

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**METALURŠKI FAKULTET**

**doc.dr.sc. Zoran Glavaš**

**prof.dr.sc. Faruk Unkić**

# **LIJEVANJE ŽELJEZNIH METALA**

**Sisak, 2008.**

# SADRŽAJ

<b>1. PODJELA LJEVAČKIH LEGURA NA BAZI ŽELJEZA</b>	<b>1</b>
<b>2. SIVI LIJEV</b>	<b>2</b>
2.1 Općenito o sivom lijevu	2
2.2 Klasifikacija sivog lijeva	4
2.3 Skrućivanje sivog lijeva	7
2.4 Mehanizam nukleacije listićavog grafita	10
2.4.1 Pogrubljenje uključaka	11
2.5 Mehanizam rasta listićavog grafita	12
2.6 Morfologija grafita	16
2.7 Pretvorbe u krutom stanju	19
2.7.1 Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke) na mikrostrukturu sivog lijeva	21
2.8 Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva	23
2.8.1 Utjecaj stalnih elemenata	23
2.8.2 Utjecaj legirajućih elemenata	28
2.8.2.1 Određivanje potrebitog dodatka legirajućih elemenata za povećanje vlačne čvrstoće	32
2.8.3 Utjecaj pratećih elemenata	33
2.8.4 Utjecaj plinova	35
2.9 Proizvodnja taljevine sivog lijeva	36
2.9.1 Uložni materijali	36
2.9.2 Taljenje	38
2.9.2.1 Kupolna peć	38

2.9.2.1.1	Odsumporavanje	44
2.9.2.2	Indukcijske peći	45
2.9.2.2.1	Indukcijske peći s loncem	46
2.9.2.2.2	Kanalne indukcijske peći	48
2.9.3	Predpriprema taljevine	49
2.10	Cijepljenje sivog lijeva	50
2.10.1	Učinci cijepljenja	50
2.10.2	Kemijski sastav cjepiva i utjecaj manjinskih elemenata	52
2.10.3	Slabljenje djelovanja cijepljenja	54
2.10.4	Metode cijepljenja	54
2.11	Svojstva sivog lijeva	56
2.11.1	Mehanička svojstva	56
2.11.2	Fizikalna svojstva	60
2.11.3	Ostala svojstva	61
2.12	Toplinska obrada sivog lijeva	65
2.12.1	Uklanjanje zaostalih naprezanja	67
2.12.2	Žarenje	68
2.12.2.1	Feritizirajuće žarenje	68
2.12.2.2	Srednje (potpuno) žarenje	69
2.12.2.3	Grafitizirajuće žarenje	69
2.12.3	Normalizacija	70
2.12.4	Kaljenje i popuštanje	71
2.12.5	Izotermičko poboljšavanje	72
2.12.6	Martenzitno gašenje	76
2.12.7	Površinsko otvrdnjavanje	76

2.12.7.1	Plameno kaljenje	76
2.12.7.2	Indukcijsko kaljenje	77
2.13	Legirani sivi ljevovi	78
2.13.1	Sivi ljevovi legirani silicijem	78
2.13.1.1	Sivi lijev legiran silicijem namijenjen za rad na povišenim temperaturama	78
2.13.1.2	Sivi ljevovi legirani silicijem otporni na koroziju	80
2.13.2	Sivi ljevovi legirani niklom	83
2.13.3	Sivi ljevovi legirani aluminijem	88
2.14	Kontrola kvalitete	89
2.14.1	Kontrola kvalitete taljevine	89
2.14.2	Kontrola kvalitete odljevaka	99
<b>3.</b>	<b>NODULARNI LIJEV</b>	<b>103</b>
3.1	Općenito o nodularnom lijevu	103
3.2	Klasifikacija nodularnog lijeva	104
3.3	Skrućivanje nodularnog lijeva	106
3.4	Mehanizam nukleacije nodularnog grafita	109
3.4.1	Pogrubljenje uključaka	112
3.5	Mehanizam rasta nodularnog grafita	113
3.5.1	Teorije površinske napetosti	114
3.5.2	Teorija rasta grafita preko austenitne ovojnice	116
3.6	Pretvorbe u krutom stanju	117
3.7	Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva	120
3.7.1	Utjecaj stalnih elemenata	120

3.7.2	Utjecaj legirajućih elemenata	125
3.7.3	Utjecaj pratećih elemenata	127
3.7.4	Utjecaj nodularnosti grafita	129
3.7.5	Utjecaj broja i veličine nodula	130
3.7.6	Utjecaj udjela ferita i perlita	132
3.8	Proizvodnja primarne taljevine	135
3.9	Proizvodnja nodularnog lijeva	135
3.9.1	Sredstva za modifikaciju oblika grafita (nodulatori)	135
3.9.2	Izračunavanje potrebne količine predlegure za obradu taljevine	137
3.9.3	Postupci proizvodnje nodularnog lijeva	138
3.9.3.1	Postupci obrade u loncu	138
3.10	Cijepljenje nodularnog lijeva	143
3.10.1	Učinci cijepljenja	143
3.10.2	Kemijski sastav cjepiva i utjecaj manjinskih elemenata	146
3.10.3	Slabljenje djelovanja cijepljenja	147
3.10.4	Metode cijepljenja	147
3.11	Svojstva nodularnog lijeva	149
3.12	Toplinska obrada nodularnog lijeva	152
3.12.1	Uklanjanje zaostalih naprezanja	154
3.12.2	Žarenje	155
3.12.3	Normalizacija	155
3.12.4	Kaljenje	156
3.12.5	Popuštanje	156
3.12.6	Površinsko otvrdnjavanje	156
3.13	Izotermički poboljšani nodularni lijev (ADI)	158

3.13.1	Kvalitete izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (norme)	158
3.13.2	Kontrola proizvodnog procesa i utjecaj elemenata kemijskog Sastava	159
3.13.3	Toplinska obrada	162
3.13.4	Svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	168
3.13.5	Primjena izotermički poboljšanog nodularnog lijeva	170
3.14.	Legirani nodularni ljevovi	171
3.14.1	Nodularni ljevovi legirani silicijem i molibdenom (Si-Mo)	171
3.14.1.1	Utjecaj elemenata kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Si-Mo	172
3.14.1.2	Proizvodni zahtjevi	175
3.14.1.3	Primjena Si-Mo	176
3.14.2	Austenitni nodularni ljevovi	176
3.14.2.1	Kvalitete austenitnih nodularnih ljevova (norme)	176
3.14.2.2	Proizvodni zahtjevi	178
3.14.2.3	Svojstva i primjena austenitnih nodularnih ljevova	179
3.15	Kontrola kvalitete	182
3.15.1	Kontrola kvalitete primarne taljevine	182
3.15.2	Kontrola kvalitete obrađene taljevine	185
3.15.3	Toplinska analiza	186
3.15.4	Kontrola kvalitete odljevaka	191
3.15.4.1	Ispitivanje mehaničkih svojstava	191
<b>4.</b>	<b>VERMIKULARNI LIJEV</b>	<b>196</b>
4.1	Općenito o vermikularnom lijevu	196
4.2	Klasifikacija vermikularnog lijeva	198

4.3	Skrućivanje vermikularnog lijeva	199
4.4	Mehanizam nukleacije i rasta vermikularnog grafita	202
4.5	Faktori koji utječu na svojstva vermikularnog lijeva	207
4.5.1	Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture	207
4.5.2	Utjecaj metalurškog stanja taljevine	210
4.5.3	Vrsta i količina predlegure za obradu	211
4.5.4	Utjecaj procesnih parametara	212
4.5.5	Utjecaj cijepljenja	212
4.5.6	Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke)	217
4.5.7	Utjecaj vremena lijevanja	219
4.6	Proizvodnja primarne taljevine	220
4.7	Proizvodnja vermikularnog lijeva	220
4.7.1	Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija bez primjene antinodularizirajućih elemenata – metoda postizanja točnog sadržaja magnezija	220
4.7.2	Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz dodatak antinodularizirajućih elemenata	222
4.7.3	Metoda obrade taljevine s visokim sadržajem sumpora predlegurom magnezij-cerij uz dodatak aluminijskog i kalcija	222
4.7.4	Metoda obrade taljevine predlegurama na bazi cerija	223
4.7.5	Metoda obrade taljevine predlegurom koja sadrži dušik	224
4.7.6	Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz naknadni dodatak sumpora	224
4.8	Kontrola procesa proizvodnje vermikularnog lijeva	224
4.8.1	Sustav kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva baziran na toplinskoj analizi	225
4.8.1.1	Postupak obrade u dva koraka	225
4.8.1.2	Postupak obrade u jednom koraku	227

4.8.2	Sustav kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva baziran na toplinskoj analizi i mjerenju aktiviteta kisika u taljevini	229
4.9	Svojstva nodularnog lijeva	230
<b>5.</b>	<b>NAPAJANJE ODLJEVAKA OD SIVOG, VERMIKULARNOG I NODULARNOG LIJEVA</b>	<b>240</b>
5.1	Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja željeznih ljevova s grafitom	240
5.2	Hlađenje i modul odljevka	242
5.3	Metode napajanja odljevaka	244
5.3.1	Konvencionalno napajanje	247
5.3.2	Izravno primijenjeno napajanje	248
5.3.2.1	Napajanje pod tlačnim opterećenjem	249
5.3.2.2	Napajanje pomoću uljevnog sustava	254
5.3.3	Napajanje kontrolom tlaka	256
5.3.4	Napajanje bez primjene pojila	263
5.3.5	Stožasta pojila	265
5.3.6	Egzotermna pojila	266
5.4	Hladila	267
<b>6.</b>	<b>ULJEVNI SUSTAVI ZA SIVI, VERMIKULARNI I NODULARNI LIJEV</b>	<b>268</b>
6.1	Osnovne komponente uljevnog sustava	268
6.2	Vrste uljevnih sustava	270
6.3	Osnove dimenzioniranja uljevnog sustava	271
6.4	Principi konstruiranja tlačnih uljevnih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom	276
6.5	Principi konstruiranja semitlačnih uljevnih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom	280



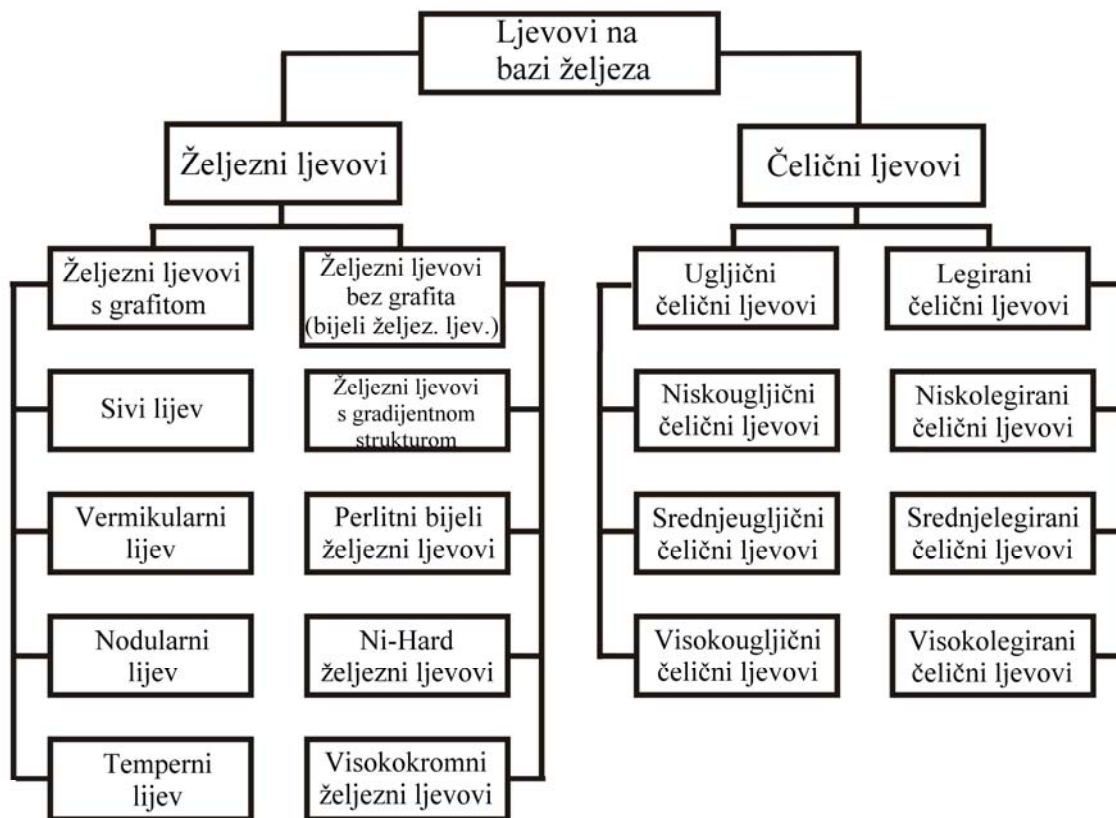
6.6	Principi konstruiranja hibridnih (kombiniranih) uljevnih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom	283
6.7	Principi konstruiranja uljevnih sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom	285
6.8	Primjena filtara u uljevnim sustavima	297
<b>7.</b>	<b>TEMPERNI LIJEV</b>	<b>299</b>
7.1	Općenito o tempernom lijevu	299
7.2	Klasifikacija tempornog lijeva	301
7.3	Kemijski sastav	303
7.4	Toplinska obrada (temperiranje)	304
7.4.1	Proizvodnja bijelog tempornog lijeva	304
7.4.2	Proizvodnja crnog tempornog lijeva	305
<b>8.</b>	<b>BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI</b>	<b>307</b>
8.1	Općenito o bijelim željeznim ljevovima	307
8.2	Klasifikacija željeznih ljevova otpornih na trošenje	309
8.2.1	Perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje	309
8.2.2	Željezni ljevovi otporni na trošenje legirani niklom i kromom (Ni-Hard 1, 2 i 3)	311
8.2.3	Željezni ljevovi otporni na trošenje legirani niklom i kromom (Ni-Hard 4)	314
8.2.4	Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje	315
8.2.5	Specijalni željezni ljevovi otporni na trošenje	318
8.3	Skrućivanje željeznih ljevova otpornih na trošenje	319
8.3.1	Binarni Fe-C sustavi (željezni ljevovi otporni na trošenje sa Fe <sub>3</sub> C i M <sub>3</sub> C karbidima)	319

8.3.2	Ternarni Fe-Cr-C sustavi (željezni ljevovi otporni na trošenje sa $M_7C_3$ karbidima	324
8.3.3	Segregacije legirajućih elemenata	329
8.3.4	Utjecaj cijepljenja na skrućivanje željeznih ljevova otpornih na trošenje	330
8.4	Toplinska obrada željeznih ljevova otpornih na trošenje	331
8.4.1	Ni-Hard 1 i 2 željezni ljevovi otporni na trošenje	332
8.4.2	Ni-Hard 4 željezni ljevovi otporni na trošenje	334
8.4.3	Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje	337
8.5	Morfologija karbida u željeznim ljevovima otpornim na trošenje	345
8.5.1	Morfologija $M_3C$ karbida	347
8.5.2	Morfologija $M_7C_3$ karbida	348
8.5.3	Morfologija $M_{23}C_6$ karbida	351
8.5.4	Morfologija $Mo_2C$ karbida	352
8.5.5	Morfologija MC (VC) karbida	353
8.5.6	Morfologija NbC karbida	354
8.5.7	Morfologija TiC karbida	354
8.6	Proizvodnja željeznih ljevova otpornih na trošenje	355
8.6.1	Perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje s potpuno bijelom strukturom	355
8.6.2	Željezni ljevovi otporni na trošenje s gradijentnom strukturom	356
8.6.3	Ni-Hard 1 i 2 željezni ljevovi otporni na trošenje	357
8.6.4	Ni-Hard 4 željezni ljevovi otporni na trošenje	359
8.6.5	Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje	360

## **9. ČELIČNI LJEVOVI** 362

# 1. PODJELA LJEVAČKIH LEGURA NA BAZI ŽELJEZA

Na slici 1.1 prikazana je podjela ljevačkih legura na bazi željeza.

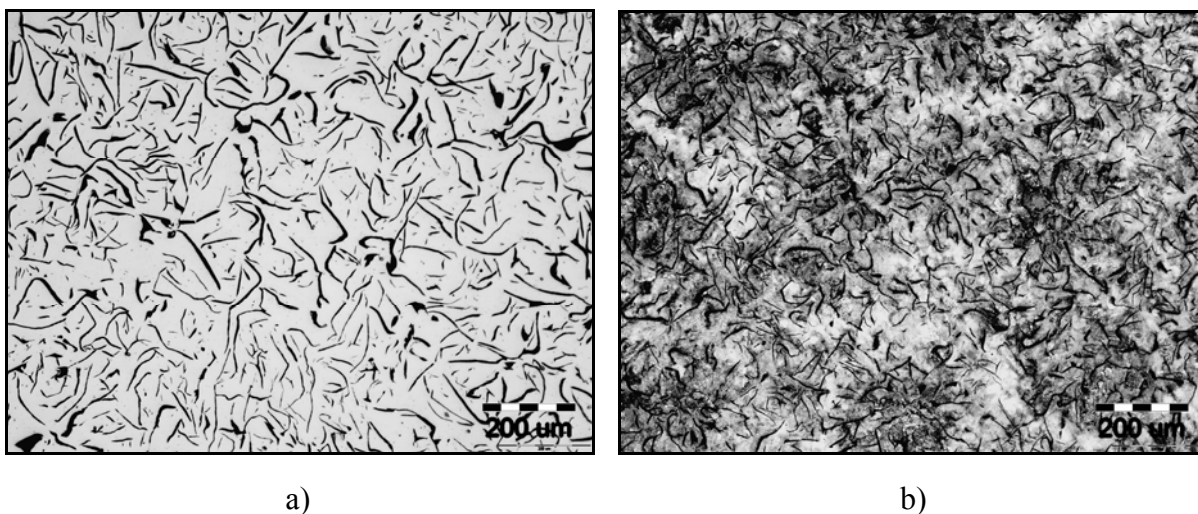


Slika 1.1 Podjela ljevačkih legura na bazi željeza

## 2. SIVI LIJEV

### 2.1 Općenito o sivom lijevu

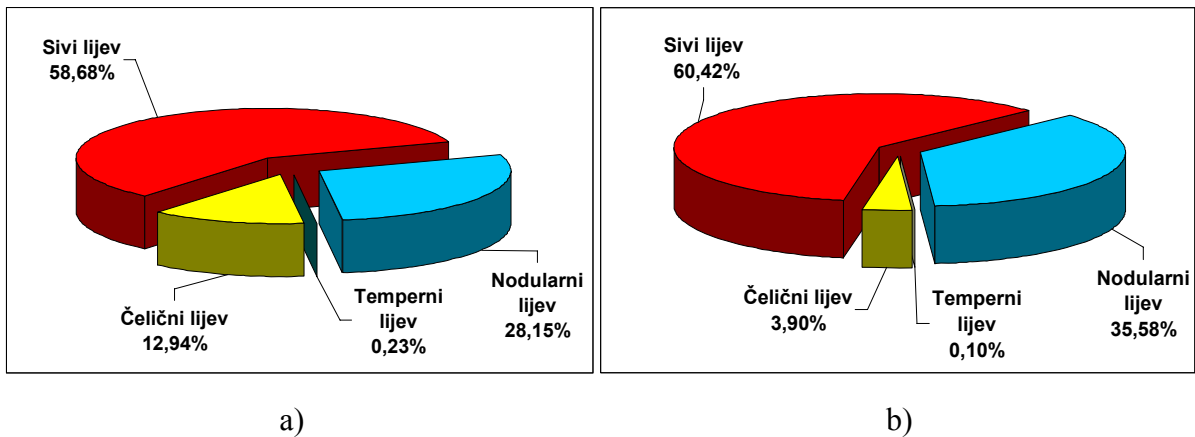
Sivi lijev pripada familiji željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita (slika 2.1). Zbog listićave strukture grafita, sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, tvrdoću, žilavost, istezanje i modul elastičnosti te povećanu osjetljivost na debljinu stjenke. Pozitivne strane sivog lijeva su: dobra strojna obradivost, visok stupanj prigušenja vibracija, otpornost na toplinske šokove (visoka toplinska vodljivost), izvanredna livljivost i tlačna čvrstoća te ekonomičnost.



Slika 2.1. Metalografske snimke tipične mikrostrukture sivog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital

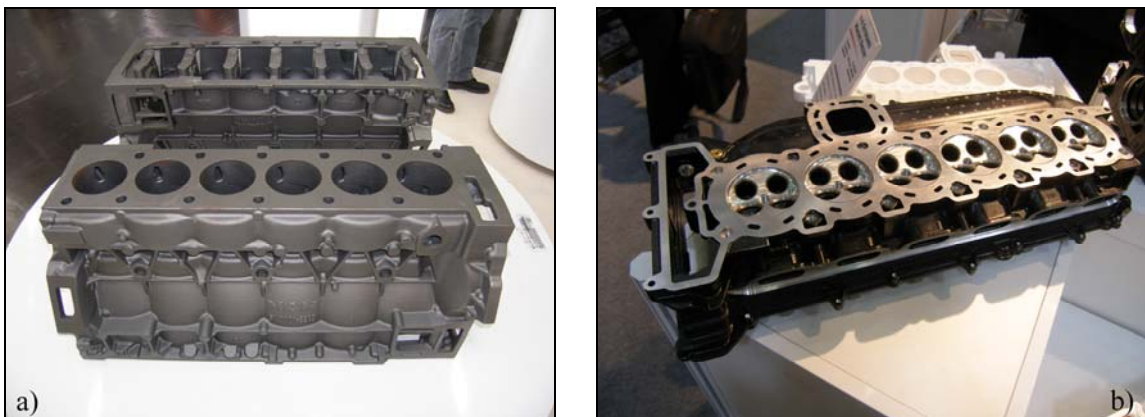
Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva direktno ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Tipična mikrostruktura sivog lijeva sastoji se od perlitno-feritne metalne osnove i grafitnih listića. Budući da grafitni listići prekidaju kontinuitet metalne osnove, odnosno djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, mehanička svojstva sivog lijeva u velikoj mjeri ovise o količini, obliku, veličini i raspodijeli grafita.

Tijekom 2005. godine u svijetu je proizvedeno 40,9mil.t odljevaka od sivog lijeva, što predstavlja 58,68% od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova (slika 2.2a). U Hrvatskoj je tijekom 2006. godine proizvedeno 30972t odljevaka od sivog lijeva. Udio odljevaka od sivog lijeva u ukupnoj količini proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova tijekom 2006. godine u Hrvatskoj iznosi 60,42% (slika 2.2b).



Slika 2.2. a) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu u 2005. godini, b) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u Hrvatskoj u 2006. godini

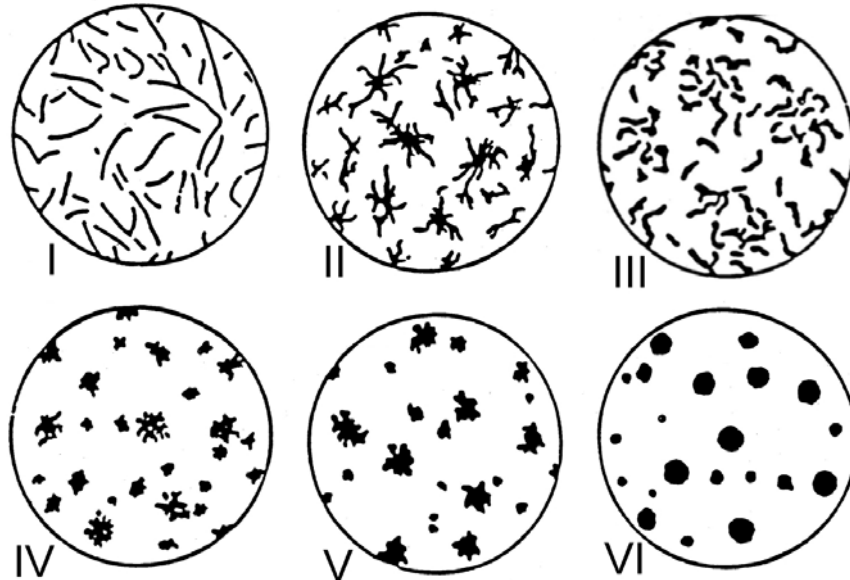
Tipična područja primjene sivog ljeva su: strojogradnja (postolja i dijelovi strojeva, kućišta itd.), odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesnu industriju i energetiku, industrija motornih vozila (cilindri, klipni prstenovi, blokovi i glave motora (slika 2.3), kočioni diskovi, zamašnjaci, razni zupčanci, kućišta sklopova itd.), dekorativni odljevci (ukrasni stupovi, stupovi rasvjete itd.) i još mnoga druga područja.



Slika 2.3. Odljevci od sivog ljeva: a) blok motora, b) glava motora

## 2.2 Klasifikacija sivog lijeva

Sivi lijev je vrsta željeznog lijeva čija je osnovna karakteristika izlučivanje grafita u listićavom (lamelarnom) obliku sukladno HRN EN ISO 945:2002 (“Željezni lijev – označivanje mikrostrukture grafita”). Prema ovoj normi listićavi grafit označava se kao oblik I. Morfologija listićavog grafita prikazana je na slici 2.4. Označivanje ovog materijala (GJL) temelji se na HRN EN 1560:1997 (“Ljevarstvo – sustav označivanja željeznih ljevova”).



Slika 2.4. Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN ISO 945:2002.  
Oblik I – listićavi grafit

Danas postoji veći broj prihvaćenih normi za sivi lijev, npr. međunarodni standard ISO 185:1988, EN 1561:1997 primjenjuje se u zemljama EU, ASTM A48-94a u SAD-u, BS 1452 (1990) u Engleskoj, JIS G5501 (1995) u Japanu, itd. U Hrvatskoj se za klasifikaciju sivog lijeva primjenjuje norma HRN EN 1561:1997. U osnovi radi se o preuzetoj europskoj normi EN 1561:1997.

Prema HRN EN 1561:1997 sivi lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. U tablici 2.1 prikazane su minimalne zahtijevane vrijednosti vlačne čvrstoće sivog lijeva za svaku pojedinu kvalitetu prema HRN EN 1561:1997.

Iz tablice 2.1 može se vidjeti da se oznaka pojedine kvalitete sivog lijeva sastoji od kombinacije brojeva i slova. Npr. u oznaci EN-GJL-200, EN se odnosi na europsku normu i smije se primjenjivati samo kod standardnih materijala, slovo G označava lijev, slovo J željezo, slovo L označava listićavi grafit, broj 200 predstavlja minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće.

Prema vrijednostima Brinellove tvrdoće, sivi lijev se klasificira u 6 kvaliteta (tablica 2.2). Određivanje Brinellove tvrdoće provodi se prema HRN EN 10003-1.

Tablica 2.1. Mehanička svojstva sivog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova ili mehaničkom obradom prilivenih proba (prema HRN EN 1561:1997)

Označivanje materijala		Relevantna debljina stjenke <sup>1)</sup>		Vlačna čvrstoća $R_m^{2)}$ , propisane vrijednosti		Vlačna čvrstoća $R_m^{4)}$ , očekivane vrijednosti u odljevku <sup>5)</sup> , MPa, min.	
Oznaka	Broj	>, mm	≤, mm	u odvojeno lijevanom uzorku <sup>3)</sup> , MPa	u prilivenom uzorku, MPa, min.		
EN-GJL-100	EN-JL1010	5 <sup>6)</sup>	40	100-200 <sup>7)</sup>	-	-	
EN-GJL-150	EN-JL1020	2,5 <sup>6)</sup>	5	150-250 <sup>7)</sup>	-	180	
		5	10		-	155	
		10	20		-	130	
		20	40		120	110	
		40	80		110	95	
		80	150		100	80	
EN-GJL-200	EN-JL1030	150	300	200-300 <sup>7)</sup>	90 <sup>5)</sup>	-	
		2,5 <sup>6)</sup>	5		-	230	
		5	10		-	205	
		10	20		-	180	
		20	40		170	155	
		40	80		150	130	
EN-GJL-250	EN-JL1040	80	150	250-350 <sup>7)</sup>	140	115	
		150	300		130 <sup>5)</sup>	-	
		5 <sup>6)</sup>	10		300-400 <sup>7)</sup>	-	250
		10	20			-	225
		20	40			210	195
		40	80			190	170
80	150	170	155				
150	300	160 <sup>5)</sup>	-				
EN-GJL-300	EN-JL1050	10 <sup>6)</sup>	20	300-400 <sup>7)</sup>	-	270	
		20	40		250	240	
		40	80		220	210	
		80	150		210	195	
		150	300		190 <sup>5)</sup>	-	
EN-GJL-350	EN-JL1060	10 <sup>6)</sup>	20	350-450 <sup>7)</sup>	-	315	
		20	40		290	280	
		40	80		260	250	
		80	150		230	225	
		150	300		210 <sup>5)</sup>	-	

<sup>1)</sup> Ako se upotrebljava prilivena proba, relevantna debljina stjenke odljevka trebala bi biti ugovorena prilikom prihvaćanja narudžbe.

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

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

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

<sup>5)</sup> Ove vrijednosti su informativne. Ne radi se o propisanim vrijednostima.

<sup>6)</sup> Ova vrijednost je uključena kao donja granica područja relevantne debljine stjenke.

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

Tablica 2.2. Brinellova tvrdoća odljevaka od sivog lijeva na ugovorenom mjestu ispitivanja (prema HRN EN 1561:1997) [5]

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

<sup>1)</sup> Kod svake kvalitete Brinellova tvrdoća smanjuje se s porastom debljine stjenke.

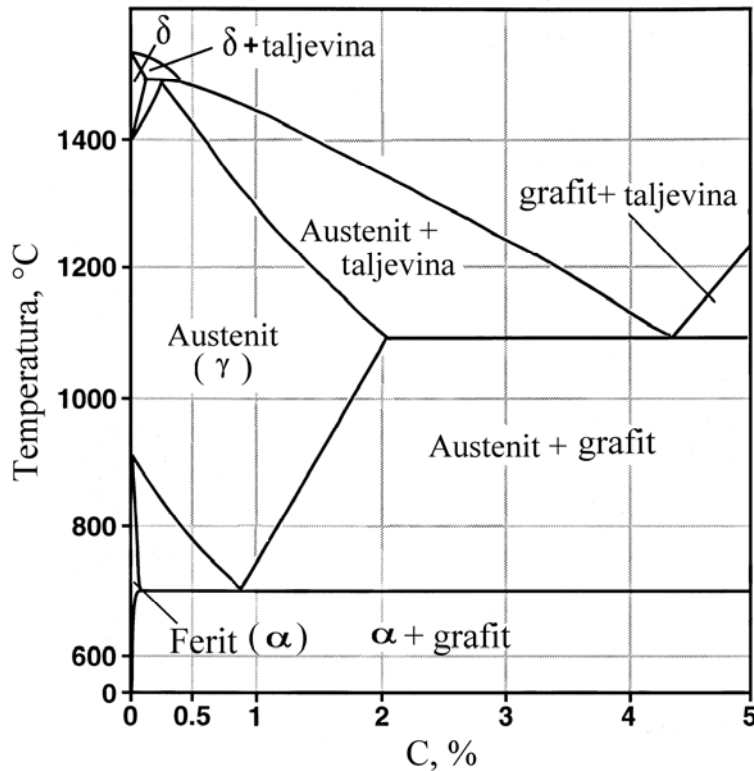
<sup>2)</sup> Dogovorom proizvođača i kupca može se definirati uže područje tvrdoće na ugovorenom mjestu u odljevku, osiguravajući da nije manje od 40 jedinica po Brinellu.

<sup>3)</sup> Relevantna debljina stjenke za pojedinu kvalitetu.



## 2.3 Skrućivanje sivog lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova s grafitom je ravnotežni dijagram Fe-C (slika 2.5). Sivi ljev, kao i ostale željezne ljevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.



Slika 2.5. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C

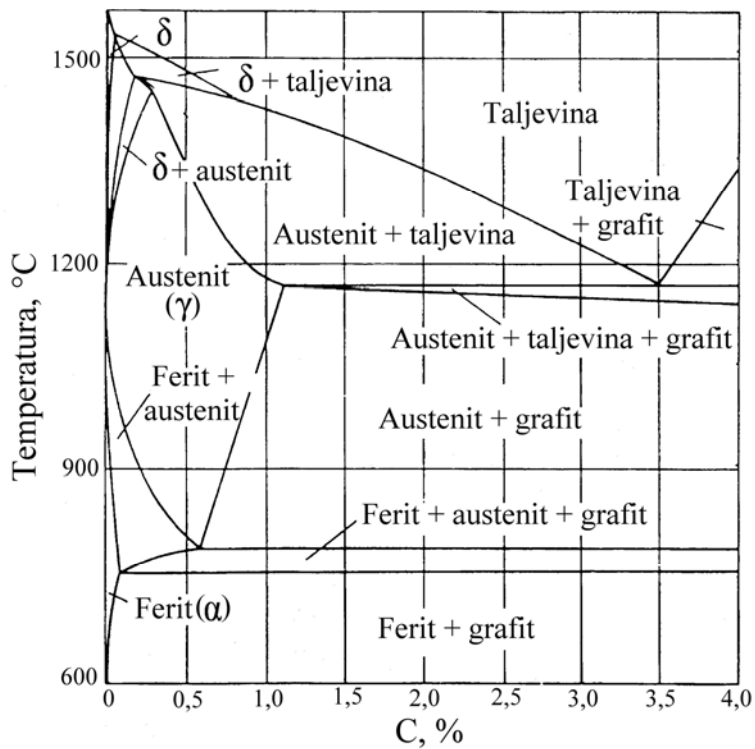
Od svih prisutnih elementa u sivom lijevu (osim ugljika), silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 2.6. Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1% silicija snižava eutektički sastav za 0,31% ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupnja zasićenja  $S_c$ :

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (2.1)$$

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (2.2)$$

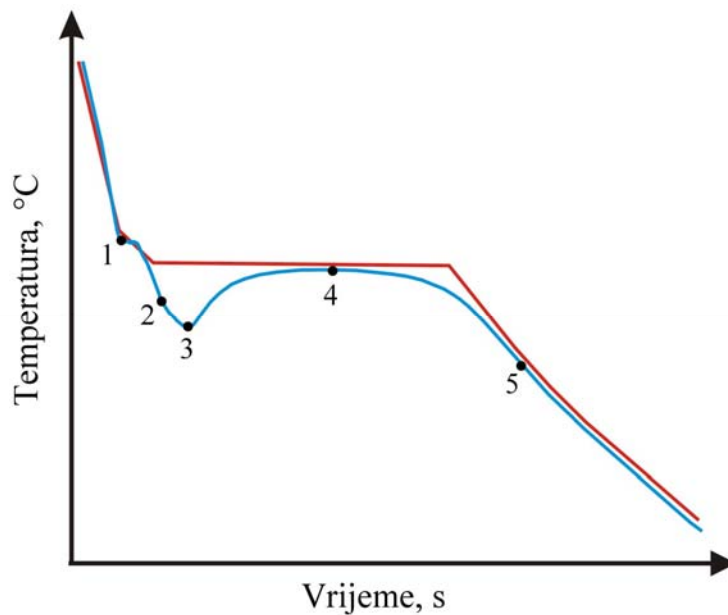
Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3, govorimo o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $< 4,3$  radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $> 4,3$  govorimo o nadeutektičkom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičkih sastava je primarni grafit.

Kada je  $S_c = 1$  govorimo o eutektičkom sastavu, ukoliko je  $S_c < 1$  govorimo o podeutektičkom sastavu, a u slučaju  $S_c > 1$  o nadeutektičkom sastavu.



Slika 2.6. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si [6]

Promjene tijekom skrućivanja mogu se pratiti snimanjem krivulja hlađenja, odnosno toplinskom analizom. Krivulja hlađenja prikazuje promjenu temperature s vremenom tijekom skrućivanja. Na temperaturu utječe oslobađanje latentne topline skrućivanja (entalpije skrućivanja) i toplina koju preuzima kalup. Promjene u načinu skrućivanja reflektiraju se kao promjene na krivulji hlađenja. Na slici 2.7 shematski je prikazana idealna (crvena linija) i stvarna (plava linija) krivulja hlađenja podeutektičkog sivog lijeva.



Slika 2.7. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog sivog lijeva

Kad se taljevina sivog lijeva ulije u kalup, ona se kontinuirano hladi sve dok se ne dostigne likvidus temperatura  $T_L$  (točka 1, slika 2.7), kad nukleira austenit, koji tijekom daljeg hlađenja raste u dendritnom obliku. Veličina dendrita određena je ekvivalentom ugljika, stupnjem zasićenja i brzinom skrućivanja. Niži ekvivalent ugljika rezultira većim dendritima, što je povezano sa širim intervalom skrućivanja. Bržim hlađenjem promovira se stvaranje finijih (sitnijih) dendrita. Tijekom izlučivanja primarnog austenita višak ugljika odbacuje se u taljevinu.

Preostala taljevina nastavlja s kontinuiranim hlađenjem sve do dostizanja temperature početka eutektičkog skrućivanja  $T_{ES}$  (točka 2), gdje između dendritnih grana u taljevini obogaćenoj ugljikom započinje nukleacija grafita i stvaranje eutektika. Kod temperature  $T_{ES}$  u taljevini je dostignut eutektički sadržaj ugljika od 4,3%. Dakle, po dostizanju eutektičke koncentracije odvija se pretvorba preostale taljevine u dvije krutine – jedna je eutektički austenit, a druga grafit. Umjesto grafita može nastati karbid  $Fe_3C$ , što ovisi o uvjetima pri skrućivanju. Karbidi štetno utječu na svojstva i potrebno je izbjeći njihovo stvaranje.

Kod temperature  $T_{ES}$  neće se taljevina u potpunosti transformirati u dvije krute faze zbog nedostatka centara nukleacije, tj. klica u taljevini. Zbog toga temperatura taljevine nastavlja s padom (područje na krivulji hlađenja između točaka 2 i 3) sve dok broj centara s kojih se pojavljuje rast eutektika i brzina rasta ne budu takvi da toplina oslobođena skrućivanjem eutektika (latentna toplina ili entalpija skrućivanja) ne prijeđe brzinu (intenzitet) odvođenja topline od strane kalupa (točka 3 – temperatura eutektičkog pothlađenja ( $T_{EP}$ )). U biti govorimo o pothlađenju taljevine, koje predstavlja pokretačku silu nukleacije. Kod točke 3 prestaje pothlađenje i zbog povoljnih nukleacijskih uvjeta odvija se povezani rast eutektika austenit-listićavi grafit. Rast se odvija u obliku austenit-grafit eutektičkih ćelija koje su međusobno odvojene taljevinom. Svaka eutektička ćelija rezultat je zasebnog nukleacijskog događaja. Tijekom skrućivanja, eutektičke ćelije kontinuirano rastu sve dok se međusobno ne sudare. Za vrijeme rasta eutektičkih ćelija austenit i grafit su u kontaktu s taljevinom. U svakoj eutektičkoj ćeliji grafitni listići su međusobno povezani. Oblik grafitnih listića ovisi o pothlađenju taljevine i kemijskom sastavu. Budući da se eutektičko skrućivanje odvija u temperaturnom intervalu, s napredovanjem skrućivanja mijenja se sastav nastalog austenita i taljevine. Elementi prisutni u taljevini koji segregiraju pozitivno (u taljevinu) koncentriraju se tijekom skrućivanja u interćelijastim područjima koja posljednja skrućuju. Obzirom da toplina oslobođena tijekom skrućivanja eutektika premašuje toplinu odvedenu od strane kalupa, dolazi do povišenja temperature pri skrućivanju (područje od točke 3 do točke 4). Ovaj fenomen poznat je pod nazivom rekalescencija. Točka 4 označava se kao temperatura eutektičke rekalescencije ( $T_{ER}$ ).

Kako se eutektičko skrućivanje bliži završetku, postepeno se smanjuje oslobađanje entalpije skrućivanja i ponovo dolazi do pada temperature (područje između točaka 4 i 5). Eutektičko skrućivanje završava pri temperaturi solidusa  $T_S$  (točka 5).

Skrućivanje sivog lijeva nadeutektičkog sastava odvija se na identičan način s razlikom da je prva faza koja se izlučuje grafit (primarni grafit). Primarni grafit raste u obliku velikih ravnih listića. Kad se koncentracija ugljika u taljevini i temperatura dovoljno snize, preostala taljevina skrućuje u obliku eutektičkih ćelija. Eutektički grafit obično je znatno sitniji od primarnog grafita.

## 2.4 Mehanizam nukleacije listićavog grafitu

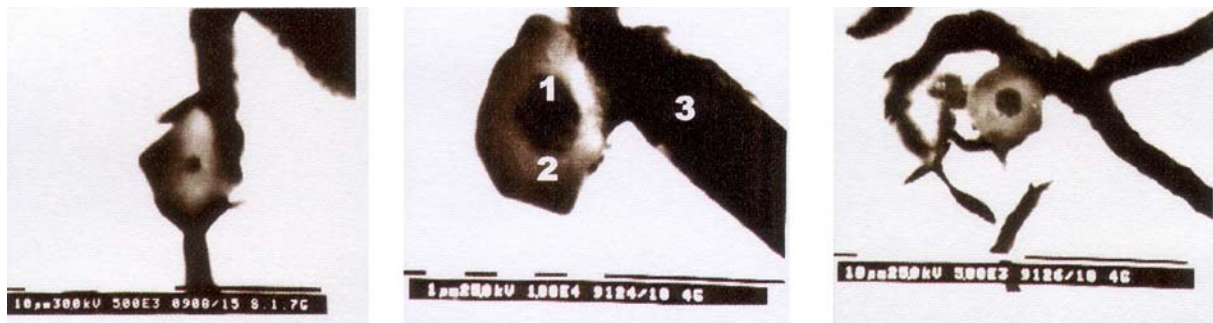
Model nukleacije grafitu u ne cijepjenom i cijepjenom sivom lijevu:

Prvi stupanj:

U taljevini se na osnovi jakih dezoksidirajućih elemenata kao što su mangan, silicij, aluminij, titan i cirkonij stvaraju mikro uključci (stabilni oksidi).

Drugi stupanj:

Nukleacija (Mn, X)S uključaka (spojeva) na mikro uključcima (stabilnim oksidima) u taljevini (slika 2.8).



Slika 2.8. Model nukleacije grafitu u sivom lijevu: 1) jezgra uključka – oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-XO}$ ), 2) vanjska ovojnica uključka – sulfid ((Mn,X)S) uključka, 3) listići grafitu

Kod necijepjenog sivog lijeva X je uglavnom željezo i u manjoj mjeri kalcij, aluminij ili titan, uz visok sadržaj mangana i omjer Mn/S u uključcima. Kod cijepjenog sivog lijeva X je kalcij, stroncij, barij, aluminij, elementi rijetkih zemalja itd., uz niži sadržaj mangana i omjer Mn/S u uključcima. Tanki sloj silikata može se formirati na površini (Mn, X)S uključaka kod cijepjenog sivog lijeva, što rezultira boljim kristalografskim slaganjem (bolja kompatibilnost) s grafitom nego u slučaju samog uključka (bez silikatnog sloja). Ovaj sloj je vrlo tanak i vrlo ga je teško detektirati.

Treći stupanj:

Grafit nukleira na stranama (Mn, X)S uključaka koje imaju nisko kristalografsko neslaganje s grafitom (slika 2.8). Kod necijepjenih sivih ljevova (Mn, X)S spoj je jednostavan, a kristalografsko neslaganje između grafitu i spoja je relativno veliko. U cijepjenim sivim ljevovima (Mn, X)S spoj je znatno kompleksniji i kristalografsko neslaganje između grafitu i spoja je niže. Uključci u kontaktu s grafitom djelomično ili u potpunosti su okruženi grafitnim listićima.

Pored aluminija i kisika, jezgra uključaka gotovo uvijek sadrži mangan, sumpor, željezo, silicij, kalcij, stroncij i moguće mnoge druge elemente u malim količinama.

Neovisno o tipu cjepiva, jezgre uključaka sadrže aluminij (aluminij je sastavni dio cjepiva) i kisik. Sadržaj aluminija mora se prilagoditi i kontrolirati jer ima važnu ulogu u stvaranju jezgre uključaka. Za optimalne učinke cijepjenja, preporučeni rezidualni sadržaj aluminija u sivom lijevu iznosi 0,005 – 0,01%. Previsok sadržaj aluminija može rezultirati greškama u odljevcima (mjehuri – podpovršinska poroznost).

Nakon cijepjenja, veliki dio sumpora je zadržan u (Mn, X)S spojevima zbog prisustva elemenata, kao što su kalcij, aluminij, stroncij, barij itd., tako da je smanjen omjer Mn/S. Kad se smanji omjer Mn/S, znatno kompleksniji sulfidi imaju mnogo kompatibilniji kristalografski

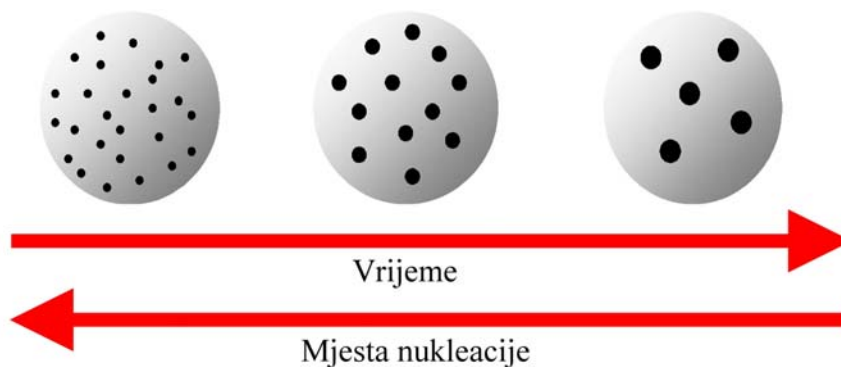
sustav za nukleaciju grafita. Omjer Mn/S u (Mn, X)S česticama određen je količinom dodanih elemenata koji imaju afinitet prema sumporu (kalcij, stroncij, barij) i omjerom Mn/S u taljevini sivog lijeva, zbog čega je važan sadržaj mangana i sumpora u taljevini. Što je viša koncentracija mangana u taljevini sivog lijeva viši je omjer Mn/S u (Mn, X)S česticama. Shodno tome, može se zaključiti da je efikasnost cijepjenja kontrolirana ne samo količinom dodanog cjepiva već i sadržajem mangana i sumpora, odnosno omjerom Mn/S u cijepljenoj taljevini sivog lijeva.

Iz navedenog razmatranja nukleacije grafita na uključcima u sivom lijevu može se zaključiti da je pored odabira adekvatnog cjepiva i količine cjepiva vrlo važno ostvariti odgovarajući sadržaj mangana i sumpora u taljevini te odgovarajući omjer Mn/S. Pored toga, bitno je ostvariti odgovarajući sadržaj kisika u taljevini prije cijepjenja u cilju vezanja s elementima koji imaju visok afinitet prema kisiku i formiranja stabilnih oksida, koji kasnije služe kao mjesta nukleacije (Mn, X)S spojeva. Sadržaj kisika u taljevini može se povišiti dodatkom sredstava za povišenje sadržaja kisika u taljevini ili određenih količina korodiranog željeza.

#### 2.4.1 Pogrubljenje uključaka

Značajno pogrubljenje uključaka pojavljuje se unutar vremenskog intervala između cijepjenja i skrućivanja. Pogrubljenjem uključaka ne mijenja se volumni udio nemetalnih uključaka, već dolazi do smanjenja broja uključaka (stvaraju se krupniji uključci), odnosno smanjenja broja potencijalnih mjesta za nukleaciju grafita.

Pogrubljenje uključaka u željeznim ljevovima odvija se Ostwaldovim sazrijevanjem koje predstavlja difuzijski kontrolirani proces gdje veće čestice rastu na račun manjih (slika 2.9).

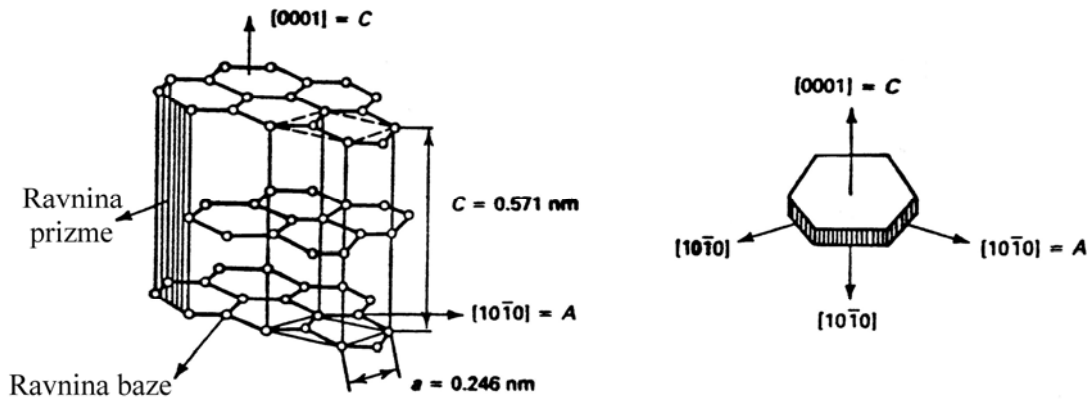


Slika 2.9. Shematski prikaz pogrubljenja uključaka Ostwaldovim sazrijevanjem

Pokretačka sila osigurana je smanjenjem ukupne granične površine čestica/taljevina, koja u pravilu smanjuje ukupnu slobodnu energiju sustava.

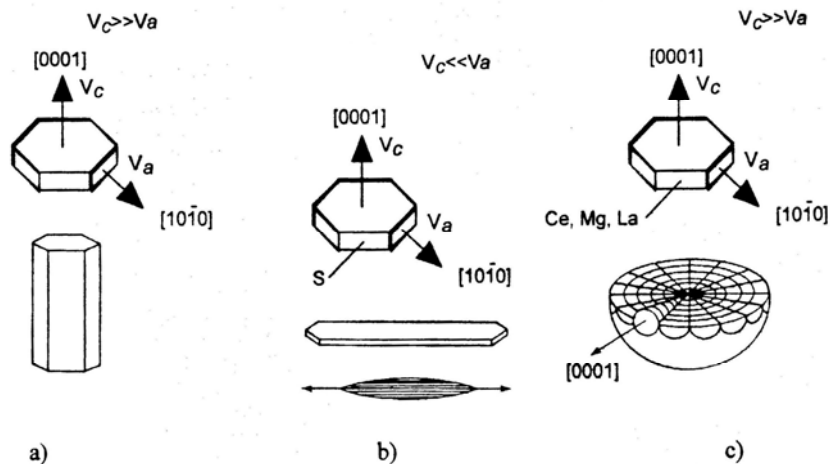
## 2.5 Mehanizam rasta listićavog grafita

Grafrit spada u kategoriju kristala s fasetiranom graničnom površinom. Kristalna rešetka grafita sastoji se od heksagonalne mreže atoma ugljika u slojevitoj konfiguraciji (slika 2.10). Površina svakog sloja stvara ravninu baze ili osnove, a rubovi sloja čine ravninu prizme. Ravnina prizme je površina s najvišom energijom na koju se preferirano adsorbiraju „nečistoće“ (sumpor, kisik).



Slika 2.10. Struktura kristala grafita

Proces nastajanja različitih oblika grafita u željeznim ljevovima odvija se kao rezultat nukleacije i rasta. Rast kristala grafita iz taljevine u svezi je sa strukturom granične površine i kinetikom pripajanja atoma ugljika na tu površinu. Ukoliko se radi o čistoj Fe-C-Si leguri, najveća brzina rasta grafita odvija se u smjeru *c*-osi okomito na ravninu baze zbog najveće gustoće atoma, što rezultira nastajanjem ne razgranatih pojedinačnih kristala, kako prikazuje slika 2.11a.

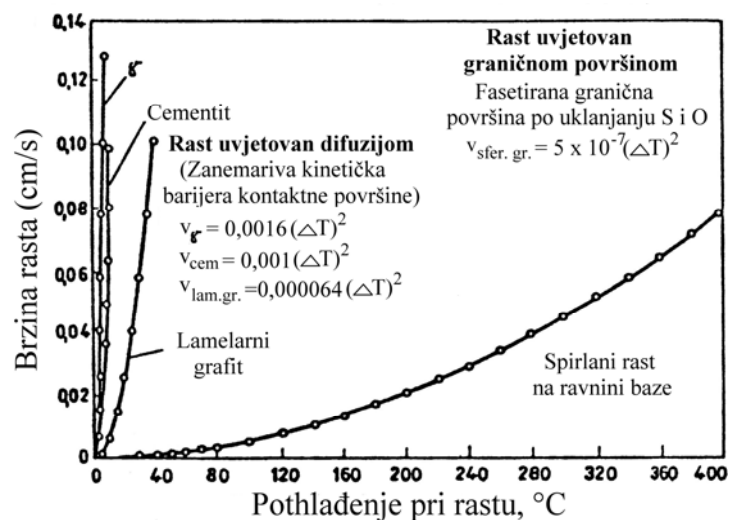


Slika 2.11. Promjena brzine rasta grafita zbog adsorpcije stranih atoma: a) bez prisutnosti nečistoća, b) u prisutnosti površinski aktivnih elemenata, kao što su sumpor i kisik, adsorbiranih na površini prizme, c) u prisutnosti nodularizirajućih elemenata (magnezij, cerij, lantan)

Nakupine nečistoća koje segregacijom na graničnu površinu smanjuju međufaznu energiju pospješuju mobilnost granične površine. Kisik i sumpor predstavljaju nečistoće koje su uvijek prisutne u željeznim ljevovima.

Kao površinski aktivni elementi, kisik i sumpor adsorbiraju se na površinu prizme (površina visoke energije) pri čemu ta površina postaje najgušće zaposjednuta atomima, što doprinosi smanjenju površinske energije i stvaranju kristalografski nefasetirane površine, odnosno stvaranju uvjeta za nesmetano priključenje atoma ugljika iz taljevine. Ovaj mehanizam “žbukanja” površine prizama kristala grafita omogućuje visoku mobilnost ove površine već pri malim pothlađenjima taljevine. U tom slučaju grafit raste u smjeru *a*-osi pripajanjem atoma ugljika iz taljevine pri čemu se debljina stvorenog listića (lamelle) ne mijenja (slika 2.11b). Rast listićavog grafita kontroliran je difuzijom atoma ugljika na graničnu površinu. Listići grafita su tijekom cijelog procesa eutektičkog skrućivanja u direktnom kontaktu s taljevinom. To pospješuje povezani eutektički rast grafitnih listića i austenita.

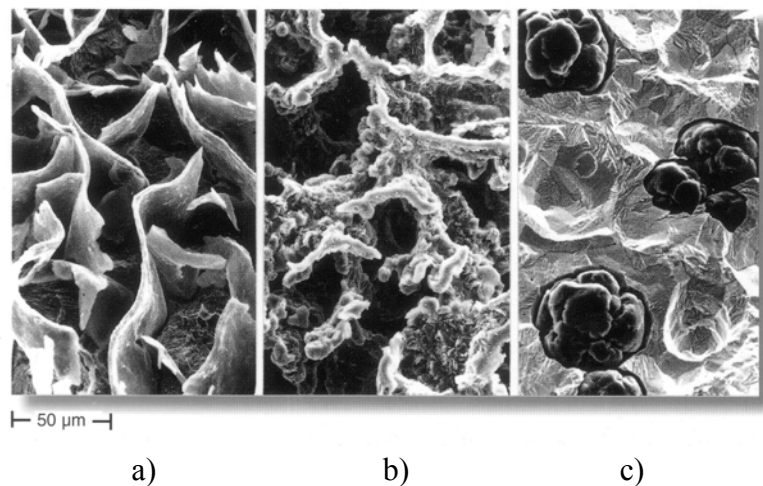
Austenit također ima kristalografski nefasetiranu, hrapavu difuznu graničnu površinu. Karakteristika tih graničnih površina je kontinuirani mehanizam rasta (slika 2.12), što uključuje najnižu kinetičku barijeru procesa skrućivanja. Ovakva granična površina pokazuje visoku mobilnost i za rast je potrebna mala pokretačka sila. Intenzitet rasta kristalografski nefasetirane granične površine određen je intenzitetom transporta (difuzijom) otopljenog elementa na graničnu površinu. Premda je konstanta rasta listićavog grafita za red veličine niža od one austenita, u ovom se slučaju ipak može računati s povezanim eutektičkim rastom (slika 2.12).



Slika 2.12. Odnos brzina rasta konkurentskih faza iz taljevine željeznog lijeva i pothlađenja pri rastu

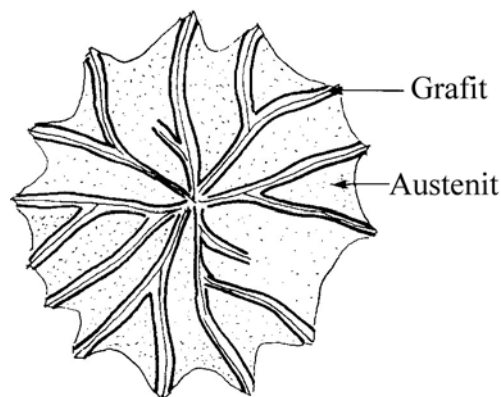
Elementi, kao što su magnezij, cerij, itrij, lantan i gadolinij imaju ograničenu topivost u austenitu i nisku topivost u grafitu i taljevini. Desulfurizacijski i dezoksidacijski utjecaj ovih elemenata (vezanje sumpora i kisika te stvaranje stabilnih sulfida i oksida) ograničava rast kristala grafita, jer uklanjanje površinski aktivnih elemenata doprinosi fasetiranju granične površine kruto-tekuće. Fasetirana granična površina posjeduje slabu mobilnost, zbog čega je za rast kristala potrebna veća pokretačka sila, odnosno veće pothlađenje. Kristali grafita tada rastu u smjeru *c*-osi ili u smjeru okomito na ravninu baze pri čemu iz taljevine nastaje nodularni grafit (slika 2,11c). U slučaju fasetirane, glatke granične površine, u Fe-Si-C + (Mg) sustavu djeluje mehanizam spiralnog rasta grafita. Kod nodularnog lijeva, brzina spiralnog mehanizma rasta grafita je nekoliko puta manja od brzine rasta austenita, što rezultira razdvojenim eutektičkim rastom (slika 2.12). Spiralni rast grafita zahtijeva veće kinetičko pothlađenje.

Mehanizam rasta vermikularnog grafita kombinacija je rasta listićavog i nodularnog grafita. Na slici 2.13 prikazana je usporedba morfologije listićavog, vermikularnog i nodularnog grafita.



Slika 2.13. Snimke morfologije listićavog (a), vermikularnog (b) i nodularnog (c) grafita

Eutektik austenit-listićavi grafit skrućuje stvaranjem eutektičkih ćelija. Smatra se da je svaka eutektička ćelija rezultat pojedinačnog nukleacijskog događaja. Eutektičke ćelije nastaju između grana primarnih dendrita austenita. Nakon nukleacije grafita, eutektičke ćelije rastu na približno radijalan način unutar ograničenja nametnutih austenitnim dendritima koji ih okružuju. Listići grafita se savijaju, zakreću i granaju kao što je prikazano na slici 2.14. Rast grafitnih lamela započinje iz jednog (zajedničkog) centra kristalizacije. Tijekom rasta grafit je stalno u kontaktu sa taljevinom, a austenit ispunjava prostor između grafitnih listića. Eutektičke ćelije kontinuirano rastu sve dok se međusobno ne sudare.

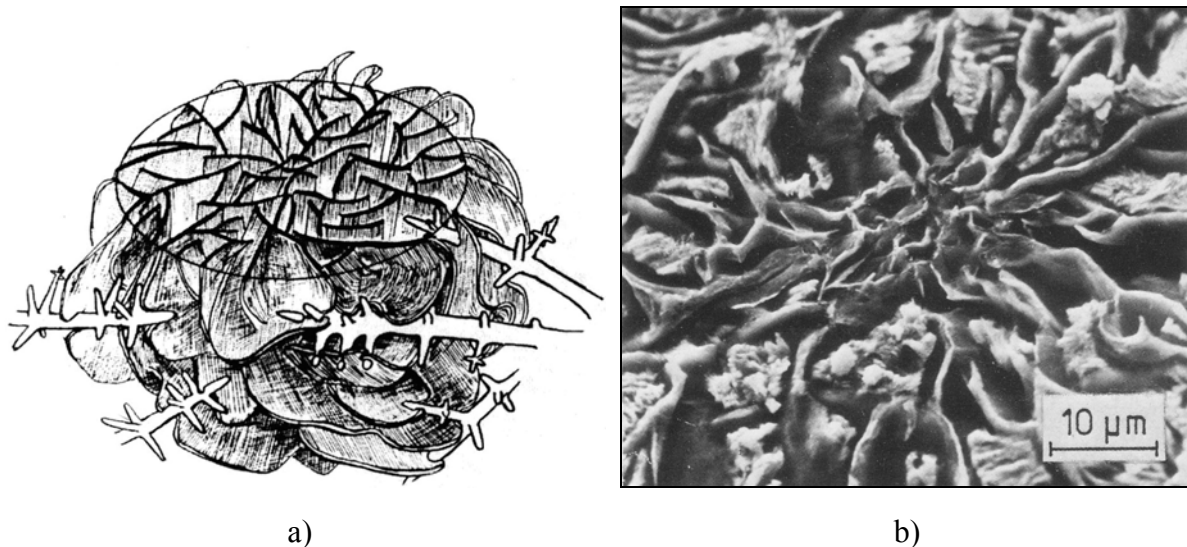


Slika 2.14. Shematski prikaz rasta eutektičke ćelije u sivom lijevu

Eutektička ćelija građena je od međusobno povezanih listića grafita okruženih austenitom. Zbog kontinuirane prirode grafitnih listića i karakterističnog oblika u literaturi se često susreće naziv „grafitna ruža“ (grafitni kostur), jer su grafitni listići međusobno povezani, a grafitna ruža se razvija iz odgovarajućeg centra (slika 2.14 i 2.15). Ako promatramo eutektičku ćeliju u dvodimenzionalnoj projekciji (uzorci za metalografsku analizu) stječe se dojam da je svali listić samostalan i odvojen od susjednih listića (slika 2.1). Tek trodimenzionalno promatranje grafita npr. pri dubokom nagrivanju, pokazuje da su listići grafita međusobno povezani i da se razvijaju iz zajedničkog središta, odnosno centra

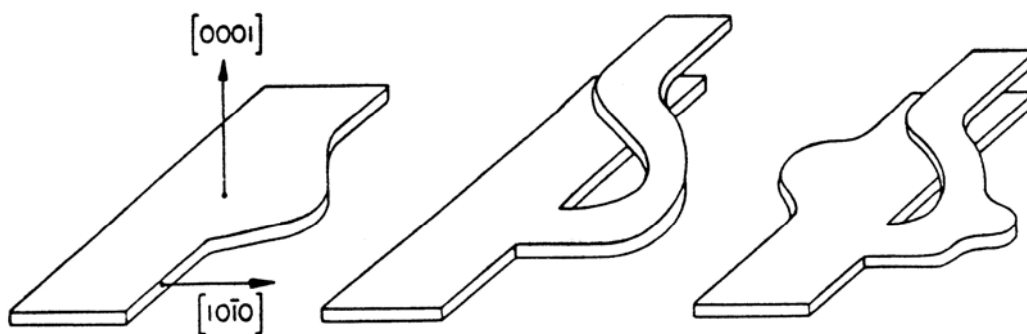


kristalizacije. Svaka eutektička ćelija sadrži svoju individualnu, kontinuiranu grafitnu ružu. Broj eutektičkih ćelija povezan je s brzinom hlađenja (skrućivanja) te nukleacijskim potencijalom taljevine. Veće brzine hlađenja i veći broj nukleacijskih mjesta u konačnici rezultiraju većim brojem eutektičkih ćelija manjih dimenzija.



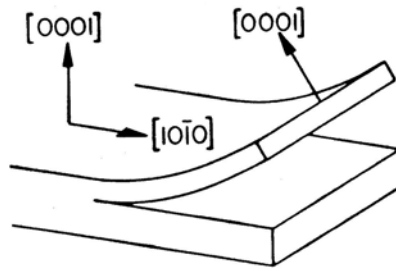
Slika 2.15. a) model eutektičke ćelije prema Morrogh-u i Oldfield-u, (b) snimka eutektičke ćelije u sivom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

Stupanj grananja grafita unutar ćelije ovisi o pothlađenju. Veće podhlađenje rezultira većim grananjem grafita. Slika 2.16 prikazuje model grananja grafitnih listića prema Minkoffu i Luxu. Grafit raste u obliku listića omeđenih [0001] površinama, dok druga faza eutektika (austenit), raste usporedno s njima. Grananje grafita odvija se tada postranično (bočno), a nastala grana savija i raste iznad matičnog kristala. Kontinuiranim grananjem rastućih grana dolazi se tad do poznatog oblika grafitne ruže (slika 2.15).



Slika 4.16. Model grananja grafitnih listića u eutektičkoj ćeliji (prema Minkoff-u i Lux-u)

Listićavi grafit može se granati i rascjepljivanjem grafitnog listića duž površine baze (slika 2.17).



Slika 4.17. Grananje grafitnih listića rascjepljivanjem

## 2.6 Morfologija grafita

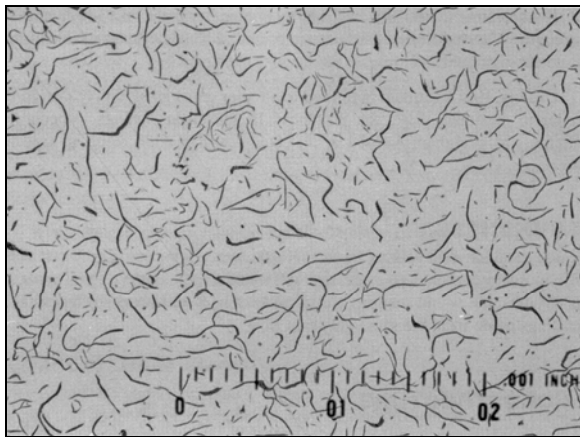
Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva jednim dijelom ovise o obliku, veličini, količini i raspodijeli grafitnih listića. Distribucija, tip i veličina grafitnih listića ovisi o temperaturi i brzini skrućivanja te nukleacijskom potencijalu taljevine. Prema normi ASTM A247 listićavi grafit podijeljen je u 5 klasa (tipova), slika 2.18.

Tip A grafitnih listića (slika 2.18a) su jednoliko raspodijeljeni listići, slučajne ili statističke orijentacije, u metalnoj osnovi. Karakterističan je za taljevine sivog lijeva s minimalnim pothlađenjem tijekom skrućivanja (slika 2.19), odnosno za slučajeve kada se skrućivanje odvija sporo uz postojanje ravnotežnih uvjeta. Manji listići postižu se kod odljevaka s tanjim stjenkama (veća brzina hlađenja) i većim brojem centara nukleacije, što u konačnici rezultira većom čvrstoćom. Ovaj tip grafita teško se ostvaruje, naročito kod odljevaka različitih debljina stijenki. Iz tog razloga taljevina sivog lijeva obično se mora cijepiti u cilju povećanja nukleacijskog potencijala. Uz A tip grafitnih listića ostvaruju se optimalna fizikalna i mehanička svojstva, što je posebno izraženo kod odljevaka kao što su kočioni diskovi i bubnjevi u automobilima. U tim slučajevima s jedne strane pojavljuje se otpornost na trošenje, a s druge strane otpornost na toplinski umor.

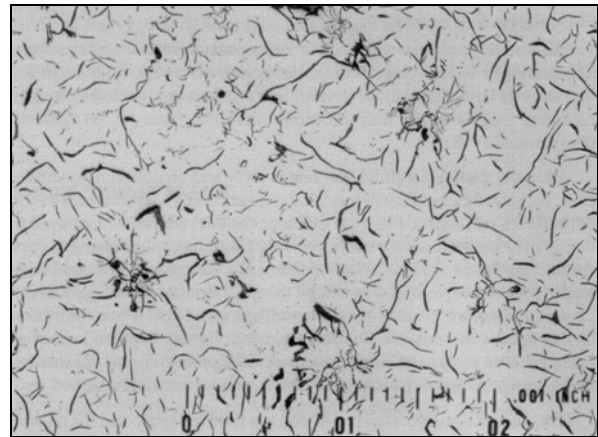
Kod nešto većih brzina hlađenja i nižeg nukleacijskog potencijala taljevine ne uspostavljaju se ravnotežni uvjeti tijekom skrućivanja, što rezultira pothlađenjem taljevine (slika 2.19). U tom slučaju skrućivanje se odvija pri nižim temperaturama od ravnotežne temperature skrućivanja. Tada nastaje B tip grafitnih listića. Na početku eutektičkog skrućivanja formiraju se rozete u čijem se centru izlučuje sitni fini listićavi grafit (slika 2.18b), jer eutektičko skrućivanje započinje pri većim pothlađenjima. Toplina oslobođena tijekom skrućivanja povisuje temperaturu preostale taljevine, odnosno smanjuje pothlađenje, što rezultira naknadnim rastom A tipa grafita koji je izražen po rubu rozeta (slika 2.18b). Veće podhlađenje zbog kojeg se javlja sitni grafit uvjetovano je nedostatkom centara heterogene nukleacije i govori o nedostatnom cijepljenju taljevine. Kod istog kemijskog sastava i iste debljine stjenke, odljevak od sivog lijeva s B tipom grafitnih listića imati će manju čvrstoću od odljevka s A tipom grafitnih listića male veličine.

Tip C grafitnih listića (slika 2.18c) pojavljuje se u nadeutektičkim sivim ljevovima, posebno u onima s visokim sadržajem ugljika. Karakteriziraju ga veliki, grubi listići izlučenog grafita, što govori o nadeutektičkom sastavu. Po dostizanju eutektičkog sastava u taljevini nastupa izlučivanje A tipa grafita. Prisustvo C tipa grafita u mikrostrukturi značajno smanjuje čvrstoću i tvrdoću odljevka od sivog lijeva i rezultira grubom površinom odljevka nakon strojne obrade. Zbog niskog modula elastičnosti i visoke toplinske vodljivosti, sivi lijev s ovim tipom grafita poželjan je za lijevanje odljevaka kod kojih se zahtijeva visoka otpornost na izmjenične cikluse grijanja i hlađenja (toplinske šokove) i visoka sposobnost prigušenja

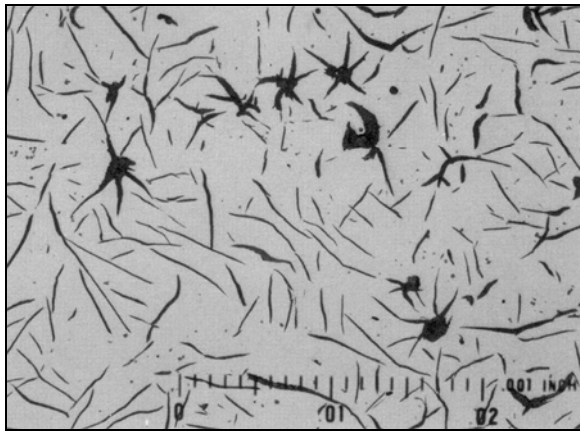
vibracija, a čvrstoća nije presudan faktor. Naročito je pogodan kod kvaliteta sivog lijeva za izradu čeličanskih kokila.



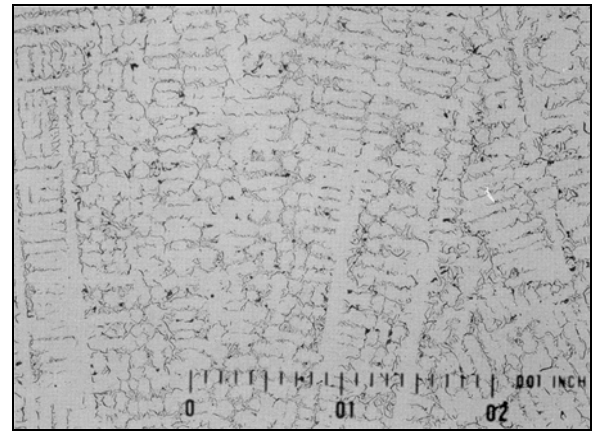
a)



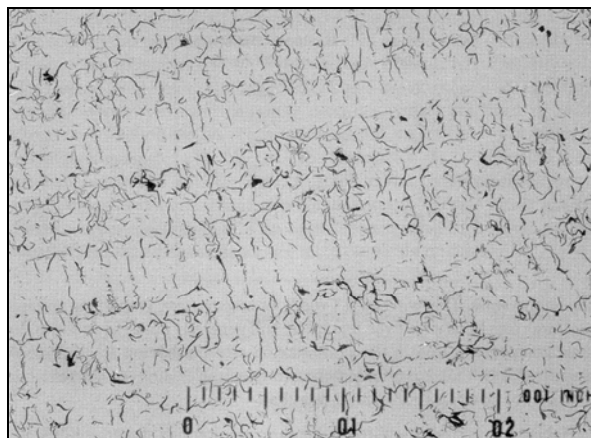
b)



c)

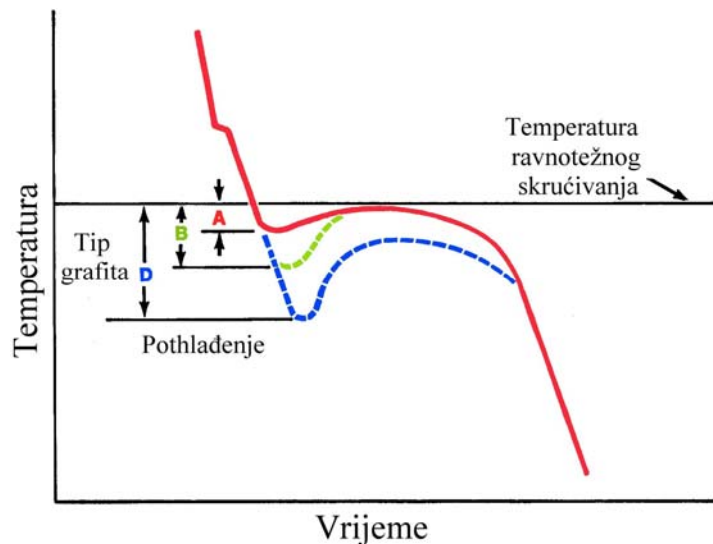


d)



e)

Slika 2.18. Tipovi listićavog grafita prema ASTM A247: a) A tip, b) A i B tip, c) C tip, d) D tip, e) E tip



Slika 2.19. Shematski prikaz krivulja hlađenja sivih ljevova s različitim morfologijama grafita

Grafitni listići D tipa (slika 2.18d) i E tipa (slika 2.18e) nastaju kad je pothlađenje taljevine dosta visoko (slika 2.19), ali ne i toliko veliko da prouzrokuje stvaranje karbida. Oba tipa grafitnih listića pojavljuju se u interdendritnim područjima pri čemu je tip E usmjerene (preferirane) orijentacije obzirom na odvođenje topline i usmjerenje primarnih dendrita, a tip D statističke orijentacije. Kod istog kemijskog sastava i debljine stjenke, ali nešto veće brzine hlađenja nago u slučaju nastajanja B tipa grafitnih listića, doći će do većeg pothlađenja i nastajanja D tipa grafitnih listića. Tip E grafitnih listića povezan je s jače izraženim podeutektičkim sastavima sivih ljevova (CE od 3,3 do 3,5) koji su podvrgnuti prilično visokim brzinama hlađenja. Kod tih sivih ljevova pri temperaturi eutektičkog skrućivanja, zbog izraženog podeutektičkog sastava (velika količina primarnog austenita), 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. Uz ove oblike grafita, obzirom da se radi o izrazito sitnim i razgranatim listićima, pojavljuje se i ferit u mikrostrukturi, jer ovakve strukture rezultiraju značajnim smanjenjem putova difuzije ugljika. Zbog nastanka ferita u metalnoj osnovi prisutan je značajan pad vlačne čvrstoće, ali i značajno poboljšanje strojne obradivosti. Kod alata za izradu staklene ambalaže, gdje je vrlo bitna površina takvog proizvoda, preferira se D tip grafitnih listića na površini.

