova greška smanjuje dinamičku čvrstoću odljevka, zbog čega se u sigurnosnim dijelovima koji su dinamički opterećeni ne može tolerirati.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Plinske pore rijetko nastaju samo zbog jednog uzroka, već su rezultat skupnog djelovanja više uzroka. One koje potječu od vodika ili zajedničkog djelovanja vodika i dušika, a nastaju u tri stupnja:

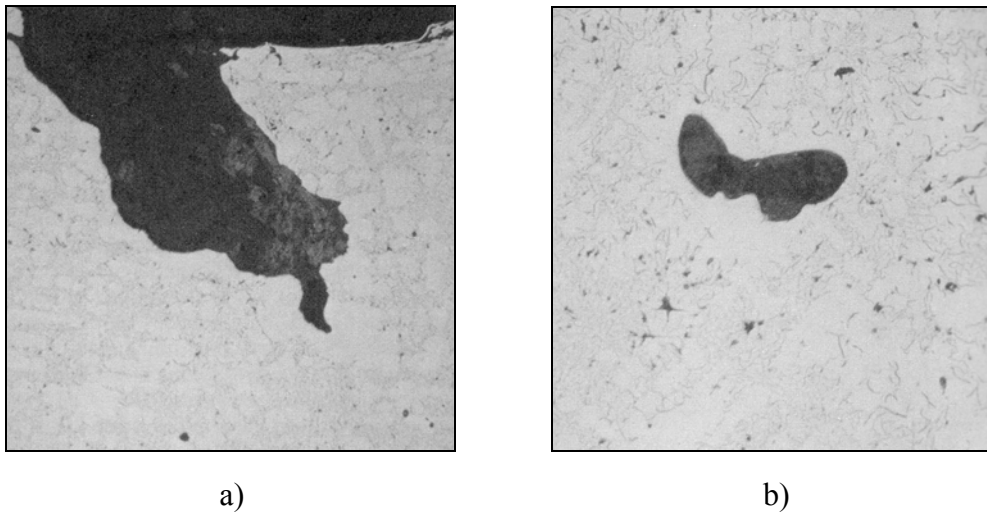
- 1.) zbog reakcije vodene pare s pratećim elementima u željezu nastaju kovinski oksidi i atomni vodik koji prodire u taljevinu. Na sličan se način raspadaju spojevi dušika i vodika, koji također mogu difundirati u taljevinu.
- 2.) nastajanje plinskih mikromjehura reakcijom kovinskih oksida sa ugljikom u taljevini.
- 3.) difuzija vodika i dušika i plinske mikromjehure i njihovo povećanje.

Prevelik sadržaj vodika u taljevini može nastati zbog vlažnih te jače korodiranih uložnih materijala, ulja i emulzija koje oslobađaju ugljikovodike, te zbog djelovanja povećane vlažnosti zraka. Prevelik sadržaj dušika u taljevini može potjecati od čeličnog otpada (~ 130 – 200 ppm), sirovog željeza (~ 10 – 60 ppm) te sredstava za dodatno naugljičavanje taljevine (~  $0,11 \times 10^4$  –  $1650 \times 10^4$  ppm).

Kritični sadržaj dušika za nastajanje plinskih pora iznosi 80 – 100 ppm. Kada je sadržaj dušika veći od navedenih koncentracija, pojavljuju se greške u ili na odljercima (plinska poroznost) (slika 5.6). Ako se istovremeno izdvaja CO i niži sadržaji mogu biti kritični.

Plinske pore nastale zbog visokog sadržaja dušika pojavljuju se znatno češće u debelim i srednje debelim stjenkama i to u područjima u kojima je taljevina u dodiru s površinom kalupa ili jezgri izrađenih primjenom raznih smola kao veziva. Šupljine koje nastaju uslijed mjehura nepravilnog su oblika (slika 5.6), za razliku od sferičnih šupljina koje

nastaju zbog povišenog sadržaja vodika, i okomite su na površinu odljevka. Na unutrašnjoj površini nastalih šupljina prisutan je kontinuirani ili diskontinuirani grafitni film, a okružujuća metalna osnova osiromašena je ugljikom.



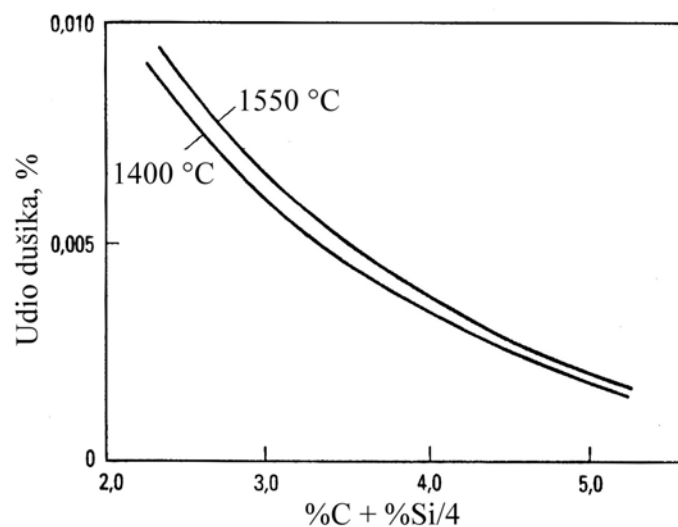
Slika 5.6. Površinske (a) i podpovršinske (b) pore u sivom lijevu nastale zbog visokog sadržaja dušika (135ppm)

Najmanji sadržaj titana koji je potreban za sprječavanje nastajanja plinskih pora zbog dušika u sivom lijevu određuje se na osnovi sljedeće jednačbe:

$$\text{ppm Ti} = 10 \times \text{ppm N} - 900$$

Pri tome se dušik veže u nitride.

Manja topljivost vodika i dušika u krutom stanju od njihove topljivosti u taljevini uzrokuje stvaranje mjehura tijekom skrućivanja. Za razliku od čeličnog lijeva, željezni lijevi manje su skloni apsorpciji plina jer veći sadržaji ugljika i silicija smanjuju topljivost vodika i dušika, a time i njihovu apsorpciju (slika 5.7).



Slika 5.7. Ravnotežna topljivost dušika u željeznim legurama ovisno o sadržaju ugljika i silicija [5]



Krom, molibden, mangan, vanadij i titan povećavaju topljivost vodika i dušika, a aluminij, fosfor, silicij i ugljik smanjuju. Pri većem sadržaju aluminija u željezu može aluminij iz taljevine reagirati s vodenom parom kalupnog plina pri čemu nastaje aluminijev oksid i vodik. Taj vodik uzrokuje stvaranje mjehura.

Potrebno je razlikovati nastanak plinskih mjehura zbog čisto metalurških razloga i nastanak plinskih mjehura zbog reakcija na graničnoj površini između taljevine i kalupa (jezgre).

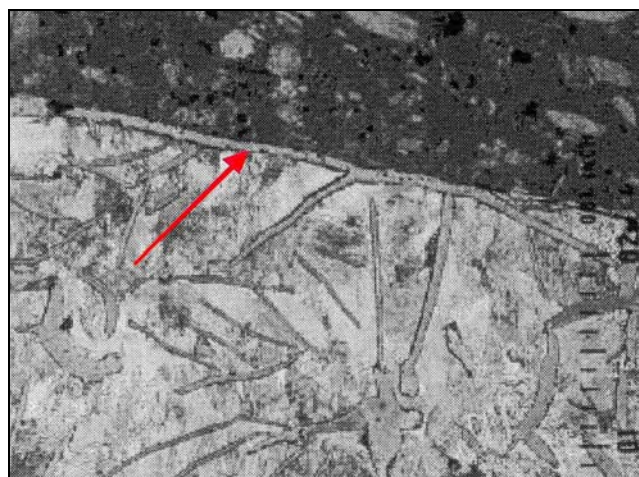
Pri skrućivanju željeznih ljevova povećava se udio ugljika u ostatku taljevine. Uz prisutnost troske bogate oksidima (MnO), oksidi reagiraju sa ugljikom stvarajući CO. Na taj način u odljevku nastaju plinski mjehuri koji su okruženi razugljičenim područjima. Osim toga, nastajanje takvih mjehura može biti pokretač stvaranja plinskih pora reakcijom troske i CO, nastanak kojih zapravo uzrokuje vodik, odnosno dušik. Velik udio oksida može potjecati i od prevelikog sadržaja oksida u uložnom materijalu.

Sadržaj sumpora također utječe na stvaranje plinskih pora. Sumpor značajno pospješuje stvaranje troske pri kontaktu taljevine željeznog lijeva i zraka te uzrokuje porast manganovog sulfida u troski. Proces stvaranja plinskih pora reakcijom troske i CO značajno pospješuju troske male viskoznosti, kao što su one koje sadrže puno MnO-MnS. U daljnjem tijeku nastajanja plinskih pora vodik difundira u mjehure i povećava ih.

U željeznim ljevovima problem mogu predstavljati preveliki sadržaji elemenata s povišenim afinitetom prema kisiku, kao što su titan, aluminij, cirkonij, silicij, kalcij, magnezij i barij (cjepivo!). Ako se navedeni elementi nalaze u obliku oksida, reakcija sa ugljikom uz stvaranje CO može biti primarni uzrok nastanka plinskih pora. Očito je da se sklonost ka stvaranju plinskih pora može povećati pri cijepljenju taljevine u kalupu.

Katkad pri cijepljenju u kalupu mogu nastati plinske pore kojima uzrok nije postupak cijepljenja u kalupu. Smanjivanjem temperature lijevanja stvaraju se nepovoljniji uvjeti za otapanje cjepiva, a time i heterogene klice za tvorbu plinskih mjehura. Te se greške mogu spriječiti vrućim lijevanjem i/ili upotrebom filtra.

Često se u ljevaonicama sivih željeznih ljevova pojavljuje problem povezan sa stvaranjem podpovršinske poroznosti (plinskih pora) zbog oslobađanja plinovitog vodika. Karakteristika ovih grešaka je postojanje grafitnog filma na površini plinske pore (nastale šupljine) (slika 5.8).



Slika 5.8. Metalografska snimka mikrostrukture sivog lijeva u nagriženom stanju. Strelicom je označen grafitni film na površini mjehura (šupljine) nastalog zbog povišenog sadržaja vodika



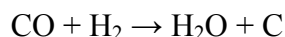
Ova pojava pripisuje se prekomjernoj količini aluminijske. Aluminij utječe na površinsku napetost taljevine željeznog lijeva, što za posljedicu ima osjetljivost na pojavu grešaka (mjehuravost). Površinska napetost taljevine sivog lijeva najprije opada s porastom sadržaja aluminijske i dostiže minimum pri ~ 0,1% aluminijske. Nakon ove koncentracije ponovo dolazi do porasta površinske napetosti. Sivi lijev je znatno osjetljiviji na pojavu te vrste grešaka od nodularnog lijeva zbog niže površinske napetosti (viši sadržaj površinski aktivnih elemenata). Površinski aktivni elementi (npr. sumpor) smanjuju površinsku napetost čime se značajno povećava tendencija ka stvaranju mjehura. Iznad određenog sadržaja aluminijske (~ 0,2%) osjetljivost na stvaranje mjehura se smanjuje zbog porasta površinske napetosti. Najkritičnije područje leži između 0,008 i 0,2% aluminijske u slučaju sivog lijeva. Zbog toga se sadržaj aluminijske mora održavati niskim i to najbolje ispod područja gdje je opasnost za stvaranje mjehura najveća. Štetan utjecaj aluminijske značajno se povećava u prisutnosti titana. Naime, prisutnost titana čak i u minornim količinama rezultira značajnim smanjenjem dopuštenih sadržaja aluminijske. Ako je prisutan visok sadržaj aluminijske i titana u taljevini, dolazi do reakcije s vlagom iz svježe kalupne mješavine, vlažnih alata ili vlažne vatrostalne obloge te oslobađanja vodika. Prema tome, potrebno je obratiti pažnju na sadržaj vlage u kalupnoj mješavini. Povećanjem sadržaja vlage sa 3,0 na 6,0 % značajno se povećava mogućnost nastajanja plinskih pora.

Kod nodularnog lijeva niske temperature lijevanja i nemogućnost uklanjanja magnezijjskih para značajno povećavaju nastajanje plinskih pora. Područja koja okružuju te pore obično su perlitna s tragovima karbida.

Ugljični monoksid, nastao reakcijom ugljika iz nodularnog lijeva ili ugljikonosnih materijala prisutnih u kalupnoj mješavini s magnezijevim silikatima ili troskom, može također biti uzrokom nastajanja plinskih pora u nodularnom lijevu. U tom slučaju plinske pore imaju sferičan oblik i obično se pojavljuju u gornjoj polovici odljevka u područjima gdje su prisutni uključci troske, koji su obično rezultat prekomjerne obrade predlegurom FeSiMg.

Kalupni materijal može također uzrokovati stvaranje plinskih pora zbog:

- prevelikog sadržaja dušika i vlage u kalupnom materijalu (organska veziva, tj. fenol-formaldehidna veziva, furanska veziva),
- nepovoljne plinske atmosfere u kalupnoj šupljini, čije uzroke treba tražiti u vrsti i dodanoj količini tvorca sjajnog ugljika,
- prevelikog sadržaja dušika, odnosno spojeva dušika i vodika u vezivima za jezgrene mješavine,
- oslobađanja velike količine plina pri pirolizi Croningovih jezgrenih veziva u trenutku dok još nije nastala kruta površinska kora odljevka. U redukcijskoj atmosferi, pri temperaturi oko 600 °C i atmosferskom tlaku amonijak se gotovo potpuno disocira. Nastali vodik reagira s prisutnim CO prema slijedećoj jednačini:



- nedovoljnog stupnja pripreme bentonitom vezanog kalupnog materijala, pa prema tome postojanja slobodne vode koja nije vezana u bentonitu, što povećava opasnost od pojave vodika.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) smanjiti udio vodikonosnih materijala, tj. rabiti suhe i izbjegavati jako korodirane i zauljene zasipne materijale,
- b) u sastavu uložka smanjiti udio materijala s povišenim sadržajem dušika (npr. čeličnog otpada), a u uložnom materijalu za proizvodnju sivog lijeva osigurati što manji udio titana ( $< 0,02\%$ ). Po mogućnosti ulagati očišćen kružni materijal,
- c) po mogućnosti povećati stupanj zasićenja i ne dopustiti da udio mangana premaši  $0,4 \times \%Si$  te smanjiti sadržaj aluminijskog (ne  $\geq 100$  ppm). Negativni učinak aluminijskog pojačava se u prisutnosti titana. Pri sadržaju titana od  $0,02\%$  i sadržaju aluminijskog od  $0,01 - 0,2\%$  pojačano je stvaranje plinskih pora,
- d) rabiti cjepiva s manjim sadržajem aluminijskog uz odgovarajuću visoku temperaturu lijevanja. Niske temperature lijevanja povećavaju sklonost prema stvaranju plinskih pora,
- e) uljevni sustav konstruirati tako da se izbjegne oksidacija taljevine, skratiti putove tečenja i spriječiti turbulencije,
- f) smanjiti sadržaj vodika u taljevini čeličnog lijeva na što je moguće niži nivo. Provesti odgovarajuću dezoksidaciju i lijevati što je moguće kraće vrijeme,
- g) smanjiti tvorbu troske,
- h) smanjiti udio vlage i kružnog jezgrenog pijeska u kalupnom materijalu,
- i) preispitati i optimizirati udio sjajnog ugljika. Prema potrebi zamijeniti tvorce sjajnog ugljika,
- j) u kalupima i jezgrama vezanim sintetičkom smolom smanjiti udio veziva ili uporabiti drugo vezivo i/ili katalizator,
- k) premazati kalupe i jezgre, osušiti vodene premaze, provjeriti i optimizirati odzračivanje,
- l) spriječiti unos pomoćnih materijala pojila u kalupni materijal,
- m) povećati propusnost za plinove kalupnog materijala,
- n) povisiti ferostatički tlak. Kad taj tlak dosegne kritičnu vrijednost, nastali jezgreni plinovi moraju se prisilno odvesti preko odgovarajućih jezgrenih oslonaca.

## **5.3 Plinska poroznost**

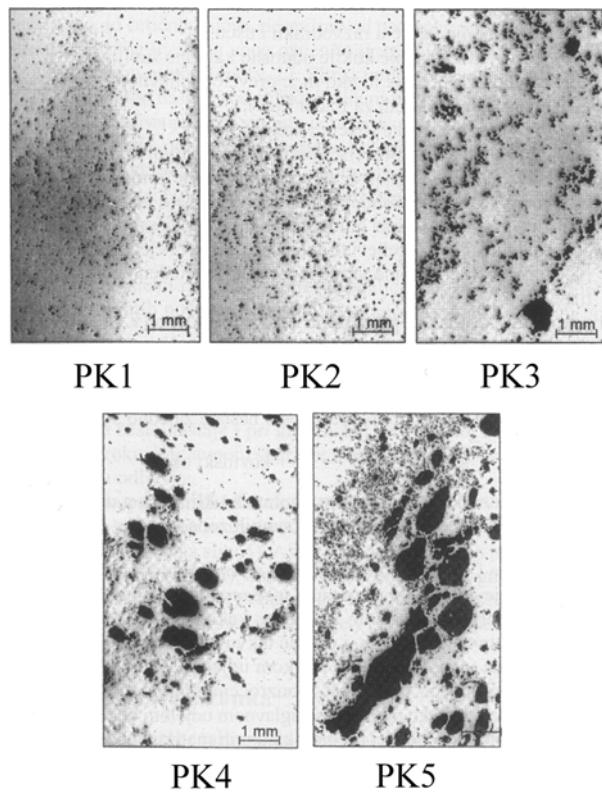
### *Opis*

Ravnomjerno raspodijeljene gotovo okrugle pore glatkih i sjajnih unutarnjih površina na velikom presjeku. Ne smiju se zamijeniti sa usahlinskim porama hrapavih stjenki. Često se uočavaju tek nakon ispitivanja nepropusnosti odljevka ili nakon strojne obrade. U zadnje navedenom slučaju greška je većinom vidljiva golim okom.

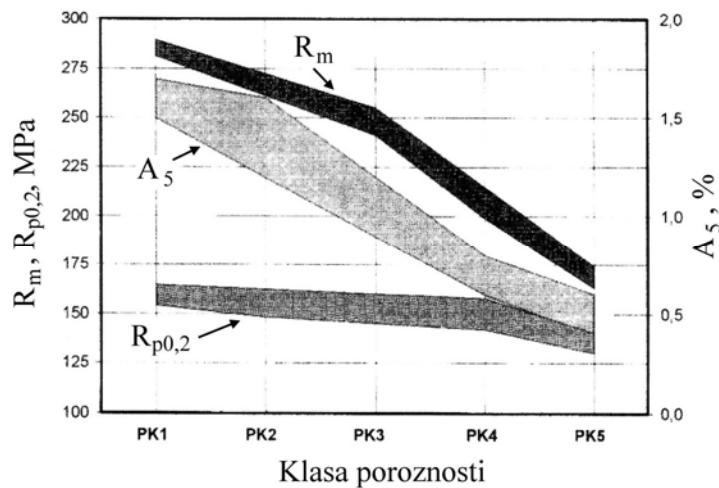
Kod odljevaka lijevanih klasičnim visokotlačnim postupkom plinska poroznost gotovo uvijek je prisutna. Pomoću klasifikacijskih slika poroznosti može se vidjeti i odrediti utjecaj različite poroznosti na mehanička svojstva (slike 5.9 i 5.10).

Ova se greška najčešće susreće kod odljevaka od aluminijskih, magnezijevih i bakrenih legura, ali i kod čeličnog lijeva, nezavisno od postupka kalupljenja. Odljevci od željeznog lijeva su zbog općenito drugačije metalurgije tog materijala skloniji plinskim mjehurima.

Plinska poroznost pojačano nastaje kod legura s velikim intervalom skrućivanja i vrlo je često u kombinaciji s poroznošću, mikrousahlinama, oksidnim uključcima i sl. Najviše su pogođena debelostjena područja, prijelazi s debljih na tanje stijenke i područja u blizini ušća.



Slika 5.9. Klasifikacijske slike za procjenu poroznosti prema G. Schindelbacheru; povećanje 10x



Slika 5.10. Utjecaj klasa poroznosti sa slike 5.9 na vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i izduženje uzoraka od AlSi9Cu3 legure

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

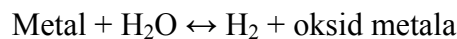
Plinska poroznost uglavnom nastaje zbog:

- a) izdvajanja plinova iz taljevine tijekom skrućivanja,
- b) izdvajanja plinova iz kalupa,
- c) reakcije taljevine s vlagom iz kalupne mješavine,
- d) zarobljenog zraka tijekom visokotlačnog lijevanja.

Pri hlađenju i skrućivanju izdvajaju se plinovi koji su bili otopljeni u taljevini jer se njihova topljivost smanjuje s padom temperature. Iako velik dio plina može ishlapiti, ipak zaostaje određena količina plina koji tijekom skrućivanja stvara pore u strukturi odljevka.

Ako je brzina razvijanja plinova iz veziva za kalupne mješavine prevelika obzirom na propusnost kalupa dolazi do gomilanja plinova. Ukoliko je tlak plinova veći od tlaka metala, plin ulazi u taljevinu i nastaje plinska poroznost. Isparavanjem vlage iz kalupnog materijala i njenim razlaganjem nastaje vodik.

Plinsku poroznost mogu prouzročiti i reakcije taljevine s komponentama kalupne mješavine. Taljevina može tijekom lijevanja reagirati s vodom iz kalupne mješavine. Pri tome najprije nastaje vodena para, koja se potom reagira s taljevinom pri čemu nastaju vodik i metani oksidi (zbog toga plinska poroznost često nastaje zajedno sa oksidnim uključcima):



Vodik je u taljevini otopljen atomarno. Topljivost vodika u taljevini ovisi o temperaturi i karakterizira ju velik skok topljivosti pri temperaturi skrućivanja. Vodik koji se sa sniženjem temperature u talini oslobađa u molekularnom obliku uzrokuje nastanak mjehura. Kod legura aluminija silicij, bakar i cink smanjuju topljivost vodika, a magnezij i natrij povećavaju.

Vodena para uzrokuje nastanak mjehurastih uključaka u odljevku, odnosno najčešće na njegovoj površini (poroznost rubnih zona).

Kod visokotlačnog lijevanja plinska poroznost uglavnom nastaje zbog zarobljenog zraka tijekom punjenja kalupne šupljine, a u manjoj mjeri zbog izdavanje plinova otopljenih u taljevini tijekom skrućivanja.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

- b) rabiti nezauljene, neoksidirane i suhe uložne materijale tijekom taljenja. Sadržaj plina u uložnim materijalima treba biti što je moguće manji. Spriječiti apsorpciju plinova iz zraka ili pećne atmosfere tijekom taljenja,
- c) optimalno otpliniti taljevine aluminijskih, bakrenih i čeličnih ljevova,
- d) po mogućnosti povišati temperaturu i brzinu lijevanja. Kod nesusenih pješčanih kalupa to zahtijeva osobit oprez jer velike brzine lijevanja, a samim tim i prejak udar taljevine o stijenku kalupa mogu izazvati eksplozivno nastajanje vodene pare,
- e) povećati propusnost kalupnog materijala za plinove,
- f) smanjiti sadržaj vlage u kalupnoj i jezgrenoj mješavini,
- g) smanjiti količinu veziva u jezgrenoj i kalupnoj mješavini,
- h) spriječiti skupljanje vlage na hladilima. Hladila prije sastavljanja kalupa zagrijati,
- i) ljevarske lonce i alate treba osušiti i prethodno zagrijati,

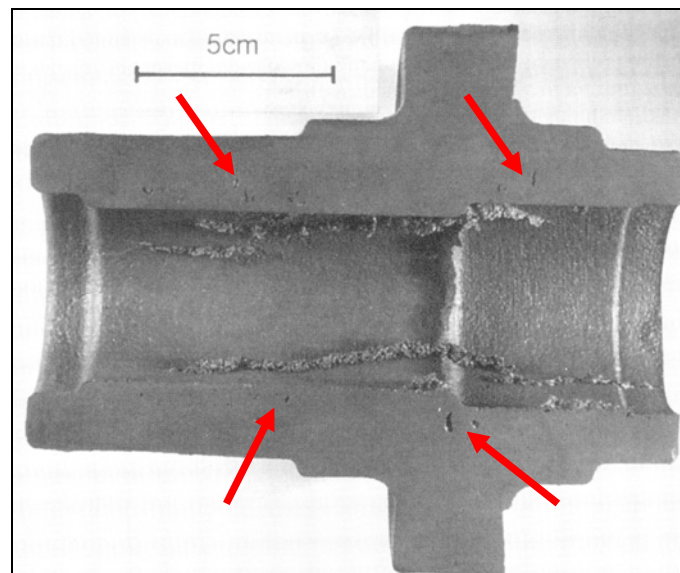
j) kod kokilnog i visokotlačnog lijevanja:

- provjeriti odzračivanje kokila, otplinjavanje i obradbu taljevine,
- provjeriti ušća i razvodnike i eventualno ih povećati,
- pravilno premazati kokile (predebeli premazi usporavaju skrućivanje i prema tome pogoduju nastanku plinske poroznosti),
- povećati tlak lijevanja i pravilno podesiti tijekom hidrauličkih faza tijekom punjenja kalupa,,
- neizbježne promjene smjera u uljevnom sustavu izvesti s dovoljno velikim radijusima,
- izbjegavati „prijeskočni val“ manjom brzinom klipa u prvoj fazi tlačenja,
- osigurati dovoljnu ispunjenost uljevne komore prije zaleta stapa,
- povećati volumen preljeva.

#### 5.4 Uske šupljine u odljevku u obliku pukotina nastale zbog plinova

##### *Opis*

Sitne tanke šupljine u obliku pukotina ili pravilno oblikovane šupljine u obliku zarezu neposredno ispod površine odljevka, okomite na površinu odljevka (slika 5.11). Moguća dubina do 2 cm. U ljevačkoj praksi nazivaju se i raspršene mikrousahline. Površina im nije sjajna kao kod plinskih pora, već je prekrivena dendritima. U segmentima (presjecima) iza tih grešaka odljevci su potpuno kompaktni. Djeluju štetno ako su prisutne u određenim segmentima odljevka koji moraju biti nepropusni. Nepovoljno utječu na dinamičku čvrstoću odljevka.



Slika 5.11. Uske šupljine u obliku pukotina u odljevku od sivog lijeva, jezgra nije premazivana

Uglavnom se pojavljuju kod odljevaka od sivog lijeva. Mogu se pojaviti i kod odljevaka od nodularnog i čeličnog lijeva. Ova greška i plinske pore srodne su obzirom na uzrok nastanka, pa se zbog toga često zajedno pojavljuju.

Mogu se pojaviti kako uz kalupne površine i rubove tako i uz jezgrene površine, prvenstveno na odljevcima velikih ploha.

Na stvaranje ove greške utječe brzina skrućivanja, tako da su ugrožene samo određene stijenke, obično one srednje debljine.

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Uzrok nastanka ove greške je prisutnost dušika u plinovima koji se izdvajaju tijekom skrućivanja. Istodobno izdvajanje vodika ovu grešku još pojačava. Izgled ove greške u obliku pukotine može se objasniti time što se dušik izdvaja tek kasnije tijekom skrućivanja kad već postoji velik broj dendrita, pa tako nastaje duguljasta šupljina dendritne površine umjesto kuglastih plinskih pora. Uske šupljine u obliku pukotina u odljevku od sivog lijeva obično nastaju ako je sadržaj dušika u njemu  $> 95\text{ppm}$ .

Legirajući elementi utječu na topljivost dušika u željezu. Vanadij i krom povećavaju topljivost, a silicij i ugljik smanjuju.

Struktura uložnog materijala također utječe na sadržaj dušika u sivom lijevu. Visok udio čeličnog otpada u uložnom materijalu može znatno povećati udio dušika u taljevini. Osim toga, uobičajena sredstva za naugljičenje sadrže određeni udio dušika.

Važan utjecaj ima i apsorpcija dušika iz kalupnih i jezgrenih veziva. Pri uporabi kalupnih materijala vezanih bentonitom može se udio dušika dodatno povećati unošenjem sredstava koja stvaraju sjajni ugljik te jezgrenim ostacima od umjetne smole. Veziva za hladno otvrdnjavanje (furanska smola), ali i ona za vruće otvrdnjavanje, npr. jezgre koje se proizvode Croningovim postupkom, često sadrže visok udio dušika.

Iz pješćanih kalupa s prevelikom udjelom vlage i bentonita talina će apsorbirati više plina, što također može prouzročiti nastanak raspršenih mikrousahlina.

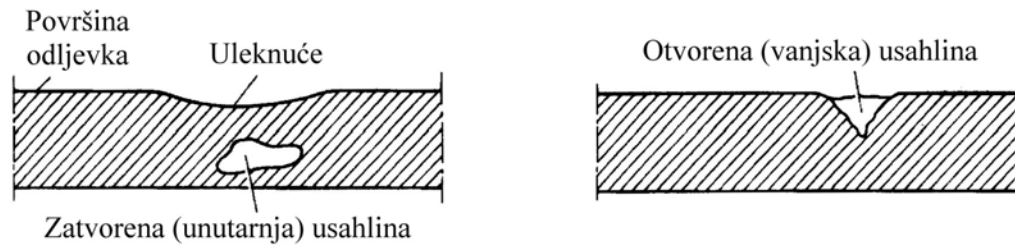
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) kontrolirati sadržaj dušika u taljevini i sniziti ga ispod 95ppm,
- b) povisiti stupanj zasićenja sivog lijeva. Dodatkom Ti vezati dušik u titanijski karbonitrid. Aluminij je također prikladan za vezanje dušika. Kod nodularnog lijeva obratiti pažnju pri dodatku Al i Ti zbog njihovog utjecaja na oblik izlučenog grafita,
- c) smanjiti udio čelika u uložnom materijalu,
- d) koristiti sredstva za naugljičenje s malim sadržajem dušika,
- e) povisiti temperaturu lijevanja te skratiti vrijeme i putove lijevanja radi sprječavanja apsorpcije plina,
- f) optimizirati udio veziva na bazi umjetnih smola za kalupe i jezgre i rabiti veziva siromašna dušikom,
- g) smanjiti udio sredstava koja stvaraju sjajni ugljik i rabiti sredstva koja stvaraju sjajni ugljik s malim sadržajem dušika,
- h) kontrolirati sadržaj dušika u regeneriranom pijesku,
- i) smanjiti na minimum udio vode i bentonita u kalupnom materijalu.

## 5.5 Usahline

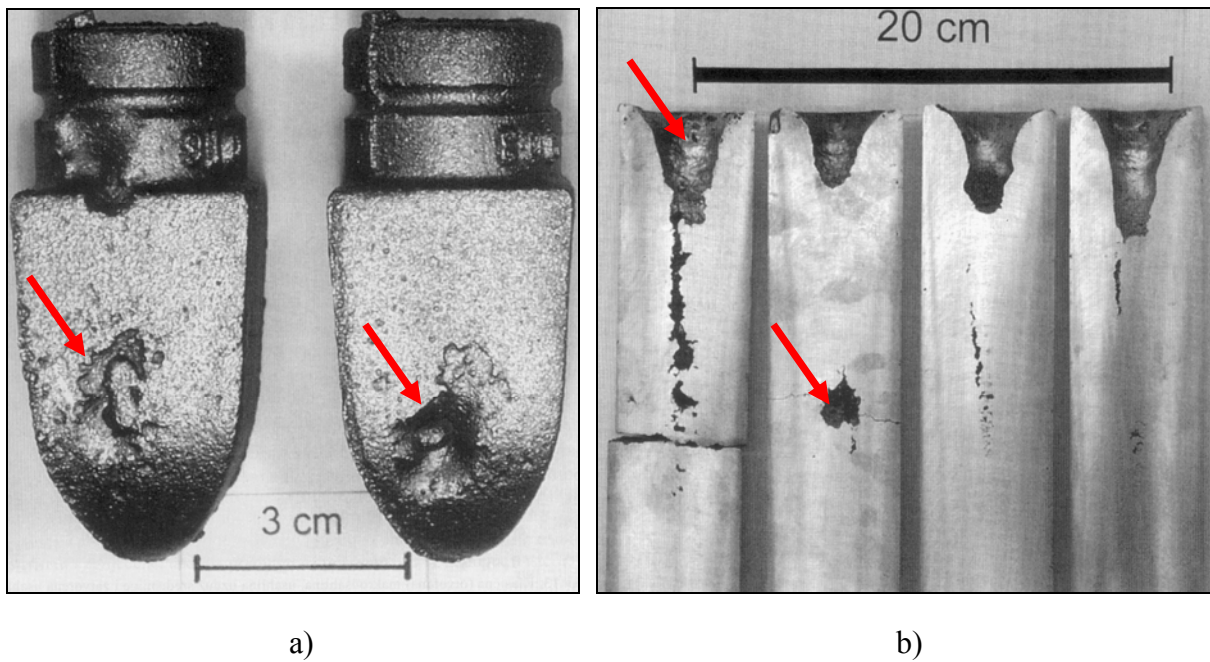
### Opis

Prema obliku u kojem se makrouсахline pojavljuju, razlikuju se zatvorene (unutarnje) usahline, otvorene (vanjske) usahline i uleknuća (slika 5.12).



Slika 5.12. Pojavni oblici makrouсахlina

Vanjske usahline su duboke, simetrično oblikovane šupljine koje su uglavnom prema van otvorene u obliku lijevka, a prema unutra se dijelom nastavljaju u obliku zatvorenih šupljina (slika 5.13). Stijenke šupljina većinom su hrapave, često dendritne. Jasno su vidljive golim okom. Pojavljuju se uglavnom u gornjim područjima odljevka koja se najkasnije skrućuju te u debelostjenim područjima odljevka.

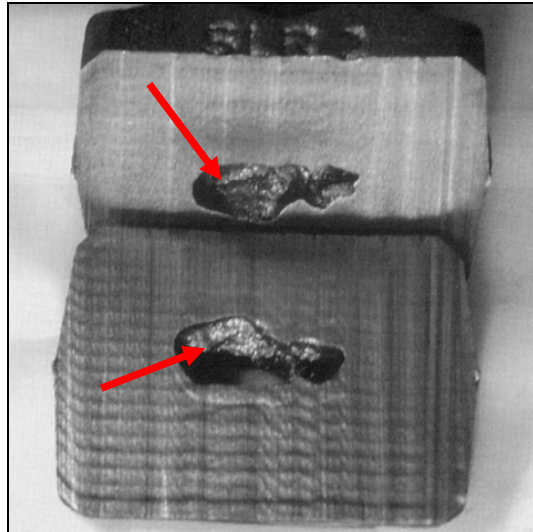


Slika 5.13. a) vanjske usahline na odljercima od sivog lijeva, b) vanjske i unutarnje usahline na uzdužnom presjeku palica od kositrene legure

Unutarnje usahline nalaze se u unutrašnjosti odljevka i ne prodiru van (slika 5.14). Nepravilnog su oblika, hrapavih stijenki, često okružene dendritima, a postaju vidljive pri nerazornom ispitivanju ili najkasnije pri mehaničkoj obradi. Obično se pojavljuju u većim debelostjenim područjima i na masivnijim debljinskim prijelazima stijenki.

Uleknuća su koritasta udubljenja na površini odljevka u području većih koncentracija materijala, pri čemu se površina uleknuća ne razlikuje od one na preostalom odljevku. Mogu

se uočiti golim okom. Pojavljuju na prijelazima poprečnih presjeka i vanjskim površinama relativno debelostjenih odljevaka, često zajedno s mikroporoznošću.



Slika 5.14. Unutarnja usahlina u odljevku od sivog lijeva (uzdužni presjek)

Do tvorbe usahlina dolazi kod svih tehničkih ljevarskih legura, nezavisno od postupka kalupljenja ili lijevanja. Konvencionalno visokotlačno lijevanje omogućuje sprječavanje nastanka, odnosno svođenje usahlina na najmanju mjeru povišenjem konačnog tlaka odmah u nastavku punjenja kalupne šupljine. Međutim, time se ne sprječava plinska poroznost.

Ako se ljevarskim mjerama (usmjerenom skrućivanje, napajanje) usahlina ne uspije premjestiti u područje izvan odljevka, ona uzrokuje škartiranje odljevka.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Specifični volumen uobičajenih ljevarskih legura u rastaljenom stanju veći je nego u krutom stanju. Zbog toga se te legure tijekom skrućivanja i hlađenja u kalupu stežu (skupljaju). Pri tome se javlja volumni manjak. Zbog smanjenja volumena, na mjestu koje zadnje skrućuje u odljevku nastaje usahlina ili lunker (šupljina). Da bi se izbjegla prisutnost ove greške u odljevku, očito je da se tijekom skrućivanja odljevka mora kompenzirati manjak taljevine dotok taljevine iz vanjskog priljevnog dijela koji se naziva pojilo ili hranitelj.

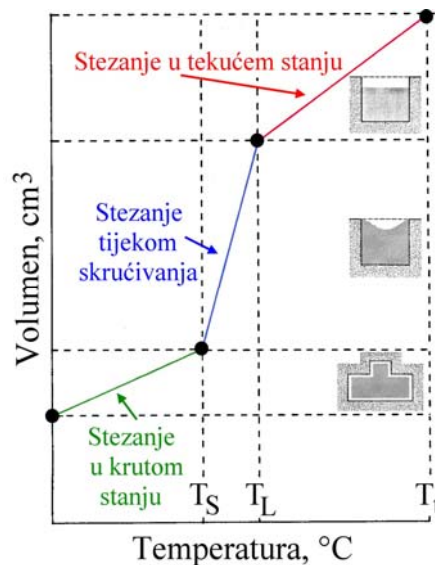
Kod većine ljevarskih legura razlikuju se tri područja volumnih promjena u odljevku koje se dešavaju tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima nakon završetka ulijevanja u kalupnu šuplinu do sobne temperature (slika 5.15):

- *stezanje u tekućem stanju*, odnosno smanjenje volumena taljevine tijekom hlađenja od temperature koju taljevina ima u kalupu nakon završetka ulijevanja do likvidus temperature tj. početka skrućivanja,
- *stezanje tijekom skrućivanja*, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja od likvidus do solidus temperature,
- *stezanje u krutom stanju*, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja odljevka od solidus temperature do sobne temperature.

Stezanje u tekućem stanju (u literaturi se često naziva primarno stezanje) ovisi o vrsti legure i visini pregrijanja taljevine.



Tijekom skrućivanja dolazi do fazne pretvorbe tekuće → kruto, odnosno prijelaza iz stanja manje gustoće u stanje veće gustoće, što u konačnici rezultira smanjenjem volumena (stezanjem). Stezanje tijekom skrućivanja u literaturi se često naziva sekundarno stezanje. Kod čistih metala ovo smanjenje volumena pojavljuje se kod određene temperature, dok se kod legura odvija u temperaturnom intervalu ili intervalu skrućivanja (od likvidus do solidus temperature).



Slika 5.15. Shematski prikaz tipične krivulje volumnih promjena kod većine ljevarskih legura (osim sivih željeznih ljevova).  $T_t$  – temperatura taljevine u kalupu nakon završetka ulijevanja,  $T_L$  – likvidus temperatura,  $T_S$  – solidus temperatura

U tablici 5.1 prikazane su vrijednosti volumnog stezanja tijekom skrućivanja za različite ljevarske legure.

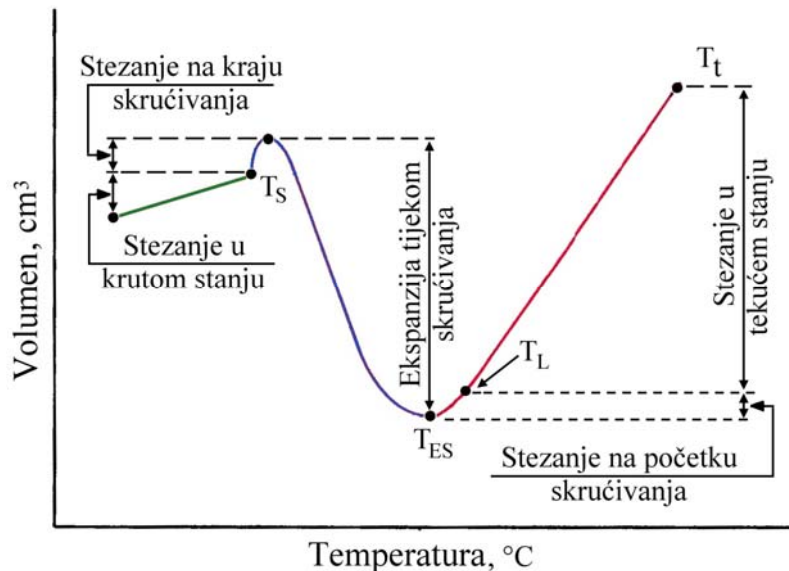
Tablica 5.1. Volumno stezanje (kontrakcija) tijekom skrućivanja za nekoliko ljevarskih legura

Materijal	Stežanje tijekom skrućivanja, vol. %
Ugljični čelik	2,5 – 3,0
Ugljični čelik sa 1% C	4,0
Bijeli željezni lijev	4,0 – 5,5
Sivi lijev	Od 1,6 kontrakcije do 2,5 ekspanzije
Nodularni lijev	Od 2,7 kontrakcije do 4,5 ekspanzije
Cu	4,9
Cu-30Zn	4,5
Cu-10Al	4,0
Al	6,6
Al-4,5Cu	6,3
Al-12Si	3,8
Mg	4,2
Zn	6,5

Sivi željezni ljevovi ili željezni ljevovi s grafitom pokazuju znatno kompleksnije ponašanje glede volumnih promjena tijekom skrućivanja i hlađenja. Željezni ljevovi s

grafitom skrućuju eutektičkom reakcijom. Tijekom eutektičkog skrućivanja (reakcije) dolazi do pretvorbe taljevine (L) u dvije krute faze: austenit ( $\gamma$ ) i grafit ( $L \rightarrow \gamma + \text{grafit}$ ).

Kod podeutektičkih željeznih ljevova s grafitom (ekvivalent ugljika (CE) < 4,3) prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja je austenit, zbog čega na početku skrućivanja dolazi do stezanja (slika 5.16). Kada se tijekom daljnjeg hlađenja dostigne temperatura početka eutektičkog skrućivanja (reakcije) ( $T_{ES}$ ) dolazi do izlučivanja grafita. Grafit ima značajno manju gustoću ( $2,2 \text{ g/cm}^3$ ) u odnosu na taljevinu ( $\sim 7,0 \text{ g/cm}^3$ ). Zbog razlike u gustoćama, tijekom izlučivanja grafita dolazi do porasta volumena, odnosno ekspanzije (slika 5.16).



Slika 5.16. Shematski prikaz volumnih promjena u podeutektičkim (CE < 4,3) sivim željeznim ljevovima od temperature koju taljevina ima u kalupnoj šupljini nakon završetka ulijevanja ( $T_t$ ) do sobne temperature.  $T_L$  – likvidus temperatura  $T_{ES}$  – temperatura početka eutektičkog skrućivanja,  $T_S$  – solidus temperatura

Ako je sivi, vermikularni ili nodularni lijev (željezni ljevovi s grafitom) eutektičkog (CE = 4,3) sastava ( $T_L = T_{ES}$ ) odmah na početku skrućivanja započinje eutektička reakcija i izlučivanje grafita te dolazi do porasta volumena.

Kod nadeutektičkih željeznih ljevova s grafitom (CE > 4,3) prva faza koja se izlučuje na početku skrućivanja je grafit, zbog čega odmah dolazi do porasta volumena. Iz navedenih razloga kod eutektičkih i nadeutektičkih željeznih ljevova s grafitom izostaje smanjenje volumena (stezanje) na početku skrućivanja karakteristično za podeutektičke željezne ljevove s grafitom.

Praktični rezultati pokazuju da se pravilnom kontrolom metalurških i kaluparskih uvjeta ekspanzija može upotrijebiti za smanjenje veličine pojila, pa čak i za eliminaciju pojila (stezanje u tekućem stanju (primarno stezanje) kompenzira se dotokom taljevine iz uljevnog sustava). Stezanje na kraju skrućivanja javlja se zbog nedovoljne količine izlučenog grafita na kraju skrućivanja, odnosno nedovoljne ekspanzije da bi se kompenziralo stezanje austenita (primarnog i eutektičkog).

Volumne promjene, odnosno stezanje u tekućem stanju i stezanje tijekom skrućivanja potrebno je kompenzirati napajanjem odljevka. U protivnom nastaju vanjske i/ili unutarnje usahline u odljevku.

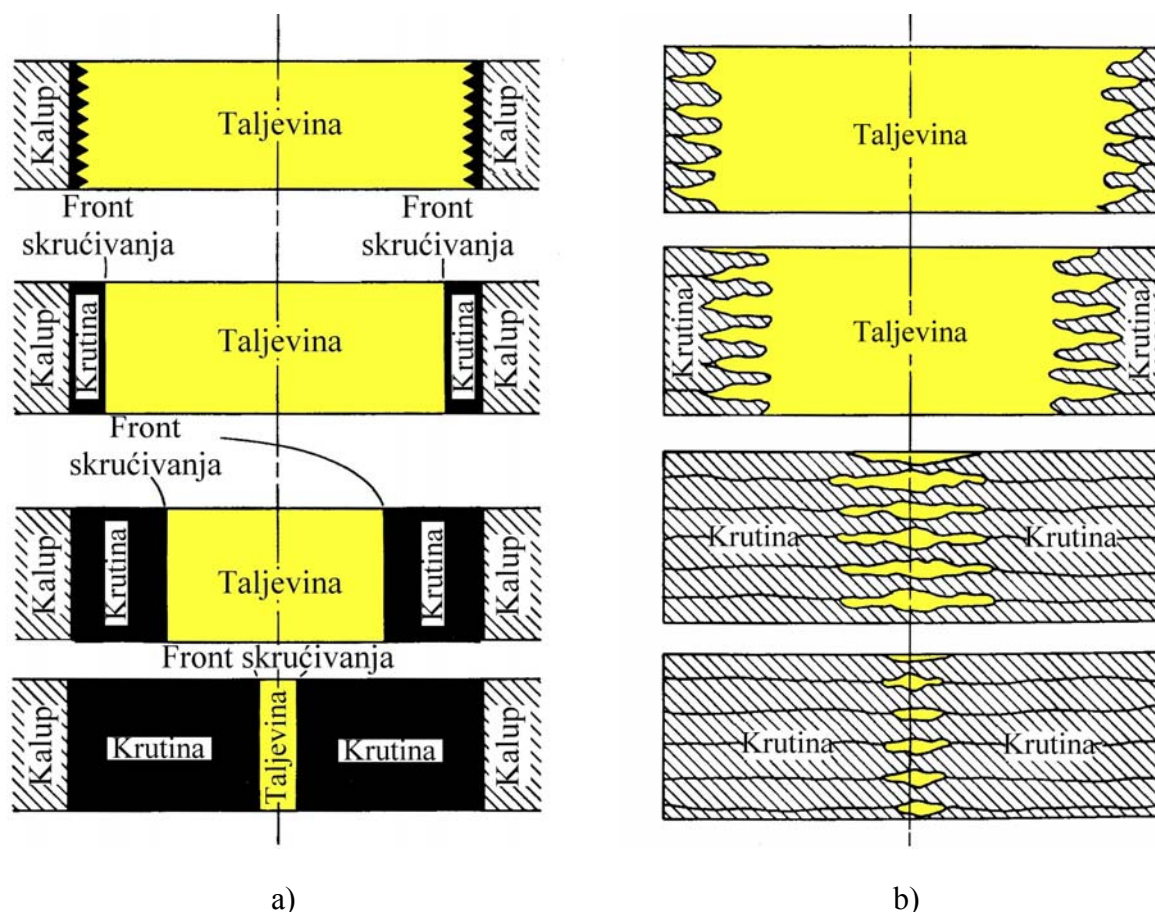
Za pravilno određivanje položaja pojila potrebno je primijeniti koncept *usmjerenog skrućivanja*. Usahline u odljevku mogu se izbjeći ako se skrućivanje odvija usmjerenom od točki koje su najudaljenije od pojila ka pojilu. Usmjerenim skrućivanjem postiže se

skrućivanje od tanjih prema debljim presjecima odljevka i na kraju prema pojilu koje mora posljednje skrutnuti. Navedeni uvjet predstavlja garanciju da je kanal napajanja uvijek otvoren i da postoji pravilan temperaturni gradijent u smjeru pojila. U tom se slučaju stezanje u tekućem stanju i stezanje tijekom skrućivanja odljevka kompenzira dotokom taljevine iz pojila. Mogućnost da se postigne usmjereno skrućivanje ovisi o: leguri i njenom načinu skrućivanja, kalupnom materijalu i konstrukciji odljevka.

Mogućnost postizanja i održavanja usmjerenog skrućivanja ovisi u velikoj mjeri o načinu skrućivanja legure. Obzirom na interval skrućivanja, legure se mogu klasificirati u tri skupine:

- legure sa uskim intervalom skrućivanja: temperaturni interval od likvidus do solidus temperature je  $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- legure sa srednjim intervalom skrućivanja: temperaturni interval od likvidus do solidus temperature kreće se od  $50 - 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- legure sa širokim intervalom skrućivanja: temperaturni interval od likvidus do solidus temperature je  $> 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Kod čistih metala interval skrućivanja približava se nuli (slika 5.17a). Skrućujuće stjenke odljevka napreduju ka unutrašnjosti odljevka kao ravna, glatka fronta.

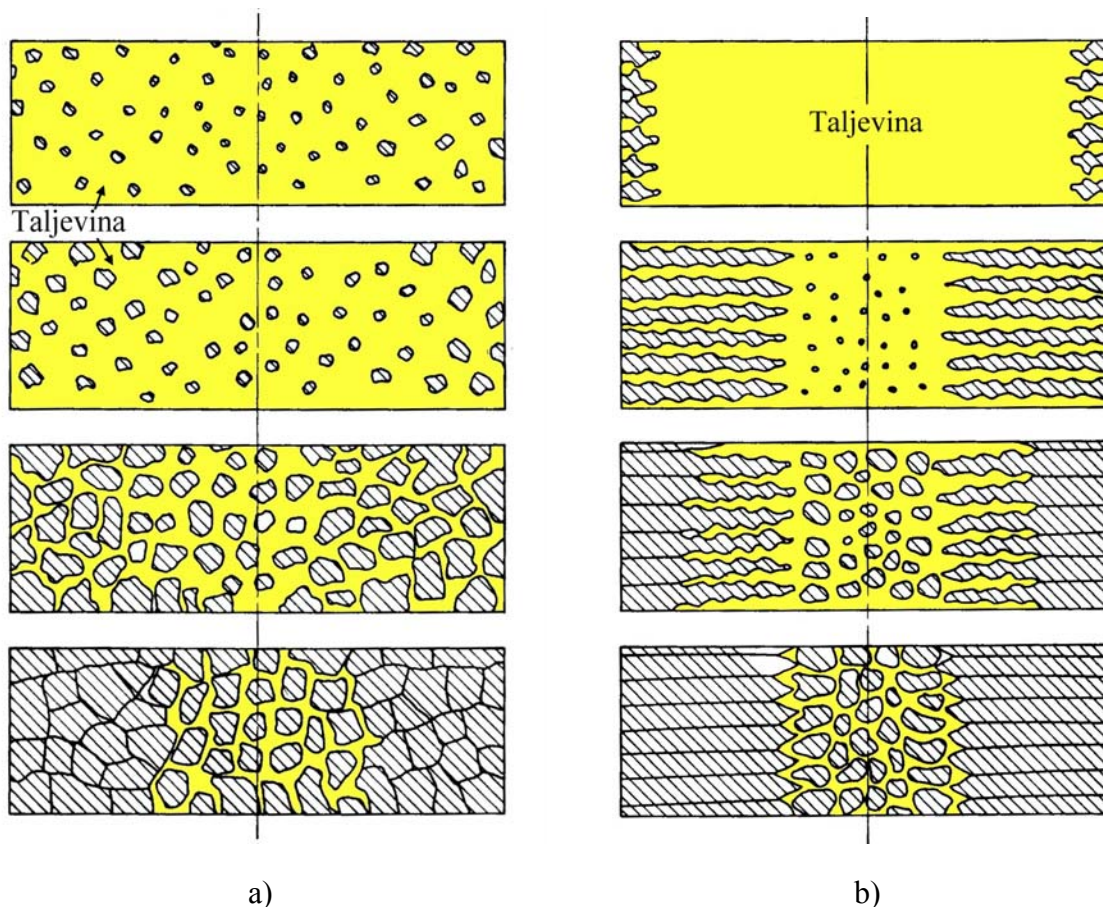


Slika 5.17. a) shematski prikaz načina skrućivanja čistih metala. Kristalizacija započinje na stjenkama kalupa i napreduje u unutrašnjost odljevka s ravnim ili glatkim frontom skrućivanja, b) shematski prikaz načina skrućivanja legura sa uskim intervalom skrućivanja



*Legure sa uskim intervalom skrućivanja* (slika 5.17b) pokazuju snažnu tendenciju ka stvaranju kore. Kristalni frontovi (fronte) skrućuju ka unutrašnjosti i ne napreduju znatno brže od svojih osnova. Pri tome front skrućivanja neće biti gladak kao kod čistih metala, već hrapav i nepravilan. Takav relativno kratak kristalinični rast potpomaže održavanje kontakta između taljevine i svih površina koje skrućuju. Ovakvo snažno progresivno skrućivanje u legurama sa uskim intervalom skrućivanja promovira nastanak usmjerenog skrućivanja kod odgovarajućeg temperaturnog gradijenta u skrućujućem odljevku. Npr. u ugljičnom čeliku, temperaturni gradijenti od samo 0,022 – 0,045 °C/mm u pločama i 0,135 – 0,269 °C/mm u šipkama dovoljni su da se dobiju odljevci bez usahlina uslijed stezanja tijekom usmjerenog skrućivanja.

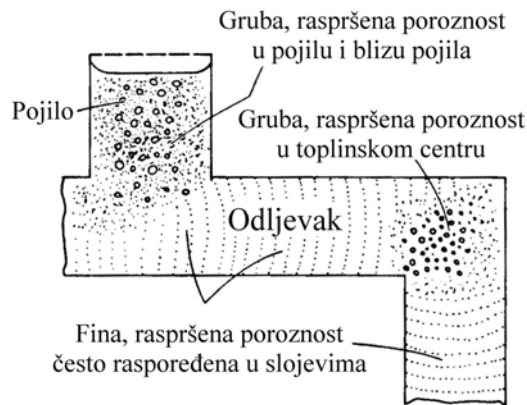
*Kod legura sa širokim intervalom skrućivanja* (slika 5.18a) otežan je razvoj usmjerenog skrućivanja. Iako na početku skrućivanja može nastati tanka kora na stjenkama kalupa, skrućivanje se ne odvija progresivno ka unutrašnjosti odljevka, već nasumično preko cijelog volumena odljevka. Ovakav kašasti način skrućivanja rezultira nastankom velikog broja malih kanala tekućeg metala u kasnijim fazama skrućivanja. Napajanje putem tih kanala je ograničeno, zbog čega se uslijed stezanja, preko cijelog odljevka, javlja raspršena poroznost. Ovakav način skrućivanja tipičan je za mnoge komercijalne legure na bazi bakra, s tim da je napajanje dodatno otežano zbog visoke toplinske vodljivosti ovih legura, što potpomaže održavanju gotovo jednolične temperature kroz cijeli skrućujući odljevak. Da bi se promoviralo usmjerenog skrućivanje, kod tih legura potrebno je ostvariti temperaturni gradijent od 1,46 °C/mm. Ovakav temperaturni gradijent obično se postiže ostrim hlađenjem jednog dijela skrućujućeg odljevka.



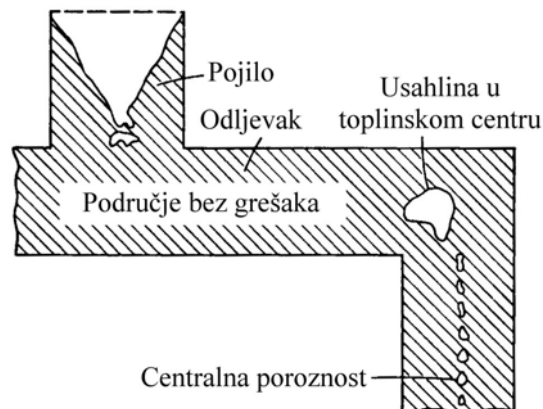
Slika 5.18. a) shematski prikaz načina skrućivanja legura sa širokim intervalom skrućivanja, b) shematski prikaz načina skrućivanja legura sa srednjim intervalom skrućivanja

Kod legura sa srednjim intervalom skrućivanja (slika 5.18b) prisutna je kombinacija načina skrućivanja legura sa uskim i širokim intervalom skrućivanja (stvaranje kore uz stjenke kalupa i kašasto skrućivanje u središnjem dijelu odljevka). Ovakav način skrućivanja zapažen je kod čeličnih odljevaka.

Različiti načini skrućivanja rezultiraju znatno različitim konfiguracijama nastalih grešaka uslijed stezanja u odljevku i pojilu (slika 5.19) i predstavljaju različite probleme koje tehnolog treba prevladati dizajniranjem i napajanjem odljevka. Odabir pogodnih metoda ovisi u velikoj mjeri o mogućnosti ostvarivanja usmjerenog skrućivanja.



a)



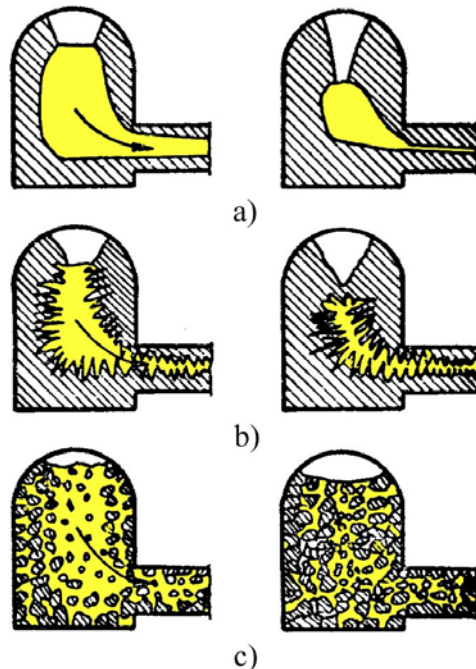
b)

Slika 5.19. a) nastanak poroznosti uslijed stezanja u odljercima lijevanim od legura koje skrućuju na kašast način (legure sa širokim intervalom skrućivanja) u kalupe od svježe kalupne mješavine, b) šupljine (usahline) u odljercima lijevanim od legura koje su sklone stvaranju kore (legure sa uskim intervalom skrućivanja)

Kod odljevaka odlivenih od legura sa širokim intervalom skrućivanja (slika 5.19a) javiti će se gruba raspršena poroznost u pojilu i toplinskom centru odljevka (spoj dvaju presjeka) te fina raspršena poroznost koja se u odljevku pojavljuje u odgovarajućim slojevima.

Kod odljevaka odlivenih od legura sa uskim intervalom skrućivanja (slika 5.19b) pojaviti će se velika usahlina u pojilu te usahlina u toplinskom centru odljevka. Budući da nije ostvareno usmjerenog skrućivanje, javiti će se centralna poroznost karakteristična za progresivno skrućivanje.

Da li će pri usmjerenom skrućivanju napajanje odljevka biti neometano, otežano ili onemogućeno ovisi prije svega o morfologiji skrućivanja legure, odnosno mogućnosti transporta taljevine iz pojila u odljevak te mogućnosti transporta taljevine u samom odljevku (slika 5.20). Napajanje će biti otežano ako iz bilo kojeg razloga morfologija skrućivanja legure sprječava transport taljevine.



Slika 5.20. Utjecaj morfologije skrućivanja na mogućnost napajanja: a) glatka fronta skrućivanja – napajanje nije ometano, b) hrapava fronta skrućivanja – otežano napajanje, c) kašasto ili tjestasto skrućivanje – vrlo otežano napajanje

Sa slike 5.20a može se vidjeti da je kod skrućivanja s glatkom ili neznatno hrapavom frontom skrućivanja put napajanja gotovo neometan. Pri skrućivanju s hrapavom frontom (slika 5.20b) u početnoj fazi napajanja taljevina relativno dobro teče. Napajanje postaje sve teže i teže kako se približava završetak skrućivanja, jer dolazi do međusobnog kontakta kristala u centru odljevka. Pojedini segmenti taljevine postaju odvojeni od ostatka taljevine i u unutrašnjosti odljevka nastaju mikrousađine. Posebno je otežano napajanje kod tzv. spužvastog skrućivanja, kada štapićasti kristali (dendriti) u taljevini u obliku mrežastog kostura, posebno pri kraju skrućivanja, gotovo onemogućuju napajanje, što rezultira nastankom mikrousađina u odljevku.

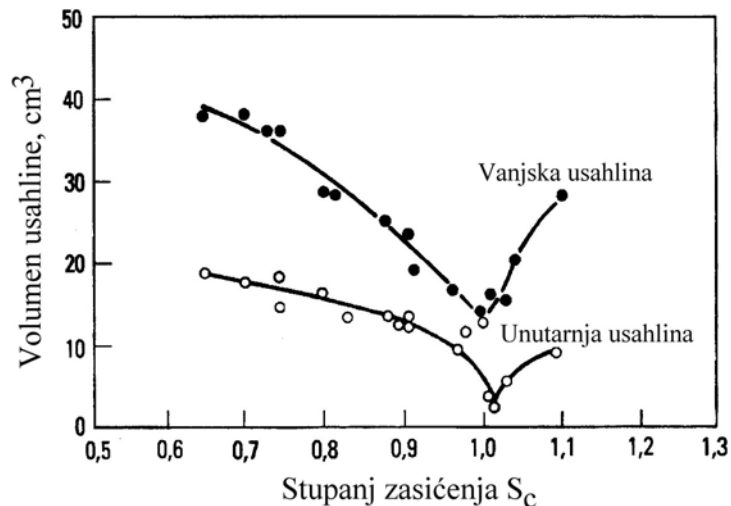
Kašasto skrućivanje (slika 5.20c) u odljevku poseban je primjer kada se odljevak ne napaja samo taljevinom, već smjesom taljevine i krutine, tj. kašastom fazom. Napajanje odljevaka značajno se otežava kada kristali toliko narastu da se međusobno počnu dodirivati. Kada više nije moguće gibanje kašaste, odnosno tjestaste faze, zaustavlja se u potpunosti napajanje odljevka. Ovakav način napajanja smjesom taljevine i kristala tipičan je za odljevke od bronce.

Za optimalno napajanje odljevka potrebno je osigurati neometan tok taljevine ili kašaste faze u unutrašnjost odljevka te usmjerenom skrućivanje. Da bi se ostvarilo usmjerenom skrućivanje i dobili kompaktni odljevci potrebno je primijeniti sve tehnološke mogućnosti. Često se u cilju postizanja usmjerenog skrućivanja kombinira napajanje sa istovremenim hlađenjem pojedinih dijelova odljevka, odabire najpovoljniji način i mjesto ulijevanja taljevine te se provode konstrukcijski zahvati na odljevku. Izrazito efikasan način za

ostvarivanje usmjerenog skrućivanja je primjena rashladnih tijela (hladila) u kalupu. Osim što omogućuju usmjerenost skrućivanja, hladila mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka i na taj način potpomažu njegovo napajanje.

Uljevni sustav mora biti tako konstruiran da taljevina dotječe u kalup na mjestu koje posljednje skrućuje. Zbog toga se odljevci često lijevaju kroz pojila, odnosno taljevina prije no što uđe u kalupnu šupljinu prolazi kroz pojilo.

Skлонost ka tvorbi usahlina kod sivog lijeva smanjuje se s povećanjem stupnja zasićenja, odnosno ekvivalenta ugljika do eutektičke točke. U nadeutektičkom području ponovo raste sklonost ka tvorbi usahlina (slika 5.21).



Slika 5.21. Ovisnost volumena usahlina o stupnju zasićenja kod sivog lijeva

Cijepljenjem sivog lijeva može se povećati sklonost ka tvorbi usahlina, poroznosti i uleknuća. U cijepljenom sivom lijevju zbog veće količine izlučenog eutektičkog grafitu tijekom skrućivanja javlja se povećana ekspanzija i s tim moguće povećanje dimenzija kalupne šupljine.

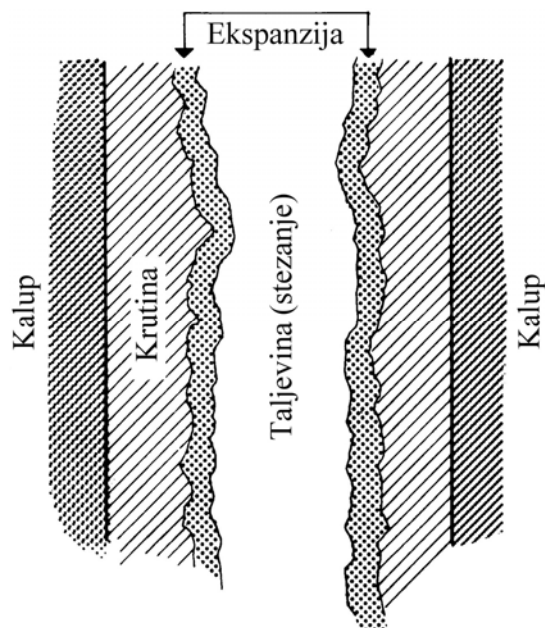
Nodularni lijev ima veću sklonost ka stvaranju usahlina od sivog lijeva jer se kod nodularnog lijeva odvija kašasto skrućivanje, a sivi lijev skrućuje uz tvorbu kore.

Morfologija skrućivanja sivog lijeva leži između morfologije skrućivanja nodularnog lijeva i čelika. U usporedbi s nodularnim lijevom, skrućivanje sivog lijeva odvija se u dužem vremenskom intervalu, što je posljedica različitih morfologija skrućivanja.

Sivi lijev ima bolju toplinsku vodljivost od nodularnog lijeva, zbog čega nastaje deblja kruta kora uz stjenke kalupne šupljine. To rezultira smanjenjem brzine odvođenja topline i omogućuje prisustvo pregrijane taljevine unutar kalupne šupljine uz čije stjenke je nastala kruta kora. Kod nodularnog lijeva nastaje tanja kruta kora uz stjenke kalupa nego kod sivog lijeva, što omogućuje brže smanjenje temperature taljevine unutar odljevka (kalupne šupljine) nego u slučaju sivog lijeva. To znači da sivi lijev skrućuje na slojevit način (slika 5.22) jer se oslobođena toplina mora transportirati kroz postojeći kruti sloj koji postaje sve deblji tijekom daljnjeg skrućivanja.

Upravo ovakav način skrućivanja omogućuje lakše napajanje odljevaka od sivog lijeva, odnosno lakšu proizvodnju ispravnih odljevaka u odnosu na proizvodnju odljevaka od nodularnog lijeva. Početak skrućivanja nodularnog lijeva je odgođen dok sva taljevina ne dostigne likvidus temperaturu i u tom trenutku skrućivanje se odvija kroz čitav odljevak. Zbog toga je brzina skrućivanja odljevaka od nodularnog lijeva veća od brzine skrućivanja odljevaka od sivog lijeva.





Slika 5.22. Napredovanje skrućivanja odljevka od sivog lijeva u kalupu

Kod centrifugalnog i visokotlačnog lijevanja značajno je smanjeno stvaranje usahlina u odnosu na lijevanje u pješčane kalupe. Pri tome treba se prisjetiti i utjecaja uvjeta hlađenja, koje ne treba zanemariti, posebno ako se uzmu u obzir kalupi koji jako dobro odvedu toplinu, kao što je slučaj s kokilnim, centrifugalnim i visokotlačnim lijevanjem.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

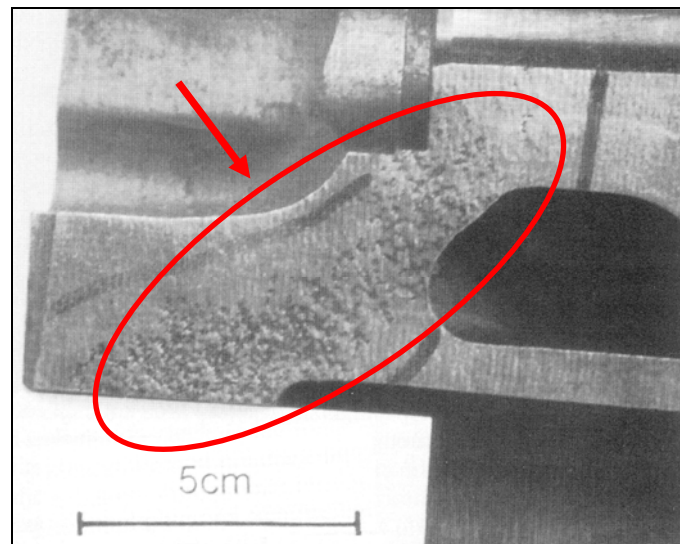
- a) osigurati usmjereno skrućivanje prema pojilima (usahline „premjestiti“ u pojila),
- b) pravilno iskoristiti ekspanziju tijekom skrućivanja, odnosno povećanje volumena zbog izlučivanja grafita u sivim željeznim ljevovima (željezni ljevovi s grafitom),
- c) pravilno dimenzionirati i postaviti pojila. Upotrijebiti programske pakete za simulaciju punjenja kalupa i skrućivanja,
- d) povećati efikasnost pojila primjenom izolacijskih i egzotermnih obloga,
- e) upotrijebiti hladila u cilju postizanja usmjerenog skrućivanja,
- f) pravilno konstruirati odljevak, odnosno optimizirati konstrukciju u cilju postizanja usmjerenog skrućivanja. Izbjegavati velike razlike u debljini stjenki odljevka i nagle prijelaze s debelih na tanke presjeke. Radijusi moraju biti dovoljno veliki,
- g) smanjiti ukupni volumni manjak sniženjem temperature lijevanja,
- h) optimizirati brzinu hlađenja pojedinih dijelova odljevka primjenom kalupnih materijala različite toplinske vodljivosti,
- i) ako je moguće, promijeniti sastav ljevarske legure u cilju smanjenja ukupnog volumnog manjka, tj. ekvivalent ugljika ne smije biti prenizak. Kod sivih željeznih ljevova treba težiti ka  $S_c = 1$ ,
- j) osigurati dovoljno visoku temperaturu lijevanja da bi pojila mogla pravilno funkcionirati,
- k) osigurati dovoljnu čvrstoću kalupa kod lijevanja odljevaka od sivih željeznih ljevova da bi se mogla iskoristiti ekspanzija tijekom skrućivanja zbog izlučivanja grafita za samonapajanje odljevka i na taj način smanjiti ili eventualno izbjeći potreba za napajanjem,

- l) optimizirati metaluršku kvalitetu i cijepljenje taljevina sivih željeznih ljevova,
- m) kontrolirati temperaturu i trajanje pregrijanja taljevine zbog njihovog utjecaja na nukleacijsko stanje, a tome i morfologiju skrućivanja,
- n) pravilno odabrati mjesto i dimenzije ušća. Ušće (ušća) postaviti na mjesta gdje protječe najtoplija taljevina,
- o) odabrati velika ušća i po mogućnosti ih dignuti što više.
- p) pri napajanju nastojati postići što veći tlak,
- q) provjeriti učinkovitost cijepjenja i modifikacije zrna kod aluminijskih legura,
- r) sniziti temperaturu kokile kod gravitacijskog lijevanja i kalupa kod visokotlačnog lijevanja,
- s) povećati tlak pri visokotlačnom lijevanju i provjeriti ispunjenost uljevne komore.

## 5.6 Mikroporoznost

### *Opis*

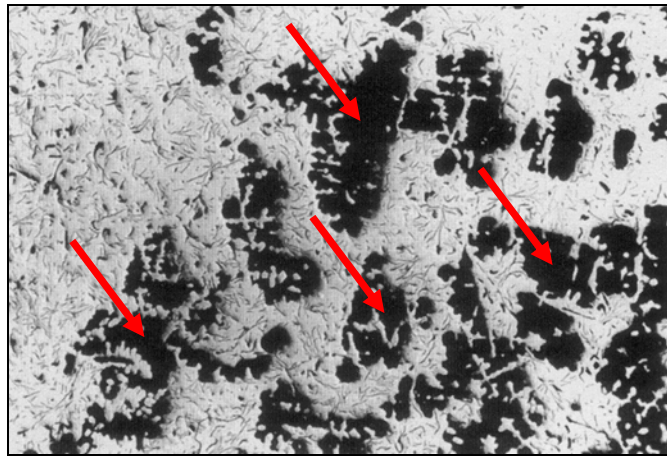
Spužvasta, rahla i porozna struktura koja nije uvijek uočljiva golim okom (slike 5.23 i 5.24). Najčešće se otkriva tek pri ispitivanju nepropusnosti odljevka te nakon strojne obrade. Nastale pore imaju hrapave unutarnje stijenke za razliku od plinske poroznosti (glatkostijene i sjajne unutarnje površine pora). Pojavljuje se na mjestima koja posljednja skrućuju (na mjestima velike koncentracije mase, na prijelazu s tanje na deblju stjenku, u blizini ušća itd.) ili ondje gdje su izbočeni dijelovi kalupa ili jezgre. Osim naziva mikroporoznost, za ovu grešku često se koristi i termin „mikrousahline“.