Pravilnim cijepljenjem može se izbjeći stvaranje D tipa grafitnih listića i postići izlučivanje A tipa grafitnih listića tijekom skrućivanja.

Prema veličini, norma ASTM A248-98 kategorizira grafitne listiće u 8 klasa (tablica 2.3). Veličina grafitnih listića određuje se na metalografskim snimkama pri povećanju 100x. Veći (duži) listići nastaju pri visokim vrijednostima ekvivalenta ugljika i niskim brzinama hlađenja. Kod sivih ljevova s izraženim podeutektičkim sastavom te kod sivih ljevova podvrgnutih brzom skrućivanju nastaju mali, kratki listići. Veliki listići grafita poželjni su kod odljevaka kod kojih se zahtijeva visoka toplinska vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija. Mali listići pogodniji su za odljevke kod kojih se zahtijeva maksimalna vlačna čvrstoća i glatka površina, jer oni u manjoj mjeri ispresijecaju metalnu osnovu.

Tablica 2.3. Kategorizacija grafitnih listića prema veličini (ASTM A 248-98)

Klasa	Maksimalna dimenzija pri povećanju 100x, mm
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

## 2.7 Pretvorbe u krutom stanju

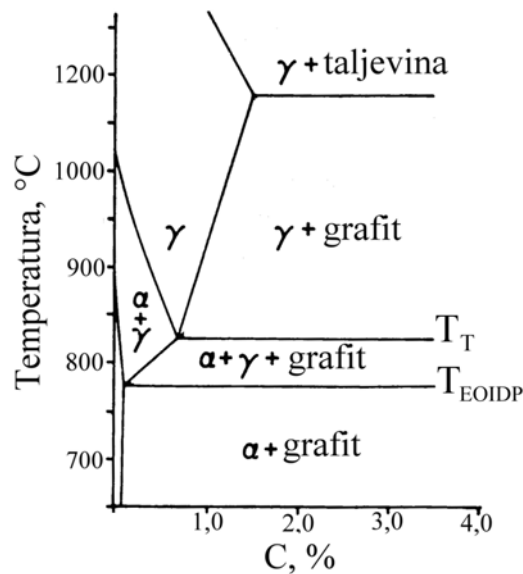
Mikrostruktura željeznih ljevova određena je tijekom skrućivanja i tijekom naknadnih pretvorbi u krutom stanju (eutektoidna pretvorba).

Mikrostruktura tipičnog sivog lijeva u lijevanom stanju pri sobnoj temperaturi sastoji se od listića grafita i metalne osnove, koja predstavlja smjesu perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) i ferita ( $\alpha$ ). Pored navedenih faza, ovisno o uvjetima pri hlađenju i prisutnim legirajućim elementima, metalna osnova može biti bainitna, martenzitna te austenitna (visok sadržaj nikla).

Udio ferita, odnosno perlita u metalnoj osnovi sivog lijeva ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja kroz područje eutektoidne pretvorbe te volumnom udjelu i tipu grafitnih listića. Kod uobičajenih kvaliteta sivog lijeva, u slučaju A tipa grafitnih listića, metalna osnova je gotovo u potpunosti perlitna, dok u slučaju D tipa grafitnih listića prevladava ferit u metalnoj osnovi. Obzirom da mehanička svojstva sivog lijeva ovise o mikrostrukтури, očito je da se varijacijama u mikrostrukтури može postići široko područje mehaničkih svojstava.

Na slici 2.20 prikazano je eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-2,0 %Si. Može se vidjeti da se nakon završetka skrućivanja topljivost ugljika u austenitu ( $\gamma$ ) smanjuje sa smanjenjem temperature. Karakteristika ovog dijagrama je prisustvo trofaznog područja (ferit ( $\alpha$ ) + austenit ( $\gamma$ ) + grafit) koje ne egzistira u binarnom sustavu Fe-C. Ovo područje rezultat je dodatka silicija, kao trećeg elementa.

Eutektoidna pretvorba predstavlja difuzijski kontroliran proces i može se podijeliti u dvije faze: stvaranje ferita, odnosno stabilne faze, te stvaranje perlita, tj. metastabilne faze iz austenita. Nakon skrućivanja, pri solidus temperaturi, mikrostruktura sivog lijeva sastoji se od austenita i listićavog grafita, pri čemu austenit sadrži ~ 1,5 % ugljika. Sa smanjenjem temperature opada topljivost ugljika u prezasićenom austenitu. Zbog toga prezasićeni austenit odbacuje ugljik koji difundira na listiće grafita. Pri vrlo sporom hlađenju (ravnotežni uvjeti) difuzija ugljika ka postojećim grafitnim listićima rezultira nastajanjem ugljikom osiromašenih austenitnih područja oko grafitnih listića, što u konačnici dovodi do nukleacije ferita na graničnoj površini austenit/grafit i to na vrhovima grafitnih listića te određenim područjima duž bočnih stranica listića, slike 2.21a i b. Nukleacija ferita započinje pri temperaturi  $T_T$  (slika 2.20).



Slika 2.20. Eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C- 2,0 %



a)

b)

Slika 2.21. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva u nenagrizenom stanju pri povećanju 250x

Daljnijm hlađenjem ispod temperature  $T_T$  dolazi do daljnje feritizacije, odnosno nastavlja se pretvorba austenita u ferit i grafit, koja završava na temperaturi  $T_{EOIDP}$ . Na taj način bi se pri hlađenju pod ravnotežnim uvjetima dobila potpuno feritna metalna osnova. To objašnjava zašto debelostjeni odljevci koji se sporo hlade imaju veći udio ferita u metalnoj osnovi od tankostjenih odljevaka.

Karakteristično je da se kod sivog lijeva s A tipom grafitnih listića feritna područja međusobno „sudaraju“ i listići grafita nisu u potpunosti okruženi feritom (listićavi grafit izlaže manji broj mjesta za priključivanje atoma ugljika od nodularnog grafita). Značajniji udio ferita u mikrostrukтури sivog lijeva povezan je s B ili D tipom grafitnih listića, jer se prisustvom većeg broja izrazito sitnih i razgranatih listića povećava broj potencijalnih mjesta za priključenje atoma ugljika.

U praksi se ravnotežni uvjeti jako teško mogu ostvariti, zbog čega će tijekom eutektoidne pretvorbe doći do stvaranja perlita. Prema tome, eutektoidna pretvorba u sivom lijevu karakterizirana je odvijanjem dvaju usporednih procesa: pretvorba prema stabilnom

sustavu -  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{grafit}$  i pretvorba prema metastabilnom sustavu -  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ . Ravnotežna temperatura nastajanja perlita leži ispod ravnotežne temperature nastajanja ferita. To znači da perlit može nastati kad se „povlaštena“ (direktna ili primarna) feritizacija u potpunosti ili djelomično potisne.

Perlit se stvara pod neravnotežnim uvjetima, kada po dostizanju temperature  $T_{\text{EODP}}$  u strukturi postoji još netransformiranog austenita. Postojanje netransformiranog austenita u velikoj je mjeri određeno sadržajem ugljika u austenitu. Svako djelovanje koje sprječava difuziju ugljika (grafitizaciju) pri hlađenju sa solidus temperature do područja pretvorbe u perlit (hlađenje ispod temperature  $T_{\text{EODP}}$ ) povećava mogućnost zaostajanja netransformiranog austenita. Zbog toga se bržim hlađenjem, kao i grubljim rasporedom listića grafita (A tip) pospješuje stvaranje perlita. Nasuprot tome, sporo hlađenje i sitni listićavi grafit (D tip) pospješuju stvaranje ferita, jer se sporim hlađenjem produžuje vrijeme za difuziju, a sitnijom strukturom grafitnih listića skraćuju putovi difuzije ugljika i povećava broj potencijalnih mjesta za priključivanje atoma ugljika na postojeće grafitne listiće. Brzina rasta perlita je znatno veća od brzine rasta ferita, što znači da će se nakon početka stvaranja perlita vrlo malo stvarati dodatnog ferita.

Legirni elementi i brzina hlađenja utječu na stvaranje ferita i perlita. Određeni elementi kemijskog sastava promoviraju stvaranje ferita (npr. silicij), dok elementi kao što je npr. kositar, bakar, mangan itd. promoviraju stvaranje perlita.

Većina legirnih elemenata potiskuje pretvorbu u ferit ili perlit ka dužim vremenima i nižim temperaturama. Na taj način je moguće i kod manjih brzina hlađenja izbjeći stvaranje ferita i ostvariti potpuno perlitnu metalnu osnovu.

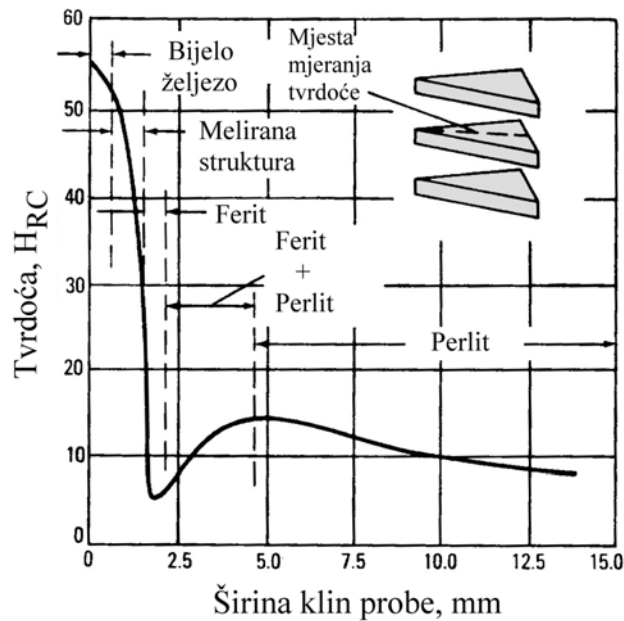
Većom brzinom hlađenja postiže se veći udio perlita u metalnoj osnovi.

### **2.7.1 Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke) na mikrostrukturu sivog lijeva**

Pored kemijskog sastava, svojstva odljevaka od sivog lijeva u velikoj mjeri ovise o brzini hlađenja (poprečnom presjeku, debljini stjenke) tijekom i nakon skrućivanja. To znači da će postojati razlika u svojstvima između tankih i debelih stijenki u istom odljevku.

Skrućivanje debelih stijenki traje duže od skrućivanja tankih stijenki. Također, tijekom hlađenja nakon skrućivanja, tanje stjenke se hlade znatno brže od debelih stijenki. Veće brzine hlađenja rezultiraju većim udjelom perlita u mikrostrukturi, a time i većom tvrdoćom i čvrstoćom. Kod vrlo visokih brzina hlađenja može čak doći do stvaranja martenzita u metalnoj osnovi. Npr. kod odljevka sa stjenkama debljine od 12,7 mm do 50,0 mm moguće je da se u tankim stjenkama (12,7 mm) metalna osnova sastoji od martenzita i perlita, dok se metalna osnova u debelim stjenkama (50,8 mm) sastoji od perlita i ferita. U tom slučaju, ispitivanja bi pokazala da je vlačna čvrstoća i tvrdoća znatno veća u tankim stjenkama. Zbog osjetljivosti sivog lijeva na debljinu stjenke, potrebno je napomenuti da se mehanička svojstva dobivena mehaničkim ispitivanjem standardiziranih ispitnih palica koje su izrađene strojnom obradom iz odvojeno lijevanih standardiziranih ispitnih uzoraka mogu razlikovati od stvarnih mehaničkih svojstava odljevka. Sivi lijev je znatno osjetljiviji na debljinu stjenke od ostalih željeznih ljevova, uključujući nodularni i vermikularni lijev.

Utjecaj debljine stjenke na mikrostrukturu i tvrdoću sivog lijeva prikazan je na slici 2.22. Rezultati su dobiveni ispitivanjem tvrdoće klin probe koja je odlivena u kalup od svježje kalupne mješavine i presječena po visini u blizini središta probe.



Slika 2.22. Utjecaj debljine stjenke na mikrostrukturu i tvrdoću sivog lijeva (kemijski sastav: 3,52 % ugljika, 2,55 % silicija, 1,01 % mangana, 0,215 % fosfora, 0,086 % sumpora)

Brzina hlađenja najveća je na vrhu klin probe. To rezultira metastabilnim skrućivanjem, odnosno mikrostrukturu koja se sastoji od željeznog karbida (cementita) i perlita. Zbog toga je tvrdoća ovog područja u klin probi najviša.

Kada se dovoljno smanji brzina hlađenja da se omogući stvaranje grafita, javlja se melirana (miješana) zona unutar klin probe (cementit + grafit). Melirana zona ima nižu tvrdoću od vrha klin probe.

S daljnjim, kontinuiranim povećanjem širine klin probe postepeno nestaje, odnosno smanjuje se udio cementita, a raste udio grafita, što rezultira odgovarajućim padom tvrdoće. Kada u potpunosti nestane cementit, mikrostruktura klin probe sastoji se od feritne metalne osnove i grafitnih listića D tipa, što rezultira minimalnom tvrdoćom.

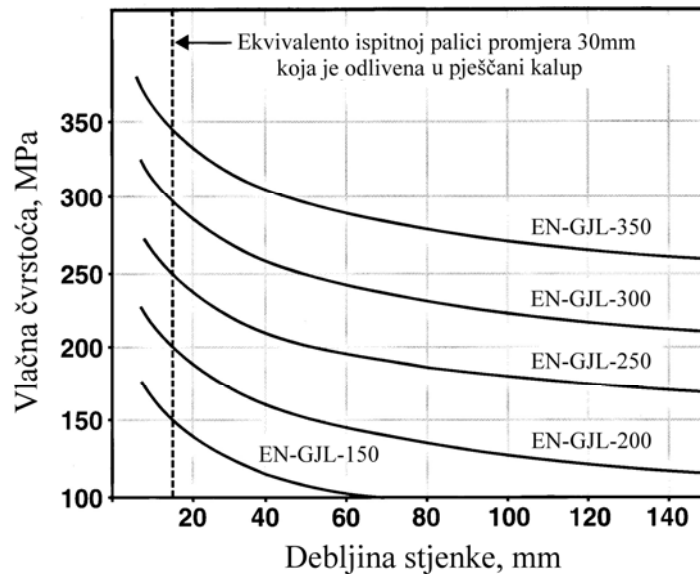
Daljnje smanjenje brzine hlađenja (povećanje širine klin probe) dovodi do porasta tvrdoće zbog promjena u mikrostrukturi koje uključuju postepenu promjenu D tipa grafitnih listića u A tip te feritne u perlitnu metalnu osnovu. S daljnjim kontinuiranim smanjenjem brzine hlađenja opada tvrdoća zbog postepene pretvorbe perlita u ferit i stvaranja grublje grafitne strukture.

Promjenom kemijskog sastava ili ljevaoničke prakse može se krivulja na slici 2.22 pomaknuti u lijevo ili desno. Zbog toga klin proba može biti koristan indikator tendencije ka stvaranju odbjela (cementita).

Brzina hlađenja utječe na vremenski period koji stoji na raspolaganju ugljiku za difuziju iz austenita na grafit i prema tome određuje sadržaj vezanog ugljika u željezu. Sporo hlađenje omogućuje više vremena za difuziju ugljika. Sa smanjenjem količine vezanog ugljika raste udio ferita, što rezultira padom čvrstoće sivog lijeva.

Prema HRN EN 1561:1997 sivi lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. Na slici 2.23 prikazan je utjecaj debljine stjenke na vlačnu čvrstoću različitih kvaliteta sivog lijeva. Sa slike 2.23 može se vidjeti da se kod svih kvaliteta sivog lijeva vlačna čvrstoća smanjuje s porastom debljine stjenke zbog smanjenja brzine hlađenja s porastom debljine stjenke. Smanjenje vlačne čvrstoće uzrokovano je prisustvom većih grafitnih listića te smanjenjem količine vezanog ugljika. Smanjenje količine vezanog ugljika rezultira porastom udjela ferita te povećanjem razmaka lamela u perlitu.





Slika 2.23. Utjecaj debljine stjenke na vlačnu čvrstoću sivog lijeva različitih kvaliteta

## 2.8 Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva sivog lijeva

Kvaliteta i svojstva sivog lijeva ovise o obliku, raspodjeli i veličini izlučenih grafitnih listića te strukturi metalne osnove. Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita te strukturu metalne osnove.

### 2.8.1 Utjecaj stalnih elemenata

U sivom lijevu **ugljik** se izlučuje u svom elementarnom obliku, tj. u obliku grafita. U uobičajenim kvalitetama sivog lijeva sadržaj ugljika kreće se u granicama od 2,9 do 3,8 % (tablica 2.4).

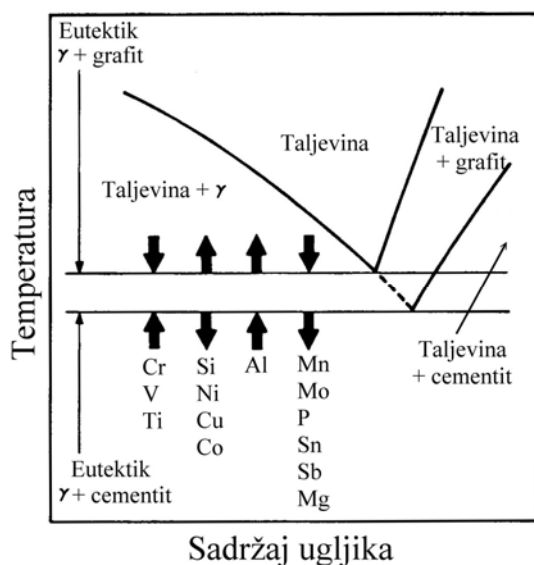
Tablica 2.4. Preporučeni sadržaji stalnih elemenata kemijskog sastava u sivom lijevu za kvalitete normirane prema HRN EN 1561

Element	Kvaliteta					
	EN-GJL-100	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	EN-GJL-350
%C	3,5-3,8	3,4-3,7	3,2-3,5	3,1-3,4	3,0-3,2	2,9-3,1
%Si	2,3-2,8	2,1-2,6	1,8-2,3	1,6-2,1	1,3-1,9	1,1-1,5
%Mn	0,4-0,8	0,5-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8	0,7-0,9	0,8-1,0
%P	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,20	maks. 0,15	maks. 0,10	maks. 0,10
%S	0,06-0,15	0,06-0,15	0,06-0,15	0,06-0,12	0,06-0,12	0,06-0,12
CE	4,2-4,6	4,0-4,3	3,8-4,1	3,6-3,9	3,4-3,7	3,2-3,5

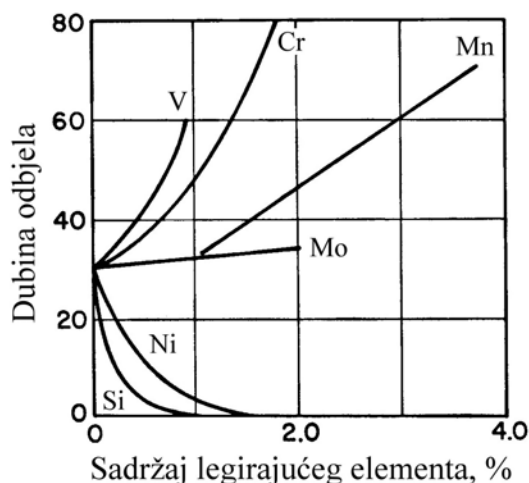
Povećanje sadržaja ugljika povećava sklonost ka grafitizaciji, što rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava odljevaka. Vlačna čvrstoća sivog lijeva opada s porastom sadržaja

ugljika. Porastom sadržaja ugljika poboljšava se livljivost taljevine i smanjuje sklonost ka stezanju te stvaranju usahlina i naprežanja.

**Silicij** smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida. Kao i ostali grafitizatori, tijekom skrućivanja segregira u krutu fazu te podiže temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 2.24). To znači da grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja odbjela - cementita) (slika 2.25). Karbidotvorci (npr. krom, vanadij itd.) djeluju suprotno.



Slika 2.24. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog ( $\gamma + \text{cementit}$ ) eutektika



Slika 2.25. Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Sadržaj ugljika 3,0 do 3,3%

Cementit (Fe<sub>3</sub>C) (ostali nazivi: eutektički karbid, primarni karbid), kojeg ljevači 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. Zbog

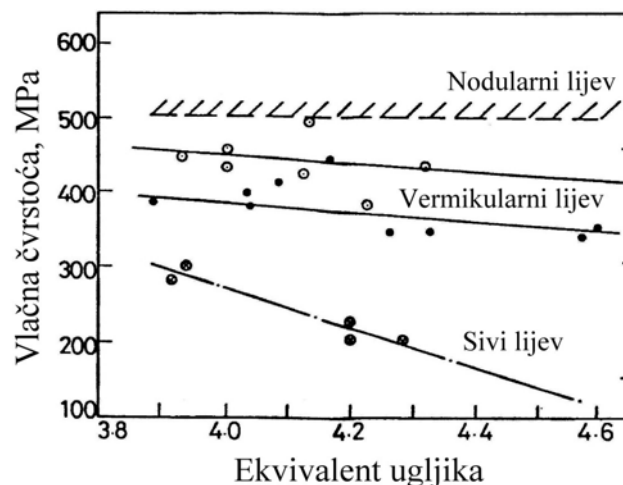
visoke krhkosti, cementit ima negativan utjecaj na vlačnu čvrstoću sivog lijeva. Pored toga, zbog visoke tvrdoće značajno otežava strojnu obradu odljevaka.

Dodatkom silicija sužava se  $\gamma$  područje te proširuje i pomiče trofazno područje ka višim temperaturama, jer silicij podiže temperaturu  $T_T$  i  $T_{EODP}$  (slika 2.20). Zbog toga, za danu brzinu hlađenja, na raspolaganju stoji više vremena za difuziju ugljika, što u konačnici potpomože (promovira) stvaranje ferita.

Zbog promoviranja stvaranja ferita, u proizvodnji perlitnog sivog lijeva sadržaj silicija treba biti  $< 2,0\%$  (tablica 2.4). Međutim, pojava odbjela i karbida u mikrostrukturi ograničava sniženje sadržaja silicija (zahtijevana vrijednost ekvivalenta ugljika održava se povećanjem sadržaj ugljika kada se sadržaj silicija smanjuje).

Kod iste kvalitete sivog lijeva, viši sadržaji silicija preporučuju se kod lijevanja tankostjenih odljevaka, zbog veće opasnosti od stvaranja karbida. Previsok sadržaj silicija djeluje negativno na mehanička svojstva sivog lijeva, jer utječe na strukturu metalne osnove (viši udio ferita) i količinu grafita.

Sadržaj ugljika, silicija (i fosfora) može se promatrati zajedno kao vrijednost CE – **ekvivalent ugljika** ili  $S_c$  – **stupanj zasićenja** (jednadžbe 2.1 i 2.2) Ovi faktori koristan su pokazatelj ljevačkih svojstava. S porastom ekvivalenta ugljika snižava se likvidus temperatura i postiže bolja livljivost. Međutim, porast ekvivalenta ugljika ima negativan utjecaj na vlačnu čvrstoću sivog lijeva (slika 2.26).



Slika 2.26. Utjecaj ekvivalenta ugljika na vlačnu čvrstoću standardiziranih uzoraka promjera 30,0 mm od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva

Iz navedenog razloga sivi lijev je u većini slučajeva podeduktivnog sastava (tablica 2.4). Što je niži sadržaj ugljika, odnosno što je sivi lijev više podeduktivnog sastava, raste količina primarnog austenita, a time i vlačna čvrstoća. Pored snižene vrijednosti ekvivalenta ugljika, za postizanje veće vlačne čvrstoće potrebno je ostvariti visok broj eutektičkih ćelija (smanjenje veličine eutektičkih ćelija), fini (sitni) grafīt A tipa (kraći grafītne listići) te potpuno perlitnu metalnu osnovu (sitnolamelarni perlit), za što se zahtijeva dodatak legirajućih elemenata. Smanjenjem ekvivalenta ugljika postižu se manje varijacije mehaničkih svojstava između debelih i tankih stijenki.

Skлонost ka stezanju i metastabilnom skrućivanju (odbjelu) povećava se s padom ekvivalenta ugljika, odnosno stupnja zasićenja. Odbjel (primarni ili eutektički karbid) pojavljuje se u ranoj fazi skrućivanja kada temperatura taljevine padne ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika ( $Fe-Fe_3C$ ).

Da bi se ostvarila visoka sposobnost prigušenja vibracija potrebno je ostvariti ekvivalent ugljika  $> 4,5$  te duge i grube grafitne listiće, jer takav oblik grafita značajnije utječe na smanjenje vibracija nego metalna osnova.

**Mangan** promovira stvaranje perlita i karbida. Za razliku od silicija, mangan snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C), ali i metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 2.24). Proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature  $T_T$  i  $T_{EOIDP}$  (slika 2.20). Mangan stabilizira austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu. Brzina stvaranja ferita je sporija kod nižih temperatura, jer se sa sniženjem temperature smanjuje brzina difuzije ugljika. Time se uspostavlja povišen sadržaj ugljika u austenitu i promovira stvaranje perlita.

Najznačajnija uloga mangana u sivom lijevu je neutralizacija **sumpora** i formiranje stabilnih MnS uključaka. Prisustvom mangana, odnosno stvaranjem MnS, sprječava se formiranje nepoželjnog željeznog sulfida FeS koji se izlučuje po granicama eutektičkih zrna i uzrokuje krhkost. Željezni sulfid (FeS) može ograničiti rast eutektičkih ćelija, što vodi ka porastu pothlađenja i eventualnoj pojavi odbjela. Pored toga, FeS ima nižu točku taljenja od MnS (FeS  $\rightarrow$  1193°C, MnS  $\rightarrow$  1620°C).

S metalurške strane, stvaranje manganovog sulfida je povoljno zbog neutralizacije sumpora koji, ako nije neutraliziran manganom, ima niz štetnih utjecaja na strukturu i svojstva sivog lijeva. Prekomjeren sadržaj sumpora utječe na stvaranje degeneriranih oblika grafita (mrežasti (engl. *mesh graphite*) i „spiky“ grafit) te porast tendencije ka stvaranju karbida i odbjela.

Stehiometrijska ravnoteža između mangana i sumpora definirana je slijedećom jednačinom:

$$\%Mn = 1,7 \times \%S \quad (2.3)$$

To znači da će u sivom lijevu u kojem je sadržaj mangana 1,7 puta veći od sadržaja sumpora, teorijski gledano, sav sumpor reagirati s manganom, a produkt reakcije je manganov sulfid. Taljevine kod kojih je ovaj uvjet ispunjen smatraju se „izbalansiranim“ („uravnoteženim“). Ako je omjer Mn/S  $> 1,7$  smatra se da u taljevini postoji višak mangana, a ako je omjer Mn/S  $< 1,7$  smatra se da u taljevini postoji višak sumpora.

U praksi, reakcija prikazana jednačinom (2.3) je reverzibilna. To znači da je potreban mali suvišak mangana da bi se odvijanje reakcije potisnulo u desno, tako da se što više sumpora veže s manganom u manganov sulfid. Značaj ovoga prezentirao je A. L. Norbury još 1920. godine. Na osnovi rezultata svojih istraživanja predložio je slijedeći izraz za određivanje potrebitog sadržaja mangana u proizvodnji sivog lijeva:

$$\%Mn = 1,7 \times \%S + 0,3 \quad (2.4)$$

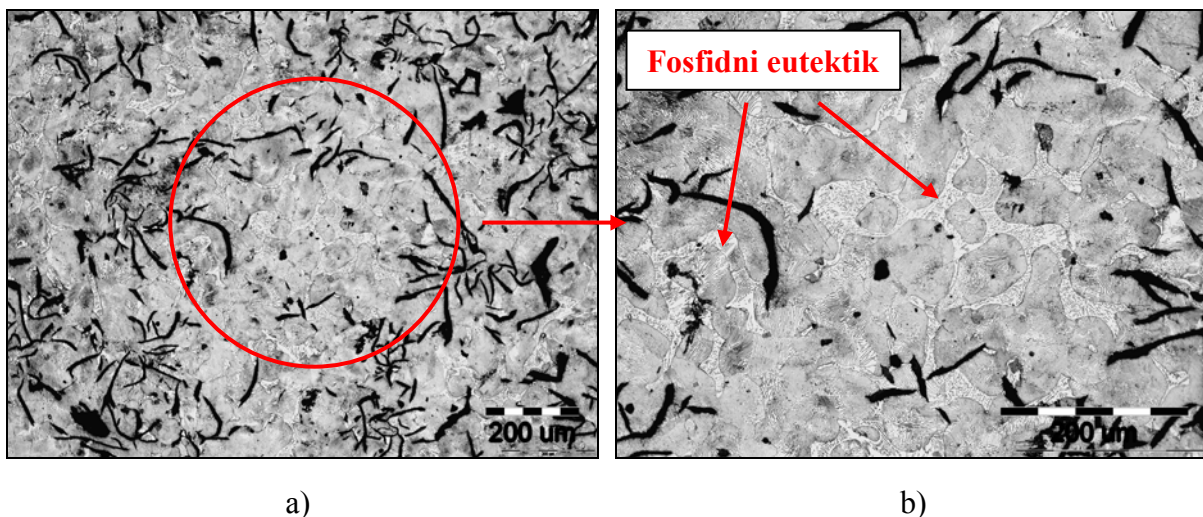
Ovo „pravilo“ prihvaćeno je i ima široku primjenu u proizvodnji sivog lijeva te osigurava zadovoljavajuću kontrolu oblika grafita, strukture metalne osnove i sklonosti ka odbjelu. Prevelik suvišak mangana (iznad potrebnog prema jednačini 2.4) rezultira porastom tendencije ka odbjelu. Kada je prisutan suvišak sumpora dolazi do stvaranja degeneriranih oblika grafita.

Mangan se ne smatra legirajućim elementom u sivom lijevu sve dok je prisutan u potrebitim količinama za vezanje sumpora i stvaranje manganovih sulfida. Iznad tih sadržaja, mangan utječe na povećanje čvrstoće i tvrdoće u istom opsegu kao nikal i bakar. Međutim, sklonost mangana ka stvaranju karbida pri povišenim sadržajima mora se uzeti u obzir pri supstituciji nikla i bakra manganom, koji za razliku od njega ne stvaraju karbide.

**Sumpor** ima značajan utjecaj na nukleaciju i rast listićavog grafita. On smanjuje površinsku napetost taljevine željeznog lijeva, što potpomaže rast listićavog grafita. MnS uključci djeluju kao potencijalna mjesta za nukleaciju grafita. Zbog toga se smatra da minimalna količina sumpora potrebna za dobivanje željene morfologije grafita iznosi 0,06 %. Ispod tog sadržaja broj MnS uključaka je premalen da bi se ostvarila efektivna nukleacija te se javlja problem nastajanja degeneriranih oblika grafita i odbjela.

Budući da snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe<sub>3</sub>C) eutektika, sumpor doprinosi stvaranju odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan, sprječava grafitizaciju. Za razliku od mangana, sumpor ima zanemarivu topljivost u austenitu i snažno segregira u taljevinu. Pored toga, sumpor ima negativan utjecaj na livljivost taljevine.

**Fosfor** stvara nisko topivi fosfidni eutektik koji je poznat pod nazivom steadit (slika 2.27). Točka taljenja fosfidnog eutektika je niska i iznosi ~ 950 °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 2.27). U tom slučaju, u tankim stjenkama, granice ćelija sadrže dvostruko više fosfora od prosječnog sadržaja, dok u debelim stjenkama (> 25 mm) čak i do 10 puta više od prosječnog sadržaja. Za razliku od sulfida, steadit je posljednje stvorena kruta faza u sivom lijevu.



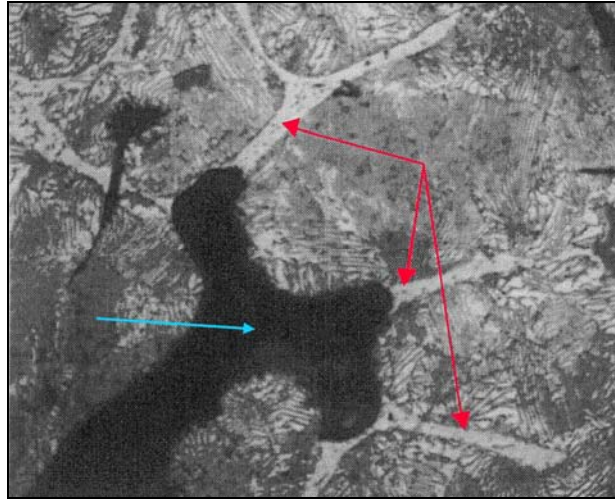
Slika 2.27. Metalografske snimke mikrostrukture sivog lijeva u nagrizanom stanju. Zbog povišenog sadržaja fosfora (0,1 %) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik

Fosfidni eutektik, kao i karbidi, ima visoku tvrdoću što otežava strojnu obradivost odljevaka od sivog 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 sivog lijeva na trošenje (npr. kočione papuče za vagone). U tim slučajevima dozvoljava se do 1,0 % fosfora. 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 osobina sivog lijeva.

Budući da je steadit još uvijek u tekućem stanju kada ostatak odljevka skrućuje, može se javiti mikroporoznost u odljevku (slika 2.28).

Povoljan učinak fosfora u sivom lijevu očituje se u poboljšanju livljivosti. U podeutektičkim sivim ljevovima dodatak 0,2 % fosfora ima isti učinak na livljivost kao dodatak 0,10 % ugljika ili porast temperature lijevanja za 15 °C



Slika 2.28. Metalografska snimke mikrostrukture sivog lijeva u nagrizenom stanju. Fosfidni eutektik (steadit) označen je crvenim strelicama, a šupljine (mikroporoznost) plavim strelicama

Fosfor snižava likvidus temperaturu te temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe<sub>3</sub>C) eutektika (slika 2.24).

## 2.8.2 Utjecaj legirajućih elemenata

**Nikal** povisuje temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 2.24). Dakle, nikal, kao i silicij, proširuje interval između navedenih temperatura i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela (slika 2.25) i nastanku karbida.

Nikal ima visoku topljivost u tekućem željezu, ali negativno utječe na topljivost ugljika. Djeluje kao grafitizirajući element (~ 1/3 grafitizacijskog potencijala silicija) i smanjuje sklonost sivog lijeva ka stvaranju odbjela, slično siliciju. Ako se dodaje u većim količinama (12,0 – 14,0 %) pospješuje stvaranje austenitne metalne osnove.

Obzirom da snižava eutektoidne temperature, nikal promovira stvaranje perlita (blag utjecaj), te ima osrednje djelovanje na usitnjavanje perlita. Pored ovog djelovanja na metalnu osnovu, nikal usitnjava zrna. Pri skrućivanju segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija).

Kada se dodaje u količinama od 0,60 do 1,50 %, nikal povećava čvrstoću i tvrdoću (tablica 2.5) sivog lijeva zbog očvršćivanja metalne osnove sivog lijeva mehanizmom očvršćivanja krute otopine.

Nikal se vrlo često primjenjuje u kombinaciji sa ostalim legirajućim elementima (molibden, krom, vanadij, bakar). Npr. u kombinaciji s molibden, značajno povisuje prokaljivost. Kombinacije legirajućih elemenata omogućuju dobivanje širokog spektra mehaničkih i fizikalnih svojstava jer se legirajući elementi međusobno nadopunjuju u djelovanju, što omogućuje i manji dodatak u cilju postizanja zahtijevanih svojstava.

Za razliku od ostalih elemenata za povećanje prokaljivosti (krom, vanadij, mangan, molibden), nikal (a i bakar) ne stvara karbide. Zbog toga se često za povećanje prokaljivosti primjenjuje kombinacija legirajućih elemenata koja se sastoji od niskih sadržaja nikla i/ili bakra (0,25 do 0,60 %) uz mali dodatak vanadija, kroma ili molibdena.

Tablica 2.5. Utjecaj dodatka legirajućih elemenata na tvrdoću sivog lijeva u lijevanom stanju. Ispitne palice promjera 30 mm lijevane u svježju kalupnu mješavinu. Sastav taljevine: 3,35 % ugljika, 2,10 % silicija, 0,65 % mangana, 0,08 % sumpora, 0,06 % fosfora. Mikrostruktura u lijevanom stanju sastoji se od A tipa grafitnih listića (veličina 5) i perlitne metalne osnove

Legirajući element	Tvrdoća, HB			
	Polazna taljevina	Dodatak 0,1% legirajućeg elementa	Dodatak 0,5% legirajućeg elementa	Dodatak 1,0% legirajućeg elementa
Molibden	205	210	230	255
Krom	205	209	225	245
Vanadij	205	215	255	-
Bakar	205	206	210	215
Nikal	205	207	211	217
Kositar	205	225	-	-

**Krom** je dvostruko efikasniji od nikla i bakra u povećanju vlačne čvrstoće sivog lijeva. Prokaljivost, tvrdoća (tablica 2.5) i otpornost na trošenje sivog lijeva može se poboljšati legiranjem kromom. Kao i ostali karbidotvorci, tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje. Obično se dodaje u količinama do 0,5 %.

Krom spada u grupu elemenata s vrlo visokom sklonošću ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju) jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 2.24).

Krom, kao i mangan, stvara relativno velike količine karbida na granicama zrna. Karbidi kroma izlučeni po granicama zrna smanjuju strojnu obradivost sivog lijeva i teško se mogu izbjeći povećanjem sadržaja silicija ili ukloniti naknadnom toplinskom obradom. Stoga je potrebno smanjiti sadržaj elemenata koji pospješuju stvaranje karbida i ostvariti visok broj eutektičkih ćelija (cijepljenje), čime se postiže veća raspodjela, odnosno manja lokalna koncentracija tih elemenata. Ako se krom primjenjuje za povećanje vlačne čvrstoće, potrebno je uz krom dodati manje količine nikla i bakra, jer ovi elementi nastoje spriječiti nastajanje karbida kroma.

Budući da sužava interval između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika, krom povećava sklonošću ka stvaranju odbjela (slika 2.25). Stvaranje odbjela posebno je izraženo u tankim stjenkama, odnosno pri velikim brzinama hlađenja. Pri legiranju s kromom potrebno je povećati sadržaj silicija da bi se izbjeglo stvaranje odbjela. Dodanoj količini kroma ekvivalentna je 1,5 puta veća količina silicija.

Vrlo povoljni efekti postižu se istodobnim legiranjem kromom i niklom: usitnjavanje grafita, manja varijacija mehaničkih svojstava obzirom na debljinu stjenke, usitnjavanje perlita, porast vlačne čvrstoće i otpornosti na trošenje, manji porast tvrdoće uz istovremeno poboljšanje strojne obradivosti. Da bi se zadržao grafitizacijski potencijal taljevine, potrebno je dodati 1,5 do 2,0 puta veću količinu nikla od kroma.

Krom se pokazao kao najefikasniji element za poboljšanje toplinske otpornosti sivog lijeva, posebno u kombinaciji s molibdenom. Pored toga, ova kombinacija legirajućih elemenata povoljno utječe na smanjenje rasta sivog lijeva pri dugotrajnom radu na povišenim temperaturama.

**Vanadij** povisuje prokaljivost i ima visoku sklonošću ka stvaranju interćelijastih karbida i odbjela, jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 2.24) te slabo perlitizirajuće djelovanje.

Obično se dodaje u količinama do 0,35 % i značajno povećava vlačnu čvrstoću i tvrdoću sivog lijeva (tablica 2.5) putem usitnjavanja grafita i perlita. Tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje.

Dodatak vanadija mora se pažljivo odabrati jer postoji značajna opasnost od stvaranja odbjela, zbog čega mora biti usklađena debljina stjenke i sadržaj silicija ili eventualno bakra ili nikla i taljevina intenzivno cijepljena. Tendencija ka stvaranju karbida raste sa smanjenjem ekvivalenta ugljika i debljine stjenke.

Brzina skrućivanja je vrlo važan faktor u minimalizaciji stvaranja karbida kod sivih ljevova legiranih s vanadijem. Važno je osigurati sporo skrućivanje, osobito kod odljevaka s debljinom stjenke < 25,4 mm.

Može se upotrijebiti pojedinačno ili u kombinaciji s drugim legirajućim elementima u cilju poboljšanja otpornosti na trošenje. Poput kroma stabilizira perlit, posebno na povišenim temperaturama. U odnosu na krom, vanadij je ~ 2 puta efikasniji u povećanju otpornosti na trošenje i stabilizaciji perlita na povišenim temperaturama. U cilju povećanja vlačne čvrstoće i tvrdoće sivog lijeva kod određenog sadržaja ugljika, 0,20 % vanadija može zamijeniti ~ 0,50 % kroma.

**Molibden** je jedan od najsvestranijih legirajućih elemenata za poboljšanje mehaničkih svojstava sivog lijeva, zbog očvršćivanja metalne osnove i usitnjavanja grafitnih listića. Povećuje broj eutektičkih ćelija, prokaljivost (kombinacija s bakrom, kromom i niklom), vlačnu čvrstoću na sobnoj i visokim temperaturama, tvrdoću (tablica 2.5), te otpornost na trošenje, puzanje i toplinski umor sivog lijeva. Najčešće se primjenjuje u količinama < 1,0 %.

Dodatkom molibdena smanjuju se varijacije mehaničkih svojstava između tankih i debelih stijenki. Pored molibdena, u tu svrhu primjenjuje se i nikal, bakar, kositar, vanadij i krom. Kombinacijom npr. molibdena i nikla ili molibdena i bakra postižu se veći efekti nego pojedinačnim dodatkom.

Obzirom da molibden znatno snažnije potiskuje perlitnu reakciju ka nižim temperaturama nego feritnu, moguć je nastanak slobodnog ferita. Prema tome ako se doda sam, molibden može osigurati više vremena za difuziju ugljika i stvaranje ferita, što znači da može povećati udio ferita u debelim stjenkama. Međutim, potiskivanjem perlitne reakcije ka nižim temperaturama molibden uzrokuje finiju perlitnu strukturu, što rezultira porastom vlačne čvrstoće i tvrdoće sivog lijeva, praktički bez štetnog djelovanja na strojnu obradivost.

Budući da molibden ne promovira stvaranje perlita već ga samo usitnjava (snažan efekt) i na taj način podiže čvrstoću i tvrdoću bez štetnog učinka na strojnu obradivost, potpuni učinak molibdena postiže se samo ako se doda u kombinaciji s elementima koji sprječavaju stvaranje ferita (kombinacije: krom + molibden, bakar + molibden, kositar + molibden).

Povećanje sadržaja molibdena ima gotovo zanemariv utjecaj na povećanje dubine odbjela (slika 2.25). Negativna strana molibdena je sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma. Za razliku od kroma, stvara pretežno specijalne karbide bogate molibdenom.

**Bakar** je grafitizirajući element (~ 20 – 30 % grafitizacijskog potencijala silicija koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida i odbjela. Povećava razliku između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 2.24) te snižava temperature  $T_T$  i  $T_{EODP}$  (slika 2.20).

Pri skrućivanju segregira na graničnu površinu austenit/grafit i djeluje kao difuzijska barijera za ugljik. Na taj način onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit, što rezultira stvaranjem perlita. Budući da je grafitizirajući element, može se primijeniti kao djelomična



zamjena za silicij u sprječavanju sklonosti ka bijelom (metastabilnom) skrućivanju (bez da se stvara slobodni ferit).

Obzirom da promovira stvaranje perlita, bakar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću sivog lijeva (tablica 2.5). Povećanje vlačne čvrstoće dodatkom bakra nema linearan trend. Zbog grafitizirajućeg djelovanja bakra, efekt je slabije izražen kod viših koncentracija. Bakar ima relativno slab utjecaj na usitnjavanje perlita.

Budući da promovira stvaranje perlita i ne promovira stvaranje odbjela, može se primjenom bakra postići jednoličnija struktura između debelih (sklonost ka većem udjelu ferita) i tankih stijenki (sklonost ka odjelu).

Da bi se ostvario snažniji efekt od onog koji se postiže pojedinačnim dodatkom, bakar se često upotrebljava u kombinaciji s ostalim legirajućim elementima, kao što su, kositar, krom, molibden, nikal i vanadij.

Bakar ima ograničenu topljivost u sivom lijevu i stoga se ne primjenjuje u količinama  $> 1,5$  %. Neotopljeni bakar rezultira smanjenjem čvrstoće. Zbog korisnog djelovanja, bakar i nikal često se primjenjuju u kombinaciji da bi se povećala vlačna čvrstoća i tvrdoća odljevaka od sivog lijeva. Često se u praksi primjenjuje omjer nikla i bakra 70:30, npr. 0,7 % nikla + 0,3 % bakra.

**Kositar i antimon** snažno promoviraju stvaranje perlita, ali nemaju značajan utjecaj na njegovo usitnjavanje. U odnosu na bakar, kositar je  $\sim 10 - 12$  puta efikasniji u stvaranju perlita, dok je antimon  $\sim 2$  do 4 puta efikasniji od kositra. Najčešće se primjenjuje dodatak od 0,04 do 0,1 % kositra, odnosno  $\sim 0,02 - 0,06$  % antimona.

Tijekom skrućivanja segregiraju na granične površine austenit/grafit i djeluju kao difuzijska barijera za ugljik te na taj način sprječavaju pretvorbu austenita u ferit + grafit. Budući da je nukleacija novih grafitnih čestica u austenitu izuzetno teška zbog visokih naprezanja, tijekom eutektoidne pretvorbe nastaje perlit. Prethodno navedeni maksimalni preporučeni sadržaji (sadržaji koji osiguravaju 100% perlita u metalnoj osnovi) ne smiju se prekoračiti jer nastali sloj oko grafitnih listića, koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik, postaje relativno debeo i krhak, što ima negativan učinak na mehanička svojstva.

Kositar, kao i antimon, snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 2.24) te segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija). Budući da pospješuju stvaranje perlita, kositar i antimon povisuju vlačnu čvrstoću i tvrdoću (tablica 2.5).

Kositar otežava grafitizaciju i ima zanemariv utjecaj na dubinu odbjela. Poput bakra i nikla, kositar ne promovira stvaranje karbida. Međutim, za razliku od bakra i nikla, ne pomaže u sprječavanju sklonosti kroma, vanadija i mangana ka stvaranju karbida. Kada se pravilno primjeni, kositar se može upotrijebiti kao nadopuna ili zamjena za ostale legirajuće elemente. Zbog snažnog promoviranja perlita, 0,1 % kositra ekvivalentno je  $\sim 0,25$  do 0,35 % kroma i  $\sim 0,80$  % nikla ili bakra.

Antimon je posebno koristan element u slučaju kada male količine ferita zaostaju u kritičnim područjima, posebno kada uobičajeni legirajući elementi, kao što su bakar, krom i kositar ne uspijevaju eliminirati ferit. Intenzivnija primjena antimona u cilju povećanja sadržaja perlita ne preporučuje se zbog sklonosti ovog elementa ka stvaranju degeneriranih oblika grafita. Pored toga, antimon ima ograničenu topljivost u krutoj fazi te ograničava rast eutektičkih ćelija. Ne utječe na stvaranje odbjela.

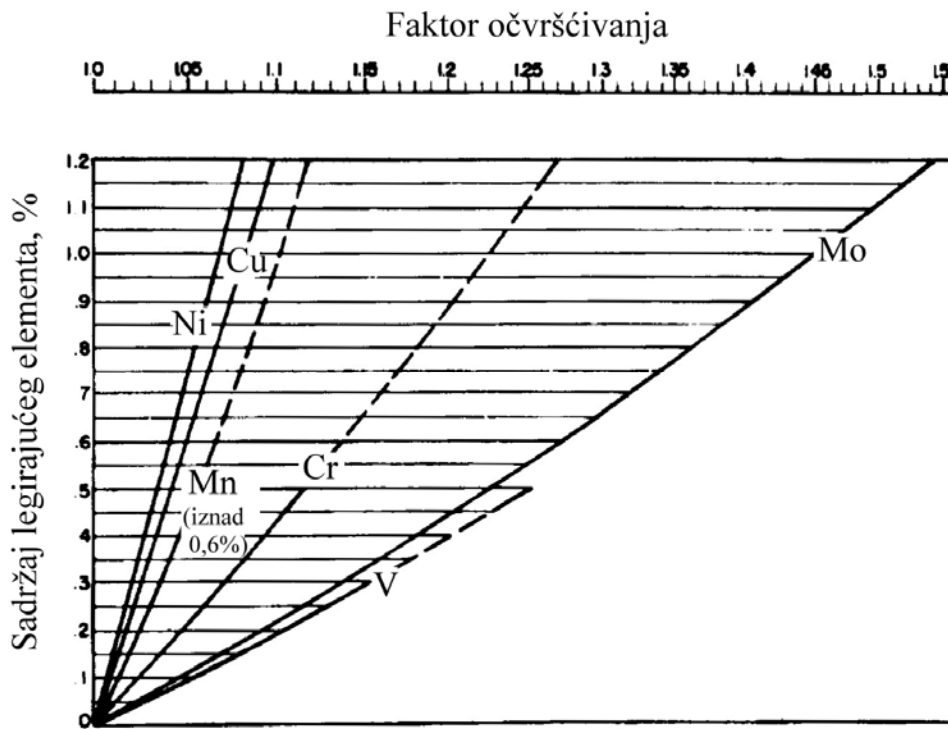
Antimon se dodaje u lonac za prijenos taljevine ili u livni lonac kao čisti metal. Tipično iskorištenje pri dodatku u tekući metal iznosi 90 do 100 %, dok se iskorištenje pri pretaljivanju u kupolnoj peći kreće  $\sim 40$  %, odnosno  $\sim 80$  % u indukcijskim pećima. Primjena antimona povezana je i s problemom točnog određivanja rezidualnog sadržaja zbog

nedostatka zadovoljavajućih standarda za spektrometre. Nepoznavanje tačnog sadržaja onemogućuje poznavanje iskorištenja legure.

Za područja primjene kod kojih su odljevci od sivog lijeva izloženi visokim temperaturama (do ~ 700 °C), prisutnost 0,03 do 0,08 % antimona osigurava značajan porast dimenzijske i strukturne stabilnosti u usporedbi s dodatkom ostalih legirajućih elemenata ili njihovih kombinacija, uključujući i kositar. Razlog za to je vrlo visoka stabilnost perlita koji je nastao dodatkom antimona.

### 2.8.2.1 Određivanje potrebitog dodatka legirajućih elemenata za povećanje vlačne čvrstoće

Za određivanje potrebitog dodatka legirajućih elemenata u cilju povećanja vlačne čvrstoće polaznog lijeva za određeni (željeni) iznos razvijen je dijagram prikazan na slici 2.29.



Slika 2.29. Dijagram za određivanje potrebitog dodatka legirajućih elemenata u cilju povećanja vlačne čvrstoće sivog lijeva (V. Patterson)

Faktor očvršćivanja pokazuje u kojoj mjeri dodatak pojedinog legirajućeg elementa utječe na povećanje čvrstoće sivog lijeva. Veća vrijednost ovog faktora znači i veći utjecaj na povećanje vlačne čvrstoće. Može se vidjeti da kod istog dodatka legirajućeg elementa nikal ima najslabiji utjecaj, a vanadij najjači utjecaj na povećanje vlačne čvrstoće.

Primjena dijagrama biti će prikazana na primjeru odabira i dodatka legirajućih elemenata za povećanje vlačne čvrstoće sivog lijeva s 207 MPa na 275 MPa u stjenkama debljine 12,7 do 25,4 mm. Faktor očvršćivanja dobije se dijeljenjem željene čvrstoće sivog lijeva (275 MPa) s čvrstoćom polaznog sivog lijeva (207 MPa). To znači da faktor očvršćivanja u ovom slučaju iznosi 1,33, odnosno da se čvrstoća mora povećati za 33 % u odnosu na polazni sivi lijev. Faktor očvršćivanja polazne taljevine sivog lijeva iznosi 1,0, što

znači da je potrebno odabrati legirajući element (ili kombinaciju legirajućih elemenata) koji doprinosi povećanju faktora očvršćivanja za 0,33.

Ako u dijagramu na slici 2.29 sa apscise u točki koja odgovara faktoru očvršćivanja 1,33 spustimo okomicu na liniju koja prikazuje utjecaj molibdena na povećanje čvrstoće dobijemo presjecište iz kojeg povučemo vodoravnu liniju prema ordinati i očitamo potrebit dodatak molibdena. U ovom slučaju taj dodatak iznosi 0,73 %. Iz dijagrama se može vidjeti da se željeno povećanje čvrstoće primjenom samo jednog legirajućeg elemenata može postići jedino dodatkom molibdena. U svim ostalim slučajevima potrebno je primijeniti kombinaciju legirajućih elemenata (npr. kombinacija 0,25 % molibdena + 0,15 % vanadija + 0,35 % kroma + 0,30 % bakra osigurava potrebit faktor očvršćivanja).

Kod debelostjenih odljevaka od sivog lijeva korisno je primijeniti kombinaciju molibdena i kroma za povećanje vlačne čvrstoće. U tom slučaju potrebit faktor očvršćivanja 1,33 može se ostvariti dodatkom 0,50% molibdena i 0,40% kroma, što rezultira minimalnom zahtijevanom vlačnom čvrstoćom od 275 MPa.

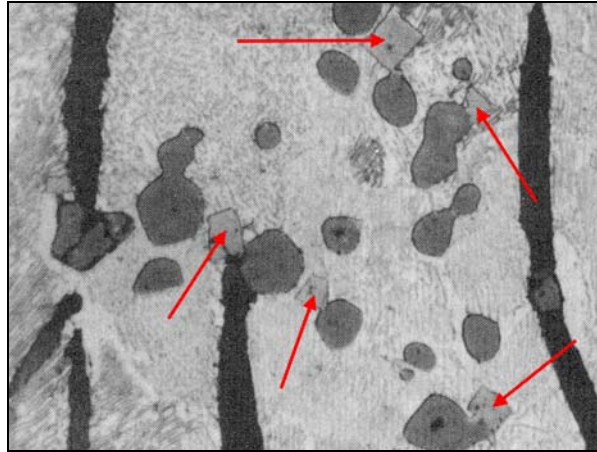
### 2.8.3 Utjecaj pratećih elemenata

**Aluminij** je grafitizirajući element koji sprječava sklonost ka metastabilnom skrućivanju (odbjelu) te poboljšava nukleacijski potencijal taljevine ako je sastavni dio cjepiva. Dodatkom aluminijske može se neutralizirati štetno djelovanje dušika.

Stvaranje plinskih mjehura zbog oslobađanja plinovitog vodika 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.

**Titan** kod malih dodataka titan djeluje kao grafitizator. Promovira stvaranje D tipa grafitnih listića. Ima visok afinitet prema dušiku, zbog čega može neutralizirati njegovo štetno djelovanje. Za neutralizaciju štetnog djelovanja dušika potreban je sadržaj titana od 0,01 do 0,03 %. Titan se spaja s dušikom pri čemu nastaju prividno ne štetni titanovi nitridi (TiN). Međutim, ako dušik nije prisutan u suvišku, titan se spaja sa ugljikom i stvara titanove karbide (TiC) ili titanove karbonitride (Ti(CN)). Svi ovi spojevi štetno djeluju na strojnu obradivost odljevaka od sivog lijeva.

Titanovi nitridi i karbonitridi imaju karakterističan kockasti oblik (slika 2.30), dok titanovi karbidi nemaju tako pravilan oblik.

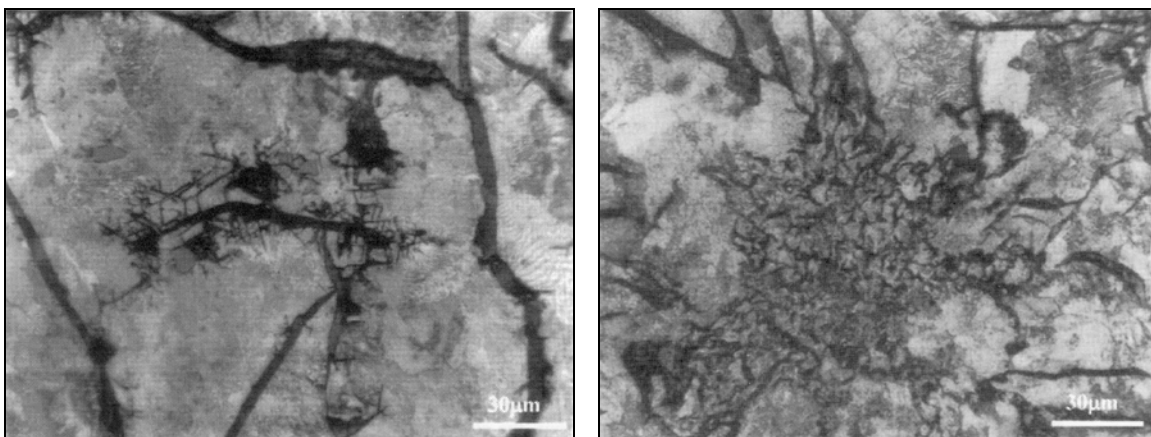


Slika 2.30. Metalografska snimka mikrostrukture sivog lijeva. Tamno sivi, sferični uključci predstavljaju manganove sulfide, dok su pravokutni uključci svijetlo sive boje (označeni strelicama) titanovi karbonitridi.

**Cerij** ima negativan utjecaj na mikrostrukturu sivog lijeva. Promovira stvaranje vermikularnog i nodularnog grafita te povećava pothlađenje taljevine, odnosno sklonost ka metastabilnom skrućivanju.

**Olovo** ima izrazito nepovoljan utjecaj na svojstva sivog lijeva. Već pri sadržajima od 0,0005 % olova dolazi do stvaranja Widmanstättenskog grafita, slika 2.31a) koji rezultira značajnim padom vlačne čvrstoće (~ 50 %). Ovaj oblik grafita može nastati i pri povišenim sadržajima telura i bizmuta.

U prisustvu olova mogu nastati i drugi degenerirani oblici grafita, kao što je mrežasti grafit (engl. *mesh graphite*), slika 2.31b). Mrežasti grafit lakše se stvara u tankim stjenkama, dok se Widmanstättenski grafit stvara u sjenkama koje sporo skrućuju (debele stjenke), jer se time pospešuje segregacija olova.



a)

b)

Slika 2.31. a) Widmanstättenski grafit u mikrostrukтури sivog lijeva. Odljevak s debljinom stjenke 100 mm. Sadržaj olova 0,0042 %, nagriženo sa 2,0 % nitalom, b) mrežasti grafit u mikrostrukтури sivog lijeva. Sadržaj olova 0,0099%

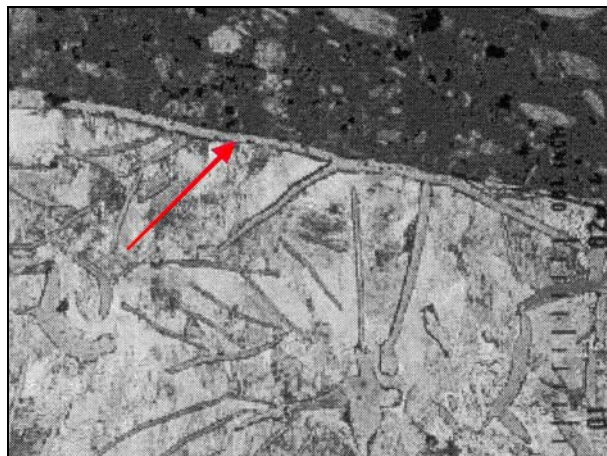
Obradom taljevine elementima rijetkih zemalja (uglavnom cerijem) u količinama od ~ 0,01 % prije lijevanja može se eliminirati štetan utjecaj olova i pratećih elemenata. Smatra se

da se elementi rijetkih zemalja nagomilavaju oko grafita i time sprječavaju utjecaj olova na njegov rast. Ipak, najbolja solucija je ukloniti izvor olova u ulošku.

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

#### 2.8.4 Utjecaj plinova

**Vodik** promovira stvaranje podpovršinske poroznosti (plinskih mjehura). Karakteristika ovih grešaka je postojanje grafitnog filma na površini mjehura (nastale šupljine) (slika 2.32). Nastajanje mjehura u sivom lijevu povezano je s površinskom napetosti taljevine.



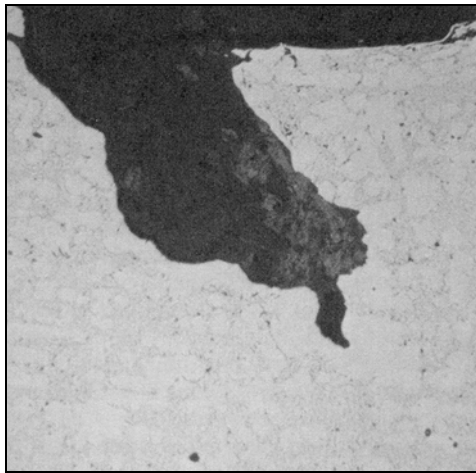
Slika 2.32. Metalografska snimka mikrostrukture sivog lijeva u nagrizenom stanju. Strelicom je označen grafitni film na površini mjehura (šupljine) nastalog uslijed povišenog sadržaja vodika

Uzrok ovih grešaka je prisustvo povišene koncentracije vlage. Ako je prisutan visok sadržaj aluminijske i titanske u taljevini, dolazi do reakcije s vlagom iz svježe kalupne mješavine, vlažnih alata ili vlažne vatrostalne obloge.

**Dušik** je obično prisutan u željeznim ljevovima u količinama od 0,005 do 0,009 % (50 –do 90 ppm). Kada je sadržaj dušika veći od navedenih koncentracija, mogu se pojaviti greške u ili na odljevcima (plinska poroznost) (slika 2.33).

Nastale šupljine su nepravilnog oblika (slika 2.33), za razliku od sferičnih šupljina koje nastaju zbog povišenog sadržaja vodika, i okomite su na površinu odljevka. Na unutarnjoj površini nastalih šupljina prisutan je kontinuirani ili diskontinuirani grafitni film.

Djelovanje dušika može se neutralizirati dodatkom aluminijske ili titanske.



a)



b)

Slika 2.33. Površinski (a) i podpovršinski (b) mjehuri u sivom lijevu nastali zbog visokog sadržaja dušika (135 ppm)

## 2.9 Proizvodnja taljevine sivog lijeva

Proizvodnja taljevine sivog lijeva obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu taljevine. Ova faza predstavlja važan korak u procesu proizvodnje kvalitetnih odljevaka od sivog lijeva. Metalurška kvaliteta taljevine ovisi o kvaliteti uložnog materijala, kontroli procesa taljenja, pripremi taljevine (odsumporavanje, predpriprema (engl. *Predconditioning*)) te cijepljenju.

### 2.9.1 Uložni materijali

**Sirovo željezo** je važan dio metalnog uložka za kontrolu kemijskog sastava. Primjenom sirovog željeza visoke čistoće u odgovarajućem udjelu u uložku moguće je smanjiti ukupni sadržaj mangana. Dodatak sirovog željeza u uložak utječe povoljno na nukleacijski potencijal taljevine. Specijalno sirovo željezo s visokim sadržajem ugljika, niskim sadržajem mangana, sumpora, fosfora i ostalih rezidualnih elemenata ima brojne pogodnosti za proizvodnju sivog lijeva (veće iskorištenje ugljika, veća kompaktnost uložnog materijala u peći, smanjenje koncentracije štetnih elemenata koji potječu od ostalih komponenti uložka („razrijeđenje“), poboljšanje nukleacijskog potencijala taljevine.

Udio u uložku može varirati od nekoliko postotaka do > 90 %, što ovisi o brojnim faktorima: agregatu za taljenje, debljini stjenke odljevka (segregacije), zahtijevanoj strukturi metalne osnove, zahtijevanim mehaničkim svojstvima, količini i kvaliteti ostalih komponenti uložka („razrijeđene“) i udjelu povratnog materijala (manji udio povratnog materijala nije ni s ekonomske niti metalurške strane poželjno kompenzirati dodatkom veće količine čeličnog otpada u uložak).

**Čelični otpad** koji se upotrebljava za proizvodnju željeznih ljevova s grafitom mora imati odgovarajuću kvalitetu, što znači nizak sadržaj rezidualnih elemenata. Upotreba odgovarajuće količine čeličnog otpada u uložku je prihvatljiva, čak i neophodna za sniženje

ukupnog sadržaja ugljika i silicija u ulošku. Prekomjerni sadržaji nisu poželjni jer s porastom udjela čeličnog otpada u ulošku raste potrošnja koksa ili električne energije za taljenje, produžuje se vrijeme trajanja taljevine, povećava dodatak sredstava za naugljčavanje, smanjuje metalurška kvaliteta taljevine i povećava količina troske (ako je otpad jače korodirao), raste opasnost od kontaminacije legirajućim elementima, javlja se potreba za naknadnom toplinskom obradom odljevaka koji moraju imati nizak sadržaj perlita u mikrostrukturi (ako otpad ima visok sadržaj perlitizirajućih elemenata) te snažnijim cijepljenjem taljevine zbog slabijeg grafitizacijskog potencijala.

**Povratni materijal unutar ljevaonice** uključuje uljevne sustave, pojila i škartne odljevke. Udio povratnog materijala u ulošku varira od ljevaonice do ljevaonice i ovisi o raspoloživoj količini ovog materijala, odnosno primijenjenim sustavima ulijevanja i napajanja te udjelu škartnih odljevaka. Vrlo je važno pravilno gospodarenje povratnim materijalom unutar ljevaonice, tj. materijal je potrebno razvrstati po kemijskom sastavu i upotrijebiti za uložak ovisno o kvaliteti koja se proizvodi da bi se što bolje iskoristili legirajući elementi iz povratnog materijala.

**Sredstva za naugljčavanje** redovito se dodaju kao komponente uloška, te kao naknadni dodatak nakon taljenja u cilju podešavanja sadržaj ugljika u taljevini. Kao sredstvo za naugljčavanje u indukcijskim pećima koristi se kristalinični grafit, komadi elektroda, petrol koksa, sintetički grafit itd. Pri odabiru sredstva za naugljčavanje potrebno je obratiti pozornost na sadržaj dušika, sumpora te pepela. Ako se taljenje provodi u mrežno frekventnoj indukcijskoj peći, sredstvo za naugljčavanje dodaje se zajedno s krutim uloškom. Visok stupanj miješanja u ovim pećima omogućuje relativno brzo otapanje ugljika u taljevini. Kod punjenja uloškom srednje frekventne indukcijske peći, potrebno je obratiti pažnju da se sredstvo za naugljčavanje ne doda sve dok u peći nema dovoljna količina rastaljenog metala. Ako se sredstvo za naugljčavanje doda ranije može doći do ubrzanog trošenja silikatne obloge peći (ugljik reducira  $\text{SiO}_2$  na silicij i ugljični monoksid). Ako je nužna značajna korekcija sadržaja ugljika nakon taljenja, potrebno je u taljevinu dodati sredstvo za naugljčenje visoke čistoće. Manje korekcije provode se dodatkom sredstva za naugljčenje u mlaz taljevine prilikom ispusta iz peći u lonac. Silicij smanjuje topljivost ugljika u taljevini. Stoga, ako je potrebno povišiti i sadržaj ugljika i silicija u taljevini, najprije treba provesti naugljčavanje, a potom dodati sredstvo za povišenje sadržaja silicija.

**Silicij-karbid** sadrži ~ 30 % ugljika i ~ 70 % silicija i pogodno je sredstvo za naugljčenje taljevine i povišenje sadržaja silicija u taljevini. Iskorištenje silicija i ugljika iz silicij-karbida vrlo je visoko. Silicij-karbid poboljšava metaluršku kvalitetu taljevine. Dodatak silicij-karbida u metalni uložak povoljno utječe na nukleacijski potencijal taljevine. Dodatak silicij-karbida ograničen je na ~ 1,0 % mase metalnog uloška i potrebno ga je dodati u ranijoj fazi taljenja, nikada u lonac. Prekomjerni dodatak silicij-karbida može dovesti do povećanog trošenja obloge peći, nagomilavanja na stjenkama peći i greškama u odljevcima.

**Koks** je sastavni dio uloška za kupolnu peć. Sagorijevanjem koksa oslobađa se toplina potrebna za zagrijavanje i taljenje uloška. Osim toga, ugljik iz koksa naugljčuje taljevinu. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na sadržaj sumpora u koksu.

**Ferolegure i ostali dodatci.** Ferolegure se koriste za legiranje taljevine i dodaju se u peć ili u lonac. Važno je poznavati kemijski sastav svake od dodanih legura. Kada se zahtijeva legiranje taljevine silicijem ili se samo želi podići sadržaj silicija u primarnoj taljevini primjenjuju se kvalitete FeSi koje nisu namijenjene za cijepljenje taljevine. U tom

slučaju primjena FeSi namijenjenog za cijepljenje (sadrži male količine aluminija i kalcija) nije ekonomski opravdana i može promijeniti nukleacijsko stanje primarne taljevine. Osim toga, visok sadržaj aluminija može rezultirati nastajanjem mjehura u odljevcima.

## 2.9.2 Taljenje

Za proizvodnju taljevine sivog lijeva primjenjuju se slijedeći agregati:

- kupolna peć - predstavlja najekonomičniji agregat za taljenje, odnosno proizvodnju većih količina sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva,
- indukcijska peć – agregat koji se sve više upotrebljava u ljevaonicama sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva zbog jednostavnosti proizvodnje, fleksibilnosti i mogućnosti proizvodnje taljevine s niskim sadržajem sumpora i rezidualnih elemenata,
- elektrolučna peć – ne upotrebljava se u znatnijem opsegu u proizvodnji sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva,
- rotacijska peć - agregat koji se ne upotrebljava u širem opsegu u proizvodnji sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva.

Od prethodno navedenih agregata, kupolna i indukcijska peć najviše se primjenjuju za proizvodnju taljevine sivog (vermikularnog i nodularnog) lijeva.

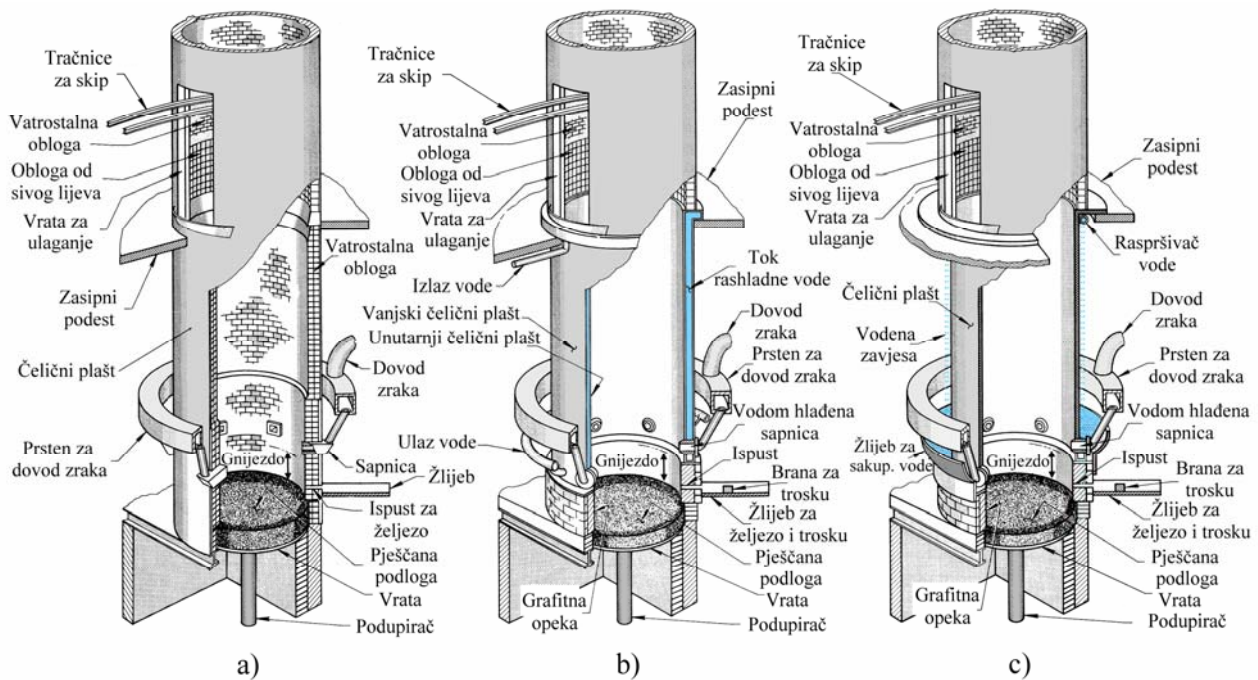
### 2.9.2.1 Kupolna peć

Kupolna peć namijenjena je za taljenje krutog uložka za proizvodnju željeznih ljevova. Danas se primjenjuju kupolne peći različitih konstrukcija, a mogu se podijeliti na slijedeće vrste:

- s kiselom oblogom (šamotna, silikatna),
- s baznom oblogom (magnezitna, dolomitna),
- s neutralnom oblogom,
- bez obloge,
- s hladnim zrakom,
- s predgrijanim zrakom,
- s vodenim hlađenjem omotača (plašta),
- bez hlađenja omotača (plašta),
- s jednim, dva ili više redova sapnica,
- s kontinuiranim ispuštanjem taljevine i troske,
- s diskontinuiranim ispuštanjem taljevine i troske.

Kupolna peć sastoji se od vertikalno stojećeg cilindra od čeličnog lima (plašt ili omotač peći) koji je s unutarnje strane obložen vatrostalnim materijalom (slika 2.34). Plašt peći je postavljen na postolje peći, odnosno nosivu ploču. Postolje peći postavljeno je na noge peći koje su pričvršćene za temelj peći.





Slika 2.34. a) konvencionalna kupolna peć (s vatrostalnim obzidom), b) vodom hlađena kupolna peć (hlađenje strujanjem vode između vanjske i unutarnje stjenke plašta peći), c) vodom hlađena kupolna peć (hlađenje špricanjem vode po vanjskom dijelu plašta peći)

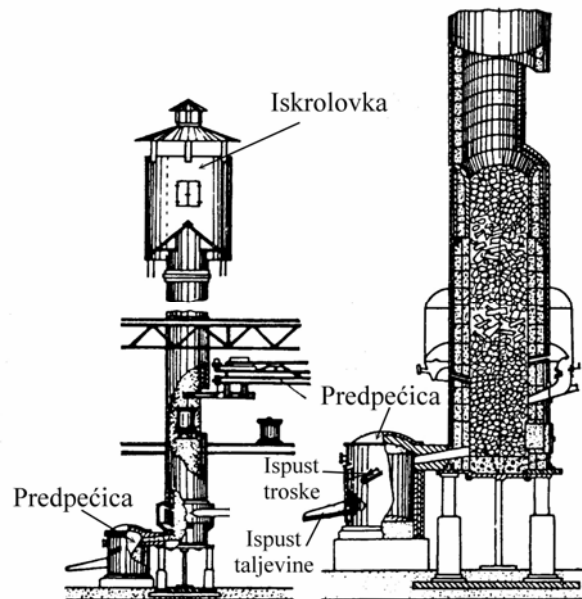
Na postolju s donje strane nalazi se otvor za pražnjenje peći nakon završetka taljenja. U toku rada peći otvor je zatvoren vratima, a vrata učvršćena klinovima i poduprta potporom ili specijalnim mehanizmom kako bi izdržala pritisak uložka (metalni uložak, koks i talitelji).