Slika 5.23. Mikroporoznost na glavi motora od sivog lijeva (HRN-EN-GJL-300). Kemijski sastav: C = 3,09%, Si = 2,58%, Cr = 0,59%, Mo = 0,55%. Greška je izbjegnuta promjenom kemijskog sastava na: C = 3,35%, Si = 1,90%, Cr = 0,40%, Mo = 0,30% i kasnim cijepljenjem s 0,15% FeSi75

Mikroporoznost se može pojaviti kod svih ljevarskih legura, bez obzira na postupak kalupljenja. Ovoj greški posebno su sklone legure sa širokim intervalom skrućivanja. Odljevci koje se proizvode u pješčanim kalupima i s pješčanim jezgrama podložniji su greškama, jer

dodatno može nastati plinska poroznost uzrokovana kalupnim materijalom. Osim toga, tijekom skrućivanja npr. odljevaka od sivih željeznih ljevova u pješčanim kalupima može doći do povećanja dimenzija kalupne šupljine, što također pridonosi sklonosti ka mikroporoznosti.



Slika 5.24. Mikroporoznost u odljevku od sivog lijeva, povećanje 10x, nenagrizen

Mikroporoznost je moguće otkriti metalografskom analizom. Točno određivanje pravih uzroka katkad je otežano zbog utjecaja većeg broja faktora koji su obično međusobno čvrsto povezani.

Da li i u kojoj mjeri mikroporoznost utječe na svojstva odljevaka pri mehaničkom opterećenju uglavnom ovisi o: veličini opterećenja, načinu opterećenja (statičko ili dinamičko, udarno, vlačno itd.), položaju mikroporoznosti obzirom na opterećenje i deformabilnosti materijala. Nepovoljan utjecaj mikroporoznosti pri dinamičkom opterećenju uvijek je veći nego pri statičkom, tako da je takva greška vrlo često uzrok škartiranja odljevaka, pri čemu je mjerodavan položaj mikroporoznosti obzirom na način opterećenja. Osim nepovoljnog utjecaja na mehanička svojstva, mikroporoznost nepovoljno utječe i na nepropusnost pod tlakom.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Podjela ukupnog volumnog manjka na makrousahline, uleknuća, linearno stezanje i mikroporoznost ovisi u velikoj mjeri o tijeku skrućivanja, na koje utječu kemijski sastav, nukleacijsko stanje, uvjeti tijekom hlađenja i skrućivanja te oblik odljevka.

Smanjenje volumena ljevarske legure tijekom hlađenja i skrućivanja, kao i samo kašasto skrućivanje, izdvajanje plina iz taljevine te naplinjenje iz kalupnog materijala mogu se smatrati glavnim uzrokom mikroporoznosti.

Ako se u toplinskim čvorištima odljevka, odnosno mjestima koja posljednja skrućuju u odljevku volumno stezanje ne može kompenzirati dotokom taljevine iz drugih područja odljevka ili pojila zbog npr. nepostojanja putova napajanja kojem može biti uzrok kašasto skrućivanje, nastaje mikroporoznost, odnosno mikrousahline. U mikrousahline dodatno mogu difundirati plinovi iz taljevine ili kalupa i time povećati mikroporoznost.

Pregrijana mjesta kalupa negativno utječu na nastanak mikroporoznosti. Ako se dio kalupa jako ugrije od okolne taljevine usporava se hlađenje taljevine u tom području u odnosu na susjedna područja, tako da ona može djelom otjecati u druga područja u odljevku koja su se prije počela skrućivati radi kompenzacije stezanja u njima.

Kod sivih željeznih ljevova potrebno je uzeti u obzir ekspanziju tijekom izlučivanja grafita i s tim povezano čvrstoću kalupa te nukleacijsko stanje taljevine. Npr. kod nodularnog lijeva prevelika količina grafita izlučena u ranoj fazi eutektičkog skrućivanja rezultira manjom količinom raspoloživog grafita tijekom daljnjeg skrućivanja. Zbog toga se stezanje primarnog i eutektičkog austenita na kraju skrućivanja ne može potpuno kompenzirati izlučivanjem grafita, što uzrokuje pojavu mikroporoznosti. Dotok taljevine iz pojila u posljednjoj fazi skrućivanja uvelike je ograničen zbog nepostojanja odgovarajućih putova napajanja. Osim toga, ako se u kratkom vremenu izluči velika količina grafita, zbog razlike u gustoći između precipitiranog grafita i taljevine može doći do značajne volumne ekspanzije i povećanja kalupne šupljine, što u konačnici rezultira pojavom mikroporoznosti.

Kod sivih željeznih ljevova mikroporoznost može nastati ako je prisutan visok sadržaj fosfora u lijevu. Stezanje fosfidnog eutektika je vrlo veliko, posebno u prisutnosti Mo i Cr, a napajanje nije moguće jer je za vrijeme stezanja fosfidnog eutektika odljevak već skrtnut okolnom području.

U aluminijskim legurama koje su lijevane gravitacijski u kokile (kokilni lijev) nastaje manji volumni manjak nego u aluminijskim legurama koje su lijevane gravitacijski u pješčane kalupe. To se odnosi i na mikroporoznost.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

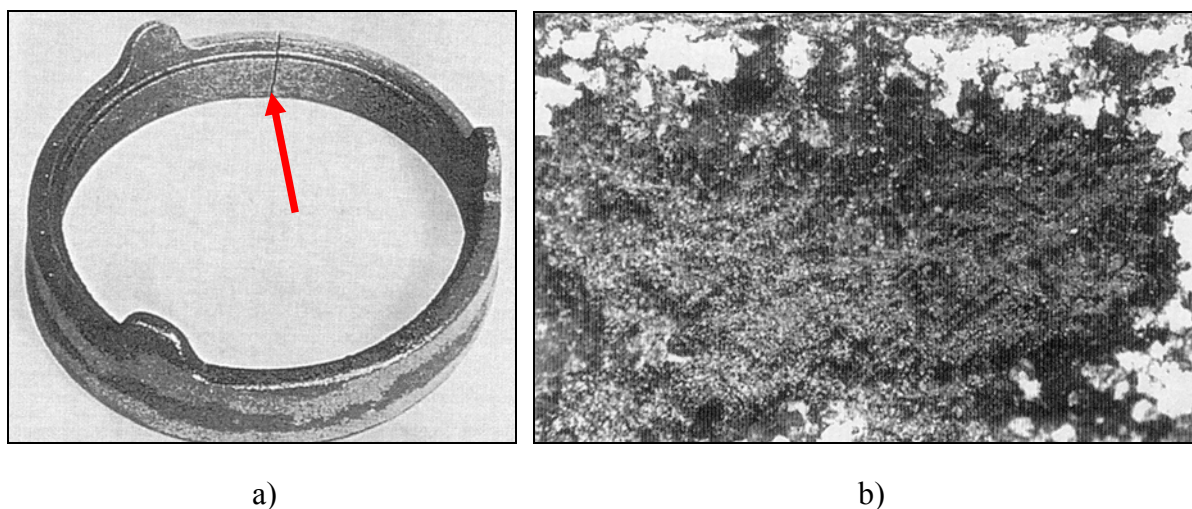
- a) smanjiti interval skrućivanja, rabiti sastav blizak eutektičkom i eventualno upotrijebiti drugu leguru,
- b) težiti ka usmjerenom skrućivanju,
- c) povećati sposobnost samonapajanja izlučivanjem veće količine eutektičkog grafita, odnosno poboljšati nukleacijski potencijal taljevine i optimizirati cijepljenje i kemijski sastav,
- d) stupanj zasićenja treba biti što veći, pri čemu kod sivog lijeva dopuštena gornja granica ovisi o zahtijevanoj vlačnoj čvrstoći,
- e) kod nodularnog lijeva također upotrijebiti što je moguće viši ekvivalent ugljika. Pri tome imati na umu da prevelika vrijednost ekvivalenta ugljika može rezultirati flotacijom grafita i prevelikom količinom primarnog grafita, što može rezultirati nedovoljnom količinom eutektičkog grafita,
- f) izbjeći previsoke sadržaje magnezija u nodularnom lijevu,
- g) osigurati što je moguće niži sadržaj elemenata koji stvaraju karbide (Cr, V, Ti itd.), jer oni nepovoljno utječu na grafitizaciju, a samim tim i samonapajanje,
- h) izbjegavati toplinska čvorišta i nagle promjene debljine stjenke,
- i) upotrijebiti hladila ili na osjetljivim mjestima primijeniti kalupne materijale s velikom sposobnošću odvođenja topline (kromitni i cirkonski pijesak),
- j) optimizirati konstrukciju odljevka da se spriječi nastanak toplinskih čvorišta,
- k) održavati što je moguće niži udio veziva i vode u kalupnim materijalima,
- l) osigurati dobru propusnost kalupnog materijala za plinove te jezgrene oduške,
- m) osigurati dovoljnu čvrstoću kalupa,
- n) optimizirati temperaturu i vrijeme lijevanja da se osigura jednolično napredovanje skrućivanja u odljevku,
- o) ograničiti sadržaj fosfora kod željeznih ljevova,
- p) povećati broj ušća,
- q) smanjiti sadržaj plinova u taljevini.

## 6. DISKONTINUITETI

### 6.1 Hladne pukotine

#### *Opis*

Hladna pukotina predstavlja jasno vidljiv diskontinuitet, odnosno rascjep osnovnog materijala (slika 6.1). Oštri rubovi ograničavaju dobru vidljivost loma, koji je uglavnom prisutan preko čitavog presjeka. Ne moraju nastajati isključivo u hladnom stanju. Obzirom na uzrok razlikuju se od toplih pukotina. Nastaju samo u krutom stanju, vidljive su golim okom i u pravilu uzrokuju škart odljevka. Mogu se pojaviti kod svih ljevarskih legura. Pojavljuju se bez obzira na postupak kalupljenja i lijevanja, obično na mjestima koja su izložena naprežanjima, najčešće u području manjih debljina stjenki, na rebrima i prečkama te u blizini ušća.



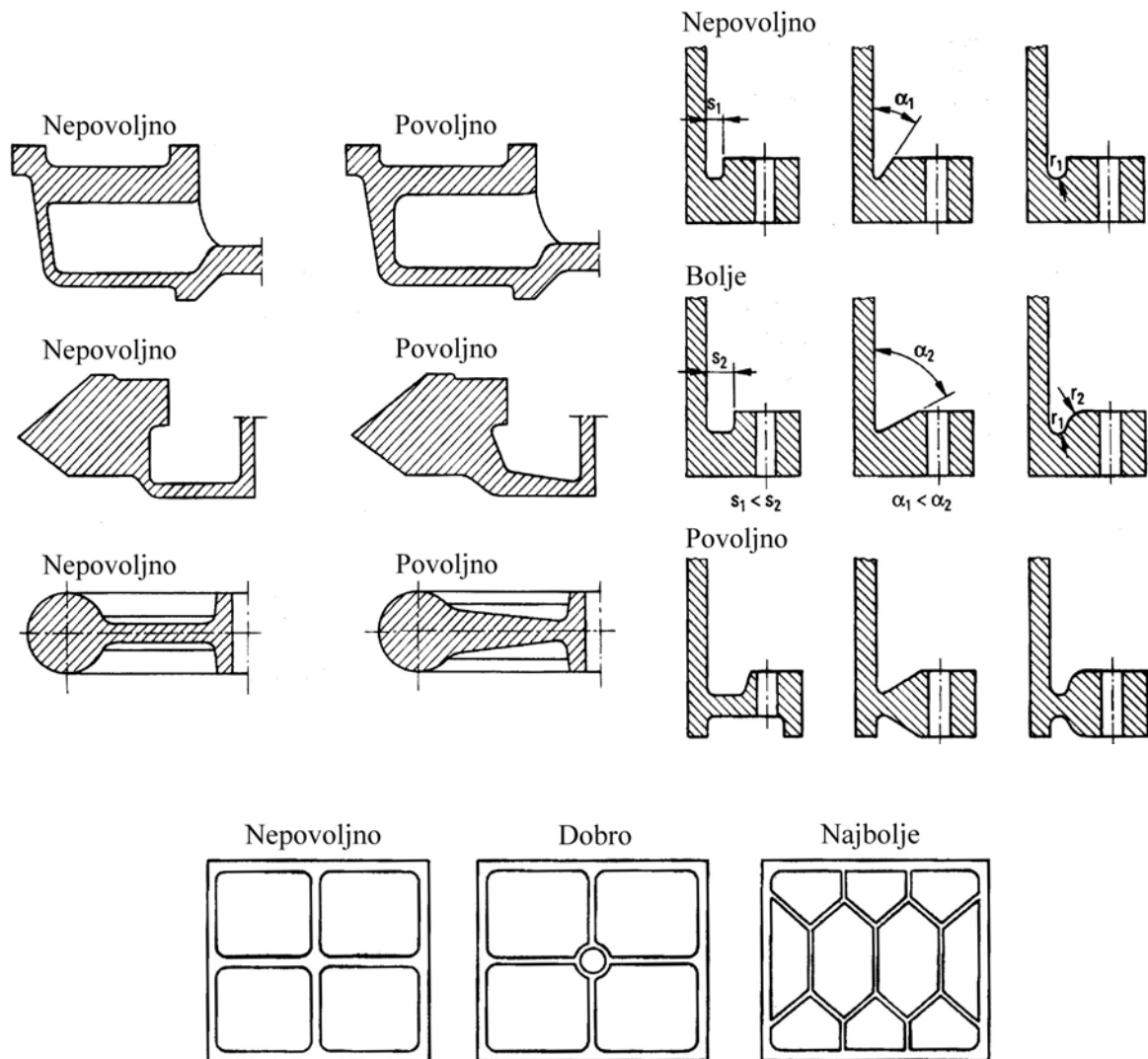
Slika 6.1. a) hladna pukotina na odljevku od sivog lijeva zbog ograničenog stezanja nakon skrućivanja, b) hrapava površina pukotine (dendriti usmjereni prema fronti skrućivanja), povećanje 15x

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Hladne pukotine nastaju kad naprežanja u odljevku postanu veća od čvrstoće materijala. U pravilu, kritična naprežanja u odljencima nastaju zbog sprječavanja stezanja materijala nakon skrućivanja, npr. zbog nepovoljne konstrukcije ili neprikladnog uljevnog sustava koji može stvoriti značajne razlike u brzini hlađenja, prekomjerno sabijenog kalupnog materijala te prečvrstih jezgri, ali i zbog nejednakih uvjeta hlađenja, npr. zbog prevelikih razlika u debljini stijenki ili prijevremenog istresanja iz kalupa. Na slici 6.2 prikazano je poboljšanje konstrukcijske izvedbe odljevka u cilju sprječavanja nastajanja pukotina.

Kod visokotlačnog lijeva, nakon skrućivanja, stezanje odljevka pri hlađenju mogu ometati kalupni ulošci. Pri vađenju odljevka iz kalupa mjestimično dolazi do koncentracije velikih sila koje mogu uzrokovati lokalnu deformaciju i eventualno pukotine. Pri izbacivanju odljevka može zapeti, tako da i tada mogu nastati kritična naprežanja koja premašuju čvrstoću

materijala, a posljedica toga su hladne pukotine. Isto se može dogoditi ako se kalup prekasno otvori.



Slika 6.2. Povoljanje konstrukcijske izvedbe odljevka u cilju sprječavanja nastajanja pukotina

Kod kokilnog lijeva hladne pukotine mogu nastati zbog prekasnog izvlačenja jezgara i otvaranja kokile nakon skrućivanja odljevka, neprikladnog hlađenja kalupa, naglih promjena debljina poprečnog presjeka odljevka, nezaobljenih kutova i bridova itd.

Treba napomenuti da je pažljivo rukovanje sa odljevcima obavezan preduvjet za sprječavanje opasnosti od pukotina. Zbog nestručnog rukovanja kliještama i dizalicama pri hvatanju odljevka, zbog brzog i nejednoličnog hlađenja nakon hvatanja ili zbog neprikladnog slaganja u vrućem stanju mogu nastati naprezanja koja potom mogu prouzročiti stvaranje pukotina u odljevku.

Naglo hlađenje nakon toplinske obrade u neprikladnim sredstvima ili neujednačeno hlađenje mogu također uzrokovati stvaranje napetosti i pukotina.



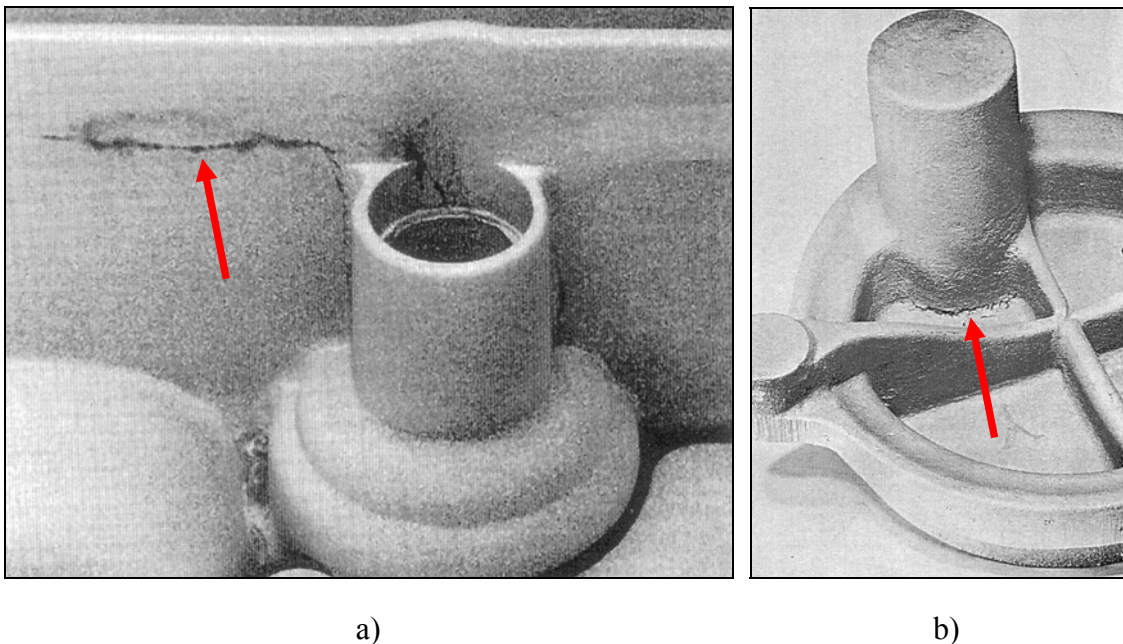
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) poboljšati konstrukcijsku izvedbu odljevka . Težiti ujednačenom hlađenju odljevka sa što manjim ometanjem stezanja, smanjiti mogućnost nastanka naprezanja,
- b) kod visokotlačnog lijeva vaditi odljevke pri višim temperaturama i eventualno pomaknuti izbacivače. Ispitati kalupni alat što se tiče mjesta trenja,
- c) provjeriti svojstva materijala za izradu pješčanih kalupa i jezgara, količinu i kakvoću veziva te sabijenost kalupnog materijala,
- d) pravilno dimenzionirati i postaviti ušća, pojila i hladila da bi se dobile jednolične brzine hlađenja i spriječilo pregrijavanje pojedinih mjesta,
- e) osigurati odgovarajuću brzinu hlađenje odljevka u kalupu,
- f) pažljivo istresati odljevke iz kalupa. Temperatura pri kojoj se odljevci istresaju iz kalupa ne smije biti suviše visoka,
- g) osigurati propisno i ne preneglo hlađenje odljevka nakon toplinske obrade.

## **6.2 Tople pukotine**

### *Opis*

Međukristalno razdvajanje materijala koje prodire do manje ili veće dubine, nepravilnog oblika (slika 6.3).



Slika 6.3. a) topla pukotina na kokilno odlivenom odljevku od magnezijске legure, b) topla pukotina na odljevku od bakrene legure (odljevka lijevan u pješčani kalup)

Na prijelomu na mjestu pukotine struktura je obično fina dendritna, a površina oksidirana. Vidljive su golim okom, a jasno se dokazuju metalografskom analizom. Mogu se pojaviti kod svih ljevarskih legura i to na onim dijelovima odljevka koji najkasnije skrućuju, gdje se javljaju naprezanja zbog stezanja (npr. prijelaz s manje na veću debljinu stijenke, udubljenja itd.).

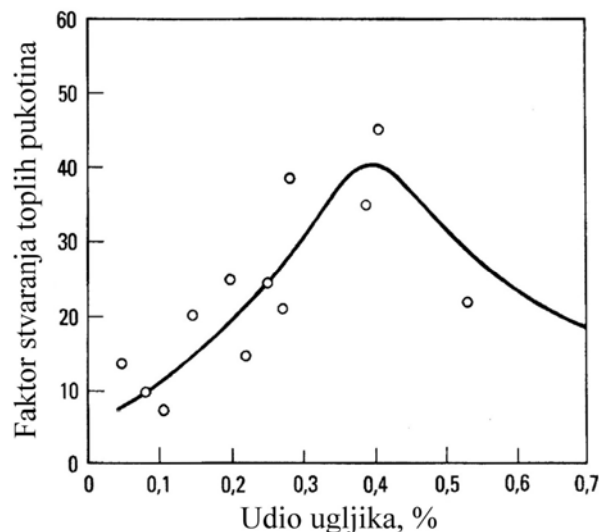


### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Tople pukotina nastaju u zadnjoj fazi skrućivanja u temperaturnom području blizu solidus temperature. Uzrokuju ih napetosti koje nastaju u odljevku zbog ometanog stezanja odljevka pri skrućivanju i nedovoljna sposobnost materijala da takve napetosti podnese. Budući da su naprezanja preduvjet za nastanak toplih pukotina, geometrijski oblik i konstrukcija kalupa i jezgara te postojanje različitih uvjeta hlađenja u različitim područjima odljevka imaju značajan utjecaj na nastanak ove greške. Vjerojatnost pojave pukotine u odljevku pri određenom geometrijskom obliku utoliko je veća ukoliko je veće stezanje legure i manja mogućnost napajanja. Male količine taljevine razdijeljene u obliku tankog filma u područjima granica zrna u odljevku koji skrućuje pospješuju tvorbu pukotina. Nemetalni uključci i njihova nepovoljna razdioba djeluju na isti način. Sklonost ka tvorbi toplih pukotina povećava se s povišenjem temperature lijevanja.

Skлонost neke legure ka tvorbi toplih pukotina ovisi u velikoj mjeri o njenom intervalu skrućivanja i koeficijentu stezanja. Općenito su tvorbi toplih pukotina sklonije legure sa širokim intervalom skrućivanja i velikom početnom brzinom kristalizacije.

Među željezo-ugljik legurama tvorbi toplih pukotina znatno je skloniji čelični i temperirani lijev nego sivi željezni lijevovi. Najveća sklonost ka tvorbi toplih pukotina može se očekivati kod čeličnog lijeva sa udjelom ugljika od ~ 0,4% (slika 6.4). Sumpor i fosfor djeluju izrazito štetno zbog nastanka tankog filma taline. Manganov sulfid kao nemetalni produkt dezoksidacije često se izdvaja u obliku tankog filma po granicama zrna i time slabi vezu između kristala.



Slika 6.4. Utjecaj sadržaja ugljika na nastajanje toplih pukotina u čeličnom lijevu

Veći udjeli ugljika i silicija u sivom lijevu smanjuju sklonost ovog materijala ka tvorbi toplih pukotina. U prisutnosti zaostale taljevine (fosfidnog eutektika kod sivog lijeva) ili pri obilnom napajanju (čelični i temperni lijev) može se prvobitno stvorena pukotina zavariti.

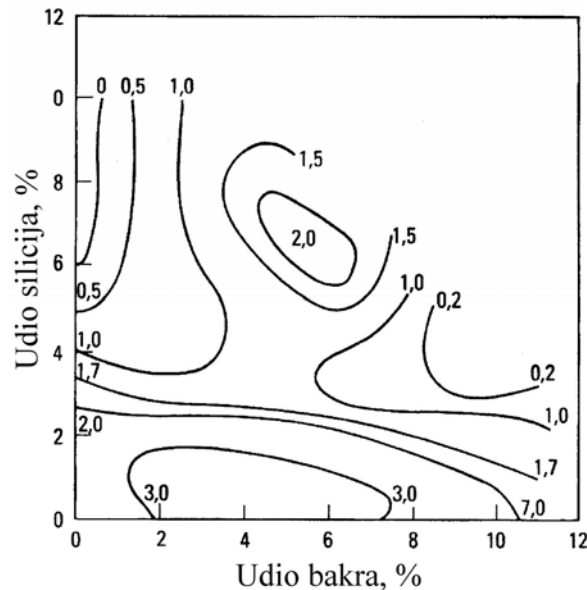
Nepovoljna konstrukcija odljevka, kao što je npr. velika razlika u debljini stjenke, nagli prijelazi s jedne debljine stjenke na drugu može sprječavati (ometati) stezanje odljevka. Prevelika krutost kalupa i jezgara, grube površine kalupa i zapečenost pijeska također mogu sprječavati (ometati) stezanje odljevka.

Kod kokilnog i visokotlačnog lijevanja ograničenje stezanja odljevka mogu uzrokovati: predugo zadržavanje odljevka u kokili, nepovoljno skošenje kokile, prerano otvaranje kokile (oštećenje pri izbacivanju odljevka), vađenje jezgri koje nisu pravilno

centrirane ili vođene, loši položaji izbacivača (stvaraju savojna opterećenja), stvaranje toplinskih čvorišta zbog previsoke temperature itd.

Magnezijske legure sklonije su tvorbi toplih pukotina od aluminijskih legura. Al-Si legure imaju malu sklonost ka tvorbi toplih pukotina. Legure AlMg, AlZnMg i AlCu posebno su sklone nastajanju toplih pukotina.

U legurama AlSiCu i AlCuSi postoje dva područja veće i manje sklonosti ka tvorbi toplih pukotina (slika 6.5). Velika je sklonost ka tvorbi toplih pukotina pri sadržaju silicija manjem od 2,5% i udjelu bakra manjem od 1,0% ili pri udjelima silicija od 7,0% i bakra od 6,0%. Mala je sklonost ka tvorbi toplih pukotina pri sadržaju silicija manjem od 5,0% i udjelu bakra manjem od 1,5% te pri sadržaju silicija od 4,0% i bakra od 9,0%.



Slika 6.5. Sklonost AlSiCu legura ka stvaranju pukotina (linije iste sklonosti ka tvorbi toplih pukotina)

Pojava toplih pukotina jako ovisi o srednjoj brzini hlađenja u intervalu skrućivanja. Tako se određene legure mogu lijevati u pijesak, dok za lijevanje u kokilu (veće brzine hlađenja) one ne dolaze u obzir zbog sklonosti ka tvorbi toplih pukotina (npr. AlCu4Ti).

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

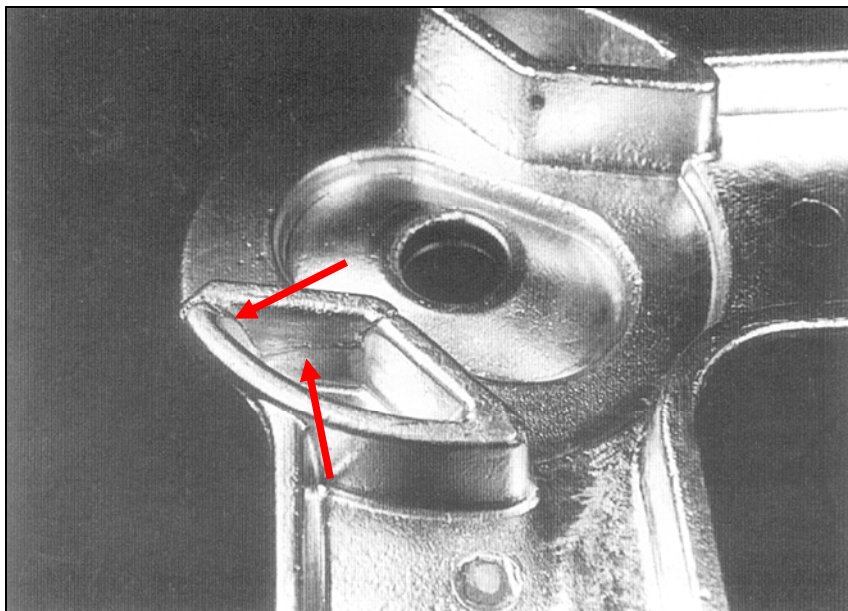
- a) povoljno oblikovati odljevak uz izbjegavanje naglih prijelaza s tankih na debele presjeke te koncentracije materijala,
- b) osigurati adekvatne radijuse na modelima,
- c) osigurati neometano stezanje odljevka,
- d) spriječiti stvaranje pregrijanih mjesta u odljevku,
- e) ostvariti usmjereno skrućivanje (upotreba hladila, egzotermnih i izolacijskih materijala),
- f) provjeriti veziva za izradu kalupa, svojstva pijeska i sabijenost kalupa te jezgara,
- g) promijeniti položaj ušća radi sprečavanja pregrijanih mjesta. Ušća i pojila ne smiju ometati stezanje odljevka. Produžiti hlađenje odljevka. Odabrati kalupni materijal s malim toplinskim širenjem,
- h) ako je moguće, uporabiti leguru sa uskim intervalom skrućivanja,

- i) kod legura lakih metala provesti adekvatno usitnjavanje zrna i obradu taljevine,
- j) smanjiti sadržaj sumpora kod čeličnog lijeva na  $< 0,02$  %. Provesti adekvatnu dezoksidaciju. Smanjiti temperaturu i vrijeme lijevanja,
- k) kod kokilnog i visokotlačnog lijeva omogućiti najkraća vremena zadržavanja odljevka u kalupu (ali ne otvarati kalup prerano), obratiti pažnju na izbacivanje odljevka, osigurati točno povlačenje jezgri, spriječiti lijepljenje odljevka na kalup, provjeriti skošenja da se ne sprječava stezanje.

### 6.3 Hladni zavar

#### *Opis*

Jasno vidljiv prekid mase (diskontinuitet) sa zaobljenim rubovima (slika 6.6). Ograničava se najčešće na hladne dijelove odljevka. Može nastati po čitavoj debljini stijenke odljevka ili samo do određene dubine u obliku manje brazde s zaobljenim rubom. Vidljiva je golim okom i vrlo često uzrokuje škart odljevka. Nastaje na odljencima koji imaju velike površine, najčešće kod malih debljina stjenki gdje se sastaju dva mlaza ohlađene taljevine. Može se pojaviti kod svih ljevarskih legura, nezavisno od postupka kalupljenja i lijevanja.



Slika 6.6. a) hladni zavar na kokilno odlivenom odljevku

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Hladni zavar nastaje kada se dva mlaza taljevine zbog niske temperature nepotpuno ili se uopće ne stale. Dakle radi se o prijevremenom skrućivanju legure pri lijevanju, npr. zbog preniske temperature lijevanja ili kalupa ili zbog premale brzine lijevanja.

Hladni zavar može nastati i zbog premale propusnosti kalupa za plinove jer je moguće stvaranje nadtlaka koji usporava tečenje taljevine. Nedovoljna livljivost legure također može uzrokovati nastanak hladnog zavara. Loša staljenost unutarnjih hladila sa odljencima još je jedan od uzroka stvaranja hladnog zavara.

*Sprečavanje nastajanja greške*

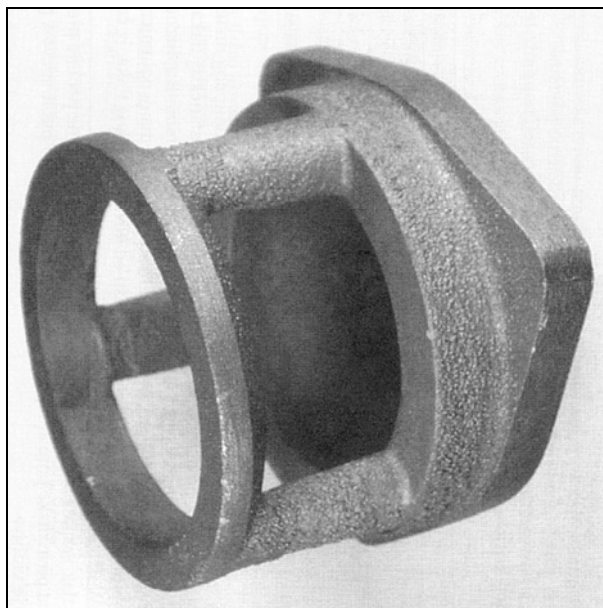
- a) povisiti temperaturu lijevanja,
- b) poboljšati livljivost taljevine,
- c) osigurati kratke putove tečenja optimiranjem uljevnog sustava,
- d) optimizirati brzinu lijevanja,
- e) osigurati dovoljne odzračne kanale,
- f) kod kokilnog lijeva eventualno povisiti temperaturu kokile i provjeriti uljevni sustav te sustav odzračivanja.,
- g) kod visokotlačnog lijevanja povisiti temperaturu taljevine i kalupa, povećati ušća, zaobliti uglove i bridove i povećati tlak lijevanja.

## 7. POVRŠINSKE GREŠKE

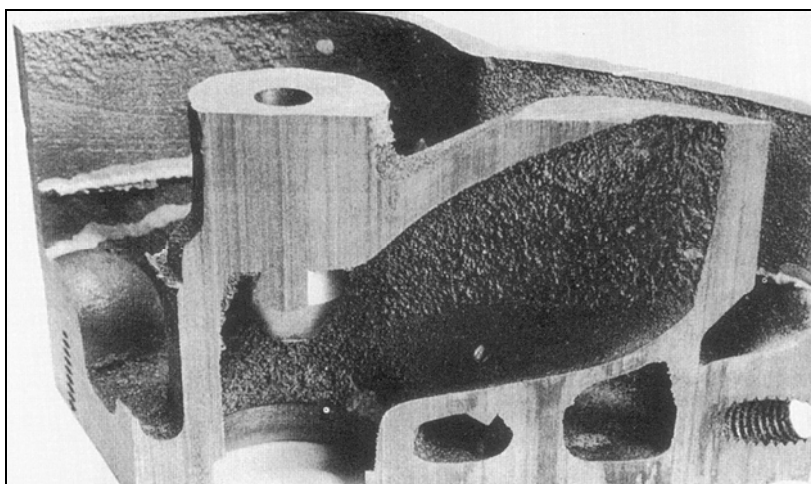
### 7.1 Hrapavost površine odljevka

#### *Opis*

Manje ili više hrapava površina cijelog odljevka vidljiva golim okom, pri čemu je hrapavost unutar reda veličine pješčanog zrna (slika 7.1).



a)



b)

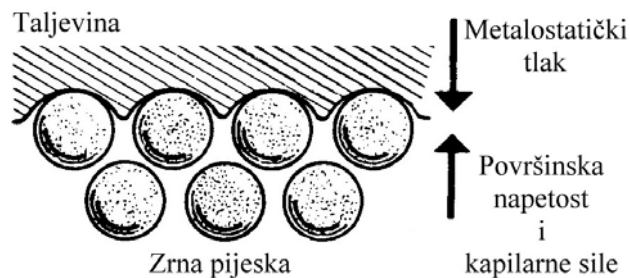
Slika 7.1. a) hrapavost na odljevku zbog velike krupnoće pješčanog zrna, b) hrapava površina odljevka zbog nepremazanih jezgri

Javlja se na svim vrstama odljevka, ali prije svega na odljevcima koji su proizvedeni lijevanjem u pješčane kalupe. Pojavljuje se na mjestima koja su jako toplinski opterećena.

Može biti praćena uključcima pijeska na površini odljevka. Hrapavost obično ne uzrokuje izravno škartiranje odljevka, ali svakako predstavlja nedostatak kakvoće koji kupci sve manje toleriraju. Ovu grešku treba smatrati stupnjem koji prethodi nekim drugim greškama na odljencima, kao što su prigorjeli (zapećeni) pijesak i penetracija, te ozbiljno upozorava na potrebu poduzimanja odgovarajućih mjera.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Najznačajniji utjecaj na kakvoću površine pješčanih odljevaka ima krupnoća pješčanih zrna, što znači da krupnija zrna uzrokuju hrapavije površine. Na slici 7.2 prikazana je ravnoteža sila na graničnoj plohi taljevina/pješčani kalup.



Slika 7.2. Shematski prikaz ravnoteže sila na graničnoj plohi taljevina/pješčani kalup

Na graničnoj površini pješčani kalup/taljevina postoji ravnoteža između kapilarnih sila kalupnog materijala (propusnost za plinove), površinske napetosti taljevine i metalostatičkog tlaka. Ako metalostatički tlak premaši sile koje djeluju suprotno, taljevina prodire u pore između zrna pijeska na površini kalupa uzrokujući hrapavu površinu odljevka. Kada metalostatički tlak prekorači kritičnu vrijednost (penetracijski tlak) može doći do penetracije. Kapilarne sile, koje se uglavnom odupiru prodiranju taljevine, to su veće što je manji polumjer pora.

Hrapava kalupna površina također uzrokuje hrapavost odljevka ako se pješčana zrna odvajaju od kalupa, a uzrok tome može biti nedovoljan udio veziva ili slaba priprema kalupnog materijala. Kao posljedica ekspanzije kvarcnog pijeska može doći do odvajanja zrna pijeska, što je poznato pod nazivom "pješčana kiša". Nakon punjenja kalupa to uzrokuje nastanak površinske hrapavosti.

Osim različite krupnoće zrna, na hrapavost površine odljevka bitno utječu i dodatci pijesku. Dodavanjem sitnijih frakcija poboljšava se kvaliteta površine odljevka, pogoršava propusnost kalupa za plinove. Nasuprot tome, dodavanjem ugljene prašine (tvorca sjajnog ugljika) postiže se znatno poboljšanje površine odljevka bez smanjenja propusnosti za plinove.

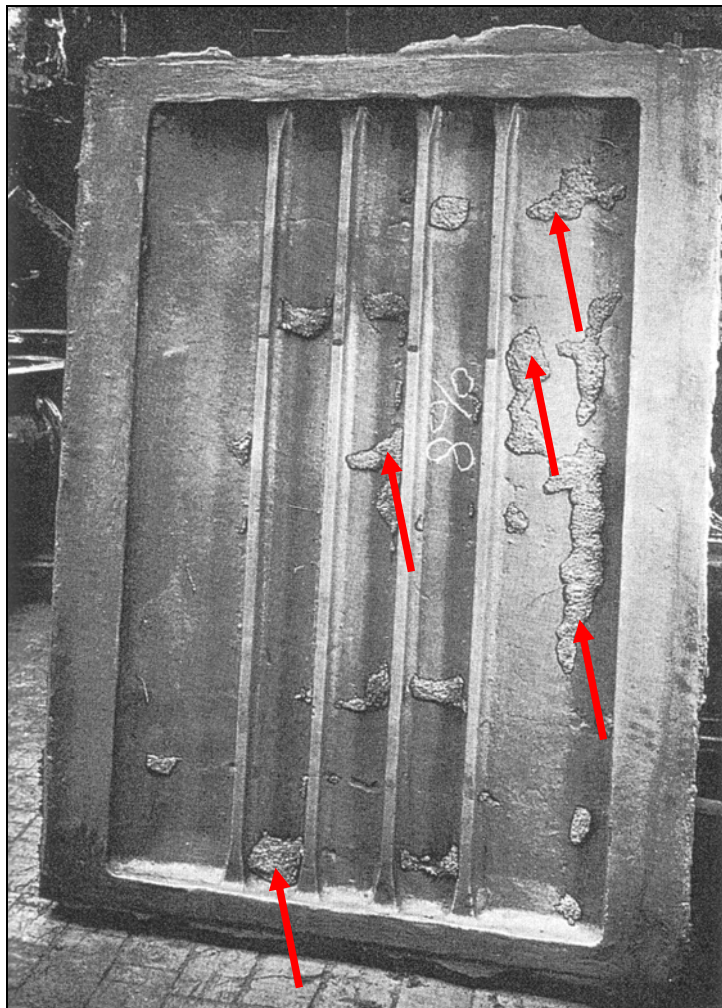
#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) dodati sitnozrnatog pijeska u kalupnu mješavinu,
- b) osigurati adekvatnu pripremu kalupne mješavine,
- c) osigurati redukcijsku atmosferu u kalupnoj šupljini dodavanjem komponenti koje stvaraju sjajni ugljik,
- d) osigurati jednolično sabijanje kalupa i eventualno povećati tlak sabijanja,
- e) spriječiti pojavu pregrijanih mjesta,
- f) sniziti temperaturu lijevanja.

## 7.2 Kraste i brazde na površini odljevka

### Opis

Kraste (engl. *scab*) su nepravilne metalne izrasline na površini odljevka debljine nekoliko milimetara, uglavnom sa oštrim bridovima, paralelne s površinom odljevka i imaju vrlo grube površine (slika 7.3). Vezane su sa odljevkom na nekoliko mjesta. Obično se nalaze na gornjim i donjim vodoravnim površinama odljevka, a rjeđe na bočnim površinama. Vidljive su golim okom. Površina odljevka ispod krste je udubljena. Udubljenje na površini odljevka ima oblik krste, a dubina udubljenja odgovara debljini krste. Mogu se ukloniti sjekačem s tim da na tom mjestu na površini odljevka ostaje udubljenje.

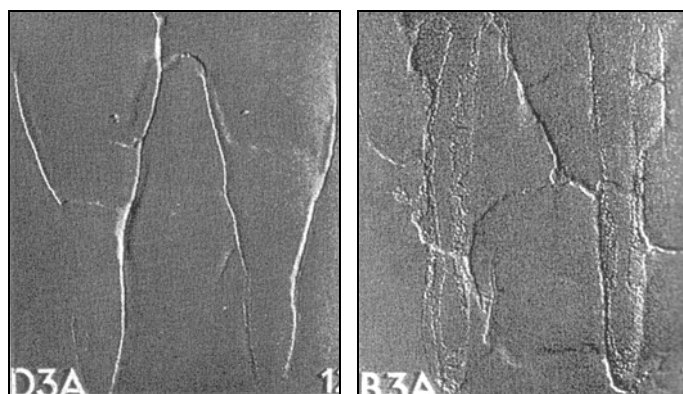


Slika 7.3. Kraste na odljevku od sivog lijeva

Brazde su nepravilni plitki utori koji se obično pojavljuju na vodoravnim površinama odljevka (slika 7.4). Brazde su duboke do 5 mm i imaju oštre skošene bridove ispod kojih se može nalaziti pijesak. Vidljive su golim okom. U ljevačkoj praksi ova greška se naziva „štakorski ili mišji rep“ (engl. *rat tail*). Brazde se često protežu od ušća i donekle su međusobno povezane (grananje). Kod kalupnih mješavina sa izraženom tendencijom ka nastajanju ove greške na odljencima, uz brazde se mogu pojaviti i kraste.

Kraste i brazde mogu se pojaviti na odljencima od svih ljevarskih legura koji se lijevaju u kalupe od svježe kalupne mješavine.





Slika 7.4. Brazde na površini odljevka od sivog lijeva

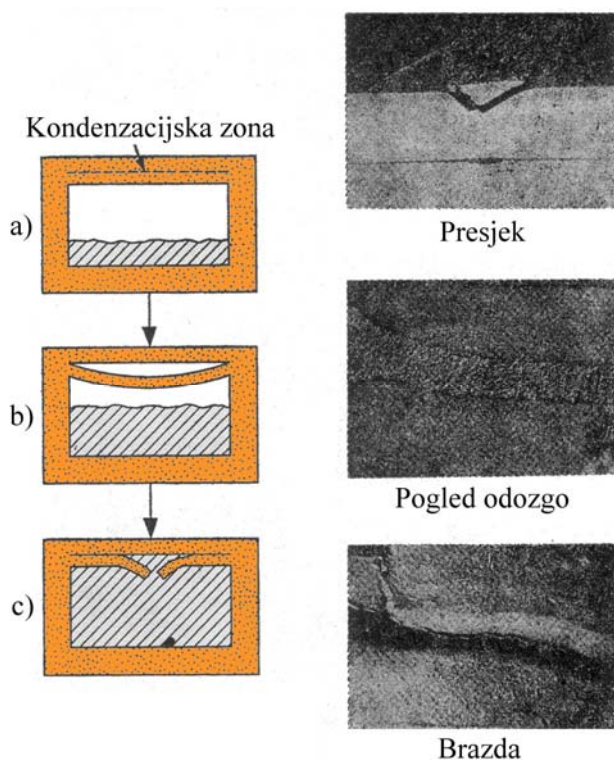
*Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Uzrok nastajanja krasti i brazdi je ometano odnosno neometano stvaranje pješčane kore na užarenoj površini kalupa zbog širenja kvarca.

*Nastajanje krasti i brazdi na gornjim površinama odljevka*

Toplinsko djelovanje taljevine uzrokuje toplinsko širenje kalupnog materijala. Osim toga, zbog temperaturnih razlika u pojedinim područjima kalupa nastaju znatne razlike u napreznjima. Ta napreznja utječu na površinske slojeve kalupa, odnosno kalupne stjenke.

Djelovanjem taljevine nastaje kondenzacijska zona s povišenim sadržajem vlage, zbog čega je čvrstoća pijeska u toj zoni smanjena (slika 7.5a).

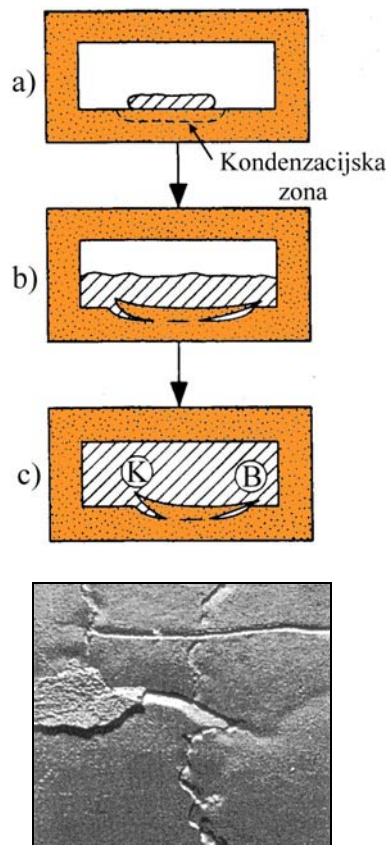


Slika 7.5. Nastajanje kraste i brazde na gornjoj površini odljevka

Širenjem kvarca, posebno zbog njegove reverzibilne pretvorbe pri  $573^{\circ}\text{C}$  ( $\alpha$  - kvarc  $\leftrightarrow$   $\beta$  - kvarc), nastaju tlačna naprezanja u površinskim slojevima kalupa koja uzrokuju nastajanje pješčane kore. Ekspanzija kvarca u pješčanoj kori ograničena je tlačnim naprezanjima u stjenci kalupa. Zbog toga dolazi do odvajanja pješčane kore od ostalih dijelova kalupa (slika 7.5b). Taljevina pritišće odvojenu pješčanu koru što uzrokuje lomljenje kore. Nakon toga, taljevina popunjava prostor iza kore, što u konačnici rezultira stvaranjem kraste. Ako se kora ne polomi, taljevina ne ulazi u prostor iza kore pa nastaje udubljenje, odnosno brazda na površini odljevka (slika 7.5c).

#### *Nastajanje krasti i brazdi na donjim površinama odljevka*

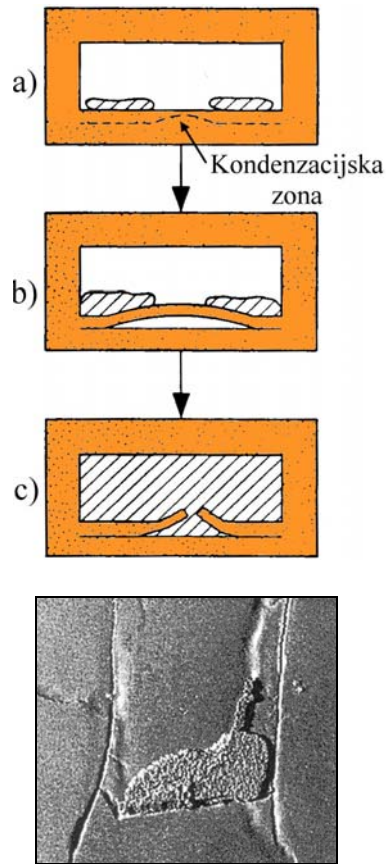
Djelovanjem mlaza taljevine stvara se kondenzacijska zona male čvrstoće (slika 7.6a). Širenjem kvarca nastaju tlačna naprezanja u površinskim slojevima kalupa što uzrokuje nastajanje pješčane kore. Ekspanzija kvarca u pješčanoj kori ograničena je tlačnim naprezanjima u stjenci kalupa. Zbog toga dolazi do djelomičnog odvajanja pješčane kore od ostalih dijelova kalupa, odnosno savijanja pješčane kore (slika 7.6b). U slučaju kada su rubovi pješčane kore samo ispupčeni prema kalupnoj šupljini i nije moguć ulaz taljevine u prostor iza kore, dolazi do stvaranja brazdi (slika 7.6c). Ako su rubovi kore dovoljno izdignuti da taljevina uđe u prostor iza kore nastaju krste (slika 7.6c).



Slika 7.6. Nastajanje krasti (K) i brazdi (B) na donjoj površini odljevka

Za razliku od prethodnog slučaja, može doći i do izdizanja pješčane kore između dva paralelna mlaza taljevine (slike 7.7a i b). Taljevina pritišće izdignutu pješčanu koru. Ako ne dođe do lomljenja kore, na površini odljevka nastaje manje udubljenje. Brazde nastaju ako se

kora polomi a taljevina ne uđe u prostor iza kore. Ukoliko taljevina uđe u prostor iza kore nakon njenog kidanja nastaju kraste (slika 7.7c).



Slika 7.7. Nastajanje krasti i brazdi na donjoj površini odljevka

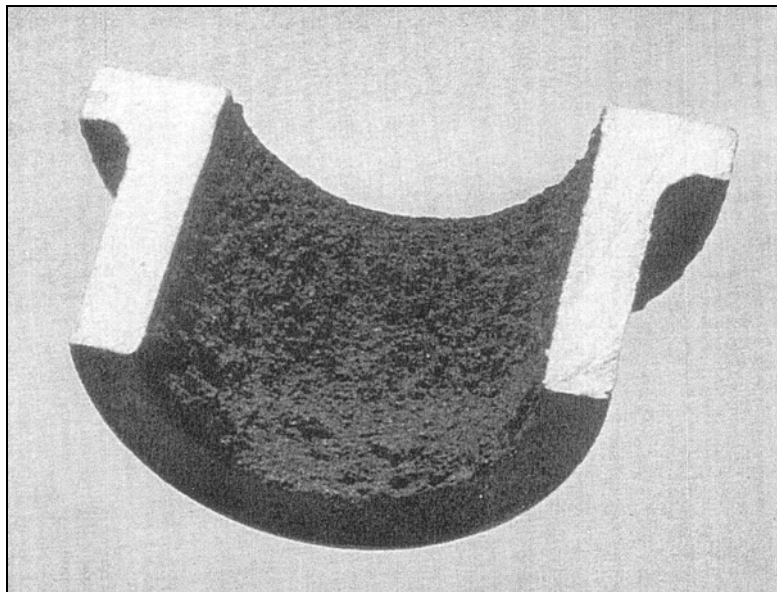
#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- povećati čvrstoću kalupne mješavine dodatkom veće količine veziva (bentonit), upotrebom bentonita veće specifične površine, upotrebom Na bentonita, hlađenjem pijeska, boljim miješanjem kalupne mješavine, upotrebom krupnijeg pijeska što okruglijih zrna.
- smanjiti tlačna naprezanja brzim i ravnomjernim punjenjem kalupa, izbjegavanjem prevelike vlažnosti, upotrebom aditiva, odnosno dodataka (npr. ugljena prašina) koji omekšavaju ili izgaraju i tako oslobađaju prostor za širenje kvarca (obratiti pažnju pri upotrebi drvenog brašna kao aditiva jer utječe na smanjenje čvrstoće kalupne mješavine), djelomičnom ili potpunom zamjenom kvarcnog pijeska drugim vatrostalnim pijeskom kod kojeg se ne pojavljuju alotropske modifikacije i ekspanzija tijekom zagrijavanja (cirkonski, kromitni, olivinski pijesak),
- povećati propusnost kalupne mješavine i osigurati adekvatno odzračivanje kalupa.

### 7.3 Penetracija taljevine u kalupnu mješavinu

#### *Opis*

Spužvaste izrasline (izbočine) nepravilnog geometrijskog oblika čvrsto vezane na površinu odljevka (slike 7.8). Sastoje se od metala i pijeska. Vidljive su golim okom. Površina odljevka je hrapava (gruba), što povećava troškove čišćenja, ali može uzrokovati i škartiranje odljevka. Dubina površinske hrapavosti u slučaju penetracije taljevine veća je od srednjeg polumjera zrna pijeska, što nije slučaj kod uobičajene hrapavosti. Uglavnom se pojavljuje na najtoplijim mjestima u kalupu (jezgre, konkavna područja), na mjestima slabe sabijenosti kalupnog materijala te na debelostjenim odljencima.



Slika 7.8. Greška na odljevku od bronce zbog penetracije taljevine u kalupnu mješavinu

O penetraciji se govori kada kalupni materijal kemijski ne reagira s taljevinom koja je u njega prodrla. U suprotnom, govori se o prigrorijevanju pijeska i prodoru taljevine.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

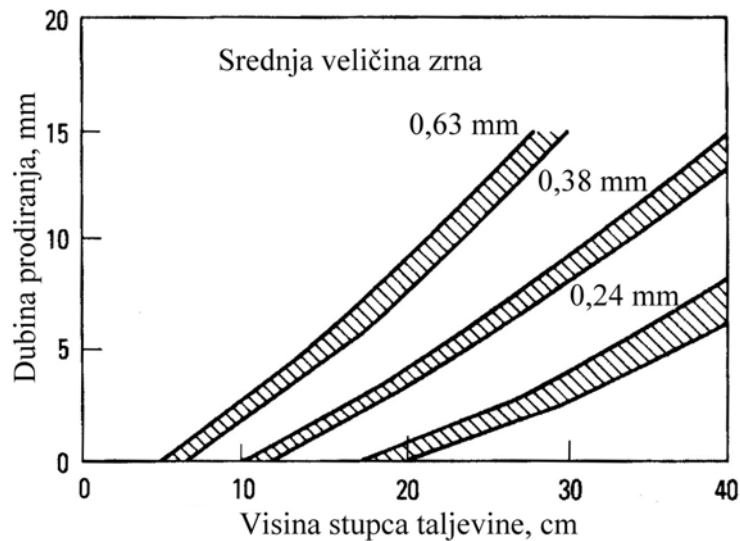
Pješčani kalupi imaju određeni sustav pora. Na graničnoj površini između taljevine i kalupnog materijala postoji ravnoteža između metalostatičkog tlaka, kapilarnih sila kalupnog materijala, kvašenja i površinske napetosti taljevine.

Pri ulijevanju taljevina dolazi u kontakt s kalupnim stjenkama i pod djelovanjem metalostatičkog tlaka može prodirati u pore na površini kalupa (slika 7.9) dok se ne uspostavi ravnoteža između granične površinske napetosti na površini kalupa i penetracijskog tlaka, a posljedica je hrapavost površine odljevka. Penetracijski tlak označava onu kritičnu vrijednost tlaka pri kojoj taljevina prodire kroz najgornji zrnati sloj.

Na graničnu površinsku napetost, koja djeluje suprotno penetracijskom tlaku, utječu kapilarne sile kalupnog materijala (u prvom redu poroznost), kvašenje kalupne površine i površinska napetost. Dubina je kvašenja to veća što je veći penetracijski tlak, polumjer zrna kalupnog pijeska, polumjer pora, gustoća zrna i manja granična površinska napetost. Kod željeznih ljevova površinska napetost taljevine snižava se s povećanjem sadržaja fosfora,



silicija i mangana. Na kut kvašenja, a time i na kvašenje kalupne površine može bitno utjecati tvorba sloja sjajnog ugljika.

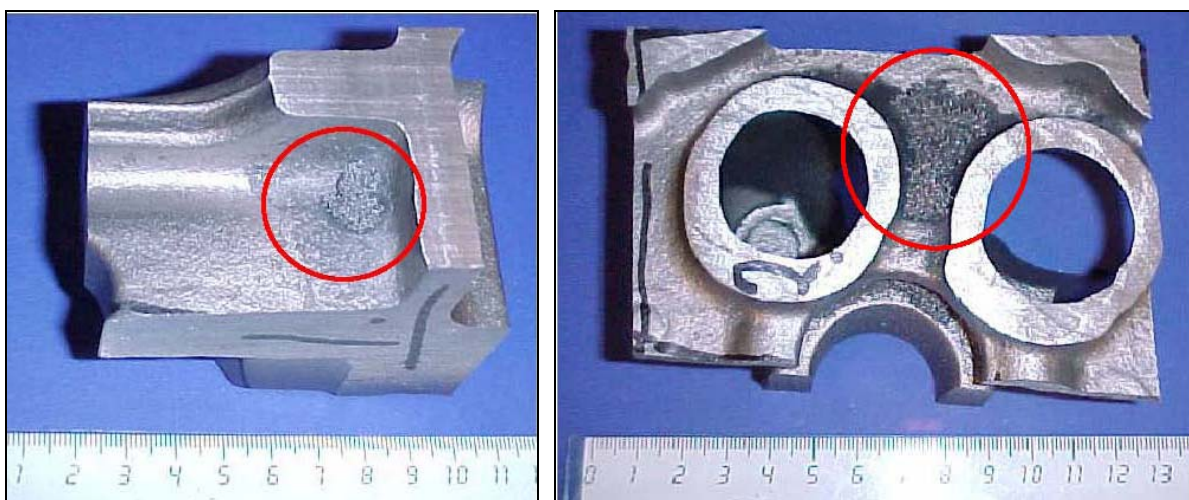


Slika 7.9. Dubina prodiranja taljevine čeličnog lijeva u kalupnu stijenku u zavisnosti od metalostatičkog tlaka i srednje veličine zrna kalupnog materijala

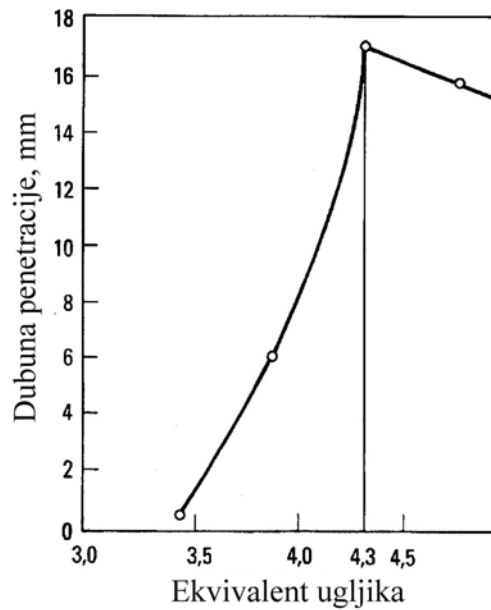
Veličina polumjera pora u kalupu u prvom redu ovisi o strukturi zrna (veličina, razdioba zrna), dodatcima (udio veziva), stupnju sabijenosti kalupne mješavine i sklonosti ka sinteriranju kalupnog materijala.

O penetraciji se govori kad je dubina površinske hrapavosti veća ili jednaka polumjeru zrna kalupnog materijala. To znači da hrapavost i penetracija gotovo isključivo ovise o veličini zrna kalupnog pijeska.

Kod sivih željeznih ljevova tijekom eutektičkog skrućivanja dolazi do stvaranja eutektika austenit-grafit i značajne ekspanzije. Ekspanzija uzrokuje znatan tlak na stjenke kalupa. Ako je kalup krut (kompaktan) i ako se metal ne može potisnuti natrag u pojilo ili ušća jer su skrtnula, nastali tlak rezultira penetracijom metala u kalup, odnosno stijenke kalupa. Ovaj oblik penetracije metala naziva se ekspanzijska penetracija (slika 7.10). Ona ovisi o metalurškim svojstvima taljevina sivih željeznih ljevova i vrijednosti ekvivalenta ugljika (slika 7.11).



Slika 7.10. Greške na odljercima od sivog lijeva zbog ekspanzijske penetracije



Slika 7.11. Ovisnost dubine penetracije o vrijednosti ekvivalenta ugljika kod sivih željeznih ljevova

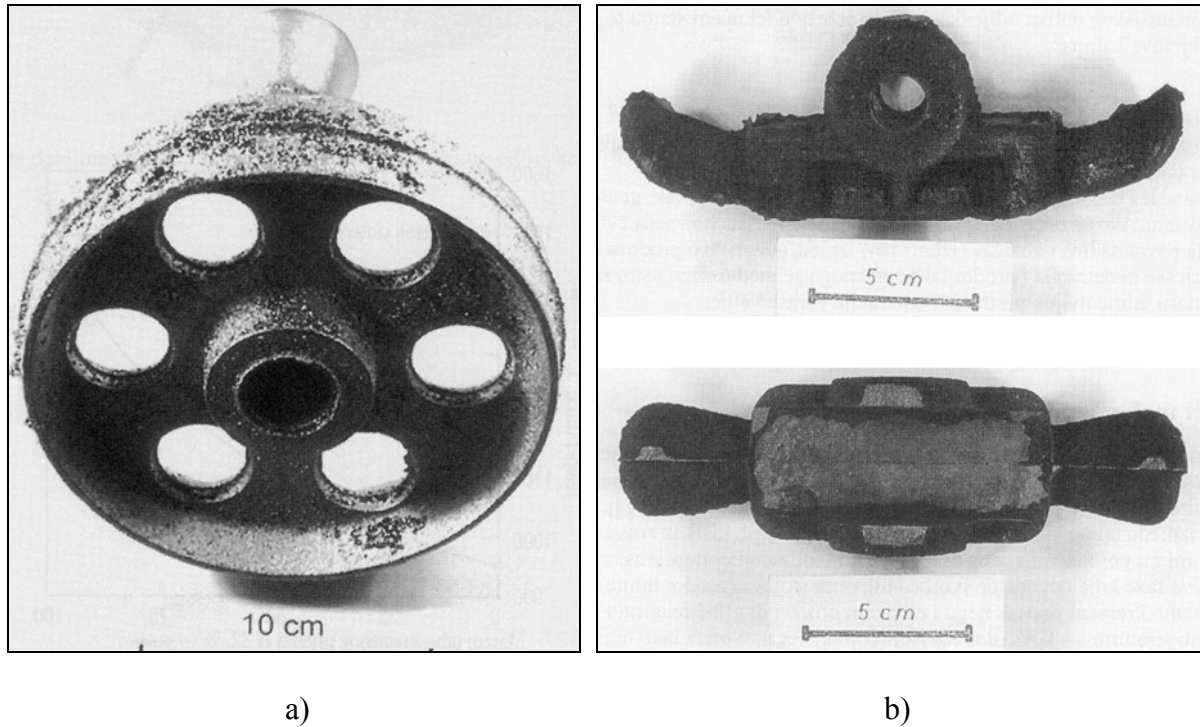
*Sprečavanje nastajanja greške*

- a) upotrijebiti sitnozrnati pijesak,
- b) povećati dodatak materijala koji stvaraju sjajni ugljik,
- c) povećati udio veziva,
- d) primijeniti odgovarajuće premaze za kalupe i jezgre tako da se bitno smanji volumen pora neposredno uz površinu kalupa ili jezgre,
- e) obratiti pažnju na kemijski sastav lijeva, odnosno elemente koji su aktivni na graničnoj plohi (elementi koji smanjuju površinsku napetost taljevine), kao što su fosfor, olovo, bizmut,
- f) smanjiti metalostatički tlak taljevine i poboljšati uljevni sustav da se spriječe udari taljevine i jako pregrijavanje dijelova kalupa i jezgri,
- g) sniziti temperaturu lijevanja,
- h) osigurati dostatnu i jednoličnu sabijenost kalupa i jezgara.

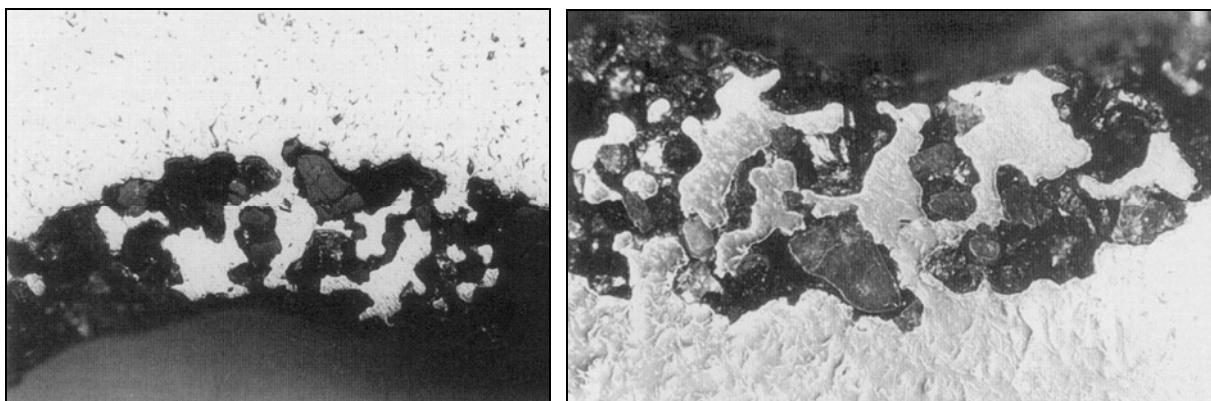
## 7.4 Prigorjeli pijesak na površini odljevka i prodor taljevine u kalupnu mješavinu

### Opis

Kad je na vanjsku ili unutarnju površinu odljevka čvrsto vezana pješčana kora govorimo o prigorjelom pijesku na površini odljevka (slike 7.12a i 7.13). Ako je uz nastajanje tankog sloja rastaljenog pijeska na površini odljevka prisutno i dublje ulaženje taljevine u kalupnu mješavinu govorimo o prodoru taljevine (slike 7.12b i 7.13).



Slika 7.12. a) prigorjela pješčana kora na odljevku od aluminijske legure (uzroci su nedovoljna sabijenost kalupa i previsoka temperatura lijevanja), b) odljevak od sivog lijeva s izraženo hrapavom (izbrazdanom) površinom zbog prodora taljevine u kalupnu mješavinu



Slika 7.13. Mikrostruktura površinskog sloja odljevka od sivog lijeva. Prisutne su greške zbog prigorijevanja pijeska na površinu odljevka i prodora taljevine u kalupnu mješavinu



Ako je došlo do prodora taljevine u kalupnu mješavinu Površina odljevka jače je izbrazdana. U oba slučaja prisutna je kemijska reakcija između taljevine i kalupnog materijala, a greške su vidljive golim okom. Ove greške ne mogu se ukloniti uobičajenim postupkom čišćenja odljevaka već samo brušenjem. Pojavljuju se, neovisno o ljevarskoj leguri, kod svih odljevaka koji se lijevaju u pješčane kalupe i to u područjima gdje je došlo do velikog zagrijavanja kalupa. Materijali koji se lijevaju pri visokim temperaturama (npr. čelici) skloniji su toj pogrešci nego npr. lijevane aluminijske legure.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Do prigorijevanja pijeska na površinu odljevka dolazi pri lijevanju kad taljevina može neometano ući između pješčanih zrna na graničnoj plohi između taljevine i kalupa. Površina odljevka pritom može postati potpuno ili djelomično vrlo hrapava. Javlja se zbog nejednolične sabijenosti kalupa, previsokog metalostatičkog tlaka (prevelika visina lijevanja), previsoke temperature lijevanja, previsoke oolitizacije, nedovoljne vatrostalnosti pijeska, preniske temperature sinteriranja, pregrube zrnatosti pijeska i pomanjkanja finih sastojaka te visokog kvašenja kalupne površine taljevinom.

Pri prodoru taljevina dublje ulazi u kalupnu mješavinu nego je to slučaj kod prigorijevanja pijeska na površini odljevka. Kad se penetracijski tlak snizi uz postojeći metalostatički tlak, s jedne strane pojačava se penetracija taljevine u kalupnu mješavinu, a s druge strane, kao posljedica reakcija između taljevine i kalupnog materijala mogu nastati niskotaljive faze koje dovode do tvorbe silikatnih slojeva.

Kemijske reakcije između taljevine i kalupnog materijala glavni su uzroci nastanka ovih grešaka. Njima pogoduje oksidacijska atmosfera u kalupnoj šupljini. Željezni oksidi koji tada nastaju kvase kalupni materijal puno bolje od željeza, pa se poveća mogućnost srašćivanja i pojava prigorjelosti. Reakcijom između željeznog oksida i  $\text{SiO}_2$  iz kvarcnog pijeska nastaje vrlo tekući niskotaljivi željezni silikat (fajalit), koji pogoduje daljnjem prigorijevanju.

U dijelovima kalupa u blizini odljevka zbog visokih toplinskih opterećenja (temperatura lijevanja, debljina stijenke) dolazi do reakcije s niskotaljivim sastojcima kalupnog materijala (bentonit), što opet pogoduje stvaranju pješčane kore i prodoru taljevine.

Hrapavost površine, prigorjela pješčana kora, penetracija taljevine i prodor taljevine u kalupni materijal (mješavinu) ne mogu se uvijek jasno međusobno razlikovati te se često pojavljuju zajedno na odljevku. Upravo tim redosljedom raste težina greške. Najjači oblik prigorijevanja jest prodor taljevine u kalupnu mješavinu.

Troske bogate manganskim oksidima, koje nastaju pri proizvodnji manganskih čelika, jako su agresivne i povećavaju sklonost tog materijala prema prodoru taljevine.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) provjeriti točku sinteriranja komponenata kalupne mješavine (pijesak, vezivo),
- b) smanjiti kvašenje kalupne površine povećanjem udjela tvari koje tvore sjajni ugljik (ugljena prašina) i time istodobno osigurati nastanak redukcijske atmosfere u kalupnoj šupljini,
- c) provjeriti stupanj oolitizacije i po potrebi dodati novi pijesak,
- d) provjeriti udio bentonita s obzirom na oolitizaciju i eventualno ga smanjiti,
- e) provjeriti udio prašine u kružnom sustavu pijeska i eventualno ga smanjiti ovisno o udjelu veziva,

- f) upotrijebiti čisti kvarcni pijesak (udio  $\text{SiO}_2 > 99,5\%$ ) jer stupanj onečišćenja ima velik utjecaj na nastajanje staljene faze, a time i na sinteriranje,
- g) osigurati jednoličnu sabijenost kalupa, posebno izbjegavati lokalne razlike u sabijenosti,
- h) izbjegavati previsoke temperature lijevanja i previsok metalostatički tlak,
- i) upotrijebiti odgovarajući premaz za opterećene dijelove kalupa ili za cijeli kalup.

## **7.5 Oštećenja na površini visokotlačno lijevanih odljevaka zbog naljepljivanja taljevine na stjenke kalupa**

### *Opis*

Naljepljivanje rastaljene ljevarske aluminijske legure na stjenke kalupa pri visokotlačnom lijevanju. Rezultira kidanjem površine odljevka pri izbacivanju iz kalupa.

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Naljepljivanje na stjenke kalupa kod visokotlačnog lijevanja nastaje zbog lokalnog pregrijavanja kalupa taljevinom. U slučaju ekstremnog pregrijanja, mlaz taljevine erodira površinu kalupa. Ovaj slučaj često je prisutan kod ili u blizini ušća. Loša konstrukcija ušća u kombinaciji s neadekvatnim hlađenjem kalupa primarni je uzrok naljepljivanja. Loše polirane površine alata pospješuju nastajanje ovog problema. Procesne varijacije u primjeni maziva na površini kalupa u cilju izbjegavanja interakcije između površine kalupa i taljevine, održavanju površine kalupa ili kontroli temperature također mogu rezultirati naljepljivanjem i erozijom kalupa.