U donjem dijelu plašta peći nalazi se otvor i žlijeb za ispuštanje tekućeg metala. Tijekom taljenja otvor za ispuštanje tekućeg metala je stalno otvoren kod kontinuiranog načina rada ili ispuštanja, a kod diskontinuiranog načina otvor se povremeno otvara i zatvara. Iznad otvora za ispuštanje tekućeg metala, na suprotnoj strani plašta peći, nalazi se otvor i žlijeb za ispuštanje troske. Kod peći s kontinuiranim načinom ispuštanja, tekući metal i troska ispuštaju se istovremeno kroz otvor za ispuštanje tekućeg metala, a žlijeb ima specijalnu konstrukciju da bi se odvojila troska od tekućeg metala uslijed različitih gustoća. Liv sifonski otječe u lonac, a odvojena troska otječe preko kanala u drugi lonac ili limenu posudu. Temperature taljevine na ispustu iz kupolne peći kreću se oko 1500°C.

Pod peći nabijen je vatrostalnim pijeskom (debljina 150 do 200 mm) tako da je u nivou otvora za ispuštanje tekućeg metala. Na omotaču kupolne peći nalaze se i otvori za sapnice preko kojih se uvodi zrak u peć potreban za sagorijevanje koksa. U gornjem dijelu omotača peći nalazi se otvor za ulaganje uložka u peć. Iznad otvora za ulaganje, cilindrični plašt peći prelazi u dimnjak koji odvodi produkte sagorijevanja. Vanjski promjer dimnjaka jednak je promjeru cilindričnog plašta peći. Dimnjak je s unutarnje strane obzidan vatrostalnim materijalom. Gornji dio dimnjaka ulazi u iskrolovku (slika 2.35) čiji je zadatak da zadrži užarene čestice koksa i prašine koje s dimnim plinovima dolaze do dimnjaka.

Sapnice su ravnomjerno raspoređene po obodu plašta peći. Mogu biti smještene u nekoliko redova (najčešće 2 reda na udaljenosti 1 m), čime se smanjuje potrošnja koksa (za ~ 10 %) i povećava brzina taljenja (za ~ 10 do 20 %). Pri tome se oko 25 do 30 % ukupne količine zraka dovodi u peć kroz gornji nivo sapnica, a ostatak kroz sapnice u donjem redu. Broj sapnica u jednom redu ovisi o promjeru kupolne peći i obično iznosi 3 do 6 komada.

Njihov položaj je uvijek iznad otvora na ispuštanje tekućeg metala i troske. Sve sapnice priključene su na prstenasti cjevovod preko kojeg se zrak dovodi od ventilatora do sapnica.



Slika 2.35. Kupolna peć s predpećicom

Predpećica je dodatni dio kupolne peći a postavlja se odmah iza žlijeba za ispuštanje tekućeg metala (slika 2.35). Ona ima višestruku ulogu i služi da:

- uskladiti ritam proizvodnje kupolne peći i proizvodnje odljevaka, odnosno služi kao rezervoar taljevine održavajući temperaturu potrebnu za lijevanje,
- ujednači sastav veće količine taljevine,
- omogućiti naknadnu doradu taljevine (legiranje, odsumporavanje),
- omogućiti pročišćavanje taljevine od troske i plinova.

Predpećica se zagrijava plinom ili tekućim gorivom. Ispust taljevine i troske iz predpećice provodi se kroz zasebne otvore.

Kod kupolnih peći bez predpećice prikuplja se veća količina taljevine u gnijezdu peći, odnosno u dijelu od poda do ravnine donjeg reda sapnica. Pri tome je taljevina duže vrijeme u kontaktu sa koksom iz koksne podloge, uslijed čega se povećava sadržaj ugljika i sumpora u taljevini, odnosno smanjuje kvaliteta taljevine. Previsoki sadržaji sumpora u taljevini zahtijevaju dodatno odsumporavanje nakon ispusta iz kupolne peći.

Najčešće se primjenjuju kupolne peći s kiselim oblogom. Kupolne peći s bazičnom oblogom omogućuju proizvodnju tekućeg metala s niskim sadržajem sumpora i primjenu troske višeg baziciteta, ali posjeduju višu cijenu. Potrošnja koksa veća je nego kod peći s kiselim oblogom.

Kod kupolnih peći visokog kapaciteta čest je problem izdržljivost opeke u zoni taljenja. Zbog toga se često primjenjuju vodom hladene kupolne peći kod kojih zona taljenja nije obzidana vatrostalnim materijalom već se plašt peći hladi vodom. U praksi se primjenjuju dva načina hlađenja plašta vodom: strujanje vode između vanjske i unutarnje stjenke plašta peći (slika 2.34b) i hlađenje špricanjem vode po vanjskom dijelu plašta peći (slika 2.34c), koji ima širu primjenu od prethodno navedenog načina hlađenja vodom. Vodom hladene kupolne peći omogućuju znatno duži radni vijek i uštedu na vatrostalnom materijalu. Nedostatak

vodom hlađenih kupolnih peći je niža toplinska efikasnost u odnosu na konvencionalne kupolne peći.

Ulaganje (šaržiranje) u kupolnu peć može se provoditi bočno (kranom ili skipom) ili centralno (cilindrična korpa koja se prazni kroz dno). Nedostatak bočnog ulaganja je neravnomjeran, kosi raspored uloška po presjeku peći. Centralni način unosa uloška u peć je pogodniji, jer je raspored uloška kod ovog načina šaržiranja znatno ravnomjerniji.

Kao metalni dio uloška kupolne peći može se upotrebljavati ljevaonički povrat, sirovo željezo, otpadni željezni lijev i čelični otpad odgovarajuće veličine i čistoće površine. Ferolegure također mogu biti sastavni dio metalnog uloška. Npr. da bi se nadoknadili gubitci silicija tijekom taljenja u metalni uložak može se dodati FeSi ili SiC. Poznavanje kemijskog sastava komponenata metalnog uloška i pravilni sastav (struktura) metalnog uloška od velike je važnosti za dobivanje adekvatnog kemijskog sastava taljevine.

Formiranje troske određenog kemijskog sastava i viskoziteta postiže se dodatkom talitelja (vapnenca ili dolomita) u kupolnu peć. Talitelji prevode u trosku razne nečistoće, kao što je pepeo koksa, razni oksidi nastali izgaranjem, čestice vatrostalnog materijala itd.). Dodatak vapnenca ili dolomita u kupolnu peć s kiselim oblogom iznosi 2 do 5 %, dok kupolna peć s bazičnom oblogom omogućuje veće dodatke, što znači i proizvodnju taljevine s nižim sadržajem sumpora. Uz vapnenac ili dolomit može se dodati i fluorit ( $\text{CaF}_2$ ) za poboljšanje viskoznosti troske te kalcij karbid ( $\text{CaC}_2$ ) koji služi kao dezoksidant te izvor CaO.

U kupolnoj peći materijal je raspoređen na slijedeći način:

- od dna peći do određene visine iznad sapnica nalazi se koks određene krupnoće koji čini tzv. koksnu podlogu, čiji je osnovni zadatak da nosi težinu zasipa koji se nalazi iznad nje. To je omogućeno visokom temperaturom taljenja koksne podloge, koja iznosi  $\sim 2000^\circ\text{C}$ . Visina koksa iznad sapnica pažljivo se određuje jer od nje ovisi učinak taljenja i temperatura taljevine. Ova visina treba iznositi 2/3 do 3/4 svijetlog promjera peći. Ugljik iz tog koksa izgara s kisikom iz zraka u  $\text{CO}_2$ ,
- iznad koksne podloge nalaze se naizmjenični slojevi vapnenca, koksa i metalnog uloška koji čine zasip peći. Uložak se ubacuje u peć dok se peć ne napuni do otvora za punjenje.

U pripremljenu kupolnu peć najprije se ubacuje samo koks do prethodno navedene visine. Taj koks se prije daljnjeg ulaganja zapali pri dnu peći i kada se užari naizmjenično se ulažu komponente zasipa. Kada se peć napuni, pušta se zrak kroz sapnice i već nakon desetak minuta prve kapljice taljevine padaju na dno peći. Taljenje u kupolnoj peći odvija se neprekidno tj. peć se kontinuirano puni kako se materijal spušta prema dolje.

Sagorijevanjem koksa oslobađa se toplina potrebna za zagrijavanje i taljenje uloška, zagrijavanje tekućeg metala do potrebne temperature te troske. Zbog toga je važno primijeniti ljevaonički koks visoke kvalitete. Ljevaonički koks mora imati nisku reakcijsku sposobnost (sposobnost redukcije  $\text{CO}_2$  u CO) da se ne bi povećala potrošnja goriva zbog reakcije  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$  koja je izrazito endotermna, a uz to smanjila temperatura tekućem metala. Veća reakcijska sposobnost koksa rezultira i većim naugljčavanjem. Koks u kupolnoj peći mora izdržati pritisak stupa metalnog uloška i samog koksa. Zbog toga koks mora biti čvrst i imati dovoljnu otpornost na udarce da bi se održala adekvatna veličina komada koksa koja osigurava propusnost, prodiranje upuhanog zraka i dostupnost zraka u centru peći. Kod sitnijeg koksa, zbog povećane redukcije  $\text{CO}_2$ , dolazi do jačeg pada temperature u višim zonama kupolne peći. Koks srednje veličine ima manju kontaktnu površinu, pa je usporeno topljenje i redukcija nastalog  $\text{CO}_2$ , uslijed čega slobodni kisik iščezava u nešto višim zonama peći, temperatura plinova raste, pa se širi zona najviših temperatura. Kod prevelikih komada

koksa nije dovoljna ni ukupna visina peći da se utroši sav kisik, što se u praksi treba izbjeći. Optimalne performanse postižu se kada veličina komada koksa iznosi od 8 do 12 % promjera kupolne peći. Sadržaj pepela u koksu mora biti < 10 % jer on predstavlja balast koji smanjuje kaloričnu moć goriva i povećava potrošnju talitelja za formiranje troske. Posebnu pažnju treba posvetiti sadržaju sumpora, jer visok sadržaj sumpora u koksu rezultira visokim sadržajem sumpora u taljevini, što zahtijeva odsumporavanje taljevine izvan peći. U toku taljenja 30 do 50 % sumpora iz koksa prelazi u tekući metal. Sadržaj volatila treba biti < 1 %, a sadržaj ugljika > 90 %. Udio koksa u ulošku iznosi obično od 8 do 16 %, a ovisi o temperaturi koja se mora ostvariti, udjelu čeličnog otpada u ulošku i nizu drugih varijabli.

Razlikujemo 4 zone u kupolnoj peći:

- zona predgrijavanja – proteže se od vrha kupolne peći do ~ 700 mm iznad nivoa sapnica. U ovoj zoni metalni uložak se predgrijava vrućim plinovima koji se dižu prema gore. Atmosfera je blago oksidacijska ( $\text{CO}_2$  i  $\text{CO}$ ) pa dolazi do oksidacije, nasumporavanja i razugljičenja. Budući da je metalni uložak još uvijek u krutom stanju, navedene reakcije odvijaju se samo na površini komada. Vapnenac se u ovoj zoni razlaže na  $\text{CaO}$  i  $\text{CO}_2$ . Na kraju prve zone temperaturu taljenja dostižu samo površinski slojevi metalnog uloška,
- zona taljenja – u ovoj zoni vrući plinovi tale metalni uložak. Kapljice metala postepeno rastu, odvajaju se od krutog ostatka metalnog uloška i slijevaju prema dolje (prema gnijezdu peći) preko užarenog koksa. Nasumporavanje u ovoj zoni je intenzivnije nego u prvoj zoni, jer se tope oksidi metala koji su štitili površinu metala od djelovanja plinova.  $\text{CO}_2$  koji dolazi iz zone izgaranja može se reducirati s ugljikom iz koksa u  $\text{CO}$ . U gornjem dijelu ova zona je blago oksidativna (neposredno ispod zone predgrijavanja), dok je u donjem dijelu (iznad zone izgaranja) znatno više oksidativna,
- zona izgaranja – ova zona je izrazito oksidativna i nalazi se u nivou sapnica. U njoj dolazi do reakcije  $\text{C}_{(\text{koks})} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  pri kojoj se oslobađa toplina. Zrakom koji se upuhuje kroz sapnice osigurava se potrebna količina kisika za izgaranje. U ravnini neposredno iznad sapnica dostiže se temperatura od ~ 1700 do 2100 °C. Koks koji se ulaže u peć u naizmjeničnim slojevima s ostalim komponentama uloška zamjenjuje koks koji je sagorio u zoni izgaranja. Pored toga, u ovoj zoni djelomično odgaraju silicij, mangan i željezo te dolazi do formiranja tekuće troske,
- zona taljevine i troske – nalazi se ispod sapnica, odnosno u gnijezdu kupolne peći. U toj zoni je taljevina duže vrijeme u kontaktu s koksom, što rezultira porastom sadržaja ugljika i sumpora. U gornjem dijelu gnijezda kupolne peći vlada oksidativna atmosfera, a u srednjem dijelu atmosfera je blago oksidativna. U donjim dijelovima gnijezda peći dolazi do redukcije ugljikom pojedinih oksida (npr. oksida silicija i mangana). Oksidi koji nisu reducirani završavaju u troski. Ako je nivo troske u blizini sapnica (kod kupolne peći bez predpećice) odvija se oksidacija taljevine kroz trosku kisikom iz zraka. Da bi se spriječila ovakva oksidacija, nivo troske treba biti što niži, jer je oksidacijska atmosfera u gnijezdu peći slabija.

Neki elementi izgaraju u kupolnoj peći tijekom taljenja. Gubitak silicija tijekom taljenja u kupolnoj peći s kiselom oblogom iznosi 8 do 15 %, odnosno 25 do 40 % ako se taljenje provodi u kupolnoj peći s bazičnom oblogom. Gubitak mangana iznosi 10 do 20 % pri taljenju u kupolnoj peći s kiselom oblogom, odnosno 5 do 10 % ako se taljenje provodi u kupolnoj peći s bazičnom oblogom. Iskorištenje bakra i nikla u kupolnoj peći iznosi ~ 100 %, kroma ~ 90 %, a molibdena ~ 95 %. Vanadij i kositar obično se dodaju u lonac.

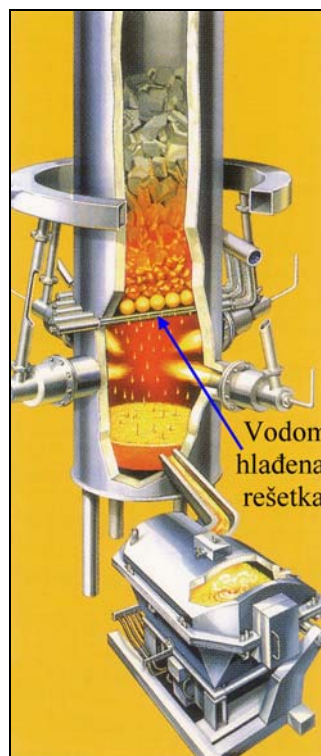
Tijekom taljenja u kupolnoj peći raste sadržaj ugljika i sumpora. Sadržaj fosfora praktički se ne mijenja tijekom taljenja u kupolnoj peći zbog niskog sadržaja fosfora u koksu.

Da bi se poboljšao termički učinak, konstruirane su kupolne peći u kojima se koristi vrući (predgrijani) zrak za sagorijevanje. Kod ovih peći dimni se plinovi pri vrhu peći ne ispuštaju direktno u atmosferu već odvede u posebnu komoru u kojoj potpuno sagorijeva ugljični monoksid i ugljikovodici iz plinova. Zbog dodatno razvijene topline reakcija sagorijevanja, povećava se temperatura dimnih plinova na 750 do 850 °C koji se potom uvode u cjevasti rekuperator. Predgrijavanjem zraka koji se upuhuje u kupolnu peć postižu se visoke temperature u zoni izgaranja, smanjuje potrošnja koksa, stvaranje CO i potrebna količina upuhanog zraka, poboljšava iskorištenje silicija i vezanje ugljika, povećava produktivnost te postižu više temperature taljevine na ispustu.

Efikasnost kupolne peći može se poboljšati obogaćivanjem zraka koji se upuhuje u peć kisikom. Obično se zrak obogaćuje sa 1 do 4 % kisika. Primjenom kisika u procesu taljenja u kupolnoj peći smanjuje se potrošnja koksa i potrebna količina upuhanog zraka, povećava brzina taljenja i postižu više temperature ispusta neophodno potrebne kod lijevanja kompleksnih odljevaka. Obogaćivanje kisikom može se provesti dodatkom kisika u prstenasti cjevovod za zrak na kojeg su povezane sapnice ili direktnim dodavanjem u koksnu podlogu ispod sapnica.

Sniženje troškova taljenja kupolne peći postiže se kontinuiranim načinom rada. Zbog toga se korisnim u praksi pokazala primjena tzv. dupleks postupka. Kod ovog postupka kupolna peć se primjenjuje u kombinaciji sa kanalnom indukcijskom peći koja služi kao rezervoar taljevine čime se omogućuje držanje taljevine duže vrijeme te postiže homogeniji sastav i temperatura taljevine, ali se omogućuje i korekcija kemijskog sastava.

Taljevina s niskim sadržajem sumpora može se dobiti primjenom tzv. bezkoksne kupolne peći (engl. *Cokeless cupola*), odnosno kupolne peći u kojoj se ne koristi koks kao gorivo (slika 2.36).



Slika 2.36. Shematski prikaz kupolne peći u kojoj se ne primjenjuje koks

Kod ove peći koksna podloga zamijenjena je vodom hlađenom rešetkom na kojoj se nalazi podnica od vatrostalnog materijala. Ova konstrukcija nosi težinu cijelog zasipa. Ispod vodom hlađene rešetke, po opsegu peći, umjesto sapnica, postavljeni su gorionici koji upotrebljavaju plinovito ili tekuće gorivo. Nedostatci ovog procesa su: zahtijeva se primjena skupih goriva i potrebno je dodati ugljik u uložak da bi se ostvario željeni sadržaj u taljevini.

Postoji nekoliko izrazitih prednosti kupolnih peći pred ostalim agregatima za taljenje u proizvodnji željeznih ljevova. Kupolna peć nudi najniže radne troškove pri velikoj proizvodnji. Pored toga, u kupolnoj peći se mogu taliti komadi uložnog materijala velikih dimenzija i težine. Adekvatno predgrijavanje uložnog materijala pri spuštanju od otvora za ulaganje do zone taljenja izostavlja potrebu za potpuno suhim uložnim materijalima. Neki nepoželjni elementi u uložku oksidiraju se i uklanjaju troskom, naročito aluminij, cink, kadmij i cerij. Važno je napomenuti da taljevina izrađena u kupolnoj peći posjeduje izvrsnu metaluršku kvalitetu, tj. posjeduje povoljan nukleacijski potencijal, a ugljik teži da se izluči u obliku grafita a ne u obliku karbida.

Glavni nedostatak kupolne peći je nemogućnost trenutnih važnijih promjena kemijskog sastava. Drugi, vrlo važan nedostatak kupolnih peći, osim kupolne peći u kojoj se ne upotrebljava koks i kupolne peći s bazičnom oblogom, je visok sadržaj sumpora u taljevini. U tim slučajevima taljevina se mora odsumporiti izvan peći.

#### **2.9.2.1.1 Odsumporavanje**

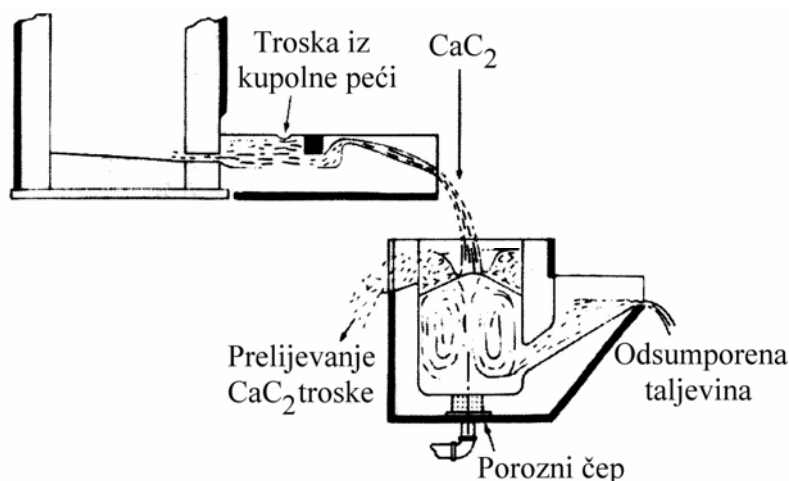
Previsoki sadržaji sumpora nisu poželjni zbog negativnog utjecaja na morfologiju grafita i strukturu metalne osnove. Visoki sadržaji sumpora posebno su nepoželjni kod proizvodnje vermikularnog i nodularnog lijeva.

Taljevina s visokim sadržajem sumpora mora se odsumporiti nakon ispusta iz kupolne peći. Potrebno je imati na umu da tijekom odsumporavanja dolazi do pada temperature taljevine. Pad temperature taljevine mora se nadoknaditi višom temperaturom ispuštanja ili dogrijavanjem taljevine u indukcijskim pećima koje služe kao receptori, ako kupolna peć radi u dupleks postupku.

Kao sredstvo za odsumporavanje taljevine iz kupolne peći najčešće se primjenjuje:

- kalcij-karbid,
- vapno i fluorit,

Na slici 2.37 shematski je prikazan postupak odsumporavanja taljevine iz kupolne peći. Sredstvo za odsumporavanje dodaje se u mlaz pri ispuštanju taljevine iz peći u lonac. U cilju uspješnijeg odsumporavanja, taljevina se intenzivno miješa inertnim plinom (dušikom) koji se uvodi kroz porozni čep na dnu lonca. Ovaj proces može se provoditi zasebno za svaki lonac ili kontinuirano (slika 2.37).



Slika 2.37. Shematski prikaz odsumporavanja taljevine iz kupolne peći

### 2.9.2.2 Indukcijske peći

Indukcijske peći su suvremeni agregati za taljenje i imaju niz prednosti pred kupolnim pećima. To je prije svega brže zagrijavanje i taljenje uložka, mali odgor elemenata (odgor silicija iznosi 5 do 10 %, odgor mangana je zanemariv) kao i ukupnog materijala (< 1 %), relativno jednostavna kontrola kemijskog sastava i primjena, sigurnije legiranje, mogućnost pravovremenih promjena kemijskog sastava taljevine, kvalitete ili sadržaja legirajućih elemenata, mogućnost postizanja viših temperatura, znatno lakša proizvodnja taljevine s nižim sadržajem sumpora i pratećih elemenata, znatno lakša kontrola procesa te manje naugljičenje taljevine.

Nedostatci indukcijskih peći u odnosu na kupolne peći su: veći investicijski troškovi, veći troškovi taljenja zbog visoke cijene električne energije, lošija metalurška kvaliteta taljevine, niska reaktivnost troske zbog niske temperature itd.

Zagrijavanje uložka provodi se na principu transformacije električne energije u toplinu. Kruti uložak pretvara se u taljevinu uz nizak gubitak legirajućih elemenata i bez nasumporavanja (u indukcijskoj peći ne primjenjuje se koks kao u kupolnoj peći). Budući da se fosfor i sumpor ne mogu ukloniti iz taljevine, potrebno je obratiti pažnju na uložni materijal.

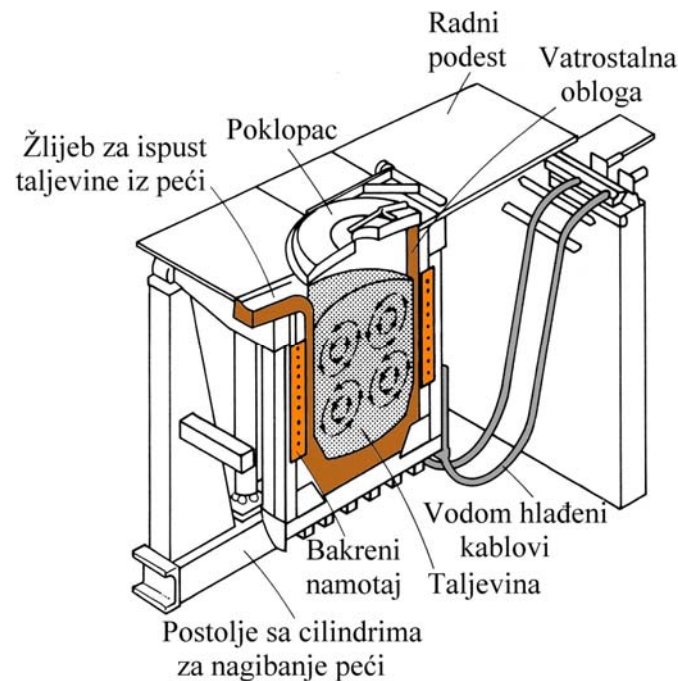
Razlikujemo dvije vrste indukcijskih peći:

- indukcijske peći s loncem (bez jezgre),
- kanalne indukcijske peći (s jezgrom).

Indukcijske peći s loncem znatno se više upotrebljavaju za taljenje i pregrijavanje, dok su kanalne indukcijske peći pogodnije za držanje taljevine, pregrijavanje i dupleks postupak.

### 2.9.2.2.1 Indukcijske peći s loncem

Indukcijska peć s loncem (engl. *Coreless induction furnace*) prikazana je na slici 2.38.



Slika 2.38. Poprečni presjek indukcijske peći s loncem. Taljevina u loncu (koja služi kao sekundar) okružena je namotajem (primar) koji okružuje lonac

Glavni elementi peći su lonac obložen vatrostalnim materijalom i induktor. Induktor je izrađen od bakrene cijevi koja je u obliku spirale namotana oko lonca. Tijekom rada peći kroz bakrenu cijev teče voda za hlađenje jer se induktor zagrijava. Na vrhu lonca nalazi se žlijeb za izlivanje taljevine iz peći. Peć je postavljena na masivnu čeličnu konstrukciju koja se nagiba tijekom ispuštanja taljevine iz peći. Kut nagiba iznosi 95 do 100° čime se omogućuje potpuno pražnjenje peći.

Prolaskom struje u induktoru se stvara izmjenično magnetsko polje koje inducira tok struje kroz uložni materijal. Drugo magnetsko polje nastaje u ulošku uslijed induciranih struja i suprotnog je smjera. Djelovanjem tih dvaju magnetskih polja dolazi do potiskivanja struje prema površini uloška. Električna struja prodire u dubinu komada prema sljedećoj jednačbi:

$$a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (2.5)$$

gdje je:

a – dubina prodiranja struje u metalni uložak,  
 $\rho$  – specifični električni otpor metala,  
 $\mu$  – relativni magnetski permeabilitet,  
f – frekvencija struje.

Kruti uložak početi će se taliti ako je gustoća struje dovoljno velika. Dovoljna gustoća može se postići ako je dubina „a“ (jednačba 2.5) mala. Budući da su  $\rho$  i  $\mu$  konstante, potrebno



je povećati frekvenciju. Prema tome, frekvencija ovisi o vrsti metala koji se tali, veličini komada metalnog uložka i veličini lonca. Što su komadi uložka manji i što je manji lonac to je potrebna viša frekvencija za taljenje određenog metala.

Danas se u praksi upotrebljavaju dvije vrste indukcijskih peći s loncem:

- nisko frekventne ili mrežno frekventne indukcijske peći s loncem,
- srednje frekventne indukcijske peći s loncem.

Nisko frekventne ili mrežno frekventne indukcijske peći s loncem rade na frekvenciji mreže kojom se doprema električna energija (50 Hz u Europi i 60 Hz u Americi). Karakteristika ovih peći je da za efikasan rad zahtijevaju da je u loncu peći uvijek prisutna određena količina taljevine. U praksi to znači da se nakon ispuštanja 20 do 35 % taljevine iz peći provodi ulaganje krutog uložka u topli ostatak, odnosno ostatak taljevine i to slijedećim redom: sredstva za naugljčavanje, čelični otpad, povratni materijal iz ljevaonice, sirovo željezo. Kada je promjena kvalitete ili kemijskog sastava neophodna, može se postići postepenim „razrjeđenjem“ (smanjenjem koncentracije pojedinih elemenata) ili legiranjem (ako se zahtijeva viša koncentracija pojedinih elemenata od prethodno prisutne). Zbog toga se često proizvodni proces započinje izradom kvaliteta s najnižom koncentracijom legirajućih elemenata, a potom se izrađuju one kvalitete koje zahtijevaju dodatak legirajućih elemenata. Ako se lonac peći u potpunosti isprazni, vrijeme taljenja počevši od hladnog krutog uložka je produženo. Stoga je u praznu peć potrebo uliti određenu količinu taljevine ili upotrijebiti kruti uložak iz jednog komada čija veličina mora iznositi barem 20 % ukupnog kapaciteta peći.

Glavni nedostaci nisko frekventnih ili mrežno frekventnih indukcijskih peći s loncem povezani su s pražnjenjem lonca, odnosno produženim taljenjem ako u peći nije prisutna taljevina (topli ostatak) i promjenom kvalitete ili vrste lijeva te gubitkom proizvodnje tijekom zadržavanja između uzastopnih ispusta.

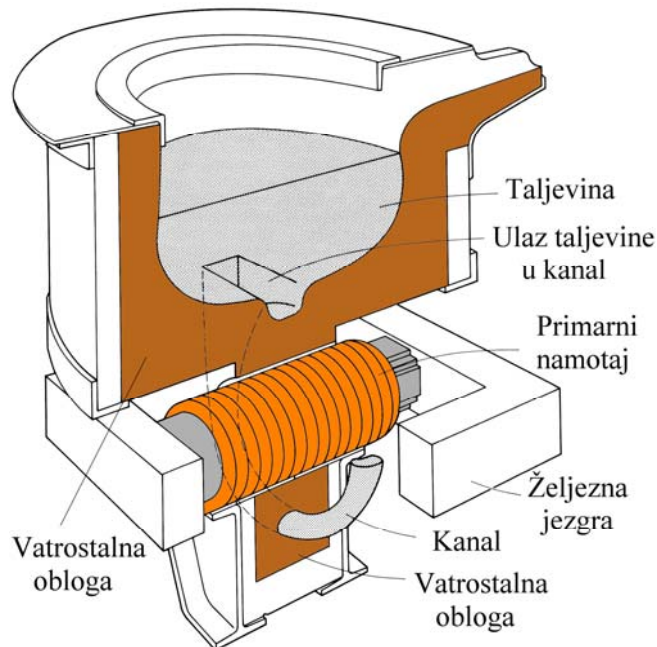
Kod srednje frekventnih indukcijskih peći s loncem mrežna frekvencija se elektroničkim putem (generator frekvencija) konvertira u više frekvencije. Srednje frekventne peći mogu raditi na frekvencijama do 5000 Hz. Prednosti srednje frekventnih indukcijskih peći s loncem u odnosu na mrežno frekventne je mogućnost povećanja snage bez potrebe za povećanjem njihove veličine. Ove peći ne zahtijevaju prisustvo rastaljenog metala za početak taljenja. Nakon taljenja u potpunosti se prazne i ponovo pune hladnim krutim uloškom čime se postiže veća fleksibilnost. Termički učinak srednje frekventnih peći iznosi 55 do 65 % i danas su više zastupljene u praksi od mrežno frekventnih indukcijskih peći s loncem.

U indukcijskim pećima najčešće se koristi silikatna vatrostralna obloga. Silikatna opeka, za razliku od magnezitne opeke, nije osjetljiva na toplinske šokove, što znači da se peć nakon gašenja i hlađenja može ponovo lako pokrenuti bez opasnosti od nastanka pukotina u oblozi. Često se obloga u indukcijskim pećima formira nabijanjem vatrostralne mase umjesto primjene vatrostralnih opeka.

Ako se u indukcijsku peć s loncem ulaže nečist uložni materijal, formira se troska koja potječe od raznih nečistoća i hrđe s otpadnog metalnog uložka ili od ljevaoničkog pijeska koji može doći s povratnim materijalom iz ljevaonice. Troska je nepoželjna u indukcijskoj peći jer utječe na potrošnju električne energije te erodiju vatrostralne obloge peći, zbog čega se mora često uklanjati iz peći.

### 2.9.2.2.2 Kanalne indukcijske peći

Kanalna indukcijska peć (engl. *Channel induction furnace*) u osnovi predstavlja transformator koji se sastoji od čelične jezgre s primarnim namotajem (slika 2.39). Kao sekundarni namotaj služi taljevina u kanalu peći oko čelične jezgre. Ove peći uglavnom se izvode kao nisko frekventne.



Slika 2.39. Poprečni presjek kanalne indukcijske peći

Cilindrično korito kanalne indukcijske peći izrađeno je od čeličnog lima i obloženo je vatrostalnim materijalom. Iz dna peći izveden je kanal (ili nekoliko kanala) koji je također obložen vatrostalnim materijalom. Kanal je povezan s koritom peći i čini sa njim zatvoreni krug unutar kojeg se nalazi vodom hlađeni primarni namotaj s jezgrom od transformatorskog lima. Kada se primarni namotaj poveže s izvorom električne struje koja ima mrežnu frekvenciju (50 Hz) u rastaljenom metalu u kanalu induciraju se struje velike jakosti. Pri tome metal u kanalu ima karakteristike sekundarnog namotaja transformatora. Toplina se razvija zbog otpora metala. Miješanjem taljevine zbog elektromagnetskih sila toplina se prenosi i na metal u koritu peći putem konvekcije. Ovaj prijenos topline je spor i značajno limitiran jer je miješanje u ovim pećima slabo. Stoga, za razliku od indukcijskih peći s loncem gdje cijeli uložni materijal predstavlja sekundar, kod kanalnih indukcijskih peći sekundar predstavlja samo taljevina u kanalu (kanalima).

Zbog navedenih karakteristika kanalnih indukcijskih peći potrebno je prije ulaganja krutog uložka uliti rastaljeni metal u peć zbog ispunjenja kanala. To pretpostavlja dobavu rastaljenog metala iz neke druge peći.

U proizvodnji željeznih ljevova ove peći ne upotrebljavaju se za taljenje zbog nedostatka adekvatnog miješanja i visokih temperatura u kanalu, ali se često upotrebljavaju za držanje taljevine (kao receptor) te u dupleks postupku s kupolnom peći, čime se omogućuje znatno bolja kemijska i temperaturna homogenost taljevine te dogrijavanje taljevine.

### 2.9.3 Predpriprema taljevine

Jedan od vrlo važnih zadataka u ljevarstvu je postizanje reproducibilnosti proizvodnog postupka, odnosno smanjenje varijacija između pojedinačnih odljevaka. Pri tome, pored striktnog vođenja procesa taljenja, legiranja i cijepjenja, vrlo važnu ulogu ima metalurško stanje taljevine. To znači da će se pojaviti razlike u svojstvima odljevaka ako postoje varijacije u metalurškom stanju taljevina, bez obzira na konzistentnost kemijskog sastava te cijepjenja taljevine. Zbog toga je važno provesti predpripremu taljevine prije obrade da bi se smanjile varijacije u metalurškom stanju taljevina.

Smanjenje udjela sivog sirovog željeza u uložnom materijalu te povećanje udjela čeličnog otpada ima negativan utjecaj na nukleacijski potencijal taljevine, tj. broj potencijalnih mjesta za nukleaciju grafita, a time i metalurško stanje taljevine.

Pod predpripremom (engl. *Preconditioning*) smatra se predobrada taljevine u cilju smanjenja varijacija u metalurškom stanju taljevina te povećanja odaziva na naknadno cijepjenje da bi se dobile manje varijacije svojstava odljevaka.

Za predpripremu taljevine u kupolnim i indukcijskim pećima upotrebljava se silicij-karbid (SiC). U ljevaonicama se najčešće primjenjuju metalurške kvalitete silicij-karbida koje imaju do 92,0 % SiC. Pored ove komponente, silicij-karbid sadrži manje udjele slobodnog ugljika i silicija te SiO<sub>2</sub>, ali i vrlo niske udjele dušika, vodika, sumpora i aluminijska. Na osnovi toga može se zaključiti da silicij-karbid sadrži ~ 60 % silicija i ~ 30 % ugljika.

Budući da silicij-karbid ima visoku točku taljenja (~ 2700 °C), on se ne tali u taljevinama željeznih ljevova već samo otapa poput šećera u kavi. Ova činjenica je vrlo važna za primjenu silicij-karbida. To znači da stabilne čestice silicij-karbida u taljevini željeznog lijeva djeluju kao potencijalna mjesta za nukleaciju grafita i austenita i to duže vrijeme zbog visoke temperature taljenja.

Iskorištenje ugljika i silicija iz silicija-karbida je vrlo visoko i iznosi ~ 90 % pri proizvodnji taljevine u indukcijskoj peći s loncem. Silicij-karbid dodaje se zajedno s metalnim uloškom u peć za taljenje (obično nakon što je već istaljeno oko 20 % uloška) u količinama od ~ 1,0 %.

Silicij-karbid dodan u uložak tijekom taljenja efikasno je sredstvo za poboljšanje nukleacijskog potencijala taljevine koja se dugo zadržava u pećima za držanje taljevine (receptorima). Na taj način može se značajno reducirati sklonost ka stvaranju odbjela i stezanje.

Pored silicij-karbida, u novije vrijeme razvijeno je i sredstvo za predobradu koje osim silicija (60 do 70 %) sadrži aluminij i cirkonij (do 5,0 %) te nizak sadržaj kalcija (do 1,0 %). Ovo sredstvo za predobradu taljevine rezultat je novih spoznaja na polju mehanizma nukleacije grafita u željeznim ljevovima. Ako se taljenje provodi u indukcijskim pećima, navedeno sredstvo za predobradu dodaje se u količini od 0,1 % zajedno s metalnim uloškom nakon što je prisutna već određena količina taljevine u peći, dok se kod kupolne peći navedena količina sredstva za predobradu dodaje u ispusni žlijeb pri ispustu taljevine iz peći. Sredstvo za predobradu ne smije se dodati u trosku jer se smanjuje njegova djelotvornost.

## 2.10 Cijepljenje sivog lijeva

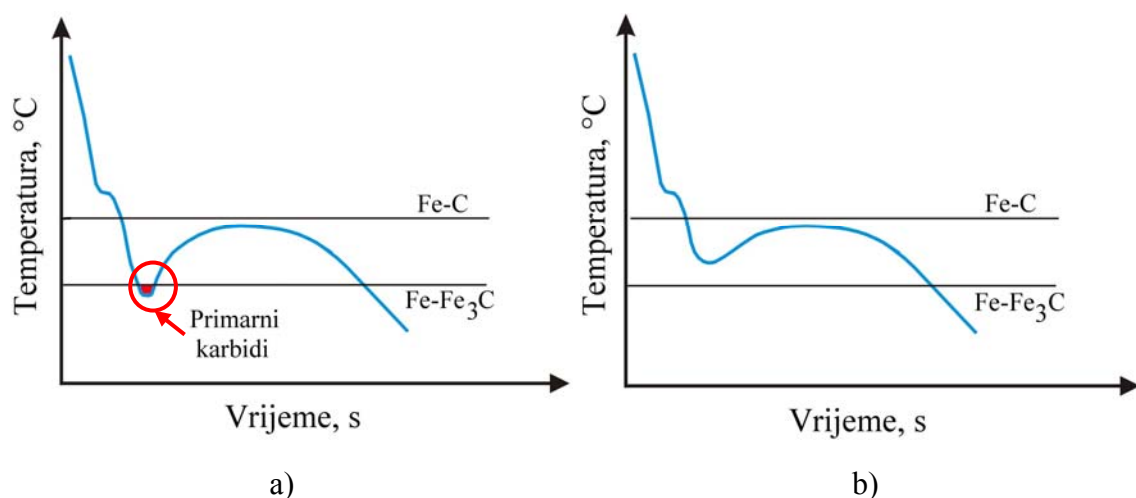
Cijepljenje predstavlja kemijsku modifikaciju taljevine kojom se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije pothlađenja i povećanja broja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja. Cijepljenjem se ne unose u taljevinu nove čestice za nukleaciju grafita, već modificiraju postojeće da bi predstavljale aktivna mjesta za nukleaciju grafita. Cjepivo se dodaje u maloj količini u taljevinu željeznog lijeva neposredno prije ili za vrijeme lijevanja taljevine u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja.

### 2.10.1 Učinci cijepljenja

Cijepljenje je važan korak u proizvodnji sivog lijeva, jer utječe na njegova mikrostruktura i mehanička svojstva. Modifikacija postojećih uključaka u taljevini u cilju stvaranja aktivnih mjesta za nukleaciju grafita predstavlja jedan od najvažnijih učinaka cijepljenja.

Cijepljenjem taljevine smanjuje se pothlađenje putem stvaranja većeg broja pogodnih mjesta za nukleaciju grafita. Smanjenjem pothlađenja taljevine promovira se stvaranje sitnih, jednolično raspoređenih grafitnih listića A tipa, što je rezultat većeg broja nukleacijskih mjesta, a time i većeg broja eutektičkih ćelija. Veličina grafitnih listića povezana je s veličinom eutektičkih ćelija. Što su eutektičke ćelije manjih dimenzija to će i grafitni listići biti kraći.

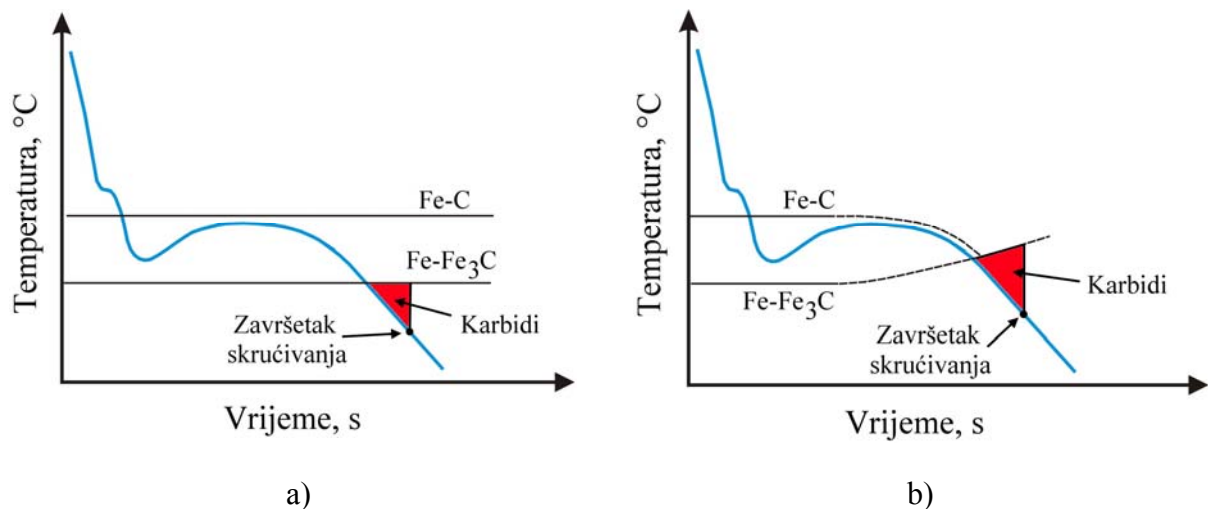
Smanjenjem pothlađenja taljevine putem cijepljenja smanjuje se i sklonost ka stvaranju eutektičkih (ili primarnih) karbida (cementita) koji se često u ljevačkoj praksi nazivaju odbjelom. Ako temperatura taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja padne ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika doći će do stvaranja eutektičkih (primarnih) karbida, odnosno odbjela (slika 2.40a). Ukoliko se eutektičkom reakcijom oslobodi dovoljno topline, temperatura ostatka taljevine može ponovo porasti iznad temperature skrućivanja metastabilnog eutektika (slika 2.40a), čime se zaustavlja stvaranje odbjela i promovira izlučivanje grafita. U tom slučaju govorimo o meliranoj strukturi, jer je u strukturi prisutan grafit i cementit.



Slika 2.40. Shematski prikaz krivulje hlađenja sivog lijeva: a) stvaranje primarnih karbida, b) bez nastanka primarnih karbida

Stvaranje odbjela posebno je izraženo u onim područjima odljevka koje karakteriziraju velike brzine skrućivanja (tanke stjenke, kutovi itd.), kao i pri niskim vrijednostima CE. Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje odbjela putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika.

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) (slika 2.41a). Sa slike 2.41a može se vidjeti da je solidus temperatura  $T_S$  ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika. Cijepljenjem taljevine može se povisiti temperatura  $T_S$  i na taj način izbjeći stvaranje inverznog odbjela.



Slika 2.41. Shematski prikaz krivulje hlađenja sivog lijeva koja ukazuje na nastanak:  
a) inverznog odbjela, b) interčelijastih karbida

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

Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje interčelijastih karbida putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. 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 (slika 2.41b).

Pravilnim cijepljenjem taljevine može se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida putem povećanja broja eutektičkih ćelija, čime se postiže veća „raspršenost“ karbidotvornih elemenata, a time i manja opasnost od stvaranja interčelijastih karbida. 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.

Cijepljenje utječe i na iznos rekalescencije tijekom eutektičkog skrućivanja. Dodatak cjepiva podiže temperaturu eutektičkog pohlađenja  $T_{EP}$  i snižava temperaturu eutektičke rekalescencije  $T_{ER}$  jer je u taljevini prisutno više centara nukleacije. Previsoke vrijednosti rekalescencije ukazuju na slabu nukleaciju i mogu uzrokovati nastanak oštećenja u kalupima od svježe kalupne mješavine, zbog velike volumne ekspanzije grafita koja se prvotno dešava pri skrućivanju. Ako se naglo izluči prevelika količina eutektičkog grafita, tj. ako je visoka

brzina rekalescencije, javljaju se pri volumnoj ekspanziji značajne sile na stjenke kalupa i može doći do proširenja kalupne šupljine. Gustoća grafita iznosi  $\sim 2,2 \text{ g/cm}^3$ , dok je gustoća tekućeg željeza  $\sim 6,9 \text{ g/cm}^3$ . Tijekom skrućivanja može doći do porasta volumena taljevine, ako je izlučeno dovoljno eutektičkog grafita.

Pravilnim cijepljenjem taljevine sivog lijeva smanjuje se osjetljivost sivog lijeva na debljinu stjenke (brzinu hlađenja).

Zbog utjecaja na mikrostrukturu, cijepljenjem se poboljšava niz svojstava sivog lijeva: vlačna čvrstoća, žilavost, otpornost na trošenje, itd. Pored navedenog, pravilnim cijepljenjem se poboljšava homogenost strukture, strojna obradivost, te smanjuje tvrdoća, sklonost ka stezanju i segregacijama

Cjepivo dodano u taljevinu željeznog lijeva djeluje i kao dezoksidant, što potpomaže sprječavanju prekomjerne oksidacije. Produkti dezoksidacije značajni su za heterogenu nukleaciju grafita.

Pored niza pozitivnih učinaka, postoji i negativno djelovanje cijepljenja u sivom lijevu. U praksi je utvrđeno da se cijepljenjem taljevine sivog lijeva može povećati sklonost ka stvaranju grešaka uslijed sekundarnog stezanja. Pri identičnim vrijednostima modula (omjer volumena i površine odljevka), kod cijepljenog sivog lijeva razviti će se viši tlak tijekom ekspanzije (izlučivanja grafita) nego kod necijepljenog sivog lijeva, što je u suprotnosti s nodularnim lijevom.

### **2.10.2 Kemijski sastav cjepiva i utjecaj manjinskih elemenata**

Najpopularnije i najučinkovitije cjepivo za sivi lijev je FeSi koji sadrži manje količine elemenata, kao što su aluminij, barij, kalcij, stroncij i cirkonij (tablica 2.6). FeSi bez prisutnih manjinskih elemenata nije učinkovito cjepivo.

Najčešću primjenu u proizvodnji sivog lijeva imaju cjepiva bazirana na FeSi koji sadrže  $\sim 7,5\%$  silicija i  $0,6$  do  $1,25\%$  aluminija, te  $0,5$  do  $2,0\%$  kalcija (cjepiva br. 1, 3 i 4 iz tablice 2.6). Ova cjepiva poznata su pod nazivom lijevaonički FeSi75. Najznačajniji elementi u ovim cjepivima su kalcij i aluminij jer poboljšavaju nukleacijski potencijal taljevine. Pri vrlo niskim koncentracijama (ispod donjih granica navedenih u tablici) ne djeluju kao cjepivo.

Ljevaonički FeSi s niskim sadržajem kalcija i aluminija (cjepivo br. 2 iz tablice 2.6) nije učinkovit kao cjepivo, zbog čega se često i ne smatra cjepivom. Može se primijeniti za podešavanje sadržaja silicija, jer bi se prevelikim dodatkom cjepiva pod rednim brojem 1, 3 i 4 iz tablice 2.6 unijela u taljevinu prevelika količina aluminija i kalcija.

Barij je snažan promotor grafita i vrlo koristan element u cjepivima. Cjepivo koje sadrži barij i kalcij (cjepivo br. 7 iz tablice 2.6) vrlo je efikasno sredstvo za poboljšanje nukleacijskog potencijala taljevine, odnosno povećanje broja eutektičkih ćelija, a dobre rezultate pokazuje i u sprječavanju stvaranja odbjela. Cjepiva s barijem imaju dobru otpornost na odgor (slabljenje djelovanja s vremenom nakon dodatka).

Cjepivo pod rednim brojem 8 u tablici 2.6 sadrži cirkonij. Cirkonij djeluje kao dezoksidant, smanjuje dubinu odbjela i povoljno utječe na nukleaciju grafita. Otopljeni dušik u sivom lijevu može se kontrolirati cirkonijem, gotovo eliminirajući rizik nastajanja mjehura u odljevcima, jer cirkonij ima visok afinitet prema dušiku.

Cjepivo pod rednim brojem 9 u tablici 2.6 sadrži visok udio cerija i elementa rijetkih zemalja (RE). Ovo cjepivo efikasno smanjuje dubinu odbjela u sivom lijevu. Prisutni elementi rijetkih zemalja u cjepivu efikasno neutraliziraju štetne utjecaje bizmuta, olova i bora u sivom lijevu.

Tablica 2.6. Tipični sastav najčešće primjenjivanih cjevica za sivi lijev

Redni broj	Element, %								
	Si	Al	Ca	Sr	Ce	Mn	Ba	Zr	Ostali
1	74,0 - 79,0	0,6-1,25	0,5 -1,0						
2	74,0-79,0	0,4 -0,5	0,1 -0,2						
3	74,0-79,0	0,6-1,1	1,0-2,0						
4	46,0-50,0	maks. 1,2	0,6-0,9						
5	60,0-65,0	0,90-1,10	28,0-32,0						
6	50,0-55,0	1,0-3,0	0,5-1,5						Ti 9,0-11,0
7	60,0-65,0	1,0-1,5	1,5-3,0			9,0-11,0	4,0-6,0		
8	60,0-65,0	0,75-1,25	0,6-0,9			5,0-7,0	0,6-0,9	5,0-7,0	
9	36,0-40,0	maks. 0,5	maks. 0,5		9,0-11,0				Ukupno RE 11,0-15,0
10	73,0-78,0	maks. 0,5	maks. 0,1	0,6-1,0					
11	46,0-50,0	maks. 0,5	maks. 0,1	0,6-0,9					
12	78,0-82,0	1,0-3,0	2,25-2,50					1,25-1,75	
13	74,0-79,0	maks. 1,25	0,75-1,25				0,75-1,25		
14	74,0-79,0	maks. 1,25	1,0				2,0		
15	67,0		1,0				2,0		Ti 9,0

\* ostatak do 100% je sadržaj željeza u cjevici

\*\* RE – elementi rijetkih zemalja

Ljevaonički FeSi koji sadrži stroncij (~ 1,0 %) izrazito je djelotvorno cjevico za sivi lijev kada je nizak sadržaj kalcija (< 0,1 %) i aluminiija (< 0,5 %) u cjevici (cjevico broj 10 i 11 u tablici 2.6), posebno u taljevinama s visokim sadržajem sumpora. Posebno je razvijeno za sivi lijev. U Fe-C-Si legurama koje sadrže sumpor i kisik stroncij promovira stvaranje listićavog grafita pri visokim i niskim brzinama hlađenja. Cjevica koja sadrže stroncij značajno smanjuju eutektičko pothlađenje i duže vrijeme su djelotvorna, pogotovo u usporedbi s ljevaoničkim FeSi75.

Cijepljenjem sivog lijeva s cjevicom koje sadrži stroncij značajno se smanjuje dubina odbjela uz zadržavanje znatno nižeg broja eutektičkih čelija (ili smanjenja njihove veličine) u usporedbi s ostalim cjevicama. Dodatkom ovih cjevica ne povećava se vlačna čvrstoća sivog lijeva u istoj mjeri kao dodatkom ostalih odgovarajućih cjevica.

### 2.10.3 Slabljenje djelovanja cijepljenja

Maksimalni učinak cijepljenja postiže se odmah nakon dodatka cjepiva u taljevinu. S vremenom dolazi do slabljenja djelovanja (odgora) cjepiva (engl. *fading*), odnosno postepenog gubitka učinka cijepljenja s vremenom zadržavanja taljevine u loncu. Brzina slabljenja djelovanja cjepiva ovisi o sastavu cjepiva i taljevine u koju je cjepivo dodano.

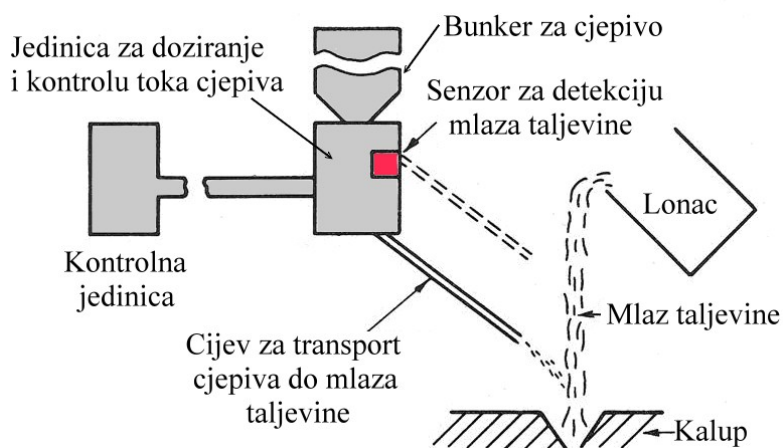
Posljedice slabljenja djelovanja cjepiva su: porast pothlađenja taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja, porast tendencije ka stvaranju odbjela (pogotovo u tankim stjenkama), smanjenje broja eutektičkih ćelija što ima direktan utjecaja na mehanička svojstva, stvaranje nepoželjnih oblika grafita itd.

Zbog slabljenja djelovanja cjepiva s vremenom zadržavanja taljevine, potrebno je odabrati adekvatno cjepivo i optimalni dodatak ovisno o vremenu lijevanja i količini taljevine u loncu, odnosno taljevinu naknadno cijepiti da bi se izbjeglo stvaranje nepoželjnih mikrostrukturnih konstituenata u zadnje lijevanim odljevcima.

### 2.10.4 Metode cijepljenja

Dodatak cjepiva u lonac (na dno lonca) prije početka njegovog punjenja najjednostavnija je i najčešće primjenjivana metoda cijepljenja u praksi. Pored slabijeg učinka cijepljenja, karakteristika ove metode je i slabljenje djelovanja cjepiva tijekom zadržavanja taljevine u loncu, nedostatak homogenosti zbog procesnih varijacija itd.

Metode cijepljenja nakon što taljevina napusti lonac i ulazi u kalup (cijepljenje u mlaz prije ulaska u kalup) ili u samom kalupu poznate su kao metode kasnog ili naknadnog cijepljenja. Kod ovih metoda cjepivo se može dodati na nekoliko načina: granulirano cjepivo dodaje se u mlaz taljevine tijekom ulijevanja u kalup (slika 2.42), žica napunjena cjepivom dodaje se uljevni sifon peći za održavanje i lijevanje taljevine te smještanjem granuliranog cjepiva ili cjepiva u obliku tableta u uljevnu čašu, spust ili razvodnik.



Slika 2.42. Shematski prikaz cijepljenja u mlaz taljevine prije ulaska u kalup

Metode kasnog ili naknadnog cijepljenja mogu riješiti mnoge probleme prisutne kod cijepljenja u loncu. Kasno cijepljenje gotovo u potpunosti eliminira problem slabljenja djelovanja cjepiva te omogućuje, za isti nivo cijepljenja, znatno manji dodatak cjepiva u usporedbi s cijepljenjem u loncu.



Kasno cijepljenje, ispravno primijenjeno, daje najveći mogući učinak koji se može postići dodatkom cjepiva i na taj način može značajno smanjiti sklonost ka odbjelu u odnosu na cijepljenje u loncu. Kod kasnog cijepjenja potrebna je manja količina cjepiva nego kod cijepjenja u loncu. Za svaki specifični odljevak potrebno je odrediti optimalnu količinu cjepiva. Može se upotrijebiti kao dodatak cijepljenju u loncu radi postizanja snažnijeg efekta cijepjenja i utjecaja na slabljenje djelovanja cjepiva.

Obično se dodaje od 0,1 –do 0,4 % cjepiva što ovisi o vrsti cjepiva, metodi cijepjenja, vremenu zadržavanja taljevine u loncu itd. Dodaci cjepiva iznad potrebnih za kontrolu odbjela te postizanje željene mikrostrukture i mehaničkih svojstava rezultira višim troškovima te može dovesti do nastanka grešaka u odljercima (uključujući uzrokovani troskom koja potječe od dodatka cjepiva, stezanje itd.).

Da bi se ostvarili maksimalni učinci cijepljenjem, potrebno je obratiti pažnju na slijedeće:

- Cjepiva moraju biti suha. Ukoliko cjepiva nisu suha postoji opasnost od pojave mjehuravosti u odljercima.
- Točno poznavati količini taljevine koja se cijepi te količinu upotrijebljenog cjepiva da bi se ostvarili konzistentni rezultati.
- Što se cjevivo duže vrijeme zadržava na vrućem dnu lonca prije ispuštanja taljevine iz peći veći je stupanj oksidacije cjepiva, a time i slabiji učinak.
- Cjevivo dodati u lonac kada u njemu ima ~ 100 do 130 mm taljevine. Na ovaj način postiže se bolje miješanje cjepiva s taljevinom i više iskorištenje cjepiva.
- Cjevivo dodati na mjesto gdje mlaz taljevine iz peći udara u taljevinu u loncu. Na taj način postiže se bolje miješanje cjepiva i taljevine. Pored toga, na tom mjestu uvijek se nalazi znatno manja količina troske u odnosu na ostala područja. Na taj način sprječava se kontakt cjepiva s troskom i shodno tome poboljšava iskorištenje cjepiva. Ako se cjevivo dodaje u sam mlaz, dolazi do brze oksidacije finih čestica iz cjepiva čime se znatno umanjuje učinak cijepjenja.
- Ne cijepiti taljevinu s niskom temperaturom. Cjevivo mora biti potpuno otopljeno. Ako cjevivo nije homogeno raspodijeljeno u taljevini, što je slučaj kod taljevina koje imaju nisku temperaturu u trenutku cijepjenja, stvaraju se u područja s visokom te područja s niskom koncentracijom cjepiva. Pod tim uvjetima nastaju različiti tipovi grafitnih listića, a time i područja u odljevku s različitim strukturama.
- Brzo napuniti lonac u kojem se provodi cijepljenje. Brzo punjenje lonca nakon cijepjenja potpomaže brzo otapanje cjepiva i potpuno miješanje s taljevinom u loncu.
- Osigurati miješanje cijepljene taljevine prije lijevanja u kalupe.
- Nakon cijepjenja lijevanje provesti što je moguće prije. Ovakvim pristupom smanjuje se odgor cjepiva i postižu maksimalni učinci cijepjenja.
- Osigurati konzistentnost u provođenju cijepjenja.
- Odabrati adekvatnu veličinu čestica (granulaciju) cjepiva prema temperaturi i količini taljevine koja se cijepi. Granulacija cjepiva trebala bi biti dovoljno sitna da se osigura brzo otapanje cjepiva i laka raspodjela kroz taljevinu.

## 2.11 Svojstva sivog lijeva

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva ovise o kemijskom sastavu i strukturi nastaloj tijekom skrućivanja i naknadnog hlađenja u krutom stanju. Veličina i orijentacija grafitnih listića ima značajan utjecaj na svojstva sivog lijeva. Grafitni listići velike dužine, obično prisutni u sivim ljevovima s visokim ekvivalentom ugljika i debelostjenim odljevcima, rezultiraju dobrom sposobnošću prigušenja vibracija, dimenzijskom stabilnošću, otpornošću na toplinske šokove te olakšavaju strojnu obradivost. Više vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti postižu se ako su u mikrostrukturi sivog lijeva prisutni sitni grafitni listići tipa A koji nastaju pri adekvatnom nukleacijskom potencijalu i nižim vrijednostima ekvivalenta ugljika (podeuteklički sastavi). Usitnjavanje i stabilizacija perlita rezultira porastom tvrdoće, vlačne čvrstoće i otpornosti na trošenje.

Pored kemijskog sastava (posebno ekvivalenta ugljika) i veličine poprečnog presjeka (debljine stjenke), na mikrostrukturu sivog lijeva (a time i svojstva) utječe dodatak legirajućih elemenata, toplinska obrada, toplinska svojstva kalupa te oblik odljevka. Kombinacijom raznih kemijskih sastava i kontrole procesa ili putem naknadne toplinske obrade mogu se dobiti različite mikrostrukture, odnosno svojstva sivog lijeva, što omogućuje konstruktorima odabir kvalitete koja osigurava najpovoljniju kombinaciju svojstava.

U odnosu na nodularni i vermikularni lijev, sivi lijev ima nižu vlačnu čvrstoću, tvrdoću, izduženje i žilavost, ali povoljniju toplinsku vodljivost, sposobnosti prigušenja vibracija i livljivost.

### 2.11.1 Mehanička svojstva

Mehanička svojstva nelegiranih kvaliteta sivog lijeva prikazana su u tablici 2.7. **Vlačna čvrstoća** je najčešće ispitivano svojstvo sivog lijeva. Najznačajniji faktori koji utječu na vlačnu čvrstoću sivog lijeva su: kemijski sastav (posebno vrijednost ekvivalenta ugljika), veličina i raspodjela grafitnih listića te struktura metalne osnove. Kod uobičajenih, nelegiranih kvaliteta sivog lijeva, vlačna čvrstoća kreće se u granicama od 100 do 450 MPa (tablica 2.7).

Grafitni listići djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, odnosno mjesta smanjene čvrstoće i tvrdoće i stoga imaju negativan utjecaj na vlačnu čvrstoću. Pod vlačnim opterećenjem, grafitni listići mogu biti mjesta stvaranja pukotina uzrokujući time značajni pad vlačne čvrstoće. Sivi lijev s nižom vrijednosti ekvivalenta ugljika ima višu čvrstoću od sivog lijeva s višom vrijednosti ekvivalenta ugljika zbog manjeg udjela grafitnih listića, manje dužine grafitnih listića te višeg udjela perlita u metalnoj osnovi.

**Tlačna čvrstoća** sivog lijeva je ~ 3 – 4 puta veća od njegove vlačne čvrstoće (tablica 2.7), što je znatno više nego kod vermikularnog i nodularnog lijeva. Znatno veća tlačna od vlačne čvrstoće rezultat je prisutnih grafitnih listića u metalnoj osnovi sivog lijeva, jer grafitni listići imaju manji utjecaj na tlačna svojstva nego na vlačna. Metalna osnova također utječe na tlačnu čvrstoću sivog lijeva. Značajni porast tlačne čvrstoće može se očekivati s promjenom feritne metalne osnove u perlitnu te martenzitnu. Zbog visoke tlačne čvrstoće sivi lijev često se primjenjuje za konstrukcije koje su opterećene na tlak.

**Smična čvrstoća** sivog lijeva je ~ 1,1 – 1,3 puta veća od vlačne čvrstoće (tablica 2.7). **Savojna čvrstoća** sivog lijeva obično je ~ 1,5 puta veća od vlačne čvrstoće.

Tablica 2.7. Mehanička svojstva sivog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova promjera 30 mm u lijevanom stanju (dodatne informacije o mehaničkim svojstvima pored onih danih u tablici 2.1.)

Svojstvo	Oznaka	Jedinica	Označivanje materijala <sup>1)</sup>				
			EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
			Struktura				
			Feritno /perlitna		Perlitna		
Vlačna čvrstoća	$R_m$	MPa	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Granica razvlačenja (0,1%)	$R_{p0,1}$	MPa	98-165	130-195	165-228	195-260	228-285
Izduženje	A	%	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3
Tlačna čvrstoća	$\sigma_{db}$	MPa	600	720	840	960	1080
Granica tečenja pod tlakom (0,1%)	$\sigma_{d0,1}$	MPa	195	260	325	390	455
Savojna čvrstoća	$\sigma_{bB}$	MPa	250	290	340	390	490
Smična čvrstoća	$\sigma_{aB}$	MPa	170	230	290	345	400
Čvrstoća na uvijanje <sup>2)</sup>	$\tau_{tB}$	MPa	170	230	290	345	400
Modul elastičnosti <sup>3)</sup>	E	GPa	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Poissonov broj	$\nu$	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Dinamička savojna čvrstoća <sup>4)</sup>	$\sigma_{bW}$	MPa	70	90	120	140	145
Čvrstoća pri izmjeničnom vlačno-tlačnom opterećenju <sup>5)</sup>	$\sigma_{zdW}$	MPa	40	50	60	75	85
Prijelomna žilavost	$K_{Ic}$	N/mm <sup>3/2</sup>	320	400	480	560	650

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

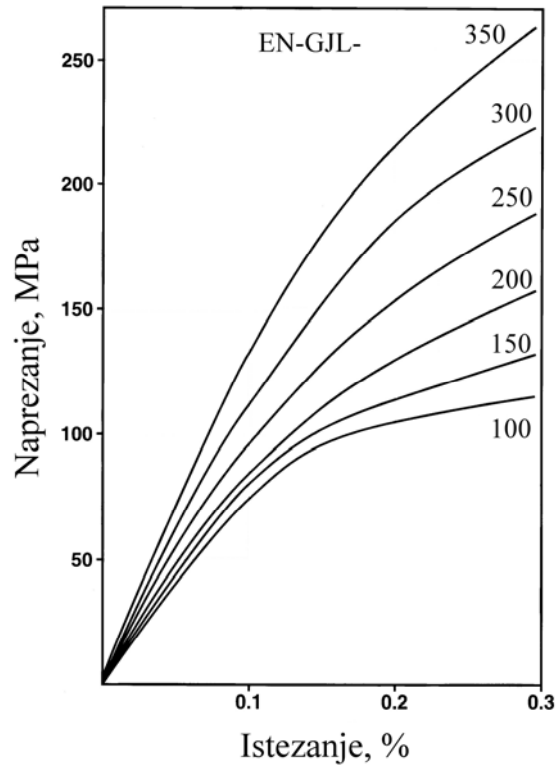
<sup>2)</sup> Dinamička čvrstoća na uvijanje  $\tau_{tW} \approx 0,42R_m$ .

<sup>3)</sup> Ovisi o količini i obliku grafita te opterećenju.

<sup>4)</sup> Primjenjuje se slijedeća aproksimacija:  $\sigma_{bW} \approx 0,35-0,50R_m$ .

<sup>5)</sup> Primjenjuje se slijedeća aproksimacija:  $\sigma_{zdW} \approx 0,53 \sigma_{bW} \approx 0,26R_m$

Kod sivog lijeva modul elastičnosti nema egzaktnu vrijednost (nije konstanta) kao kod većine ostalih materijala, jer kod sivog lijeva nije prisutno elastično područje u kojem su naprezanje i istežanje u proporcionalnom odnosu. U sivom lijevu grafitni listići djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi, odnosno mjesta na kojima započinje mikroplastična deformacija pri vrlo niskim naprezanjima. Plastična deformacija uzrokuje kontinuirano smanjenje nagiba krivulje naprezanje – istežanje, zbog čega sivi lijev ne pokazuje uobičajeno elastično ponašanje (slika 2.43).



Slika 2.43. Krivulje naprezanje – istežanje za različite kvalitete sivog lijeva

Za razliku od većine ostalih materijala, modul elastičnosti sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće. Porastom dužine grafitnih listića i povećanjem njihovog udjela u mikrostrukturi smanjuje se modul elastičnosti sivog lijeva. To znači da će sivi ljevovi s nižim modulom elastičnosti bolje apsorbirati vibracije i buku u odnosu na materijale s visokom vrijednosti modula elastičnosti. Pored toga, sivi lijev s niskom vrijednosti modula elastičnosti posjeduje superiorniju otpornost na stvaranje toplih pukotina u uvjetima gdje je prisutno značajno trenje, odnosno posjeduje superiorniju otpornost na oštre toplinske šokove. Zbog toga je sivi lijev pogodniji za izradu kočionih diskova i bubnjeva te potisnih ploča kvačila od materijala koji imaju visok modul elastičnosti. Viši moduli elastičnosti poželjni su za aplikacije kod kojih se zahtijeva krutost konstrukcije.

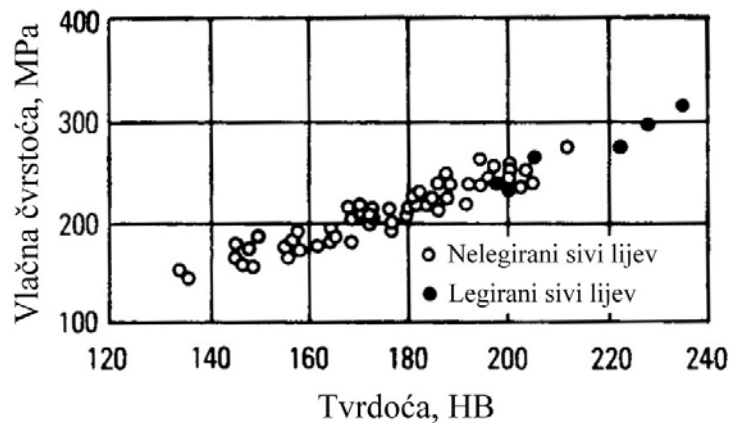
Kod nelegiranih sivih ljevova s vlačnom čvrstoćom do 250 MPa (određena na standardiziranim uzorcima koju su izrađeni strojnom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka promjera 30 mm), modul elastičnosti može se odrediti na osnovi slijedećih izraza:

$$E(\text{MPa}) = 319350 - 49980\%C - 14360\%Si \quad (2.6)$$

$$E(\text{MPa}) = 25790 + 124R_m + 324HB \quad (2.7)$$

Jednadžbe (2.6) i (2.7) te tablica 2.7 pokazuju da je teško proizvesti sivi lijev s vrlo visokom vlačnom čvrstoćom i niskim modulom elastičnosti. Povećanje vlačne čvrstoće bez proporcionalnog povećanja modula elastičnosti i smanjenja toplinske vodljivosti može se postići dodatkom legirajućih elemenata (molibden), čime se utječe na čvrstoću metalne osnove, ali ne i na oblik i količinu grafita.

Ispitivanje **tvrdće** sivog lijeva često se provodi jer se na osnovi izmjerene tvrdće može procijeniti vlačna čvrstoća i strojna obradivost. Sa slike 2.44 može se vidjeti da tvrdća sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće, odnosno da postoji čvrsta korelacija između navedenih svojstva. Varijacije u veličini i distribuciji grafita uzrokuju značajne varijacije u tvrdći, čak i kod konstantne tvrdće metalne osnove.



Slika 2.44. Odnos između vlačne čvrstoće i tvrdće kod različitih kvaliteta sivog lijeva

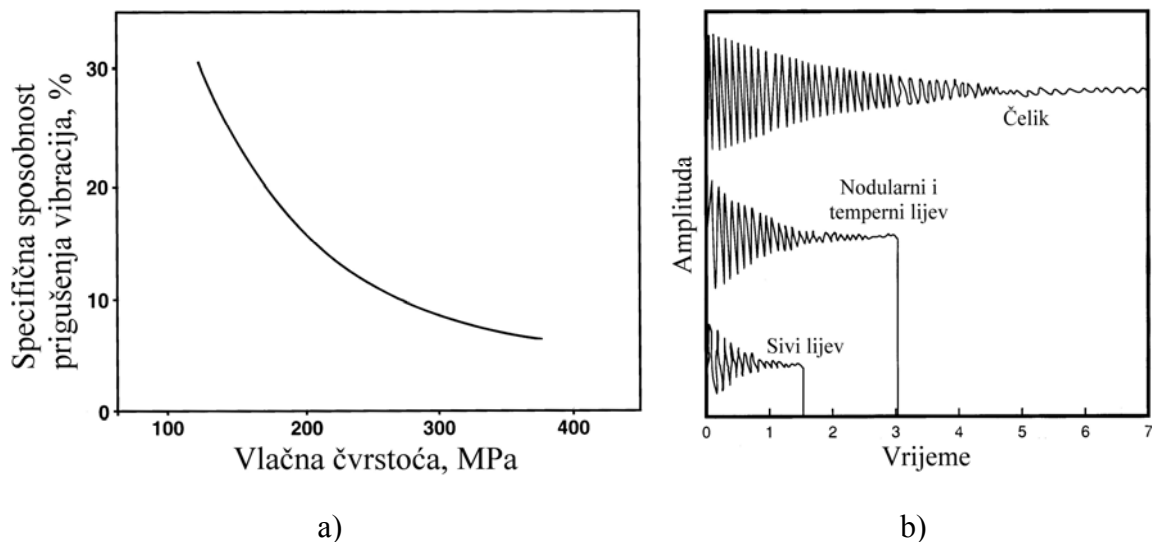
Vrlo niska duktilnost je svakako najnepovoljnije svojstvo sivog lijeva i direktno je povezana s njegovom strukturom. Niska duktilnost očituje se u niskoj **udarnoj žilavosti** i **istezanju** sivog lijeva. Grafitni listići djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi sivog lijeva, što omogućuje koncentraciju naprezanja i sukladno tome, rezultira smanjenjem žilavosti materijala. Udarni rad loma sivog lijeva određen na epruvetama bez zareza obično se kreće u granicama od 1,4 – 6,8 J. Za razliku od nodularnog lijeva, žilavost sivog lijeva raste s porastom vlačne čvrstoće (tablica 2.7). Kod sivog lijeva izduženje pri prijelomu obično je manje od 1 %.

Sivi lijev ima vrlo malu **osjetljivost na zarez**. To znači da će se čvrstoća vrlo malo smanjivati ako su zbog dizajna prisutna razna zaobljenja, otvori, dodatni zarezi, urezi ili utori na odljevku, što se objašnjava prisutnošću grafitnih listića koji djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi.