Rastaljeni aluminij je vrlo agresivan prema nezaštićenom čeličnom kalupu. Ako je sadržaj željeza u leguri aluminijske prenizak, taljevina nastoji otopiti kalup tijekom injektiranja. Ova tendencija posebno je izražena pod uvjetima koji promoviraju naljepljivanje i eroziju kalupa. Ovaj posebni problem naljepljivanja može se izbjeći ako se sadržaj željeza u aluminijskoj ljevarskoj leguri održava između 0,8 – 1,1%.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

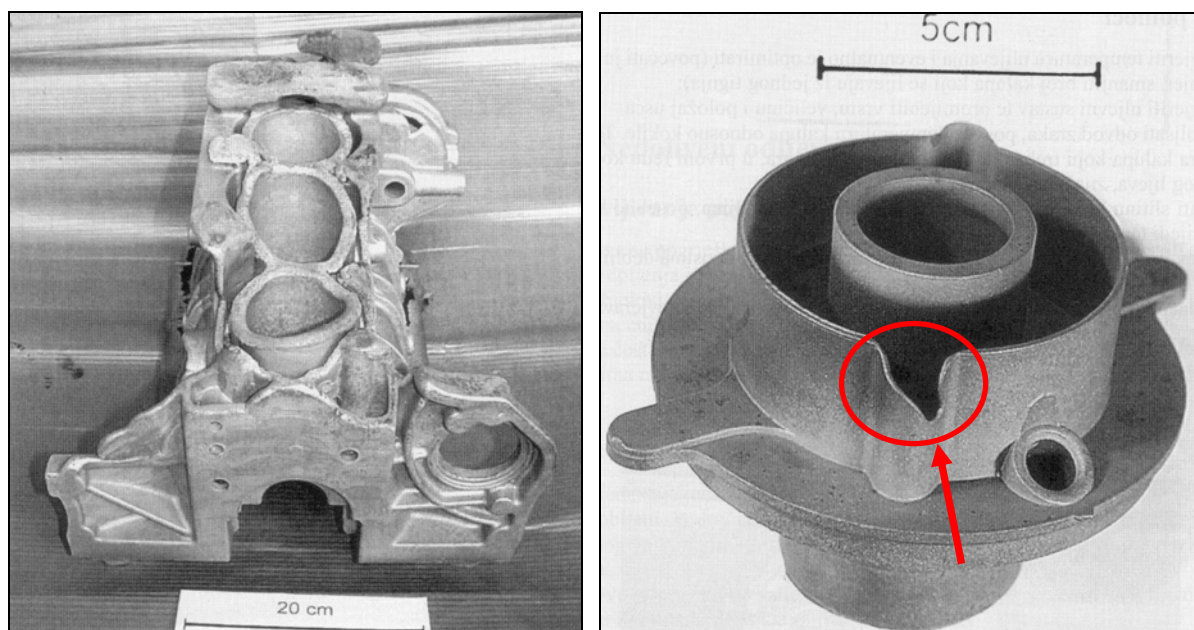
- a) spriječiti lokalna pregrijanja kalupa,
- b) pravilno konstruirati ušća,
- c) osigurati adekvatno hlađenje kalupa i mazivo,
- d) u aluminijskim legura za visokotlačno lijevanje održavati sadržaj željeza u granicama od 0,8 – 1,1%.

## 8. NEPOTPUNI ODLJEVCI

### 8.1 Nekompletan (nedoliven) odljevak

#### *Opis*

Nedostaje jedan dio ili cijela područja odljevka (slika 8.1). Bridovi nedolivenih mjesta su zaobljeni. Spust i ušća su puni. Najčešće se pojavljuje kod odljevaka s malom debljinom stijenke, na odljencima s velikom površinom, na gornjim dijelovima odljevka i mjestima koja su najudaljenija od ušća.



Slika 8.1. Nepotpuni (nedoliveni) odljevci

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Najčešći uzrok ove pogreške je niska temperatura lijevanja, zbog čega se taljevina prijevremeno skrutne. Osim toga, nepravilno dimenzioniran i konstruiran uljevni sustav te nedovoljna livljivost i sastav legure također mogu rezultirati nepotpuno odlivenim odljevkom. Tako npr. treba uzeti u obzir da Al-Mg legure za razliku od Al-Si legura imaju znatno slabiju sposobnost tečenja i punjenja kalupa.

Kod kokilnog lijeva niska temperatura kokile i/ili nedovoljno odzračivanje može rezultirati nekompletnim odljevkom.

Kod visokotlačnog lijevanja prenizak tlak i premale brzine ulijevanja, hladni kalupi, nedovoljno odzračivanje kalupa i niske temperature taljevine najčešći su uzroci ove greške.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) osigurati adekvatnu temperaturu lijevanja,

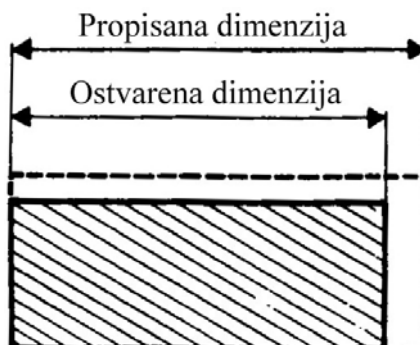
- b) provjeriti uljevni sustav te promijeniti vrstu, veličinu i položaj ušća,
- c) poboljšati odzračivanje kalupa, povisiti temperaturu kalupa, odnosno kokile.
- d) uporabiti leguru s boljom sposobnosti tečenja i punjenja kalupne šupljine, posebno kad se lijevaju tankostjeni odljevci,
- e) optimizirati oblik odljevka i debljine stjenki,
- f) kod visokotlačnog lijevanja provjeriti doziranje taljevine, tlak i gibanje stapa.

## 9. NETOČNE DIMENZIJE ILI OBLIK

### 9.1 Proporcionalno odstupanje svih dimenzija odljevka

#### *Opis*

Sve dimenzije odljevka ne odgovaraju mjerama na nacrtu, ali u istom omjeru u odnosu na zahtijevane dimenzije (slika 9.1). Oblik odljevka odgovara nacrtu.



Slika 9.1. Netočne dimenzije odljevka zbog nepravilnog odabira stezanja u krutom stanju pri izradi modela

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Stezanje u krutom stanju (modelarsko ili linearno stezanje) prema kojem je izrađen model ne odgovara stvarnom stezanju odljevka, odnosno legure u krutom stanju.

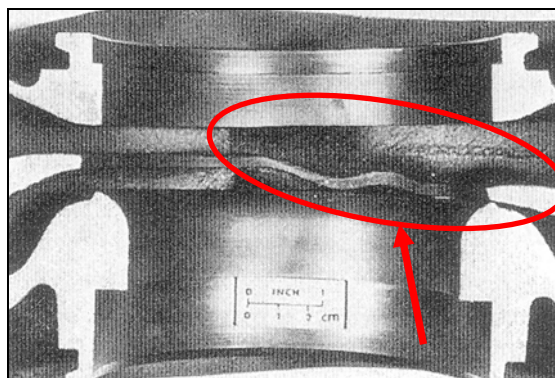
#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) mjerenjem ustanoviti stvarno stezanje odljevka u krutom stanju i prema tome korigirati model.

### 9.2 Deformacija (iskrivljenje) odljevka

#### *Opis*

Iskrivljenje je promjena oblika odljevka zbog deformacije koja prelazi konstrukcijom zadane granice tolerancije (slika 9.2). Budući da iskrivljenje nije uvijek vidljivo golim okom, apsolutna sigurnost je moguća tek provjerom dimenzija. U tom slučaju provjera dimenzija odljevka mora se provesti tek nakon posljednje faze proizvodnje, npr. nakon čišćenja ili nakon toplinske obrade. Pojavljuje se neovisno o vrsti legure, postupku kalupljenja ili proizvodnje, te pri doradi kao što je zavarivanje ili toplinska obrada. Ukoliko je iskrivljenje značajno i ne može se korigirati ili tolerirati odljevak se škartira.



Slika 9.2. Iskrivljenje kućišta turbopunjača od legiranog nodularnog lijeva uzrokovano toplinskim naprezanjima pri toplinskoj obradi

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Iskrivljenje odljevaka obično je uzrokovano naprezanjima, npr. zbog spriječenog stezanja (skupljanja) u kalupu. Ta naprezanja mogu biti toliko velika da pri istresanju kalupa deformiraju odljevak. Ako je temperatura odljevka pri istresanju povišena, ta naprezanja mogu uzrokovati i nastanak pukotina.

Neadekvatna konstrukcija odljevka koja uzrokuje neujednačeno, spriječeno stezanje odljevka tijekom skrućivanja i hlađenja, može rezultirati iskrivljenjem i u danjem tijeku nastanak pukotina (hladne pukotine).

Iskrivljenje često nastaje i pri dva najvažnija postupka dorade odljevaka – zavarivanju i toplinskoj obradi. Naprezanja i iskrivljenje, odnosno pukotine kao posljedica toga nastajale bi kada je dovođenje topline bilo prebrzo, odnosno ako se odljevci ne bi predgrijavali.

Pri toplinskoj obradi iskrivljenje može nastati kad se odljevci nakon žarenja, barem u području viših temperatura, brzo hlade.

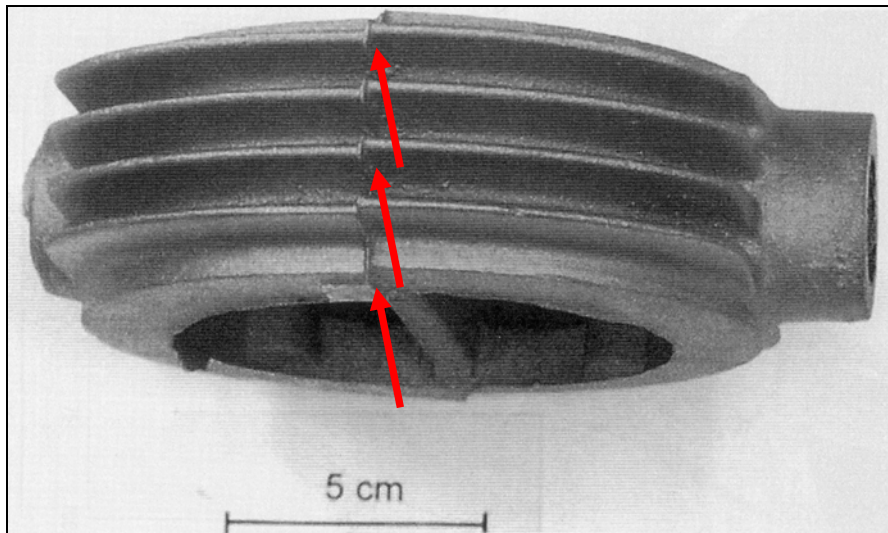
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) provjeriti ispravnost modela (konstrukcija modela, deformacije),
- b) osigurati konstrukciju odljevka koja jamči što manja naprezanja, što manje razlike u debljini stijenki i jednolične uvjete hlađenja,
- c) prijelazi između stijenki kod kojih postoji veća razlika u debljini ne smiju biti nagli,
- d) kod lijevanja u jednokratne pješčane kalupe obratiti pažnju na ometanje stezanja kod prečvrstih kalupa, valjanu sabijenost kalupa i spriječiti pojavu pregrijanih mjesta,
- e) kod visokotlačnog lijeva osigurati dovoljna skošenja za izbačaj, a izbacivače postaviti na debelostjena područja odljevka,
- f) pri zavarivanju polako unositi toplinu i što manju količinu, npr. uporabom tankih elektroda, sa strujom male snage i odgovarajućim redoslijedom zavarivanja. Plinsko je zavarivanje manje prikladno zbog velikih unosa topline - potrebno je provesti predgrijavanje,
- g) osigurati odgovarajuće parametre pri toplinskoj obradi. Prilagoditi brzinu hlađenja nakon toplinske obrade da ne nastanu nova toplinska naprezanja. Složeni odljevci i odljevci velikih razlika u debljini stijenke moraju se hladiti u peći.

### 9.3 Pomak modela, jezgre ili kalupa

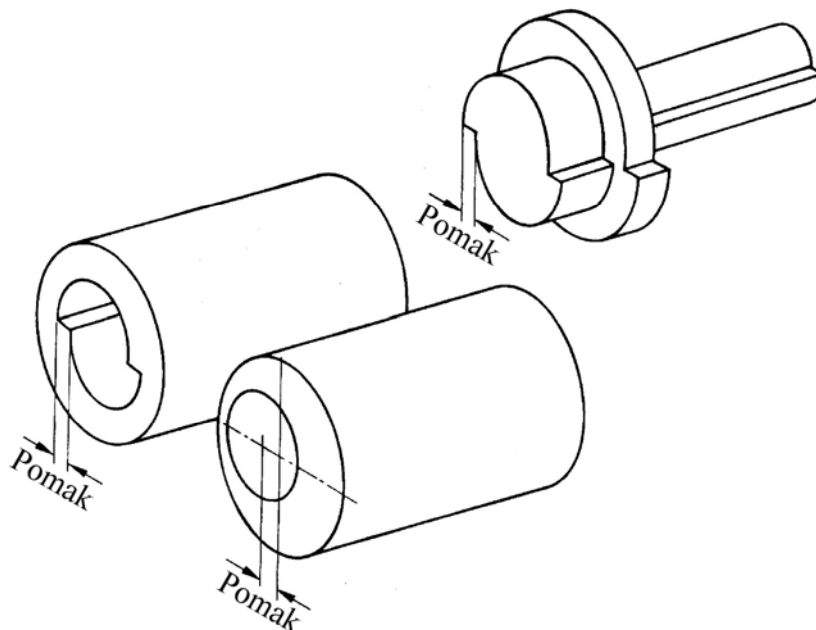
#### *Opis*

Ova greška nastaje zbog netočnog sklapanja dijelova modela, kalupa ili jezgrenika. Kod netočnog sklapanja modela ili kalupa odljevak izgleda kao da je bio podvrgnut smicajnom naprezanju paralelno diobenoj ravni (slika 9.3).



Slika 9.3. Pomak na odljevku zbog prevelike zračnosti vodilice modelnog sklopa

Kod pomaka jezgre dvije polovice šupljine u odljevku koja je formirana pomoću jezgre pokazuju relativni pomak paralelno diobenoj ravni jezgre (slika 9.4). Osim toga, može doći i do pomaka cijele jezgre (slika 9.4).



Slika 9.4. Shematski prikaz pomaka jezgre



*Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Uzrok pomaka su netočno centrirani modeli na modelnom sklopu (ploči), jezgrenici i kalupi, prevelika zračnost vodilice modelnog sklopa, kalupnika, jezgrenika, kokile ili kalupa za visokotlačno lijevanje te u jezgrenom osloncu.

*Sprečavanje nastajanja greške*

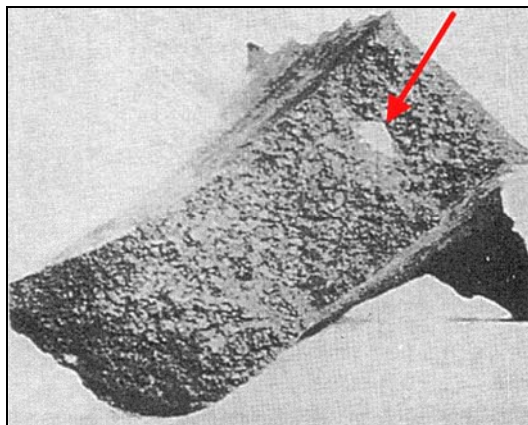
Ukloniti prethodno navedene uzroke.

## 10 UKLJUČCI I NEPRAVILNOSTI U STRUKTURI

### 10.1 Metalni ukljucci

#### *Opis*

Metalni ili intermetalni ukljucci različitih veličina čiji se kemijski sastav, struktura, svojstva i boja značajno razlikuju od osnovnog materijala (slika 10.1). Često se pojavljuju nakon strojne obrade.



Slika 10.1. Metalni ukljućak u segmentu odljevka od sivog lijeva

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Metalni i intermetalni ukljucci nastaju zbog prisustva stranih metalnih elemenata u taljevini. Intermetalni ukljucci mogu nastati reakcijom taljevine i metalnih nečistoća (strane nečistoće). U legurama aluminija za visokotlačno lijevanje, posebno Al-Si-Cu legurama koje sadrže željezo, mogu nastati intermetalni spojevi (Fe-Al-Mn-Si) i to lokalno ili preko cijele taljevine u obliku zrna ili igličastih kristala zbog preniske temperature u peći za održavanje temperature taljevine.

Metalni i intermetalni ukljucci mogu nastati zbog nepotpunog otapanja uložnih materijala ili ferolegura te cjepiva.

Tijekom skrućivanja taljevine mogu nastati netopljivi intermetalni spojevi koji segregiraju i koncentriraju se u preostaloj taljevini.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

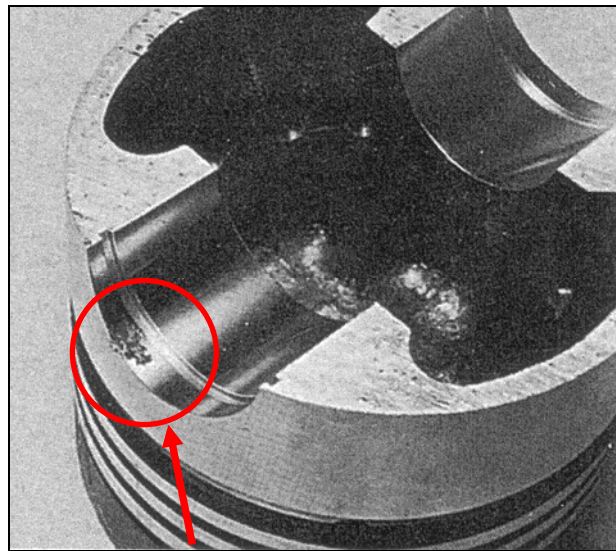
- a) uložni materijali moraju biti čisti bez prisustva stranih metala,
- b) dodavati male komade ferolegura i legura za predobradu u taljevinu. Taljevina mora imati dovoljno visoku temperaturu. Miješanjem se ubrzava taljenje i otapanje. Ne dodavati legure neposredno prije lijevanja,
- c) kod neželjeznih legura upotrijebiti odgovarajući premaz za ljevačke lonce od lijevanog željeza,
- d) kod kokilnog i visokotlačnog lijevanja osigurati dovoljno visoku temperaturu u peći za održavanje temperature,

- e) pažljivo provoditi lijevanje da se izbjegne ulaz u kalupnu šupljinu eventualno prisutnih nečistoća ili spojeva na dnu lonca.

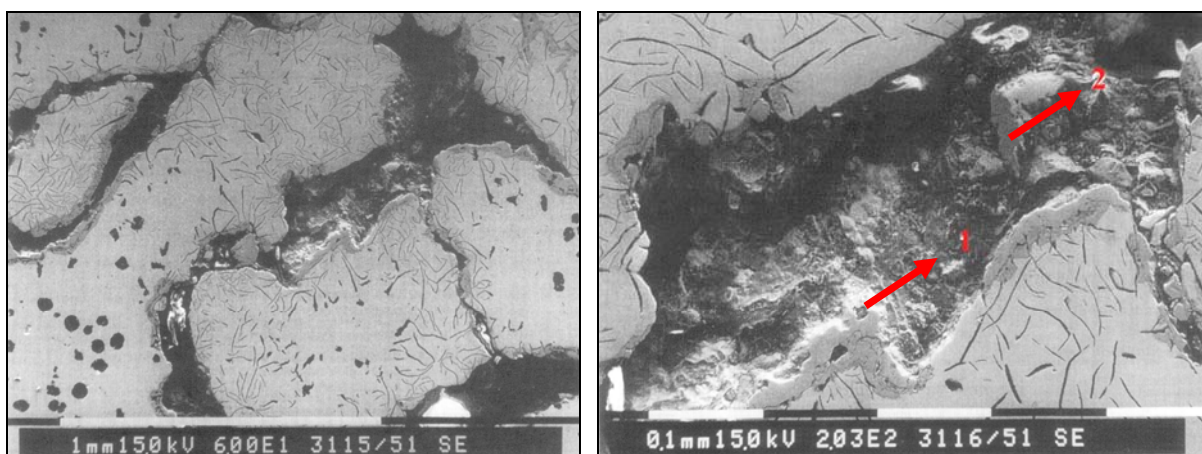
## 10.2 Uključci troske

### Opis

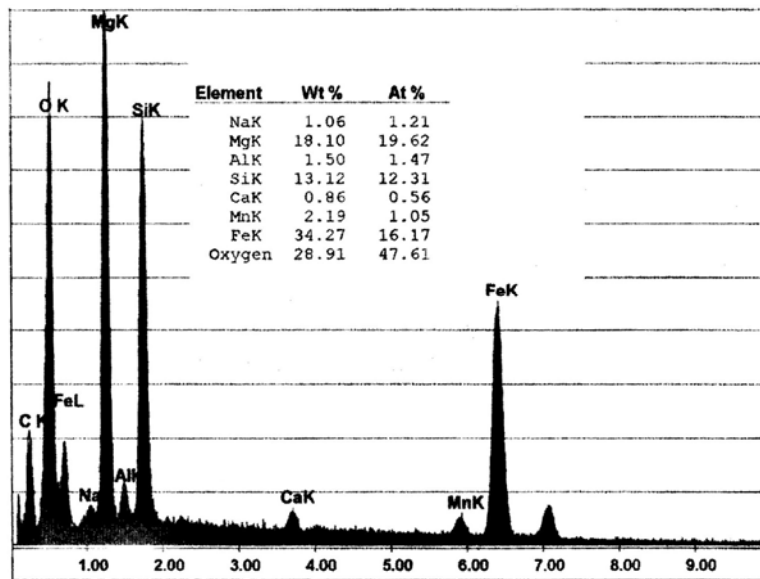
Nepravilni nemetalni uključci, odnosno uključci troske koja potječe iz agregata za taljenje ili nastaje pri obradi taljevine (slike 10.2 – 10.4). Pojavljuju se na površini ili u stjenci odljevka. Često se nalaze na gornjim površinama odljevka, uz jezgre i kalupne izbočine. Uključci na površini odljevka mogu se djelomično ukloniti tijekom čišćenja, pri čemu zaostaju nepravilne šupljine. Uključci u stjenci odljevka mogu se otkriti radiografskim ispitivanjem ili pri strojnoj obradi. Pojavljuju se kod svih ljevačkih legura.



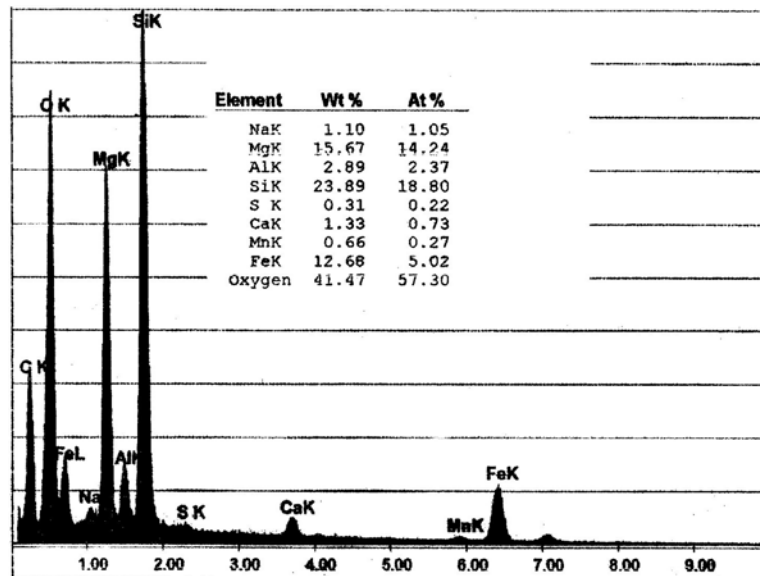
Slika 10.2. Kokilno odliven klip od aluminijske legure. Uključci troske otkriveni su tijekom strojne obrade



Slika 10.3. Snimka uključaka troske u odljevku od nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)



a)



b)

Slika 10.4. Analiza područja označenih brojevima 1 i 2 na slici 10.3 energetske disperzivne spektrometrom (EDS) - prisutni elementi i njihova koncentracija

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Mogući uzrok nastanka ove greške je troska iz peći koja pri ispustu dospije u lonac, a potom pri lijevanju u kalupnu šupljinu. Troska obično ispliva na gornju površinu odljevka ili se zadrži u kutovima ili uz jezgre i tijekom skrućivanja ostaje zarobljena u odljevku.

Uključci troske u odljevku mogu potjecati od obrade taljevine u loncu prije lijevanja. Npr. kod nodularnog lijeva zbog obrade taljevine u loncu predlegurom na bazi magnezija nastaje troska, odnosno magnezijski oksidi, sulfidi i silikati. Ako troska nije uklonjena i lijevanje nije pažljivo provedeno, troska može dospjeti u kalupnu šupljinu, što u konačnici rezultira nastankom oksidnih uključaka u odljevku.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

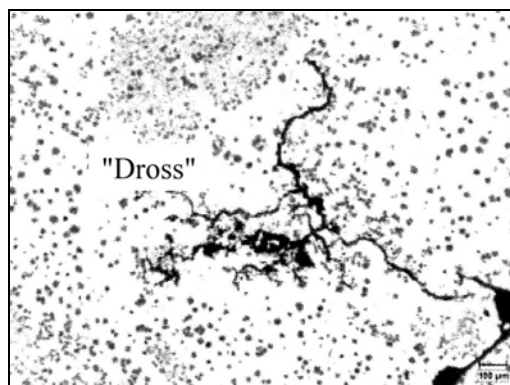
- a) koristiti čiste uložne materijale,
- b) održavati lonce čistima. Uklanjati ostatke i naljepe troske,
- c) izbjeći ulaznje troske u lonac prilikom ispusta taljevine iz peći,
- d) ukloniti trosku s površine taljevine u loncu,
- e) spriječiti ulazak troske iz lonca u kalup. Upotrijebiti lonce sa sifonskim izljevom i lonce sa izljevnim otvorom na dnu lonca,
- f) izbjegavati legiranje u loncu i skratiti zadržavanje taljevine u loncu,
- g) pravilno konstruirati i dimenzionirati uljevni sustav. Obrati pažnju na konstrukciju i dimenzije uljevne čaše i razvodima kao jedinim komponenti u kojima je moguće izdvajanje i zadržavanje čestica troske,
- h) održavati punu uljevnu čašu i spust tijekom lijevanja u kalup. Spriječiti turbulencije tijekom lijevanja,
- i) upotrijebiti filtre i troskolovke u uljevnom sustavu,
- j) osigurati optimalni položaj odljevka u kalupu. Površine odljevka koje će se strojno obrađivati smjestiti u donju polovicu kalupa.

### **10.3 Nemetalni uključci u odljevcima od nodularnog lijeva nastali zbog kemijskih reakcija u taljevini**

#### *Opis*

Nemetalni uključci u odljevku koji nastaju zbog kemijskih reakcija u taljevini prije ili tijekom lijevanja. Često se pojavljuju kod nodularnog lijeva neovisno o postupku kalupljenja i izgledaju kao uključci troske. U području oko greške nodularni grafit je često degeneriran. U američkoj literaturi ova greška poznata je pod nazivom „*dross*“. Uključci pijeska i troske su egzogeni materijali koje talina zahvaća tijekom lijevanja, a nečistoće koje nastaju u taljevini uslijed kemijskih reakcija predstavljaju endogene čestice.

Premda se pojavljuju kao vlaknaste čestice, kao što se to može vidjeti na slici 10.5, nemetalni uključci u odljevku koji nastaju zbog kemijskih reakcija u taljevini sastoje se od ravnih listića (slojeva) oksida koji nastaju kada je površina taljevine izložena kisiku tijekom manipulacije taljevinom, u uljevnoj čaši, u uljevnom sustavu i/ili u kalupu. Može se pronaći u svim područjima odljevka, ali najčešće u gornjim (površinskim) dijelovima.

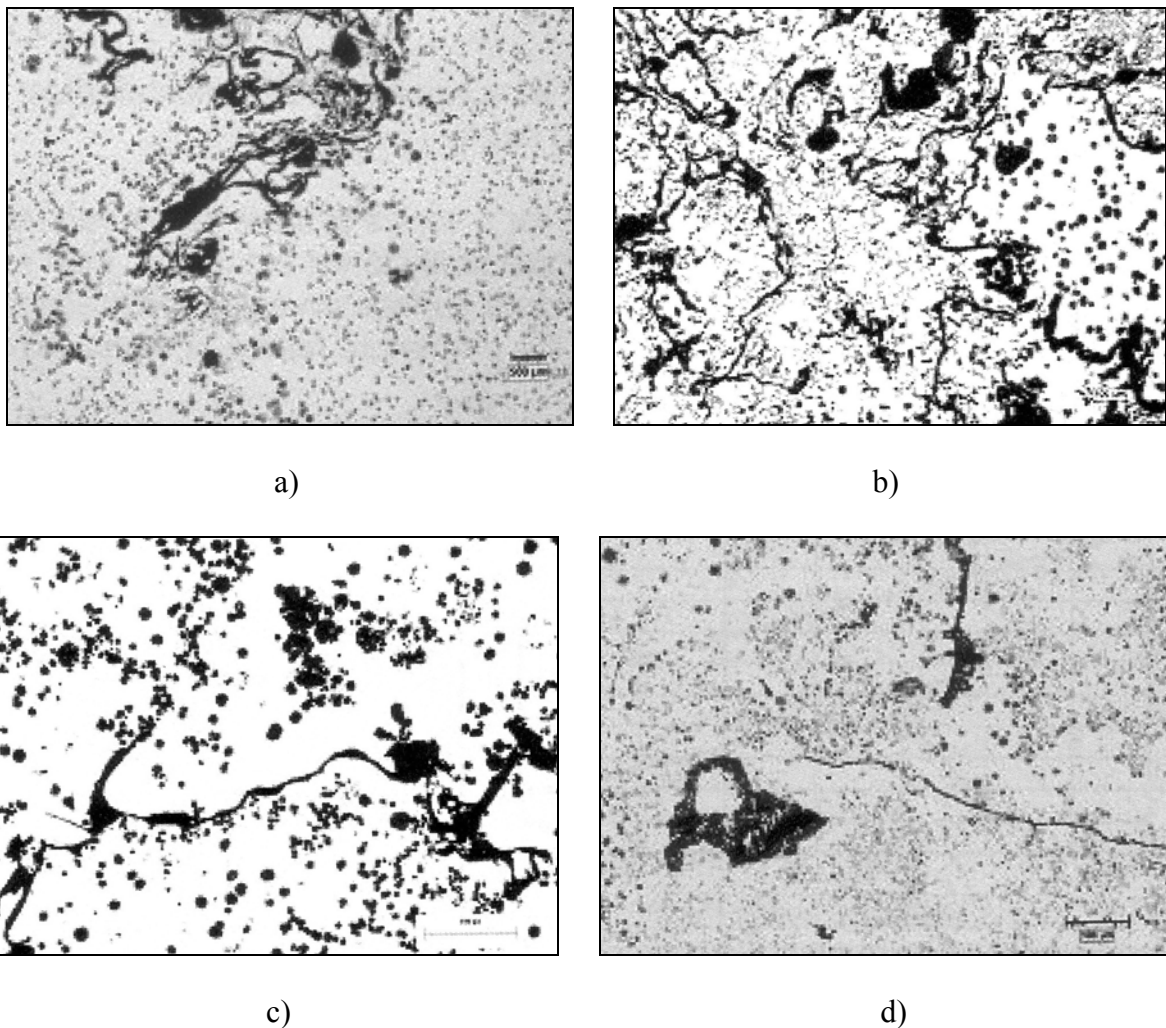


Slika 10.5. Tipični nemetalni uključci u odljevku od nodularnog lijeva nastali zbog kemijskih reakcija u taljevini

Kada se nalaze u kritičnim područjima odljevka, uključci, odnosno nečistoće koje su nastale u taljevini zbog kemijskih reakcija imaju izrazito štetan utjecaj na mehanička svojstva (pad čvrstoće, izduženja i žilavosti). Dinamička čvrstoća konstrukcijskog elementa znatno se smanjuje zbog prisutnosti ovih uključaka, pri čemu za nastanak pukotine nije odlučujuća njihova količina, već općenito njihova prisutnost.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Na slici 10.6 prikazano je još nekoliko metalografskih snimki mikrostrukture odljevaka od nodularnog lijeva kod kojih su prisutni nemetalni uključci zbog kemijskih reakcija u taljevini. U osnovi radi se o mješovitom spoju magnezij oksida/sulfida/silikata ( $MgO/MgS/MgSiO_3$ ).



Slika 10.6. Primjeri nemetalnih uključaka u odljevcima od nodularnog lijeva koji su nastali zbog kemijskih reakcija u taljevini

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, najčešće se provodi obradom primarne taljevine predlegurom čiji je glavni sastojak magnezij. Magnezij dodan u primarnu taljevinu najprije dezoksidira i odsumporava taljevinu prije stvaranja uvjeta potrebnih za modifikaciju (nodularizaciju) grafita.

Produkt dezoksidacijskog djelovanja magnezija je vrlo stabilni spoj bijele boje (MgO). Ovaj spoj ima visoku temperaturu taljenja zbog čega ostaje u krutom stanju, nisku gustoću i nisku topljivost u željezu. MgO nastoji isplivati na površinu taljevine u loncu. Ako prilikom lijevanja ove čestice dospiju u kalup, one će isplivati i akumulirati se na gornjim površinama odljevka ili mogu biti zahvaćene unutar odljevka kao štetni nemetalni uključci.

Produkt odsumporavajućeg djelovanja magnezija je spoj MgS. Ovaj spoj ima nisku gustoću i nastoji isplivati na površinu taljevine u trosku. Budući da se radi o relativno nestabilnom spoju, MgS se spaja s kisikom stvarajući MgO pri čemu se oslobađa sumpor koji se može vratiti natrag u taljevinu i ponovo vezati s magnezijem. Ovaj ciklus dezoksidacije i odsumporavanja nastavlja se i smanjuje efektivni magnezij potreban za održavanje nodularnog oblika grafita te promovira stvaranje troske, a time i nemetalnih uključaka u odljevku.

Dodatkom predlegure na bazi magnezija u taljevinu unose se i drugi elementi, poput silicija, aluminijska i rijetkih zemalja (posebno Ce) koji potiču dezoksidaciju i/ili odsumporavanje, a time i stvaranje troske, odnosno nemetalnih uključaka u odljevku.

Iz navedenog proizlazi važnost uklanjanja troske sa površine taljevine nakon obrade predlegurom na bazi magnezija te prije cijepjenja i lijevanja u kalupe.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

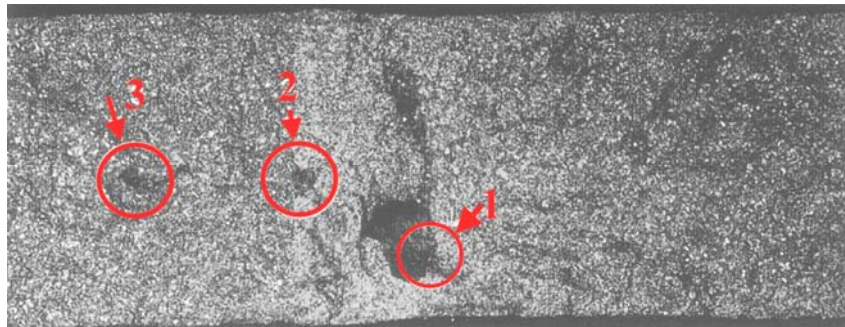
- a) osigurati dovoljno vremena nakon obrade taljevine predlegurom da bi reakcijski produkti mogli isplivati na površinu taljevine,
- b) minimalizirati turbulencije tijekom transporta taljevine u loncu i lijevanja. Minimalizirati turbulencije u uljevnom sustavu,
- c) rabiti posebne ljevarske lonce (sifonski izljev),
- d) ugraditi filtre u uljevni sustav. Spust održavati punim tijekom lijevanja,
- e) dodati sredstva koja vežu trosku (nastale reakcijske produkte),
- f) izbjeći previsok rezidualni sadržaj magnezija. Rezidualni sadržaj magnezija iznad 0,050% značajno povećava mogućnost nastajanja ove greške,
- g) izbjeći niske temperature lijevanja ( $< 1350^{\circ}\text{C}$ ) jer povećavaju opasnost od stvaranja troske,
- h) rabiti čišći uložni materijal,
- i) obratiti pažnju na sredstva koja se dodaju u taljevinu, odnosno njihov sadržaj elemenata koji imaju afinitet prema kisiku,
- j) osigurati nizak sadržaj kisika i sumpora u primarnoj taljevini,
- k) smanjiti izloženost taljevine zraku (kisiku),
- l) dodati dovoljno ugljene prašine u kalupni materijal da bi se u kalupu ostvarila redukcijaska atmosfera.