**Sposobnost prigušenja vibracija** ima značajnu ulogu u konstrukciji mnogih komponenti. Visoka sposobnost prigušenja vibracija reducira buku i vibracije koje emitiraju strojne komponente koje su podvrgnute cikličkim naprezanjima. Sivi lijev posjeduje vrlo visoku sposobnost prigušenja vibracija, što je rezultat međusobno povezanih grafitnih listića u metalnoj osnovi. Nasumično orijentirani grafitni listići raspršuju vibracije u odljercima od sivog lijeva. Veličina i udio grafitnih listića ima značajan utjecaj na sposobnost prigušenja vibracija. Odljevci od sivih ljevova povišene čvrstoće s malim udjelom te kratkim grafitnim listićima imaju znatno nižu sposobnost prigušenja vibracija od odljevaka od sivog lijeva niske čvrstoće s visokim ekvivalentom ugljika, debelim stjenkama i dugim grubim grafitnim listićima (slika 2.45a). Pored toga, sivi ljevovi s nižim modulom elastičnosti bolje apsorbiraju vibracije i buku u odnosu na materijale s visokom vrijednosti modula elastičnosti. Sa slike 2.45b i može se vidjeti da sivi lijev ima znatno višu sposobnost prigušenja vibracija od čelika, aluminija, nodularnog i tempernog lijeva te bijelih željeznih ljevova. Vermikularni lijev

također ima manju sposobnost prigušenja vibracija od sivog lijeva. Odnos relativnih sposobnosti prigušenja vibracija sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva je:

$$\text{Sivi lijev} : \text{vermikularni lijev} : \text{nodularni lijev} = 1,0 : 0,60 : 0,34$$



Slika 2.45. a) promjena specifične sposobnosti prigušenja vibracija ovisno o vlačnoj čvrstoći sivog lijeva, b) relativna sposobnost prigušenja vibracija čelika, nodularnog, tempernog i sivog lijeva

Visoka sposobnost prigušenja vibracija često je razlog odabira odljevaka od sivog lijeva za izradu blokova i glava motora, kočionih diskova i bubnjeva, postolja strojeva, kućišta ležajeva itd.

### 2.11.2 Fizikalna svojstva

Fizikalna svojstva nelegiranih kvaliteta sivog lijeva prikazana su u tablici 2.8. Ovi podaci su dani u okviru norme HRN EN 1561:1997.

**Gustoća** sivog lijeva ovisi o kemijskom sastavu i temperaturi. Povećanjem udjela slobodnog grafita (koji ima nisku gustoću), smanjuje se gustoća sivog lijeva. To je razlog zašto sivi ljevovi s povišenom čvrstoćom imaju veću gustoću od sivih ljevova s niskom čvrstoćom (tablica 2.8).

**Toplinska vodljivost** sivog lijeva pod snažnim je utjecajem morfologije i udjela grafita. Zbog kontinuirane prirode grafitnih listića, toplinska vodljivost sivog lijeva veća je od toplinske vodljivosti vermikularnog i nodularnog lijeva. Što je veća količina grafita i što su grafitni listići grublji i duži, veća je i toplinska vodljivost sivog lijeva. Pored oblika i udjela grafita, kemijski sastav, metalna osnova i temperatura također utječu na toplinsku vodljivost. Silicij smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva. Većina legirajućih elemenata također smanjuje toplinsku vodljivost sivog lijeva. Međutim, njihov utjecaj je znatno manji od utjecaja silicija. S porastom udjela ferita povećava se toplinska vodljivost. Iz tablice 2.8 može se vidjeti da je toplinska vodljivost kod određene temperature najviša kod kvalitete sivog lijeva s najnižom vlačnom čvrstoćom, a najniža kod kvalitete s najvišom vlačnom čvrstoćom. Pored toga, može se vidjeti da toplinska vodljivost svih kvaliteta sivog lijeva tek neznatno opada s porastom temperature do 500 °C. Visoka toplinska vodljivost važna je u aplikacijama

gdje je potrebno brzo odvoditi toplinu, kao što su kočioni diskovi i bubnjevi, čeličanske kokile itd.

**Toplinska ekspanzija** sivog lijeva ovisi o koeficijentu linearne ekspanzije. Koji primarno ovisi o metalnoj osnovi, dok oblik grafita ima zanemariv utjecaj. Feritna metalna osnova ima neznatno viši koeficijent linearne ekspanzije od perlitne metalne osnove. Austenitna metalna osnova može imati viši koeficijent linearne ekspanzije od feritne ili martenzitne metalne osnove, što ovisi o sadržaju nikla. Iz tablice 2.8 može se vidjeti da koeficijent linearne ekspanzije sivog lijeva raste s porastom temperature.

### 2.11.3 Ostala svojstva

Za određena specifična područja primjene (npr. za čeličanske kokile, kočione diskove i bubnjeve, ispušne komore, glave cilindara kod visoko opterećenih diesel motora, alate za upuhivanje stakla itd.) potrebno je poznavati otpornost materijala ka **toplinskom umoru** (naizmjeničnim ciklusima grijanja i hlađenja). Naizmjenično grijanje i hlađenje odljevka izaziva oštra naprezanja u materijalu. Naprezanja u odljevku rastu s porastom modula elastičnosti, koeficijenta toplinskog istezanja i temperaturne razlike. Nastala elastična i plastična naprezanja koja se naizmjenično izmjenjuju mogu dovesti do stvaranja pukotina u odljevku.

Za dobru otpornost na toplinski umor željezni ljevovi moraju imati visoku toplinsku vodljivost, nisku toplinsku ekspanziju, nizak modul elastičnosti, visoku čvrstoću pri sobnoj i povišenim temperaturama te za upotrebe iznad 500 °C otpornost na oksidaciju i strukturne promjene. Za oštre toplinske uvjete (naizmjenično grijanje - hlađenje) pri visokim brzinama hlađenja, visoka toplinska vodljivost i nizak modul elastičnosti sivog lijeva s visokim sadržajem ugljika (3,6 – 4,0 %) čini ovaj materijal superiornijim od legiranog i nelegiranog feritnog nodularnog lijeva te vermikularnog lijeva. Pri umjerenim brzinama hlađenja feritni vermikularni i feritni nodularni ljevovi imaju najvišu otpornost na nastajanje pukotine, ali pokazuju deformaciju. Pri niskim brzinama hlađenja, visoko čvrsti perlitni nodularni ljevovi te nodularni ljevovi legirani silicijem i molibdenom pokazuju superiornost obzirom na nastajanje pukotine i pojavu deformacija.

Kada se sivi lijev tijekom dužeg vremenskog perioda izlaže povišenim temperatura koje su niže od temperature pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit ili kada je podvrgnut dugotrajnom naizmjeničnom zagrijavanju i hlađenju, dolazi do njegovog **rasta i oksidacije** (stvaranja ogorine). Dakle, odljevci od sivog lijeva koji su izloženi cikličkim promjenama temperature mijenjaju svoj volumen, a ta promjena volumena poznata je kao rast ljevanih željeza. Rast koji se pojavljuje kod sivog lijeva odvija se brže nego kod vermikularnog, nodularnog ili tempernog lijeva. Posljedica rasta je razrahljenje ili „cvjetanje“ strukture što vodi ka značajnom padu vlačne čvrstoće i odbacivanju odljevka.

Obzirom na temperaturu i uzroke, razlikuje se primarni i sekundarni rast. Primarni rast posljedica je raspada cementita u perlitu na grafit i ferit, što znači da dolazi do grafitizacije. Nastali produkti (ferit i grafit) imaju veći specifični volumen od cementita. Raspad cementita, odnosno rast sivog lijeva ovisi o kemijskom sastavu. Viši sadržaji ugljika povećavaju brzinu rasta. Silicij pospješuje rast zbog grafitizirajućeg efekta, dok mangan sprječava raspad jer stabilizira cementit. Primarni rast počinje kod temperatura > 400 °C (tablica 2.9). Premda dolazi do povećanja rasta i prirasta mase (stvaranje ogorine), brzina raspada cementita pri ovim temperaturama je vrlo niska i ne izaziva značajnije probleme. Dodatkom kroma (0,5 – 2,0 %) i molibdena ( $\leq 0,5$  %) ili kroma i u određenom iznosu kositra i bakra može se struktura stabilizirati do ~ 450 °C (pri kraćim vremenima zadržavanja do 550°C).

Tablica 2.8. Fizikalna svojstva sivog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova promjera 30 mm u lijevanom stanju

Svojstvo	Oznaka	Jedinica	Označivanje materijala				
			EN-GJL-150 (EN-JL1020)	EN-GJL-200 (EN-JL1030)	EN-GJL-250 (EN-JL1040)	EN-GJL-300 (EN-JL1050)	EN-GJL-350 (EN-JL1060)
Gustoća	$\rho$	$\text{g/cm}^3$	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Specifični toplinski kapacitet; između 20 i 200°C,  između 20 i 600°C	c	J/(kgK)	460				
			535				
Koeficijent linearne ekspanzije; između -100 i +20°C  između 20 i 200°C  između 20 i 400°C	$\alpha$	$\mu\text{m}/(\text{mK})$	10,0				
			11,7				
			13,0				
Toplinska vodljivost pri 100°C pri 200°C pri 300°C pri 400°C pri 500°C	$\lambda$	W/(mK)	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5
			51,0	49,0	47,5	46,0	44,5
			50,0	48,0	46,5	45,0	43,5
			49,0	47,0	45,0	44,0	42,0
			48,5	46,0	44,5	43,0	41,5
Rezistivnost	$\rho$	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,80	0,77	0,73	0,70	0,67
Koercitivnost	$H_0$	A/m	560-720				
Maksimalna permeabilnost	$\mu$	$\mu\text{H}/\text{m}$	220-330				
Gubtci zbog histereze pri B = 1T		$\text{J}/\text{m}^3$	2500-3000				



Tablica 2.9. Rast (izražen kao postotno povećanje dužine odljevka) i prirast mase sivog lijeva (zbog stvaranja ogorine) pri 450 °C i 500 °C tijekom 64 tjedna

Temperatura, °C	Rast, %		Prirast mase, g/m <sup>2</sup>	
	450	500	450	500
EN-GJL-250	0,31	0,72	32,4	99,3
EN-GJL-300	0,05	0,56	32,8	84,4

Do temperature od 350 °C sve kvalitete sivog lijeva su stabilne i ne dolazi do rasta, čak ni tijekom vrlo dugih vremenskih perioda. Vrlo mali rast i prirast mase pojavljuju se pri 400 °C. Dodatkom kroma i molibdena u prethodno navedenim količinama značajno se može smanjiti rast (< 0,02 %).

Kod nelegiranog sivog lijeva iznad 550 °C započinje značajniji raspad cementita, odnosno perlita, već nakon nekoliko sati. Ako je sivi lijev legiran kromom (0,7 % kroma) raspad perlita započinje iznad 550 °C nakon 1000 sati. Brzina oksidacije udvostručuje se pri povećanju temperature sa 450 °C na 550 °C. Međutim, ona još uvijek nije tako velika i nakon 1000 sati zadržavanja neće se dogoditi dramatična oštećenja materijala. Daljnji porast temperature iznad 550 °C značajno ubrzava oksidaciju, odnos rast. Oksidacija kod 650 °C je ~ 8 puta brža nego kod 550 °C, zbog čega se rast intenzivno odvija. Kod nelegiranih kvaliteta ovaj rast može uzrokovati povećanje volumena odljevka i do 40 %. Daljnji rast na dovoljno visokim temperaturama može dovesti do potpunog raspada odljevka.

Sekundarni rast se javlja pod djelovanjem plinske atmosfere. Uzrok su plinovi koji ulaze kroz nastale pukotine koje su rezultat primarnog rasta. Pri tome dolazi do oksidacije grafitu i metalne osnove, što vodi do povećanja volumena koje je veće nego povećanje volumena zbog raspada cementita, odnosno karbida.

Zbog značajnog rasta, nelegirani sivi lijev nije pogodan za visokotemperaturne primjene. Međutim, dodatkom silicija iznad 4,0 % može se značajno usporiti rast i stvaranje ogorine na povišenim temperaturama. Zbog toga se provodi legiranje sivog lijeva silicijem (~ 6 % silicija) čime se postiže potpuno feritna metalna osnova, D tip grafitnih listića i podiže kritična temperatura (temperatura pretvorbe ferita ili perlita u austenit), što omogućuje značajno veću otpornost na rast i stvaranje ogorine te primjenu ovog materijala na temperaturama do 800 °C. Legiranjem s niklom (Ni-resist kvalitete sivog lijeva) temperatura primjene podiže se na ~ 900 °C. Otpornost na oksidaciju i rast može se značajno poboljšati visokim legiranjem sivog lijeva aluminijem. Ovi materijali detaljno će se razmatrati u poglavlju 2.13.

Sumarno se može reći da se ovisno o temperaturi mogu razlikovati tri područja opterećenosti materijala. U donjem temperaturnom području, sivi lijev je opterećen samo naprezanjima nastalim uslijed toplinskog umora. Granična temperatura za ovo područje leži u intervalu od 450 – 550 °C, što ovisi o kemijskom sastavu i vremenu zadržavanja na povišenim temperaturama. Pri višim temperaturama dolazi do dodatnog povećanja naprezanja uz vanjsku i unutarnju oksidaciju, kao i promjena u materijalu uslijed raspada perlita. Gornja granica tog područja je temperatura pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit, koja se ovisno o sadržaju silicija može kretati od ~ 750 °C (kod ~ 1,5 % silicija) do ~ 900 °C (kod ~ 6,0 % silicija). Pri prekoračenju ove temperature dolazi do pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit, iz kojeg pri hlađenju, ovisno o brzini hlađenja, može ponovno nastati ferit, perlit, bainit ili martenzit. Ovi procesi pretvorbe povezani su sa značajnim naprezanjem, koje posebno ubrzava proces oksidacije, tako da se materijal relativno lako raspadne.

Da bi se postigla što veća otpornost na rast u strukturi sivog lijeva ne bi smjelo biti slobodnog cementita, metalna osnova trebala bi biti feritna, a eventualno prisutni perlit treba stabilizirati dodatkom kroma, vanadija i molibdena. Pored toga, potrebno je obratiti pažnju da

temperatura kojoj je odljevak izložen ne dostigne temperaturu pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit te osigurati kompaktnost odljevka da bi se spriječila difuzija kisika ka unutrašnjosti.

Pored unutarnje oksidacije koja doprinosi rastu, na površini nelegiranih sivih ljevova nastaje **ogorina** nakon dovoljno dugog izlaganja povišenim temperaturama. Sivi lijev ima nižu otpornost na stvaranje ogorine od vermikularnog i nodularnog lijeva. Količina ogorine, odnosno porast mase odljevka uslijed oksidacije, raste s porastom vremena izlaganja povišenim temperaturama. Povećanje mase rezultat je apsorpcije kisika tijekom stvaranja ogorine. Ogorina nastala tijekom zagrijavanja sivog lijeva na zraku sastoji se od tri oksida: vanjski sloj čini  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , središnji sloj čini  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , a unutarnji sloj (sloj do odljevka) je  $\text{FeO}$ . Kod primjene materijala važno je razmotriti da li je nastala ogorina dobro povezana s osnovnim materijalom (djeluje kao zaštitni sloj), odnosno da li postoji sklonost ka stvaranju pukotina u ogorini čime se omogućuje daljnja oksidacija osnovnog materijala. Ako nisu prisutne pukotine u ogorini, transport kisika je otežan i ona djeluje kao zaštitni sloj, zbog čega se smanjuje brzina oksidacije. Površinska oksidacija sivog lijeva povećava se s porastom temperature. Pored temperature, atmosfera u kojoj se nalazi odljevak značajno utječe na stvaranje ogorine.

Sadržaj ugljika, odnosno količina i oblik grafita, ima značajan utjecaj na stvaranje ogorine kod sivog lijeva, posebno kod temperatura do  $500^\circ\text{C}$ . Povećanjem količine grafita raste količina stvorene ogorine. Struktura metalne osnove ima vrlo mali utjecaj na stvaranje ogorine u sivom lijevu. Silicij, krom i aluminij povećavaju otpornost na stvaranje ogorine putem stvaranja oksidnog sloja na površini odljevka koji ima zaštitno djelovanje.

Brzina atmosferske **korozije** sivog lijeva smanjuje se s porastom vremena izlaganja korozivnom okolišu. To se objašnjava zaštitnim djelovanjem stvorenog oksidnog sloja.

Nelegirani sivi ljevovi imaju dobru **otpornost na koncentriranu sumpornu kiselinu** jer se na površini odljevka stvara netopljivi sloj željeznog sulfata koji ima zaštitno djelovanje. Nelegirani sivi ljevovi ne primjenjuju se u razrijeđenoj sumpornoj kiselini zbog značajne brzine korozije (nemogućnost formiranja adekvatnog zaštitnog sloja).

Nelegirani sivi ljevovi rijetko se primjenjuju u fosfornoj kiselini. Primjena je uglavnom **ograničena na fosfornu kiselinu visoke koncentracije**, premda prisutnost klorida i fluorida može značajno povećati brzinu korozije. Pored toga, nelegirani sivi ljevovi pokazuju **vrlo lošu otpornost na solnu kiselinu** ( $\text{HCl}$ ), zbog čega nisu pogodni za primjenu u tom mediju.

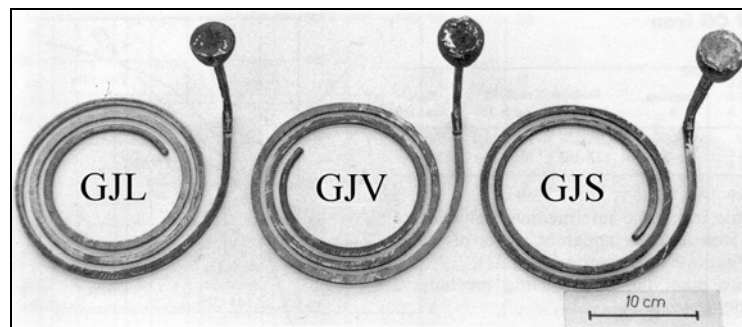
Odljevci od sivog lijeva jednolične tvrdoće s jednolično raspodijeljenim nasumično orijentiranim grafitnim listićima u metalnoj osnovi pokazuju odličnu **otpornost na trošenje**, posebno na trošenje klizanjem. Grafitni listići djeluju kao „rezervoari“ za sredstvo za podmazivanje, čime se minimalizira trenje između kliznih površina. Osim toga, sami grafitni listići djeluju kao sredstvo za podmazivanje. Otpornost na trošenje ovisi o kemijskom sastavu, obliku grafita i strukturi metalne osnove. Najbolja otpornost na trošenje sivih ljevova lijevanom stanju postiže se ako je ostvaren A tip grafitnih listića u finoj perlitnoj metalnoj osnovi. Prisustvo ferita i D tipa grafitnih listića negativno utječe na otpornost ka trošenju, dok prisutnost fosfidnog eutektika povoljno utječe na otpornost prema trošenju.

Otpornost na trošenje može se značajno poboljšati legiranjem kromom i molibdenom te toplinskom obradom (kaljenje + popuštanje). Kod istog kemijskog sastava kaljenjem i popuštanjem sivih ljevova može se postići približno 5 puta veća otpornost na trošenje u odnosu na perlitne sive ljevove. Zbog visoke otpornosti na trošenje klizanjem, sivi lijev se primjenjuje za izradu cilindara i klipnih prstena kod motora s unutarnjim sagorijevanjem.

Odlična **strojna obradivost** sivog lijeva u odnosu na ostale željezne ljevove prvenstveno je povezana s prisutnošću grafitnih listića u metalnoj osnovi koji djeluju kao mjesta na kojima se strugotina lomi, a ujedno podmazuju alat za obradu. Strojna obrada lakše se provodi kod kvaliteta koje imaju viši udio ferita u metalnoj osnovi u odnosu na kvalitete

koje imaju visok udio perlita. Prisustvo odbjela, površinskih uključaka itd., negativno utječe na strojnu obradivost. Veličina i jednoličnost raspodjele grafitnih listića u strukturi značajno utječe na kvalitetu površine nakon strojne obrade. Grubi grafitni listići, često prisutni kod kvaliteta sivog lijeva s vrijednostima ekvivalenta ugljika  $> 4,3$ , rezultiraju grubom površinom nakon strojne obrade.

**Livljivost** taljevine željeznog lijeva općenito ovisi o sadržaju ugljika i silicija te temperaturi. Pored toga, značaju ulogu ima i morfologija skrućivanja. Na slici 2.46 prikazani su rezultati ispitivanja livljivosti taljevina željeznih ljevova, tzv. spiralne probe (Sippove probe).



Slika 2.46. Spiralne probe odlijevane od sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva. Temperatura taljevine ista u sve tri slučaja

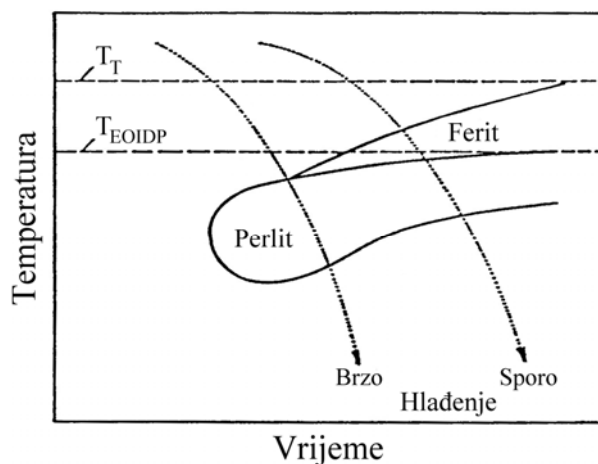
Sa slike 12.17 može se vidjeti da sivi lijev pokazuje najbolju livljivost, a nodularni lijev najlošiji. Livljivost vermikularnog lijeva leži između livljivosti sivog i nodularnog lijeva.

## 2.12 Toplinska obrada sivog lijeva

Većina odljevaka od sivog lijeva upotrebljava se u lijevanom stanju. Toplinska obrada primjenjuje se u slučajevima kada je potrebno udovoljiti specifičnim zahtjevima, koji nisu ispunjeni u lijevanom stanju. Tražena svojstva treba nastojati ostvariti u lijevanom stanju, jer primjena naknadne toplinske obrade povećava troškove proizvodnje odljevaka.

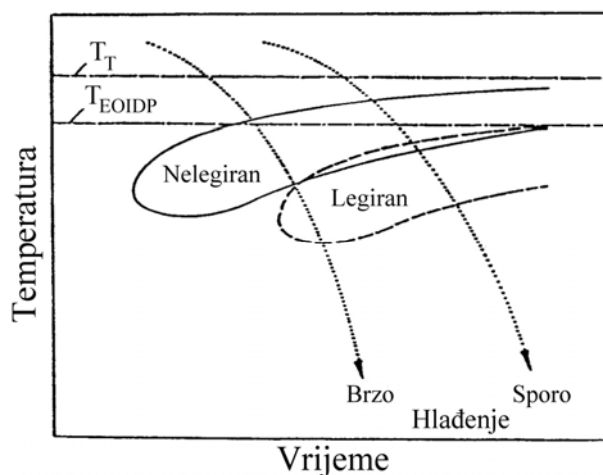
Toplinskom obradom mogu se postići značajnije promjene u metalnoj osnovi sivog lijeva, bez utjecaja na veličinu i oblik grafitna ostvarenog tijekom lijevanja. Najčešće primjenjivane toplinske obrade kod sivog lijeva su: žarenje, uklanjanje zaostalih naprezanja i normalizacija. Ostale standardne toplinske obrade, kao što je kaljenje i popuštanje, izotermičko (međustupanjsko) poboljšavanje (engl. *Austempering*) i martenzitno gašenje (engl. *Martempering*) primjenjuju se samo u specifičnim slučajevima. Plameno i indukciono kaljenje primjenjuje se u određenim slučajevima gdje se zahtijeva otvrdnjavanje površinskog sloja odljevka u cilju povećanja otpornosti na trošenje.

Kontrola pretvorbe austenita tijekom hlađenja predstavlja osnovu za većinu toplinskih obrada sivog lijeva. Ovisno o brzini hlađenja (koja je povezana s debljinom stijenke) i kemijskom sastavu, austenit se razlaže procesom difuzije ugljika u ferit, perlit ili bainit. Pri vrlo velikim brzinama hlađenja dolazi do pretvorbe austenita u martenzit, zbog odsutnosti difuzije ugljika. Pretvorbe austenita u ove različite produkte te utjecaj brzine hlađenja i kemijskog sastava najbolje su opisane TTT (engl. *Time – Temperature- Transformations*) dijagramima (slika 2.47).



Slika 2.47. Shematski prikaz tipičnog TTT dijagrama kontinuiranog hlađenja nelegiranog sivog lijeva

Većina legirajućih elemenata pomiče polja feritne ili perlitne pretvorbe ka dužim vremenima i nižim temperaturama. Na taj način moguće je i kod polaganijih brzina hlađenja (desna krivulja na slici 2.48) izbjeći stvaranje ferita i ostvariti potpuno perlitnu metalnu osnovu.



Slika 2.48. Utjecaj legirajućih elemenata na TTT dijagram kontinuiranog hlađenja sivog lijeva

Veličina grafitnih listića ima značajan utjecaj na kinetiku ugljika tijekom toplinske obrade. Kod odljevaka sa sitnim, finim grafitnim listićima difuzijski putovi ugljika su kratki, zbog čega se feritizacija postiže u kraćem vremenskom periodu nego kod odljevaka s dugim grafitnim listićima.

U odnosu na čelik, sivi lijev ima viši sadržaj ugljika i silicija, zbog čega će i učinak toplinske obrade biti drugačiji. Viši sadržaj ugljika povećava prokaljivost, omogućujući da i deblje stjenke budu toplinski obrađene uz niže zahtjeve za skupim legirajućim elementima ili sredstvima za gašenje. Kao i kod ostalih željeznih legura, količina ugljika u metalnoj osnovi određuje konačnu tvrdoću: viši sadržaj ugljika u metalnoj osnovi – viša tvrdoća. S druge strane, viši sadržaji ugljika mogu uzrokovati pojavu pukotina pri gašenju zbog stvaranja martenzita s povišenim sadržajem ugljika. Zbog toga je vrlo važna kontrola kemijskog sastava, temperature austenitizacije i uvjeta pri gašenju.

Prokaljivost je važno svojstvo svakog odljevka koji se gasi, jer određuje dubinu do koje se može ostvariti potpuna ili djelomična martenzitna metalna osnova te potrebnu oštrinu gašenja. Pri odabiru legirajućih elemenata za povećanje prokaljivosti potrebno je uzeti u obzir, pored jačine utjecaja na prokaljivost, i njihov utjecaj na mikrostrukturu. Krom je snažan element za povećanje prokaljivosti, ali postoji velika opasnost od stvaranja karbida u lijevanom stanju. Pored kroma, snažan utjecaj na prokaljivost ima molibden, vanadij i mangan. Međutim, ovi elementi također promoviraju stvaranje karbida. Prokaljivost se može poboljšati i dodatkom nikla, s tim da se zahtijeva viši dodatak u odnosu na prethodno navedene elemente. Prednost nikla je u tome što on ne stvara karbide. Većina legirajućih elemenata pomiče linije pretvorbi u TTT dijagramu u desno (odgađaju početak pretvorbe austenita) i na taj način povećavaju prokaljivost (slika 2.48). Pri odabiru legirajućih elemenata za poboljšanje prokaljivosti potrebno je uzeti u obzir njihov utjecaj na TTT dijagram, tendenciju ka stvaranju karbida te sklonost ka segregacijama, koje rezultiraju visokim lokalnim koncentracijama i stvaranjem interčelijastih karbida.

### 2.12.1 Uklanjanje zaostalih napreznja

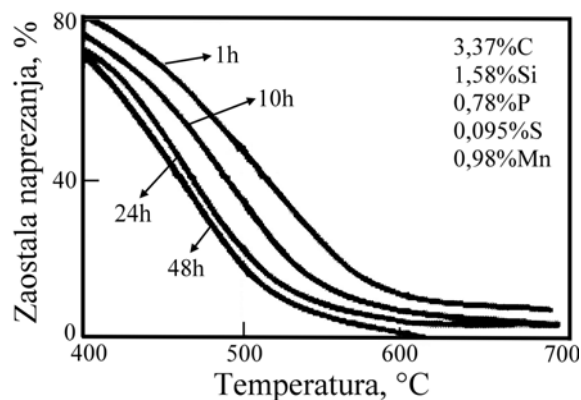
Rezidualna (zaostala) napreznja nastaju tijekom skrućivanja i hlađenja odljevaka i uzrokovana su različitim brzinama hlađenja između različitih debljina stjenki. Rezidualna napreznja mogu uzrokovati smanjenje čvrstoće, deformaciju, spontano pucanje odljevaka te promjenu dimenzija i dimenzijsku nestabilnost tijekom obrade ili primjene odljevka.

Rezidualna napreznja mogu se izbjeći ili minimalizirati na slijedeći način:

- modificiranjem dizajna odljevka,
- lokalnim uklanjanjem pijeska u područjima debelih stjenki odljevka, da bi se postiglo jednolično hlađenje,
- ranijim istresanjem odljevaka s značajnim razlikama u debljinama stjenki i smještanjem u peć da bi se ostvarilo sporo hlađenje,
- izbjegavanjem pojave odbjela u rubovima,
- pravilnim cijepljenjem i kemijskim sastavom.

Za razliku od nodularnog lijeva, kod odljevka od sivog lijeva često se može zahtijevati uklanjanje unutarnjih zaostalih napreznja. Na dijagramu napreznje – istežanje sivog lijeva ne postoji područje elastičnosti, što znači da se odljevci od sivog lijeva plastično deformiraju tijekom dugog vremena pod napreznjima u odljevku.

Temperature na kojima se provodi uklanjanje rezidualnih napreznja nalaze se ispod temperature pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit. Previsoke temperature i preduga zadržavanja na visokim temperaturama mogu dovesti do smanjenja vlačne čvrstoće i tvrdoće (raspad cementita u perlitu). Kod nelegiranih sivih ljevova uklanjanje zaostalih napreznja potrebno je provesti na temperaturama od 540 – 565 °C. Sa slike 2.49 može se vidjeti da se ~ 70 % zaostalih napreznja može ukloniti zadržavanjem odljevka na prethodno navedenim temperaturama tijekom 1 h. Ako se želi ostvariti potpuno uklanjanje zaostalih napreznja (> 85 %) u odljencima od nelegiranih sivih ljevova, temperatura mora iznositi minimalno 595 °C. Ovako visoke temperature uklanjanja zaostalih napreznja mogu negativno utjecati na čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje.



Slika 2.49. Utjecaj temperature i vremena zadržavanja na uklanjanje zaostalih naprezanja u odljevcima od nelegiranog sivog lijeva

Kod niskolegiranih sivih ljevova obično se zahtijevaju više temperature za uklanjanje zaostalih naprezanja, tj. 595 – 650 °C, ovisno o sadržaju legirajućih elemenata. Vrijeme zadržavanja na temperaturi pri kojoj se provodi uklanjanje zaostalih naprezanja iznosi najčešće 2 – 8 h.

Kod smještanja odljevaka u peć, temperatura u peći ne može biti veća od 95°C. Smještanjem kompleksnih odljevaka ili odljevaka s visokim unutarnjim naprezanjima u vruću peć može rezultirati različitim toplinskim naprezanjima koja mogu uzrokovati deformaciju tijekom daljnje toplinske obrade. Odljevci u peći moraju biti tako smješteni da se međusobno ne dodiruju. Nakon smještanja odljevaka u peć, brzina zagrijavanja odljevaka može biti prilično visoka. Npr. uobičajena praksa je zagrijati odljevke na 620 °C za 3 sata. Odljevci se moraju sporo hladiti (< 40 °C/h) s temperature na kojoj se provodi uklanjanje zaostalih naprezanja do sobne temperature da bi se izbjeglo ponovno stvaranje zaostalih naprezanja. Vrijeme hlađenja odljevka u kalupu prije istresanja također utječe na iznos zaostalih naprezanja.

## 2.12.2 Žarenje

Žarenje se sastoji od zagrijavanja na dovoljno visoku temperaturu da bi se smanjila tvrdoća i/ili minimalizirali, odnosno uklonili karbidi i time povećala strojna obradivost. To znači da se ovom toplinskom obradom smanjuju se mehanička svojstva sivog lijeva. Smanjenje mehaničkih svojstava ovisi o temperaturi žarenja, vremenu zadržavanja i kemijskom sastavu sivog lijeva.

U praksi obično se primjenjuju tri postupka žarenja sivog lijeva: feritizirajuće žarenje, srednje (ili potpuno) žarenje i grafitizirajuće žarenje. Međusobno se razlikuju po temperaturnom području u kojem se provode.

### 2.12.2.1 Feritizirajuće žarenje

Kada je kod nelegiranih ili nisko legiranih sivih ljevova jedini cilj toplinske obrade ostvariti pretvorbu perlita u ferit i grafit da bi se poboljšala strojna obradivost, u većini slučajeva nije potrebno odljevak zagrijati na temperaturu iznad eutektoidne temperature.

Kod većine sivih ljevova feritizirajuće žarenje odvija se u temperaturnom području od 700 – 760 °C. Točna (potrebna) vrijednost temperature u tom području ovisi o kemijskom sastavu sivog lijeva. Kod svih postupaka žarenja, brzina zagrijavanja do temperature žarenja treba iznositi od 50 – 100 °C/h.

Odljevci se moraju zadržati na temperaturi žarenja dovoljno dugo da bi se mogao završiti proces grafitizacije. Pri temperaturama < 700° C potrebna su vrlo duga vremena zadržavanja. Pri temperaturama od 700 – 760 °C vrijeme zadržavanja varira ovisno o kemijskom sastavu i debljini stjenke odljevka. Najčešće vrijeme zadržavanja na temperaturi žarenja iznosi 1 h za svakih 25,4 mm poprečnog presjeka (debljine stjenke) odljevka. Duža vremena mogu biti nužna ako su prisutni legirajući elementi. Ako se naknadno hlađenje odvija jako sporo, moguće je dodatno skratiti vrijeme zadržavanja na temperaturi žarenja.

Brzina hlađenja nakon dovoljno dugog zadržavanja na prethodno navedenim temperaturama treba iznositi 40 – 50 °C/h, odnosno ne smije biti visoka da bi se izbjegla zaostala naprezanja u odljevku.

### **2.12.2.2 Srednje (potpuno) žarenje**

Srednje ili potpuno žarenje primjenjuje se u slučajevima kada se feritizirajućim žarenjem ne može ostvariti feritna metalna osnova, zbog visokog sadržaja legirajućih elemenata ili prisutnog odbjela. Kod ovog tipa žarenja odljevak se zagrijava na temperaturu od 790 – 900 °C, što je iznad temperature eutektoidne pretvorbe. Vrijeme zadržavanja na navedenim temperaturama obično iznosi 1 h za svakih 25,4 mm poprečnog presjeka (debljine stjenke) odljevka. Duža vremena zadržavanja ili više temperature mogu biti potrebne ako sivi lijev sadrži legirajuće elemente, kao što je krom, mangan, bakar, nikel ili kositar. Nakon dovoljno dugog zadržavanja na temperaturi žarenja, odljevak se sporo hladi (10 – 20 °C/h) kroz područje eutektoidne pretvorbe (posebno kroz područje od 790 – 675 °C) da bi se promoviralo stvaranje ferita. Nakon 675 °C odljevak se može hladiti na zraku.

### **2.12.2.3 Grafitizirajuće žarenje**

Grafitizirajuće žarenje primjenjuje se samo ako se zahtijeva uklanjanje velikih (masivnih) karbida i odbjela. Postupak se može odvijati u smjeru da se samo ostvari raspad masivnih karbida na perlit i grafit, ali se može i dodatno u okviru ovog procesa provesti feritizirajuće žarenje da se osigura što povoljnija strojna obradivost.

Da bi se raspad masivnih karbida odvijao prihvatljivom brzinom, potrebna je temperatura od najmanje 870 °C. Sa svakim dodatnim povećanjem temperature za 55 °C, udvostručava se brzina raspada karbida. Sukladno tome, grafitizirajuće žarenje obično se provodi pri temperaturama austenitizacije od 900 – 925 °C. Kod temperatura koje su  $\geq 925$  °C postoji opasnost od taljenja fosfidnog eutektika kod sivih ljevova koji sadrže  $\geq 0,1$  % fosfora.

Vrijeme zadržavanja na temperaturi žarenja može iznositi od nekoliko minuta do nekoliko sati. Kod sivih ljevova s visokim sadržajem silicija i ugljika dovoljno je ~ 15 min. pri 940 °C da bi se uklonio odbjel. Vrijeme zadržavanja na temperaturi žarenja, osim u slučaju kontrolirane atmosfere u peći, trebalo bi biti što je moguće kraće, jer kod ovako visokih temperatura postoji značajna opasnost od stvaranja ogorine.

Nakon raspada karbida, brzina hlađenja s temperature žarenja ovisi o željenoj mikrostrukturi. Ako je primarni cilj grafitizirajućeg žarenja uklanjanje karbida i zadržavanje

visoke čvrstoće i otpornosti na trošenje, odljevak bi trebalo hladiti na zraku s temperature žarenja do  $\sim 540$  °C čime se promovira stvaranje perlita. Ukoliko je cilj postići što bolju strojnu obradivost, odljevak je potrebno hladiti u peći do  $\sim 540$  °C, s tim da se osigura vrlo sporo hlađenje kroz područje eutektoidne pretvorbe. U oba slučaja, brzina hlađenja od  $540$  °C do  $300$  °C trebala bi biti  $< 110$  °C/h da bi se minimalizirala rezidualna naprezanja. Karbide u sivom lijevu koji ima visok sadržaj elemenata koji stabiliziraju karbide (npr. kroma i mangana) vrlo je teško razložiti čak i pri temperaturama od  $930$  °C.

### 2.12.3 Normalizacija

Normalizacija sivog lijeva sastoji se od zagrijavanja odljevka na temperaturu austenitizacije od  $885 - 925$  °C (dakle iznad eutektoidne temperature), zadržavanja na tim temperaturama u trajanju od  $1$  h za svakih  $25,4$  mm najdeblje stjenke odljevka i naknadnog hlađenja na mirnom zraku do sobne temperature. Ova toplinska obrada može se upotrijebiti za povećanje mehaničkih svojstava (tvrdoće i vlačne čvrstoće) ili za obnavljanje, odnosno vraćanje prvobitnih svojstava u lijevanom stanju koja su izmijenjena drugim procesima zagrijavanja, kao što je predgrijavanje i naknadno zagrijavanje povezano s popravcima zavarivanjem.

Pri provođenju normalizacije bitno je osigurati dovoljnu brzinu hlađenja da se spriječi stvaranje ferita i ostvari potpuno perlitna metalna osnova. Brzina hlađenja ovisi o veličini poprečnog presjeka odljevka te sadržaju legirajućih elemenata. Ako se potrebna brzina hlađenja ne može osigurati hlađenjem na mirnom zraku, primjenjuje se hlađenje ventilatorima, odnosno komprimiranim zrakom. Ukoliko se i ovakvim hlađenjem ne može postići željena perlitna mikrostruktura, potrebno je provesti legiranje elementima koji stabiliziraju perlit, kao što je bakar, kositar, nikal ili antimon. Budući da su nakon normalizacije uglavnom prisutna zaostala naprezanja u odljevku, potrebno je provesti toplinsku obradu za uklanjanje zaostalih naprezanja.

Vlačna čvrstoća i tvrdoća normaliziranog sivog lijeva ovisi o: sadržaju vezanog ugljika, razmaku između lamela cementita u perlitu i morfologiji grafita. Morfologija grafita ne mijenja se tijekom normalizacije, zbog čega nije potrebno razmatrati njen utjecaj na tvrdoću i vlačnu čvrstoću.

Sadržaj vezanog ugljika određen je temperaturom normalizacije (austenitizacije) i kemijskim sastavom odljevka. Više temperature normalizacije povećavaju topljivost ugljika u austenitu, što u konačnicu rezultira višim čvrstoćom i tvrdoćom. Sadržaj legirajućih elemenata također utječe na topljivost ugljika u austenitu. Postoje elementi koji povećavaju topljivost ugljika u austenitu (mangan, krom) i elementi koje smanjuju topljivost ugljika u austenitu (silicij). Sadržaj ugljika u metalnoj osnovi određen je zajedničkim utjecajima legirajućih elemenata.

Razmak lamela cementita u perlitu određen je brzinom hlađenja odljevka nakon austenitizacije i sadržajem legirajućih elemenata. Brzo hlađenje smanjuje razmak cementitnih lamela, a time se povećava tvrdoća i vlačna čvrstoća. Usitnjavanje perlita, odnosno smanjenje razmaka između lamela može se postići dodatkom legirajućih elemenata. Molibden i vanadij imaju snažan utjecaj na usitnjavanje perlita, mangan i nikal umjeren utjecaj, a bakar i krom slab utjecaj. Kositar i antimon ne utječu na usitnjavanje perlita.

Kombinacija visokih temperatura normalizacije i velikih brzina hlađenja promovira stvaranje martenzita, koji štetno djeluje na strojnu obradivost odljevaka.



## 2.12.4 Kaljenje i popuštanje

Kaljenje i popuštanje odljevaka od sivog lijeva provodi se u cilju poboljšanja njihovih mehaničkih svojstava, posebno čvrstoće i otpornosti na trošenje. Sivi lijev nakon kaljenja i popuštanja pokazuje približno 5 puta veću otpornost na trošenje u odnosu na perlitni sivi lijev.

Kaljenje u solnim kupkama nakon zagrijavanja u pećima može se primijeniti na mnogo širi dijapazon sivih ljevova u odnosu na plameno i indukcijsko kaljenje. Kod plamenog i indukcijskog kaljenja potreban je relativno visok sadržaj vezanog ugljika, jer je na raspolaganju izuzetno kratak vremenski period za otapanje ugljika u austenitu.

Da bi se moglo provesti kaljenje, odljevak je potrebno zagrijati na dovoljno visoku temperaturu da bi se omogućila pretvorba u austenit (austenitizacija), zadržati na toj temperaturi sve dok se željena količina ugljika ne otopi u austenitu i potom gasiti pogodnom brzinom da se dobije martenzit.

Temperatura na koju se odljevak mora zagrijati (temperatura austenitizacije) ovisi o temperaturnom području, odnosno temperaturama pri kojima se odvija eutektoidna pretvorba. Za približno određivanje temperature pri kojoj kod nelegiranih sivih ljevova započinje pretvorba ferita i perlita u austenit tijekom zagrijavanja primjenjuje se slijedeća formula:

$$T_{\text{EODP}} = 730 + 28,0(\%Si) - 25,0(\%Mn) \quad (2.8)$$

Austenitizacija se obično provodi pri temperaturi koja je za ~ 95 °C viša od izračunate temperature pri kojoj započinje pretvorba ferita i perlita u austenit tijekom zagrijavanja (jednadžba 2.8). Viša temperatura austenitizacije rezultira i većom količinom otopljenog ugljika u austenitu (vezani ugljik), što znači i veću tvrdoću nakon kaljenja (tablica 2.10).

Tablica 2.10. Utjecaj temperature austenitizacije na tvrdoću različitih kvaliteta sivih ljevova kaljenih u ulju

Kemijski sastav, %									HB, lijeva no	HB, nakon kaljenja s temp.			
C <sub>uk</sub> <sup>*</sup>	C <sub>v</sub> <sup>*</sup>	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Mo		790° C	815° C	845° C	870° C
3,1 9	0,6 9	1,7 0	0,21 6	0,09 7	0,7 6	0,03	-	0,01 3	217	159	269	444	477
3,1 0	0,7 0	2,0 5	-	-	0,8 0	0,27	0,3 7	0,45	255	207	444	514	601
3,2 0	0,5 8	1,7 6	0,18 7	0,05 4	0,6 4	0,00 5	-	0,48	223	311	477	486	529
3,2 2	0,5 3	2,0 2	0,11 4	0,06 7	0,6 6	0,02	1,2 1	0,52	241	355	469	486	460
3,2 1	0,6 0	2,2 4	0,11 4	0,07 1	0,6 7	0,50	0,0 6	0,52	235	208	487	520	512
3,3 6	0,6 1	1,9 6	0,15 8	0,07 0	0,7 4	0,35	0,5 2	0,47	235	370	477	480	465

\* - ukupni ugljik.

\*\* - vezani ugljik.

Previsoke temperature austenitizacije potrebno je izbjegavati, jer se kaljenjem s visokih temperatura povećava opasnost od deformacije odljevka i stvaranja pukotina te zaostalog austenita, posebno kod legiranih kvaliteta.

U većini slučajeva potrebno je provesti legiranje taljevine da bi se povećala prokaljivost i time izbjeglo stvaranje perlita i ferita tijekom kaljenja. Mangan, nikal, krom i molibden najčešće su primjenjivani elementi za povećanje prokaljivosti sivog lijeva.

Kroz niskotemperaturno područje odljevci se moraju sporo zagrijavati da bi se izbjeglo stvaranje pukotina. Iznad područja od 595 do 650°C, tj. iznad područja u kojem se provodi uklanjanje zaostalih naprezanja, zagrijavanje se može odvijati željenom brzinom.

Nakon austenitizacije provodi se kaljenje. Najčešće upotrebljavana sredstva za kaljenje su solne kupke (rastaljene soli) i ulje. Voda se ne smatra povoljnim sredstvom za kaljenje jer se toplina odvodi tako velikom brzinom da može doći do deformacije odljevaka i stvaranja pukotina. Najblaže sredstvo za kaljenje je zrak. Odljevci od nelegiranih i nisko legiranih sivih ljevova obično se ne mogu kaliti na zraku, jer brzina hlađenja nije dovoljno velika da bi nastao martenzit. Međutim, kod odljevaka od visoko legiranih sivih ljevova kaljenje u struji zraka je često najpogodnija metoda.

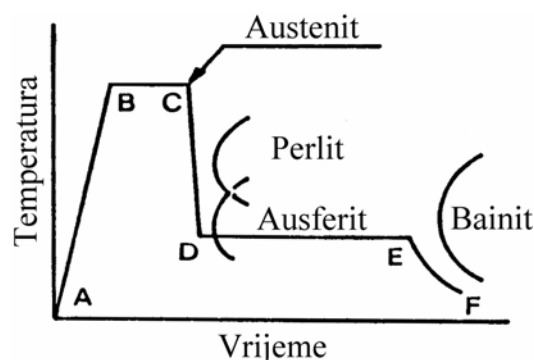
Odljevke je potrebno izvaditi iz sredstva za kaljenje čim njihova temperatura padne na ~ 150 °C i odmah provesti popuštanje, jer su pri sobnoj temperaturi odljevci nakon kaljenja osjetljivi na stvaranje pukotina.

Popuštanje nakon kaljenja provodi se pri temperaturama koje su znatno ispod područja pretvorbe ferita i perlita u austenit. Temperatura popuštanja ovisi o željenim svojstvima. Što je temperatura popuštanja veća, veće je smanjenje tvrdoće. Općenito se može reći da se popuštanjem nelegiranih i legiranih sivih ljevova u temperaturnom području od 370 – 510 °C ostvaruje najveće povećanje čvrstoće.

### 2.12.5 Izotermičko poboljšavanje

Izotermičko poboljšavanje (engl. *Austempering*) je specifični postupak toplinske obrade koji rezultira jedinstvenom strukturom metalne osnove sivog lijeva, bez utjecaja na oblik i veličinu grafita. Metalna osnova sivog lijeva nakon izotermičkog poboljšavanja sastoji se od igličastog ferita (engl. *Acicular ferrite*) i stabiliziranog austenita s visokim sadržajem ugljika (ugljikom stabiliziranog austenita). Ova struktura poznata je pod nazivom ausferit (engl. *Ausferrite*) i ima najznačajniji utjecaj na mehanička svojstva. Sivi lijev s ovakvom strukturom naziva se izotermički poboljšani sivi lijev – AGI (engl. *Austempered Gray Iron*). Primarni cilj izotermičkog poboljšavanja sivog lijeva je povećanje čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje.

Toplinska obrada odvija se u dva koraka (slika 2.50). Najprije se provodi austenitizacija (austenitizacijsko žarenje), a nakon toga slijedi izotermičko poboljšavanje.



Slika 2.50. Shematski prikaz tijeka izotermičkog poboljšavanja sivog lijeva

Austenitizacija (austenitizacijsko žarenje) je prva faza toplinske obrade. Odljevak od sivog lijeva zagrijava se (područje od A do B na slici 2.50) na temperaturu austenitizacije (najčešće 840 – 900 °C) i zadržava na toj temperaturi (područje od B do C na slici 2.50) dovoljno dugo da bi se dobila potpuno austenitna struktura. Temperatura austenitizacije i vrijeme zadržavanja na toj temperaturi utječu na konačnu strukturu i svojstva odljevaka. Višom temperaturom austenitizacije povećava se sadržaj ugljika u austenitu, povećava njegova prokaljivost, ali pretvorbu tijekom izotermičkog poboljšavanja čini znatno problematičnijom (austenit s višim sadržajem ugljika zahtijeva duža vremena za pretvorbu u ausferitnu strukturu) i potencijalno snižava mehanička svojstva nakon toplinske obrade. Ako je temperatura austenitizacije preniska u odnosu na gornju kritičnu temperaturu (temperatura završetka pretvorbe ferita i perlita u austenit pri zagrijavanju), ne može se postići potpuna austenitizacija bez obzira na dužinu perioda austenitizacije.

Otapanje ugljika iz grafitne faze u okolnu austenitnu matricu je relativno spor proces. Zbog toga vrijeme austenitizacije treba biti minimalno potrebno da se cijeli odljevak zagrije na temperaturu austenitizacije, cijela metalna osnova transformira u austenit i taj austenit zasiti ravnotežnim sadržajem ugljika (tipično ~ 1,1 do 1,3 %C). Vrijeme austenitizacije obično iznosi 1 – 2 h. Za vrijeme austenitizacije mora se izbjeći oksidacija površine odljevka, zbog čega se austenitizacija provodi u pećima s zaštitnom atmosferom

Izotermičko poboljšavanje (engl. *Austempering*) predstavlja drugu fazu toplinske obrade. Nakon austenitizacije odljevak se brzo prenosi u solnu kupku (rastaljene soli koje sadrže smjese natrijevih i kalijevih nitrata i nitrita), ulje ili kupku od rastaljenog olova određene temperature gdje se naglo hladi (gašenje) (područje od C do D na slici 2.50) da bi se izbjeglo stvaranje perlita, do temperature izotermičkog poboljšavanja koja leži u intervalu od 230 – 425 °C i zadržava na toj temperaturi (područje od D do E na slici 2.50) dovoljno dugo, ovisno o kvaliteti koja se proizvodi.

Tijekom izotermičkog poboljšavanja razlaže se austenit koji je zasićen ugljikom i nastaje struktura koja je smjesa igličastog ferita i stabiliziranog austenita s visokim sadržajem ugljika (~ 2,0 %), poznata pod nazivom ausferit. Ukoliko je toplinska obrada pravilno provedena, u strukturi se ne smiju pojaviti karbidi niti bainit (smjesa igličastog ferita i karbida). Općenito, austenit se smatra stabilnim kad je koncentracija ugljika u austenitu > 1,8 %C.

Temperatura izotermičkog poboljšanja je jedan od glavnih faktora koji određuje mehanička svojstva odljevaka od izotermički poboljšanog sivog lijeva. Ova temperatura mora biti iznad temperature početka martenzitne pretvorbe ( $M_s$ ). Proizvodnja izotermički poboljšanog sivog lijeva visoke tvrdoće, čvrstoće i otpornosti na trošenje, zahtijeva da se međustupanjsko poboljšavanje provede na temperaturama od 230 – 290 °C. Snižanjem temperature izotermičkog poboljšavanja postiže se finija struktura i smanjuje udio ugljikom stabiliziranog austenita u odnosu na kvalitete koje su izotermički poboljšavanje kod povišenih temperatura. To rezultira višom čvrstoćom, tvrdoćom i otpornosti na trošenje.

Zadržavanje na temperaturi izotermičke pretvorbe ne smije biti predugo. Izotermičku pretvorbu moguće je opisati kao reakciju u dva stupnja kod koje se najprije austenit razlaže na igličasti ferit i ugljikom obogaćeni austenit (prvi stupanj izotermičke pretvorbe), a potom se odvija razlaganje ugljikom obogaćenog austenita u stabilnije produkte: ferit i karbid (drugi stupanj izotermičke pretvorbe), a njegov udio postepeno opada na nulu. Predugo zadržavanje na temperaturi izotermičke pretvorbe rezultira odvijanjem drugog stupnja (reakcije) tijekom izotermičkog poboljšava, što je nepoželjno jer uzrokuje krhkost. Vrijeme držanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja ne smije biti niti prekratko, jer pri kratkim vremenima izotermičkog poboljšavanja ne postoji dovoljna difuzija ugljika ka austenitu da bi ga stabilizirala i tijekom hlađenja do sobne temperature može nastati martenzit. Što je

temperatura izotermičkog poboljšavanja niža, potrebno je duže vrijeme da bi se ostvarila optimalna svojstva.

Nakon završetka druge faze toplinske obrade odljevak se vadi iz solne kupke i hladi na zraku do sobne temperature (područje od E do F na slici 2.50).

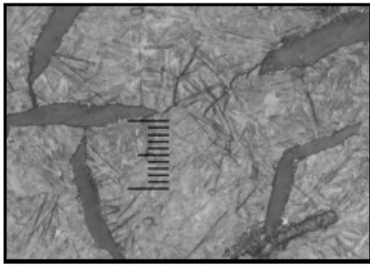
Kod većine odljevaka, osim kod relativno tankostjenih odljevaka (debljina stijenke < 10 mm), zahtijeva se legiranje da bi se poboljšala prokaljivost i izbjeglo stvaranje perlita prilikom brzog hlađenja s temperature austenitizacije na temperaturu izotermičkog poboljšavanja. Stvaranje perlita potrebno je izbjeći zbog nepovoljnog utjecaja na mehanička svojstva. Zbog ekonomskih razloga, ali i zbog izbjegavanja metalurških problema, često se primjenjuje kombinacija legirajućih elemenata da bi se ostvarila željena prokaljivost. Prokaljivost sivog lijeva najčešće se poboljšava dodatkom malih količina nikla, bakra i molibdena (opasnost od karbida).

Pored veće čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje, izotermički poboljšani sivi lijev pruža kombinaciju visoke čvrstoće i sposobnosti prigušenja vibracija, što se teško moglo ostvariti kod uobičajenih kvaliteta sivog lijeva. Kod iste vrijednosti tvrdoće, izotermički poboljšani sivi lijev pokazuje višu otpornost prema trošenju od kaljenog i popuštenog sivog lijeva. Zbog prisutnosti grafitnih listića u mikrostrukturi, kod sivog lijeva ne postoji potencijalna mogućnost da se izotermičkim poboljšavanjem povisi duktilnost, kao što je to slučaj kod izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (ADI).

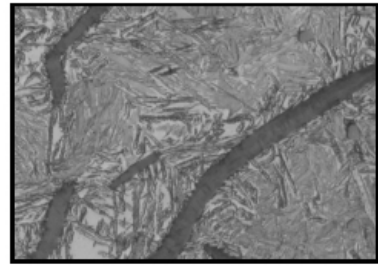
Zbog povećane čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje, izotermički poboljšani sivi lijev posebno je pogodan za izradu cilindara dizelskih motora. Cilindri moraju biti otporni na toplinski umor, imati odličnu dimenzijsku stabilnost i toplinsku vodljivost te otpornost na trošenje, kao i korozivne tekućine i plinove. Sivi lijev koji se upotrebljava za izradu cilindara dizelskim motorima obično sadrži ~ 3,3 % ugljika, 2,2 % silicija, min. 0,46 % mangana, maks. 0,10 % nikla, 0,57 % bakra, maks. 0,22 % kroma te 0,20 % molibdena.

U nastavku je prikazano kako se mijenja struktura i svojstva izotermički poboljšanog sivog lijeva za cilindre dizelskih motora s promjenom temperature austenitizacije te temperature i vremena izotermičkog poboljšavanja (slika 2.51). Može se vidjeti da se izotermička pretvorba odvija brže u slučaju austenitizacije pri nižoj temperaturi. Pored toga, nastali igličasti ferit ima sitniju morfologiju u slučaju austenitizacije pri temperaturi 871 °C u odnosu na austenitizaciju pri 927 °C. To znači da kod istih uvjeta pri izotermičkom poboljšavanju, viša temperatura austenitizacije u konačnici rezultira nešto nižom tvrdoćom u odnosu na austenitizaciju pri nižim temperaturama. Nastala struktura je znatno finija ako se izotermičko poboljšavanje odvijalo pri nižim temperaturama, što znači i višu čvrstoću, tvrdoću i otpornost na trošenje.

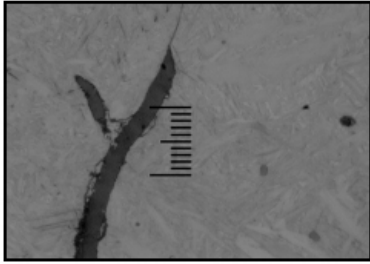
$t_{IP} = 8 \text{ min.}$



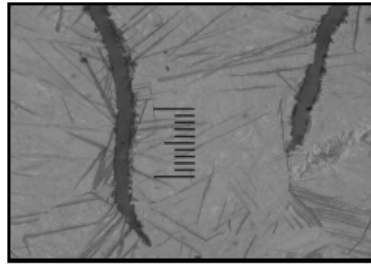
$T_A = 871^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 260^\circ\text{C}$



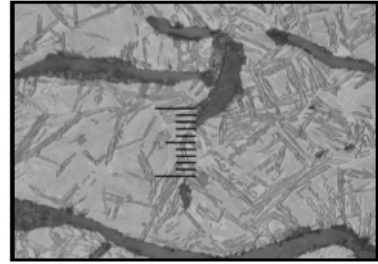
$T_A = 871^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 375^\circ\text{C}$



$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 260^\circ\text{C}$

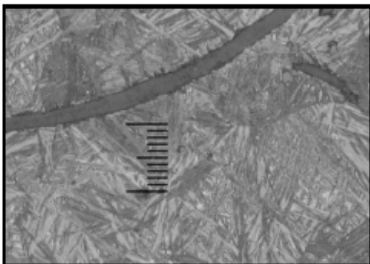


$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 316^\circ\text{C}$

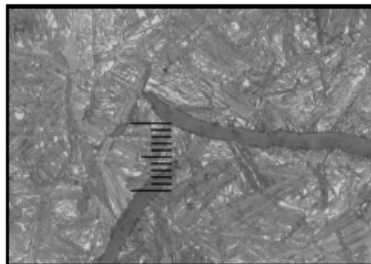


$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 375^\circ\text{C}$

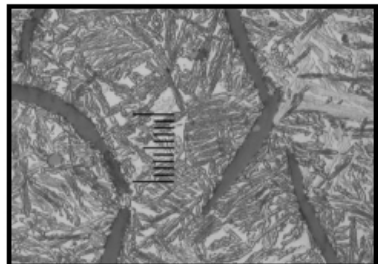
$t_{IP} = 128 \text{ min.}$



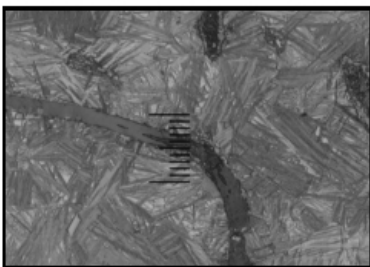
$T_A = 871^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 260^\circ\text{C}$



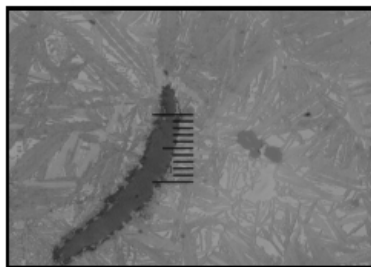
$T_A = 871^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 316^\circ\text{C}$



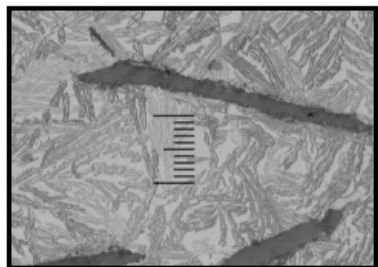
$T_A = 871^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 375^\circ\text{C}$



$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 260^\circ\text{C}$



$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 316^\circ\text{C}$



$T_A = 927^\circ\text{C}$      $T_{IP} = 375^\circ\text{C}$

Slika 2.51. Utjecaj temperature austenitizacije ( $T_A$ ), temperature izotermičkog poboljšavanja ( $T_{IP}$ ) i vremena zadržavanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja ( $t_{IP}$ ) na mikrostrukturu cilindra od izotermički poboljšanog sivog lijeva (kemijski sastav: ~ 3,3 % ugljika, 2,2 % silicija, min. 0,46 % mangana, maks. 0,10 % nikla, 0,57 % bakra, maks. 0,22 % kroma te 0,20 % molibdena). Vrijeme austenitizacije iznosi 2h

### 2.12.6 Martenzitno gašenje

Martenzitno gašenje (engl. *Martempering*) primjenjuje se da bi se dobila martenzitna metalna osnova bez nastanka visokih naprezanja koja obično prate njegovo formiranje, te smanjila osjetljivost na nastajanje pukotina. Ovaj postupak toplinske obrade sličan je konvencionalnom kaljenju, s razlikom da je deformacija odljevka minimalizirana. Odljevak se gasi u solnoj kupki ili ulju s temperature koja leži u austenitnom području, zadržava u tom mediju pri temperaturi neznatno višoj od područja u kojem počinje stvaranje martenzita (200 – 260 °C kod nelegiranih sivih ljevova) toliko vremena koliko je potrebno da se izjednači temperatura odljevka i kupke (obično nekoliko minuta) i potom hladi do sobne temperature. Zbog karakteristične krhkosti martenzita prisutne nakon martenzitnog gašenja, odljevci se gotovo uvijek moraju popuštati.

Tvrdoća sivog lijeva nakon izotermičkog poboljšavanja obično je manja od tvrdoće dobivene martenzitnim gašenjem. Razlike su vrlo male, ako se nakon martenzitnog gašenja provede popuštanje. Oba procesa karakterizira manja deformacija i rast odljevaka u odnosu na konvencionalno gašenje u ulju i naknadno popuštanje.

Martenzitno gašenje često se primjenjuje za otvrdnjavanje, odnosno povećanje otpornosti na trošenje tankostjenih cilindara za dizel motore

### 2.12.7 Površinsko otvrdnjavanje

Površinskim otvrdnjavanjem nastoji se postići tvrd i otporan na trošenje vanjski martenzitni sloj uz zadržavanje meke jezgre kod koje tijekom toplinske obrade nije dostignuta temperatura pretvorbe ferita i perlita u austenit. Za površinsko otvrdnjavanje pogodni su perlitni sivi ljevovi, jer se austenitizacijom dobiva austenit s višim sadržajem ugljika.

U praksi se površinsko otvrdnjavanje najčešće provodi plamenim i indukcijskim kaljenjem. Kod oba postupka površinski sloj odljevka ili djela odljevka zagrijava se na temperaturu austenitizacija, nakon čega slijedi gašenje.

#### 2.12.7.1 Plameno kaljenje

Plameno kaljenje je metoda toplinske obrade kojom se otvrdnjava površinski sloj odljevaka od sivog lijeva. Može se uspješno primijeniti kod nelegiranih i legiranih sivih ljevova. Sadržaj vezanog ugljika trebao bi biti u području od 0,50 – 0,70 %. Povišeni sadržaj vezanog ugljika potreban je zbog kratkog vremena koje stoji na raspolaganju za otapanje ugljika u austenitu. Plameno kaljenje ne preporučuje se kod sivih ljevova kod kojih je sadržaj vezanog ugljika iznad navedenih granica zbog povećane opasnosti od stvaranja pukotina.

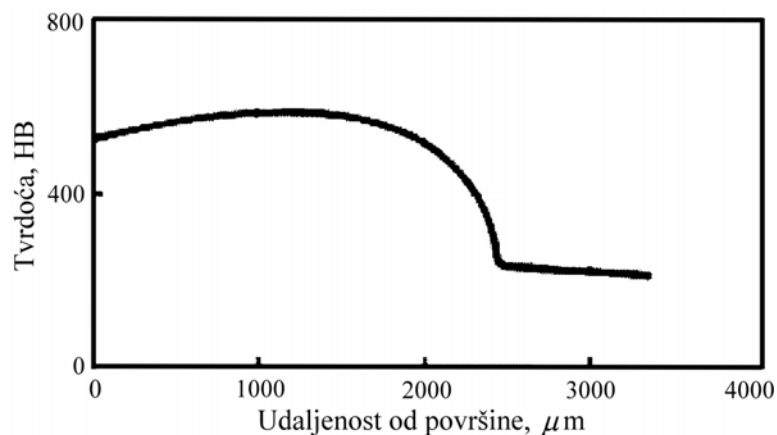
Sadržaj silicija trebao bi biti relativno nizak (~ 2,0 %) jer silicij smanjuje topljivost ugljika u austenitu. Zbog toga su potrebne više temperature austenitizacije, što znači i oštrije gašenje i veću opasnost od stvaranja pukotina. Općenito gledano, legirani sivi ljevovi mogu se lakše plameno kaliti od nelegiranih sivih ljevova, jer legirane kvalitete imaju povećanu prokaljivost.

Najčešće upotrebljavani medij za gašenje je voda. Ako se gašenje provodi vodom, najbolji rezultati postižu kod temperature vode od ~ 30 °C. Nastajanje pukotina može se spriječiti nižim brzinama gašenja, koje se mogu dobiti gašenjem u vodenim emulzijama koje sadrže 5 – 15 % ulja ili komprimiranim zrakom. Gašenje na zraku je posebno pogodno za

visokolegirane sive ljevove zbog njihove osjetljivosti na pukotine. Kod plamenog kaljenja samo pojedinih dijelova odljevka, gašenje se može provesti uranjanjem u vruće ulje.

Kad god je praktički i ekonomski moguće, potrebno je nakon plamenog kaljenja provesti žarenja za uklanjanje zaostalih naprezanja pri temperaturi od 150 – 200 °C. Na ovaj način minimalizira se deformacija i stvaranje pukotina te povećava žilavost otvrdnutog površinskog sloja uz vrlo malo smanjenje tvrdoće.

Dubina i mikrostruktura otvrdnutog sloja plamenim kaljenjem ovisi o temperaturi površine, sadržaju ugljika i legirajućih elemenata u otopini kada se plamenom zagrijava površina gasi te efikasnosti gašenja. Površina odljevka nakon plamenog kaljenja obično ima nešto nižu tvrdoću od sloja neposredno ispod površine (slika 2.52). Razlog za to je zadržavanje relativno mekog austenita na površini.



Slika 2.52. Promjena tvrdoće s udaljenošću od površine kod odljevka od sivog lijeva nakon plamenog kaljenja

Ako je smanjenje tvrdoće povezano s prisutnošću austenita u mikrostrukturi, odljevak se može ohladiti na temperaturu od – 40 °C i držati na toj temperaturi 1 h, što će rezultirati pretvorbom austenita i povećanjem tvrdoće.

### 2.12.7.2 Indukcijsko kaljenje

Površinsko otvrdnjavanje odljevaka od sivog lijeva može se provesti i indukcijskim kaljenjem. Zbog visokih troškova opreme, metoda je uglavnom opravdana u slučaju velikog broja odljevaka.

Postupak se provodi tako da se odljevak, odnosno jedan dio odljevka (ako se provodi lokalno indukcijsko kaljenje) kratko zagrije pomoću indukcijskog svitka na temperaturu koja leži u austenitnom području i potom provede gašenje. Temperatura austenitizacije za indukcijsko kaljenje sivog lijeva iznosi 870 – 925 °C. Gašenje se provodi vodom ili u slučaju osjetljivih dijelova odljevka (npr. tanke stjenke) uljem da bi se spriječila prekomjerna deformacija ili stvaranje pukotina.

Minimalni sadržaj vezanog ugljika kod željeznih ljevova koji se indukcijski kale ne bude niži od 0,40 – 0,50 %.

Tvrdoća površine odljevka od sivog lijeva postignuta indukcijskim kaljenjem ovisi o ekvivalentu ugljika. Što je veći sadržaj grafita u mikrostrukturi, odnosno što je viši ekvivalent ugljika, niža će biti tvrdoća nakon indukcijskog kaljenja.

Deformacija odljevka pri indukcijskom kaljenju je manja nego u slučaju gašenja nakon zagrijavanja odljevka u peći.

## 2.13 Legirani sivi ljevovi

Familija legiranih sivih ljevova obuhvaća feritne (visok sadržaj silicija ili visok sadržaj aluminija) i austenitne (visok sadržaj nikla) sive ljevove. Ovi materijali posjeduju karakteristična svojstva i razvijeni su za specifična područja primjene, za koja nije moguće primijeniti uobičajene kvalitete sivih ljevova. Za razliku od uobičajenih kvaliteta, legirani sivi ljevovi sadrže viši udio legirajućih elemenata da bi se postigla poboljšana svojstva, prije svega otpornost na koroziju te otpornost na djelovanje visokih temperatura.

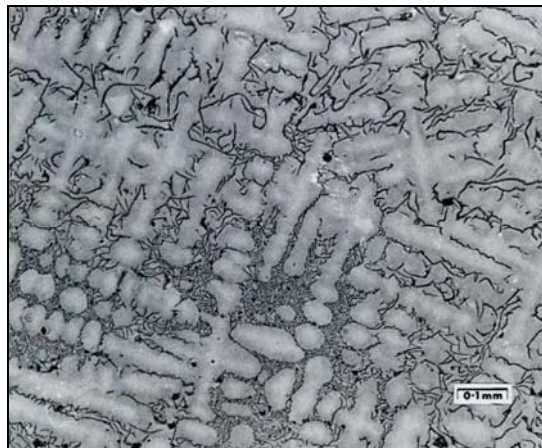
### 2.13.1 Sivi ljevovi legirani silicijem

Sivi ljevovi legirani silicijem mogu se svrstati u dvije grupe. Legiranjem sivog lijeva silicijem u količinama od 4,0 – 6,0 % značajno se povećava njegova otpornost na djelovanje povišenih temperatura. Legiranjem sivog lijeva silicijem u količinama od 14,0 – 16,0 % značajno se povećava otpornost na koroziju.

#### 2.13.1.1 Sivi lijev legiran silicijem namijenjen za rad na povišenim temperaturama

Legirani sivi lijev pogodan za mnoge primjene na povišenim temperaturama obično sadrži do 2,3 % ugljika, 4,0 – 6,0 % silicija, 0,5 – 0,8 % mangana, < 0,1 % sumpora, < 0,2 % fosfora te 0,2 % titana i naziva se Silal. Oksidacijska otpornost, a ujedno i mehanička svojstva, mogu se dodatno poboljšati dodatkom do 2,0 % kroma.

Mikrostruktura ovog materijala sastoji se od feritne metalne osnove i sitnih D tipa grafitnih listića. (slika 2.53). Ovaj materijal relativno se dobro strojno obrađuje, vrlo je krhak i ima nisku čvrstoću, zbog čega se rukovanju mora posvetiti posebna pažnja.

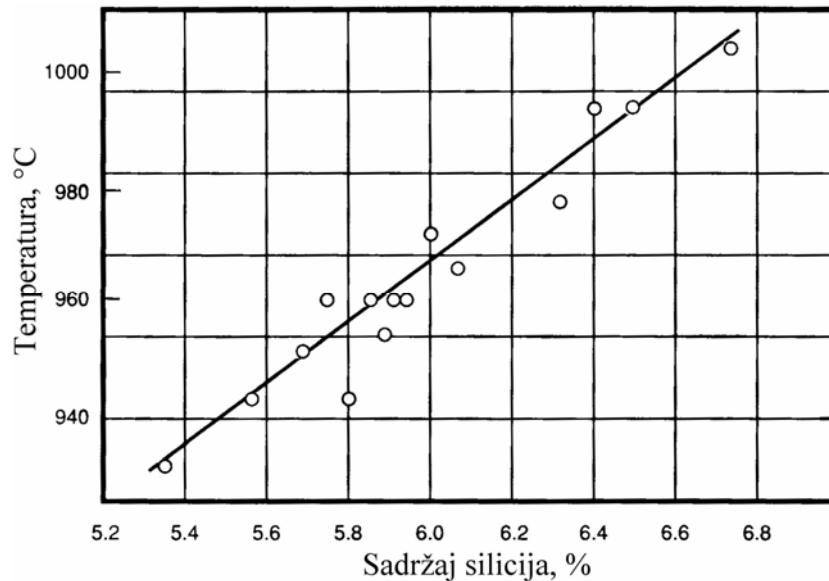


Slika 2.53. Metalografska snimka mikrostrukture sivog lijeva legiranog silicijem (Silal). Kemijski sastav: 2,15 % ugljika, 5,0 % silicija, 0,35 % mangana, 0,03 % sumpora, 0,02 % fosfora. Struktura se sastoji od dendrita ferita i interdendritnih grafitnih listića.



Silal je otporan na oksidaciju, rast i toplinski umor pri temperaturama do najmanje 800°C (moguća je primjena i do 900°C), što je prvenstveno rezultat povišenog sadržaja silicija.

Silicij poboljšava svojstva sivog lijeva na povišenim temperaturama putem stabilizacije feritne metalne osnove i stvaranja gustog silicijem obogaćenog površinskog sloja koji se sastoji od željeznih silikata, a ne željeznih oksida. Ovaj sloj čvrsto je vezan za površinu odljevka i sprječava daljnju oksidaciju. Silicij podiže temperaturu pri kojoj se ferit transformira u austenit (slika 2.54). Zbog toga u području primjene ne dolazi do faznih transformacija i sa njima povezanih volumnih promjena. Ova temperatura ujedno predstavlja i maksimalnu radnu temperaturu komponente.



Slika 2.54. Utjecaj sadržaja silicija na temperaturu pretvorbe ferita u austenit

Iznad ove temperature volumne promjene povezane s pretvorbom ferita u austenit mogu uzrokovati deformaciju odljevka i pucanje površinskog oksidnog sloja smanjujući time otpornost na oksidaciju. Snažna tendencija silicija ka feritizaciji stabilizira metalnu osnovu i značajno smanjuje mogućnost nastajanja karbida i perlita, odnosno smanjuje rast povezan s razlaganjem perlita pri visokim temperaturama (grafitizacija cementitne faze).

Čvrstoća kojom je zaštitni sloj vezan na površinu odljevka umanjuje se ukoliko dođe do faznih pretvorbi ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ). Stoga radna temperatura komponente mora biti ispod temperature fazne pretvorbe koja ovisi o sadržaju silicija.

Povećanje otpornosti na toplinski umor s porastom sadržaja silicija može se objasniti na slijedeći način. Silicij podiže temperaturu pretvorbe ferita u austenit, odnosno proširuje feritno područje. Manje faznih pretvorbi znači i manje toplinskih naprezanja tijekom toplinskih ciklusa grijanje/hlađenje, a time i višu otpornost na toplinski umor.

Efikasnost površinskog sloja koji sprječava oksidaciju raste s porastom sadržaja silicija, a time se postiže i bolja otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju. Previsok sadržaj silicija značajno smanjuje mehanička svojstva odljevaka, tako da je potrebno pronaći svojevrsni kompromis. Ustanovljeno je da se najbolja kombinacija svojstava postiže ako je sadržaj silicija u granicama od 4,0 – 6,0 %.

Otpornost na oksidaciju u velikoj mjeri ovisi o strukturi grafita. Oksidacija i rast najbrže se odvija u sivom lijevu zbog kontinuirane prirode grafitnih listića i brze difuzije kisika, a najsporije u nodularnom lijevu. Listići grafita omogućuju ulazak oksidirajućih plinova u unutrašnjost odljevka. Zbog toga bi grafit trebao biti što je moguće finiji, odnosno

sitniji (poželjan D tip grafitnih listića). Dodatkom malih količina titana promovira se stvaranje sitnog D tipa grafitnih listića. Ekvivalent ugljika potrebno je tako prilagoditi da se izbjegnu nadeutektički sastavi jer u protivnom nastaje primarni grafit koji smanjuje otpornost sivog lijeva na stvaranje ogorine. Pored toga, nastali sloj koji štiti od oksidacije čvršće je povezan s površinom odljevka u slučaju sitnijeg grafita.

### 2.13.1.2 Sivi ljevovi legirani silicijem otporni na koroziju

Sivi ljevovi visokolegirani silicijem ili silicijski ljevovi najčešće sadrže 14,0 -16,0 % silicija (kod pojedinih aplikacija i do 18,0 %) i čine jedinstvenu grupu feritnih sivih ljevova otpornih na koroziju. Ovi ljevovi imaju različite trgovačke nazive, npr. Durion u SAD-u; Ironak u Engleskoj; Termsil, Eksilid, Azidur u Njemačkoj; Fero-silid, Sileks u Rusiji itd. Svi imaju približno isti kemijski sastav.

Visoka korozijska postojanost potiče od gustog zaštitnog oksidnog sloja na površini odljevaka koji je rezultat visokih sadržaja silicija. Zbog toga ovi ljevovi posjeduju vrlo dobru otpornost na različite kiseline i lužine. Vlačna čvrstoća ovih ljevova je vrlo niska, ali je tvrdoća vrlo visoka, što ga čini tvrdim, krtim i izrazito nepogodnim za strojnu obradu. Pored toga, ovaj materijal ima vrlo nisku toplinsku vodljivost i povećanu sklonost ka stezanju.

Silicijski ljevovi otporni su na koroziju u svim kiselinama osim u fluorovodičnoj i sulfidnoj kiselini. Posebno je potrebno istaknuti njihovu visoku korozijsku otpornost na vruću sumpornu kiselinu kod svih koncentracija i temperatura (najveća otpornost postiže se pri 16,5 % silicija). Zbog toga se ovi ljevovi široko primjenjuju u kemijskoj industriji za obradu i transport viskokorozivnih tekućina.

Prema standardu ASTM A 518A silicijski ljevovi klasificiraju se u tri kvalitete (tablica 2.11).

Tablica 2.11. Kemijski sastav sivih ljevova visokolegiranih silicijem (silicijski ljevovi) prema normi ASTM A 518A

Legura	Kemijski sastav, %					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu
Kvaliteta 1	0,70-1,10	maks.1,50	14,20-14,75	maks.0,50	maks.0,50	maks.0,50
Kvaliteta 2	0,75-1,15	maks.1,50	14,20-14,75	3,25-5,00	0,40-0,60	maks.0,50
Kvaliteta 3	0,70-1,10	maks.1,50	14,20-14,75	3,25-5,00	maks.0,20	maks.0,50

Pored kvaliteta navedenih u tablici 2.11 proizvode se silicijski ljevovi i s drugim kemijski sastavima. Npr. u Njemačkoj literaturi preporučuje se slijeći kemijski sastav: 0,4 – 1,0 % ugljika, 14,0 – 17,0 % silicija, maks. 1,5 % mangana, maks. 0,2 % fosfora, 0,03 – 0,05 % sumpora te do 3,5 % molibdena. Ruska norma GOST-2233-43 propisuje dvije kvalitete silicijskog lijeva (tablica 2.12), a poljska norma PN-61/H-83111 6 kvaliteta (tablica 2.13).

Silicij je glavni legirajući element u silicijskom lijevu. S porastom sadržaja silicija raste korozijska postojanost, ali i tvrdoća i krtost. Povećanjem sadržaja silicija iznad 17,0 % ne dolazi do značajnijeg povećanja antikorozivnosti (slika 2.55), ali dolazi do značajnijeg povećanja krhkosti.

Kod silicijskog lijeva posebnu pažnju potrebno je posvetiti sadržaju ugljika, koji se kod ovog lijeva izlučuje u obliku sitnih grafitnih listića. Kod većih sadržaja ugljika, odnosno nadeutektičkih sastava dolazi do izlučivanja grubih listića primarnog grafita (slika 2.56) čime

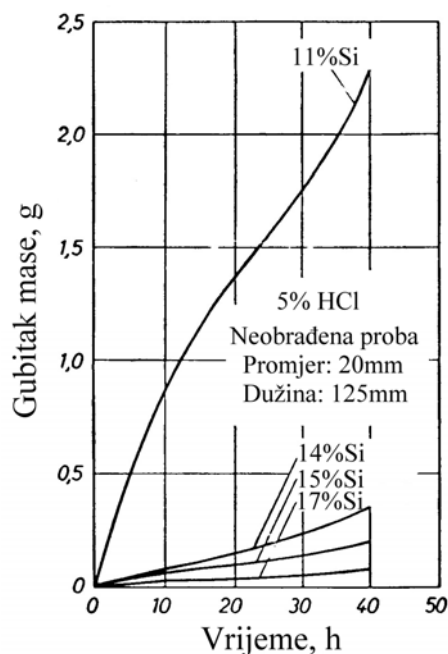
se smanjuje korozijska otpornost silicijskog lijeva. Preniski sadržaji ugljika (npr. 0,2 %) vode ka povećanoj krhkosti i povećanom stezanju. Optimalni sadržaj ugljika iznosi 0,50 - 0,60 %.

Tablica 2.12. Kemijski sastav sivih ljevova visokolegiranih silicijem (silicijski ljevovi) prema normi GOST-2233-43

Legura	Kemijski sastav, %					
	C	Mn	Si	P	S	Mo
C 15	0,5-0,8	0,3-0,8	14,5-16,0	0,1	0,07	
C 17	0,3-0,5	0,3-0,8	16,0-18,0	0,1	0,07	

Tablica 2.13. Kemijski sastav sivih ljevova visokolegiranih silicijem (silicijski ljevovi) prema normi PN-61/H-83111

Legura	Kemijski sastav, %					
	C	Mn	Si	P	S	Mo
ZlSi12	0,8-1,4	0,3-0,8	11,5-13,0	0,1	0,07	-
ZlSi14	0,6-1,0	0,3-0,8	13,1-14,5	0,1	0,07	-
ZlSi15	0,5-0,8	0,3-0,8	14,6-16,0	0,1	0,07	-
ZlSi17	0,3-0,5	0,3-0,8	16,1-18,0	0,1	0,07	-
ZlSi15Mo	0,6-0,9	0,6-1,0	14,0-16,0	0,3	0,1	3,0-4,0
ZlSi17Mo	0,3-0,6	0,6-1,0	16,0-18,0	0,3	0,1	2,0-3,0



Slika 2.55. Utjecaj sadržaja silicija na korozijsku otpornost silicijskog lijeva u solnoj kiselini



Slika 2.56. Metalografska snimka mikrostrukture silicijskog lijeva (0,84 %C, 13,84 %Si)

Otpornost silicijskog lijeva na solnu kiselinu pri sobnoj i povišenim temperaturama dodatno se može poboljšati povećanjem sadržaj silicija na 16,0 – 18,0 % ili dodatkom 3,0 – 5,0 % kroma i/ili 3,5 – 4,0 % molibdena. Krom kao legirajući element potpomaže stvaranju zaštitnog oksidnog sloja i time povećava otpornost na oksidirajuće kiseline.

Silicijski lijev ima znatno nižu toplinsku vodljivost od nelegiranog sivog lijeva, što je razlog njegove osjetljivosti na toplinske šokove. To zahtijeva poduzimanje posebnih mjera opreza tijekom proizvodnje, ali i primjene, da ne dođe do stvaranja unutarnjih naprezanja i pukotina na odljercima. Stezanje silicijskog lijeva usporedivo je sa stezanjem čelika i dvostruko je veće od stezanje nelegiranog sivog lijeva. Linearno stezanje silicijskog lijeva iznosi 1,2 – 2,6 %.

Vlačna čvrstoća silicijskog lijeva je manja od vlačne čvrstoće nelegiranog sivog lijeva. Obično se kreće u granicama od 100 – 150 MPa. Tvrdća silicijskog lijeva kreće se od 400 – 450 HB, tj. dvostruko je veća od tvrdoće nelegiranih sivih ljevova. Zbog vrlo visoke tvrdoće, silicijski lijev otporan je na trošenje. Visoka tvrdoća negativno utječe na strojnu obradivost, zbog čega se je potrebno proizvesti odljevke koji zahtijevaju što je moguće manje naknadne strojne obrade. Tvrdoća ovog materijala proporcionalno raste s porastom sadržaja silicija sve do 13,0 %, nakon čega više nema značajniji porast.

Silicijski lijev izrazito je krhак materijal, zbog čega se posebna pažnja mora posvetiti rukovanju s odljercima tijekom proizvodnje i primjene. Posebno je važno provesti toplinsku obradu kojom se uklanjaju zaostala naprezanja koja potječu od različitih brzina hlađenja između tankih i debelih stijenki.

Silicijski lijev je loš vodič topline, zbog čega se hlađenje odljevka odvija brže na periferiji nego u središtu, a nastala naprezanja uzrokuju stvaranje pukotina u odljevku. Da bi se izbjegla ova vrsta pogrešaka zahtijeva se izjednačavanje hlađenja.

Strojna obrada silicijskog lijeva u praksi se provodi isključivo brušenjem, ograničavajući ga uglavnom na površinu zbog opasnosti od pregrijavanja. Sve otvore na odljevku potrebno je načiniti tijekom lijevanja primjenom odgovarajućih jezgara.

Za proizvodnju silicijskog lijeva preferira se upotreba indukcijskih peći. Indukcijske peći omogućuju vrlo preciznu kontrolu kemijskog sastava i temperature. Budući da se sadržaj vodika i dušika mora održavati u vrlo uskim granicama, potrebno je pažljivo kontrolirati uložni materijal da bi se minimalizirao sadržaj ovih plinova.

Propisani visoki sadržaj silicija ostvaruje se legiranjem taljevine sa FeSi. FeSi koji sadrži visoku koncentraciju vodika potrebno je zagrijati na temperaturu od 900 – 1000 °C prije ulaganja u peć i izbjegavati pregrijavanje taljevine silicijskog lijeva iznad 1400 °C zbog povećane opasnosti od naplinjenja. .

Sadržaj plinova, posebno vodika i dušika, ima značajan utjecaj na konačna svojstva odljevaka. Sadržaj vodika potrebno je održavati < 2 ppm, a sadržaj dušika < 6 ppm. Sadržaj kisika također je potrebno sniziti i to na ~ 20 – 30 ppm. Ako u taljevini nema vodika, dušika i kisika, osim u navedenim kritičnim granicama, moguća je nukleacija sitnih grafitnih listića i njihova ravnomjerna raspodjela u metalnoj osnovi, što u konačnici rezultira povećanjem čvrstoće. Vakuumiranjem se može ostvariti isti sadržaj plinova, odnosno silicijski lijev bez prisutnih mjehura (poroznosti).

Lijevanje taljevine silicijskog lijeva provodi se u pješčane ili trajne kalupe. Temperatura lijevanja odljevaka s debljinom stjenke > 10 mm treba iznositi 1220 – 1250 °C, dok kod odljevaka s tanjim stjenkama temperatura lijevanja treba iznositi 1260 – 1280 °C (temperatura taljenja eutektika s 14,3 % silicija iznosi ~ 1180 °C).

Zbog vrlo visoke krhkosti, odljevci se obično hlade u kalupu do sobne temperature. Određeni oblici odljevaka zahtijevaju vruće istresanje iz kalupa, odmah potom smještanje u zagrijanu peć u cilju uklanjanja naprezanja i hlađenje u peći, a sve u cilju sprječavanja nastajanja pukotina.

Kod odljevaka od silicijskog lijeva obično se zahtijeva uklanjanje zaostalih naprezanja prije primjene odljevka.

### **2.13.2 Sivi ljevovi legirani niklom**

Sivi ljevovi visokolegirani niklom imaju austenitnu strukturu na sobnoj temperaturi i poznati su pod trgovačkim nazivom Ni-resist. Sadržaj nikla (snažan stabilizator austenita) u ovim materijalima kreće se od 12,0 – 36,0 %. U cilju poboljšanja mehaničkih svojstava u sive ljevove legirane niklom dodaje se krom u količinama do 5,5 % (6,0 %). Glavna svojstva ovih materijala su:

- stabilnost te otpornost na oksidaciju i rast pri visokim temperaturama,
- otpornost na koroziju u kiselinama (osim u dušičnoj i solnoj kiselini), lužinama i solima,
- dobra čvrstoća,
- otpornost na eroziju i trošenje,
- niska (kontrolirana) toplinska ekspanzija,
- nemagnetičnost,
- dobra livljivost i strojna obradivost.

Za klasifikaciju austenitnih sivih ljevova razvijen je veći broj normi. Najčešće se primjenjuju slijedeće norme: ASTM A 436 i ISO 2892-1973.

Prema normi ASTM A 436 austenitni sivi ljevovi klasificiraju se u 8 kvaliteta. Kemijski sastavi prikazani su u tablici 2.14, a mehanička svojstva u tablici 2.15.

Prema normi ISO 2892-1973 austenitni sivi ljevovi klasificiraju se u 9 kvaliteta. Kemijski sastavi prikazani su u tablici 2.16, mehanička svojstva u tablici 2.17.

Tablica 2.14. Kemijski sastav austenitnih sivih ljevova prema ASTM A 436

Element	Kvaliteta							
	Grade 1	Grade 1b	Grade 2	Grade 2b	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Grade 6
	Kemijski sastav, %							
C, maks.	3,0	3,0	3,0	3,0	2,6	2,60	2,4	3,0
Si	1,0-2,8	1,0-2,8	1,0-2,8	1,0-2,8	1,0-2,0	5,0-6,0	1,0-2,0	1,5-2,5
Mn	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5
Ni.	13,5-17,5	13,5-17,5	18,0-22,0	18,0-22,0	28,0-32,0	29,0-32,0	34,0-36,0	18,0-22,0
Cu	5,5-7,5	5,5-7,5	maks.0,5	maks.0,5	maks.0,5	maks.0,5	maks.0,5	3,5-5,5
Cr	1,5-2,5	2,5-3,5	1,5-2,5	3,0-6,0 <sup>1)</sup>	2,5-3,5	4,5-5,5	maks.0,1	1,0-2,0
S, maks.	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Mo	-	-	-	-	-	-	-	maks.1,0

<sup>1)</sup> kada se zahtijeva strojna obrada, preporučuje se da sadržaj kroma ne bude veći od 3,0 – 4,0 %.

Tablica 2.15. Mehanička svojstva austenitnih sivih ljevova prema ASTM A 436 određena na standardnim epruvetama za ispitivanja vlačnih svojstava

	Kvaliteta							
	Grade 1	Grade 1b	Grade 2	Grade 2b	Grade 3	Grade 4	Grade 5	Grade 6
	Vrijednosti mehaničkih svojstava							
R <sub>m</sub> , min, MPa	172	206	172	206	172	172	206	138
HB	131-183	149-212	118-174	171-248	118-159	149-212	99-124	124-174
Udarna radnja loma, J <sup>1)</sup>	136	108	136	81	203	108	203	-

<sup>1)</sup> udarni rad loma određena na ispitnoj palici debljine 30 mm bez zareza.

Tablica 2.16. Kemijski sastav austenitnih sivih ljevova prema ISO 2892-1973

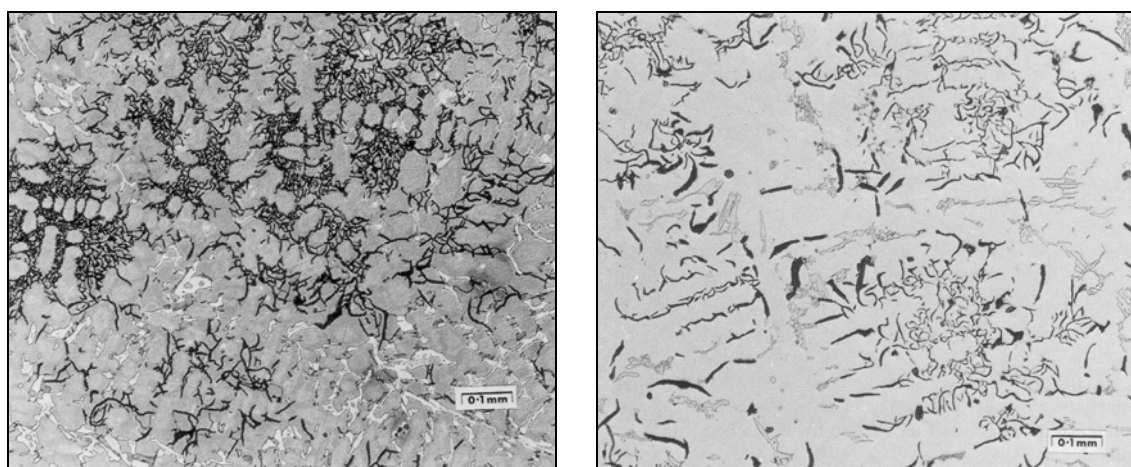
Kvaliteta	Kemijski sastav					
	C max., %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %
L – Ni Mn 13 7	3,0	1,5-3,0	6,0-7,0	12,0-14,0	maks.0,2	maks.0,5
L – Ni Cu Cr 15 6 2	3,0	1,0-2,8	0,5-1,5	13,5-17,5	1,0-2,5	5,5-7,5
L – Ni Cu Cr 15 6 3	3,0	1,0-2,8	0,5-1,5	13,5-17,5	2,5-3,5	5,5-7,5
L – Ni Cr 20 2	3,0	1,0-2,8	0,5-1,5	18,0-22,0	1,0-2,5	maks.0,5
L – Ni Cr 20 3	3,0	1,0-2,8	0,5-1,5	18,0-22,0	2,5-3,5	maks.0,5
L – Ni Si Cr 20 5 3	2,5	4,5-5,5	0,5-1,5	18,0-22,0	1,5-4,5	maks.0,5
L – Ni Cr 30 3	2,5	1,0-2,0	0,5-1,5	28,0-32,0	2,5-3,5	maks.0,5
L – Ni Si Cr 30 5 5	2,5	5,0-6,0	0,5-1,5	29,0-32,0	4,5-5,5	maks.0,5
L – Ni 35	2,4	1,0-2,0	0,5-1,5	34,0-36,0	maks.0,2	maks.0,5

Tablica 2.17. Mehanička svojstva austenitnih sivih ljevova prema ISO 2892-1973 određena na standardnim epruvetama za ispitivanje vlačnih svojstava

Kvaliteta	Mehanička svojstva				
	$R_m$ , (MPa)	$\sigma_{db}^*$ (MPa)	A, min. (%)	E (GN/m <sup>2</sup> )	HB
L – Ni Mn 13 7	140-220	630-840	-	70-90	120-150
L – Ni Cu Cr 15 6 2	170-210	700-840	2	85-105	140-200
L – Ni Cu Cr 15 6 3	190-240	860-1100	1-2	98-113	150-250
L – Ni Cr 20 2	170-210	700-840	2-3	85-105	120-215
L – Ni Cr 20 3	190-240	860-1100	1-2	98-113	160-250
L – Ni Si Cr 20 5 3	190-280	860-1100	2-3	110	140-250
L – Ni Cr 30 3	190-240	700-910	1-3	98-113	120-215
L – Ni Si Cr 30 5 5	170-240	560	-	105	150-210
L – Ni 35	120-180	560-700	1-3	74	120-140

\*) tlačna čvrstoća

Sivi ljevovi visokolegirani niklom superiorniji od nelegiranih sivih ljevova u pogledu otpornosti na korozivne medije, kao što su kiseline, lužine, soli te korozivne plinove. Otpornost na trošenje austenitnih sivih ljevova superiornija je od mnogih konkurentnih materijala i rezultat je sposobnosti otvrdnjavanja hladnom deformacijom (otvrdnjavanje pri radu). Tipične mikrostrukture austenitnih sivih ljevova prikazane su na slici 2.57.



a)

b)

Slika 2.57. Metalografske snimke mikrostrukture austenitnih sivih ljevova: a) austenitni sivi ljev s 3,31 % ugljika, 2,20 % silicija, 6,0 % mangana, 0,03 % sumpora, 0,05 % fosfora i 11,60 % nikla. U strukturi se mogu vidjeti austenitni dendriti, sitni interdendritni listićavi grafit i interdendritni karbidi, b) austenitni sivi ljev s 2,54 % ugljika, 1,51 % silicija, 0,93 % mangana, 0,50 % bakra, 0,03 % sumpora, 0,03 % fosfora, 32,6 % nikla i 3,24 % kroma. U strukturi se može vidjeti primarni austenit u dendritnom obliku, interdendritni karbidi i listićavi grafit

Osim poboljšanja mehaničkih svojstava, dodatkom kroma (od 2,0 - 5,5 %) povećava se otpornost na oksidaciju i rast pri povišenim temperaturama. Dodatak kroma rezultira prisutnošću karbida u mikrostrukturi. Zbog meke austenitne metalne osnove, austenitni sivi ljevovi nemaju visoku tvrdoću i relativno lagano se strojno obrađuju. Ako se zahtijevaju vrlo

niske brzine puzanja kod odljevka koji rade na visokim temperaturama i podvrgnuti su visokim naprežanjima, potrebno je austenitni sivi lijev dodatno legirati s 1,0 % molibdena.

Austenitni sivi ljevovi zahtijevaju veći volumen pojila, te primjenu pojila većeg modula koja je potrebno tako postaviti da se ostvari usmjereno skrućivanje. Potreba za usmjerenim skrućivanjem često zahtijeva upotrebu hladila te primjenu kromitnog pijeska u odgovarajućim područjima kalupne šupljine. Za proizvodnju austenitnih sivih ljevova preporučuje se upotreba indukcijskih peći.

Austenitni sivi ljevovi primjenjuju se do temperatura od ~ 900 °C (kvaliteta s 35 % nikla). Za nešto više temperature primjene (do 950°C) može se primijeniti austenitni sivi lijev koji sadrži najmanje 18,0 % nikla, 2,0 – 5,5 % kroma i 5,0 – 6,0 % silicija. Ovaj materijal poznat je pod trgovačkim nazivom Nicrosilal.

Nicrosilal ima nešto slabiju korozijsku postojanost, ali vrlo dobru otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, posebno kada je još dodatno legiran s 0,2 % titana da bi se dobio fini listićavi grafit. Obzirom da silicij i nikal pri većim sadržajima utječu značajnije na količinu ugljika u eutektiku, sadržaj ugljika ne smije biti veći od 1,8 – 2,0 %. Silicij je dodan da bi se poboljšala toplinska otpornost. Veće količine silicija od navedenih rezultiraju smanjenjem stabilnosti austenita, dok kod nižih sadržaja opada toplinska otpornost. Mangan stabilizira austenit, zbog čega se njegov sadržaj kod ovog materijala kreće od 0,8 – 1,0 %. Sadržaj nikla mora biti > 18,0 %, što je garancija potpuno austenitne strukture. Kod tih sadržaja nikla, mikrostruktura Nicrosilala sastoji se od austenita i sitnih listića grafita (D tip). Ovisno o sadržaju kroma, u mikrostrukturi mogu biti prisutni kromom bogati igličasti karbidi.

Najznačajnija svojstva i područja primjene austenitnih sivih ljevova prema ISO 2892-1973 sumirana su u tablici 2.18.



Tablica 2.18. Svojstva i tipična područja primjene austenitnih sivih ljevova prema ISO 2892-1973

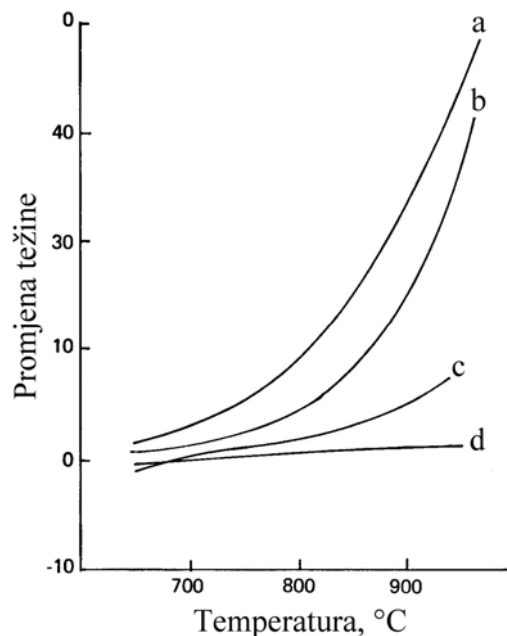
Kvaliteta	Svojstva <sup>1)</sup>	Tipična područja primjene
L – Ni Mn 13 7	nemagnetičan	Razni dijelovi turbina (tlačni poklopci), izolirajuće prirubnice itd.
L – Ni Cu Cr 15 6 2	Dobra otpornost na koroziju, posebno u lužinama, razrijeđenim kiselinama, morskoj vodi i otopinama soli. Dobra otpornost na toplinu, visoka toplinska ekspanzija, nemagnetičnost pri niskim sadržajima kroma.	Pumpe, ventili, dijelovi za peći itd.
L – Ni Cu Cr 15 6 3	Bolja otpornost na koroziju i eroziju od kvalitete L – Ni Cu Cr 15 6 2.	Pumpe, ventili, dijelovi za peći itd.
L – Ni Cr 20 2	Slična svojstva kao L – Ni Cu Cr 15 6 2, ali veća otpornost na koroziju u lužinama. Visok koeficijent toplinske ekspanzije.	Kao i L – Ni Cu Cr 15 6 2, ali se preferira za pumpe koje rade s lužinama, posude za lužine, koje se primjenjuju u proizvodnji sapuna, industriji hrane itd. Pogodan za primjene gdje se zahtijevaju materijali bez bakra.
L – Ni Cr 20 3	Svojstva slična kvaliteti L – Ni Cr 20 2, ali veća otpornost na eroziju, toplinu i rast.	Kao i L – Ni Cr 20 2, ali se primjenjuje i za komponente koje rade na povišenim temperaturama
L – Ni Si Cr 20 5 3	Dobra otpornost na koroziju, čak i u razrijeđenoj sumpornoj kiselini. Toplinski otporniji od kvalitete L – Ni Cr 20 2 i L – Ni Cr 20 3. Nije pogodan za primjenu u temperaturnom području od 500 – 600°C.	Dijelovi pumpi, ventili za industrijske peći
L – Ni Cr 30 3	Otporan na toplinu i toplinske šokove do 800°C. Dobra otpornost na koroziju pri visokim temperaturama, odlična otpornost na eroziju u vodenoj pari i solima, prosječna toplinska ekspanzija.	Pumpe, tlačne posude, ventili, dijelovi filtara, ispušne grane, kućišta turbopunjača.
L – Ni Si Cr 30 5 5	Posebno otporan na koroziju, eroziju i toplinu, prosječna toplinska ekspanzija.	Dijelovi pumpi, ventili za industrijske peći.
L – Ni 35	Otporan na toplinske šokove, niska toplinska ekspanzija.	Komponente koje moraju imati visoku dimenzijsku stabilnost, znanstveni instrumenti, kalupi za staklo.

<sup>1)</sup> svojstva na osnovi kemijskih sastava u tablici 14.6.

### 2.13.3 Sivi ljevovi legirani aluminijem

Legiranje sivog lijeva aluminijem rezultira značajnim poboljšanjem otpornosti na visoke temperature, korozijske otpornosti, otpornosti na habanje i nemagnetičnosti. Ovisno o sadržaju u sivom lijevu, aluminij djeluje kao grafitizator ili kao karbidotvorac. Zbog toga se sivi ljevovi legirani aluminijem dijele u dvije skupine. Prvu skupinu predstavljaju feritni sivi ljevovi sa 1,0 – 7,0 % aluminija, kod kojih, u biti, aluminij zamjenjuje silicij kao grafitizirajući element. Drugu skupinu čine feritni sivi ljevovi sa 18,0 – 25,0 % aluminija. Sadržaji aluminija koji se nalaze između ove dvije skupine rezultiraju stvaranjem bijelih željeznih ljevova i nemaju komercijalnu primjenu.

Legiranjem sa aluminijem značajno se poboljšava otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama (slika 2.58) i stabilizira ferit do vrlo visokih temperatura (~ 980 °C). Otpornost na oksidaciju povezana je sa stvaranjem zaštitnog kompaktnog sloja oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na površini. Ovaj sloj dobro je povezan sa osnovnim materijalom i vrlo otporan na daljnje prodiranje kisika. S porastom sadržaja aluminija raste kompaktnost zaštitnog sloja, a time i otpornost na oksidaciju i visoke temperature.



Slika 2.58. Utjecaj sadržaja aluminija na oksidaciju sivog lijeva na zraku pri različitim temperaturama tijekom 200 h: a) 2,47 % aluminija, b) 4,28 % aluminija, c) 5,99 % aluminija, d) 20,79 % aluminija

Povećanjem sadržaja aluminija povećava se otpornost sivih ljevova na visoke temperature, ali se mehanička svojstva značajno pogoršavaju i ljevovi postaju krhki. Mehanička svojstva mogu se poboljšati legiranjem kromom, molibdenom ili niklom.

Sivi ljev legiran sa 2,0 – 3,0 % aluminija pokazuje otpornost na temperature do ~ 700 °C. Međutim, kod odljevaka od ovog lijeva, zbog grafitizacije eutektoidnog cementita pri zagrijavanju do 500 °C (600 °C), dolazi do linearnog povećanja dimenzija za 0,5 – 0,8 %, čime se pogoršava otpornost na povišene temperature. Tek sivi ljevovi s više od 6,0 % aluminija imaju dobru otpornost na oksidaciju i rast do 800 – 900 °C. Međutim, ovi ljevovi imaju niska mehanička svojstva, koja se značajno pogoršavaju s povećanjem temperature iznad 400 °C (450 °C). Otpornost na visoke temperature i volumna postojanost može se značajno poboljšati legiranjem sa 5,0 – 6,0 % silicija. Dodatnim legiranjem s kromom ili

niklom (1,5 – 2,0 %) poboljšavaju se mehanička svojstva. Legiranjem sa ~ 6,0 % kroma značajno se poboljšava otpornost na temperature do 1000 °C, a legiranjem sa 10,0 – 12,0 % kroma do 1100 °C (1200 °C). Međutim, u tim slučajevima dobiva se bijeli željezni lijev.

Druga skupina sivih ljevova legiranih aluminijem također ima feritnu metalnu osnovu, ali višu otpornost na visoke temperature i volumnu postojanost u odnosu na prvu skupinu. Superiornija svojstva mogu se dobiti ako se taljevina obradi magnezijem, odnosno modificiranjem oblika grafita iz listićavog u nodularni.

Aluminijem legirane sive ljevove vrlo je teško odliti bez uključaka troske i hladnih zavara. Pri temperaturama rastaljenog sivog lijeva aluminij je vrlo reaktivan i lako reagira s kisikom i vlagom. Potrebno je obratiti pažnju da oksidni sloj nastao tijekom lijevanja ne uđe u kalup, jer to rezultira stvaranjem uključaka. Zbog toga posebnu pažnju potrebno je posvetiti uljevnom sustavu (sprječavanje turbulencija, primjena filtara i troskolovki). Kod odljevaka od aluminijem legiranih sivih ljevova može biti prisutna plinska poroznost. Otopljeni aluminij može reagirati s vlagom u kalupu stvarajući pri tome slobodni vodik koji se otapa u taljevini, a pri skrućivanju (zbog smanjene topivosti) rezultira stvaranjem plinske poroznosti.

Sivi ljevovi legirani aluminijem mogu se primijeniti za gradnju komponenti koje se primjenjuju kod povišenih temperatura, a u radu nisu podvrgnute mehaničkom opterećenju. Loša mehanička svojstva, izrazita krhkost i loša livljivost značajno su ograničili primjenu ovih ljevova. Za ove materijale ne postoje odgovarajuće norme.

## 2.14 Kontrola kvalitete

Da bi se osigurala ponovljivost proizvodnog procesa potrebno je provesti striktnu kontrolu svih faza u toku procesa proizvodnje. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na uložne materijale koji moraju zadovoljiti definirane specifikacije. Sve podatke o uložnim materijalima potrebno je sustavno voditi. Preporučljivo je pažljivo pratiti nove materijale (sirovine) tijekom početka primjene u proizvodnom procesu.

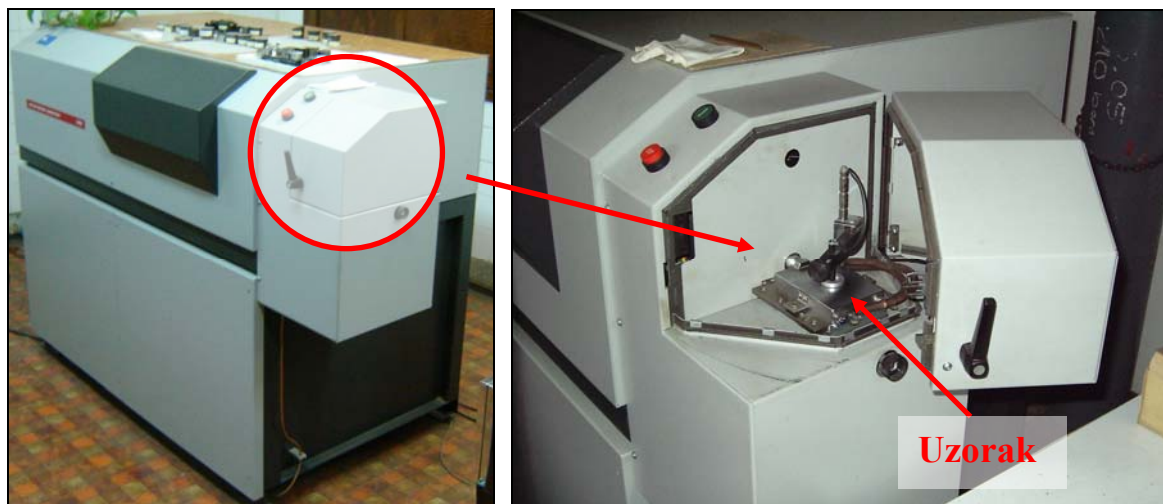
### 2.14.1 Kontrola kvalitete taljevine

Prije procesa taljenja uložni materijali moraju se točno odvagnuti i dobivene podatke potrebno je evidentirati. Vrlo je važno strogo se pridržavati propisane procedure ulaganja i taljenja. Provođenje ove procedure treba također evidentirati.

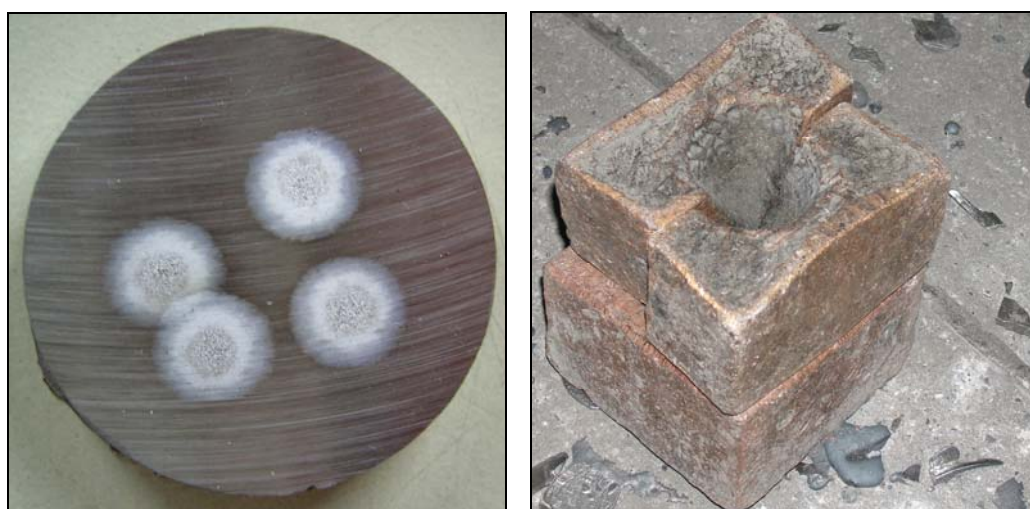
Temperatura taljevine određuje se uranjajućim pirometrom. Optički spektrometar je najčešće upotrebljavani uređaj za kontrolu kemijskog sastava taljevine (slika 2.59). Uzorak za određivanje kemijskog sastava (slika 2.60a) na spektrometru je tanka pločica kružnog presjeka koja se dobiva ulijevanjem taljevine u bakrenu kokilu (slika 2.60b), čime se osigurava metastabilno skrućivanje, tj. skrućivanje bez izlučivanja ugljika u obliku grafita.

Toplinskom analizom može se odrediti sadržaj ugljika i silicija s relativno visokom točnošću ukoliko se skrućivanje odvija metastabilno (bijelo), tj. bez izlučivanja ugljika u obliku grafita. Na taj se način može jasno uočiti zastoj koji odgovara likvidus temperaturi  $T_L$  i temperaturi eutektičkog skrućivanja  $T_E$ . Važno je da se skrućivanje odvija metastabilno. U tom slučaju i kod varijacije nukleacijskih svojstava taljevina s istim kemijskim sastavom eutektička temperatura određena pri metastabilnom skrućivanju biti će konstantna, dok će eutektička temperatura pri stabilnom skrućivanju značajno varirati. Metastabilno skrućivanje

postiže se lijevanjem uzorka taljevine u standardizirani lončić (Quik – cup®) koji sadrži telur (slika 2.61). Telur nema utjecaj na iznos navedenih temperatura.



Slika 2.59. Spektrometar za određivanje kemijskog sastava



a)

b)

Slika 2.60. a) uzorak za određivanje kemijskog sastava (nakon provedene analize),  
b) bakrena kokila za lijevanje uzorka za određivanje kemijskog sastava

Primjenom višestruke regresijske analize moguće je dobiti jednadžbe za određivanje sadržaja ugljika i silicija:

$$\%C = -6,51 - 0,0084T_L + 0,0178T_E \quad (2.9)$$

$$\%Si = 78,41 - 0,0683T_E - 4,2808\%P \quad (2.10)$$

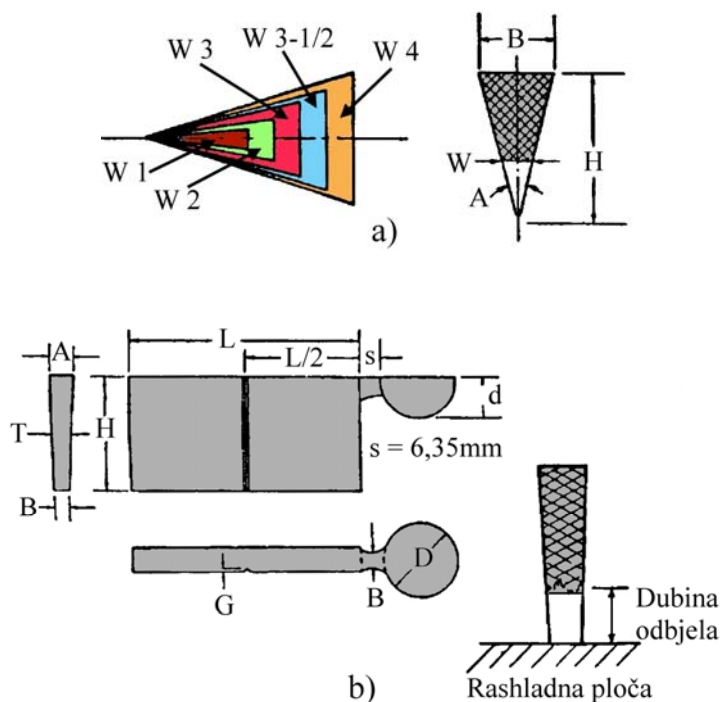
Koeficijenti u jednadžbama (2.9) i (2.10) moraju se eksperimentalno utvrditi unutar svake ljevaonice za pojedinu vrstu lijeva.



Slika 2.61. Standardizirani lončić sa telurom (Quik – cup®) za toplinsku analizu

Nakon što se ostvari propisani kemijski sastav taljevine i temperatura, a prije lijevanja u kalupe, potrebno je provjeriti grafitizacijski potencijal, odnosno sklonost ka odbjelu (metastabilnom skrućivanju). Na osnovi rezultata ovog ispitivanja može se odrediti potreba za cijepljenjem i potrebna količina cjepiva. Kemijski sastav i metalurško stanje taljevine imaju značajan utjecaj na dubinu odbjela.

Ispitivanje sklonosti ka odbjelu provodi se na odvojeno lijevanom ispitnom uzorku. Norma ASTM A367 propisuje dvije vrste uzoraka za ispitivanje sklonosti ka odbjelu: klin probu (engl. *Wedge test specimen*) (slika 2.62a) i gašenu (kaljenju) probu (engl. *Chill test specimen*) (slika 2.62b). Pored toga, norma propisuje 5 različitih veličina za svaku od navedenih proba. Dimenzije i oznake probi navedene su u tablicama 2.19 i 2.20.



Slika 2.62. Uzorci za ispitivanje sklonosti ka odbjelu prema ASTM A 367: a) klin proba, b) gašena (kaljena) proba

Tablica 2.19. Dimenzije i oznake klin probi sa slike 2.62a (prema ASTM A367)

Oznaka klin probe	Dimenzije			
	B, mm	H, mm	A, °	L*, mm
W 1	5,1	25,4	11,5	101,6
W 2	10,2	31,8	18	101,6
W 3	19,1	38,1	28	101,6
W 3-1/2	25,4	44,4	32	127,0
W 4	31,8	50,8	34,5	152,4

\*) L – dužina klin probe.

Tablica 2.20. Dimenzije i oznake gašenih (kaljenih) probi sa slike 2.62b (prema ASTM A367)

Oznaka gašene (kaljene) probe	Dimenzije							
	T, mm	A, mm	B, mm	H, mm	L, mm	D, mm	d, mm	G, mm
1 C	4,8	6,4	3,2	31,8	63,5	19,0	12,7	0,8
2 C	6,4	7,9	4,8	38,1	76,2	22,2	12,7	0,8
3 C	9,5	12,1	7,9	44,4	88,9	22,2	12,7	1,6
4 C	12,7	14,3	12,1	50,8	101,6	25,4	15,9	1,6
5 C	19,0	20,6	17,5	63,5	127,0	25,4	15,9	2,4

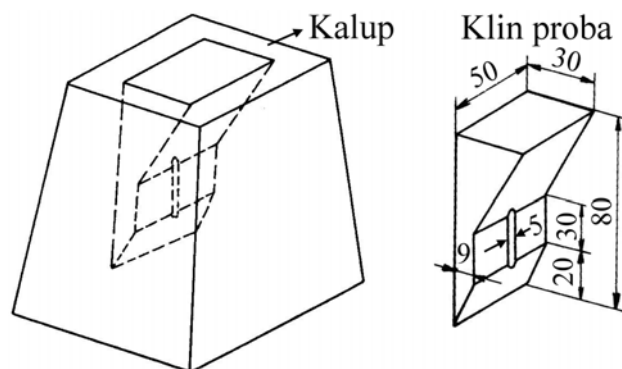
Klin proba lijeva se u pješčani kalup izrađen od kemijski vezane mješavine. Nakon hlađenja, proba se lomi po visini i na prijelomu promatra struktura. Jasno se razlikuje bijelo područje od područja s meliranom i područja sa sivom strukturom. Na prijelazu iz područja s potpuno sivom strukturom u područje gdje se pojavljuju prvi znakovi metastabilnog skrućivanja određuje se širina potpunog odbjela.

Klin probe ne primjenjuju se kod sivih ljevova kod kojih je sadržaj silicija > 2,5 %, a sadržaj ugljika > 3,5 %. Dakle, klin proba ne smatra se pouzdanom za određivanje sklonosti ka odbjelu nadeutektskih sivih ljevova. Za ove ljevove znatno je pogodnija gašena (kaljena) proba.

Pri odabiru pravilne veličine klinaste probe potrebno je uzeti u obzir da maksimalna širina odbjela (W) ne smije biti veća od B/2. Kod određivanja vrijednosti odbjela primjenom klin probe znatno češće se određuje širina nego visina odbjela, vidi sliku 2.62a. Kod odabira klin probe potrebno je uzeti u obzir i debljinu stjenke odljevka i ekvivalent ugljika. U većini slučajeva pravilna veličina klin probe određuje se na osnovi iskustva.

Pored navedenih standardiziranih klin proba, u praksi se primjenjuje i niz drugih nestandardiziranih klin proba. Na slici 2.63 prikazana je klin proba prema K. Wagneru i W. Friedrichu.

Gašena (kaljena) proba ima blagi konusni oblik (slika 2.62b), tj. njena širina neznatno se smanjuje od vrha prema dnu. Za razliku od klin probe, gašena (kaljena) proba lijeva se na metalnu (rashladnu) ploču koja je načinjena od sivog lijeva, čelika ili bakra. Gašena (kaljena) proba je pogodnija od klin probe ako se određuje sklonost ka odbjelu kod sivih ljevova s sadržajem silicija > 2,5 % i sadržajem ugljika > 3,50 %.

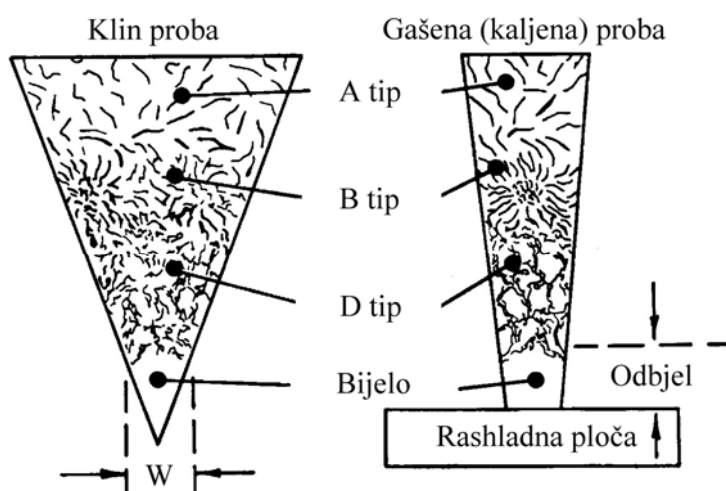


Slika 2.63. Klin proba prema K. Wagneru i W. Friedrichu

Kod lijevanja probi za određivanje sklonosti ka odbjelu potrebno je strogo kontrolirati temperaturu taljevine zbog njenog utjecaja na konačne rezultate. Drugim riječima, taljevina kod koje se određuje sklonost ka odbjelu ne smije se jedanput uliti u kalup za npr. klinastu probu s visokom temperaturom a drugi put s niskom temperaturom. Kod iste taljevine, istog tipa i veličine probe za određivanje sklonosti ka odbjelu, niža temperatura lijevanja rezultira većom vrijednosti odbjela nego u slučaju više temperature lijevanja.

Brzina hlađenja probe ima značajan utjecaj na konačne rezultate ispitivanja. Najviša vrijednost odbjela dobiva se kada se završi skrućivanje i više se ne stvaraju primarni karbidi ili cementit. Zbog toga, probu treba zagasiti u vodi odmah nakon završetka skrućivanja. Pri tome, deblji kraj probe potrebno je prvi uroniti u sredstvo za gašenje da bi se spriječilo stvaranje pukotina u tanjem dijelu (vrhu). Ako je na raspolaganju dovoljno vremena, proba se može hladiti u kalupu ili na zraku. Na taj način postiže se jasnija granica između sivog i bijelog dijela uzorka,

Na prijelomnoj površini klin ili gašene (kaljenje) probe promatra se struktura, odnosno određuje odbjel. Na slici 2.64 shematski je prikazana tipična struktura na prijelomnoj površini kod klin i gašene (kaljene) probe.

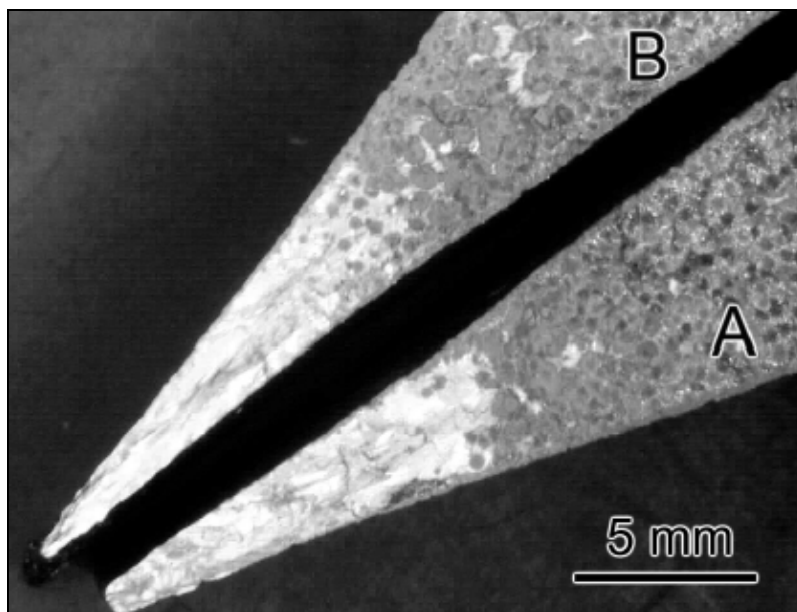


Slika 2.64. Shematski prikaz strukture na prijelomnoj površini klin i gašene (kaljene) probe

U gornjem (debljem) dijelu obiju probi odvija se stabilno skrućivanje (sivo) i prisutan je A tip grafitnih listića u mikrostrukturi. Ovaj tip grafitnih listića izlučuje se pri ravnotežnom skrućivanju koje se uspostavlja pri niskim brzinama skrućivanja i u većini slučajeva najpoželjniji je oblik grafita

S postepenim udaljavanjem od gornjeg dijela probe postaju sve uže, što rezultira povećanjem brzine skrućivanja i pojavom pothlađenja, čime se narušavaju ravnotežni uvjeti skrućivanja. Zbog toga se ispod područja s A tipom grafitnih listića, u većini slučajeva, najprije pojavljuje područje s B tipom grafitnih listića (manja pothlađenja), a zatim, kod većih pothlađenja područje s D tipom grafitnih listića. Promjena oblika grafita rezultira padom vlačne čvrstoće. Cijepljenjem taljevine može se minimalizirati količina B i D tipa grafitnih listića ili eventualno izbjeći njihovo stvaranje.

U donjem dijelu (vrhu) probi, neposredno ispod područja s D tipom grafitnih listića, brzina skrućivanja je vrlo visoka, zbog čega dolazi do izlučivanja cementita, odnosno metastabilnog skrućivanja. U većini slučajeva najprije se javlja melirana zona (miješana struktura – grafit i cementit) ispod koje se nalazi područje s potpuno bijelom strukturom (odbjel) (slika 2.65). Na osnovi iskustva i veličine odbjela, ljevač može odrediti potrebit dodatak cjepiva da bi se izbjeglo stvaranje odbjela u odljevcima.



Slika 2.65. Strukture na prijelomnoj površini klin probi koje su odlivene od taljevina sivog lijeva sa 3,93 % ugljika, 1,53 % silicija, CE = 4,44). Može se uočiti različita veličina područja odbjela. Pored toga, kod probe označene slovom B, unutar područja sa sivom strukturom prisutan je veći broj manjih područja s bijelom strukturom (šira melirana zona)

Rezultati određivanja grafitizacijskog potencijala, odnosno sklonosti ka odbjelu pomoću klin ili gašene (kaljene) probe ovise u velikoj mjeri o brojnim parametrima koji se moraju strogo kontrolirati te iskustvu operatera. Ova ispitivanja pružaju samo kvalitativne informacije i nisu garancija kvalitete odljevaka. Zbog toga sve više ljevaonica danas primjenjuje toplinsku analizu (snimanje krivulje hlađenja) za potpuniji uvid u grafitizacijski potencijal i metalurško stanje taljevine.

Toplinska analiza (TA) je metoda kontrole taljevine koja omogućuje mjerenje promjena tijekom procesa skrućivanja. U ljevaonicama se provodi snimanjem krivulja hlađenja. Krivulja hlađenja dobiva se praćenjem promjene temperature s vremenom pri skrućivanju uzorka taljevine u standardiziranom lončiću s ugrađenim termoelementom (Quik-cup<sup>®</sup>).

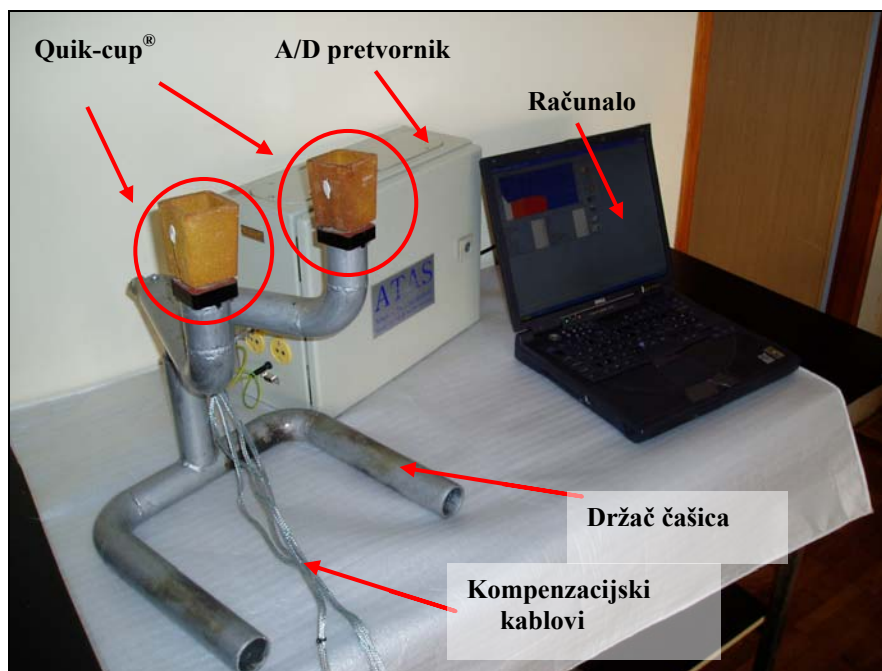


Fazne pretvorbe koje se događaju u analiziranom uzorku tijekom skrućivanja rezultiraju odgovarajućim promjenama nagiba krivulje hlađenja, što omogućuje određivanje karakterističnih temperatura s krivulja hlađenja.

Najširu primjenu u ljevaonicama ima računalom potpomognuta toplinska analiza. Krivulja hlađenja pohranjena je u računalu koje izračunava njenu prvu (i eventualno) drugu derivaciju, što omogućuje potpuniju interpretaciju faznih pretvorbi. Utjecaj različitih elemenata, oksida, silikata itd., kao i izlučivanje ugljika u obliku grafita reflektira se na krivulju hlađenja te njenu prvu i drugu derivaciju. Krivulja hlađenja omogućuje najpotpuniji uvid u metalurško stanje taljevine i predstavlja „metalurški otisak prsta“ taljevine identificirajući je mnogo točnije od analize kemijskog sastava, budući da se dvije taljevine istog kemijskog sastava mogu ponašati sasvim različito.

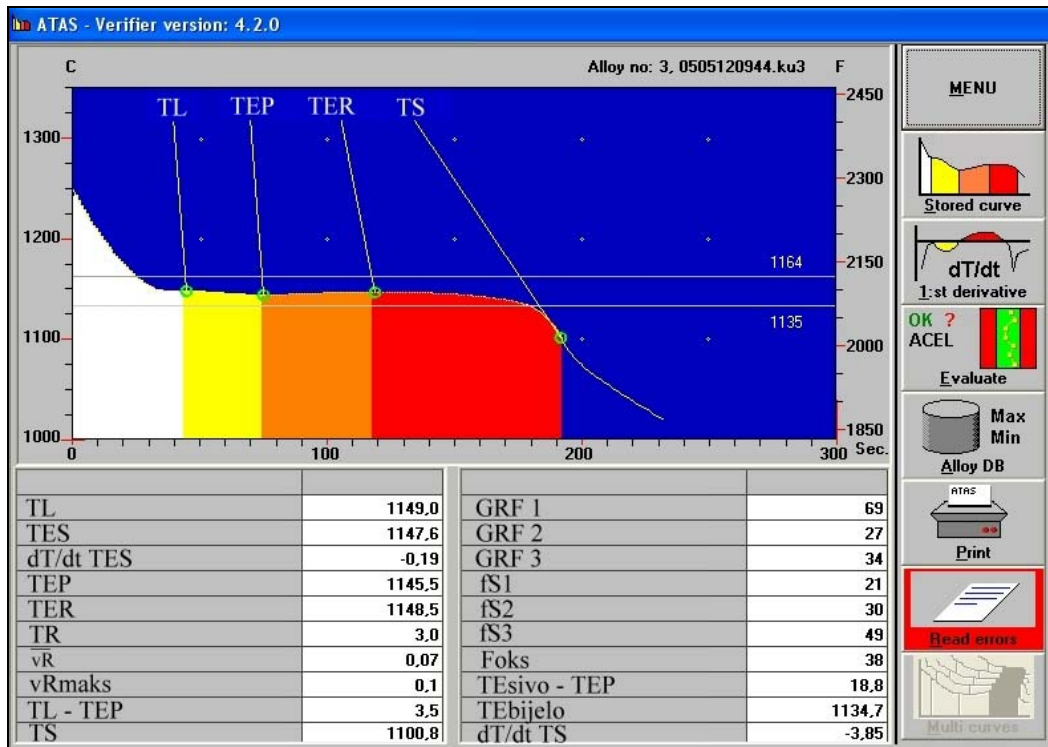
Primjena toplinske analize u ljevaonicama ide u smjeru utvrđivanja korelacije između pojedinih karakterističnih točaka s krivulje hlađenja te njene prve i druge derivacije s kemijskim sastavom, mikrostrukturnim i mehaničkim svojstvima. Na taj način moguće je izgraditi sustav kontrole koji će na osnovi snimljene krivulje hlađenja moći procijeniti navedena svojstva, što omogućuje eventualne korekcije na taljevini u cilju postizanja propisanih svojstava.

U cilju stvaranja sustava kontrole procesa proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova primjenjuje se, kao najnoviji pristup, kombinacija računalom potpomognute toplinske analize taljevine i metoda umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence*). Cilj je ovakvog sustava da na osnovi analize krivulje hlađenja i njene derivacije odredi metalurško stanje taljevine, definira uvjete obrade taljevine (dodatak cjepiva), procijeni mikrostrukturna i mehanička svojstva, te eventualni nastanak grešaka (poroznost, stezanje itd.). Na slici 2.66 prikazan je jedan suvremeni sustav za toplinsku analizu.



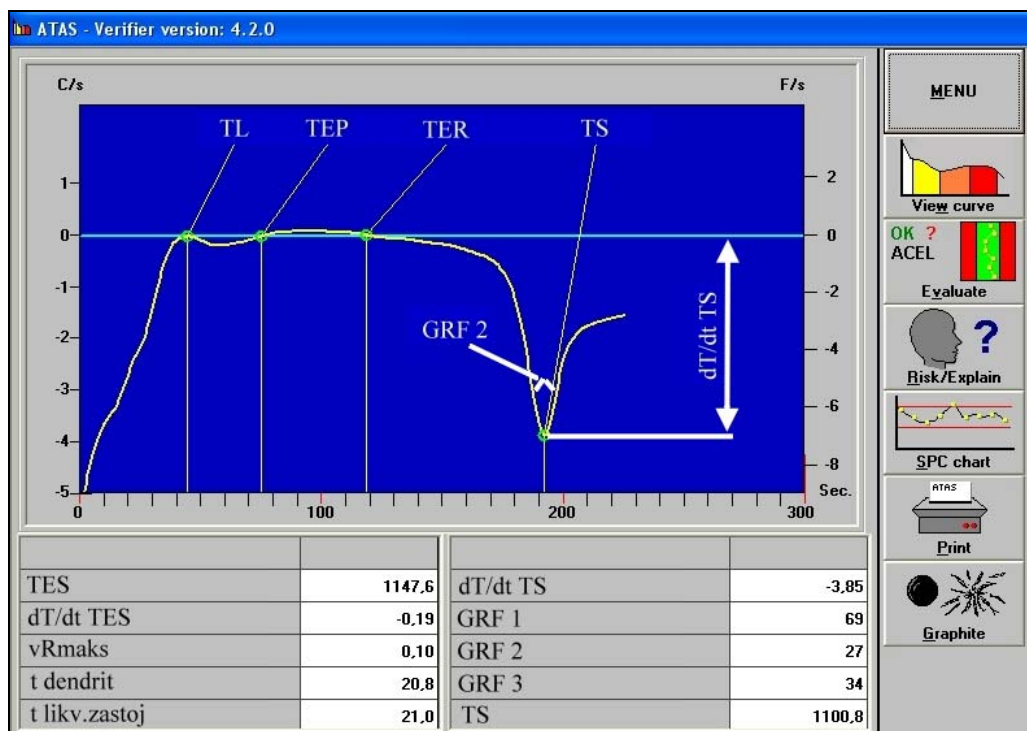
Slika 2.66. Suvremeni sustav za toplinsku analizu ATAS®

Na slici 2.67 prikazan je primjer krivulje hlađenja taljevine sivog lijeva u eutektičkom području i registrirani toplinski parametri. Krivulja hlađenja snimljena je sustavom za toplinsku analizu koji je prikazan slikom 2.66.



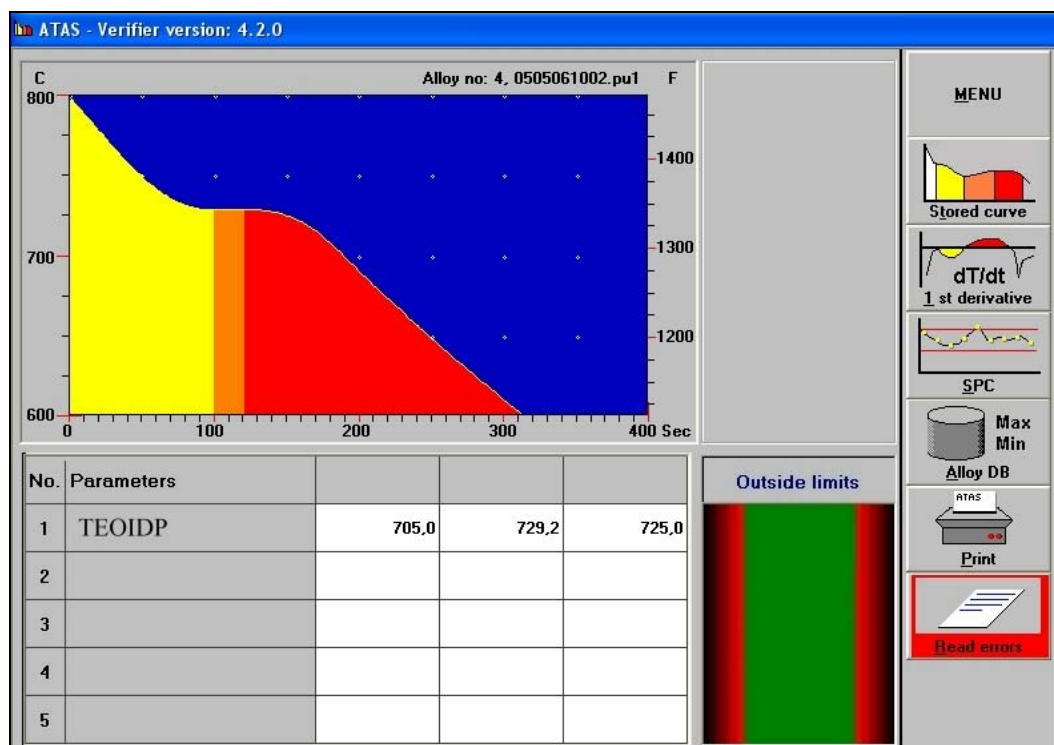
Slika 2.67. Primjer krivulje hlađenja taljevine sivog lijeva u eutektičkom području i registrirani toplinski parametri

Na slici 2.68 prikazana je prva derivacija krivulje hlađenja sivog lijeva u eutektičkom području sa slike 2.67 i registrirani toplinski parametri. Prva derivacija krivulje hlađenja prikazuje brzinu promjene temperature u promatranoj točki.



Slika 2.68. Prva derivacija krivulje hlađenja sivog lijeva u eutektičkom području sa slike 2.67 i registrirani toplinski parametri

Na slici 2.69 prikazana je krivulja hlađenja taljevine sivog lijeva u eutektoidnom području.



Slika 2.69. Krivulja hlađenja taljevine sivog lijeva u eutektoidnom području i registrirani toplinski parametri

U nastavku biti će prikazan utjecaj (povezanost) nekoliko najznačajnijih toplinskih parametara s krivulje hlađenja u eutektičkom području i njene prve derivacije te sa krivulje hlađenja u eutektoidnom području na mikrostrukturu, a time i mehanička svojstva sivog lijeva.

Temperatura eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  je povezana s nukleacijskim stanjem taljevine. Niske vrijednosti temperature eutektičkog pothlađenja ukazuju na slaba nukleacijska svojstva taljevine (stvaranje D i E tip grafitnih listića i veći udio ferita u mikrostrukturi). Prema tome, na osnovi analize krivulje hlađenja sivog lijeva može se dobiti podatak o obliku izlučenog grafita.

Temperatura eutektičkog pothlađenja indikator je nastanka primarnih karbida u mikrostrukturi. Ako temperatura eutektičkog pothlađenja leži ispod temperature metastabilnog skrućivanja, pojaviti će se primarni karbidi u mikrostrukturi, odnosno ugljik precipitira kao  $Fe_3C$ , a ne kao grafit.

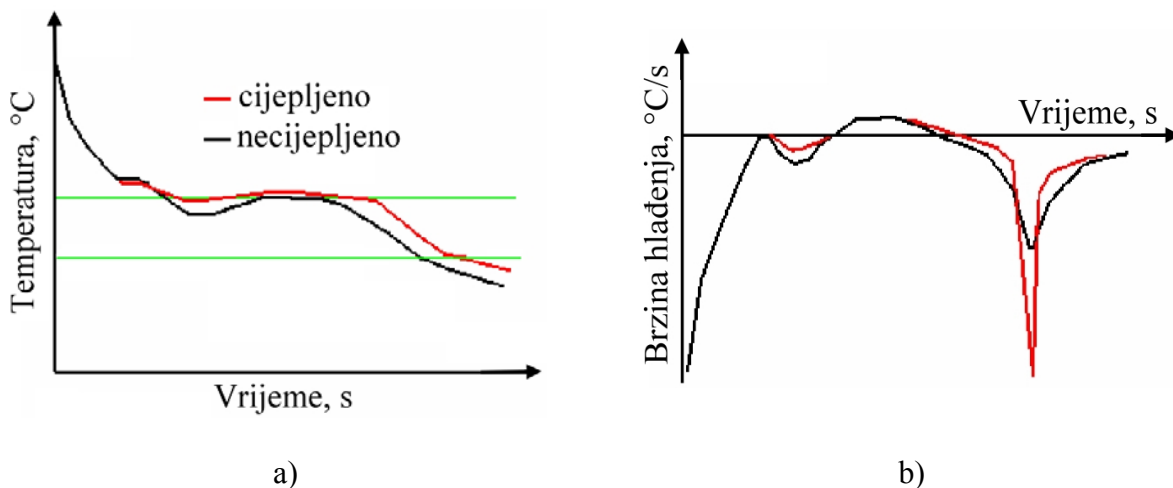
Rekalescencija predstavlja razliku između temperature eutektičke rekalescencije, odnosno najviše eutektičke temperature  $T_{ER}$  i temperature eutektičkog pothlađenja, tj. najniže eutektičke temperature  $T_{EP}$  (slika 2.67). Visoka rekalescencija ukazuje na veliku količinu izlučenog grafita na početku eutektičke reakcije u kratkom vremenskom periodu te slaba nukleacijska svojstva taljevine. Prevelika količina grafita izlučena u ranoj fazi eutektičkog skrućivanja rezultira manjom količinom raspoloživog grafita tijekom daljnjeg skrućivanja i povećanom opasnosti od grešaka uslijed sekundarnog stezanja. Optimalna vrijednost rekalescencije kod sivog lijeva iznosi 2 – 5 °C.

Solidus temperatura je značajan toplinski parametar za praćenje završetka skrućivanja. Ako solidus temperatura leži ispod temperature metastabilnog skrućivanja, u mikrostrukтури mogu nastati karbidi.

Razlika u toplinskoj vodljivosti najjasnije je izražena na kraju skrućivanja, naročito oko solidus temperature. Grafitni faktor 2 (GRF2) predstavlja kut prve derivacije krivulje hlađenja na solidus temperaturi i prikazuje brzinu kojom željezni ljev prolazi zonu ukupnog skrućivanja, mjereći indirektno toplinsku vodljivost. Toplinska vodljivost grafita je ~ 4 puta veća od toplinske vodljivosti austenita u temperaturnom području oko 1100 °C, što je upravo temperaturno područje unutar kojeg se nalazi solidus temperatura sivog lijeva. Prema tome, niske vrijednosti grafitnog faktora 2 ukazuju na visoku toplinsku vodljivost, što je znak velike količine izlučenog grafita. Niska vrijednost prve derivacije krivulje hlađenja na solidusu (veća dubina negativnog pika)  $\frac{d}{dt} T_S$  (slika 2.68) ukazuje na brže odvođenje topline, odnosno veću toplinsku vodljivost i povezana je s visokom količinom eutektičkog grafita na kraju skrućivanja. Zbog toga grafitni faktor 2 (GRF2) u kombinaciji s vrijednosti prve derivacije krivulje hlađenja na solidus temperaturi snažan je indikator toplinske vodljivosti, odnosno oblika izlučenog grafita. Zbog kontinuirane prirode grafitnih listića, sivi ljev ima višu toplinsku vodljivost i niže vrijednosti oba navedena parametra u odnosu na nodularni ljev, što je jasan indikator oblika izlučenog grafita.

Pretvorba austenita u krutom stanju u ferit i perlit pojavljuje se pri eutektoidnoj temperaturi ( $T_{E0IDP}$ ). Temperatura eutektoidne pretvorbe biti će veća kod većih udjela ferita u mikrostrukтури. Pored toga, kod stvaranja većih udjela perlita karakteristična je pojava rekalescencije na krivulji hlađenja u eutektoidnom području (slika 2.69). Feritni sivi ljev ne pokazuje rekalescenciju zbog čega krivulja hlađenja ima gotovo kontinuirani pad.

Toplinska analiza može se uspješno primijeniti za određivanje potrebne količine i djelovanja cjepljiva te nukleacijskog potencijala taljevina željeznih ljevova. Pravilnim cjepljenjem taljevine povisuje se temperatura eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  i solidus temperatura  $T_S$  te snižava likvidus temperatura  $T_L$  i rekalescencija  $T_R$  (slika 2.70). Indikator slabljenja djelovanja cjepljiva je opadanje temperature eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  i eutektičke rekalescencije  $T_{ER}$ .



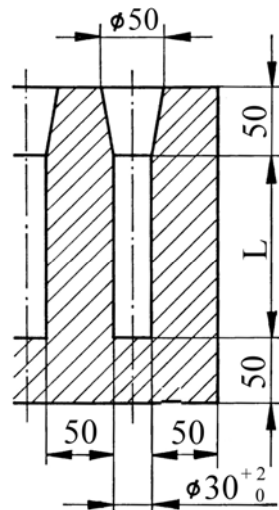
Slika 2.70. utjecaj cjepljenja na krivulju hlađenja (a) i prvu derivaciju krivulje hlađenja (b)

### 2.14.2 Kontrola kvalitete odljevaka

Preuzimanje odljevaka od strane kupca ovisi o rezultatima završne kontrole koja se može provesti na svim odljencima ili na reprezentativnim uzorcima odljevaka. Ispitivanje mehaničkih svojstava, ispitivanje dimenzijske točnosti, ultrazvučno ispitivanje, ispitivanje vrtložnim strujama, rendgenska analiza, ispitivanje feromagnetskim prahom, ispitivanje obojenim penetrantom, ispitivanje pod tlakom itd., neke su od metoda koje se primjenjuju za provjeru ispravnosti odljevaka i sukladnosti s zahtijevanim specifikacijama. Dodatne metode mogu se upotrijebiti za analizu mikrostrukture.

Ispitivanje mehaničkih svojstva sivog lijeva najčešće obuhvaća ispitivanje vlačne čvrstoće i tvrdoće. Mehanička svojstva odljevaka od sivog lijeva propisana su normom HRN EN 1561 (tablica 2.1), a mogu biti i stvar dogovora proizvođača odljevaka i kupca.

Standardizirani uzorci za ispitivanje mehanička svojstava sivog lijeva najčešće se dobivaju iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka strojnom obradom (slika 2.71).



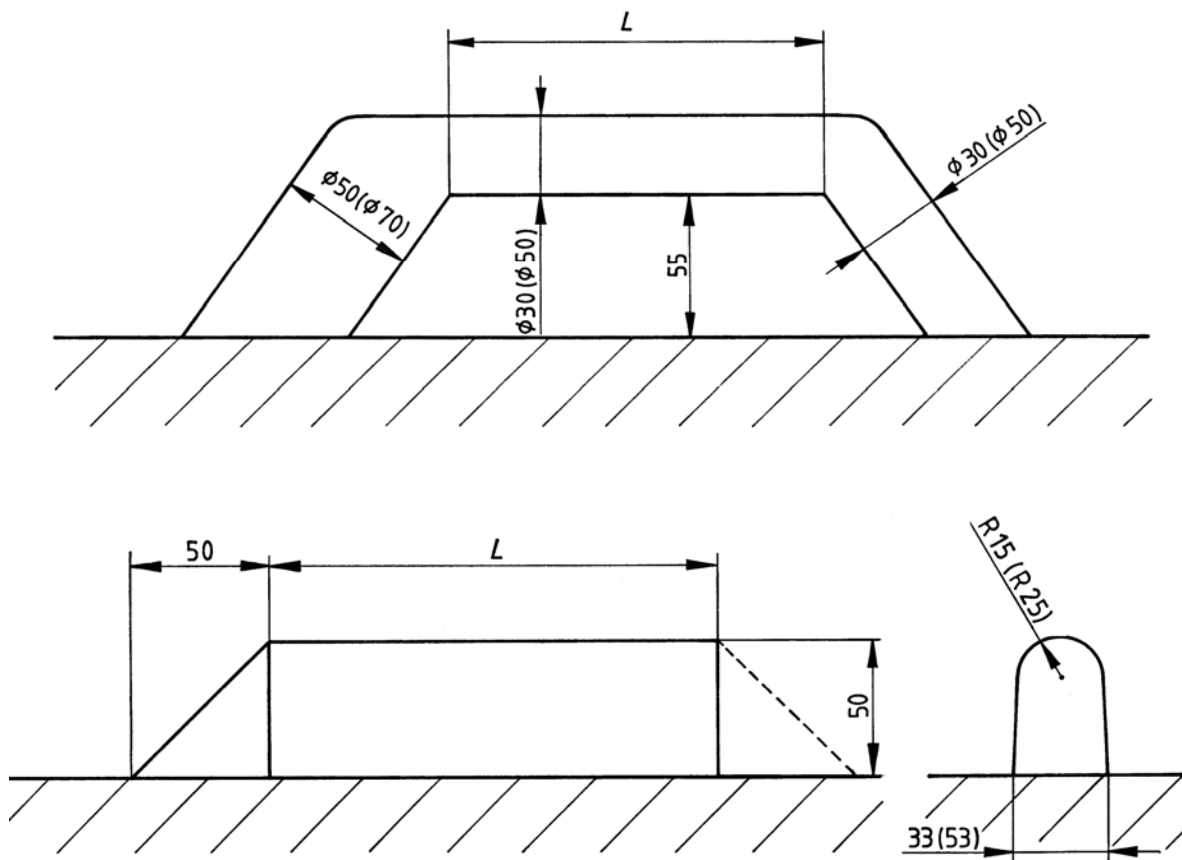
Slika 2.71. Oblik i dimenzije odvojeno lijevanog ispitnog uzorka za određivanje vlačnih svojstava sivog lijeva (sukladno HRN EN 1561 i ISO 185)

Odvojeno lijevani ispitni uzorci lijevaju se u okomitom položaju u kalupe koji su izrađeni od materijala od kojih su izrađeni i kalupi za lijevanje odljevaka. Kalupi mogu biti izrađeni tako da je moguće istovremeno lijevanje nekoliko uzoraka. Udaljenost između uzoraka u kalupu mora biti najmanje 50 mm (slika 2.71). Lijevani ispitni uzorak potrebno je odliti iz iste taljevine kao i odljevke. Dužina lijevanog ispitnog uzorka ovisi o dužini epruveta za ispitivanje vlačnih svojstava. Ostale dimenzije moraju biti prema slici 2.71. Ako se zahtijeva toplinska obrada odljevaka, potrebno je istu primijeniti i na ispitni uzorak.