## 10.4 Oksidni uključci

### *Opis*

Oksidi (nemetalni uključci) u odljevku koji mjestimično prekidaju osnovnu strukturu čime nepovoljno utječu na statičku i dinamičku čvrstoću te istežanje (slike 10.7 i 10.8). Oksidi kao nemetalni uključci, često zajedno s plinskim mjehurima, odnosno plinskom poroznošću, pojavljuju se često u čeličnom i nodularnom lijevu te posebno u odljevcima od aluminijskih legura zbog velike sklonosti ka stvaranju oksida i to neovisno o postupku kalupljenja. Oksidni uključci vidljivi su na metalografskoj snimci, ali i golim okom na površini odljevka.



Slika 10.7. Tanki oksidni uključci na prijelomnoj površini kokilno odlivenog odljevka od Al-Si legure, povećanje 12x

Oksidni uključci kod čeličnog lijeva potječu od produkata dezoksidacije i obično se sastoje od spojeva  $MnO-Al_2O_3-SiO_2$ . Razlikuju se po sastavu, izgledu i načinu nastanka. Ako sadrže veće udjele  $SiO_2$  okruglog su oblika i staklastog izgleda. Kako raste udio  $MnO$  uključci postaju veći, a njihova građa heterogenija.

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

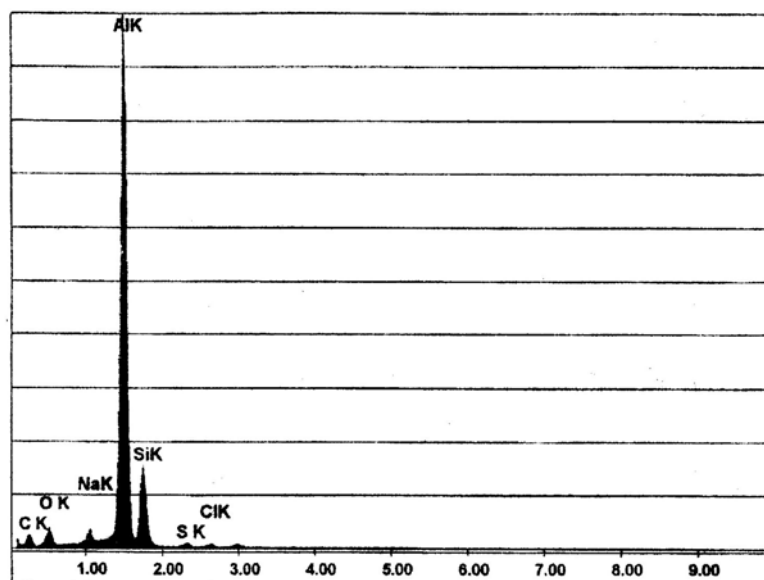
Uzrok nastanka oksidnih uključaka jesu kompleksne reakcije koje se pojavljuju u samoj taljevini između njenih različitih konstituenata ili između legure i njenih oksida, atmosfere te obloge lonca ili kalupa. Ove reakcije često su rezultat uvjeta pri taljenju, ali i kvalitete upotrijebljenih sirovina.

Aluminij, silicij, magnezij i primjerice krom, a tako i legure koje sadrže veće udjele tih elemenata, zbog svog velikog afiniteta prema kisiku posebno su skloni stvaranju netopljivih oksidnih filmova pri taljenju, punjenju ljevarskog lonca i lijevanju. Stupanj oksidacije kisikom iz zraka, osim što ovisi o koncentraciji i tlaku, u praksi ponajprije ovisi o temperaturi i vremenu. Na tu ovisnost o temperaturi i vremenu treba obratiti pažnju pri taljenju te pri održavanju topline (temperature) taljevine jer s porastom temperature taljevine i vremena zadržavanja na visokim temperaturama brzo raste sklonost ka oksidaciji.

Legure aluminija posebno su sklone oksidaciji. Oksidi aluminija i magnezija mogu dospjeti u taljevinu već i s primarnim zasipom, ali u većoj mjeri nastaju tek oksidacijom na površini taljevine zbog miješanja i prelijevanja čime se kida zaštitni film na površini taljevine što omogućuje difuziju kisika. Navedene tehnološke radnje imaju još i daljnje neželjene posljedice, a to je raspad oksida u male i fine čestice koje potom ostaju dulje vremena suspendirane u takvom obliku. U najpovoljnijem slučaju zbog razlike u gustoći nakon duljeg vremena potonu na dno ili isplivaju u trosku.



a)



b)

Slika 10.8. a) snimka područja označenog brojem 1 na slici 10.7 pretražnim elektronskim mikroskopom, b) analiza označenog područja na slici a) energetske disperzivne spektrometrom (EDS) – prisutni elementi

Nestručno lijevanje (nejednoličan mlaz taljevine) i turbulentno punjenje kalupa (npr. prevelika visina lijevanja, usisavanje zraka, prevelika brzina strujanja) ili zahvaćanje oksida i troske u taljevinu uobičajeni su uzroci nastanka ljevarskih grešaka. Uključci stranih čestica, zahvaćeni pijesak od nestručno zbijenih kalupa te nemetalni materijali suspendirani u taljevini koji ne mogu isplivati na površinu mogu biti uzrokom nastanka oksidnih uključaka.

Kod nodularnog lijeva pri reakciji magnezija s taljevinom nastaju razni reakcijski produkti, među kojima i magnezijski oksid koji može biti uzrokom nastanka oksidnih uključaka u odljevku (vidi poglavlje 10.3).

Oksidi se također ubrajaju među najznačajnija onečišćenja u čeličnom lijevu. Njihov je nastanak tijesno povezan s postupkom taljenja te dezoksidacijom. Građa i stvaranje oksida ovise o dezoksidacijskim sredstvima i postupku dezoksidacije te imaju različit utjecaj na kakvoću odljevka. Prekomjerna dezoksidacija, kratko vrijeme zadržavanja taljevine nakon dezoksidacije i visoke temperature povećavaju stupanj onečišćenja čelika.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) upotrijebiti sirovine sa što manje oksidnih uključaka u unutrašnjosti te sa što manje oksida na površini (korozijski produkti),
- b) koristiti čist povratni materijal u zasipu,
- c) spriječiti oksidaciju mlaza taljevine pri lijevanju (lijevanje s manje visine uz neprekidan mlaz),
- d) optimizirati uljevni sustav i održavati ga punim tijekom lijevanja. Smanjenjem brzine strujanja smanjuju se turbulencije i mogućnost usisavanja zraka u taljevinu, a time i nastajanje oksidnih uključaka,
- e) osigurati optimalno sabijanje pješčanih kalupa i izbjeći njihovu eroziju, posebno u uljevnom sustavu,
- f) redovito čistiti alate za obradu taljevine i peć (naljepe na obzidu peći),
- g) kod nodularnog lijeva održavati sadržaj magnezija što je moguće nižim ovisno o sadržaju sumpora, smanjiti sadržaj aluminijske, optimizirati cijepljenje,
- h) provesti odgovarajuću dezoksidaciju taljevine čeličnog lijeva.

## **10.5 Uključci pijeska**

### *Opis*

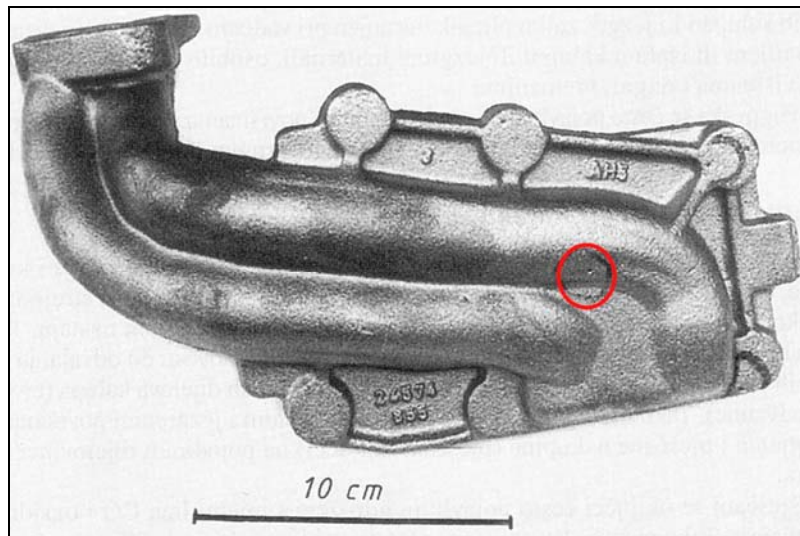
Čestice kalupnog ili jezgrenog pijeska u strukturi ili u površini odljevka (slike 10.9 i 10.10), npr. slobodni kalupni pijesak koji pri sastavljanju kalupa nije bio uklonjen, pijesak koji se odvojio pri vađenju modela, te pri lijevanju odvojeni ili isprani kalupni ili jezgrena materijali, posebno pri lijevanju s velikih visina i dugim vremenima. Može nastati kod svih ljevarskih legura, ali najčešće kod legura na bazi željeza, koje se lijevaju u pješčane kalupe. Na površini odljevka mogu se uočiti golim okom ili tek nakon strojne obrade. Ako su uključci pijeska prisutni na ili u površini odljevka, površina je gruba i hrapava.

Uključci pijeska spadaju u grupu ljevarskih grešaka koje se najčešće pojavljuju i koje ne dovode uvijek do škarta. Budući da negativno utječu na kakvoću odljevka, potrebna je odgovarajuća dorada.

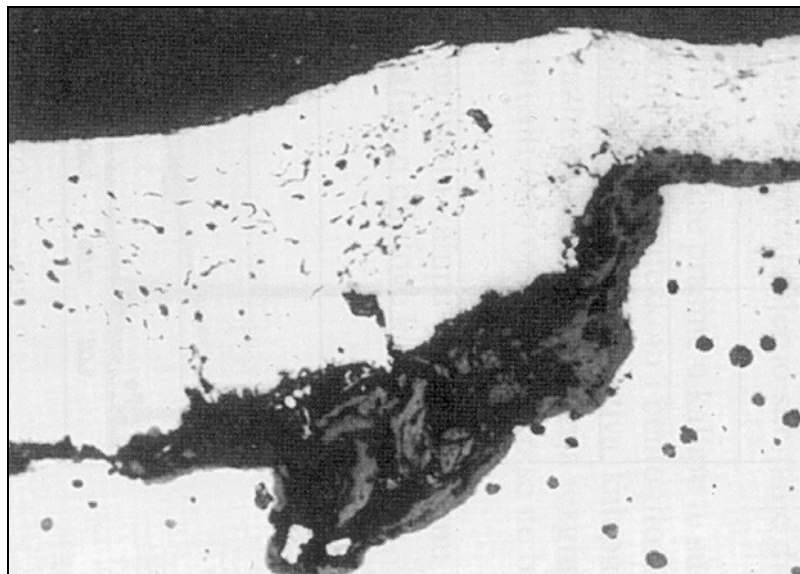
### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Pretpostavi li se uredan i čist rad te besprijekorne modelne naprave i kalupilice, ova ljevarska greška nastaje zbog erozije kalupne površine strujom taljevine koja je u kontaktu s njom i termomehaničkih opterećenja koja pri tome nastaju. Jaka tlačna i smična naprezanja dijelova kalupa i jezgre mogu dovesti do odvajanja pojedinih pješčanih zrna (ispiranje), odnosno otkidanja većih dijelova kalupa. Tako nastaju prekidi na glatkim kalupnim i

jezgrenim površinama, odebljanja i pješčane nakupine (uključci pijeska) na pojedinim dijelovima odljevka.



a)



b)

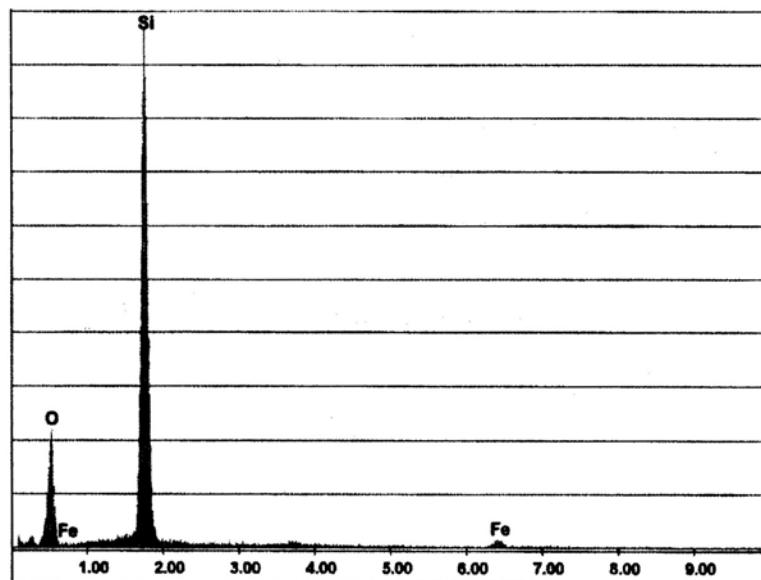
Slika 10.9. a) uključci pijeska u odljevku od nodularnog lijeva, b) metalografska snimka mikrostrukture odljevka u području greške (označeno na slici a)

Pješčani uključci često se pojavljuju zajedno s mjehurima CO i oksidnim uključcima. U kombinaciji s troskom i metalnim oksidima mogu ostati ispod površine odljevka i postati vidljivi tek nakon strojne obrade.

Nedovoljna otpornost kalupnog materijala prema eroziji također je čest uzrok ove greške. Premalen udio vode i veziva i pregruba zrnatost kvarcnog pijeska smanjuju otpornost kalupne površine prema abraziji.



a)



b)

Slika 10.10. a) snimka greške označene na slici 10.9a pretražnim elektronskim mikroskopom, b) analiza označenog područja na slici a) energetske disperzivne spektrometrom (EDS) – prisutni elementi

Zbog odloma dijelova kalupa cijeli segmenti kalupa mogu završiti u odljevku. Nepravilno konstruiran uljevni sustav (nepovoljno postavljena ušća, predugi putovi tečenja taljevine, turbulencije) te predugo trajanje i prevelike visine lijevanja pospješuju eroziju kalupa i time stvaranje uključaka pijeska.

Premalen udio veziva povezan s nedovoljnim očvršćivanjem te djelomično velik udio regeneriranog pijeska, najčešći su uzroci ovih grešaka kod kalupa i jezgara kod kojih se kao vezivo primjenjuju razne smole.



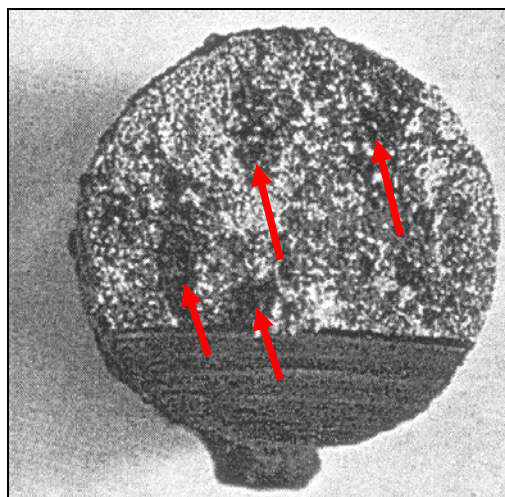
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) provjeriti modele. Povećati skošenja i zaobljenja modela, upotrijebiti sredstvo za lakše odvajanje modela od kalupa,
- b) provjeriti izvlačenje modela (modelne ploče) i eliminirati koso podizanje,
- c) pažljivo ispuhati kalupnu šupljinu i provjeriti valjanost dosjeda jezgre u jezgrenim osloncima,
- d) povećati plastičnost i sposobnost oblikovanja kalupnog materijala (povećanje udjela veziva i vode, optimizacija pripreme),
- e) osigurati jednolično sabijanje kalupa. Izbjeći prekomjerno sabijanje dijelova kalupa,
- f) kod smolom vezanih kalupa i jezgara eventualno povećati udio veziva. Kalupni materijal bolje sabiti,
- g) poboljšati tehnološke uvjete lijevanja pri punjenju kalupa (smanjiti visinu i brzinu lijevanja), izbjegavati prejaki udar taljevine o dijelove kalupa i jezgre,
- h) optimizirati uljevni sustav. Izbjeći duge putove tečenja taljevine, turbulencije i velike brzine taljevine,
- i) kontrolirati svojstva kalupne mješavine (tlačna i smična čvrstoća itd.).

## **10.6 Crna mjesta na prijelomnoj površini odljevaka od nodularnog lijeva**

### *Opis*

Jasno izražena crna mjesta na prijelomnoj površini odljevaka od nodularnog lijeva (slika 10.11). Nepravilnog su oblika, a dimenzije mogu varirati od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Obično nastaju kod odljevaka sa stijenkom debljine iznad 25 mm i to najčešće u gornjim dijelovima odljevka. Prisutan je značajniji pad mehaničkih svojstava odljevaka.



Slika 10.11. Crne mrlje (mjesto) na prijelomnoj površini odljevka od nodularnog lijeva

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Uzrok nastanka crnih mrlja na prijelomnoj površini odljevka od nodularnog lijeva je previsok sadržaj oksida i sulfida u taljevini. Sulfidi magnezija i mangana, kao i oksidi magnezija, željeza i aluminijski izdvajaju se, koaguliraju i ostaju u odljevku tijekom skrućivanja.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

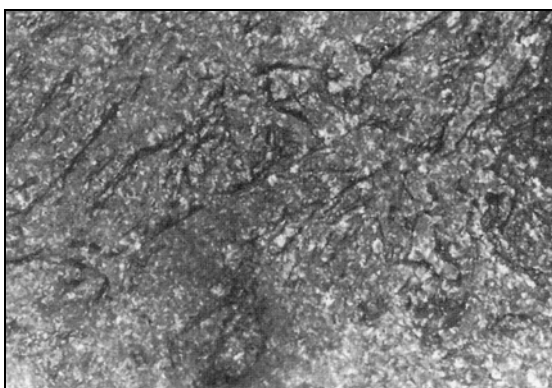
- a) ograničiti sadržaj sumpora u taljevini na  $< 0,01\%$  prije obrade predlegurom koja sadrži magnezij,
- b) sadržaj rezidualnog magnezija ne smije biti visok. Težiti ka minimalnim propisanim vrijednostima,
- c) ograničiti sadržaj aluminijski u taljevini,
- d) po mogućnosti povisiti temperaturu lijevanja,
- e) dodati sredstva koja promoviraju koagulaciju troske,
- f) upotrijebiti lonce sa sifonskim izljevom,
- g) izbjegavati turbulencije pri transportu i lijevanju obrađene taljevine.

## **10.7 Uključci sjajnog ugljika**

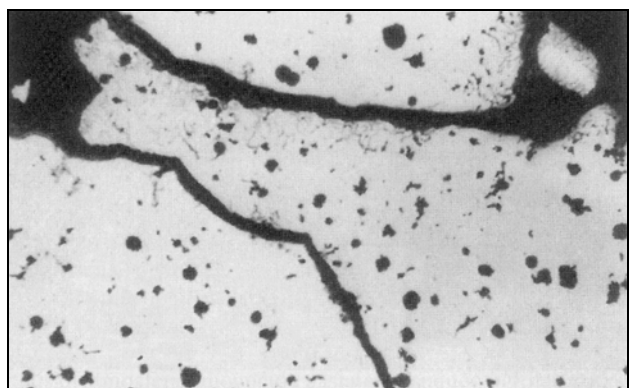
### *Opis*

Tanki sjajni naborani filmovi grafita vidljivi na površini odljevka u obliku brazdi (slika 10.12), a u unutrašnjosti stjenke djeluju kao diskontinuiteti u strukturi (razdvajanje materijala) zbog čega nepovoljno utječu na mehanička i dinamička svojstva odljevaka.

Ova greška uglavnom se susreće kod sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva i povezana je s lijevanjem u pješčane kalupe.



a)



b)

Slika 10.12. a) uključci sjajnog ugljika na površini odljevka zbog prevelikog udjela komponenti koje tvore sjajni ugljik, b) metalografska snimka mikrostrukture u području greške sa slike a)



### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Sredstva na bazi ugljika dodaju se u kalupne mješavine da bi se ostvarila redukcijaska atmosfera u kalupu i spriječila oksidacija metala. Ovi dodaci u kalupnom materijalu razvijaju pri zagrijavanju ugljikovodične plinove koji se u redukcijaskoj atmosferi razgrađuju i pri tome nastaje tzv. sjajni ugljik koji obavija zrna kalupne mješavine. Sjajni ugljik onemogućuje kvašenje kvarcnih zrna taljevinom što povoljno utječe na površinu odljevka, posebno sivih lijevanih željeza. On postaje fizikalna barijera formiranju silikata željeza, što onemogućuje zapečenje mješavine na odljevku. Točnije rečeno, ne stvara se željezni oksid koji bi reagirao sa  $\text{SiO}_2$  i stvorio lakotaljivi silikat željeza. Kao nosilac sjajnog ugljika obično se upotrebljava ugljena prašina (prah samljevenog bituminoznog uglja). Osim toga, dodatkom ugljene prašine smanjuje se mogućnost nastanka grešaka zbog ekspanzije zrna kvarcnog pijeska. Ako se pojavljuje slabo odvajanje, gibanje stjenki kalupa, penetracija, zapečenost, to upućuje na nedovoljnu količinu ugljene prašine.

Ako je količina dodataka iz kojih nastaje sjajni ugljik prevelika, zbog tlaka plina i turbulentnog punjenja kalupa može doći do odvajanja filmova sjajnog ugljika. Zbog razlika u gustoći, ti filmovi sjajnog ugljika pojaviti će se na površini odljevka ili tijekom skrućivanja u njegovoj strukturi.

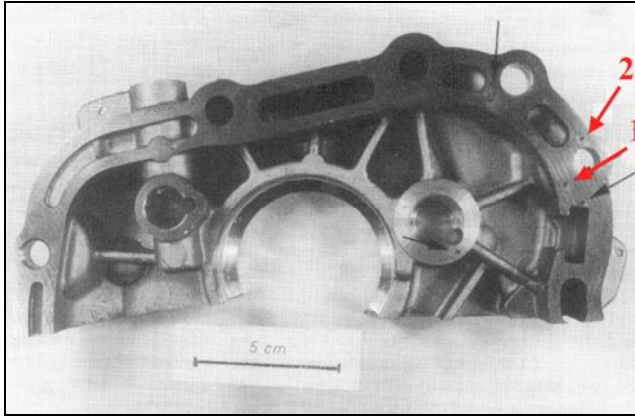
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) smanjiti nastajanje sjajnog ugljika u kalupnoj mješavini, tj. smanjiti količinu dodataka iz kojih nastaje sjajni ugljik ili upotrijebiti dodatke s manjom sposobnošću nastajanja sjajnog ugljika,
- b) smanjiti količinu uporabljenog jezgrenog pijeska u svježim kalupnim mješavinama,
- c) smanjiti dodatak veziva u jezgrenim mješavinama ili koristiti veziva s niskom sposobnošću nastajanja sjajnog ugljika,
- d) težiti ka smanjenju udjela regenerata u jezgrenoj mješavini,
- e) osigurati dobro odvođenje jezgrenih plinova,
- f) premazati jezgre,
- g) poboljšati propusnost kalupnog materijala za plinove. Eventualno smanjiti tlak sabijanja kalupa,
- h) izbjeći turbulencije u uljevnom sustavu.

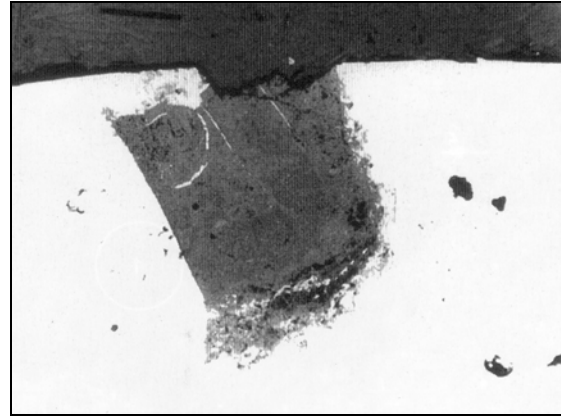
## **10.8 Uključci velike tvrdoće (tvrda mjesta) u aluminijskim legurama**

### *Opis*

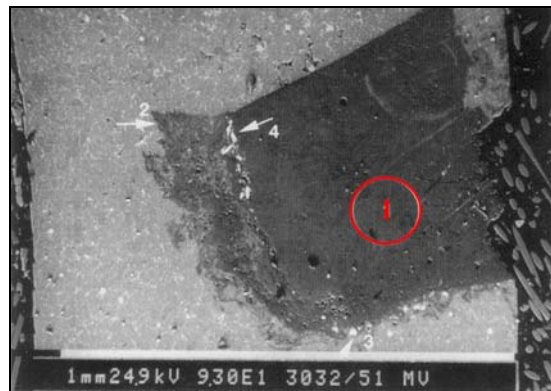
Uključci velike tvrdoće, više ili manje fino disperzirani, ponekad većih dimenzija, u mikrostrukturi odljevka (slika 10.13). Kod visokotlačno lijevanih odljevaka od aluminijskih legura mogu se nalaziti po cijelom odljevku. Obično se uočavaju tijekom strojne ili površinske obrade. Zbog velike tvrdoće otežavaju strojnu obradu odljevka i uzrokuju veliko trošenje alata. Nastaju nezavisno od postupka kalupljenja i često uzrokuju škartiranje odljevka je oslabljuju strukturu i pogoršavaju mehanička i dinamička svojstva odljevka.



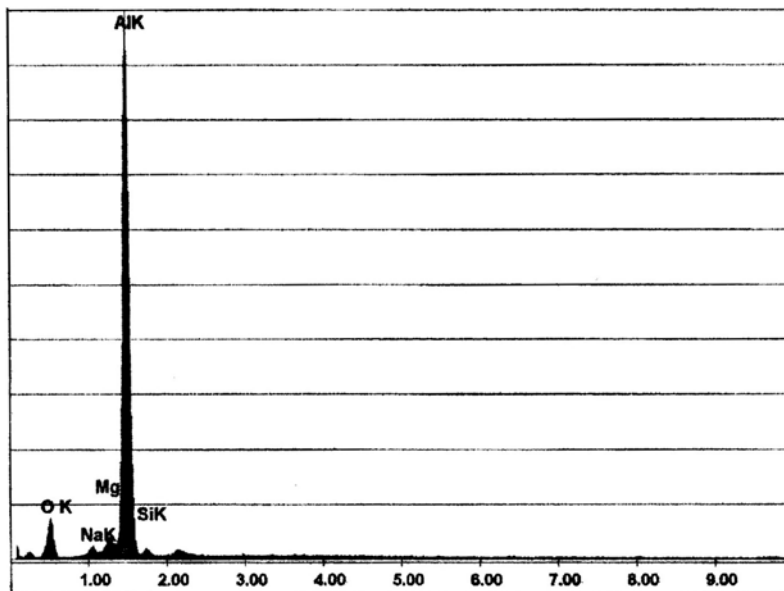
a)



b)



c)



d)

Slika 10.13. a) uključci velike tvrdoće u visokotlačno odlivenom odljevku od aluminijske legure, b) metalografska snimka mikrostrukture odljevka sa slike a) u području gdje je prisutan uključak velike tvrdoće označen brojem 1 na slici a), c) snimka uključka sa slike b) pretražnim elektronskim mikroskopom, d) analiza označenog područja na slici c) energetska disperzivnim spektrometrom (EDS) – prisutni elementi

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Uključci velike tvrdoće (tvrda mjesta) koji se mogu naći u aluminijskim legurama (npr. kod visokotlačnog lijeva) u osnovi se mogu podijeliti u dvije glavne skupine: metalni uključci i nemetalni uključci.

Metalni uključci najčešće su teškotaljivi metalni spojevi koji se izdvajaju iz taljevine, u prvom redu kod legura koje sadrže željezo i mangan. Slijedeći metalni uključci tipični su za odljevke od aluminijskog visokotlačnog lijeva:

$\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_5\text{Fe}_2$  – krhki kristali, reakcija čistog aluminijsa sa željezom  
 $\text{B-AlSiFe}$ ,  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{m-Al(Fe-Si)}$  – pločasti kristali koji se često na snimci uzorka čine kao urezani te izgledaju poput iglica,  
 $\alpha\text{-AlSi(FeMn)}$ ,  $\text{Al}_{15}(\text{FeMnCr})_2\text{Si}$ ,  $\text{c-Al(Mn-Fe)}$  – metalni spojevi različitog oblika.

Tvrđi metalni uključci nastaju uglavnom zbog preniske temperature taljevine u peći za održavanje temperature.

Nemetalni uključci koji često nastaju jesu:

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  – korund  
 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  – spinel  
 $\text{SiC}$  – silicij karbid,  
 $\text{SiO}_2$  – kvarc

U nemetalne uključke koji se pojavljuju pojedinačno ili vrlo rijetko, ubrajaju se:

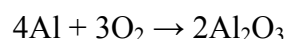
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $(\text{Mg,Fe})_2 \cdot \text{SiO}_3$ ,  $3 \cdot [\text{SiO}_4] \cdot \text{AlNa} \cdot \text{NaCl}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Navedeni nemetalni uključci nastaju oksidacijom aluminijsa pri taljenju, i to posebno pri prejakom miješanju taljevine i/ili pri previsokim temperaturama. Osim toga, aluminijski oksidi vrlo lako nastaju i dospijevaju u taljevinu ako se uloži previše povratnog lijeva. Oksid koji najprije nastaje ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) relativno je mekan, ali u određenom vremenu pod utjecajem topline dolazi do njegove pretvorbe u vrlo tvrdi modifikaciju  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , koja se naziva korund.

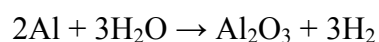
Opasnost od daljnjeg nastajanja oksida značajno raste u slučaju nestručnog rada s taljevinom. Stupanj oksidacije bitno ovisi o kakvoći uložka (veličina komada, vlažnost, onečišćenja uljem i masnoćama, sadržaju oksida), a tijekom taljenja o sastavu legure, temperaturi i trajanju taljenja, te o izvedbi peći, zagrijavanju i površini taljevine.

Oksidi u taljevini mogu nastati reakcijom :

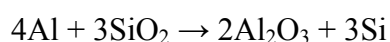
- s kisikom iz zraka, kidanjem površinskog sloja taljevine:



- s vlagom iz zraka (vlažni alati za obradu):



- reakcijom sa oblogom peći:



### *Sprečavanje nastajanja greške*

Sprečavanje nastajanja metalnih uključaka:

- a) održavati odgovarajuću temperaturu taljevine u peći za održavanje temperature. Izbjeći preniske temperature taljevine,
- b) ne dodavati krute materijale u peć za održavanje temperature jer dolazi do lokalnog pothlađivanja taljevine i stvaranja metalnih uključaka,
- c) obratiti pažnju na čistoću taljevine. Uklanjati okside jer djeluju kao centri kristalizacije za metalne uključke,
- d) filtrirati taljevinu,

Sprečavanje nastanka nemetalnih uključaka

- a) obratiti pažnju na čistoću uložnih materijala,
- b) obratiti pažnju na sastav legure (Zn i Mg pospješuju oksidaciju),
- c) obratiti pažnju na temperaturu i trajanje taljenja. Što je temperatura viša i taljenje dulje traje, oksidacija je veća,
- d) obratiti pažnju na miješanje taljevine. Što je jače miješanje, to je veća oksidacija,
- e) treba spriječiti reakcije s vatrostalnim materijalom,
- f) pri upotrebi lonaca od SiC spriječiti onečišćenje uključcima SiC,
- g) skratiti vrijeme taljenja,
- h) propuhivanjem taljevine inertnim plinom pospješiti isplivavanje oksidnih uključaka,
- i) primijeniti mjere za sprečavanje nastajanja oksidnih uključaka (vidi poglavlje 10.4 Oksidni uključci).

## **10.9 Widmanstättenski grafit**

### *Opis*

Vrlo sitan degeneriran grafit oštih rubova povezan s grafitnim listićima (slika 10.14).



Slika 10.14. Widmanstättenski grafit u mikrostrukтури sivog lijeva. Odljevak s debljinom stjenke 100 mm. Sadržaj olova 0,0042%, nagrizen o nitalom

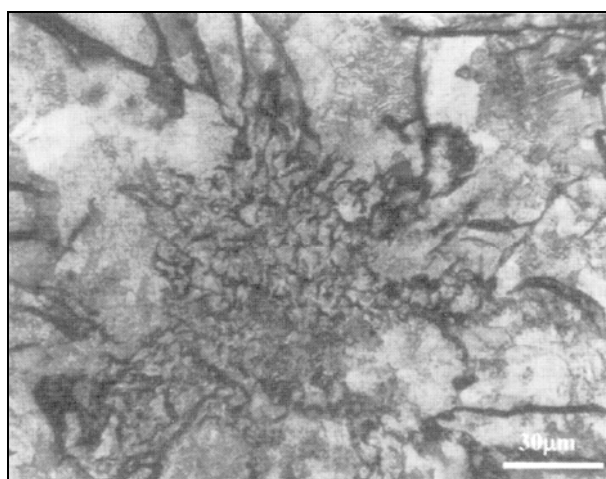
Često se, zbog izuzetno sitne morfologije ovog grafita, ne može detektirati tipičnim metalografskim ispitivanjem pri povećanju 100x, odnosno potrebno je primijeniti povećanja od 400 do 500x. Mehanička svojstva odljevka od sivog lijeva mogu biti 50 – 70% niža ako je u mikrostrukturi prisutan Widmanstättenski grafit.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Glavni uzrok nastanka Widmanstättenskog grafita je prisutnost olova u taljevini. Već pri sadržajima od 0,0005% olova dolazi do stvaranja Widmanstättenskog grafita.

Mehanizam nastajanja Widmanstättenskog grafita nije još u potpunosti poznat. Smatra se da olovo nije topljivo u austenitu i feritu te da Widmanstättenski grafit nastaje kao rezultat izlučivanja grafita duž preferiranih kristalografskih ravnina unutar austenita tijekom hlađenja s povišenih temperatura. Dakle, nastajanje Widmanstättenskog grafita odvija se reakcijom u čvrstom stanju.

Pored stvaranja Widmanstättenskog grafita, u prisutnosti olova mogu nastati i drugi degenerirani oblici grafita, kao što je mrežasti grafit (*eng. mesh graphite*) (slika 10.15). Mehanizam nastajanja i faktori koji utječu na njegovo stvaranje nisu još u potpunosti istraženi. Mrežasti grafit lakše se stvara u tankim stjenkama, dok se Widmanstättenski grafit stvara u sjenkama koje sporo skrućuju (debele stjenke), jer se time pospješuje segregacija olova.



Slika 10.15. Mrežasti grafit (*eng. mesh graphite*) u mikrostrukturi sivog lijeva.  
Sadržaj olova 0,0099%

Smanjenje vlačne čvrstoće zbog prisustva olova još je izraženije ako je prisutan povišen sadržaj sumpora i fosfora. Obradom taljevine elementima rijetkih zemalja (uglavnom cerijem) u količinama od ~ 0,01% prije lijevanja može se eliminirati štetan utjecaj olova i pratećih elemenata. Smatra se da se elementi rijetkih zemalja nagomilavaju oko grafita i time sprječavaju utjecaj olova na njegov rast. Ipak, najbolja solucija je ukloniti izvor olova u uložnom materijalu.

Istraživanja su pokazala da vlaga u kalupu ima utjecaj na stvaranje Widmanstättenskog grafita kod taljevina kontaminiranih olovom. Naime, kod odljevaka lijevanih u kalupe koji su izrađeni hladno očvršćujućim postupcima uočena je znatno manja količina Widmanstättenskog grafita te praktički eliminirano stvaranje mrežastog grafita, u odnosu na odljevke lijevane u kalupe izrađene od svježe kalupne mješavine. Uzrok tome je

vodik koji potječe iz vlage u svježoj kalupnoj mješavini. Naime, vodik doprinosi stvaranju Widmanstättenskog grafitu. Pored toga, ustanovljeno je da se ranijim istresanjem odljevaka iz kalupa (vruće istresanje) može značajno smanjiti, pa čak i u potpunosti spriječiti, stvaranje Widmanstättenskog grafitu.

Izvori olova mogu biti različiti. Pored komada elementarnog olova, koji je svakako najznačajniji uzročnik onečišćenja, olovo se može unijeti u peć i čeličnim otpadom. Čelici od kojih se zahtijeva visoka strojna obradivost sadrže olovo, premda se danas olovo zamjenjuje dodatkom bizmuta i sumpora. Pored čeličnog otpada potrebno je naglasiti da izvor olova može biti i otpad željeznih ljevova. Potencijalni izvor olova može biti i bakar koji se dodaje u cilju povećanja udjela perlita i čvrstoće.

Problem prisustva olova izražen je kod proizvodnje sivog lijeva putem indukcijskih peći jer olovo ostaje u taljevini. Ovaj problem znatno je manje zastupljen u kupolnim pećima zbog isparavanja ili oksidacije olova u zoni taljenja.

Bizmut utječe na energiju granične površine grafit/taljevina, odnosno rast grafitu. Poznato je da je brzina rasta grafitu obrnuto proporcionalna njegovoj energiji granične površine tijekom procesa rasta. Prema tome, ravnine s nižom površinskom energijom rastu prije ostalih ravnina. Površinsko aktivni elementi u taljevini mogu promijeniti brzinu rasta grafitu putem promjene energije graničnih površina kristala grafitu. Dodatkom bizmutu u taljevinu sivog lijeva dolazi do promjene energije granične površine grafit/taljevina. Potiče se rast u smjeru c-osi, a smanjuje rast u smjeru a-osi. Zbog toga dolazi do stvaranja degeneriranih oblika grafitu ili čak sferičnih oblika. Pri povišenim sadržajima bizmut može promovirati stvaranje Widmanstättenskog grafitu.

Telur izrazito štetno djeluje na oblik grafitu u sivom lijevu. On promovira stvaranje degeneriranih oblika grafitu te Widmanstättenskog grafitu.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) obratiti pažnju na strukturu uložnog materijala. Ne upotrebljavati sirovine koje sadrže olovo,
- b) kod upotrebe bakra kao legirajućeg elementa obratiti pažnju na sadržaj olova u njemu.

## 10.10 Tip D i E grafitnih listića u sivom lijevu

### *Opis*

Grafitni listići D tipa (slika 10.16a) i E tipa (slika 10.16b) su izrazito sitni i razgranati grafitni listići koji se pojavljuju u interdendritnim područjima pri čemu je tip E usmjerene (preferirane) orijentacije obzirom na odvođenje topline i usmjerenje primarnih dendrita, dok tip D pokazuje nasumičnu orijentaciju. Metalna osnova uglavnom je feritna, što rezultira značajnim padom vlačne čvrstoće sivog lijeva.



a)

b)

Slika 10.16. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva: a) D tip grafitnih listića, b) E tip grafitnih listića

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

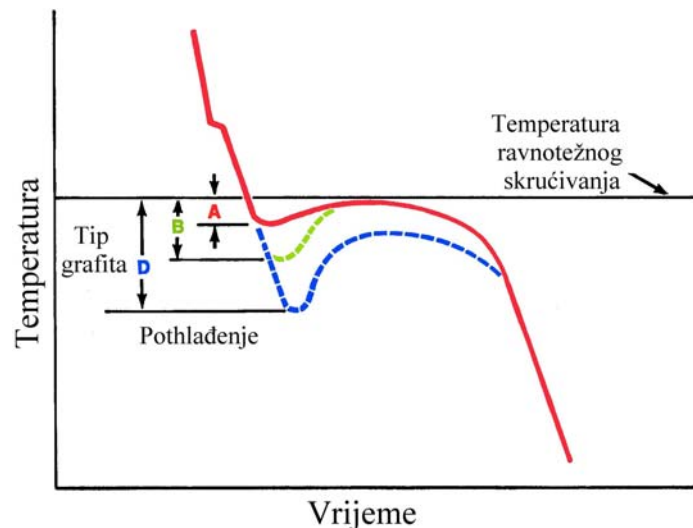
Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva jednim dijelom ovise o obliku, veličini, količini i raspodijeli grafitnih listića. Distribucija, tip i veličina grafitnih listića ovisi o temperaturi i brzini skrućivanja te nukleacijskom potencijalu taljevine. Prema normi ASTM A247 listićavi grafit je podijeljen u 5 klasa, odnosno tipova (A – E).

Grafitni listići D tipa (slika 10.16a) i E tipa (slika 10.16b) nastaju kad je pothlađenje taljevine dosta visoko (slika 10.17), ali ne i toliko veliko da prouzrokuje stvaranje karbida. Visoko pothlađenje upućuje na loš nukleacijski potencijal taljevine.

Oba tipa grafitnih listića pojavljuju se u interdendritnim područjima. To se objašnjava snažnom interdendritnom segregacijom MnS spojeva zbog njihove niske nukleacijske aktivnosti (postaju aktivna mjesta za nukleaciju grafita samo nakon velikog pothlađenja taljevine). Međutim, nakon cijepljenja taljevine cjepivom koje sadrži kalcij ili cjepivom koje sadrži stroncij, segregacija (Mn, X)S spojeva značajno se smanjuje i nastaje A tip grafita. Razlog za to je njihova visoka nukleacijska aktivnost u ranoj fazi skrućivanja zbog utjecaja kalcija i stroncija iz cjepiva.

Elementi kao što su titan i aluminij pospješuju stvaranje D i E tipa grafitnih listića. D tip grafita nastaje pri brzom hlađenju sivog lijeva s visokim sadržajem silicija.





Slika 10.17. Shematski prikaz krivulja hlađenja sivih ljevova s različitim morfologijama grafita

Uz ove oblike grafita, obzirom da se radi o izrazito sitnim i razgranatim listićima, pojavljuje se i ferit u mikrostrukтури, jer ovakve strukture rezultiraju značajnim smanjenjem putova difuzije ugljika. Zbog nastanka ferita u metalnoj osnovi prisutan je značajan pad vlačne čvrstoće, ali značajno poboljšanje strojne obradivosti. U tablici 10.1 prikazan je utjecaj tipa grafitnih listića na vlačnu čvrstoću sivog lijeva.

Tablica 10.1. Utjecaj tipa grafitnih listića na vlačnu čvrstoću sivog lijeva s 3,0 %C i 2,4 %Si. Ispitne palice promjera 30 mm

Broj ispitne palice	Tip grafita	Vlačna čvrstoća, MPa	Struktura metalne osnove
1	A	262	Srednje do grubi perlit
2	B	228	Grubi perlit i ferit
3	D	172	Uglavnom ferit

Analizom podataka u tablici 10.1 može se zaključiti da metalna osnova značajno utječe na vlačnu čvrstoću sivog lijeva. Osim toga, može se vidjeti da struktura metalne osnove u velikoj mjeri ovisi o tipu grafitnih listića. Pravilnim cijepljenjem taljevina iz kojih su izrađene ispitne palice 2 i 3 može se postići izlučivanje A tip grafitnih listića tijekom skrućivanja, što bi rezultiralo perlitnom metalnom osnovom, odnosno većom čvrstoćom. Kod alata za izradu staklene ambalaže, gdje je vrlo bitna površina takvog proizvoda, preferira se D tip grafitnih listića na površini.

Tip E grafitnih listića povezan je s jače izraženim podeutektičkim sastavima sivih ljevova (ekvivalent ugljika od 3,3 do 3,5) koji su podvrgnuti prilično visokim brzinama hlađenja. Kod tih sivih ljevova kod temperature eutektičkog skrućivanja preostaje samo mala količina taljevine za skrućivanje. Taljevina 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 grafita.

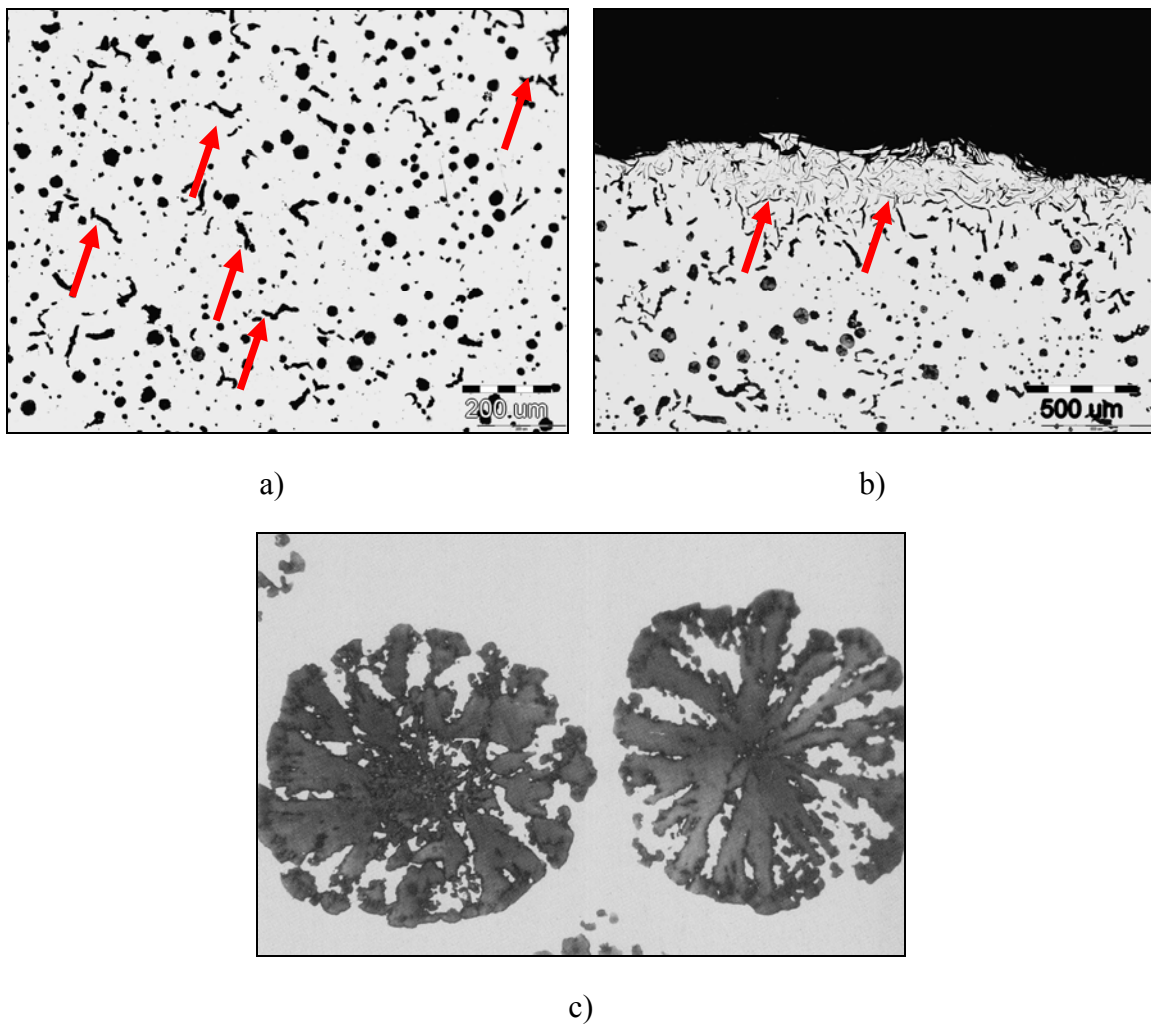
### *Sprečavanje nastajanja greške*

- poboljšati metaluršku kvalitetu taljevine (viši udio sivog sirovog željeza u uložnom materijalu),
- izbjeci previsoko pregrijanje taljevine i duga vremena zadržavanja na visokim temperaturama jer negativno utječu na nukleacijski potencijal taljevine,
- optimizirati cijepljenje taljevine. Time se smanjuje pothlađenje i omogućuje nastajanje grafitnih listića A-tipa te istodobno povećava vlačna čvrstoća odljevaka,
- izbjeci velike brzine skrućivanja, odnosno velika pothlađenja.

## **10.11 Nepravilni oblici grafita u nodularnom lijevu**

### *Opis*

Razni nepravilni (degenerirani) oblici grafita čiji oblik odstupa od oblika kugle (koraljni, eksplodirajući, čvoričasti, vermikularni i listićavi grafit) (slika 10.18).



Slika 10.18. a) vermikularni grafit u mikrostrukturi nodularnog lijeva, b) listićavi grafit u površinskom sloju odljevka od nodularnog lijeva, c) eksplodirajući grafit u mikrostrukturi nodularnog lijeva (previsok sadržaj magnezija – 0,082%)

Degenerirani oblici grafita negativno utječu na mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva. Ove greške ovise o kemijskom sastavu i metalurškom stanju taljevine, cijepljenju te prisutnosti antinodularizirajućih elemenata. Debljina stjenke odljevka ima značajan utjecaj na pojavljivanje ove greške.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

Postoji niz elementa koji već u minimalnim količinama otežavaju stvaranje grafitnih nodula, a samim tim utječu i na pad mehaničkih svojstava nodularnog lijeva. To su: aluminij, antimon, arsen, bizmut, kadmij, olovo, titan, cirkonij i selen. Ovi elementi su snažni površinsko aktivni elementi koji se nastoje koncentrirati na graničnoj površini grafit/taljevina i grafit/kruta faza, zbog čega imaju značajan utjecaj na morfologiju grafita.

Maksimalni sadržaj aluminija u nodularnom lijevu trebao bi biti  $< 0,03\%$  jer pospješuje stvaranje listićavog i vermikularnog grafita. Primjenom FeSiMg predlegure za obradu koja sadrži cerij može se neutralizirati štetno djelovanje aluminija.

Antimon iznad  $0,004\%$  onemogućuje stvaranje nodularnog grafita, posebno u debelostjenim odljencima. Akumulira se na površini grafitnih nodula i reagira s magnezijem, što umanjuje njegovu efikasnost. Cerij efikasno sprječava štetno djelovanje antimona, dok je antimon efikasan u sprječavanju sklonosti cerija ka stvaranju čvoričastog grafita u debelim stjenkama.

Bizmut iznad  $0,003\%$  pospješuje stvaranje listićavog grafita. Negativan utjecaj bizmuta može se spriječiti upotrebom predlegure za obradu FeSiMg koja sadrži cerij. Međutim, s druge strane, bizmut u malim koncentracijama snažno promovira nukleaciju grafita, što rezultira većim brojem grafitnih nodula, a nakon toga daljnje povećanje sadržaja bizmuta negativno utječe na oblik i broj grafitnih nodula. Veći broj grafitnih nodula utječe pozitivno na proizvodnju tankostjenih odljevaka jer se smanjuje mogućnost nastanka karbida. Zbog toga, bizmut je često sastavni dio cjepiva gdje je njegov sadržaj izbalansiran dodatkom rijetkih zemalja. Interakcijom bizmuta i elemenata rijetkih zemalja stvaraju se intermetalni spojevi koji mogu biti mjesta heterogene nukleacije grafita.

Kadmij potiče stvaranje listićavog grafita zbog čega se njegov sadržaj u nodularnom lijevu ograničava na  $< 0,002\%$ . Štetno djelovanje kadmija može se spriječiti primjenom predlegure za obradu FeSiMg koja sadrži cerij.

Olovo već pri sadržaju od  $0,002\%$  može rezultirati nastankom listićavog grafita. Ovaj efekt izraženiji je u debljim stjenkama. Primjenom predlegure FeSiMg koja sadrži cerij može se spriječiti štetno djelovanje olova.

Titan pospješuje stvaranja vermikularnog grafita i sužava područje između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Negativan utjecaj titana izraženiji je u debljim stjenkama. Zbog štetnog djelovanja, sadržaj titana trebao bi biti  $< 0,035\%$ .

Cirkonij pospješuje stvaranje vermikularnog grafita zbog čega se njegov sadržaj u nodularnom lijevu ograničava na  $< 0,01\%$ .

Selen pospješuje stvaranje karbida i onemogućuje stvaranje nodularnog grafita. Iz tog razloga sadržaj selena potrebno je održavati  $< 0,002\%$ .

Utjecaj antinodularizirajućih elemenata izraženiji je kod nižih brzina hlađenja (deblje stjenke) jer imaju više vremena na raspolaganju za difuziju na graničnu površinu grafit/taljevina. Kod velikih brzina hlađenja i niskih koncentracija antinodularizirajućih elemenata nema dovoljno vremena za njihovu difuziju na graničnu površinu grafit/taljevina: U tom se slučaju nukleacija i rast grafita odvija bez njihovog utjecaja iako su prisutni u taljevini.

Ostvareni rezidualni sadržaj magnezija ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Nizak rezidualni sadržaj magnezija rezultira nedovoljnom modifikacijom grafita (opasnost od stvaranja vermikularnog i listićavog grafita), odnosno smanjenom nodularnosti i manjim brojem grafitnih nodula. U konačnici to se odražava na pad svih mehaničkih svojstava nodularnog lijeva. Ukoliko je sadržaj sumpora i kisika u taljevini nizak tada je već  $\sim 0,018\%$  magnezija dovoljno za formiranje potpuno nodularne strukture grafita. Međutim, ciljani sadržaj rezidualnog magnezija u praksi kreće se od  $0,035 - 0,045\%$ . Previsok sadržaj magnezija također nije poželjan jer rezultira nastajanjem eksplozivnog grafita (slika 10.18c).

Nastajanje vermikularnog grafita (slika 10.18a) u svezi je s rastom austenita i faktorima koji utječu na formiranje uskih tekućih kanala u austenitu preko kojih je vermikularni grafit, gotovo u tijeku cijelog eutektičkog skrućivanja povezan s ostatkom taljevine. Prilikom skrućivanja austenit odbacuje elemente kao što su titan i aluminij u preostalu taljevinu zbog čega dolazi do njihovog nagomilavanja po granicama eutektičkih ćelija. Segregacijom elemenata kao što su titan, aluminij, antimon, bizmut (antinodularizirajući elementi) itd., po granicama eutektičkih ćelija dolazi do sniženja točke taljenja i nastanka tekućih kanala koji povezuju grafit s taljevinom. Pri tome nastaje degeneracija nodula i rast se grafita odvija preferirano u smjeru uskih tekućih kanala.

Loša metalurška kvaliteta, odnosno slab grafitizacijski i nukleacijski potencijal taljevine potpomaže stvaranje nepravilnih oblika grafita u nodularnom lijevu.

Cijepljenje ima značajan utjecaj na mikrostrukturna i mehanička svojstva nodularnog lijeva. Modifikacija postojećih uključaka u nodularnom lijevu u cilju stvaranja djelotvornih mjesta za nukleaciju grafita svakako je jedan od najvažnijih učinaka cijepljenja u nodularnom lijevu. Veći broj pogodnih mjesta za nukleaciju grafita rezultirati će većim brojem grafitnih nodula u mikrostrukтури. Pored toga, cijepljenje potpomaže stvaranju potpuno sferoidiziranih grafitnih nodula, što utječe na povećanje čvrstoće i duktilnosti.

Nepravilni oblici grafita u mikrostrukтури odljevaka od nodularnog lijeva mogu nastati i zbog reakcije taljevine s kalupnim materijalom. Pri reakciji sa sumporom iz kalupne mješavine nastaje MgS čime se smanjuje količina aktivnog magnezija za modifikaciju grafita, što u konačnici rezultira stvaranjem nepravilnih i nepoželjnih oblika grafita u rubnoj zoni odljevka (slika 10.18b).

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

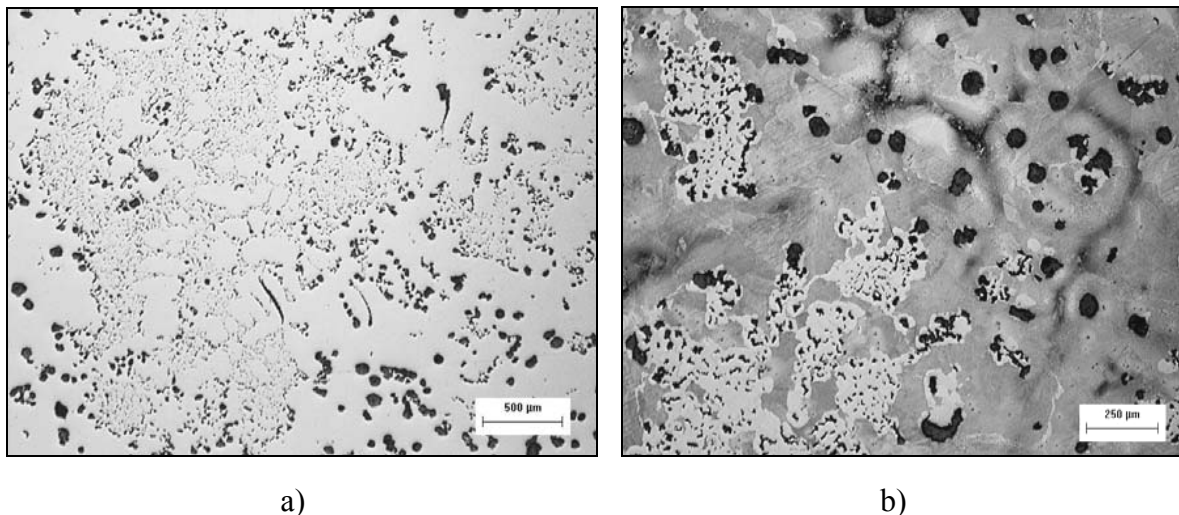
- a) obratiti pažnju na kemijski sastava uložnih materijala. Spriječiti ili minimalizirati unos antinodularizirajućih elemenata. Kontrolirati i razdvajati povratni materijal unutar ljevaonice,
- b) poboljšati metalurško stanje taljevine te grafitizacijski i nukleacijski potencijal,
- c) izbjegavati previsoke temperature i predugo zadržavanje taljevine na visokim temperaturama zbog negativnog utjecaja na nukleacijski potencijal,
- d) neutralizirati štetno djelovanje antinodularizirajućih elemenata upotrebom cerija ili elemenata rijetkih zemalja (odvojeni dodatak ili sastavni dio predlegure). Treba imati na umu da sadržaj cerija ne smije biti previsok jer pospješuje stvaranje čvoričastog grafita,
- e) ostvariti dovoljno visok rezidualni sadržaj magnezija u taljevini. Izbjeći previsoke i preniske sadržaje magnezija,
- f) izbjeći previsoke vrijednosti ekvivalenta ugljika,

- g) optimizirati cijepljenje taljevine. Primijeniti odgovarajuća cjeviva i cijepljenje u mlaz,
- h) spriječiti reakcije između kalupne mješavine i taljevine. Upotrijebiti odgovarajuće premaze za kalupe i jezgre,

## 10.12 Čvoričasti grafit

### *Opis*

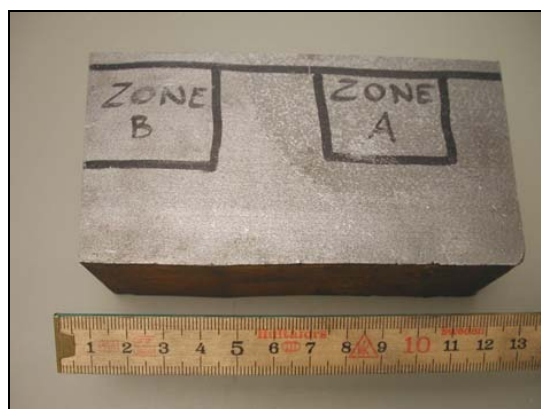
Čvoričasti grafit (engl. *chunky graphite*) prepoznaje se po lokalnom, vrlo finom ćelijastom rasporedu grafita, kratkih i zaobljenih listića (slika 10.19). Obično se nalazi u toplinskim čvorištima. Vizualno on izgleda kao sitni djelići grafita koji su raspršeni u metalnoj osnovi, ali su zapravo međusobno povezani unutar eutektičkih ćelija. Može se pojaviti kao interćelijasti grafit ili u klasterima koji su okruženi nodularnim grafitom. Osim toga, može biti grublji ili finiji. Kratka udaljenost između pojedinih grafitnih čvorića rezultira kratkim putovima difuzije i pospješuje stvaranje ferita u područjima u kojima se nalazi čvoričasti grafit, kao što je to prikazano na slici 10.19b.



Slika 10.19. a) čvoričasti grafit oko austenitnih dendrita, b) prisutnost ferita u područjima u kojima se nalazi čvoričasti grafit

Na presjeku se lako može uočiti područje u kojem se nalazi čvoričasti grafit po tamnoj boji ili sjeni, kao što je prikazano na slici 10.20.

Čvoričasti grafit čest je problem u debelostjenim odljevcima od nodularnog lijeva. Prisutnost čvoričastog grafita predstavlja veći problem u feritnim nodularnim ljevovima s visokim sadržajem silicija i austenitnim nodularnim ljevovima. On značajno utječe na mehanička svojstva odljevaka, zbog čega je potrebno izbjeći ili kontrolirati njegovo nastajanje. Visoko isprepletana priroda vlakana čvoričastog grafita u feritnoj metalnoj osnovi rezultira brzim padom duktilnosti i čvrstoće materijala, što vodi ka ranom oštećenju duž područja čvoričastog grafita.



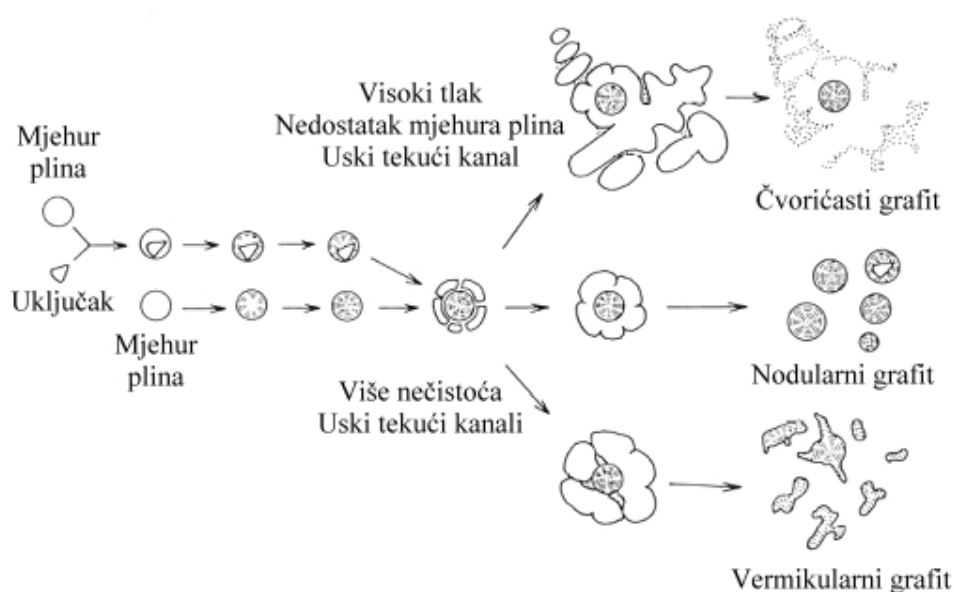
Slika 10.20. Čvoričasti grafit nalazi se u području koje je označeno slovom A. Iznad tog područja nalazilo se pojilo

### Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške

Čvoričasti grafit pojavljuje se u obliku mreže vrlo razgranatih i međusobno povezanih vlakana. Predloženo je više različitih teorija koje objašnjavaju nastajanje čvoričastog grafita.

Teorija „otkinutih komada“ (*eng. broken off pieces theory*) koju su postavili Karsay i Campomanes jedna je od starijih teorija prema kojoj čvoričasti grafit potiče od komada otkinutih od nodularnog grafita koji potom bivaju odneseni u taljevinu i u konačnici završavaju između dendritnih grana ili u područjima koja posljednja skrućuju, gdje nastaje čvoričasti grafit. Karsay zasniva ovu teoriju na svojim istraživanjima koja su pokazala da nodularni i čvoričasti grafit pokazuju slične radijalne strukture. Međutim, naknadna istraživanja čvoričastog grafita pretražnim elektronskim mikroskopom pokazuju da ova teorija nije zadovoljavajuća, jer je pronađeno da je čvoričasti grafit razgranat kao međusobno povezane faze koje se formiraju u ćelijasti oblik, a ne kao pojedinačni komadi grafita.

H. Itofuji je predložio teoriju, prikazanu na slici 10.21, prema kojoj je glavni uzrok nastanka čvoričastog grafita nedostatak plinskih mjehurića Mg raspoloživih kao slobodne površine u taljevini, pogotovo u sprezi s toplinskim čvorištima u debelostjenim odljevcima.



Slika 10.21. Shematski prikaz stvaranja degeneriranog grafita prema H. Itofujiu

Ova teorija zasniva se na pronalasku segregiranog Mg i Si na polaznim mjestima za stvaranje čvoričastog grafita. Međutim, mnogo je vjerojatnije da su kompleksni nemetalni uključci glavna mjesta za heterogenu nukleaciju grafita, a ne plinski mjehuri Mg.

P. C. Liu i suradnici kroz svoja su istraživanja ustanovili da je rast čvoričastog grafita sličan spiralnom rastu ravnine baze kristala grafita, s tim da su ćelije veće od nodularnog grafita. Oni smatraju da je čvoričasti grafit iskrivljeni (nepravilni) oblik nodularnog grafita koji vjerojatno potječe od mikrosegregacija, naročito Ce.

Z. Zhang i suradnici smatraju da je čvoričasti grafit interkristalni eutektički grafit koji nastaje na graničnoj površini austenit/taljevina na kraju eutektičke reakcije. Također ističu da je nastajanje čvoričastog grafita povezano s mikrosegregacijama. Smatraju da pored Ce i Mg, S i C promoviraju nastajanje čvoričastog grafita.

Istraživanja M. Gagnea pokazuju da se rast čvoričastog grafita odvija spiralnim mehanizmom rasta na ravnini baze. Pojavljivanje čvoričastog grafita u obliku vrpce s relativno konstantnim promjerom ukazuje da je brzina rasta na ravnini prizme vrlo niska, blizu nule. Ovakav spiralni rast zahtjeva visoke pokretačke sile. M. Gagne smatra da pokretačke sile čine prezasićenje ugljikom i pothlađenje. Promatranja završetaka vrpce čvoričastog grafita koje završavaju malom nodulom podupiru ovu teoriju da se nastajanjem i rastom čvoričastog grafita pokretačke sile smanjuju omogućujući također rast duž ravnine prizme. To objašnjava klastere čvoričastog grafita okružene nodularnim grafitom i zašto prisutnost čvoričastog grafita može biti lokalni fenomen. Veliko pothlađenje u kombinaciji s povoljnim nukleacijskim potencijalom pomaže objašnjenju zašto se u pojedinim slučajevima može pronaći povišeni broj nodula u toplinskim centrima kada nije prisutan čvoričasti grafit. Pozitivan utjecaj porasta temperature lijevanja ili upotrebe hladila snažno podupiru ovu teoriju nastajanja i rasta čvoričastog grafita.

Može se vidjeti da sve prikazane teorije predlažu da čvoričasti grafit raste u direktnom kontaktu s taljevinom, te da segregacija jednog ili više elemenata u kombinaciji s toplinskim čvorištima pospješuje lokalno stvaranje čvoričastog grafita prije nego nodularnog.

Utjecaj nikla na stvaranje čvoričastog grafita je izrazito velik, tako da se kod austenitnog nodularnog lijeva pojavljuje i u tankim presjecima odljevka.

### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) smanjiti vrijednost ekvivalenta ugljika (CE) i prilagoditi ga debljini stjenke odljevka. Kod debelostjenih odljevaka vrijednost CE treba biti  $< 4,1\%$ ,
- b) sniziti sadržaj silicija na  $2,0 - 2,2\%$  jer promovira stvaranje čvoričastog grafita. U prisutnosti nikla sadržaj silicija treba biti još niži za  $0,2 - 0,4\%$ ,
- c) u austenitnom nodularnom lijevu koji ne sadrži cerij stvaranje čvoričastog grafita spriječiti će se ako je ispunjen uvjet:  $\% C + 0,2\% Si + 0,06\% Ni \leq 4,4\%$
- d) sadržaj cerija održavati niskim ili prilagoditi ga sadržaju elemenata u tragovima,
- e) da bi se izbjeglo stvaranje degeneriranih oblika grafita, rezidualni sadržaj magnezija preporučljivo je održavati u granicama od  $0,040 - 0,050\%$ ,
- f) kontrolirani dodatak Sb, Sn i Cu promovira stvaranje perlita i prema tome sprječava stvaranje čvoričastog grafita. Oni promoviraju stvaranje perlita stvaranjem difuzijske barijere oko grafitnih nodula. Prema tome, ovi elementi smanjuju brzinu difuzije ugljika na čestice grafita i snižavaju stupanj prezasićenosti ugljikom na ravnini baze grafita koji je značajan za ubrzanje rasta promatranog u čvoričastom grafitu. Dodatak ovih elemenata je ispravno rješenje u slučajevima kada se metalna osnova treba sastojati od ferita i perlita. Kod kvaliteta gdje se zahtijeva potpuno feritna metalna osnova to može biti negativan pristup jer



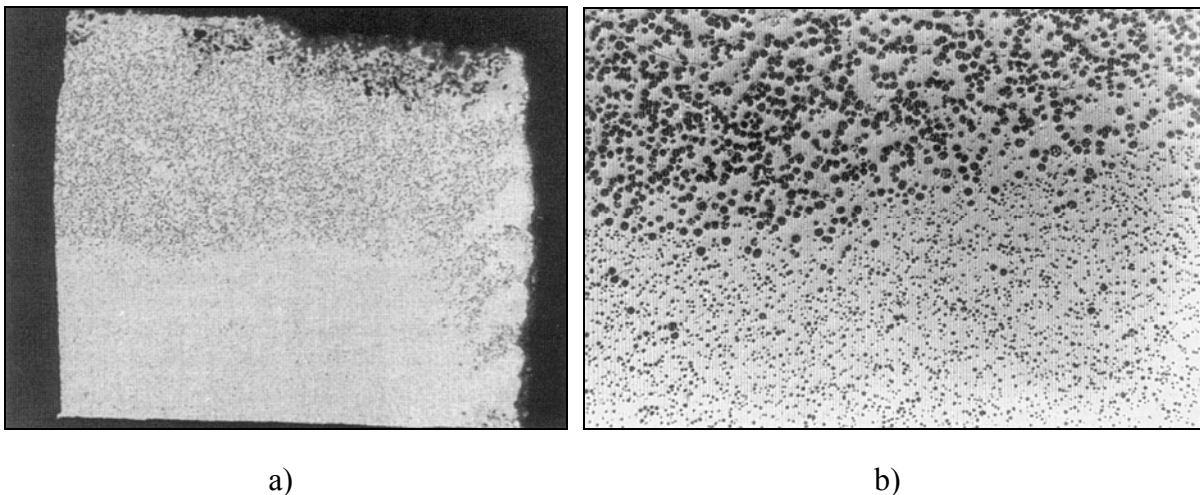
povišenje udjela perlita može imati štetan utjecaj na zamor i izduženje materijala. Kod feritnih nodularnih ljevova izbjegava se uporaba navedenih perlitizirajućih elemenata ili se njihov sadržaj održava vrlo niskim,

- g) vrlo često se Sb dodaje kod proizvodnje feritnih nodularnih ljevova u cilju izbjegavanja stvaranja čvoričastog grafita i vezanja elemenata rijetkih zemalja koji se nalaze u suvišku. U tom slučaju potrebno je pažljivo pronaći optimalni dodatak Sb ovisno o trenutnom sastavu taljevine i debljini stjenke da bi se ostvarili željeni rezultati. Obično se dodatak Sb kreće u granicama od 20 – 50 ppm i ne utječe na mehanička svojstva, odnosno na promjenu strukture. Osim što stvara spojeve sa elementima rijetkih zemalja, Sb usporava difuziju C i potpomaže nastajanje manjih i bolje oblikovanih nodula,
- h) ostvariti usmjereno skrućivanje i izbjeći stvaranje toplinskih čvorišta. Upotrijebiti hladila i kalupne materijale s povećanom sposobnošću odvođenja topline (cirkonski ili kromitni pijesak kao modelni pijesak),
- i) primijeniti kasno cijepljenje (u uljevni mlaz) da se postigne što veći broj grafitnih nodula i izbjegne pojava degeneriranih oblika grafita. Kod odabira vrste i količine cjepiva vrlo je važno imati na umu da većina uobičajenih cjepiva sadrži oko 70,0 %Si i prema tome utječe na vrijednost ekvivalenta ugljika,
- j) sadržaj sumpora u taljevini ne smije biti prenizak jer se u tom slučaju značajno smanjuje nukleacijski potencijal i povećava mogućnost nastanka čvoričastog grafita. Preporučljivo je sadržaj sumpora održavati iznad 0,005 %,
- k) uljevni sustav i sustav napajanja potrebno je također detaljno analizirati da bi se minimalizirala prisutnost toplinskih čvorišta,
- l) poboljšati nukleacijski potencijal taljevine i održavati ga sve do kraja lijevanja.