Osim iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka, standardizirani uzorci za ispitivanje vlačnih svojstava sivog lijeva mogu se dobiti strojnom obradom iz prilivenih ispitnih uzoraka. Ovi uzorci trebali bi se primijeniti samo na osnovi dogovora kupca i proizvođača i to kod odljevaka s debljinom stjenke > 20 mm i masom > 200 kg. Norme HRN EN 1561 i ISO 185 propisuju dva oblika prilivenih ispitnih uzoraka – Tip 1 i Tip 2 (slika 2.72).

Tip i položaj prilivenog ispitnog uzorka na odljevku stvar je dogovora kupca i proizvođača. Sa slike 2.72 može se vidjeti da navedene norme propisuju dvije različite veličine za svaki tip prilivenog ispitnog uzorka. Manje dimenzije primjenjuju se kod odljevaka s debljinom stjenke < 80 mm, dok se prilivene probe većih dimenzija primjenjuju

kod odljevaka s debljinom stjenke  $\geq 80$  mm. Dužina prilivenog ispitnog uzorka ovisi o dužini epruvete za vlačna ispitivanja.



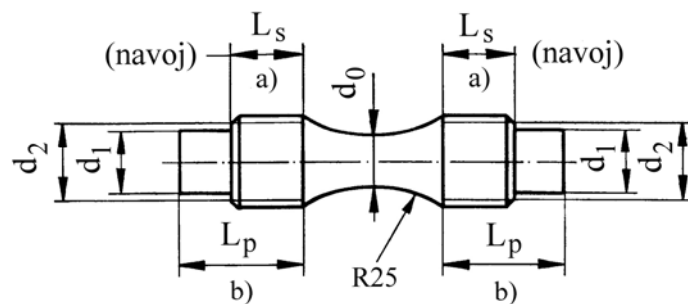
Slika 2.72. Oblik i dimenzije prilivenih ispitnih uzoraka za određivanje vlačnih svojstava sivog lijeva (sukladno HRN EN 1561 i ISO 185)

Kupac također može zahtijevati uzimanje ispitnog uzorka iz odljevka. Kod ovog slučaja kupac mora definirati mjesto uzimanja ispitnog uzorka u odljevku.

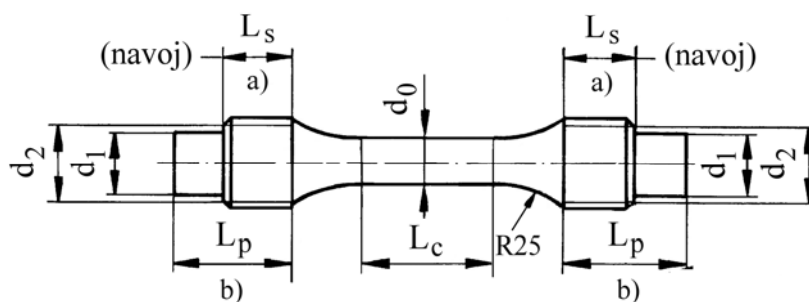
Ispitivanje vlačnih svojstava sivog lijeva provodi se prema normi HRN EN 10002-1 na uzorcima koji su izrađeni strojnom obradom iz odvojeno lijevanih (slika 2.71) ili prilivenih ispitnih uzoraka (slika 2.72). Na slici 2.73 prikazan je izgled ispitnih uzoraka za vlačna ispitivanja sivog lijeva, a u tablici 2.21 dane su njihove dimenzije.

Ispitivanje tvrdoće najčešće se provodi metodom po Brinellu jer je to najprikladnija metoda za sivi lijev. Da bi se dobile pouzdane vrijednosti tvrdoće preporučuje se upotreba kuglice većeg promjera te većih opterećenja. Sa smanjenjem veličine otiska smanjuje se i točnost mjerenja. Uvjeti i tijek ispitivanja tvrdoće prema Brinellu definirani su normom HRN EN 10003-1.

Ispitivanje tvrdoće može se provesti na odgovarajućem mjestu na odljevku koje je prethodno dogovoreno između kupca i proizvođača, na odvojeno lijevanom ispitnom uzorku ili na posebnom uzorku namijenjenom samo za ispitivanje tvrdoće koji je odliven zajedno s odljevkom na njegovoj površini (slika 2.74). Pozicija uzorka na odljevku definirana je dogovorom kupca i proizvođača. Ovaj ispitni uzorak može se primijeniti kod odljevaka s minimalnom debljinom stjenke 20 mm. Ispitni uzorak odreže sa odljevka i ispitivanje tvrdoće provede na reznoj površini.



a) uzorak s navojem  
b) uzorak s ravnim krajevima



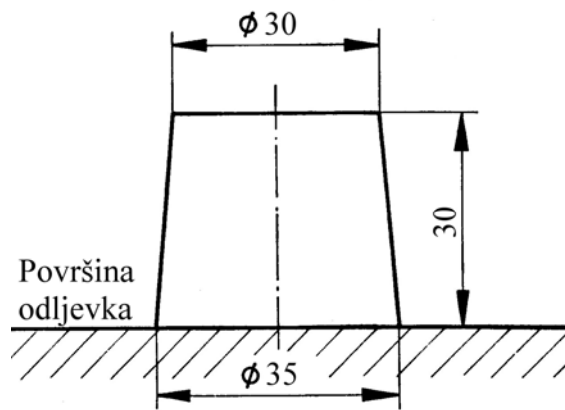
Slika 2.73. Uzorci za ispitivanje vlačnih svojstava sivog lijeva (sukladno HRN EN 1561 i ISO 185). Kod istog materijala i kvalitete, rezultati dobiveni na uzorcima A biti će nešto veći od onih dobivenih ispitivanjem na uzorcima B

Tablica 2.21. Dimenzije uzorka za ispitivanje vlačnih svojstava sivog lijeva (sukladno HRN EN 1561 i ISO 185)

Promjer $d_0$	Tip navoja kod uzorka s navojem	Dužina navoja, $L_s$ , mm	Promjer $d_1$ kod ravnih krajeva, mm	Uzorak s navojem A, ukupna dužina, mm	Uzorak B, $L_c$ , mm
$6 \pm 0,1$	M10	13	8	46	18
$8 \pm 0,1$	M12	16	10	53	24
$10 \pm 0,1$	M16	20	12	63	30
$12,5 \pm 0,1$	M20	24	15	73	36,5
$16 \pm 0,1$	M24	30	20	87	48
<b><math>20 \pm 0,1</math></b> <sup>*)</sup>	<b>M30</b>	<b>36</b>	<b>23</b>	<b>102</b>	<b>60</b>
$25 \pm 0,1$	M36	44	30	119	75
$32 \pm 0,1$	M45	55	40	143	96

$L_p > L_s$ , uskladiti prema stezaljkama na kidalici.

<sup>\*)</sup> – preferirane dimenzije ispitnih uzoraka (kod uzorka s navojem  $d_2 = 25$  mm,  $L_s$  (min.) = 30 mm, kod uzorka s ravnim krajevima  $L_p$  (min.) = 65 mm).



Slika 2.74. Priliveni uzorak za ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ako se odljevak toplinski obrađuje, ispitni uzorak se ne uklanja sa odljevka sve dok se ne provede toplinska obrada.

Na osnovi vrijednosti Brinellove tvrdoće može se s zadovoljavajućom tačnošću odrediti vlačna čvrstoća, jer kod sivog lijeva postoji vrlo dobra korelacija između ovih svojstava. U tu svrhu formirane su slijedeće jednačbe:

- a) kada je  $R_m \geq 196$  MPa,

$$HB = RH(100 + 0,438R_m) \quad (2.11)$$

- b) kada je  $R_m < 196$  MPa

$$HB = RH(44 + 0,724R_m) \quad (2.12)$$

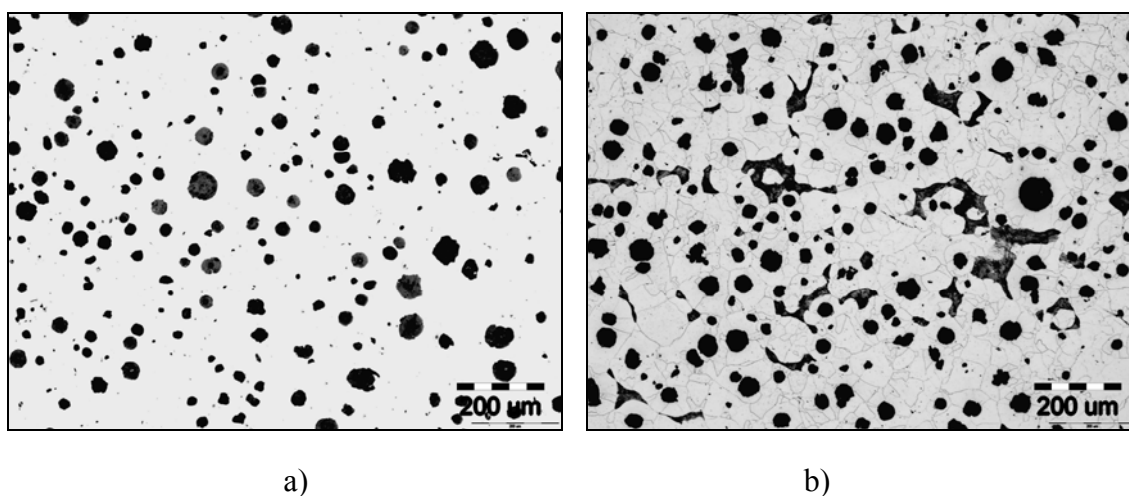
Faktor RH predstavlja relativnu tvrdoću. Vrijednosti ovog parametra kreću se od 0,8 – 1,2 i ovise o sirovinama i provedenom proizvodnom procesu. Unutar jedne ljevaonice navedene utjecajne varijable mogu se održavati približno konstantnima, a time i vrijednost faktora RH.



## 3. NODULARNI LIJEV

### 3.1 Općenito o nodularnom lijevu

Nodularni lijev (engl. *Spheroidal graphite cast iron; Ductile iron*) pripada porodici željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita (slika 3.1). Zbog specifičnog (nodularnog, kugličastog) oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava. Karakterizira ga visoko istezanje, visoka granica razvlačenja (u odnosu na sivi lijev), dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na nivou vrijednosti vlačne čvrstoće čeličnog lijeva. Vrijednosti vlačne čvrstoće nodularnog lijeva kreću se od 350 do >1500 MPa ovisno o legiranju i primijenjenoj toplinskoj obradi. Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev zamijenio je u mnogim aplikacijama sivi, čelični i temperni lijev.

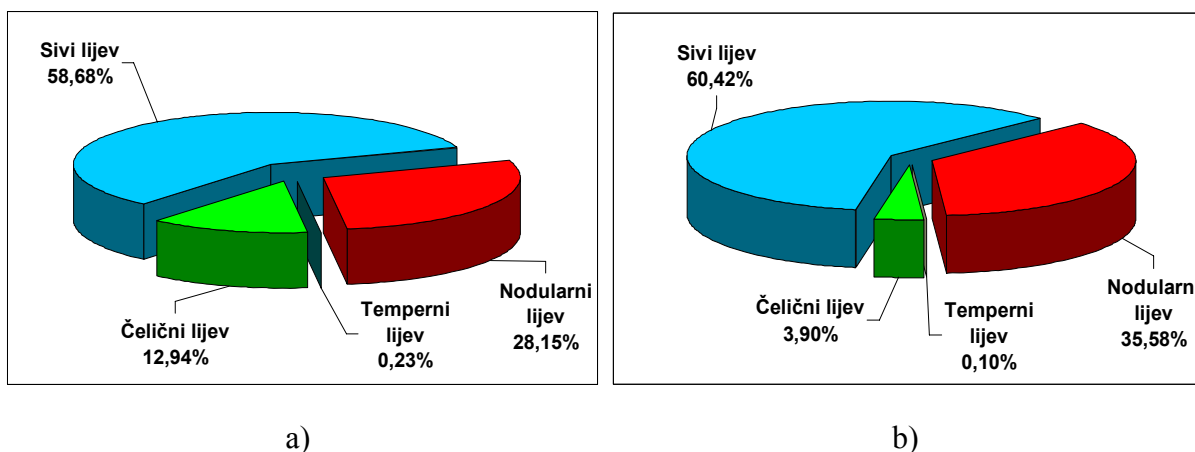


Slika 3.1. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital

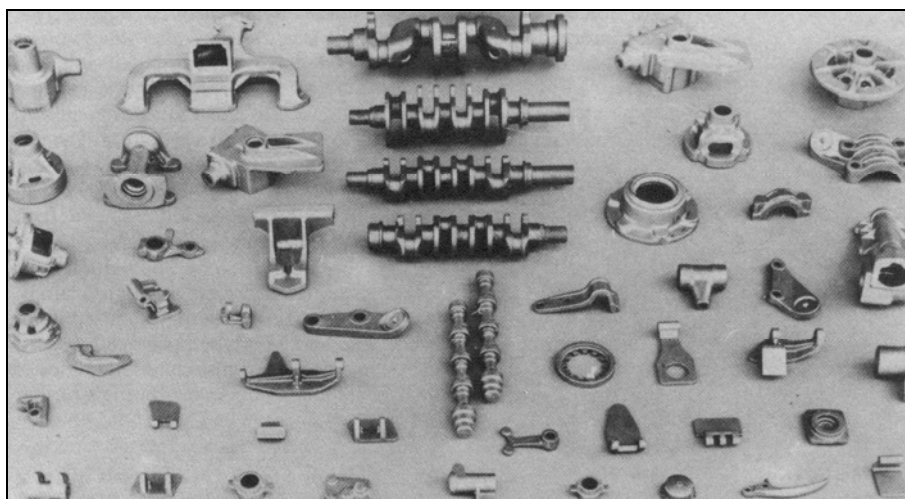
Proizvodnja nodularnog lijeva u svijetu bilježi iz godine u godinu pozitivan trend rasta. Tijekom 2005. godine u svijetu je proizvedeno 19,6 mil. t nodularnog lijeva, što predstavlja 28,15 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova (slika 3.2a). Razlog za ovaj impresivni rast u odnosu na ostale materijale leži svakako u njegovim svojstvima te u najnižim troškovima po jedinici čvrstoće u odnosu na konkurentne materijale. U Hrvatskoj je tijekom 2006. godine proizvedeno 18243 t odljevaka od nodularnog lijeva, što je za 240 % više u odnosu na 1990. godinu. Udio odljevaka od nodularnog lijeva u ukupnoj količini proizvedenih odljevaka od željeznih ljevova tijekom 2006. godine u Hrvatskoj iznosi 35,58 % (slika 3.2b).

Danas postoji više postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se nodularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne (polazne, bazne) taljevine modifikatorima (predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični kuglasti oblik grafita. Najčešće primjenjivani modifikatori su legure na bazi magnezija.

Više od 1/3 svjetske proizvodnje nodularnog lijeva odnosi se na izradu vodovodnih armatura (cijevi, ventili), ~ 1/3 primjenjuje se u industriji automobila i kamiona i 1/3 za razne konstrukcijske odljevke. Nodularni lijev je postigao najveći uspjeh u industriji automobila i kamiona, gdje postoji snažna konkurencija materijala obzirom na performanse i troškove. Na slici 3.3 prikazani su primjeri tipičnih odljevaka od nodularnog lijeva u modernom automobilu.



Slika 3.2. a) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u svijetu u 2005. godini, b) struktura proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova u Hrvatskoj u 2006. godini



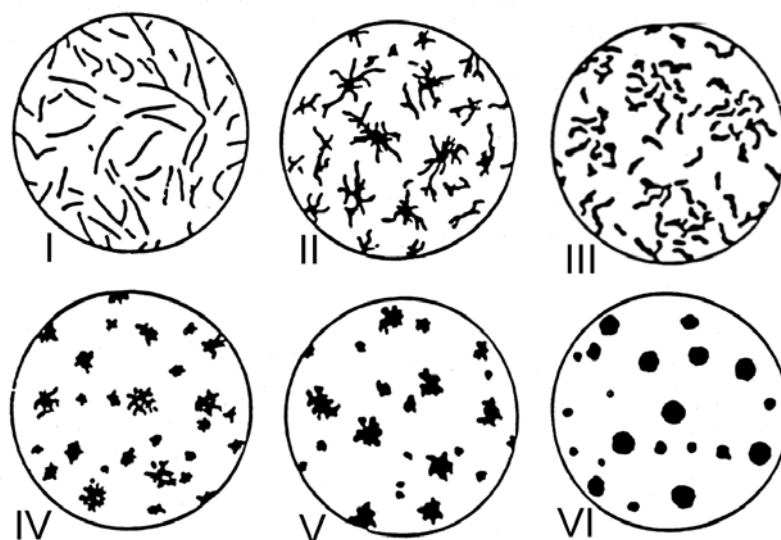
Slika 3.3. Primjeri tipičnih odljevaka od nodularnog lijeva upotrijebljenih u modernom automobilu

### 3.2 Klasifikacija nodularnog lijeva

Nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva čija je osnovna karakteristika izlučivanje grafita u tzv. nodularnom obliku sukladno HRN EN ISO 945:2002 ("Željezni lijev – označivanje mikrostrukture grafita"). Prema ovoj normi nodularni grafit označava se kao oblik VI. Morfologija nodularnog grafita prikazana je na slici 3.4. Označivanje ovog materijala (GJS) temelji se na HRN EN 1560:1997 ("Ljevarstvo – sustav označivanja željeznih ljevova").

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za nodularni lijev. U Hrvatskoj se za klasifikaciju nodularnog lijeva primjenjuje norma HRN EN 1563:1997. U osnovi radi se o preuzetoj europskoj normi EN 1563:1997, koja se primjenjuje u zemljama EU.

Prema HRN EN 1563:1997 nodularni lijev klasificira se u više kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. U tablici 3.1 prikazane su minimalne zahtijevane vrijednosti mehaničkih svojstava nodularnog lijeva za svaku pojedinu kvalitetu prema HRN EN 1563:1997.



Slika 3.4. Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN ISO 945:2002.  
Oblik VI – nodularni grafit

Tablica 3.1. Mehanička svojstva nodularnog lijeva izmjerena na ispitnim uzorcima koji su dobiveni mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka

Označivanje materijala		Vlačna čvrstoća $R_m$ , [MPa], min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , [MPa], min.	Istezanje pri lomu, [%], min.
Oznaka	Broj			
EN-GJS-350-22-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT <sup>1)</sup>	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT <sup>2)</sup>	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

<sup>1)</sup>LT - (*eng. low temperature*) – udarna žilavost određuje se pri niskim temperaturama

<sup>2)</sup>RT - (*eng. room temperature*) – udarna žilavost određuje se pri sobnoj temperaturi

Iz tablice 3.1 može se vidjeti da se oznaka pojedine kvalitete nodularnog lijeva sastoji od kombinacije brojeva i slova. Npr. u oznaci EN-GJS-350-22-LT, EN se odnosi na europsku normu, slovo G označava lijev, slovo J željezo, slovo S označava nodularni grafit, broj 350 predstavlja minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće, a 22 predstavlja minimalnu vrijednost istezanja. Poslije minimalne vrijednosti istezanja u oznaci može biti i slovo U koje označava da se radi o ispitnom uzorku koji je lijevan s odljevkom ili slovo S koje označava da se radi o posebno lijevanom uzorku.

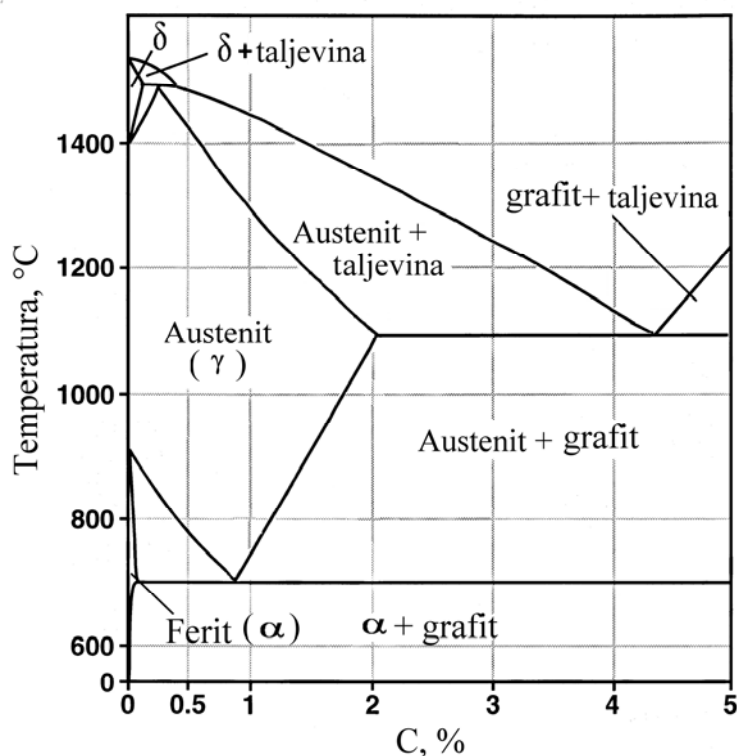
U tablici 3.2 dane su propisane minimalne vrijednosti udarnog rada loma (udarne žilavosti) nodularnog lijeva prema HRN EN 1563:1997. Prikazane su vrijednosti udarnog rad loma pri sobnoj temperaturi te pri  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tablica 3.2. Minimalne vrijednosti udarnog rada loma nodularnog lijeva mjerene na ispitnim uzorcima s V-zarezom koji su dobiveni mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka

Označivanje materijala		Minimalna vrijednost udarne radnje loma, J					
Oznaka	Broj	pri sobnoj temp. ( $23\pm 5$ ), $^{\circ}\text{C}$		pri $(-20\pm 2)$ , $^{\circ}\text{C}$		pri $(-40\pm 2)$ , $^{\circ}\text{C}$	
		sred. vrij. 3 mjer.	pojed. vrijed.	sred. vrij. 3 mjer.	pojed. vrijed.	sred. vrij. 3 mjer.	pojed. vrijed.
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	-	-	-	-	12	9
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	17	14	-	-	-	-
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	-	-	12	9	-	-
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	14	11	-	--	-	-

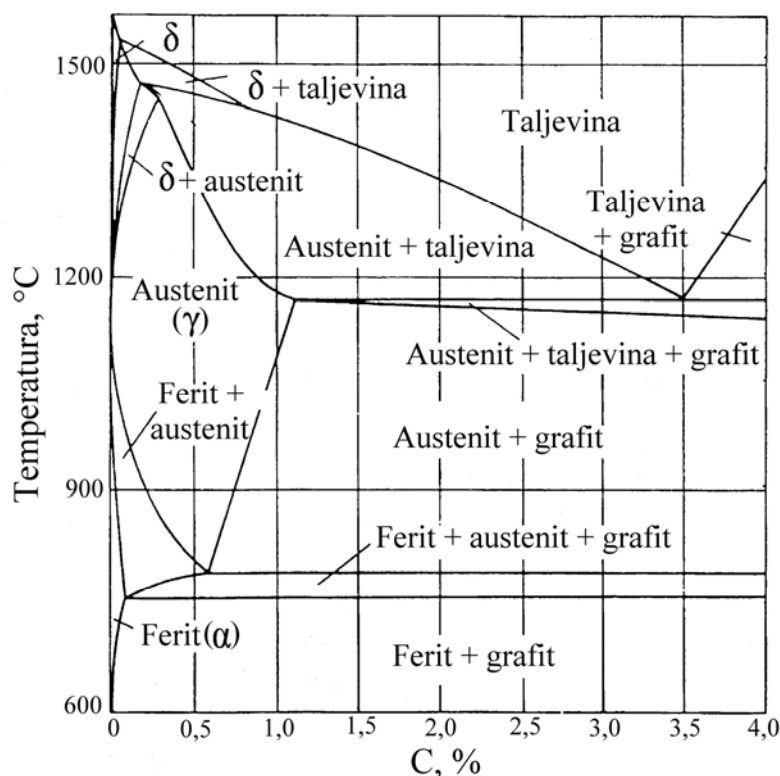
### 3.3 Skrućivanje nodularnog lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih lijevova s grafitom je ravnotežni dijagram Fe-C (slika 3.5). Nodularni lijev, kao i ostale željezne lijevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.



Slika 3.5. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C

Od svih prisutnih elementa (osim ugljika) u nodularnom lijevu, silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si

Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1,0 % silicija snižava eutektički sastav za 0,31 % ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupnja zasićenja ( $S_c$ ):

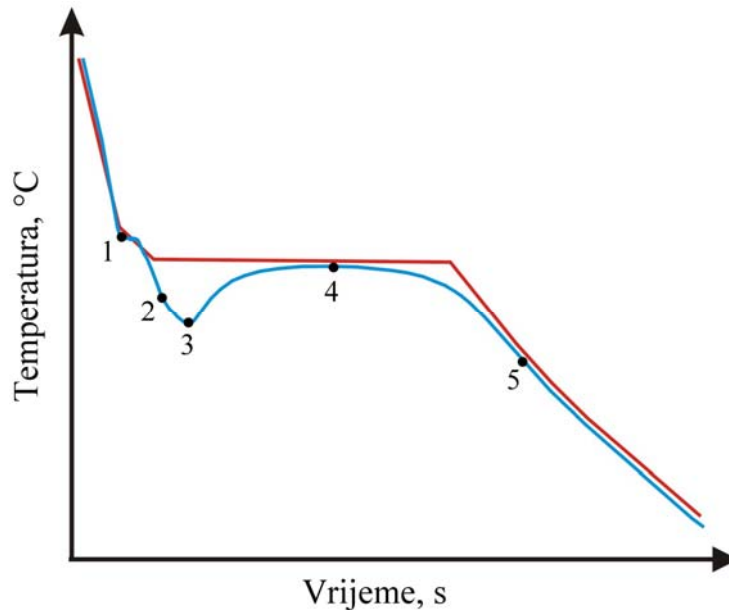
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (3.1)$$

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (3.2)$$

Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3, govorimo o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $< 4,3$  radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $> 4,3$  govorimo o nadeutektičkom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičkih sastava je primarni grafit (krupne i grube nodule).

Kada je  $S_c = 1$  govorimo o eutektičkom sastavu, Ukoliko je  $S_c < 1$  govorimo o podeutektičkom sastavu, a u slučaju  $S_c > 1$  o nadeutektičkom sastavu.

Promjene tijekom skrućivanja mogu se pratiti snimanjem krivulja hlađenja, odnosno toplinskom analizom. Krivulja hlađenja prikazuje promjenu temperature s vremenom tijekom skrućivanja. Na slici 3.7 prikazana je idealna (crvena linija) i stvarna (plava linija) krivulja hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva.



Slika 3.7. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog nodularnog lijeva

Kad se taljevina nodularnog lijeva ulije u kalup, ona se kontinuirano hladi sve dok se ne dostigne likvidus temperatura  $T_L$  (točka 1, slika 3.7), kad nukleira primarni austenit, koji tijekom daljeg hlađenja raste u dendritnom obliku. Veličina dendrita određena je ekvivalentom ugljika, stupnjem zasićenja i brzinom skrućivanja. Niži ekvivalent ugljika rezultira većim dendritima, što je povezano sa širim intervalom skrućivanja. Bržim hlađenjem promovira se stvaranje finijih (sitnijih) dendrita. Tijekom izlučivanja primarnog austenita višak ugljika odbacuje se u taljevinu.

Preostala taljevina nastavlja s kontinuiranim hlađenjem sve do dostizanja temperature početka eutektičkog skrućivanja  $T_{ES}$  (točka 2), gdje između dendritnih grana u taljevini obogaćenoj ugljikom započinje nukleacija grafita i stvaranje eutektika. Kod temperature  $T_{ES}$  u taljevini je dostignut eutektički sadržaj ugljika od 4,3 %. Dakle, po dostizanju eutektičke koncentracije odvija se pretvorba preostale taljevine u dvije krutine – jedna je eutektički austenit, a druga grafit. Umjesto grafita može nastati karbid  $Fe_3C$ , što ovisi o uvjetima pri skrućivanju. Karbidi imaju štetan utjecaj na svojstva i potrebno je izbjeći njihovo stvaranje.

Kod temperature  $T_{ES}$  neće se taljevina u potpunosti transformirati u dvije krute faze zbog nedostatka centara nukleacije, tj. klica u taljevini. Zbog toga temperatura taljevine nastavlja s padom (područje na krivulji hlađenja između točaka 2 i 3) sve dok broj centara s kojih se pojavljuje rast eutektika i brzina rasta ne budu takvi da toplina oslobođena skrućivanjem eutektika (latentna toplina ili entalpija skrućivanja) ne prijeđe brzinu (intenzitet) odvođenja topline od strane kalupa (točka 3 – temperatura eutektičkog pothlađenja ( $T_{EP}$ )). U biti govorimo o pothlađenju taljevine, koje predstavlja pokretačku silu nukleacije. Kod točke 3 prestaje pothlađenje i zbog povoljnih nukleacijskih uvjeta odvija se razdvojeni rast eutektika austenit-nodularni grafit. Razdvojeni rast grafita i austenita posljedica je različitih mehanizama rasta.

Tijekom skrućivanja globule austenit-nodularni grafit povezuju se međusobno te s dendritima austenita. U ovakvom nasumičnom rasporedu, pojedinačne grupe globula austenit-nodularni grafit međusobno su odvojene taljevinom. Ove grupe nazivaju se eutektičke ćelije. Kako skrućivanje napreduje, taljevina se osiromašuje ugljikom.

Budući da se eutektičko skrućivanje odvija u temperaturnom intervalu, s napredovanjem skrućivanja mijenja se sastav nastalog austenita i taljevine. Elementi prisutni u taljevini koji segregiraju pozitivno (u taljevini) koncentriraju se tijekom skrućivanja u intercelijastim područjima koja posljednja skrućuju. Obzirom da toplina oslobođena tijekom skrućivanja eutektika premašuje toplinu odvedenu od strane kalupa, dolazi do povišenja temperature pri skrućivanju (područje od točke 3 do točke 4).). Ovaj fenomen poznat je pod nazivom rekalescencija. Točka 4 označava se kao temperatura eutektičke rekalescencije ( $T_{ER}$ ).

Kako se eutektičko skrućivanje bliži završetku, postepeno se smanjuje oslobađanje entalpije skrućivanja i ponovo dolazi do pada temperature (područje između točaka 4 i 5). Eutektičko skrućivanje završava pri temperaturi solidusa  $T_S$  (točka 5).

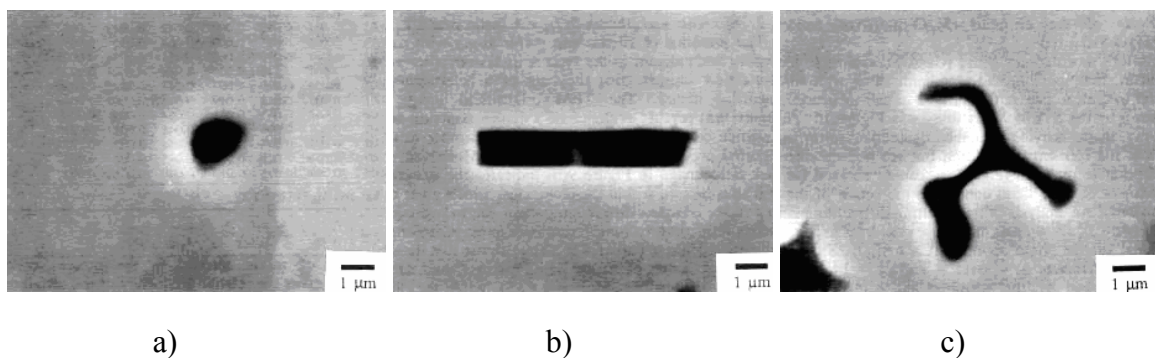
Skrućivanje nodularnog lijeva nadeutektičkog sastava odvija se na identičan način s razlikom da je prva faza koja se izlučuje grafit u nodularnom obliku. Kada se sadržaj ugljika u taljevini i temperatura dovoljno snize, preostala taljevina skrućuje u obliku eutektičkih čelija.

### 3.4 Mehanizam nukleacije nodularnog grafita

Tijekom povijesti formulirane su mnoge teorije heterogene nukleacije grafita: grafitna teorija, teorija Si-karbida, teorija karbida sličnih solima i teorija sulfid/oksid. Najznačajnija postavka teorije sulfid/oksid je da se nukleacija grafita pojavljuje na česticama sulfida, oksida ili nitrada koje su nastale nakon obrade taljevine. Na osnovi ovih saznanja, T. Skaland *et al.* tijekom 90-tih godina prošlog stoljeća došli su do novih spoznaja o mehanizmu nukleacije nodularnog grafita i djelovanju cjepiva u nodularnom lijevu.

U grafitnim nodulama i metalnoj osnovi prisutni su razni uključci. Uključci u nodularnom lijevu mogu se podijeliti u tri glavne kategorije (slika 3.8):

- tip A uključaka, koji sadrže Mg, Ca, S i Si kao glavne konstituirajuće elemente,
- tip B uključaka, koji sadrže Mg i Si kao glavne konstituirajuće elemente,
- tip C uključaka, koji sadrže Mg, P i elemente rijetkih zemalja (npr. Ce, La) kao glavne konstituirajuće elemente.

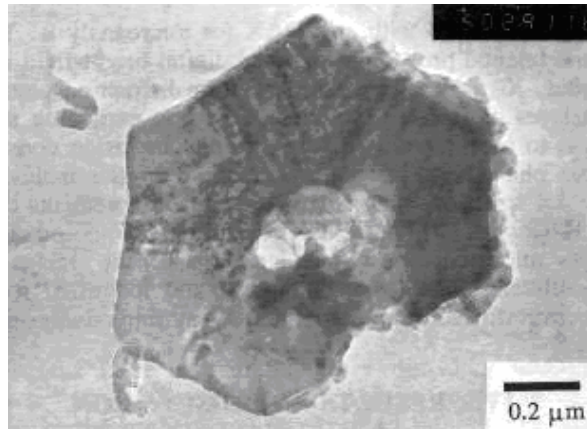


Slika 3.8. Snimke karakterističnih morfologija uključaka u nodularnom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM): a) A tip, b) B tip, c) C tip

Sa slike 3.8 može se vidjeti da su uključci A tipa uglavnom uglate ili fasetirane čestice smještene u centru grafitnih nodula kao i u metalnoj osnovi. Uključci B tipa su pravokutne čestice koje se uglavnom pojavljuju u metalnoj osnovi. Uključci C tipa su velike, nepravilno oblikovane čestice smještene u interdendritnim područjima. Uključci A i B tipa produkti su obrade magnezijem. Posljednja grupa uključaka, C tip, vjerojatno potječe od reakcije između

otopljenog magnezija i fosfora tijekom skrućivanja i zbog toga je od manjeg značenja u ovom kontekstu.

Opsežnija analiza pokazala je da uključci A tipa imaju dupleks strukturu (slika 3.9). jezgru uključka čini sulfid, a vanjsku ovojnicu oksid.

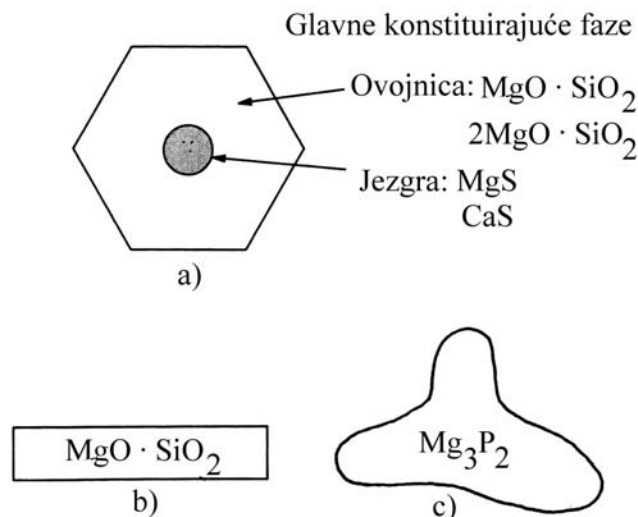


Slika 3.9. Snimka A tipa uključka transmisionim elektronskim mikroskopom (TEM)

Sulfidna jezgra sastoji se od magnezija, kalcija i sumpora (najvjerojatnije MgS i CaS), dok vanjska ovojnica sadrži uglavnom magnezij i silicij (najvjerojatnije enstatit ( $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ) ili forsterit ( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ )).

Za razliku od A tipa uključaka, uključci B tipa vjerojatno su jednofazne čestice enstatita ( $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Ovi oksidi izlučuju se u homogenom obliku tijekom primarne faze dezoksidacije zbog manjka moćnih MgS i CaS katalizatorskih čestica u taljevini.

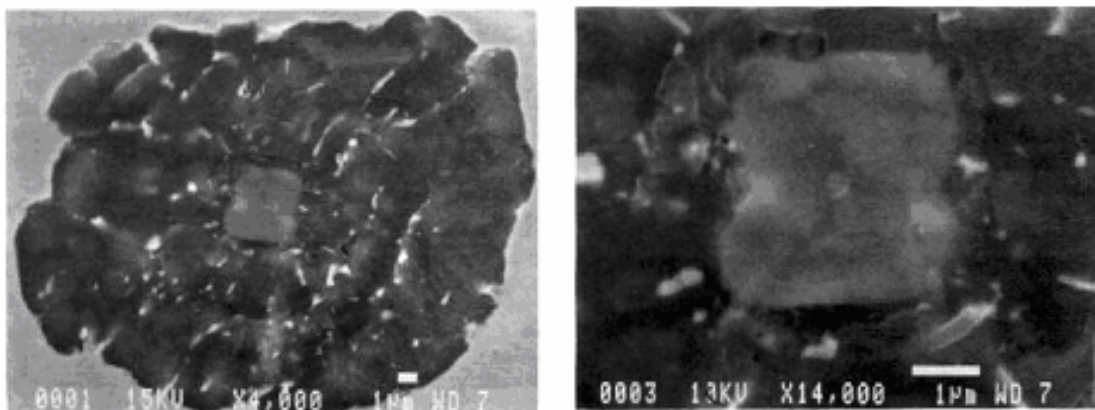
Na osnovu prethodno iznesenih spoznaja na slici 3.10 shematski su prikazana tri tipa uključaka koji nastaju u nodularnom lijevu nakon obrade magnezijem.



Slika 3.10. Shematski prikaz glavnih konstituirajućih faza u uključcima A, B i C tipa nakon nodularizacije: a) A tip uključka, b) B tip uključka i c) C tip uključka

Nukleacija grafita u nodularnom lijevu odvija se heterogeno na česticama (uključcima) koje se nalaze u taljevini. Evidentno je sa snimaka na slici 3.11 da se nukleacija grafita uglavnom povezuje s A tipom uključaka. Međutim, ponekad se može zapaziti B tip uključaka ( $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ) u centru grafitnih nodula.

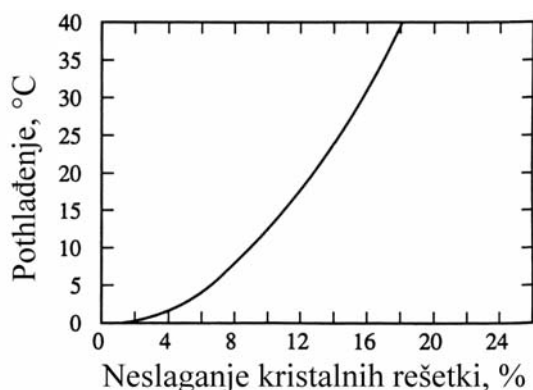




Slika 3.11. Nukleacije grafita na ukljućcima A tipa (snimke načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM))

Prisustvo ovih faza nije dovoljan kriterij za stvaranje grafita, zbog velikog neslaganja rešetki grafita i ukljućaka (podloga ili supstrata). Zbog toga je potrebna modifikacija kemizma površine ukljućaka dodatkom manjinskih elemenata putem cjepiva da bi se ostvarilo bolje slaganje kristalnih rešetki i veći broj nodula.

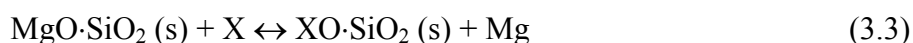
U praksi, pothlađenje  $\Delta T$  (koje je mjera energetske barijere heterogene nukleacije, odnosno pokretačka sila nukleacije) povećava se jednoliko s povećanjem vrijednosti planarnog neslaganja rešetke  $\delta$ , kao što je pokazano na slici 3.12. Najmoćnije katalizatorske čestice su one koje osiguravaju dobro površinsko slaganje između nukleanta (podloge, supstrata) i grafita.

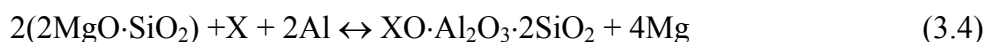


Slika 3.12. Odnos pothlađenja i neslaganja kristalnih rešetki kod nodularnog lijeva

Budući da tipično pothlađenje tijekom skrućivanja nodularnog lijeva varira od 2 do 10 °C (ovisno o debljini stjenke), sa slike 3.12 može se vidjeti da je plošno neslaganje kristalnih rešetki cjepiva i grafita reda veličine 3 do 10 %.

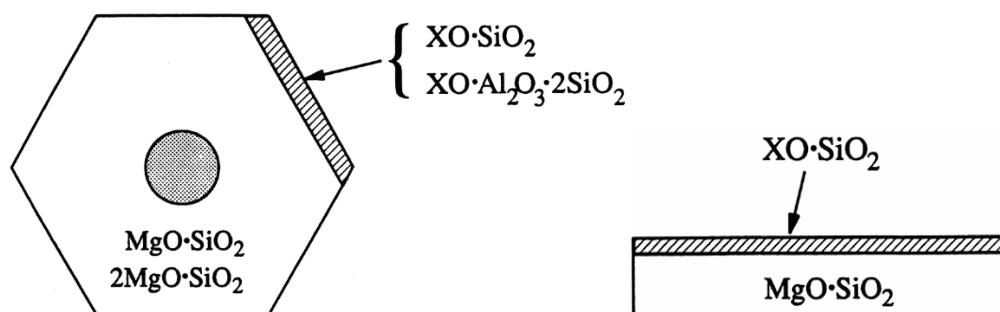
Nakon cijepljenja legurom FeSi koja sadrži kalcij, barij ili stroncij, A i B tip ukljućaka neznatno će promijeniti kemijski sastav zbog stvaranja novih produkata reakcije na površini ukljućaka, odnosno dolazi do modifikacije površine ukljućaka. Stvaranje ovakvih kompleksnih silikata može se pojaviti kao rezultat reakcije između kalcija, stroncija ili barija i otopljenog kisika i silicija u taljevini željeznog lijeva ili reakcijom zamjene s magnezijem.





gdje X označava kalcij, stroncij ili barij.

XO·SiO<sub>2</sub> faze mogu nastati na površini A i B tipa uključaka (slika 3.13), ako su kalcij, stroncij i barij dodani u dovoljnim količinama putem cjeviva.



Slika 3.13. Shematski prikaz promjene sastava na površini A i B tipa uključaka nakon cijepljenja

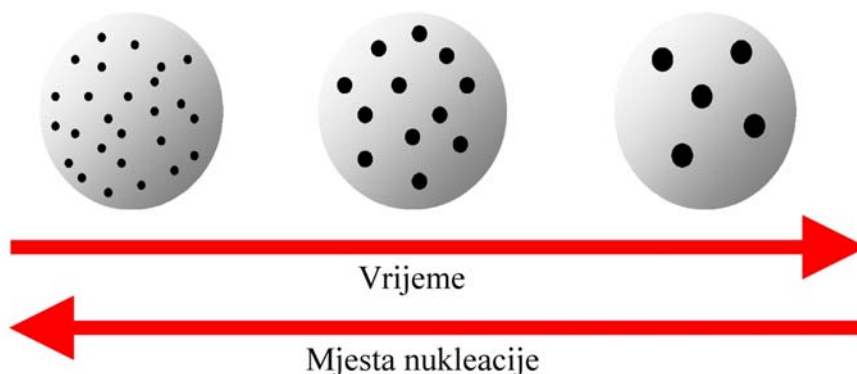
Nastajanje XO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> uglavnom je povezano s A tipom uključaka i ovisi o postojanju slobodnog aluminija u taljevini. Različiti silikati kalcija, stroncija i barija, XO·SiO<sub>2</sub> i XO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub> tipa, su faze koje će pospješiti stvaranje grafita tijekom skrućivanja, jer posjeduju istu heksagonalnu strukturu kristalne rešetke kao grafit (dobro slaganje s grafitom). Imajući u vidu ove činjenice nije iznenađujuće da većina komercijalnih cjeviva za nodularni lijev sadrži aluminij (uobičajena koncentracija 0,5 i 1,0 mas. % Al).

Previsok sadržaj kalcija, stroncija ili barija u cjevivima nije poželjan zbog negativnog utjecaja. Broj nodula povećava se s povećanjem sadržaja kalcija, stroncija ili barija do određenog nivoa, nakon čega s daljnjim povećanjem sadržaja navedenih elemenata dolazi do pada broja nodula. Ova situacija proizlazi vjerojatno iz promjene kemijskog sastava produkata reakcije koji u tom slučaju ne osiguravaju dobro površinsko slaganje podloge i grafita i zbog toga će sprječavati izlučivanje grafita u nodularnom lijevu.

### 3.4.1 Pogrubljenje uključaka

Značajno pogrubljenje uključaka pojavljuje se unutar vremenskog intervala između cijepljenja i skrućivanja. Pogrubljenjem uključaka ne mijenja se volumni udio nemetalnih uključaka, već dolazi do smanjenja broja uključaka (stvaraju se krupniji uključci), odnosno smanjenja broja potencijalnih mjesta za nukleaciju grafita.

Pogrubljenje uključaka u željeznim lijevovima odvija se Ostwaldovim sazrijevanjem koje predstavlja difuzijski kontrolirani proces gdje veće čestice rastu na račun manjih (slika 3.14). Pokretačka sila osigurana je smanjenjem ukupne granične površine čestica/taljevina, koja u pravilu smanjuje ukupnu slobodnu energiju sustava.



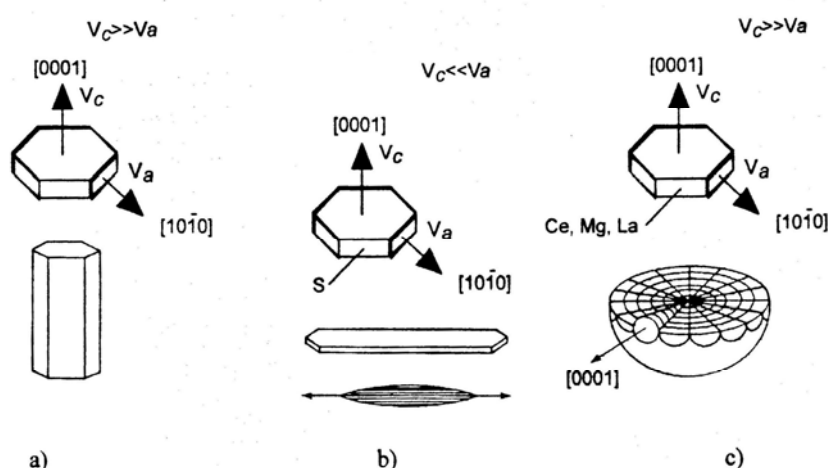
Slika 3.14. Shematski prikaz pogrubljenja uključaka Ostwaldovim sazrijevanjem

### 3.5 Mehanizam rasta nodularnog grafit

Grafrit spada u kategoriju kristala s fasetiranom graničnom površinom. Kristalna rešetka grafitu sastoji se od heksagonalne mreže atoma ugljika u slojevitoj konfiguraciji.

Proces nastajanja različitih oblika grafitu u željeznim ljevovima odvija se kao rezultat nukleacije i rasta. Rast kristala grafitu iz taljevine u svezi je sa strukturom granične površine i kinetikom pripajanja atoma ugljika na tu površinu.

Nakupine nečistoća koje segregacijom na graničnu površinu smanjuju međufaznu energiju pospješuju mobilnost granične površine. Kisik i sumpor predstavljaju nečistoće koje su uvijek prisutne u željeznim ljevovima. Kao površinski aktivni elementi, kisik i sumpor adsorbiraju se na površinu prizme (površina visoke energije) pri čemu ta površina postaje najgušće zaposjednuta atomima, što doprinosi smanjenju površinske energije i stvaranju kristalografski nefasetirane površine, odnosno stvaranju uvjeta za nesmetano priključenje atoma ugljika iz taljevine. U tom slučaju grafrit raste u smjeru *a*-osi pripajanjem atoma ugljika iz taljevine pri čemu se debljina stvorenog listića (lamelle) ne mijenja (slika 3.15b).



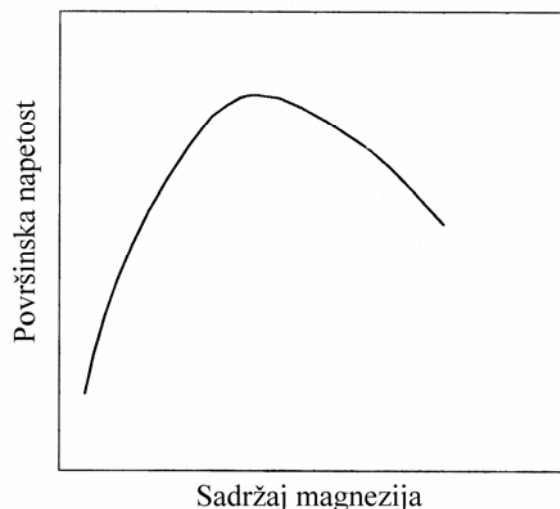
Slika 3.15. Promjena brzine rasta grafitu zbog adsorpcije stranih atoma: a) bez prisutnosti nečistoća, b) u prisutnosti površinski aktivnih elemenata, kao što su sumpor i kisik, adsorbiranih na površini prizme, c) u prisutnosti nodularizirajućih elemenata (magnezij, cerij, lantan)

Za razliku od sivog lijeva, kod nodularnog lijeva u taljevinu se dodaje magnezij u obliku raznih predlegura (modifikacija oblika grafita). Magnezij ima visok afinitet prema kisiku i sumporu, zbog čega dolazi do stvaranja stabilnih sulfida i oksida. Na taj način se ograničava rast kristala grafita, jer uklanjanje površinski aktivnih elemenata (kisik i sumpor) dovodi do stvaranja fasetirane granične površine kruto-tekuće. Fasetirana granična površina ima slabu mobilnost, zbog čega je za rast kristala potrebna veća pokretačka sila, odnosno veće pothlađenje. Kristali grafita tada rastu u smjeru *c*-osi ili u smjeru okomito na ravninu baze pri čemu iz taljevine nastaje nodularni grafit (slika 3.15c). U slučaju fasetirane, glatke granične površine, u Fe-Si-C + (Mg) sustavu djeluje mehanizam spiralnog rasta grafita. Kod nodularnog lijeva, brzina spiralnog mehanizma rasta grafita je nekoliko puta manja od brzine rasta austenita, što rezultira razdvojenim eutektičkim rastom. Spiralni rast grafita zahtijeva veće kinetičko pothlađenje.

Do danas je razvijeno mnogo teorija o mehanizmu rasta nodularnog grafita. U nastavku biti će iznesene osnovne postavke teorija koje danas imaju najširu primjenu. To su teorije površinske napetosti i teorija rasta grafita preko austenitne ovojnice.

### 3.5.1 Teorije površinske napetosti

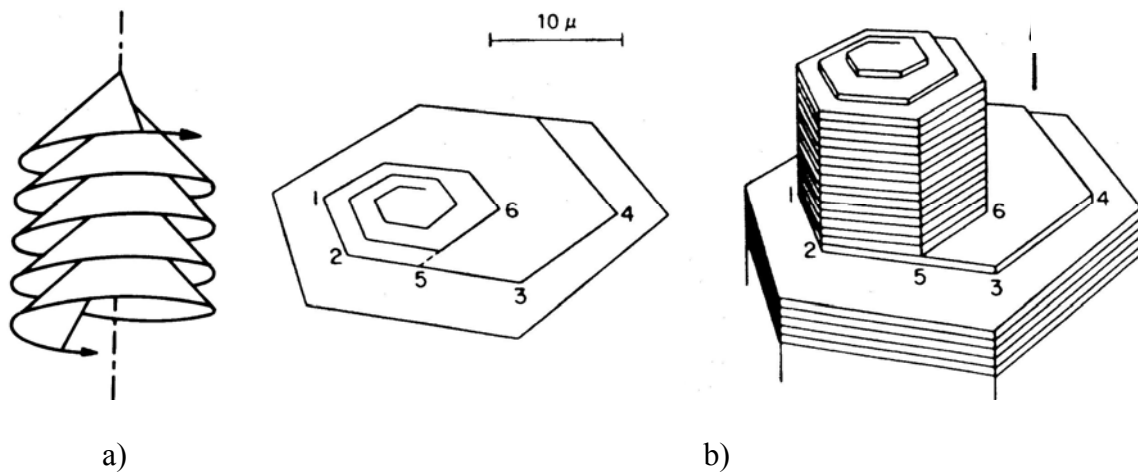
Teorije površinske napetosti povezane su s utjecajem magnezija na površinsku napetost taljevine željeznog lijeva (slika 3.16).



Slika 3.16. Promjena površinske napetosti taljevine željeznog lijeva dodatkom magnezija

Dodatak magnezija djeluje na porast površinske napetosti do neke maksimalne vrijednosti pri čemu, najvjerojatnije kao rezultat interakcije između magnezija i otopljenog sumpora, nastaje spoj MgS. Poznato je da otopljeni sumpor smanjuje površinsku napetost tekućeg željeza. Međutim, sumpor je uklonjen dodatkom magnezija. Pod uvjetima visoke površinske napetosti, nodule su mnogo stabilnije od listića grafita istog volumena zbog manje ukupne površine.

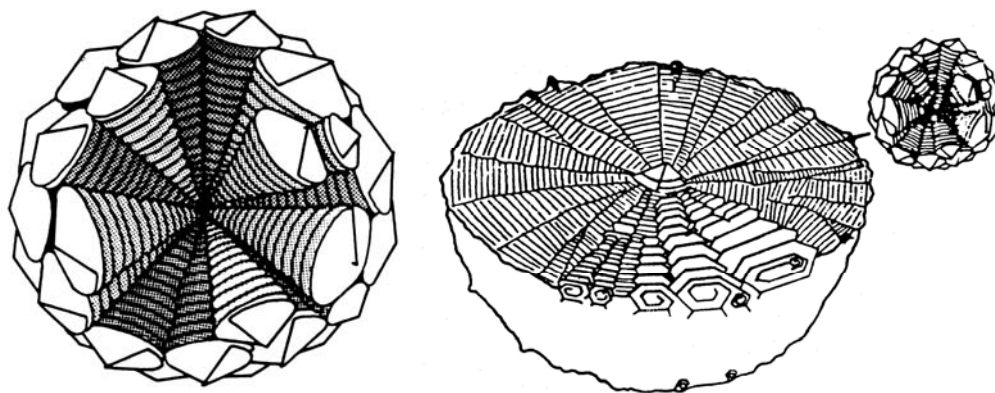
Grafit, kao i neki drugi materijali, može pokazati fenomen poznat kao spiralni (krivolinijski) kristalni rast (slika 3.17a). Kristali rastući na podlozi čine spirale (krivulje) kao rezultat naprezanja između dva kristala. Stvarni rast odvija se u smjeru *a*-osi s prirastom u smjeru *c*-osi pomoću spiralnog mehanizma rasta (slika 3.17b).



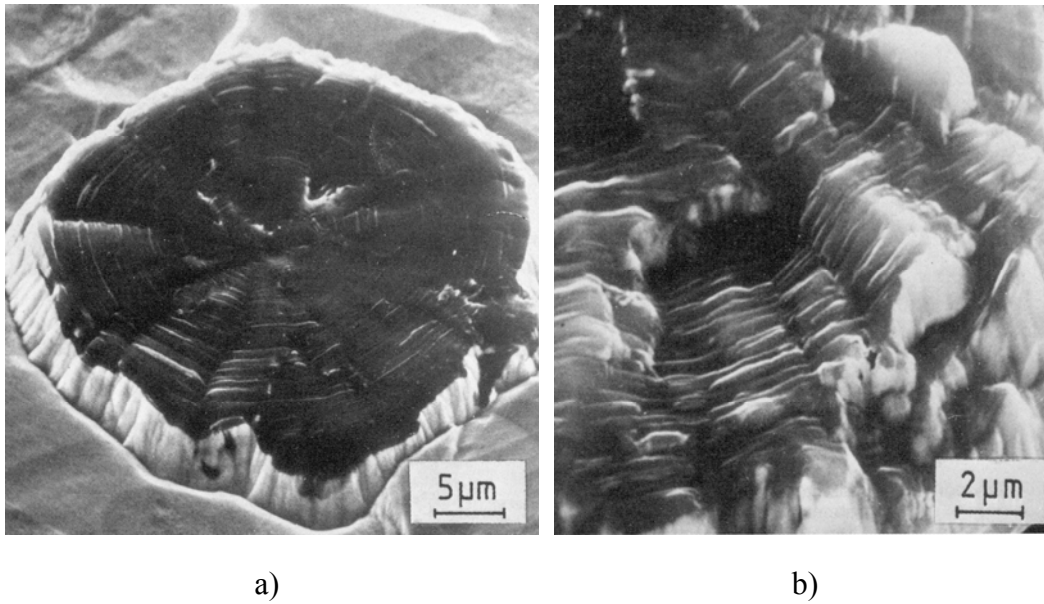
Slika 3.17. a) spiralni rast grafita, b) rast bloka kristala polazeći od grafitne lamele

Pokretačka sila, potrebna za dvodimenzionalnu nukleaciju novog sloja na površini prizme grafita daleko je veća od one potrebne za spiralni rast na površini baze, što uvjetuje promjenu kinetike rasta granične površine grafita iz smjera  $a$ -osi (površina prizme) u smjer  $c$ -osi (površina baze), rezultirajući stvaranjem grafitne nodule.

Predloženo je nekoliko modela rasta grafitnih nodula koji se zasnivaju na principu spiralnog rasta. Prema najčešće primjenjivanom modelu (slika 3.18) nodule rastu kao serija koničnih spirala iz zajedničkog nukleusa, stvarajući tako unutarnju strukturu sferoida (nodule). To potvrđuju snimke strukture grafitne nodule prikazane na slici 3.19.



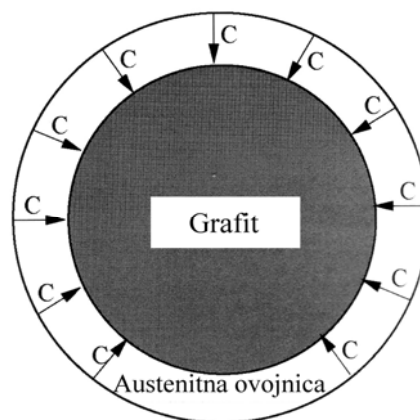
Slika 3.18. Strukturni model rasta nodularnog grafita. Grafitna nodula sastavljena je od koničnih spirala, kao što je pokazano na slici 3.17a



Slika 3.19. Snimka strukture grafitne nodule, SEM: a) povećanje 2000x, b) povećanje 5000x

### 3.5.2 Teorija rasta grafita preko austenitne ovojnice

Prema ovoj teoriji grafitne nodule nakon dostizanja određene dimenzije obavijaju se (okružuju) austenitnom ovojnicom. Daljnji rast odvija se difuzijom ugljika od taljevine kroz austenitnu ovojnicu do postojeće nodule. Shematski prikaz ovog procesa dat je na slici 3.20.



Slika 3.20. Shematski prikaz mehanizma rasta nodularnog grafita preko austenitne ovojnice

U strukturi nodularnog lijeva često su pored idealnih oblika nodula prisutni i različiti tipovi (oblici) grafitnih nakupina, odnosno degenerirani oblici grafita. Promjena oblika nodula ovisi u velikoj mjeri o postupku stvaranja austenitnog ovoja oko grafitnih nodula.

Austenitni ovoj može se podijeliti u tri osnovna oblika:

- brzo zatvoreni tip,
- sporo zatvoreni tip,
- otvoreni tip.

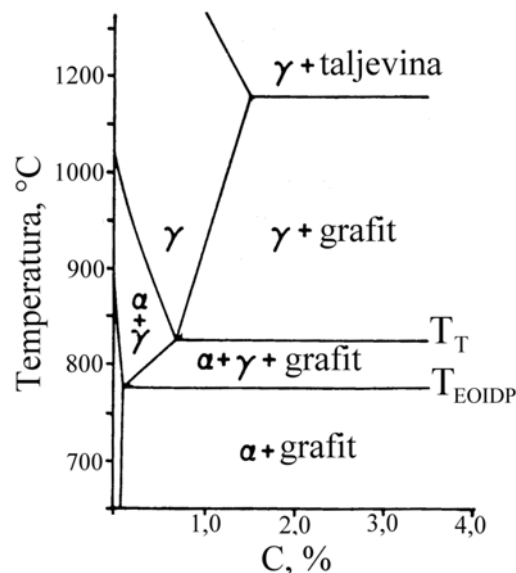
Brzo zatvoreni tip austenitne ovojnice rezultira stvaranjem pravilnih nodula. Pri sporom tipu zatvaranja austenitnog ovoja, metal je u kanalima (ostatak taljevine između austenitnih kristala) duže tekuć. Preostala taljevina ima direktan kontakt s nodulama, što rezultira stvaranjem degeneriranih oblika grafita. S daljnjim napredovanjem skrućivanja dolazi do skrućivanja taljevine u kanalima, što rezultira potpunim obavijanjem nodula čvrstom austenitnom ovojnicom. Što je duže austenitna ovojnica otvorena to se više razvijaju degenerirani oblici grafita.

Kad metal u kanalu ostaje tekuć sve do kraja skrućivanja, prisutan je tip otvorene austenitne ovojnice. Posljedica je još jača degeneracija grafita.

### 3.6 Pretvorbe u krutom stanju

Mikrostruktura željeznih ljevova određena je tijekom skrućivanja i tijekom naknadnih pretvorbi u krutom stanju (eutektoidna pretvorba). Mikrostruktura tipičnog nodularnog lijeva u lijevanom stanju pri sobnoj temperaturi sastoji se od grafitnih nodula i metalne osnove, koja predstavlja smjesu ferita ( $\alpha$ ) i perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). U većini slučajeva grafitne nodule okružene su feritom, a ostatak metalne osnove je perlit. Udio ferita, odnosno perlita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja kroz područje eutektoidne pretvorbe te volumnom udjelu i broju grafitnih nodula. Budući da mehanička svojstva nodularnog lijeva u velikoj mjeri ovise o mikrostrukтури, očito je da se varijacijama u mikrostrukтури može postići široko područje mehaničkih svojstava.

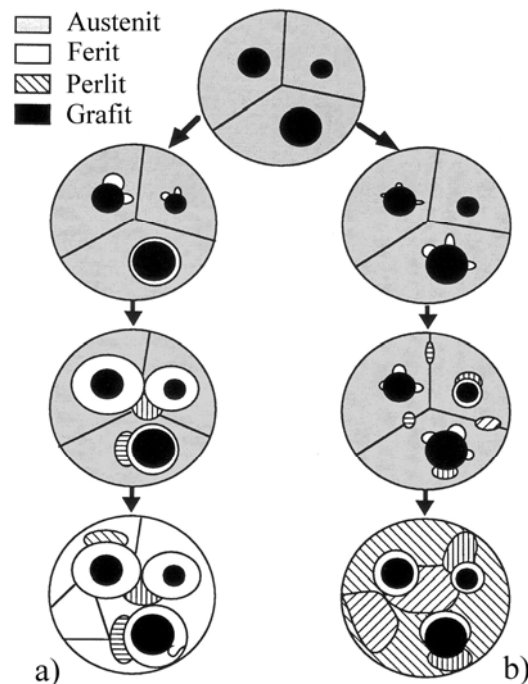
Na slici 3.21 prikazano je eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-Si sa sadržajem silicija od 2,0 %. Može se vidjeti da se nakon završetka skrućivanja topivost ugljika u austenitu ( $\gamma$ ) smanjuje sa smanjenjem temperature.



Slika 3.21. Eutektoidno područje ravnotežnog faznog dijagrama Fe-C-Si sa sadržajem silicija od 2,0 %

Karakteristika dijagrama na slici 3.21 je prisustvo trofaznog područja (ferit ( $\alpha$ ) + austenit ( $\gamma$ ) + grafit), koje ne egzistira u binarnom sustavu Fe-C. Ovo područje rezultat je dodatka silicija, kao trećeg elementa.

Eutektoidna pretvorba predstavlja difuzijski kontroliran proces i može se podijeliti u dvije faze: stvaranje ferita, odnosno stabilne faze te stvaranje perlita, tj. metastabilne faze iz austenita. Ako pretpostavimo da se nodularni ljev sporo hladi (ravnotežno skrućivanje), nakon skrućivanja ravnotežne faze biti će austenit i nodularni grafit. Sa smanjenjem temperature nastavlja se rast grafitnih nodula, zbog odbacivanja ugljika od strane prezasićenog austenita. Ugljik migrira ka postojećim grafitnim nodulama, što rezultira nastajanjem ugljikom osiromašenog austenitnog područja oko grafitnih nodula. Na ovaj način osiguravaju se povoljna mjesta za nukleaciju ferita na graničnoj površini austenit/nodularni grafit (slika 3.22a). Nukleacija ferita započinje pri temperaturi  $T_T$  (slika 3.21).



Slika 3.22. Shematski prikaz modela eutektoidne pretvorbe u nodularnom lijevu: a) nukleacija perlita na graničnoj površini ferit/austenit, b) nukleacija perlita na graničnoj površini austenit/austenit i grafit/austenit

Broj nodula određen je tijekom skrućivanja i ne mijenja se tijekom eutektoidne pretvorbe. To znači da tijekom eutektoidne pretvorbe ne dolazi do stvaranja novih nodula.

Rast feritne ovojnice odvija difuzijom ugljika od granične površine ferit/austenit kroz ferit do grafitnih nodula. Budući da ferit obično nukleira oko grafitnih nodula, očito je da broj grafitnih nodula značajno utječe na udio ferita, odnosno tijekom eutektoidne pretvorbe. Stoga je kod feritnih nodularnih ljevova potrebno uzeti u obzir utjecaj broja grafitnih nodula na eutektoidnu pretvorbu.

U slučaju ravnotežnog skrućivanja pri temperaturi eutektoidne pretvorbe  $T_{EOIDP}$  (slika 3.21) dolazi do pretvorbe austenita u ferit (u slučaju ravnotežnog skrućivanja). Međutim, skrućivanje se u većini slučajeva odvija neravnotežno, odnosno eutektoidna pretvorba u nodularnom lijevu karakterizirana je odvijanjem dvaju usporednih procesa:  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{grafit}$  i  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ . Kako feritna ovojnica raste oko grafitne nodule, stvara se ugljikom obogaćena zona na graničnoj površini ferit/austenit, što omogućuje nukleaciju perlita (slika 3.22a). Perlit potom kontinuirano raste zajedno s feritom do kraja pretvorbe.

Legirajući elementi i brzina hlađenja utječu na stvaranje ferita i perlita. Elementi koji pospješuju stvaranje perlita (bakar, mangan, krom) snižavaju temperaturu eutektoidne

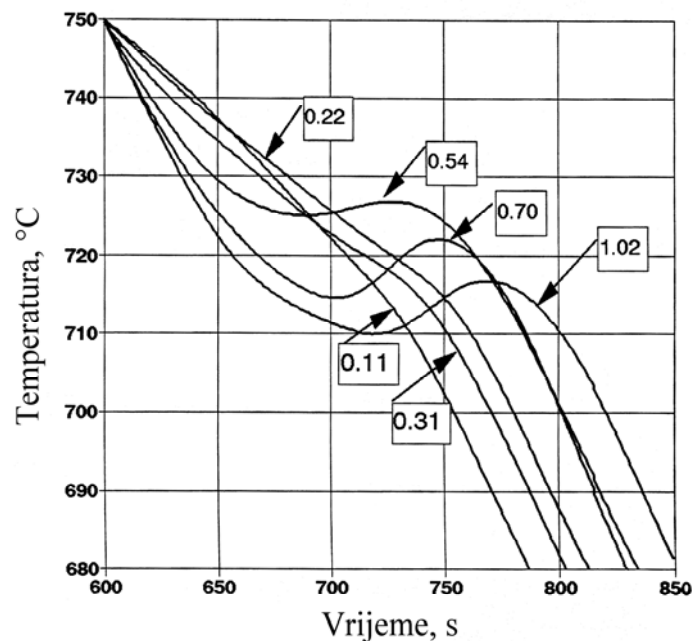


pretvorbe i brzinu stvaranja ferita. Kao rezultat toga, moguća je, pri određenom sadržaju elemenata koji pospješuju stvaranje perlita, nukleacija perlita na granicama austenitnih zrna, te na graničnim površinama ferit/austenit i grafit/austenit (slika 3.22b). Kod perlitnog nodularnog lijeva, u ranoj fazi eutektoidne pretvorbe, znatna količina perlita nukleira na granicama austenitnih zrna, nakon čega stvaranje perlita dominira eutektoidnom pretvorbom (slika 3.22b). U kasnijoj fazi eutektoidne reakcije perlit se stvara i na granicama ferit/austenit. Brzina rasta perlita je znatno veća od brzine rasta ferita, što znači da će se nakon početka stvaranja perlita vrlo malo stvarati dodatnog ferita.

Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturu nodularnog lijeva prilično je kompleksan. Povećanje brzine hlađenja tijekom skrućivanja rezultira povećanjem broja nodula. Povećanje brzine hlađenja kroz eutektoidno područje rezultira smanjenjem udjela ferita i povećanjem udjela perlita u mikrostrukturi. Ovisno o brzini hlađenja, osim ferita i perlita, mogu nastati i drugi produkti pretvorbe (mikrostrukturni konstituenti), kao što su npr. bainit i martenzit.

Male količine elemenata, kao što su kositar i antimon mogu u potpunosti spriječiti stvaranje ferita bez obzira na brzinu hlađenja. Ovi elementi segregiraju na površinu grafitnih nodula i djeluju kao difuzijska barijera za ugljik te na taj način sprječavaju pretvorbu austenita u ferit + grafit. Budući da je nukleacija novih grafitnih čestica u austenitu izuzetno teška zbog visokih napreznja tijekom pretvorbe, odvija se metastabilna pretvorba austenita, odnosno nastaje perlit.

Mangan, nikal i bakar snižavaju temperature  $T_T$  i  $T_{E0IDP}$ . Stoga ovi elementi utječu na smanjenje brzine stvaranja ferita i pospješuju stvaranje perlita. U lijevaonima nodularnog lijeva, bakar je jedan od najčešće primjenjivanih dodataka ako se želi postići perlitna mikrostruktura. Utjecaj sadržaja bakra na krivulju hlađenja u eutektoidnom području prikazan je na slici 3.23.



Slika 3.23. Utjecaj sadržaja bakra na krivulju hlađenja u eutektoidnom području

Sa slike 3.23 može se vidjeti da pri niskim sadržajima bakra krivulja hlađenja gotovo kontinuirano pada i vrlo je teško odrediti temperaturu početka i završetka eutektoidne pretvorbe. Ove krivulje su tipične za feritni nodularni lijev. Porast sadržaja bakra utječe na promjenu oblika krivulje hlađenja. Jasno se može vidjeti sa slike 3.23 da se pojavljuje pothlađenje, odnosno rekalescencija koja je mjera topline razvijene za vrijeme nukleacije i

rasta perlita. Viši sadržaji bakra utječu na više vrijednosti pothlađenja. Pothlađenje se pojavljuje kod sadržaja bakra od 0,4 – 0,5 %. Kod feritnih nodularnih lijevova ne pojavljuje se pothlađenje.

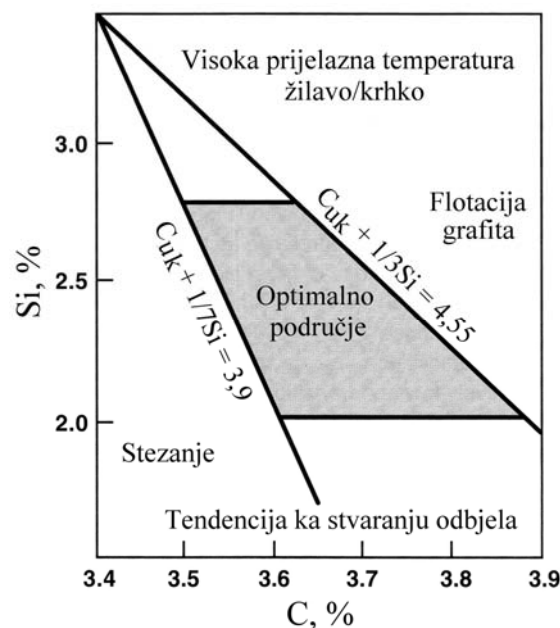
Za razliku od prethodno navedenih elemenata, silicij, fosfor i krom povisuju temperature  $T_T$  i  $T_{EOIDP}$ . Posebno je značajan utjecaj silicija. Silicij povećava brzinu difuzije ugljika pri svim temperaturama. Pored toga, silicij proširuje trofazno područje ( $\alpha + \gamma +$  grafit) (slika 3.21) što promovira stvaranje ferita.

### 3.7 Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva nodularnog lijeva

Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na oblik grafita i strukturu metalne osnove u nodularnom lijevu.

#### 3.7.1 Utjecaj stalnih elemenata

Optimalni sadržaj **ugljika** i **silicija** može se odrediti iz Handersonovog dijagrama (slika 3.24).

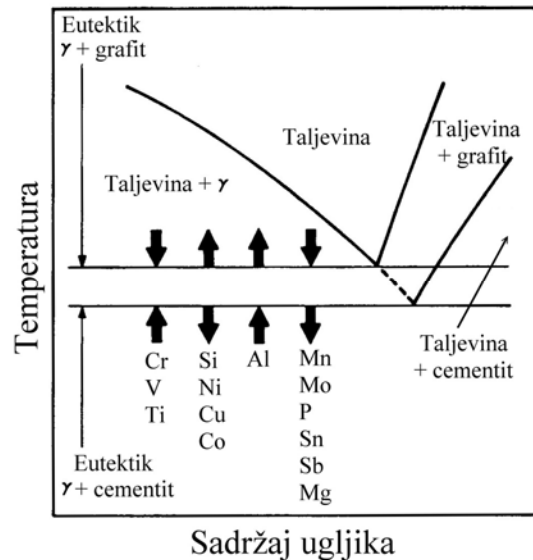


Slika 3.24. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji nodularnog lijeva

Iz dijagrama na slici 3.24 može se zaključiti da se optimalni sadržaj ugljika kreće u granicama od 3,5 – 3,9 %, ovisno o sadržaju silicija. Više vrijednosti sadržaja ugljika preferiraju se za tanje stjenke, a niže vrijednosti za deblje stjenke. Kombinacija visokih vrijednosti sadržaja ugljika, tj. ekvivalenta ugljika i niskih brzina hlađenja (debele stjenke) može rezultirati flotacijom (isplivavanjem na površinu) i degeneracijom nodula, što ima negativan učinak na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Kod tankih stjenki ne postoji opasnost od flotacije, zbog čega se preferiraju više vrijednosti ekvivalenta ugljika u cilju

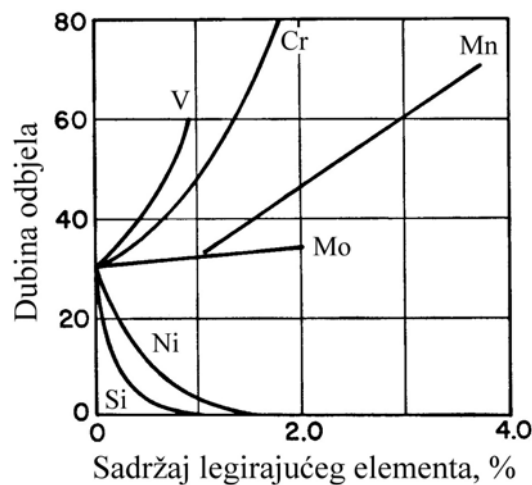
izbjegavanja stvaranja karbida. Visoke vrijednosti sadržaja ugljika povećavaju ekspanziju tijekom skrućivanja. U većini slučajeva nodularni lijev ima sastav blizu eutektičkog.

Silicij smanjuje topljivost ugljika u čvrstoj i tekućoj fazi, povećava difuziju ugljika pri svim temperaturama te promovira stvaranje grafita (djeluje kao grafitizator), odnosno otežava stvaranje karbida. Kao i ostali grafitizatori, tijekom skrućivanja segregira u krutu fazu te podiže temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 3.25). Kod iste kvalitete nodularnog lijeva, viši sadržaji silicija preporučuju se kod lijevanja tankostjenih odljevaka, da bi se smanjila mogućnost stvaranja karbida.



Slika 3.25. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog (γ + grafit) i metastabilnog (γ + cementit) eutektika

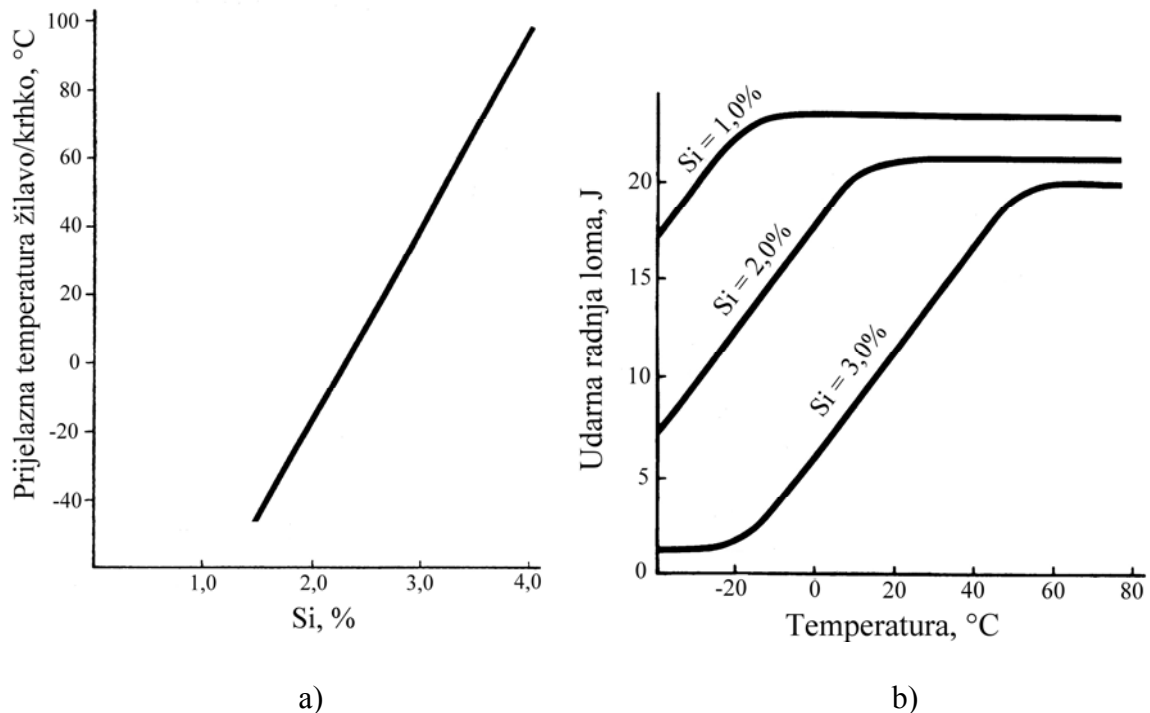
Grafitizatori putem proširenja intervala između eutektičkih temperatura smanjuju opasnost od metastabilnog skrućivanja (stvaranja odbjela - cementita) (slika 3.26). Karbidotvorci (npr. krom, vanadij itd.) djeluju suprotno.



Slika 3.26. Utjecaj legirajućih elemenata na dubinu odbjela. Sadržaj ugljika 3,0 do 3,3 %

Dodatkom silicija proširuje se i pomiče trofazno područje ka višim temperaturama, jer silicij podiže temperaturu  $T_T$  i  $T_{EOIDP}$  (slika 3.21). Zbog toga, za danu brzinu hlađenja, na raspolaganju stoji više vremena za difuziju ugljika, što u konačnici potpomože (promovira) stvaranje ferita.

S porastom udjela ferita povećava se žilavost i izduženje nodularnog lijeva, a smanjuje vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Sadržaj silicija iznad potrebnog za stvaranje pretežno feritne metalne osnove rezultira smanjenjem žilavosti (slika 3.27) i izduženja te porastom čvrstoće i tvrdoće feritnog nodularnog lijeva.



Slika 3.27. a) utjecaj silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko, b) utjecaj silicija na udarni rad loma pri različitim temperaturama za feritni nodularni lijev

Sa slike 3.27 može se vidjeti da porast sadržaja silicija utječe na smanjenje udarnog rad loma (udarne žilavosti) i povišenje prijelazne temperature žilavo/krhko, premda promovira stvaranje ferita koji je poželjan kod kvaliteta koje moraju posjedovati visoku udarnu žilavost i duktilnost. Efekt je izraženiji kod feritnih nodularnih lijevova u odnosu na feritno-perlitne i perlitne nodularne lijevove.

Pad udarne žilavosti i duktilnosti nodularnog lijeva s porastom sadržaja silicija tumači se očvršćivanjem ferita od strane silicija i smanjenjem njegove plastičnosti. U cilju postizanja optimalne žilavosti nodularnog lijeva koji se primjenjuje pri uobičajenim temperaturama, sadržaj silicija treba održavati u granicama od 2,0 – 2,8 %. Primjena pri niskim temperaturama zahtjeva što je moguće niži sadržaj silicija (2,0 – 2,5 %).

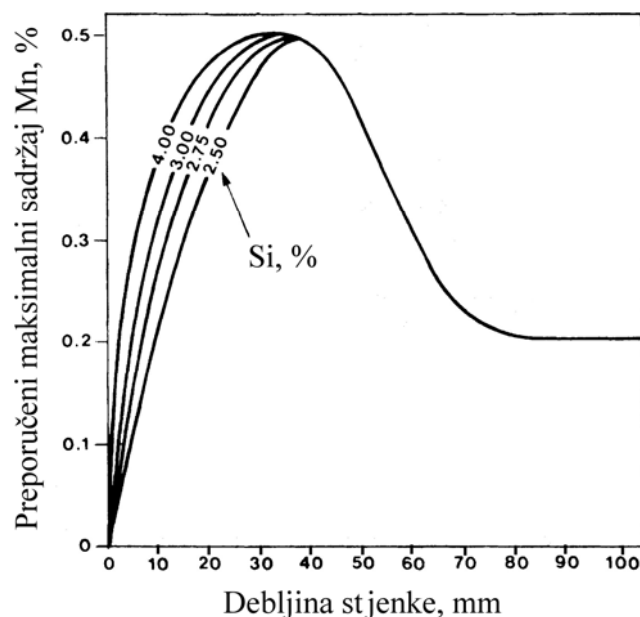
Zbog promoviranja stvaranja ferita, u proizvodnji perlitnog nodularnog lijeva sadržaj silicija treba biti  $< 2,0 \%$ .

**Mangan** promovira stvaranje perlita i karbida jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C), ali i metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 3.25). Mangan proširuje austenitno područje snižavajući eutektoidne temperature  $T_T$  i  $T_{EOIDP}$  (slika 3.21). Stabilizira

austenit jer povećava topljivost ugljika u njemu. Brzina stvaranja ferita je sporija kod nižih temperatura, jer se sa sniženjem temperature smanjuje brzina difuzije ugljika. Time se uspostavlja povišen sadržaj ugljika u austenitu i promovira stvaranje perlita.

Prisustvo karbida u mikrostrukturi utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, izduženja i udarne žilavosti. U cilju izbjegavanja stvaranja karbida, potrebno je sadržaj mangana održavati što nižim (0,1 – 0,2 %).

Dopušteni sadržaj mangana određen je sadržajem silicija i debljinom stjenke odljevka (slika 3.28). U tankim stjenkama (do 30 mm) sklonost mangana ka stvaranju karbida može se izbalansirati porastom sadržaja silicija. Međutim, kod debelostjenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati sadržajem silicija jer mangan preferirano segregira u taljevinu koja zadnja skrućuje (potiskuje se ispred fronta kristalizacije). Pri tome dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna.



Slika 3.28. Utjecaj sadržaja silicija i debljine stjenke na dopušteni sadržaj mangana

**Sumpor** snižava temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe<sub>3</sub>C) eutektika, zbog čega doprinosi stvaranju odbjela, posebno kod viših sadržaja. Sumpor, kao i mangan, sprječava grafitizaciju.

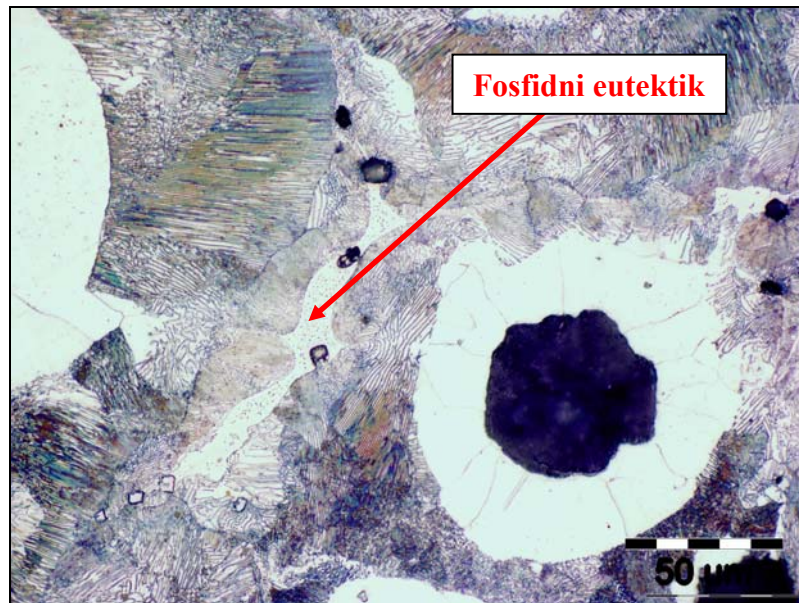
Obzirom da se nodularni lijev proizvodi obradom primarne taljevine predlegurama na bazi magnezija i da magnezij ima visok afinitet prema sumporu, očito je da se sadržaj sumpora mora održavati niskim.

Reakcijama magnezija sa sumporom smanjuje se raspoloživa količina magnezija za modifikaciju oblika grafita, što može rezultirati nastankom vermikularnog, listićavog i degeneriranih oblika grafita. Prisutnost ovih oblika grafita u mikrostrukturi nodularnog lijeva negativno se odražava na njegova mehanička svojstva.

Pre niski sadržaji sumpora (<0,005 %) također nisu poželjni jer čestice magnezijeva sulfida predstavljaju mjesta za nukleaciju grafita. Primarna taljevina s niskim sadržajem sumpora imati slab „odziv“ na nodularizaciju i cijepljenje u pogledu broja grafitnih nodula i nastanka karbida. Optimalni sadržaj sumpora kreće se od 0,008 – 0,015 %.

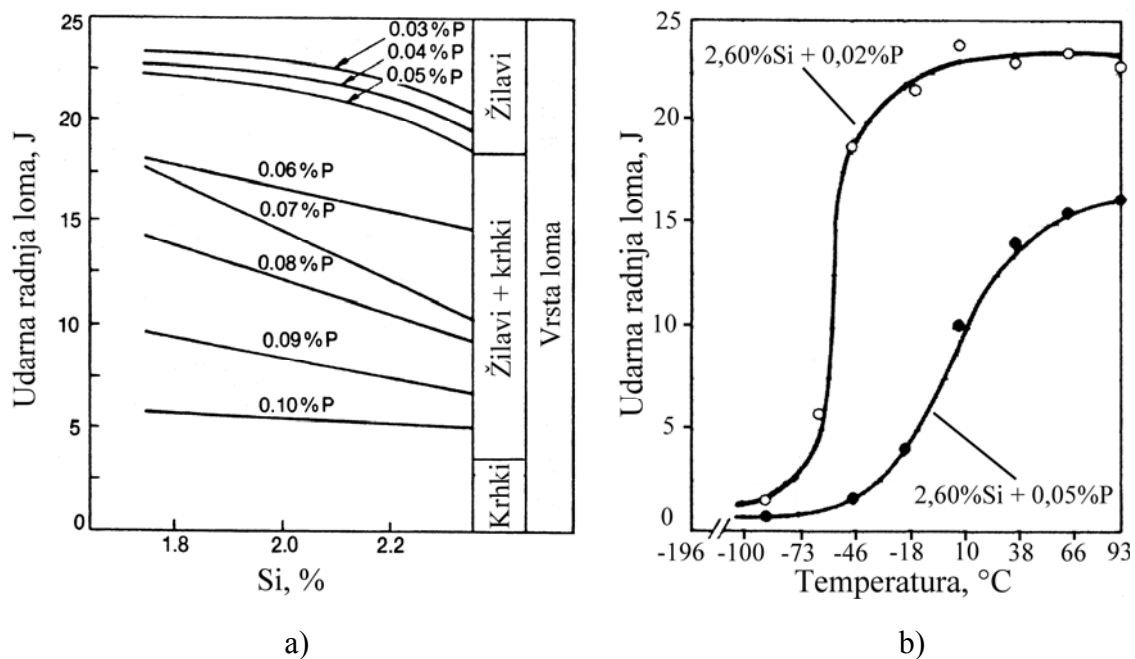
**Fosfor** je nepoželjan element u nodularnom lijevu jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim (< 0,02 %). Kao i u sivom lijevu, stvara nisko topivi fosfidni eutektik (Fe<sub>3</sub>P) (slika 3.29) koji je poznat pod nazivom steadit. Točka taljenja

fosfidnog eutektika je niska i iznosi  $\sim 950$  °C. Tijekom skrućivanja segregira po granicama eutektičkih ćelija kao tvrda i krhka faza.



Slika 3.29. Metalografska snimka mikrostrukture uzorka taljevine nodularnog lijeva u nagriženom stanju (nital). Zbog visokog sadržaja fosfora ( $P = 0,085$  %) u mikrostrukтури je prisutan fosfidni eutektik

Kod većih sadržaja fosfora stvara se mreža fosfidnog eutektika po granicama eutektičkih ćelija. U tom slučaju, u tankim stjenkama, granice ćelija sadrže dvostruko više fosfora od prosječnog sadržaja, dok u debelim stjenkama ( $> 25,0$  mm) čak i do 10 puta više od prosječnog sadržaja. To rezultira velikim padom čvrstoće, duktilnosti i udarne žilavosti, odnosno udarnog rada loma (slika 3.30).



Slika 3.30. a) utjecaj fosfora i silicija u nodularnom lijevu na udarni rad loma, b) utjecaj fosfora i silicija na prijelaznu temperaturu žilavo/krhko

Fosfor snižava likvidus temperaturu te temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i metastabilnog (Fe-Fe<sub>3</sub>C) eutektika (slika 3.25). Pored stvaranja fosfidnog eutektika, fosfor stabilizira perlit. Udio perlita u mikrostrukturi nodularnog lijeva raste s porastom sadržaja fosfora.

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 (MgO) i odsumporava (MgS) taljevinu. Na taj način se smanjuje količina magnezija raspoloživog za modifikaciju oblika grafita.

Ukoliko je sadržaj sumpora i kisika u taljevini nizak, tada je već rezidualni magnezij od ~ 0,018 % dovoljan za formiranje potpuno nodularne strukture grafita. Ciljani sadržaj rezidualnog magnezija u praksi kreće se od 0,035 – 0,045 %.

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 brojem grafitnih nodula. U konačnici to se odražava na pad svih mehaničkih svojstava nodularnog lijeva.

Ako je rezidualni magnezij previsok (>0,06 %) postoji velika opasnost od stvaranja karbida, poroznosti i troske. Ovaj rizik pojačava se s porastom brzine skrućivanja i smanjenjem broja nodula. Zbog toga je potrebno primijeniti adekvatno cijepljenje taljevine.

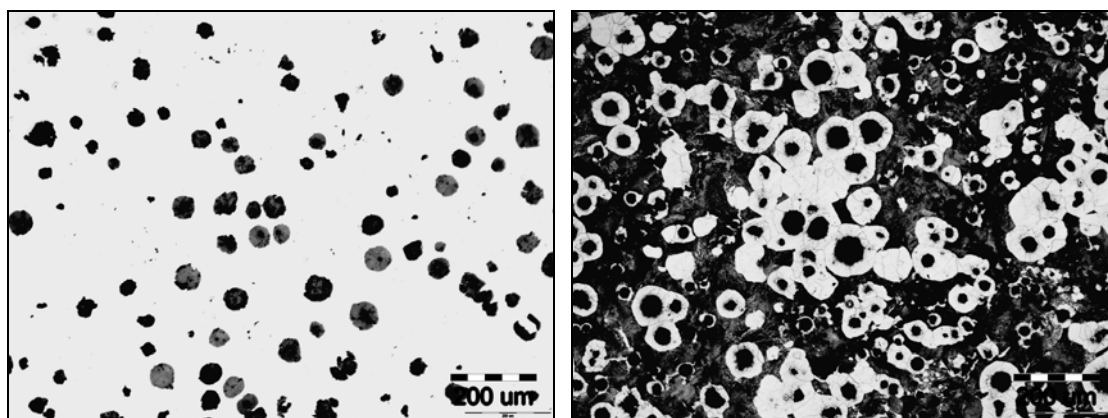
Omjer Mg:S važan je za održavanje nodularnosti u nodularnom lijevu. Poželjno je da ovaj odnos bude iznad 3:0.

### 3.7.2 Utjecaj legirajućih elemenata

**Bakar** je grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida. Povećava razliku između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 3.25) te snižava temperature  $T_T$  i  $T_{EOIDP}$  (slika 3.21). Pri skrućivanju segregira na površinu grafitnih nodula i djeluju kao difuzijska barijera za ugljik. Na taj način onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit, što rezultira stvaranjem perlita.. Premda je maksimalna topivost bakra u nodularnom lijevu ~ 2,5 %, obično se ograničava na ~ 1,5 % da bi se izbjegao njegov utjecaj na nodularnost. Već sadržaj od 0,82 % je dovoljan da bi se ostvarila potpuno perlitna mikrostruktura. U feritnom nodularnom lijevu sadržaj bakra treba biti što je moguće niži. Na slici 3.31 prikazana je mikrostruktura perlitnog nodularnog lijeva sa sadržajem bakra od 0,48 %, dok se sa slike 3.32 može vidjeti utjecaj bakra na udio perlita u mikrostrukturi.

U odnosu na mangan, bakar je 5 – 10 puta efikasniji u stvaranju perlita i ne postoji opasnost od nastanka karbida kao u slučaju dodatka mangana.

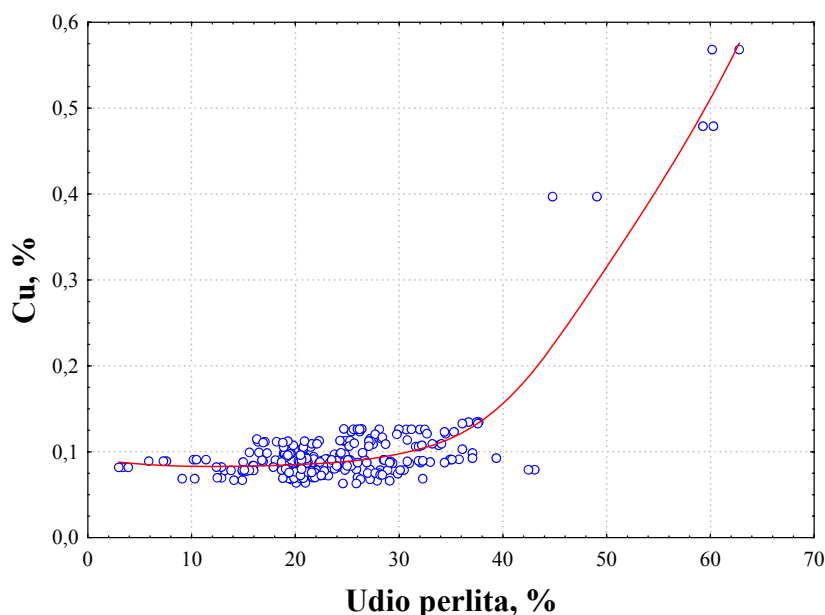
Zbog promoviranja stvaranja perlita, bakar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva te podiže prijelaznu temperaturu žilavo/krhko.



a)

b)

Slika 3.31. Metalografske snimke mikrostrukture perlitnog nodularnog lijeva ( $\text{Cu} = 0,48 \%$ ) u nenagrizenom (a) i nagrizenom (b) stanju (nital) pri povećanju 100x. Udio ferita 38,7 %, udio perlita 61,3 %, 80 nodula/ $\text{mm}^2$ , nodularnost 70 %



Slika 3.32. Utjecaj sadržaja bakra na udio perlita u mikrostrukтури nodularnog lijeva

**Kositar** je snažan promotor perlita. Mehanizam djelovanja je identičan kao kod bakra. U odnosu na bakar, kositar je  $\sim 10$  puta efikasniji u stvaranju perlita. Zbog toga sadržaji od 0,03 – 0,08 %, što ovisi o debljini stjenke, već su dovoljni da se ostvari potpuno perlitna mikrostruktura.

Sadržaj kositra  $>0,1 \%$  nije poželjan jer nastali sloj oko grafitnih nodula, koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik, postaje relativno debeo i krhak, što ima negativan učinak na mehanička svojstva.

Kositar otežava grafitizaciju, ali ne promovira stvaranje karbida. Snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (slika 3.25), te kao i bakar, segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija). Utjecaj kositra na temperature  $T_T$  i  $T_{EODP}$  je zanemariv.

Budući da pospješuje stvaranje perlita, kositar povisuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i udarnu žilavost nodularnog lijeva.



**Molibden** povisuje prokaljivost, vlačnu čvrstoću na sobnoj i visokim temperaturama, granicu razvlačenja te otpornost na lom, puzanje i toplinski umor nodularnog lijeva. Negativno utječe na izduženje i udarnu žilavost. Negativna strana molibdena je sklonost ka stvaranju karbida, ali u znatno manjoj mjeri od kroma.

Molibden snižava temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. Tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje. Ne promovira stvaranje perlita već ga samo usitnjava (povećanje čvrstoće).

**Nikal** podiže temperaturu skrućivanja stabilnog (Fe-C) i snižava temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 3.25). Prema tome, nikal, kao i silicij, proširuje interval između navedenih temperatura i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela (slika 3.26) i nastanku karbida. Snižava eutektoidnu temperaturu i blago promovira stvaranje perlita. Pri skrućivanju segregira u prvu taljevinu koja skrućuje (negativna segregacija).

Nikal je grafitizirajući element koji povisuje prokaljivost (dodatak od 0,5 – 4,0 %), poboljšava svojstva feritnog nodularnog lijeva pri niskim temperaturama, poboljšava vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva s niskim sadržajem silicija, te pospješuje stvaranje austenitne metalne osnove (dodatak 18,0 – 36,0 %). U feritnom nodularnom lijevu povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću bez štetnog utjecaja na udarnu žilavost. Zbog toga se primjenjuje kao supstitucija za silicij u onim kvalitetama gdje se zahtijeva visoka čvrstoća i udarna žilavost.

**Krom** ima visoku sklonost ka stvaranju karbida (sprječava grafitizaciju) jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 3.25). Kao i ostali karbidotvorci, tijekom skrućivanja segregira u taljevinu koja posljednja skrućuje.

Čak se i dugotrajnim žarenjem na visokim temperaturama teško mogu u potpunosti ukloniti ovi karbidi. Zbog toga njegov sadržaj u nodularnom lijevu treba biti što niži. Sklonost ka nastajanju karbida pospješuje se u prisustvu mangana. To zahtijeva još niže sadržaje kroma, ako je prisutan povišen sadržaj mangana.

Prokaljivost, tvrdoća i otpornost na trošenje nodularnog lijeva može se poboljšati legiranjem kromom.

**Vanadij** povisuje prokaljivost i ima visoku sklonost ka stvaranju intercelijastih karbida i odbjela, jer snižava temperaturu skrućivanja stabilnog eutektika (Fe-C) i povisuje temperaturu skrućivanja metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C) (slika 3.25) te slabo perlitizirajuće djelovanje.

Kod uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva sadržaj vanadija potrebno je održavati što je moguće nižim zbog visoke sklonosti ka stvaranju karbida. S povećanjem brzine hlađenja raste opasnost od stvaranja karbida.

### 3.7.3 Utjecaj pratećih elemenata

Modifikacija oblika grafita, odnosno stvaranje nodularnog grafita, može se postići obradom taljevine **cerijem**. Kao i magnezij, cerij je snažan dezoksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija, cerij nije lako ispariv (točka isparavanja iznosi 2406 °C). Cerij dodan u taljevinu neće uzrokovati snažne i burne reakcije te nastajanja dima karakterističnog za obradu taljevine magnezijem. Nadalje, cerij stvara mnogo stabilnije okside i sulfide, zbog čega postoji daleko manja sklonost ka odgoru i stvaranju troske.

Cerij jak promotor karbida, zbog čega primarna taljevina mora imati visok sadržaj ugljika (>3,8 %), a zahtijeva se i primjena adekvatnog cijepjenja. Nodularni lijev proizveden obradom primarne taljevine cerijem mnogo je osjetljiviji na debljinu stjenke i u tankostjenim odljevcima teško je postići lijevanu strukturu bez karbida.

Zbog navedenih razloga cerij se ne upotrebljava kao primarni nodularizator, već kao komponenta rijetkih zemalja (RE) u legurama FeSiMg (predlegure za obradu taljevine). Uobičajeni sadržaj rijetkih zemalja u legurama FeSiMg iznosi oko 0,5 - 1,0 %. Ovakva upotreba rijetkih zemalja i cerija značajno povećava broj nodula, što se može vidjeti u tablici 3.3 (tipičan rezidualni cerij u nodularnom lijevu iznosi ~ 0,008 %).

Tablica 3.3. Utjecaj sadržaja rijetkih zemalja (RE) na broj nodula u nodularnom lijevu

Rezidualni Mg, %	Rezidualni RE, %	Broj nodula/mm <sup>2</sup>
0,015	0,0	226
0,015	0,003	342
0,016	0,008	292
0,025	0,0	225
0,027	0,004	275
0,025	0,012	250
0,043	0,0	150-175
0,032	0,010	200-225

Prekomjerni sadržaj rijetkih zemalja (RE) u nodularnom lijevu je štetan, jer čini graničnu površinu grafit/taljevina nestabilnom i uzrokuje grananje nodularnog grafita tijekom skrućivanja. Kao i ostali elementi rijetkih zemalja, cerij je koristan u kontroli utjecaja antinodularizirajućih elemenata (olovo, arsen, titan, antimon itd.). Rezidualni cerij od ~ 0,005 % obično je dovoljan da spriječi štetno djelovanje antinodularizirajućih elemenata.

Prekomjerni sadržaj cerija u tankim ili debelim stjenkama odljevaka od nodularnog lijeva treba svakako izbjeći zbog niza štetnih djelovanja. U tankim stjenkama postoji opasnost stvaranja karbida, dok u debelim stjenkama postoji povećana opasnost flotacije grafita, pojave eksploziviranih (degeneriranih) oblika grafita i posebno u toplinskom centru debelih stjenki odljevka nastajanje chunky grafita.

**Lantan** se preferira više od cerija u FeSiMg legurama za obradu. Obradom taljevine predlegurom koja u sebi ima čisti lantan umjesto uobičajene smjese rijetkih zemalja rezultira u konačnici superiornijim svojstvima nodularnog lijeva (veći broj nodula, viša nodularnost, manji udio perlita, manji odbjel) i bez naknadnog cijepjenja u odnosu na nodularni lijev proizveden obradom taljevine predlegurom koja u sebi sadrži čisti cerij.

**Bor** je jedan od najsnažnijih karbidotvornih elemenata. Karbidi bora su stabilni i ne mogu se ukloniti žarenjem. Već pri sadržaju od 0,002 % može doći do stvaranja intercelijastih karbida i značajnog pada mehaničkih svojstava. Npr. pri sadržaju bora od 0,01 % izduženje se može smanjiti s 14,0 % na 1,0 %.

Postoji niz elemenata 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 i titan. 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. Često se nazivaju antinodularizatori.

Maksimalni sadržaj **aluminija** u nodularnom lijevu trebao bi biti <0,03 % jer pospješuje stvaranje listićavog i vermikularnog grafita te utječe na nastanak mikroporoznosti. 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. Cerij efikasno sprječava štetno djelovanje antimona, dok je antimon efikasan u sprječavanju sklonosti cerija ka stvaranju chunky grafita u debelim stjenkama. Antimon spada u grupu elemenata koji snažno promoviraju stvaranje perlita.

**Bizmut** već kod vrlo niskih koncentracija pospješuje stvaranje listićavog grafita. Negativan utjecaj bizmuta može se spriječiti upotrebom predlegure za obradu FeSiMg koja sadrži cerij. Međutim, dodatkom bizmuta u vrlo malim koncentracijama (0,005 – 0,01 mas. %) može se značajno povisiti broj nodula/mm<sup>2</sup>, jer bizmut snažno promovira nukleaciju grafita. Prekomjerni dodatci bizmuta imaju negativan učinak na broj nodula/mm<sup>2</sup>. Veći broj grafitnih nodula utječe pozitivno na proizvodnju tankostjenih odljevaka, zbog smanjenja mogućnosti za nastanak karbida. Zbog toga, bizmut je često sastavni dio cjepiva gdje je njegov sadržaj izbalansiran dodatkom rijetkih zemalja.

**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.

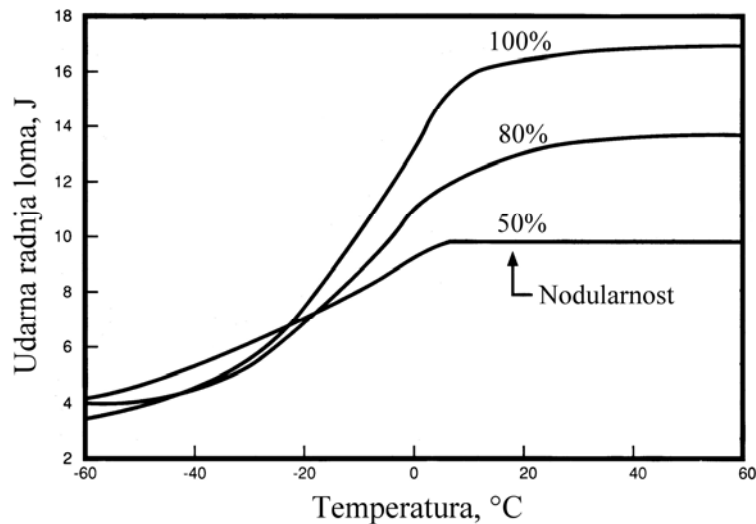
**Olovo** već pri sadržaju od 0,002 % može rezultirati nastankom listićavog grafita. Ovaj efekt izraženiji je u debljim stjenkama. Primjenom predlegure FeSiMg koja sadrži cerij može se spriječiti štetno djelovanje olova.

**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 %.

### 3.7.4 Utjecaj nodularnosti grafita

Nodularnost i morfologija nesferičnih čestica ima značajan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Sa smanjenjem nodularnosti grafita opada vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i udarna žilavost (slika 3.33) nodularnog lijeva. Što je grafitna čestica bliže savršenom krugu (kugli) to ona za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukturi, odnosno manje utječe na slabljenje metalne osnove. To u konačnici rezultira višim vrijednostima mehaničkih svojstava. Očito je da nastanak nodula slabe sferičnosti, vermikularnog, te eventualno degeneriranih oblika grafita utječe na sniženje udarne žilavosti nodularnog lijeva.

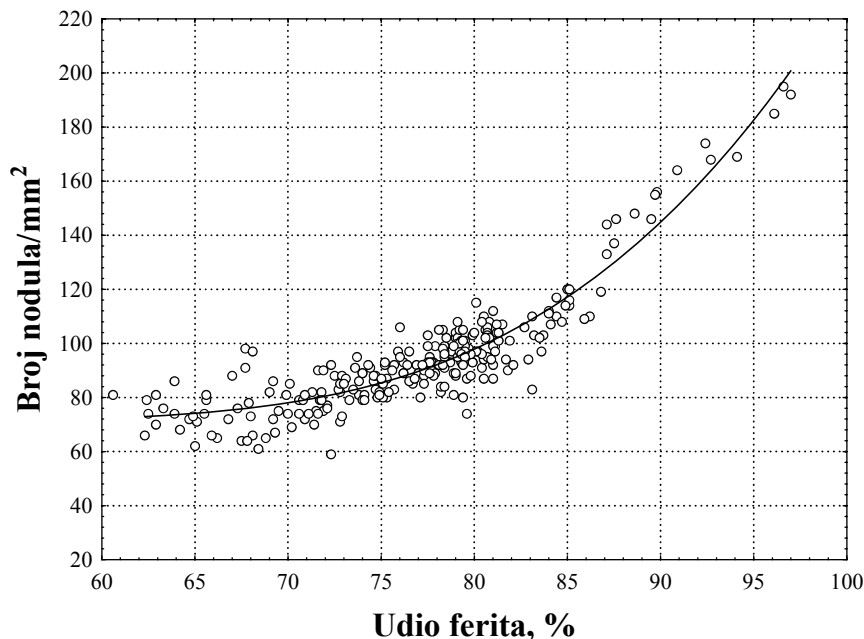


Slika 3.33. Utjecaj nodularnosti grafita na udarni rad loma feritnog nodularnog lijeva

### 3.7.5 Utjecaj broja i veličine nodula

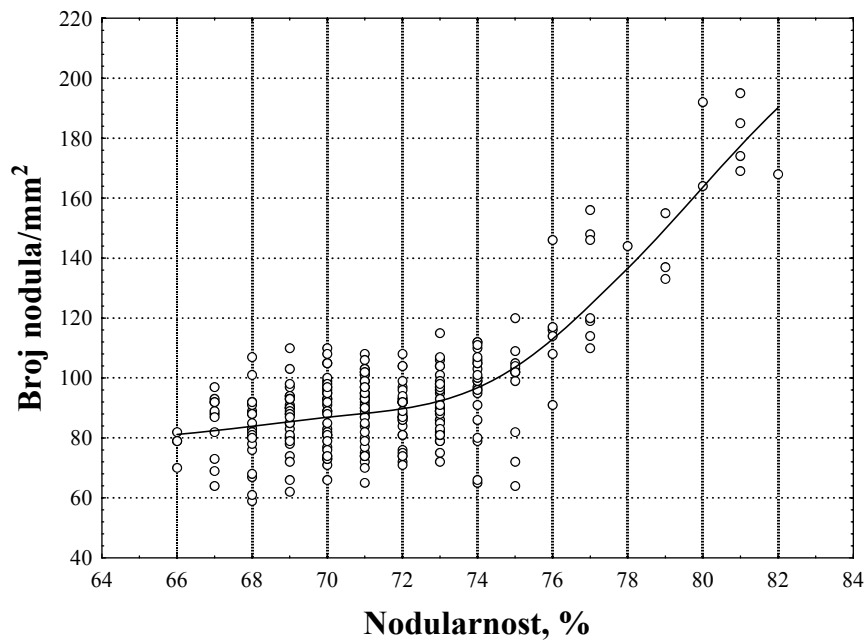
Broj grafitnih nodula (izražen kao broj grafitnih nodula/mm<sup>2</sup>) ima značajan utjecaj na udio ferita i perlita u metalnoj osnovi, a samim tim i na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Povećanje broja nodula rezultira većim udjelom ferita u mikrostrukturi (slika 3.34), jer se skraćuju putovi difuzije ugljika iz austenita pri eutektoidnoj pretvorbi. Ovaj utjecaj broja nodula na udio ferita ne treba shvatiti jednoznačno. Naime, u tankim stjenkama, gdje se prisutne velike brzine hlađenja, prisutan je veliki broj manjih nodula, ali i povišeni udio perlita. Velike brzine hlađenja otežavaju difuziju ugljika na nodule, što rezultira višim udjelom austenita s visokim sadržajem ugljika na eutektoidnoj temperaturi, odnosno višim udjelom perlita nakon eutektoidne pretvorbe.



Slika 3.34. Utjecaj broja nodula/mm<sup>2</sup> na udio ferita u mikrostrukturi nodularnog lijeva

Broj grafitnih nodula utječe i na nodularnost grafita (slika 3.35). S povećanjem broja nodula smanjuje se njihov promjer, što rezultira većom nodularnošću grafita, jer su manje nodule bliže savršenoj kugli.

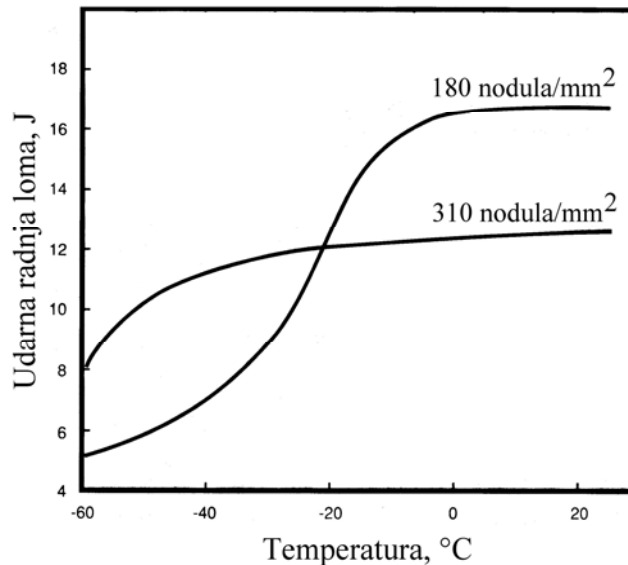


Slika 3.35. Utjecaj broja nodula/mm<sup>2</sup> na nodularnost grafita

Broj grafitnih nodula utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Općenito, povećanje broja nodula utječe na smanjenje njihove veličine, što poboljšava vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, udarnu žilavost i otpornost na umor. Ovaj utjecaj broja nodula na mehanička svojstva ne može se shvatiti jednoznačno, odnosno mora se promatrati u kontekstu s utjecajem ostalih mikrostrukturnih karakteristika. Naime, pri promatranju utjecaja broja nodula na mehanička svojstva mora se uzeti u obzir i utjecaj nodularnosti, udjela ferita i perlita, te homogenosti strukture.

Cijepljenjem taljevine povećava se broj grafitnih nodula i poboljšava nodularnost. Prema tome, veliki broj nodula povezan je s poboljšanjem nodularnosti.

Međutim, za svaki presjek odljevka, odnosno debljinu stijenke postoji optimalno područje broja nodula. Odstupanje od tog područja može rezultirati smanjenjem mehaničkih svojstava. Osim toga, broj nodula/mm<sup>2</sup> potrebno je prilagoditi uvjetima primjene odljevaka. Npr. Kod feritnog nodularnog lijeva previsok broj nodula/mm<sup>2</sup> negativno utječe na udarnu žilavost pri sobnoj temperaturi (slika 3.36). Međutim, pri niskim temperaturama veći broj nodula/mm<sup>2</sup> rezultira višim vrijednostima udarne žilavosti. To znači da je potrebno obratiti pažnju na nukleacijski potencijal i cijepljenje taljevine.



Slika 3.36. Utjecaj broja nodula u feritnom nodularnom lijevu na udarni rad loma

### 3.7.6 Utjecaj udjela ferita i perlita

Udio i distribucija ferita i perlita u metalnoj osnovi ima vrlo značajan utjecaj na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

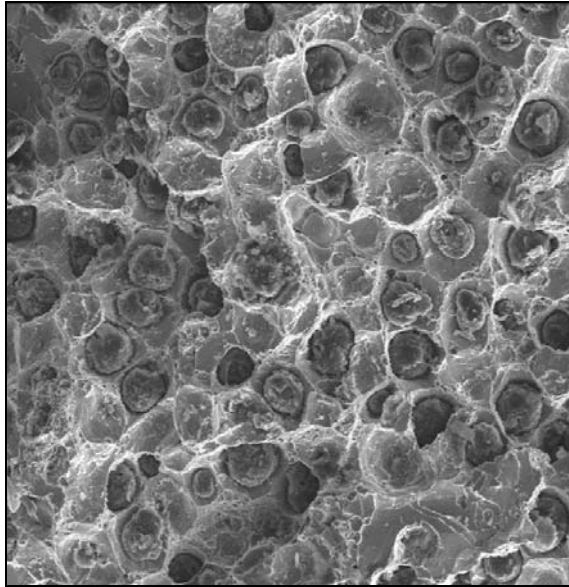
Feritni nodularni lijev ima relativno visoko izduženje i udarnu žilavost te osrednju vlačnu čvrstoću i tvrdoću.

Analizom prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) feritnog nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) može se ustanoviti da prije loma uzorka dolazi do značajne plastične deformacije ferita u cilju razgradnje naprezanja (slika 3.37). Radi se o transkristalnom žilavom lomu kojeg karakterizira prisustvo udubina (jamica) na prijelomnoj površini nastalih plastičnom deformacijom ferita, što u konačnici rezultira povišenom udarnom žilavosti.

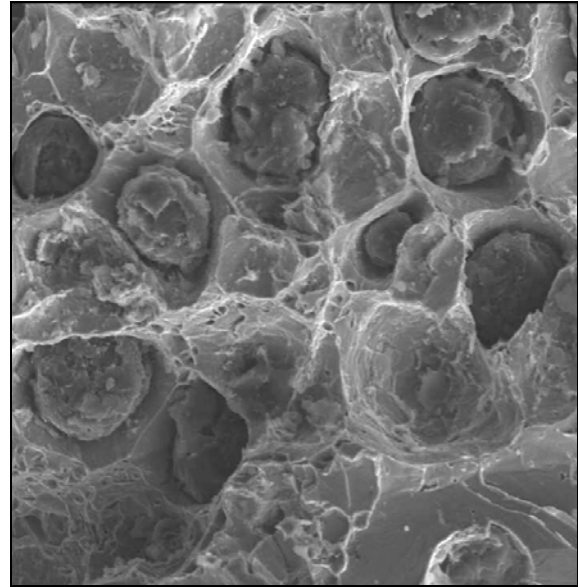
Perlitni nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću i tvrdoću te nisko izduženje i udarnu žilavost.

Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita i samim tim ima povećanu čvrstoću i tvrdoću u odnosu na ferit, zbog čega je kod perlitnog nodularnog lijeva prisutan transkristalni krhki lom koji slijedi određene kristalne ravnine u pojedinim kristalnim zrnima (slika 3.38). Mogu se vidjeti karakteristične ravne plohe, što ukazuje da se radi o krhkom lomu bez prethodne plastične deformacije.

Utjecaj sadržaja perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću i vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva jasno je prikazan na slikama 3.39 i 3.40. Može se vidjeti da tvrdoća i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva rastu s porastom udjela perlita u metalnoj osnovi, što upućuje da su udarna žilavost i tvrdoća, odnosno vlačna čvrstoća obrnuto proporcionalne veličine.

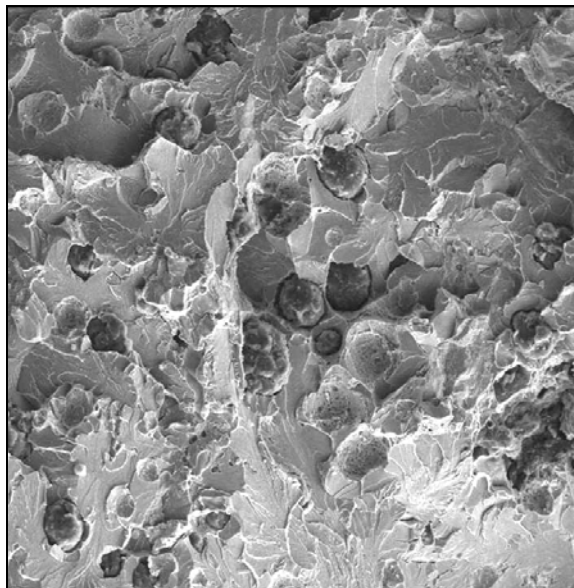


a)

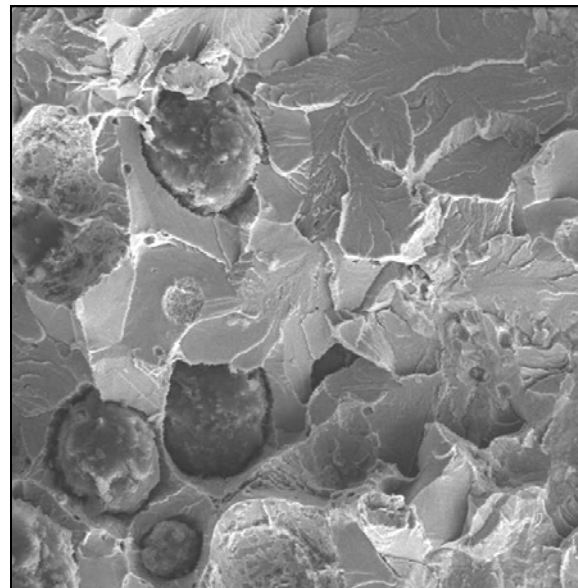


b)

Slika 3.37. Snimka prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) feritnog nodularnog lijeva (udio ferita 96,6 %) pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pri povećanju 100x (a) i 300x (b)

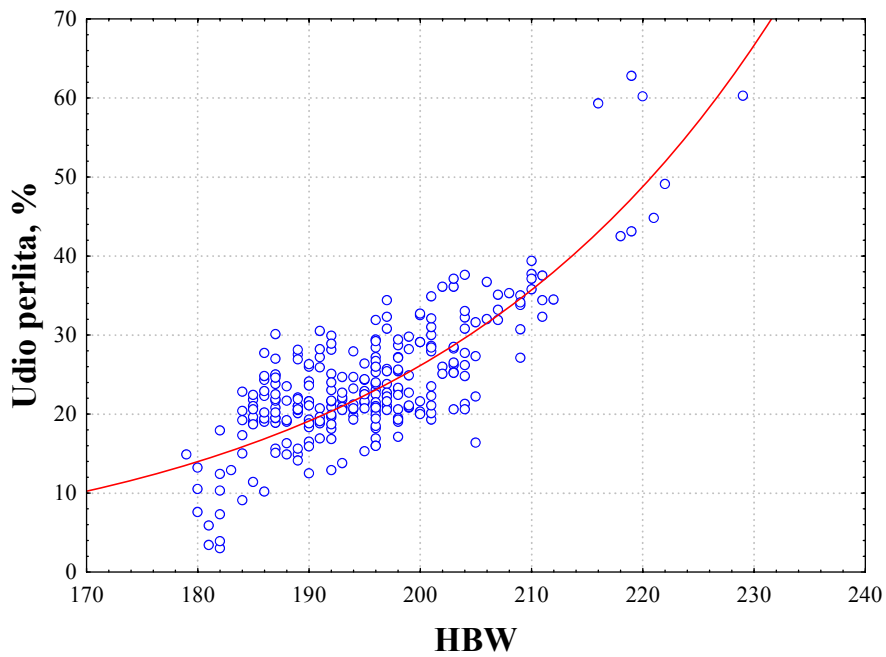


a)

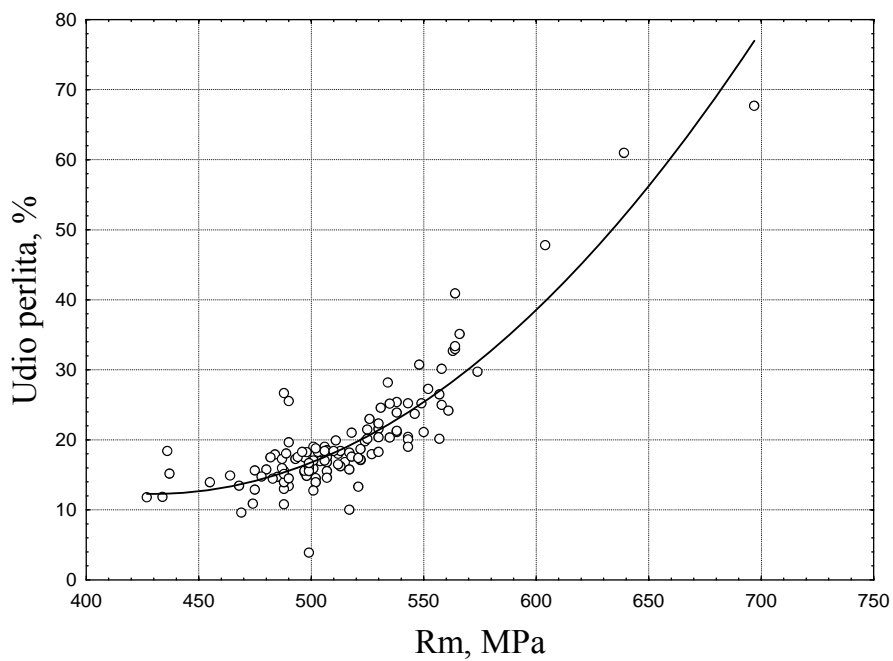


b)

Slika 3.38. Snimka prijelomne površine (nakon određivanja udarnog rada loma) perlitnog nodularnog lijeva (udio perlita 63,6 %) pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pri povećanju 100x (a) i 200x (b)



Slika 3.39. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na tvrdoću nodularnog lijeva



Slika 3.40. Utjecaj udjela perlita u mikrostrukтури na vlačnu čvrstoću nodularnog lijeva



### 3.8 Proizvodnja primarne taljevine

Proizvodnja primarne taljevine obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu primarne taljevine (korekcija kemijskog sastava, predpriprema (engl. *Preconditioning*), odsumporavanje), te predstavlja važan korak u proizvodnji kvalitetnih odljevaka od nodularnog lijeva. Nakon izrade primarne taljevine slijedi obrada primarne taljevine, odnosno nodularizacija (modifikacija oblika grafita).

Primarna taljevina za proizvodnju nodularnog lijeva izrađuje se u istim agregatima kao i taljevina sivog lijeva. Pri tome se upotrebljavaju isti uložni materijali, s razlikom da je za proizvodnju nodularnog lijeva poželjno upotrijebiti uložne materijale s nižim sadržajem sumpora. Također je potrebno obratiti pažnju na sadržaj antinodularizatora.

Ako primarna taljevina ima visok sadržaj sumpora treba je odsumporiti prije obrade (nodularizacije). Sadržaj sumpora u primarnoj taljevini ne bi trebao biti veći od 0,015 %.

Uložni materijali, agregati za taljenje, tijek taljenja, odsumporavanje i predpriprema taljevine detaljno su obrađeni u okviru cjeline 2.9 „Proizvodnja taljevine sivog lijeva“.

### 3.9 Proizvodnja nodularnog lijeva

Da bi se proizveo nodularni lijev potrebno je provesti modifikaciju oblika grafita primarne taljevine (ugljik treba biti izlučen u obliku nodula), odnosno potrebno je provesti obradu primarne taljevine.

#### 3.9.1 Sredstva za modifikaciju oblika grafita (nodulatori)

Od početka industrijske proizvodnje nodularnog lijeva, magnezij se pokazao kao vrlo efikasno sredstvo za obradu, jer ispunjava postavljene zahtjeve s tehnološkog i ekonomskog motrišta. Modifikacija oblika grafita može se djelotvorno provesti i obradom taljevine cerijem. Međutim, zbog praktičnih (sklonost ka stvaranju karbida) i ekonomskih razloga (visoki troškovi), cerij se ne primjenjuje samostalno već kao sastavni dio legure za obradu na bazi magnezija.

U cilju povećanja efikasnosti obrade taljevine razvijene su specijalne legure na bazi magnezija. Budući da se te legure primjenjuju za obradu taljevine, a ne za legiranje uveden je termin „predlegura“. Najčešće primjenjivane predlegure za obradu su predlegure FeSiMg s niskim sadržajem cerija i elemenata rijetkih zemalja.

**Čisti magnezij.** Najjednostavnije sredstvo za obradu taljevine u proizvodnji nodularnog lijeva bio bi čisti magnezij u metalnom obliku. Obrada taljevine čistim magnezijem povezana je s nizom tehnoloških problema. Magnezij ima vrlo nisku topljivost u tekućem i krutom željezu. Temperatura vrenja magnezija iznosi 1107 °C, što znači da kod odgovarajućih temperatura obrade (od 1400 do 1500 °C) ima vrlo visok tlak para (6 – 10 bar). Vrlo visok tlak para magnezija rezultira snažnim isparavanjem i mogućim izbacivanjem taljevine iz lonca za obradu. Specifična težina magnezija iznosi samo 1,74 g/cm<sup>3</sup>, što je niska vrijednost u usporedbi s vrijednošću za taljevinu željeza. Zbog toga, dodani magnezij nastoji isplivati na površinu rezultirajući isparavanjem i oksidacijom, što smanjuje učinak obrade taljevine (iskorištenje magnezija). Magnezij ima visok afinitet prema kisiku te stvara spoj

MgO koji u obliku gustog bijelog dima odlazi u atmosferu, što svakako pogoršava radne uvjete u ljevaonici. Dio dodanog magnezija reagira sa sumporom i stvara sulfide (MgS). Navedeni spojevi imaju jaku sklonost ka okrupnjavanju i stvaraju uključke u taljevini koji mogu isplivati ili ostaju zahvaćeni tijekom skrućivanja što rezultira stvaranjem grešaka i odbacivanjem odljevaka. Pored toga, zbog aglomeracije i isplivavanja, značajni će dio potencijalnih nukleacijskih čestica također biti uklonjen iz taljevine željeznog lijeva.

**Predlegure FeSiMg.** Zbog problematike dodavanja čistog magnezija u taljevinu, razvijene su legure na bazi magnezija (FeSiMg) koje omogućuju lakše dodavanje i bolje iskorištenje magnezija. U tablici 3.4 navedeni su kemijski sastavi nekih predlegura.

Tablica 3.4. Kemijski sastavi predlegura FeSiMg za obradu primarne taljevine

Kemijski sastav predlegure FeSiMg, tež.%								
Mg	Ce	Ba	RE	Si	Ca	Al	La	Fe
2,8	1,2	3,1	3,0	48,0	-	1,0	3,1	ost.
3,0	-	-	-	46,0	1,0	1,0	-	ost.
3,0	0,4	-	1,0	46,0	1,0	1,0	-	ost.
3,0	1,75	-	2,2	46,0	1,0	1,0	-	ost.
5,5	-	-	-	46,0	1,0-3,0	1,0	-	ost.
5,5	0,4	-	0,75	46,0	1,0-3,0	1,0	-	ost.
5,5	0,9	-	1,8	46,0	1,0-3,0	1,0	-	ost.
8,0	-	-	-	50,0	1,0	1,0	-	ost.
9,0	-	-	-	46,0	1,25	1,0	-	ost.
9,0	0,35	-	1,0	46,0	1,25	1,0	-	ost.
9,0	0,60	-	1,0	46,0	1,25	1,0	-	ost.
9,0	-	-	5,0	46,0	1,25	1,0	-	ost.
9,0	-	-	5,0	48,0	1,50	1,0	-	ost.
15,0	-	-	-	46,0	3,0	n.s*	-	ost.
15,0	-	-	1,0	46,0	3,0	n.s*	-	ost.

\* nije specificiran

Većina FeSiMg predlegura sadrži ~ 45 % silicija. Silicij pospješuje topivost magnezija u taljevini tijekom otapanja predlegure, što u pravilu pospješuje iskorištenje magnezija. Kalcij ima značajan utjecaj na reaktivnost predlegure i kod "Sandwich" postupka može doći do prigušenja reakcije s magnezijem ako sadržaj kalcija pređe 3,0 %.

Predlegure FeSiMg koje se najviše primjenjuju sadrže ~ 5 % magnezija. Sve više su zastupljene i legure s nižim sadržajem magnezija (2,5 - 3,5 %) te manjim sadržajima cerija (~ 1 %) i elemenata rijetkih zemalja (RE), radi poboljšanja efikasnosti procesa obrade te smanjenja emisije dima.

Obrada taljevine predlegurama FeSiMg rezultira manje burnim reakcijama i zbog toga je manje efektivno uklanjanje potencijalnih nukleusa iz taljevine. Vrlo je važno osigurati adekvatan početni sadržaj magnezija u taljevini nakon obrade. Ukoliko početni sadržaj magnezija nije dovoljno visok, te zbog odgora magnezija tijekom lijevanja (~ 0,001 %/min.) postoji opasnost da sadržaj magnezija u zadnjim količinama taljevine u loncu bude prenizak, što u konačnici može rezultirati smanjenjem nodularnosti, nastanka vermikularnog grafita i pojavom degeneriranih oblika grafita u zadnje lijevanim odljevcima.

Primjenom predlegure FeSiMg postižu se iskorištenja magnezija od 60 – 80 %.

**Predlegure FeNiMg** omogućuju jednostavan načina dodavanja i osiguravaju visoko i konzistentno iskorištenje magnezija jer imaju visoku gustoću i lagano tonu kroz taljevinu bez pojave burne reakcije. Zbog relativno visoke cijene, legure na bazi nikla danas su vrlo malo zastupljene u industrijskoj proizvodnji nodularnog lijeva. Uglavnom se primjenjuju u proizvodnji nodularnog lijeva gdje je nikal legirajući element. U tablici 3.5 navedeni su kemijski sastavi nekih predlegura iz ove skupine.

Tablica 3.5. Kemijski sastavi predlegura FeNiMg za obradu primarne taljevine

Kemijski sastav predlegure FeNiMg, tež.%					
Mg	Si	C	Ce <sub>MM</sub>	Fe	Ni
13,0-16,0	-	2,0	-	-	ost.
13,0-16,0	-	2,0	0,6	-	ost.
13,0-16,0	26,0-33,0	-	-	maks. 5,0	ost.
13,0-16,0	26,0-33,0	-	0,7-0,8	maks. 5,0	ost.
4,2-4,8	-	-	-	-	ost.
4,0-4,5	-	-	-	32,0-36,0	ost.
30,0	-	-	-	-	70,0
15,0-16,0	-	-	-	ost.	63,0-66,0
15,0-16,0	-	-	1,8	ost.	63,0-66,0

**Cerij i elementi rijetkih zemelja(RE).** Kao i magnezij, cerij je snažan dezoksidant i desulfurant, ali za razliku od magnezija cerij nije lako ispariv (točka isparavanja iznosi 2406 °C). Cerij dodan u taljevinu neće uzrokovati snažne i burne reakcije te nastajanja dima karakterističnog za obradu taljevine magnezijem. Cerij stvara mnogo stabilnije okside i sulfide zbog čega postoji daleko manja tendencija odgora i stvaranja troske.

Negativna strana cerija je visoka sklonost ka stvaranju karbida. Nodularni ljev proizveden obradom primarne taljevine cerijem znatno je osjetljiviji na debljinu stjenke i u tankostijenim odljevcima teško je postići lijevanu strukturu bez karbida.

Cerij se najčešće upotrebljava kao komponenta rijetkih zemalja (RE) u legurama FeSiMg. Uobičajen sadržaj rijetkih zemalja u legurama FeSiMg iznosi oko 0,5 - 1,0 %RE. Ovakva upotreba rijetkih zemalja i cerija značajno povećava broj nodula.

Djelovanje cerija i elemenata rijetkih zemalja detaljnije je razmatrano u okviru cjeline 3.7.3 „Utjecaj pratećih elemenata“

### 3.9.2 Izračunavanje potrebne količine predlegure za obradu taljevine

Potrebit dodatak predlegure za obradu primarne taljevine može se odrediti pomoću slijedećeg izraza:

$$Mg_{\text{predleg.}} = \frac{\%S \cdot 0.76 + Mg_{(GJS)} \cdot 10^4}{Mg_{(isk.)} \cdot Mg_{(pred.)}} \quad (3.5)$$

gdje je:

$Mg_{\text{predleg.}}$  – količina predlegure za obradu, %

$\%S$  – sadržaj sumpora u primarnoj taljevini, %

$Mg_{(GJS)}$  – rezidualni sadržaj magnezija, %  
 $Mg_{isk.}$  – iskorištenje magnezija, %  
 $Mg_{(pred.)}$  – sadržaj magnezija u leguri za obradu, %

### 3.9.3 Postupci proizvodnje nodularnog lijeva

Postupak proizvodnje nodularnog lijeva provodi se obradom primarne taljevine odgovarajućeg kemijskog sastava predlegurama u cilju modificiranja oblika izlučenog grafita. Rezultat pravilno provedene obrade je nodularni (sferični) oblik grafita u metalnoj osnovi.

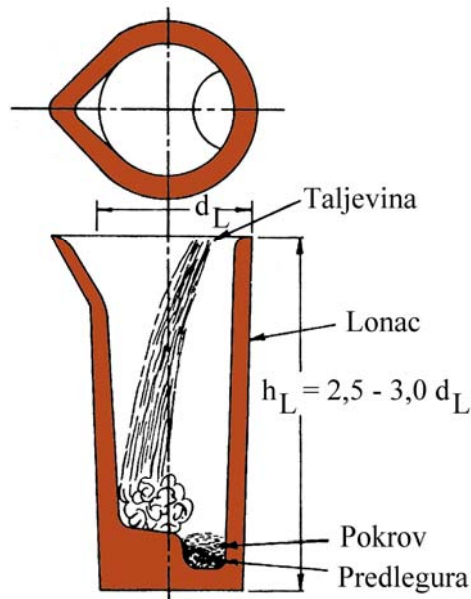
Tijekom povijesti razvijen je niz različitih postupaka obrade. Između svih postupaka danas najširu primjenu imaju slijedeći postupci:

- postupci obrade u loncu:
  - a) postupak obrade u otvorenom loncu („Sandwich“ postupak),
  - b) postupak obrade u loncu s poklopcem („Tundish Cover“ postupak),
  - c) postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom („Osmose“ postupak),
  - d) postupak obrade punjenom žicom („Cored Wire“ postupak)
- postupak obrade u kalupu („In Mould“ postupak),
- postupak protjecanja („Flotret“ postupak).

**Postupak obrade u otvorenom loncu - „Sandwich“ postupak.** Najčešće primjenjivani postupak za proizvodnju nodularnog lijeva je „Sandwich“ postupak (postupak s otvorenim loncem). Predlegura za obradu taljevine (i cjepivo ako se taljevina cijepi u loncu) smješta se u džep na dnu predgrijanog lonca i pokriva sitnom čeličnom strugotinom (slika 3.41).

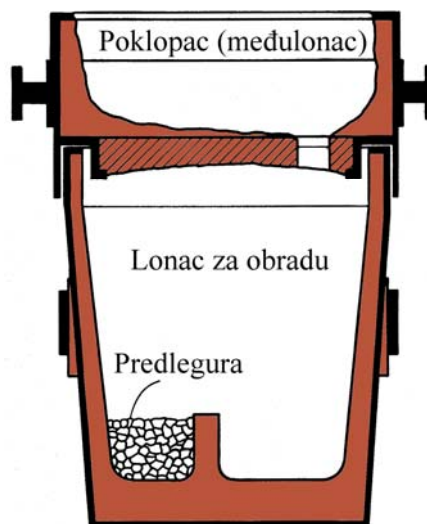
Količina čeličnog pokrova iznosi 2 – 3 % od mase taljevine. Zadatak čeličnog pokrova je da onemogući reakciju između taljevine i predlegure koja sadrži magnezij odmah nakon ulijevanja prve taljevine u lonac. Do taljenja čeličnog pokrova i reakcije doći će tek kod određenog nivoa taljevine u loncu. Na taj će se način omogućiti veće iskorištenje magnezija, jer pare magnezija prije no što iziđu na površinu prolaze kroz taljevinu i dolazi do usvajanja magnezija. Očekivana iskorištenja magnezija kreću se do 60 %.

„Sandwich“ postupak je jedan od najpopularnijih postupaka jer obuhvaća fleksibilnost, niske troškove, konzistentnost i jednostavnost obrade. Nedostaci ovog postupka su: velika količina dima i prašine koji se razvijaju tijekom obrade te manje iskorištenje magnezija u odnosu na ostale srodne postupke obrade.



Slika 3.41. Shematski prikaz „Sandwich“ postupka,  $d_L$  – promjer lonca,  $h_L$  – visina lonca

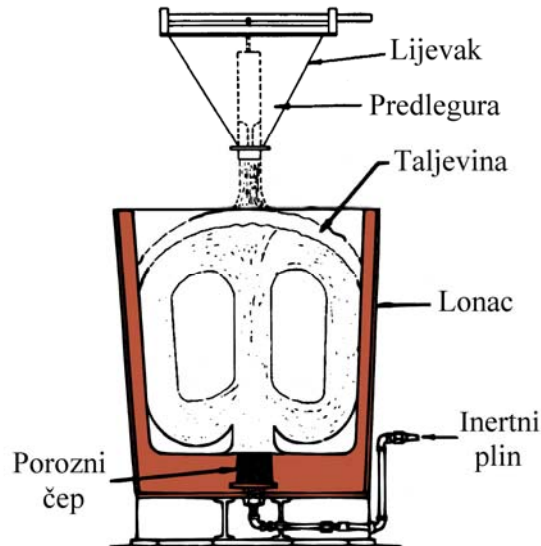
**Postupak obrade u loncu s poklopcem - „Tundish Cover“ postupak.** Poboljšana verzija relativno jednostavnog „Sandwich“ postupka je „Tundish Cover“ postupak (postupak obrade u pokrivenom loncu) (slika 3.42). Poklopac ujedno služi i kao međulonac za prihvatanje taljevine. U usporedbi sa „Sandwich“ postupkom, „Tundish Cover“ postupak, ako je pravilno proveden, osigurava povećano iskorištenje magnezija, konzistentnije usvajanje, smanjenje stvaranja troske, manji gubitak temperature taljevine, prigušivanje dima i bljeska tijekom obrade.



Slika 3.42. Shematski prikaz postupka obrade taljevine u loncu s poklopcem („Tundish cover“ postupak)

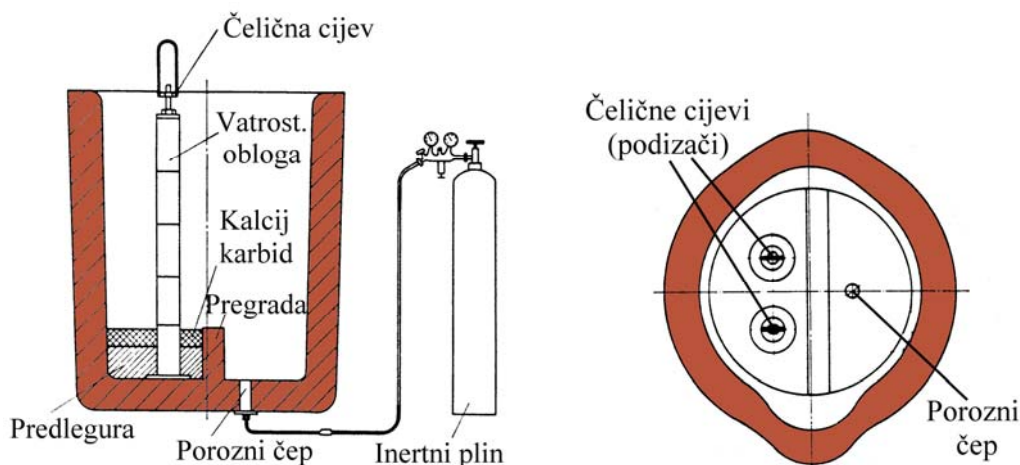
Ovim postupkom obrade mogu se ostvariti iskorištenja magnezija i do 80%. Cijepljenje taljevine može se provesti nakon obrade ili se cjepivo može dodati zajedno s predlegurom za obradu.

**Postupak obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom – „Osmose“ postupak.** Ovaj postupak široko se primjenjuje za odsumporavanje (npr. kalcij-karbidom) i nodularizaciju (najčešće s FeSiMg). U dno lonca ugrađen je porozni čep kroz kojeg se uvodi inertni plin u cilju miješanja taljevine i predlegure za obradu (slika 3.43). dodatak predlegure za obradu provodi se putem žljeba (lijevka) smještenog iznad lonca.



Slika 3.43. Shematski prikaz postupka obrade u loncu uz propuhivanje inertnim plinom („Osmose“ postupak)

Varijanta „Osmose“ postupka je „Osmose-Trigger“ postupak (postupak s poroznim čepom i okidačem). U zagrijani lonac postavljaju se dvije izolirane čelične cijevi (podizači). Smještene su u pregrađeni dio dna lonca koji je predviđen za smještaj predlegure za obradu (slika 3.44).

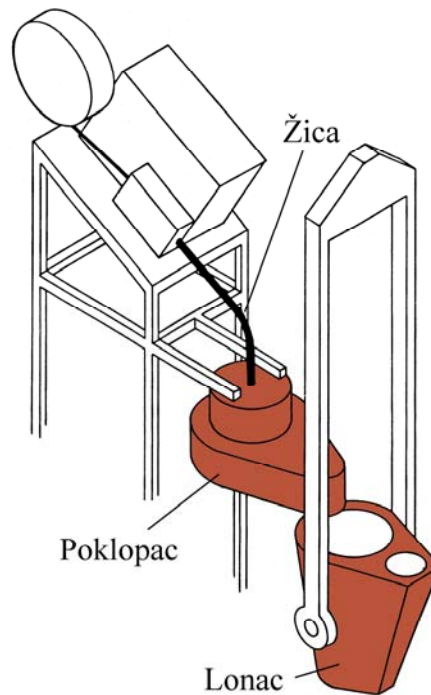


Slika 3.44. Shematski prikaz „Osmose-Trigger“ postupka obrade

Oko podizača postavlja se pripremljena predlegura za obradu, a na predleguru stavlja se kalcij-karbid. Kalcij-karbid ima funkciju da spriječi prijevremenu reakciju između taljevine i predlegure za obradu. Mlaz taljevine iz peći ne smije udarati u prostor u kojem se nalazi predlegura za obradu da ne bi došlo do prijevremene reakcije između taljevine i predlegure.

Postupak obrade provodi se na slijedeći način. Prvo se podiže jedna izolirana šipka, uz istovremeno propuhivanje dušikom, pri čemu dolazi do burne reakcije između predlegure za obradu i taljevine. Nakon smirivanja reakcije podiže se i druga izolirana šipka, tako da reagira i preostali dio predlegure za obradu.

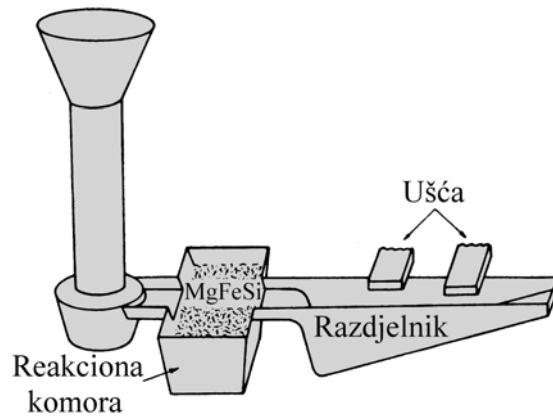
**Postupak obrade punjenom žicom - „Cored Wire“ postupak.** Na slici 3.45 shematski je prikazana tipična aparatura za obradu taljevine punjenom žicom.



Slika 3.45. Shematski prikaz tipične aparature za obradu taljevine punjenom žicom

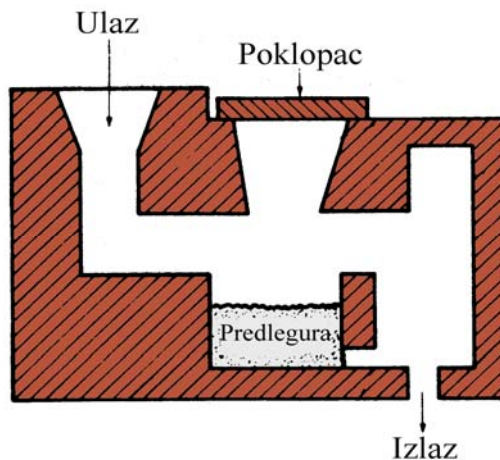
Predlegura se nalazi unutar čelične žice (omotača) promjera 9 – 13 mm koja je namotana na kolut. Žica se pomoću odgovarajućeg programiranog mehanizma uvodi u taljevinu kroz poklopac na loncu. Brzina injektiranja žice određena je tako da se čelična cijev tali pri dnu lonca, osiguravajući tako maksimalno vrijeme kontakta magnezija i taljevine. Poslije obrade, taljevinu je potrebno cijepiti jer se cjepivo ne dodaje zajedno s predlegurom za obradu.

**Postupak obrade u kalupu - „In Mould“ postupak** (slika 3.46) karakterizira postojanje reakcione komore unutar kalupa. Važna karakteristika ove metode je vrlo visok nivo usvajanja magnezija (> 90 %). Reakcije se odvijaju u zatvorenom prostoru kontroliranom brzinom, a kontakt s kisikom je minimalan. U ovom postupku obrade isključena je emisija dima i reakcijskih para u atmosferu. Obzirom da je svaki odljevak slučaj za sebe, zahtijeva se opsežna kontrola nodularnosti. Primjenjuju se nerazarajuće metode, kao što je ultrazvučno ispitivanje. Reakciona komora smještena je u uljevnom sustavu, zbog čega se može očekivati niži izvadak te niži broj odljevaka u jednom kalupu. Zbog toga se često primjenjuje i modificirana verzija prema kojoj je reakciona komora integralni uljevne čaše (nalazi se između uljevne čaše i spusta).