### 10.13 Flotacija grafita

#### *Opis*

Isplivavanje i koncentriranje grafitnih nodula u gornjem dijelu odljevka (slika 10.22).



Slika 10.22. Flotacija grafita u odljevku od nodularnog lijeva, debljina stjenke 80 mm, ekvivalent ugljika 4,47. Sadržaj ugljika u području flotacije iznosi 5,5%, a ispod tog područja 3,3%: a) povećanje 2x, b) povećanje 12x

Flotacija grafita pojavljuje se kod nodularnog lijeva prvenstveno nadeutektičkog sastava i to na odljencima s velikim modulom. Greška je vidljiva na metalografskom uzorku već pri malom povećanju. Na prijelomu ili u obrađenim područjima flotacija grafita vidljiva je golim okom kao tamna područja. Pri čišćenju ili mehaničkoj obradi odljevka grafit koji je isplivao u gornji dio odljevka može se odvojiti i na taj način rezultirati grubom (izbrazdanom) površinom.

Grafit koji isplivava na površinu utječe na širenje i stezanje nodularnog lijeva tijekom skrućivanja i prema tome znatno smanjuje djelotvornost napajanja. Zbog nejednolične razdiobe grafita nastaju i nejednolična svojstva odljevaka.

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

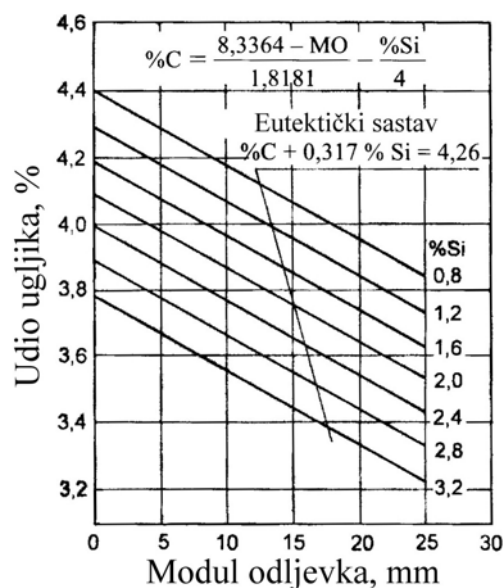
Kombinacija visokih vrijednosti sadržaja ugljika, tj. ekvivalenta ugljika (nadeutektički sastav) i niskih brzina hlađenja (debele stjenke) može rezultirati flotacijom grafita (isplivavanjem na površinu) i degeneracijom nodula, što ima negativan učinak na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Razlika u gustoći između tekućeg željeza i grafita iznosi  $\sim 4,8 \text{ g/cm}^3$ . To znači da su velike nodule (uobičajene za nadeutektičke sastave) izložene znatnom uzgonu, posebno nodule primarnog grafita. Brzina isplivavanja ovisi o veličini nodula, a put isplivavanja o brzini i vremenu raspoloživom za isplivavanje, koje pak ovisi o debljini stjenke.

Više vrijednosti sadržaja ugljika preferiraju se za tanje stjenke, a niže vrijednosti za deblje stjenke. Kod tankih stjenki ne postoji opasnost od flotacije, zbog čega se preferiraju više vrijednosti ekvivalenta ugljika u cilju izbjegavanja stvaranja karbida.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) pri debljinama stjenki iznad 40 mm potrebno je sniziti ekvivalent ugljika ispod 4,3. Granični sadržaji ugljika i silicija ovisno o debljini stjenke, odnosno modulu odljevka mogu se odrediti sa slike 10.23 i tablice 10.2.



Slika 10.23. Određivanje sadržaja ugljika i silicija u nodularnom lijevu ovisno o modulu odljevka radi sprječavanja flotacije grafita

Tablica 10.2. Preporučeni granični sadržaji ugljika i silicija u nodularnom lijevu radi sprječavanja flotacije grafita ovisno i debljini stijenke odljevka

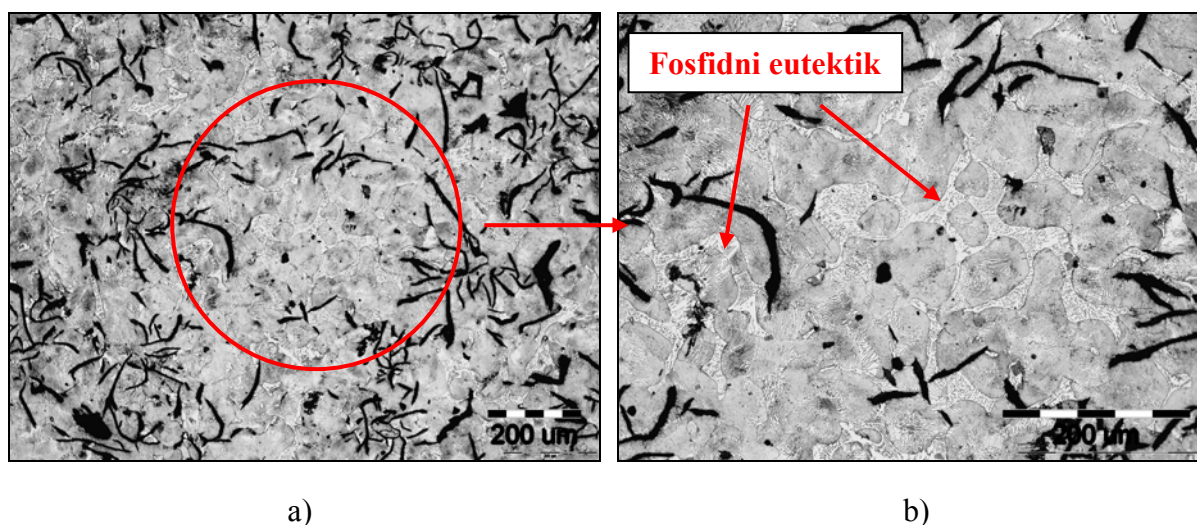
Lijevano stanje Metalna osnova	Debljina stijenke					
	< 25 mm		25 – 50 mm		> 50 mm	
	%C	%Si	%C	%Si	%C	%Si
feritna	3,7	2,8	3,6	2,5	3,6	2,1
perlitna	3,8	2,5	3,7	2,1	3,6	2,1
feritno/perlitna	3,8	2,5	3,7	2,1	3,6	2,1

- b) provesti odgovarajuće cijepljenje da bi se postigao veći broj manjih nodula,
- c) izbjegavati presporo skrućivanje odljevaka.

## 10.14 Fosfidni eutektik

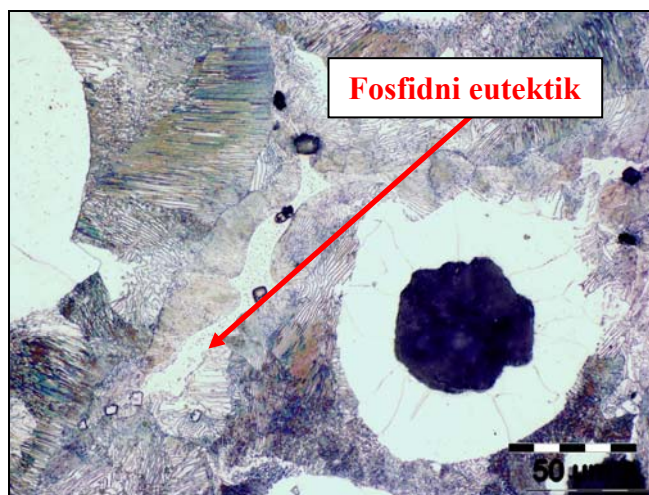
### Opis

Fosfidni eutektik je mikrostrukturni konstituent željeznih ljevova s grafitom, a nastaje kod povišenih ili visokih sadržaja fosfora. Kod niskih sadržaja fosfora ne pojavljuje se u mikrostrukтури željeznih ljevova s grafitom. Vidljiv je na metalografskom uzorku nakon nagrizanja kao svijetla faza (slike 10.24 i 10.25). Još se naziva i steadit.



Slika 10.24. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva u nagrizenom stanju pri povećanju 100x (a) i 200x (b). Zbog povišenog sadržaja fosfora (0,1%) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik

Fosfidni eutektik nakon skrućivanja sastoji se od triju faza: željeznog fosfida ( $Fe_3P$ ), željeznog karbida ( $Fe_3C$ ) i austenita. Zbog prisustva konstituenata koji imaju povišenu tvrdoću ( $Fe_3P$  i  $Fe_3C$ ), fosfidni eutektik povećava otpornost željeznog lijeva na trošenje. No pritom je potrebno da se fosfidni eutektik nalazi u odgovarajućem rasporedu u strukturi. Najpovoljnije je da se nalazi u obliku jednolično povezane mreže. Međutim, zbog visoke tvrdoće fosfidni eutektik smanjuje žilavost i izduženje željeznih ljevova.



Slika 10.25. Metalografska snimka mikrostrukture uzorka nodularnog lijeva u nagrizenom stanju (nital) pri povećanju 500x. Zbog visokog sadržaja fosfora ( $P = 0,085\%$ ) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik

#### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

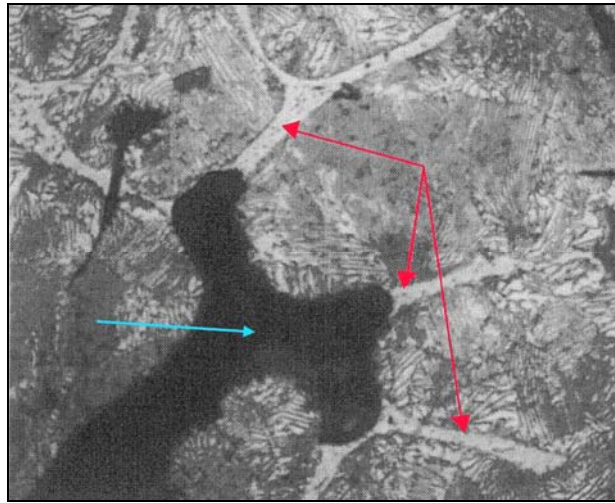
Segregacija fosfora tijekom skrućivanja željeznog lijeva uzrok je nastanka ternarnog fosfidnog eutektika. Tijekom skrućivanja fosfor segregira u taljevinu te snižava solidus temperaturu. Pri kraju eutektičkog skrućivanja približava se sastavu koji je u ostatku taljevine potisnute na granice eutektičkih zrna jednak ternarnom eutektiku  $Fe-2\%C-7\%P$ . Skrućivanjem tog rastaljenog eutektičkog sastava stvara se nisko topivi ternarni eutektik sastavljen od austenita, željeznog fosfida (većim dijelom građen od  $Fe_3P$ , a manjim dijelom od  $Fe_2P$ ) i grafita (ili  $Fe_3C$ , ovisno o uvjetima pri skrućivanju). Tijekom skrućivanja molibden, krom i vanadij segregiraju u smjeru fosfidne taljevine i povisuju količinu fosfida. Visok sadržaj fosfida pospješuje segregaciju ovih elemenata u ostatak taljevine, što rezultira osiromašenjem metalne osnove tim legirajućim elementima i gubitkom njihovog korisnog učinka. Ovo je posebno izraženo kod debelostjenih odljevaka.

Dakle, fosfor stvara nisko topivi fosfidni eutektik koji je poznat pod nazivom steadit. Točka taljenja fosfidnog eutektika je niska i iznosi  $\sim 950^\circ C$ . Tijekom skrućivanja segregira po granicama eutektičkih ćelija kao tvrda i krhka faza. Kod većih sadržaja fosfora stvara se mreža fosfidnog eutektika po granicama eutektičkih ćelija (slika 10.24). U tom slučaju u tankim stjenkama granice ćelija sadrže dvostruko više fosfora od prosječnog sadržaja, dok u debelim stjenkama ( $>25\text{ mm}$ ) čak i do 10 puta više od prosječnog sadržaja.

Fosfidni eutektik, kao i karbidi, ima visoku tvrdoću što otežava strojnu obradivost odljevaka od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva. Može se jedino eliminirati smanjenjem sadržaja fosfora u taljevini.

Prisustvo fosfidnog eutektika je poželjno samo u onim slučajevima kada je potrebno ostvariti povećanu otpornost lijeva na trošenje (npr. kočione papuče od sivog lijeva za vagone). U tim slučajevima dozvoljava se do  $1,0\%$  fosfora. Nižom temperaturom lijevanja postiže se finija i jednoličnija raspodjela fosfidnog eutektika po granicama eutektičkih ćelija. Pri sadržajima  $> 1,2\%$  fosfor može uzrokovati niz negativnih posljedica: prekomjerna grafitizacija (fosfor, slično siliciju, intenzivno snižava topljivost ugljika u taljevini), rast feritnih zrna, izlučivanje fosfida te pojačana segregacija. Ove pojave rezultiraju značajnim smanjenjem mehaničkih svojstava sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva.

Budući da je steadit još uvijek u tekućem stanju kada ostatak odljevka skrućuje, on može djelovati kao taljevina za napajanje tijekom procesa skrućivanja. Kao posljedica toga, može se javiti mikroporoznost u odljevku (slika 10.26).



Slika 10.26. Metalografska snimke mikrostrukture sivog lijeva u nagrizenom stanju pri povećanju 500x. Fosfidni eutektik (steadit) označen je crvenim strelicama, a šupljine (mikroporoznost) plavim strelicama

Pored toga, više stezanje (za  $\sim 1,0\%$ ) može se očekivati kod većih sadržaja fosfora ( $P \geq 1,0\%$ ) jer je kod taljevina sivog lijeva s povišenim fosforom niži sadržaj eutektičkog grafita (dio ugljika vezan u fosfidni eutektik) te postoji mogućnost većeg pomicanja stjenki kalupa. Kašasto skrućivanje, koje nastaje kad taljevina obogaćena fosforom okružuje eutektičke ćelije, sprječava stvaranje potpuno skrutnute kore uz stjenke kalupa. Zbog toga će tlak nastao uslijed ekspanzije zbog izlučivanja grafita djelovati na stjenke kalupa tijekom cijelog perioda eutektičkog skrućivanja. Kod primjene kalupa izrađenih od svježe kalupne mješavine to može rezultirati gibanjem, odnosno pomicanjem stjenki kalupa koje treba kompenzirati većim volumenom taljevine za napajanje (veća pojila). Kod uobičajenih kvaliteta sivog lijeva s niskim sadržajima fosfora potpuno skrutnuta kora uz stjenke kalupa nastaje u ranoj fazi eutektičkog skrućivanja. Kako se povećava debljina skrutnute kore tako ona ima sve veću otpornost na tlačne sile nastale tijekom ekspanzije zbog izlučivanja grafita, odnosno manje sile djeluju na stjenke kalupa.

Na kraju eutektičkog skrućivanja taljevina sivog lijeva s visokim fosforom ( $P \geq 1,0\%$ ) veća količina fosfidnog eutektika prisutna je u perifernom sloju u odnosu na centar odljevka. Ovaj fenomen povezuje se s potiskivanjem dijela taljevine ka perifernim slojevima zbog ekspanzije uslijed izlučivanja grafita. Tijekom daljnjeg hlađenja nastavlja se skrućivanje fosfidne faze i smanjuju se razlike između centra i periferije odljevka. Pri sobnoj temperaturi razlika iznosi  $\sim 1,0\%$  kod taljevina sivog lijeva s  $1,0\%$  fosfora.

Povoljan učinak fosfora očituje se u poboljšanju livljivosti i povećanju broja eutektičkih ćelija. U podeutektičkim sivim ljevovima dodatak  $0,2\%$  fosfora ima isti učinak na livljivost kao dodatak  $0,10\%$  ugljika ili porast temperature lijevanja za  $15^\circ\text{C}$ . Najbolja livljivost postiže se pri eutektičkom sastavu.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) ograničiti unos fosfora u taljevinu - primjenjivati uložne materijale s niskim sadržajem fosfora.

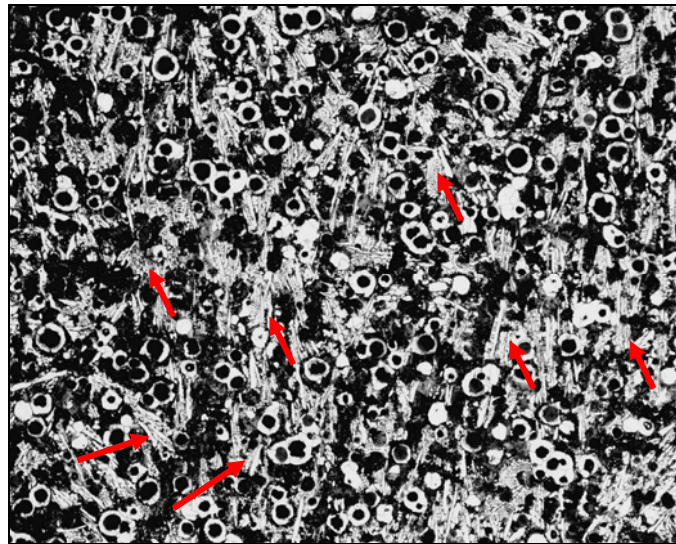


## 10.15 Karbidi, odbjel i inverzni odbjel u željeznim ljevovima s grafitom

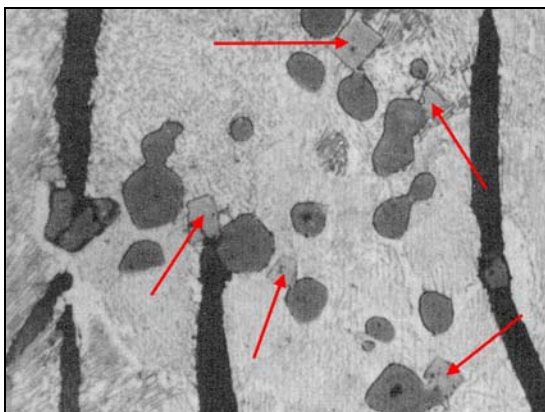
### Opis

Karbidi su spojevi metala s ugljikom, npr. cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (željezni karbid), koji se često pojavljuju kao dvostruki karbidi (ternarni spoj ugljika s dva metala, npr.  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ ), kao miješani karbidi (pojedinačni atomi željeza ovdje su vezani preko atoma legirajućih elemenata, npr.  $(\text{Cr}, \text{Fe})_3\text{C}$ ;  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ ) ili kao posebni karbidi (eutektički (primarni) i sekundarni miješani karbidi tipa  $\text{M}_7\text{C}_3$ ). Mogu nastati kod svih željeznih ljevova s grafitom tijekom skrućivanja, ovisno o kemijskom sastavu i debljini stijenke odljevka (brzini hlađenja), neovisno o postupku kalupljenja i postupku lijevanja. Uočljivi su na metalografskim uzorcima, uglavnom nakon nagrizanja.

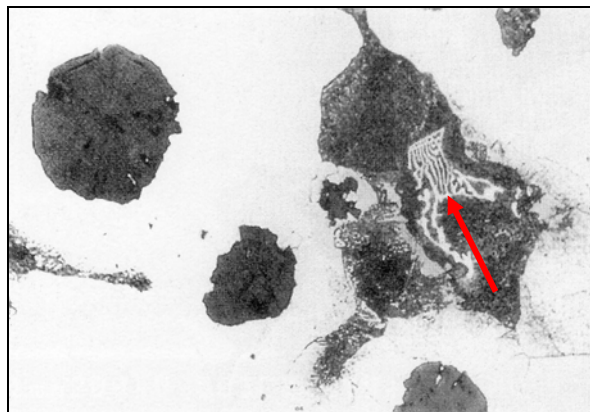
Najčešće karbidne tvorevine u odljercima od željeznih ljevova jesu odbjel (slika 10.27a) i inverzni odbjel. U osnovi radi se o željeznom karbidu (cementitu).



a)



b)



c)

Slika 10.27. a) odbjel, odnosno karbidi u mikrostrukturi nodularnog lijeva nastali zbog velike brzine hlađenja, b) titozni karbonitridi (označeni strelicama) u mikrostrukturi sivog lijeva.

Tamno sivi, sferični ukljucci predstavljaju manganove sulfide, c) molibdenom bogati eutektički karbidi u mikrostrukturi nodularnog lijeva

Cementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (ostali nazivi: eutektički karbid, primarni karbid), kojeg lijevači često nazivaju odbjelom, je tvrd i krhak intermetalni spoj željeza i ugljika. Za razliku od karbida npr. kroma, vanadija itd. cementit nastaje u početnoj fazi eutektičkog skrućivanja.

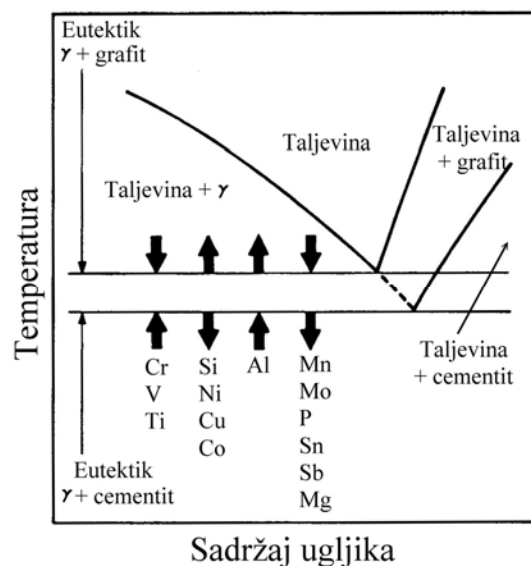
Oblik karbida može biti različit. Katkad su vlaknasto prošireni po cijelom presjeku (odbjel) ili imaju kockast oblik (titanovi karbidi i titanovi karbonitridi, slika 10.27b) ili oblik „kineskog pisma“ (molibdenovi (slika 10.27c) i vanadijevi mješoviti karbidi).

Karbidi imaju visoku tvrdoću, zbog čega negativno utječu izduženje i žilavost te značajno otežavaju strojnu obradivost odljevaka.

Toplinskom obradom (žarenjem) mogu se ukloniti samo neki karbidi.

### *Mogući uzroci i mehanizmi nastajanja greške*

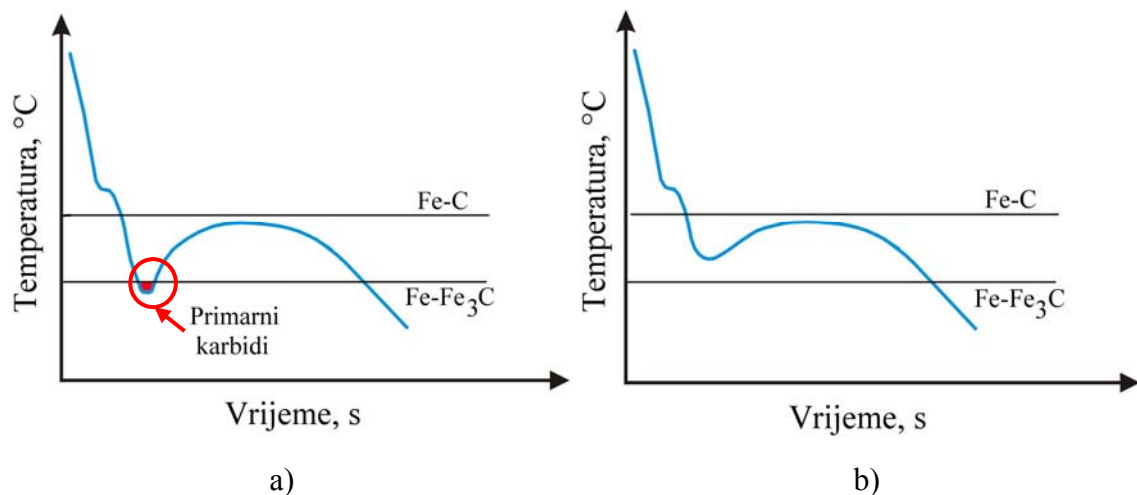
Grafitizatori (npr. Si, Ni, Cu) tijekom skrućivanja segregiraju u krutu fazu (austenit) te podižu temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižavaju temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (slika 10.28). To znači da grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja cementita). Suprotno tome, karbidotvorci (npr. Cr, V, Ti) segregiraju u tekuću fazu (ostatak taljevine) te sužuju interval između eutektičkih temperatura i time pospešuju metastabilno skrućivanje, odnosno stvaranje cementita.



Slika 10.28. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog ( $\gamma + \text{cementit}$ ) eutektika

Smanjenjem pothlađenja taljevine putem cijepjenja smanjuje se sklonost ka stvaranju eutektičkih (ili primarnih) karbida (cementita) koji se često u lijevačkoj praksi nazivaju odbjelom. Za razliku od grafita koji je mekan, cementit ima visoku tvrdoću ( $\sim 660\text{HB}$ ) i krhkost zbog čega negativno utječe na mehanička svojstva i strojnu obradivost sivih željeznih ljevova. Naime, ako temperatura taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja padne ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika doći će do stvaranja eutektičkih (primarnih) karbida, odnosno odbjela. Na slici 10.29a shematski je prikazana krivulja hlađenja nodularnog lijeva u čijoj se strukturi stvaraju primarni karbidi, dok je na slici 10.29b prikazana krivulja hlađenja nodularnog lijeva u čijoj strukturi neće doći do stvaranja primarnih karbida.





Slika 10.29. Shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva: a) stvaranje primarnih karbida, b) bez nastanka primarnih karbida

Ukoliko se eutektičkom reakcijom oslobodi dovoljno topline, temperatura ostatka taljevine može ponovo porasti iznad temperature skrućivanja metastabilnog eutektika (slika 10.29a), čime se zaustavlja stvaranje odbjela i promovira izlučivanje grafita. Skrućivanje u ovom slučaju može završiti na temperaturi koja leži između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. U tom slučaju govorimo o meliranoj strukturi, jer je u strukturi prisutan grafit i cementit. Stvaranje odbjela posebno je izraženo u onim područjima odljevka koje karakteriziraju velike brzine skrućivanja (tanke stjenke, kutovi itd.), kao i pri niskim vrijednostima ekvivalenta ugljika.

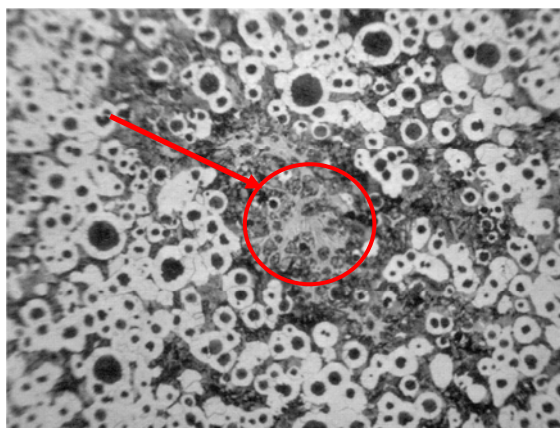
Ukoliko se skrućivanje u potpunosti odvija ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika neće doći do izlučivanja eutektika Fe-C već Fe-Fe<sub>3</sub>C, odnosno nastaje bijeli željezni lijev.

Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje odbjela putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 10.28). Na taj način oni utječu na širinu intervala između navedenih temperatura, a time i na dozvoljeno pothlađenje taljevine koje neće rezultirati stvaranjem odbjela.

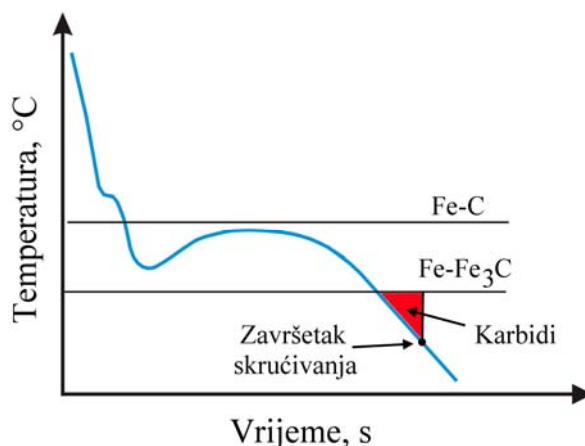
Stvaranje inverznog odbjela i interčelijastih karbida može se također spriječiti cijepljenjem taljevine. Inverzni odbjel može nastati kad je skrućivanje posljednje taljevine u kalupu praćeno lošim nukleacijskim uvjetima (uglavnom zbog slabljenja djelovanja cjepiva), zbog čega nastaju karbidi u mikrostrukturi po granicama zrna (slika 10.30a). Na slici 10.30b shematski je prikazana krivulja hlađenja nodularnog lijeva u čijoj strukturi nastaje inverzni odbjel (karbidi).

Na slici 10.30b jasno se vidi da je solidus temperatura ( $T_S$ ) ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika. Cijepljenjem taljevine može se povisiti solidus temperatura i na taj način izbjeći stvaranje inverznog odbjela.

Interčelijasti karbidi, za razliku od odbjela, nastaju u završnoj fazi eutektičkog skrućivanja. Rezultat su segregacije karbidotvornih elemenata, kao što su krom, mangan, vanadij itd. po granicama eutektičkih ćelija.



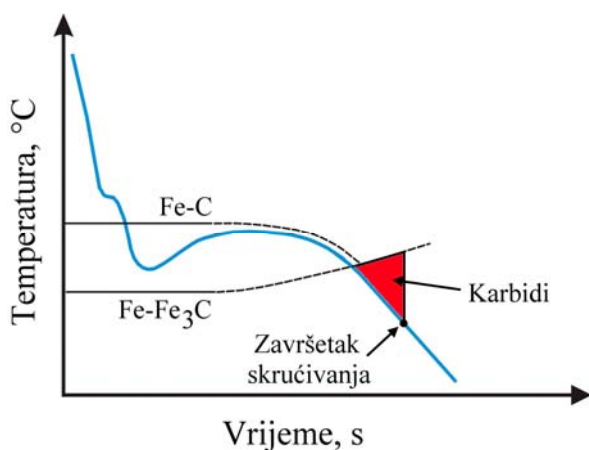
a)



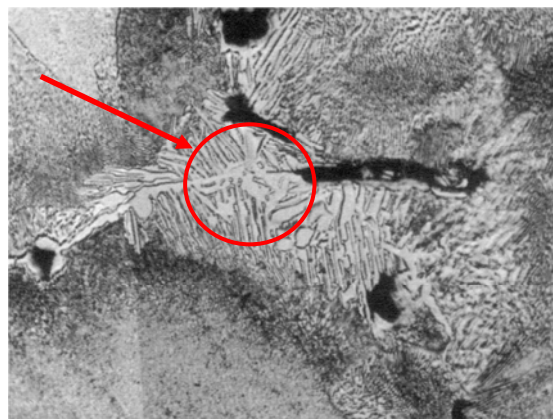
b)

Slika 10.30. a) metalografska snimka mikrostrukture nodularnog lijeva u kojoj se jasno može uočiti inverzni odbjel (karbidi), b) shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva koja ukazuje na nastanak inverznog odbjela

Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje interčelijastih karbida putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 10.28). Za razliku od grafitizirajućih elemenata, karbidotvorni elementi tijekom skrućivanja segregiraju u taljevinu. Kako skrućivanje napreduje taljevina se sve više obogaćuje karbidotvornim elementima, što rezultira progresivnim porastom temperature skrućivanja metastabilnog eutektika i sniženjem temperature skrućivanja stabilnog eutektika. Zbog toga se u posljednjoj taljevini koja skrućuje temperatura skrućivanja metastabilnog eutektika značajno približava temperaturi skrućivanja stabilnog eutektika (slika 10.31a), što rezultira stvaranjem interčelijastih karbida (slika 10.31b). Pravilnim cijepljenjem taljevine može se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida.



a)



b)

Slika 10.31. a) shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva koja ukazuje na nastanak interčelijastih karbida, b) metalografska snimka mikrostrukture nodularnog lijeva u kojoj se jasno mogu uočiti interčelijasti karbidi

Za razliku od odbjela, interčelijasti karbidi često se pojavljuju i u debelim stjenkama zbog sporog skrućivanja, što je posebno izraženo kod legiranih sivih željeznih ljevova.

Pravilnim cijepljenjem taljevine može se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida putem povećanja broja eutektičkih čelija, čime se postiže veća „raspršenost“ karbidotvornih elemenata, a time i manja opasnost od stvaranja interčelijastih karbida. Međutim, pri visokim brzinama hlađenja koje potpomažu stvaranje karbida (npr. tanke stjenke odljevka), kao i u prisutnosti povišene koncentracije karbidotvornih elemenata, čak i snažnim cijepljenjem neće se moći izbjeći stvaranje interčelijastih karbida.

#### *Sprečavanje nastajanja greške*

- a) osigurati adekvatnu metaluršku kvalitetu taljevine (nukleacijski potencijal, struktura uloška),
- b) izbjeći previsoke temperature taljevine i predugo zadržavanje taljevine na visokim temperaturama zbog negativnog utjecaja na metaluršku kvalitetu taljevine,
- c) odabrati sastav blizak eutektičkom, tj. povećati sadržaj grafitizacijskih elemenata (npr. Si),
- d) smanjiti sadržaj elemenata koji povisuju temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (npr. Cr, V, Ti, Mn, Mo),
- e) provesti optimalno cijepljenje taljevine da bi se povećao broj eutektičkih čelija i smanjio opseg segregacije,
- f) smanjiti sadržaj legirajućih elemenata,
- g) izbjeći prebrzo i presporo skrućivanje,
- h) nastale karbide, ako je moguće, ukloniti toplinskom obradom (žarenjem). Potrebno je imati na umu da se karbidi kroma ne mogu ukloniti toplinskom obradom.

## 11. LITERATURA

- [1] M. T. Rowley, International Atlas of Casting Defects, AFS, 2007.
- [2] Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.
- [3] Metals Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park, Ohio, 2008.
- [4] ....., Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [5] S. Hasse, Pogrješke na odljevcima, prijevod: D. Palijan, M. Galić, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2003. (naslov originala: Guß- und Gefügefehler - Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehler bei der Erzeugung von Gegossenen Komponenten, Schiele & Schön, Berlin).
- [6] R. Elliott, Cast Iron Technology, Butterwort & Co, England, 1988.
- [7] L. A. Plutshack, A. L. Suschil, Riser Design, Chapter in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, Casting, ASM International, Metals Park Ohio, USA, ,1988., 577 - 588.
- [8] S. I. Karsay, The Practical Foundryman's Guide to Feeding and Running Grey-, CG – and SG Iron Castings, Ferrous Casting Centre Ltd., Republic of South Africa, 1985.
- [10] K. Terzić, F. Unkić, Z. Glavaš, T. Marjanović, Analiza površinskih grešaka na odljevcima nodularnog lijeva kvalitete HRN EN GJS 500-7, Zbornik radova 10. Savjetovanja o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju, MATRIB 2005, Vela Luka, 23. – 25. lipanj 2005., 231 – 235.
- [11] I. Dugić, A. Diószegi i I. L. Svensson, Metal Expansion Penetration on Concave Casting Surfaces of Grey Cast Iron Cylinder Heads, Proceedings book of 9<sup>th</sup> International Foundry Conference, Opatija, 18. – 19. lipanj 2009.
- [12] H. Roedter, M. Gagné, Microstructure Defects in Heavy Section Ductile Iron Castings -Formation and Effect on Properties, Proceedings book of 9<sup>th</sup> International Foundry Conference, Opatija, 18. – 19. lipanj 2009.
- [13] C. Hartung, O. Knustad, K. Wardenauer, Chunky Graphite in Ductile Iron Castings – Theories and Examples, Proceedings book of 8<sup>th</sup> International Foundry Conference, Opatija, 05. – 07. lipanj 2008, 06-2008.
- [14] 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.
- [15] C. R. Loper, Jr., J. Y. Park, W. L. Powell, C. Shirvani, Recovery od Lead in Cupola Melting of Cast Iron, AFS Transactions **106**(1998), 545 – 551.
- [16] G. M. Goodrich, A Microview od Some Factors That Impact Cast Iron (Or the Little Things That Mean a Lot), AFS Transactions **109**(2001), paper 01-121.
- [17] S. Hasse, Structure of Cast Iron Alloys, Schiele & Schön, Berlin, 2008.
- [18] G. Goodrich, Casting Defects handbook: Iron & Steel, American Foundry Society, Illinois, 2008.