Slika 3.46. Shematski prikaz obrade taljevine u kalupu („In Mould“ postupak)

**Postupak protjecanja - „Flotret“ postupak** po koncepciji je sličan „In Mould“ postupku s razlikom da se odvija izvan kalupa. Primarna taljevina obrađuje se protjecanjem preko predlegure FeSiMg u reakcionoj komori, koja se nalazi u odvojenoj (samostalnoj) jedinici za obradu smještenoj između peći i kalupa ili lonca (slika 3.47). Jedinica za obradu posjeduje određene dimenzijske parametre u cilju zadržavanja istjecanja metala da bi se usvojila maksimalna količina magnezija. Površine u kontaktu s taljevinom obložene su vatrostalnim materijalom. U cilju manjih gubitaka temperature, provodi se predgrijavanje prije obrade.



Slika 3.47. Shematski prikaz „Flotret“ postupka

Cijepljenje taljevine provodi se u mlaz obrađene taljevine na izlazu iz jedinice za obradu. Za vrijeme obrade smanjeno je bljeskanje magnezija, nastaje vrlo malo troske, te se postiže visoko i konzistentno iskorištenje magnezija. Nedostatak ove metode odnosi se na povišene gubitke temperature tijekom obrade.



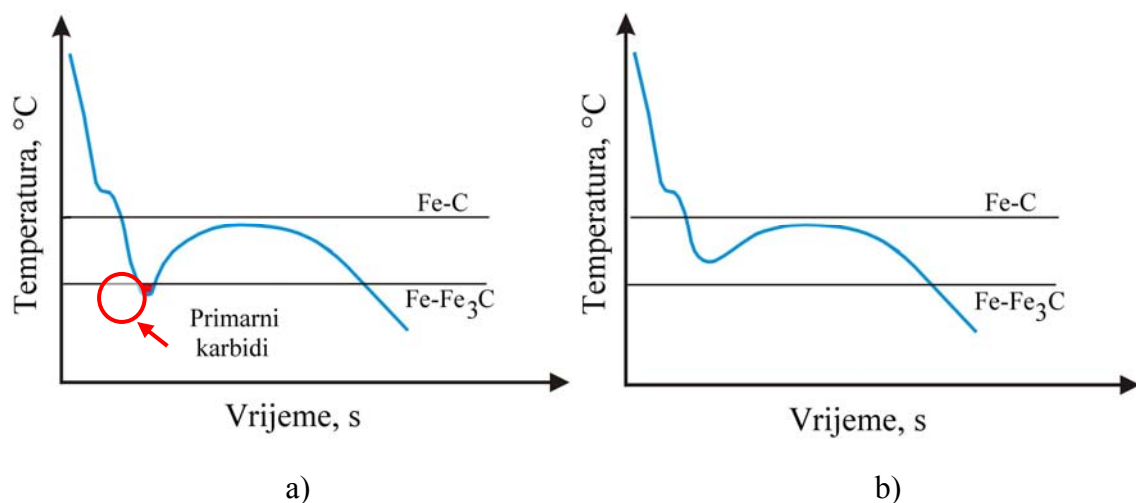
### 3.10 Cijepljenje nodularnog lijeva

Cijepljenje predstavlja kemijsku modifikaciju taljevine kojom se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije pothlađenja i povećanja broja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja. Cijepljenjem se ne unose u taljevinu nove čestice za nukleaciju grafita, već modificiraju postojeće da bi predstavljale aktivna mjesta za nukleaciju grafita. Cjepivo se dodaje u maloj količini u taljevinu željeznog lijeva neposredno prije ili za vrijeme lijevanja taljevine u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja.

#### 3.10.1 Učinci cijepljenja

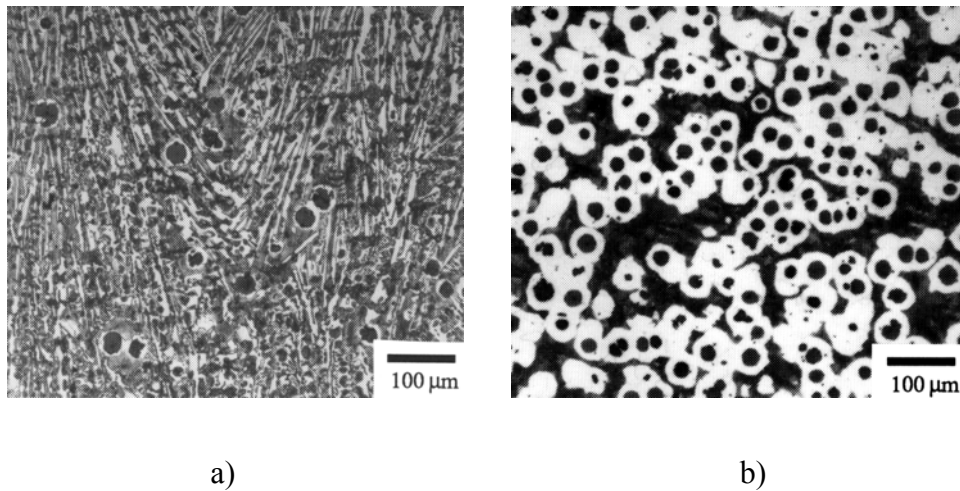
Cijepljenje je važan korak u proizvodnji nodularnog lijeva, jer utječe na njegova mikrostruktura i mehanička svojstva. Modifikacija postojećih uključaka u nodularnom lijevu u cilju stvaranja djelotvornih mjesta za nukleaciju grafita (vidi „Mehanizam nukleacije nodularnog grafita“) svakako je jedan od najvažnijih učinaka cijepljenja u nodularnom lijevu. Veći broj pogodnih mjesta za nukleaciju grafita rezultirati će većim brojem grafitnih nodula u mikrostrukturi. Pored toga, cijepljenje potpomaže stvaranju potpuno sferoidiziranih grafitnih nodula, što utječe na povećanje čvrstoće i duktilnosti.

Stvaranje primarnih (eutektičkih) karbida (cementita, odnosno odbjela) u mikrostrukturi može se izbjeći cijepljenjem taljevine. Cijepljenjem taljevine smanjuje se pothlađenje putem stvaranja većeg broja pogodnih mjesta za nukleaciju grafita, odnosno podiže temperatura eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  iznad temperature metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C), ispod koje se stvaraju karbidi. Ako temperatura taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja padne ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika doći će do stvaranja eutektičkih (primarnih) karbida, odnosno odbjela (slika 3.48a). Ukoliko se eutektičkom reakcijom oslobodi dovoljno topline, temperatura ostatka taljevine može ponovo porasti iznad temperature skrućivanja metastabilnog eutektika (slika 3.48a), čime se zaustavlja stvaranje odbjela i promovira izlučivanje grafita. U tom slučaju govorimo o meliranoj strukturi, jer je u strukturi prisutan grafit i cementit.



Slika 3.48. Shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva: a) stvaranje primarnih karbida, b) bez primarnih karbida

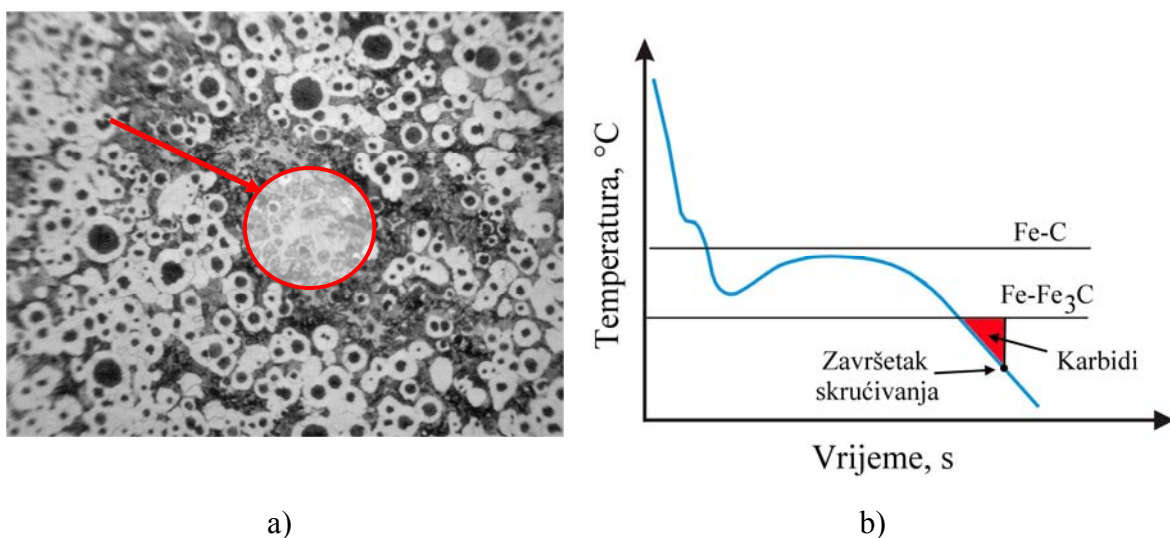
Slika 3.49a prikazuje primjer mikrostrukture necijepljenog nodularnog lijeva u kojoj se jasno mogu uočiti karbidi, dok slika 3.49b prikazuje mikrostrukturu iste taljevine nodularnog lijeva nakon cijepjenja.



Slika 3.49. Metalografska snimka mikrostrukture necijepljenog (a) i cijepljenog (b) nodularnog lijeva, nagrizeno stanje, povećanje 100x

Stvaranje odbjela posebno je izraženo u onim područjima odljevka koje karakteriziraju velike brzine skrućivanja (tanke stjenke, kutovi itd.). Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje odbjela putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika.

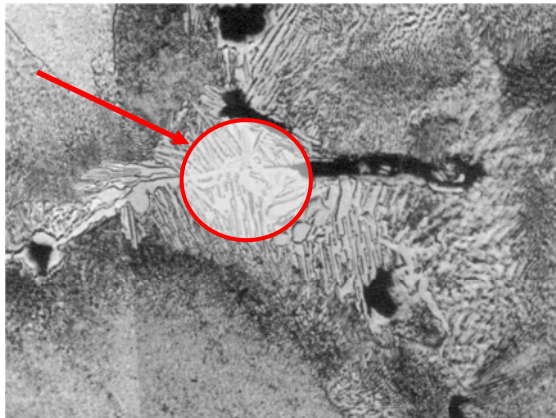
Stvaranje inverznog odbjela i intercelijastih karbida može se također spriječiti cijepljenjem taljevine. Inverzni odbjel može nastati kad je skrućivanje posljednje taljevine u kalupu praćeno lošim nukleacijskim uvjetima (uglavnom zbog slabljenja djelovanja cjepiva) (slika 3.50a). Sa slike 3.50b može se vidjeti da je solidus temperatura,  $T_S$  ispod temperature metastabilnog eutektika. Cijepljenjem taljevine može se povisiti temperatura  $T_S$  i na taj način izbjeći stvaranje inverznog odbjela. Stvaranje inverznog odbjela pospješeno je segregacijom karbidotvornih elemenata u taljevinu koja posljednja skrućuje.



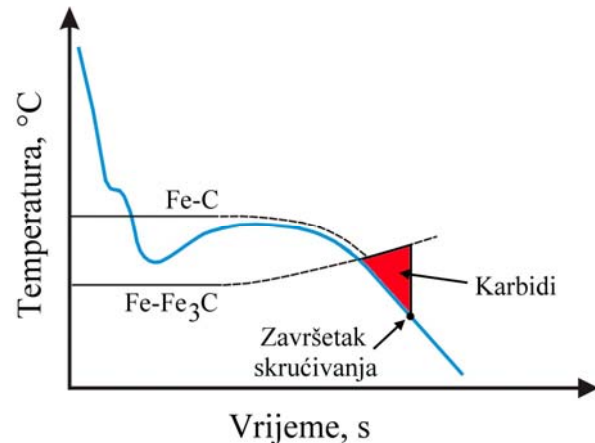
Slika 3.50. a) metalografska snimka mikrostrukture nodularnog lijeva u kojoj se jasno može uočiti inverzni odbjel (karbidi), b) shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva koja ukazuje na nastanak inverznog odbjela

Interčelijasti karbidi (slika 3.51a) nastaju u završnoj fazi eutektičkog skrućivanja. Rezultat su segregacije karbidotvornih elemenata, kao što su krom, mangan, vanadij itd. po granicama eutektičkih ćelija.

Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje interčelijastih karbida putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. 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 (slika 3.51b).



a)



b)

Slika 3.51. a) metalografska snimka mikrostrukture nodularnog lijeva na kojoj se jasno mogu uočiti interčelijasti karbidi, b) shematski prikaz krivulje hlađenja nodularnog lijeva koja ukazuje na nastanak interčelijastih karbida

Pravilnim cijepljenjem taljevine može se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida putem povećanja broja eutektičkih ćelija, čime se postiže veća „raspršenost“ karbidotvornih elemenata, a time i manja opasnost od stvaranja interčelijastih karbida. 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.

Cijepljenje utječe i na iznos rekalescencije tijekom eutektičkog skrućivanja. Dodatak cjepiva podiže temperaturu eutektičkog pohlađenja,  $T_{EP}$  i snižava temperaturu eutektičke rekalescencije,  $T_{ER}$  jer je u taljevini prisutno više centara nukleacije. Previsoke vrijednosti rekalescencije ukazuju na slabu nukleaciju i mogu uzrokovati nastanak oštećenja u kalupima od svježe kalupne mješavine, zbog velike volumne ekspanzije grafita koja se prvotno dešava pri skrućivanju. Ako se naglo izluči prevelika količina eutektičkog grafita, tj. ako je visoka brzina rekalescencije, javljaju se pri volumnoj ekspanziji značajne sile na stjenke kalupa i može doći do proširenja kalupne šupljine. Gustoća grafita iznosi  $\sim 2,2 \text{ g/cm}^3$ , dok je gustoća tekućeg željeza  $\sim 6,9 \text{ g/cm}^3$ . Tijekom skrućivanja može doći do porasta volumena taljevine, ako je izlučeno dovoljno eutektičkog grafita.

Zbog utjecaja na mikrostrukturu, cijepljenje utječe i na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Cijepljenjem se poboljšava vlačna čvrstoća, žilavost i duktilnost, a smanjuje tvrdoća nodularnog lijeva. Pored navedenog, cijepljenjem se poboljšava homogenost strukture, strojna obradivost, te smanjuje sklonost ka stezanju i odbjelu.

### 3.10.2 Kemijski sastav cjepiva i utjecaj manjinskih elemenata

Najpopularnije i najučinkovitije cjepivo za nodularni lijev je FeSi koji sadrži manje količine elemenata, kao što su aluminij, barij, kalcij, stroncij itd. (tablica 3.6).

Tablica 3.6. Tipični sastav najčešće primjenjivanih cjepiva

Cjepivo	Element, (mas.%)										
	Si	Al	Ca	Ba	Sr	Zr	Mn	Mg	Ti	RE*	C
Standardni FeSi	75-80	0,6-1,25	0,6-1,0								
FeSi-Ba	60-65	1,0	0,8	0,8		6,0	6,0				
FeSi-Ba	60-65	0,5-1,7	1,0	9,0-11,0							
FeSi-Ba	60-65	1,5	2,0	5,0-6,0			9,0-10,0				
FeSi-Zr	80	1,5-2,5	2,5			1,5					
FeSi-Sr	75	< 0,5	< 0,1		0,8						
FeSi-Sr	45-50	< 0,5	< 0,1		0,8						
FeSi-La	75	1,5								2,0-2,5La	

\* RE – elementi rijetkih zemalja

FeSi s niskim sadržajem kalcija i aluminijske nije učinkovit kao cjepivo. Najčešću primjenu ima cjepivo bazirano na FeSi koji sadrži 75 % silicija (FeSi75) i 1,0 – 2,0 % aluminijske, te 0,2 – 1,0 % kalcija. Cijepljenjem s navedenim cjepivom dobivaju se poboljšana mehanička svojstva i smanjuje sklonost ka stvaranju odbjela.

Cijepljenje nodularnog lijeva cjepivom koje sadrži barij rezultira većim brojem nodula i manjom sklonosti ka stvaranju odbjela u usporedbi s cijepljenjem lijevaoničkim FeSi75 [2, 98]. Pored toga, cjepiva koja sadrže barij otpornija su na slabljenje djelovanja cijepljenja s vremenom. Broj nodula/mm<sup>2</sup> u nodularnom lijevu povećava se i cijepljenjem taljevine s FeSi koji sadrži bizmut.

Cjepiva koja sadrže stroncij daju visok broj nodula i sprečavaju nastajanje karbida u nodularnom lijevu, ako je taljevina obrađena čistim magnezijem ili ako je sadržaj elemenata rijetkih zemalja (RE) vrlo nizak. Elementi rijetkih zemalja (RE), koji su često sadržani u nodularnom lijevu, neutraliziraju pozitivan učinak stroncija.

Elementi rijetkih zemalja, kao što su cerij i lantan mogu imati koristan i štetan utjecaj na mikrostrukturu i svojstva nodularnog lijeva, ovisno o uvjetima primjene. Mali dodatak elementa rijetkih zemalja je koristan jer sprječava štetno djelovanje antinodularizirajućih elemenata, kao što su antimon, olovo, titan itd. Previsok sadržaj elemenata rijetkih zemalja može rezultirati povišenom sklonosti ka stvaranju odbjela u tankostijenim odljevcima te stvaranjem degeneriranih oblika grafita u debelostjenim odljevcima, s naknadnim smanjenjem mehaničkih svojstava.

### 3.10.3 Slabljenje djelovanja cijepljenja

Maksimalni učinak cijepljenja postiže se odmah nakon dodatka cjepljiva u taljevinu. S vremenom dolazi do slabljenja djelovanja (odgora) cjepljiva (engl. *fading*), odnosno postepenog gubitka učinka cijepljenja s vremenom zadržavanja taljevine u loncu. Brzina slabljenja djelovanja cjepljiva ovisi o sastavu cjepljiva i taljevine u koju je cjepljivo dodano.

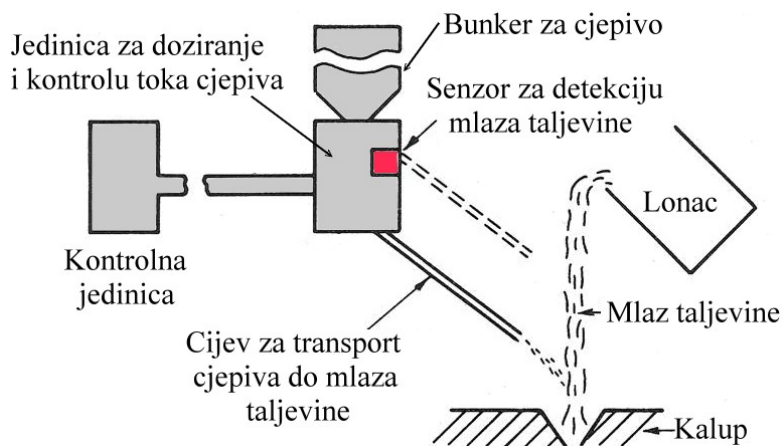
Posljedice slabljenja djelovanja cjepljiva su: porast pothlađenja taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja, porast tendencije ka stvaranju odbjela (pogotovo u tankim stjenkama), smanjenje broja nodula i stupnja nodularnosti, što u konačnici utječe na mehanička svojstva.

Zbog slabljenja djelovanja cjepljiva s vremenom zadržavanja taljevine, potrebno je odabrati adekvatno cjepljivo i optimalni dodatak ovisno o vremenu lijevanja i količini taljevine u loncu, odnosno taljevinu naknadno cijepiti da bi se izbjeglo stvaranje nepoželjnih mikrostrukturnih konstituenata u zadnje lijevanim odljevcima.

### 3.10.4 Metode cijepljenja

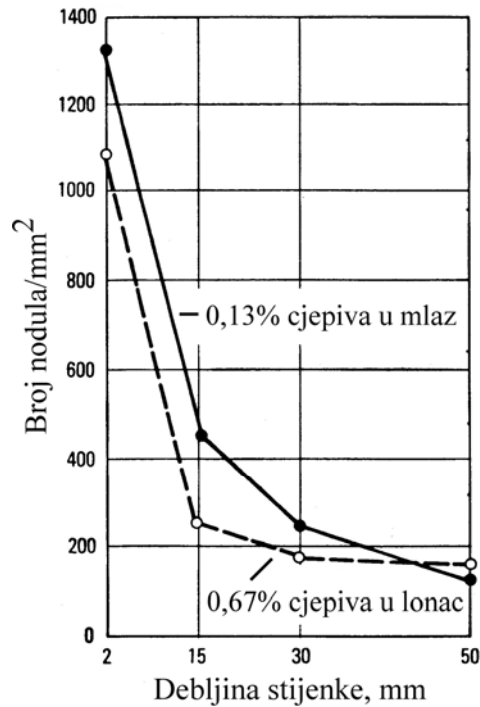
Dodatak cjepljiva u lonac (na dno lonca) prije početka njegovog punjenja najjednostavnija je i najčešće primjenjivana metoda cijepljenja u praksi. Pored slabijeg učinka cijepljenja, karakteristika ove metode je i slabljenje djelovanja cjepljiva tijekom zadržavanja taljevine u loncu, nedostatak homogenosti zbog procesnih varijacija itd.

Metode cijepljenja nakon što taljevina napusti lonac i ulazi u kalup (cijepljenje u mlaz prije ulaska u kalup) ili u samom kalupu poznate su kao metode kasnog ili naknadnog cijepljenja. Kod ovih metoda cjepljivo se može dodati na nekoliko načina: granulirano cjepljivo dodaje se u mlaz taljevine tijekom ulijevanja u kalup (slika 3.52), žica napunjena cjepljivom dodaje se uljevni sifon peći za održavanje i lijevanje taljevine te smještanjem granuliranog cjepljiva ili cjepljiva u obliku tableta u uljevnu čašu, spust ili razvodnik.



Slika 3.52. Shematski prikaz cijepljenja u mlaz taljevine prije ulaska u kalup

Metode kasnog cijepljenja mogu riješiti mnoge probleme prisutne kod cijepljenja u loncu. Kasno cijepljenje gotovo u potpunosti eliminira problem slabljenja djelovanja cjepljiva te omogućuje, za isti nivo cijepljenja, znatno manji dodatak cjepljiva u usporedbi s cijepljenjem u loncu (slika 3.53). Kasno cijepljenje može se upotrijebiti kao dodatak cijepljenju u loncu radi postizanja snažnijeg efekta cijepljenja i utjecaja na slabljenje djelovanja cjepljiva.



Slika 3.53. Utjecaj metode cijepljenja na broj nodula u različitim debljinama stijenki odljevka od nodularnog lijeva. Predlegura FeSiMg, cjepivo FeSi75 koji sadrži kalcij

Obično se dodaje od 0,1 –do 0,4 % cjepiva što ovisi o vrsti cjepiva, metodi cijepljenja, vremenu zadržavanja taljevine u loncu itd. Dodaci cjepiva iznad potrebnih za kontrolu odbjela te postizanje željene mikrostrukture i mehaničkih svojstava rezultira višim troškovima te može dovesti do nastanka grešaka u odljercima (uključujući uzrokovani troškom koja potječe od dodatka cjepiva, stezanje itd.).

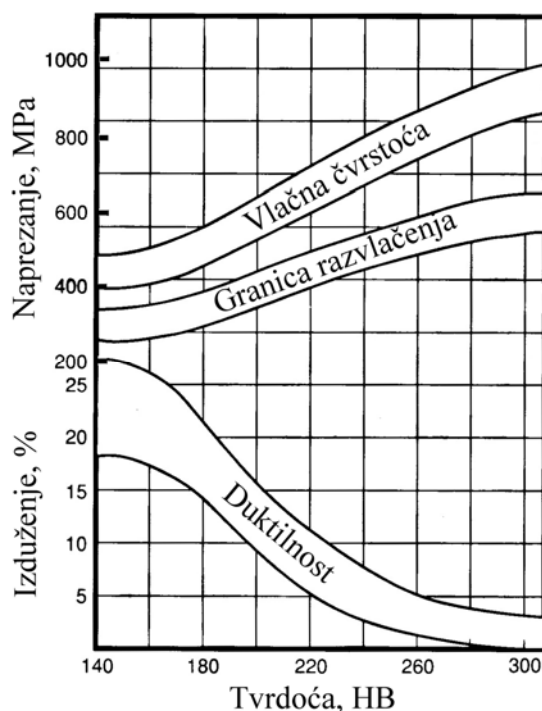
Da bi se ostvarili maksimalni učinci cijepljenjem, potrebno je obratiti pažnju na slijedeće:

- Cjepiva moraju biti suha. Ukoliko cjepiva nisu suha postoji opasnost od pojave mjehuravosti u odljercima.
- Točno poznavati količini taljevine koja se cijepi te količinu upotrijebljenog cjepiva da bi se ostvarili konzistentni rezultati.
- Što se cjepivo duže vrijeme zadržava na vrućem dnu lonca prije ispuštanja taljevine iz peći veći je stupanj oksidacije cjepiva, a time i slabiji učinak.
- Cjepivo dodati u lonac kada u njemu ima ~ 100 do 130 mm taljevine. Na ovaj način postiže se bolje miješanje cjepiva s taljevinom i više iskorištenje cjepiva.
- Cjepivo dodati na mjesto gdje mlaz taljevine iz peći udara u taljevinu u loncu. Na taj način postiže se bolje miješanje cjepiva i taljevine. Pored toga, na tom mjestu uvijek se nalazi znatno manja količina troske u odnosu na ostala područja. Na taj način sprječava se kontakt cjepiva s troskom i shodno tome poboljšava iskorištenje cjepiva. Ako se cjepivo dodaje u sam mlaz, dolazi do brze oksidacije finih čestica iz cjepiva čime se znatno umanjuje učinak cijepljenja.
- Ne cijepiti taljevinu s niskom temperaturom. Cjepivo mora biti potpuno otopljeno. Ako cjepivo nije homogeno raspodijeljeno u taljevini, što je slučaj kod taljevina koje imaju nisku temperaturu u trenutku cijepljenja, stvaraju se u područja s visokom te područja s niskom koncentracijom cjepiva. Pod tim uvjetima nastaju različiti tipovi grafitnih listića, a time i područja u odljevku s različitim strukturama.

- Brzo napuniti lonac u kojem se provodi cijepljenje. Brzo punjenje lonca nakon cijepjenja potpomaže brzo otapanje cjepiva i potpuno miješanje s taljevinom u loncu.
- Osigurati miješanje cijepljene taljevine prije lijevanja u kalupe.
- Nakon cijepjenja lijevanje provesti što je moguće prije. Ovakvim pristupom smanjuje se odgor cjepiva i postižu maksimalni učinci cijepjenja.
- Osigurati konzistentnost u provođenju cijepjenja.
- Odabrati adekvatnu veličinu čestica (granulaciju) cjepiva prema temperaturi i količini taljevine koja se cijepi. Granulacija cjepiva trebala bi biti dovoljno sitna da se osigura brzo otapanje cjepiva i laka raspodjela kroz taljevinu.

### 3.11 Svojstva nodularnog lijeva

Mehanička i fizikalna svojstva nodularnog lijeva ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Kombinacijom raznih kemijskih sastava i uvjeta pri skrućivanju te hlađenju nakon skrućivanja ili putem naknadne toplinske obrade mogu se dobiti različite mikrostrukture, odnosno širok dijapazon svojstva nodularnog lijeva (slika 3.54), što omogućuje konstruktorima odabir kvalitete koja osigurava najpovoljniju kombinaciju svojstava.



Slika 3.54. Odnos između vlačne čvrstoće, tvrdoće i izduženja nodularnog lijeva

U odnosu na sivi i vermikularni lijev, nodularni lijev ima višu vlačnu čvrstoću, tvrdoću, izduženje i žilavost, ali nižu toplinsku vodljivost, sposobnost prigušenja vibracija te lošiju livljivost. Vrijednosti vlačne čvrstoće perlitnog nodularnog lijeva mogu doseći i 900 Mpa, dok se specijalnim postupcima toplinske obrade mogu postići vlačne čvrstoće i iznad 1000 MPa.

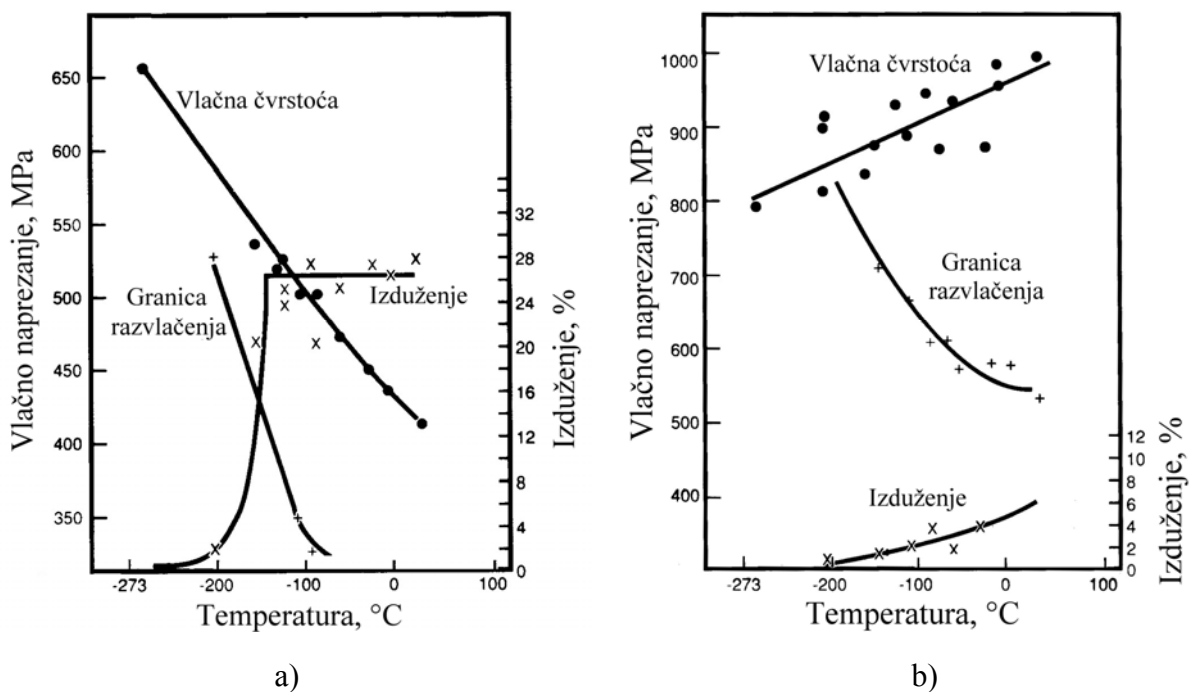
Broj nodula i nodularnost imaju značajan utjecaj na svojstva nodularnog lijeva. Niska nodularnost i prisustvo degeneriranih oblika grafita negativno utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Feritni nodularni ljevovi imaju visoko izduženje i relativno nisku vlačnu čvrstoću te tvrdoću, dok je kod perlitnih nodularnih ljevova situacija obrnuta. (vidi tablicu 3.1).

S porastom vlačne čvrstoće raste granica razvlačenja i tvrdoća nodularnog lijeva, a smanjuje se izduženje i žilavost.

Za razliku od sivog lijeva, nodularni ljev pokazuje elastično ponašanje slično čeliku, koje je međutim ograničeno postepenim početkom plastične deformacije oko grafitnih nodula.

Ukoliko se nodularni ljev primjenjuje pri niskim temperaturama mora se uzeti u obzir utjecaj temperature na čvrstoću i izduženje. Feritni nodularni ljevovi preferiraju se za ovakve primjene jer posjeduju superiorniju duktilnost pri niskim temperaturama u odnosu na perlitni nodularni ljev. S padom temperature raste vlačna čvrstoća i granica razvlačenja feritnog nodularnog lijeva. Vrijednosti izduženja pri sobnoj temperaturi zadržavaju se do vrlo niskih temperatura, nakon čega slijedi oštar pad (slika 3.55a). Granica razvlačenja perlitnog nodularnog lijeva raste s padom temperature, ali opada vlačna čvrstoća i izduženje (slika 3.55b).



Slika 3.55. a) utjecaj temperature na vlačna svojstva feritnog nodularnog lijeva, b) utjecaj temperature na vlačna svojstva perlitnog nodularnog lijeva

Nodularni ljev može se uspješno primijeniti i na povišenim temperaturama. Kod feritnih i perlitnih nelegiranih nodularnih ljevova smanjenje vlačne čvrstoće do 400 °C iznosi ~ 30,0 %. Vlačna čvrstoća perlitnog nodularnog lijeva je viša od vlačne čvrstoće feritnog nodularnog lijeva pri svim temperaturama.

Nodularni ljev ima višu žilavost od sivog i vermikularnog lijeva. Kombinacija visoke čvrstoće i dobre žilavosti, koja je inače nekarakteristična za sivi i vermikularni ljev, omogućila je vrlo široku primjenu ovog materijala.

Feritni nodularni ljev ima veću žilavost od perlitnog nodularnog lijeva. Žilavost nodularnog lijeva opada sa sniženjem i porastom temperature.



Sposobnost prigušenja vibracija ima značajnu ulogu u konstrukciji suvremenih komponenti. Visoka sposobnost prigušenja vibracija reducira buku i vibracije koje emitiraju strojne komponente koje su podvrgnute cikličkim naprezanjima. Nodularni lijev ima nižu sposobnost prigušenja vibracija od sivog i vermikularnog lijeva. Sposobnost prigušenja vibracija nodularnog lijeva opada s porastom udjela nodularnog grafita. Odnos relativnih sposobnosti prigušenja vibracija sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva je:

$$\text{Sivi lijev} : \text{vermikularni lijev} : \text{nodularni lijev} = 1,0 : 0,60 : 0,34$$

Gustoća nodularnog lijeva primarno ovisi o udjelu grafitiziranog ugljika i kreće se od  $6,8 \text{ g/cm}^3$  za visokougljični feritni nodularni lijev do  $7,4 \text{ g/cm}^3$  za niskougljični perlitni nodularni lijev. Obzirom da posjeduje nižu gustoću u odnosu na čelik, pogodna je supstitucija za kovani ili lijevani čelik.

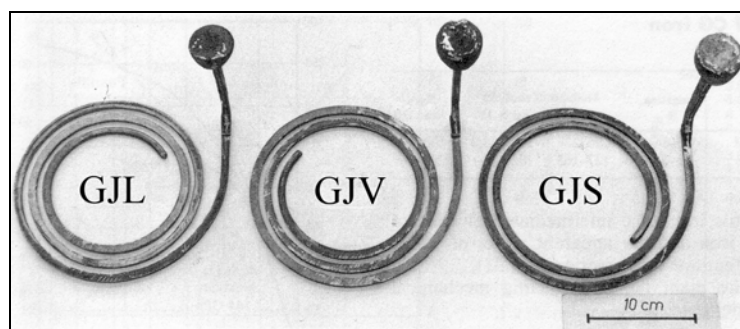
Toplinska vodljivost nodularnog lijeva pod snažnim je utjecajem morfologije grafita. Budući da grafitne nodule nisu međusobno povezane, toplinska vodljivost nodularnog lijeva znatno je niža od toplinske vodljivosti sivog i vermikularnog lijeva. Pored oblika grafita, struktura metalne osnove utječu na toplinsku vodljivost. Feritni nodularni lijev ima više toplinsku vodljivost od perlitnog nodularnog lijeva.

Nodularni lijev ima bolju otpornost na rast i oksidaciju od sivog lijeva. Povećanjem sadržaja silicija i dodatkom molibdena značajno se smanjuje oksidacija nodularnog lijeva.

Zbog niske toplinske vodljivosti i visokog modula elastičnosti, legirani nodularni ljevovi nisu pogodni za primjene koje uključuju oštre toplinske cikluse (grijanje-hlađenje).

Perlitni nodularni ljevovi imaju znatno nižu otpornost na rast i oksidaciju od feritnih nodularnih ljevova zbog grafitizacije karbidne komponente, odnosno raspada cementita pri temperaturama iznad  $540 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Livljivost taljevine željeznog lijeva općenito ovisi o sadržaju ugljika i silicija te temperaturi. Pored toga, značaju ulogu ima i morfologija skrućivanja. Na slici 3.56 prikazani su rezultati ispitivanja livljivosti taljevina željeznih ljevova, tzv. spiralne probe (Sippove probe).



Slika 3.56. Spiralne probe odlivene od sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva. Temperatura taljevine ista u sve tri slučaja

Sa slike 3.56 može se vidjeti da sivi lijev pokazuje najbolju livljivost, a nodularni lijev najlošiju. Livljivost vermikularnog lijeva leži između livljivosti sivog i nodularnog lijeva.

Nelegirani nodularni ljevovi pokazuju približno istu **otpornost na koroziju** kao sivi lijev i superiorniji su od nelegiranog čelika.

Otpornost na trošenje nodularnog lijeva primarno je određena njegovom mikrostrukturom. Perlitni nodularni ljevovi imaju višu otpornost na trošenje od feritnih

nodularnih ljevova. Daljnje poboljšanje može se postići legiranjem ili toplinskom obradom da bi se ostvarila tvrda martenzitna ili bainitna struktura.

Strojna obradivost nodularnog lijeva lošija je od strojne obradivosti sivog lijeva. Lakše se provodi kod kvaliteta koje imaju viši udio ferita u metalnoj osnovi u odnosu na kvalitete koje imaju visok udio perlita. Prisustvo odbjela, površinskih uključaka itd., negativno utječe na strojnu obradivost.

### 3.12 Toplinska obrada nodularnog lijeva

Većina odljevaka od nodularnog lijeva primjenjuje se u lijevanom stanju. Tražena svojstva treba nastojati ostvariti u lijevanom stanju, jer primjena naknadne toplinske obrade povećava troškove proizvodnje odljevaka. Pored povećanja troškova proizvodnje, toplinska obrada, bilo da se provodi pri niskim ili visokim temperaturama, može uzrokovati deformaciju odljevka. Toplinskom obradom mogu se postići značajnije promjene u metalnoj osnovi nodularnog lijeva, bez utjecaja na veličinu i oblik grafita ostvarenog tijekom lijevanja.

Toplinska obrada odljevaka od nodularnog lijeva provodi se da bi se:

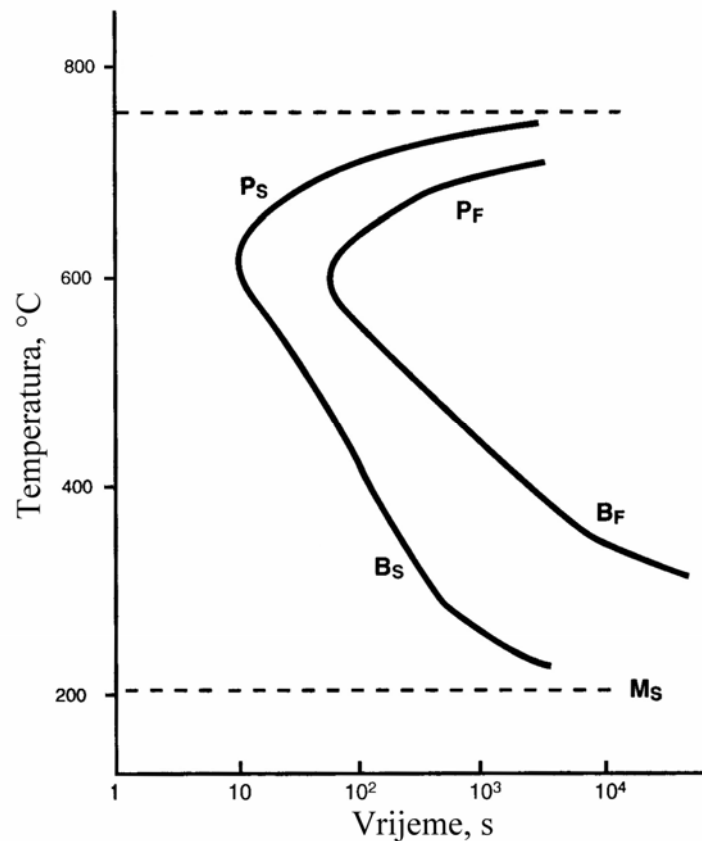
- povećala žilavost i duktilnost,
- povećala čvrstoća i otpornost na trošenje,
- poboljšala otpornost na koroziju,
- stabilizirala mikrostrukturu i minimalizirao rast,
- ujednačila svojstva u odljevku s različitim debljinama stjenki,
- poboljšala konzistentnost svojstava,
- poboljšala strojnu obradivost,
- uklonila zaostala unutarnja naprezanja.

Kontrola pretvorbe austenita tijekom hlađenja predstavlja osnovu za većinu toplinskih obrada nodularnog lijeva. Ovisno o brzini hlađenja (koja je povezana s debljinom stjenke) i kemijskom sastavu, austenit se razlaže procesom difuzije ugljika u ferit, perlit ili bainit. Pri vrlo velikim brzinama hlađenja dolazi do pretvorbe austenita u martenzit zbog odsutnosti difuzije ugljika. Pretvorbe austenita u ove različite produkte te utjecaj brzine hlađenja i kemijskog sastava najbolje su opisane TTT (engl. *Time – Temperature- Transformations*) dijagramima (slika 3.57).

Pri sporom hlađenju ispod  $A_1$  temperature (gonja horizontala isprekidana linija, slika 3.57) dolazi do pretvorbe austenita u ferit, s tim da se ugljik izlučuje u obliku grafita i difundira na postojeće grafitne nodule. Ovo predstavlja osnovu feritizirajućeg žarenja, odnosno toplinske obrade kojoj je cilj dobiti potpuno feritnu metalnu osnovu. Pri većim brzinama hlađenja, vrijeme za difuziju ugljika je ograničeno i austenit se razlaže u perlit, što predstavlja osnovu za normalizaciju. Još veće brzine hlađenja rezultiraju razlaganjem austenita u bainit s čim je povezano značajno povećanje čvrstoće i tvrdoće. Konačno, pri vrlo visokim brzinama hlađenja, vrijeme za difuziju ugljika je u tolikoj mjeri ograničeno da dolazi do pretvorbe austenita u martenzit.

Kemijski sastav je važan faktor koji utječe na toplinsku obradu nodularnog lijeva. U odnosu na čelik, nodularni lijev ima viši sadržaj ugljika i silicija, zbog čega će i učinak toplinske obrade biti drugačiji. Viši sadržaj ugljika u nodularnom lijevu povećava prokaljivost, omogućujući da i deblje stjenke budu toplinski obrađene uz niže zahtjeve za skupim legurama ili sredstvima za gašenje. Kao i kod ostalih željeznih legura, količina ugljika u metalnoj osnovi određuje konačnu tvrdoću: viši sadržaj ugljika u metalnoj osnovi – viša

tvrdća. S druge strane, viši sadržaji ugljika mogu uzrokovati pojavu pukotina pri gašenju zbog stvaranja martenzita s povišenim sadržajem ugljika.



Slika 3.57. Tipični TTT dijagram za nelegirani nodularni lijev. P<sub>S</sub> – početak stvaranja perlita, P<sub>F</sub> – završetak stvaranja perlita, B<sub>S</sub> – početak stvaranja bainita, B<sub>F</sub> – završetak stvaranja bainita, M<sub>S</sub> – temperatura početka stvaranja martenzita

Silicij ima također snažan utjecaj na odziv nodularnog lijeva na toplinsku obradu. S porastom sadržaja silicija smanjuje se topljivost ugljika u austenitu. Prema tome, s porastom sadržaja silicija raste količina izlučenog ugljika u obliku grafita tijekom sporog hlađenja te udio ferita u metalnoj osnovi.

Prokaljivost je važno svojstvo svakog odljevka jer određuje dubinu do koje se može ostvariti potpuna ili djelomična martenzitna metalna osnova te potrebnu oštrinu (brzinu) gašenja. Pri odabiru legirajućih elemenata za povećanje prokaljivosti potrebno je uzeti u obzir, pored jačine utjecaja na prokaljivost, i njihov utjecaj na mikrostrukturu. Krom je snažan element za povećanje prokaljivosti, ali postoji velika opasnost od stvaranja karbida u lijevanom stanju. Pored kroma, snažan utjecaj na prokaljivost ima molibden, vanadij i mangan. Međutim, ovi elementi također promoviraju stvaranje karbida. Prokaljivost se može poboljšati i dodatkom nikla, s tim da se zahtijeva viši dodatak u odnosu na prethodno navedene elemente.

Vremena pretvorbi u velikoj mjeri određena su sastavom i legirajući elementi često se odabiru prema njihovom utjecaju na TTT dijagram. Većina legirajućih elemenata pomiče linije pretvorbi u desno (odgađaju početak pretvorbe austenita) i kao što je rečeno povećavaju prokaljivost. Prema tome, pri odabiru legirajućih elemenata za poboljšanje prokaljivosti potrebno je uzeti u obzir njihov utjecaj na TTT dijagram, tendenciju ka stvaranju karbida te

sklonost ka segregacijama, što rezultira visokim lokalnim koncentracijama i stvaranjem interčelijastih karbida.

Oblik grafitnih nodula ne mijenja se tijekom toplinske obrade. Grafitne nodule imaju vrlo važnu ulogu u toplinskoj obradi nodularnog lijeva jer daju i prihvaćaju ugljik.

### 3.12.1 Uklanjanje zaostalih napreznja

Rezidualna (zaostala) napreznja nastaju tijekom skrućivanja i hlađenja odljevaka i uzrokovana su različitim brzinama hlađenja između različitih debljina stjenki. Rezidualna napreznja mogu uzrokovati spontano pucanje odljevaka te promjenu dimenzija i dimenzijsku nestabilnost tijekom obrade ili upotrebe odljevka.

Rezidualna napreznja mogu se izbjeći ili minimalizirati na slijedeći način:

- modificiranjem dizajna odljevka,
- lokalnim uklanjanjem pijeska u područjima debelih stjenki odljevka (da bi se postiglo jednolično hlađenje),
- ranijim istresanjem odljevaka s značajnim razlikama u debljinama stjenki i smještanjem u peć da bi se ostvarilo sporo hlađenje,
- izbjegavanjem pojave odbjela u rubovima,
- pravilnim cijepljenjem i kemijskim sastavom.

Za razliku od sivog lijeva, kod odljevka od nodularnog lijeva rijetko se zahtijeva uklanjanje unutarnjih zaostalih napreznja. Deformacija nodularnog lijeva je elastična (osim ako nisu previsoka napreznja u odljevku), zbog čega odljevci od nodularnog lijeva zadržavaju svoju dimenziju beskonačno dugo vremena. Odljevci od nodularnog lijeva deformirati će se ako je značajan dio odljevka uklonjen strojnom obradom, jer se mijenja raspodjela napreznja.

Temperature na kojima se provodi uklanjanje rezidualnih napreznja nalaze se ispod temperature pretvorbe ferita, odnosno perlita u austenit. Previsoke temperature i preduga zadržavanja na visokim temperaturama mogu dovesti do smanjenja vlačne čvrstoće i tvrdoće (raspad cementita u perlitu).

Odljevke treba smjestiti u peć pri temperaturi  $< 200$  °C. Smještanjem kompleksnih odljevaka ili odljevaka s visokim unutarnjim napreznjima u vruću peć može rezultirati različitim toplinskim napreznjima koja mogu uzrokovati deformaciju tijekom daljnje toplinske obrade. Odljevci se ne smiju međusobno dodirivati.

Uklanjanje zaostalih napreznja provodi se na temperaturi od 600 °C,  $\pm 10$ °C. brzina zagrijavanja do ove temperature treba iznositi 50 – 100 °C/h. Vrijeme zadržavanja na temperaturi od 600 °C iznosi 1 h za svakih 25 mm poprečnog presjeka (debljine stjenke). Nakon toga odljevci se moraju sporo hladiti u peći brzinom 50 – 100 °C/h do 200 °C (ako se zahtijeva vrlo visok stupanj uklanjanja napreznja hladiti u peći do 150 °C) da bi se izbjeglo ponovno stvaranje napreznja u odljevcima, zatim ukloniti odljevke iz peći i hladiti ih na zraku.

Temperatura na kojoj se uklanjaju unutarnja rezidualna napreznja ne smije biti viša od 610 °C jer strukturne promjene koje nastaju mogu utjecati na mehanička svojstva odljevaka.

### 3.12.2 Žarenje

Primarna svrha žarenja ili feritizacije nodularnog lijeva je proizvodnja odljevaka s visokom duktilnosti i žilavosti, smanjenom čvrstoćom i tvrdoćom, poboljšanom strojnom obradivosti i jednoličnim svojstvima.

Žarenjem se razlažu karbidi i postiže potpuno feritna metalna osnova. Razlaganje nelegiranih karbida, odnosno karbida u nodularnom lijevu koji ne sadrži visoku koncentraciju elemenata koji stabiliziraju karbide (krom, mangan) provodi se zadržavanjem na temperaturi od 900 – 920 °C (austenitno područje) u trajanju od 2 sata za odljevke s debljinom stijenke do 25 mm plus 1 dodatni sat za svakih dodatnih 25 mm poprečnog presjeka (debljine stijenke), zatim sporo hlađenje u peći do 700 °C i zadržavanje na toj temperaturi 5 sati, potom hlađenje do 500 °C tijekom 2 sata, nakon čega slijedi hlađenje na zraku. Kod nodularnih lijevova koji imaju nizak sadržaj elemenata koji stabiliziraju perlit, kao što je mangan ili bakar, vrijeme zadržavanja od 5 sati može se zamijeniti sporim hlađenjem do 500 °C. Pri tome je maksimalna brzina hlađenja u peći uglavnom ovisna o sadržaju silicija, mangana i, ako je prisutan, nikla. Silicij povećava, a mangan i nikal smanjuju maksimalno dopuštene brzine hlađenja. Karbide u nodularnom lijevu koji ima visok sadržaj elemenata koji stabiliziraju karbide (npr. 0,25 % kroma i 0,5 % mangana) vrlo je teško razložiti čak i pri temperaturama od 930° C.

Ako u strukturi nisu prisutni karbidi, žarenje se može provesti na nižim temperaturama da bi se dobila potpuno feritna metalna osnova. U tom slučaju žarenje se provodi zagrijavanjem na 700 °C i zadržavanjem na toj temperaturi 5 sati plus 1 sat za svakih 25 mm poprečnog presjeka (debljine stijenke), nakon čega slijedi sporo hlađenje u trajanju od ~ 3 sata do 400 °C i potom hlađenje na zraku.

### 3.12.3 Normalizacija

Cilj normalizacije je uklanjanje karbida, postizanje perlitne metalne osnove, povećanje čvrstoće i tvrdoće te dobivanje jednoličnijih svojstava. Ako su u lijevanom stanju prisutni karbidi odljevak se mora zagrijati (austenitizirati) na temperaturu 900 – 920 °C, odnosno 850 °C ako nisu prisutni karbidi i držati na navedenim temperaturama 2 sata plus 1 sat za svakih dodatnih 25 mm poprečnog presjeka, da bi se dobila potpuno austenitna metalna osnova bez karbida. Nakon toga slijedi hlađenje na zraku. Vrlo je važno osigurati dovoljnu brzinu hlađenja da se spriječi stvaranje ferita i ostvari potpuno perlitna metalna osnova. Brzina hlađenja ovisi o veličini poprečnog presjeka odljevka te sadržaju legirajućih elemenata (prokaljivost). Ako se potrebna brzina hlađenja ne može osigurati hlađenjem na mirnom zraku primjenjuje se hlađenje ventilatorima. Ukoliko se i ovakvim hlađenjem ne može postići željena perlitna mikrostruktura, potrebno je provesti legiranje elementima koji stabiliziraju perlit, kao što je bakar, kositar, nikal ili antimon. Nakon normalizacije uglavnom su prisutna zaostala naprezanja u odljevku, zbog čega treba provesti toplinsku obradu za uklanjanje zaostalih naprezanja.

Normalizacijom u dva koraka ili stupnjevitom normalizacijom može se postići značajno poboljšanje izduženja i udarne žilavosti uz manji pad čvrstoće i tvrdoće u odnosu na konvencionalno provedenu normalizaciju. U tom slučaju postiže se feritno/perlitna metalna osnova. Austenitizacija se provodi na 900 – 925 °C u trajanju od 2 - 5 sati, nakon čega slijedi hlađenje u peći na temperaturu 10 – 25 °C iznad gornje kritične eutektoidne temperature (~ 760 °C) i zadržavanje na toj temperaturi 3 sata. Potom se odljevci hlade na zraku do sobne temperature.

### 3.12.4 Kaljenje

Maksimalna tvrdoća odljevaka od nodularnog lijeva postiže se toplinskom obradom koja se sastoji od austenitizacije i naknadnog kaljenja dovoljnom brzinom da bi se dobio martenzit. Tvrdoća postignuta nakon kaljenja ovisi o ostvarenom sadržaju ugljika u austenitu tijekom austenitizacije (a prema tome i u martenzitu) te udjelu martenzita u metalnoj osnovi. Sadržaj ugljika u austenitu ovisi o temperaturi austenitizacije (viša temperatura, više ugljika u austenitu) i sadržaju silicija (viši sadržaj silicija, niži sadržaj ugljika u austenitu). Niže temperature austenitizacije rezultiraju nižim sadržajem ugljika u austenitu, što u konačnici vodi do martenzita niže tvrdoće. Kod nižih sadržaja ugljika u martenzitu manja je opasnost za nastajanje pukotina i deformacije odljevaka. Povišenim temperaturama austenitizacije postiže se viši sadržaj ugljika u austenitu, ali se tvrdoća snižava zbog zaostalog austenita i nižeg konačnog sadržaja martenzita u metalnoj osnovi.

Sredstvo za kaljenje te miješanje sredstva za kaljenje vrlo su važni faktori u procesu kaljenja. Najčešće primjenjivana sredstva za kaljenje su ulje i voda. Gašenje u vodi je oštrije od gašenja u ulju.

Miješanjem sredstva za kaljenje može se poboljšati oštrina kaljenja i jednoličnost hlađenja kompleksnih odljevaka. Pri odabiru medija za kaljenje potrebno je uzeti u obzir osjetljivost odljevka na nastajanje pukotina i deformaciju.

Nakon kaljenja potrebno je provesti popuštanje.

### 3.12.5 Popuštanje

Popuštanjem se smanjuje čvrstoća i tvrdoća te poboljšava duktilnost, žilavost i strojna obradivost gašenih ili normaliziranih nodularnih ljevova. Pored toga, popuštanjem nakon gašenja smanjuju se zaostala naprezanja, odnosno mogućnost nastajanja pukotina. Temperature popuštanja kreću se do 600 °C, ovisno o željenoj čvrstoći i tvrdoći. Vrijeme držanja iznosi 2 sata plus 1 sat za svakih 25 mm poprečnog presjeka odljevka. Nakon popuštanja odljevci se moraju sporo hladiti do 200 °C da bi se smanjila zaostala naprezanja. Popuštanje na temperaturama iznad 600 °C nije preporučljivo zbog mogućih strukturnih promjena.

Proces popuštanja u velikoj je mjeri određen željenom promjenom svojstava, sadržajem legirajućih elemenata, mikrostrukturom koja se popušta te brojem nodula. Nizak sadržaj legirajućih elemenata, martenzitna metalna osnova i visok broj nodula smanjuju temperaturu i vrijeme popuštanja, dok visok sadržaj legirajućih elemenata, normalizirana (perlitna) metalna osnova i nizak broj nodula zahtijevaju duža vremena popuštanja.

### 3.12.6 Površinsko otvrdnjavanje

Površinskim otvrdnjavanjem nastoji se postići tvrd i otporan na trošenje vanjski martenzitni sloj uz zadržavanje duktilne i žilave jezgre. Za površinsko otvrdnjavanje pogodni su perlitni nodularni ljevovi, jer se austenitizacijom dobiva austenit s višim sadržajem ugljika.

U praksi se površinsko otvrdnjavanje najčešće provodi plamenim i indukcijskim kaljenjem. Kod oba postupka površinski sloj odljevka ili djela odljevka zagrijava se na temperaturu austenitizacija, nakon čega slijedi kaljenje.

Često se u praksi primjenjuje lokalno površinsko otvrdnjavanje, čime se dobivaju područja na odljevku koja posjeduju visoku tvrdoću i otpornost na habanje, dok ostatak odljevka ostaje ne promijenjen.

Dubina površinski otvrdnutog sloja uglavnom je određena dubinom prodiranja topline (dubinom zagrijavanja na temperaturu austenitizacije) prije nego prokaljivošću materijala. Kod legiranih nodularnih ljevova, površinskim otvrdnjavanjem mogu se dobiti niže tvrdoće u odnosu na nelegirane kvalitete, jer s porastom prokaljivosti raste količina zaostalog austenita. Ovaj problem može se prevladati dubokim hlađenjem da bi se postigla potpuna pretvorba austenita u martenzit.

### 3.13 Izotermički poboljšani nodularni lijev (ADI)

Izotermički poboljšani nodularni ljevovi – ADI (engl. *Austempered Ductile Iron*) predstavljaju familiju nodularnih ljevova koji pružaju izvanrednu i jedinstvenu kombinaciju visoke vlačne i dinamičke čvrstoće, visoke žilavosti i otpornosti na trošenje te dobre strojne obradivosti. Visok odnos čvrstoće i mase čini ovaj materijal pogodnim za gradnju komponenti koje moraju posjedovati visoku čvrstoću uz zadržavanje relativno niske mase. Ovaj materijal sve više nalazi svoju primjenu u strojogradnji i to posebno za dinamički opterećene elemente kao supstitucija za ljevani i kovani čelik.

Da bi se ostvarila ovako povoljna kombinacija svojstva, odnosno superiornija mehanička svojstva u odnosu na uobičajene kvalitete nodularnog lijeva, ali i mnoge ljevane i kovane čelike, zahtijeva se primjena specifične toplinske obrade nakon ljevanja koja se sastoji od austenitizacije (austenitizacijskog žarenja) i izotermičkog (međustupanjskog) poboljšavanja (engl. *Austempering*). Specifičnom toplinskom obradom postiže se jedinstvena struktura metalne osnove koja se sastoji od igličastog ferita (engl. *Acicular ferrite*) i stabiliziranog austenita s visokim sadržajem ugljika. Ova struktura poznata je pod nazivom ausferit (engl. *ausferrite*) i ima najznačajniji utjecaj na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Stvaranje perlita potrebno je izbjeći zbog štetnog utjecaja na mehanička svojstva. To se postiže legiranjem elementima koji povisuju prokaljivost.

#### 3.13.1 Kvalitete izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (norme)

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za izotermički poboljšani nodularni lijev, a najviše se upotrebljavaju EN 1564:1997 (tablica 3.7) i ASTM A 897 (tablica 3.8).

Tablica 3.7. Mehanička svojstva izotermički poboljšanih nodularnih ljevova izmjerena na uzorcima dobivenim mehaničkom obradom iz odvojeno ljevanih ispitnih uzoraka (prema EN 1564:1997)

Označivanje materijala		Vlačna čvrstoća $R_m$ , [MPa], min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , [MPa], min.	Izduženje [%], min.	Tvrdoća, HB
Oznaka	Broj				
EN-GJS-800-8	EN-JS1100	800	500	8	260-320
EN-GJS-1000-5	EN-JS1110	1000	700	5	300-360
EN-GJS-1200-2	EN-JS1120	1200	850	2	340-440
EN-GJS-1400-1	EN-JS1130	1400	1100	1	380-480

U Hrvatskoj se za klasifikaciju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva primjenjuje norma HRN EN 1564:1997. U osnovi radi se o preuzetoj europskoj normi EN 1564:1997.



Tablica 3.8. Mehanička svojstva izotermički poboljšanih nodularnih lijevova izmjerena na uzorcima dobivenim mehaničkom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka (prema ASTM A 897)

Oznaka materijala Grade	Vlačna čvrstoća $R_m$ , [MPa], min.	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , [MPa], min.	Izduženje, [%], min.	Udarne radnja loma*, [J]	Tvrdoća**, HB
850/550/10	850	550	10	100	269-321
1050/700/7	1050	700	7	80	302-363
1200/850/4	1200	850	4	60	341-444
1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477
1600/1300/-	1600	1300	***	***	444-555

\* vrijednosti dobivene Charpyjevom metodom na uzorku bez zareza pri 20°C. Vrijednosti u tablici predstavljaju srednju vrijednost triju najviših vrijednosti od četiri provedena mjerenja (četiri ispitna uzorka).

\*\* tvrdoće se ne zahtijevaju specifikacijom već su prikazane informativno.

\*\*\* izduženje i udarna radnja loma ne zahtijevaju se kod ovih kvaliteta.

### 3.13.2 Kontrola proizvodnog procesa i utjecaj elemenata kemijskog sastava

Odljevci u lijevanom stanju, odnosno prije toplinske obrade, moraju imati visoku kvalitetu. Ne smiju biti prisutne greške koje mogu umanjiti mehanička svojstva. Potrebno je ostvariti slijedeće mikrostrukturne karakteristike: nodularnost: > 80%, broj nodula: min. 100/mm<sup>2</sup>, konzistentan kemijski sastav, mikrostruktura bez karbida, poroznosti i uključaka, konzistentan odnos perlit/ferit.

Kemijski sastav odljevaka od nodularnog lijeva koji će se izotermički poboljšavati (tablica 3.9) neznatno se razlikuje od kemijskog sastava odljevaka od uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva.

Tablica 3.9. Tipičan kemijski sastav odljevaka od nodularnog lijeva koji će se izotermički poboljšavati

Element	Preporučeno područje
C	3,40 – 3,80%
Si	2,20 – 2,60%
Mn	maks. 0,30%
S	maks. 0,015%
P	maks. 0,030%
Cu*	0,20 – 0,80%
Ni*	0,20 – 2,0%
Mo*	0,1 – 0,3%
CE	4,3 – 4,6

\* legirajući elementi čiji sadržaj i kombinacija ovisi o poprečnom presjeku (debljini stjenke) odljevka

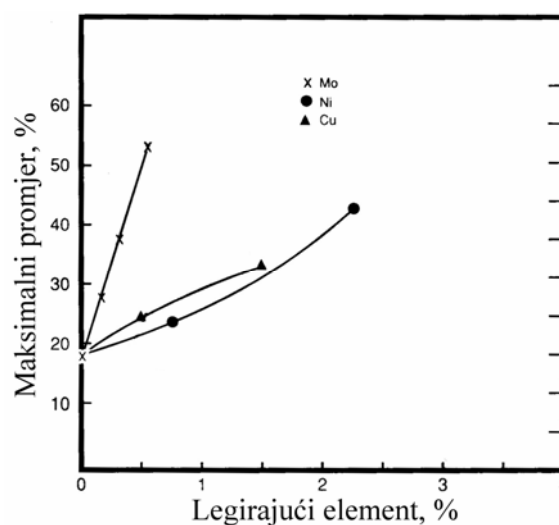
Kod većine odljevaka, osim kod relativno tankostjenih odljevaka (debljina stijenke < 10 mm), potrebno je provesti legiranje da bi se poboljšala prokaljivost i izbjeglo stvaranje perlita. Zbog problema povezanih sa segregacijom pojedinih elemenata tijekom skrućivanja, posebnu pažnju je potrebno posvetiti odabiru legirajućih elemenata. Posljedice segregacija su nehomogena (nejednolična) distribucija i topljivost ugljika, što kasnije utječe na tijek reakcije izotermičkog poboljšavanja, mikrostrukturu, a time i mehanička svojstva i strojnu obradivost odljevaka od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Stupanj segregacije raste s povećanjem debljine stijenke odljevka jer se smanjuje brzina skrućivanja i zbog toga je na raspolaganju više vremena za segregacije.

Iz navedenih razloga, najčešće primjenjivani elementi za poboljšanje prokaljivosti kod izotermički poboljšanih nodularnih lijeva su bakar, nikal i molibden. Ovi elementi dodaju se u niskom koncentracijama (jer imaju snažan utjecaj na prokaljivost), zbog čega nemaju znatan utjecaj na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva koji je pravilno toplinski obrađen (provedena toplinska obrada određuje svojstva, a ne legirajući elementi). Pri određivanju sadržaja legirajućih elemenata potrebno je uzeti u obzir poprečni presjek odljevka kao i uvjete pri toplinskoj obradi (vrsta sredstva za gašenje, brzina gašenja).

Mangan, krom i vanadij povisuju prokaljivost, ali tijekom skrućivanja segregiraju na granice austenitnih čelija gdje stvaraju karbide i u tim područjima usporavaju proces izotermičkog poboljšavanja. Zbog toga je potrebno ograničiti njihov sadržaj.

Molibden ima najsnažniji utjecaj na prokaljivost, zbog čega može biti nužan dodatak kod odljevaka velikog poprečnog presjeka, da bi se spriječilo stvaranje perlita. Negativna strana molibdena je da on također segregira po granicama čelija, ali u nešto manjem opsegu u odnosu na mangan, i time značajno utječe na tijek reakcija tijekom izotermičkog poboljšavanja. Dodatkom molibdena snižava se vlačna čvrstoća i duktilnost zbog segregacije molibdena po granicama čelija i stvaranja karbida. Zbog toga se sadržaj molibdena ograničava na < 0,2 % u odljevcima velikog poprečnog presjeka.

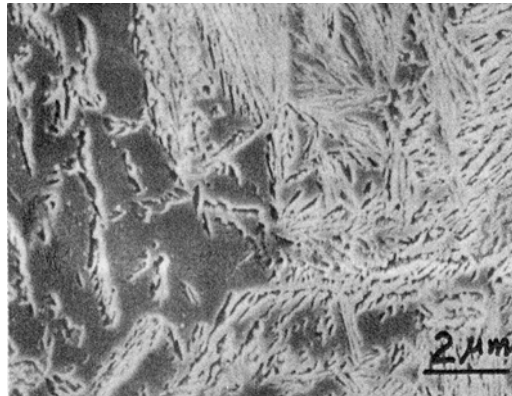
Na slici 3.58 prikazan je utjecaj bakra, nikla i molibdena na prokaljivost. Može se jasno vidjeti da je kod istog dodatka elementa, maksimalni promjer ispitne palice koja se može uspješno toplinski obraditi (potpuna ausferitna struktura bez perlita) najviši u slučaju primjene molibdena za povišenje prokaljivosti. Mangan se prema svom utjecaju na prokaljivost može svrstati između molibdena i bakra.



Slika 3.58. Utjecaj sadržaja nikla, bakra i molibdena na maksimalni promjer ispitne palice koja se može uspješno toplinski obraditi tako da se dobije potpuno ausferitna struktura bez perlita (izotermičko poboljšavanje pri temperaturi 350 °C)

Silicij, pored niza korisnih efekata u nodularnom lijevu, doprinosi problemu segregacija koncentriranjem oko grafitnih nodula. Silicij smanjuje topljivost ugljika zbog čega se reakcije znatno brže odvijaju u područjima segregacije silicija.

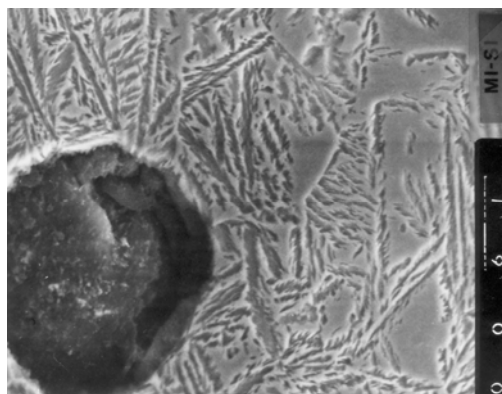
Posljedica segregacija u izotermički poboljšanom nodularnom lijevu je postojanje područja u materijalu (nakon ukupne toplinske obrade) u kojima su se reakcije odvijale u prekomjernom opsegu te područja u kojima se reakcije nisu ni počele odvijati (slika 3.59). Postojanje ovako izraženih varijacija u mikrostrukturi uzrokuje značaj pad mehaničkih svojstava.



Slika 3.59. Snimka mikrostrukture izotermički poboljšanog nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom. Mogu se uočiti nehomogenosti uzrokovane segregacijama

Zbog ekonomskih razloga, ali i zbog izbjegavanja metalurških problema, često se primjenjuje kombinacija legirajućih elemenata da bi se ostvarila željena prokaljivost. Da bi se izbjegle mikro segregacije i rezultirajuća degradacija mehaničkih svojstava povezana s povišenim sadržajem mangana i molibdena, njihov sadržaj potrebno je pažljivo kontrolirati a željenu prokaljivost postići dodatkom najprije bakra (do 0,8 %) a potom nikla.

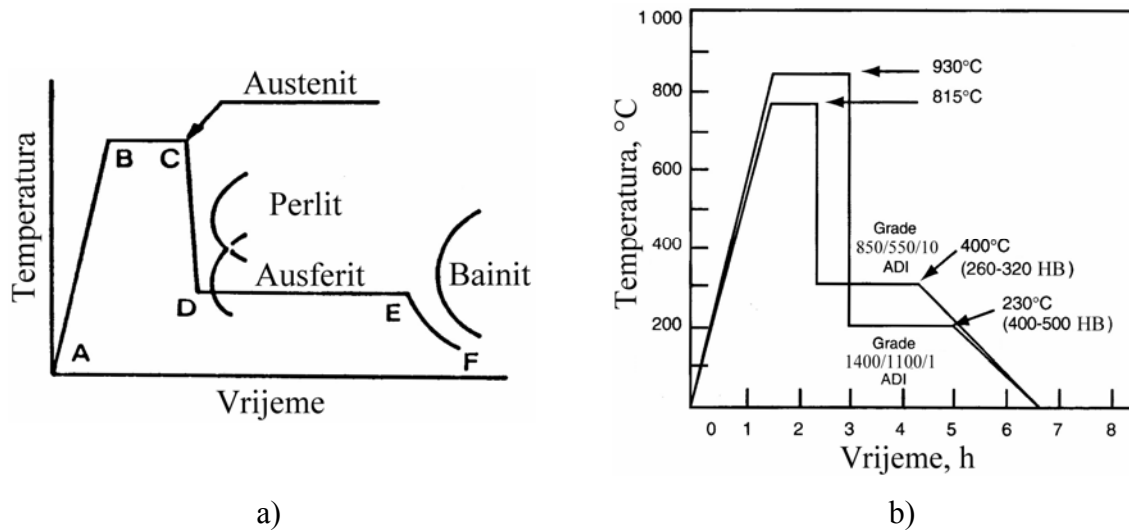
Visokim brojem nodula može se smanjiti opasnost od segregacije legirajućih elemenata. Na ovaj način povećava se broj potencijalnih mjesta (granica ćelija) za segregacije, što rezultira nižom koncentracijom segregacija legirajućih elemenata u ovim područjima. Uvjeti za nukleaciju igličastog ferita pogodni u blizini grafitnih nodula (slika 3.60), jer se koncentracijski gradijent ugljika, koji pospješuje rast ferita, ostvaruje znatno lakše u tom području. Iz ovih razmatranja proizlazi važnost povišenog broj nodula/mm<sup>2</sup> u izotermički poboljšanom nodularnom lijevu.



Slika 3.60. Snimka mikrostrukture izotermički poboljšanog nodularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom, povećanje 1000x. Austenitizacija 90 min. pri 900 °C, izotermičko poboljšavanje 15 min. pri temperaturi 380 °C u solnoj kupci

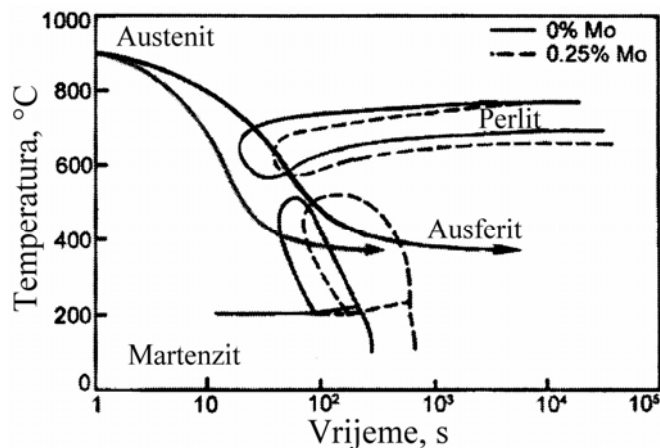
### 3.13.3 Toplinska obrada

Izotermički poboljšani nodularni lijev proizvodi se specijalnim postupkom toplinske obrade koja se odvija u dva stupnja (slika 3.61) - austenitizacija (austenitizacijsko žarenje) i izotermičko poboljšanje (engl. *Austempering*), da bi se dobila ausferitna metalna osnova koja se sastoji od igličastog ferita i stabiliziranog austenita s visokom sadržajem ugljika (ugljikom stabiliziranog austenita).



Slika 3.61. a) shematski prikaz toplinske obrade izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, b) dijagrami toplinske obrade za izotermički poboljšani nodularni lijev Grade 850/550/10 i Grade 1400/1100/1 (prema ASTM A 897)

Tipični TTT (engl. *Time – Temperature- Transformations*) dijagrami za nodularni lijev s dva različita sadržaja molibdena prikazani su na slici 3.62 zajedno s krivuljama hlađenja za dvije debljine stjenki.



Slika 3.62. TTT dijagrami za nodularni lijev sa 3,3 %C, 2,6 %Si i 0,3 %Mn, ali različitim sadržajima molibdena. Prikazane su i krivulje hlađenja za dvije različite debljine stjenki

Austenitizacija (austenitizacijsko žarenje) je prva faza toplinske obrade. Odljevak od nodularnog lijeva zagrijava se (područje od A do B na slici 3.61a, brzina zagrijavanja ~ 100 °C/h) na temperaturu austenitizacije (815 – 927 °C) i zadržava na toj temperaturi (područje od

B do C na slici 3.61a) dovoljno dugo da bi se dobila potpuno austenitna struktura. Brzina zagrijavanja ima zanemariv utjecaj na konačna svojstva odljevaka.

Višom temperaturom austenitizacije povećava se sadržaj ugljika u austenitu, povećava njegova prokaljivost, ali pretvorbu tijekom izotermičkog poboljšavanja čini znatno problematičnijom (austenit s višim sadržajem ugljika zahtijeva duža vremena za pretvorbu u ausferitnu strukturu) i potencijalno snižava mehanička svojstva nakon toplinske obrade. Ako je temperatura austenitizacije preniska u odnosu na gornju kritičnu temperaturu (temperatura završetka pretvorbe ferita i perlita u austenit pri zagrijavanju), ne može se postići potpuna austenitizacija bez obzira na dužinu perioda austenitizacije.

Otapanje ugljika iz grafitne faze u okolnu austenitnu matricu je relativno spor proces. Zbog toga vrijeme austenitizacije treba biti minimalno potrebno da se cijeli odljevak zagrije na temperaturu austenitizacije, cijela metalna osnova transformira u austenit i taj austenit zasiti ravnotežnim sadržajem ugljika (tipično  $\sim 1,1 - 1,3 \%C$ ). vrijeme austenitizacije obično iznosi 60 – 90 min.

Feritni nodularni ljevovi zahtijevaju duža vremena austenitizacije da bi se dosegao ravnotežni sadržaj ugljika u austenitu od perlitnih nodularnih ljevova. Zbog toga se austenitizacija znatno brže odvija ako je polazna mikrostruktura perlitna.

Deblje stijenke zahtijevaju duža vremena austenitizacije. Visok broj nodula skraćuje potrebno vrijeme austenitizacije jer se skraćuju putovi difuzije ugljika, što omogućuje lakše postizanje jednolične mikrostrukture.

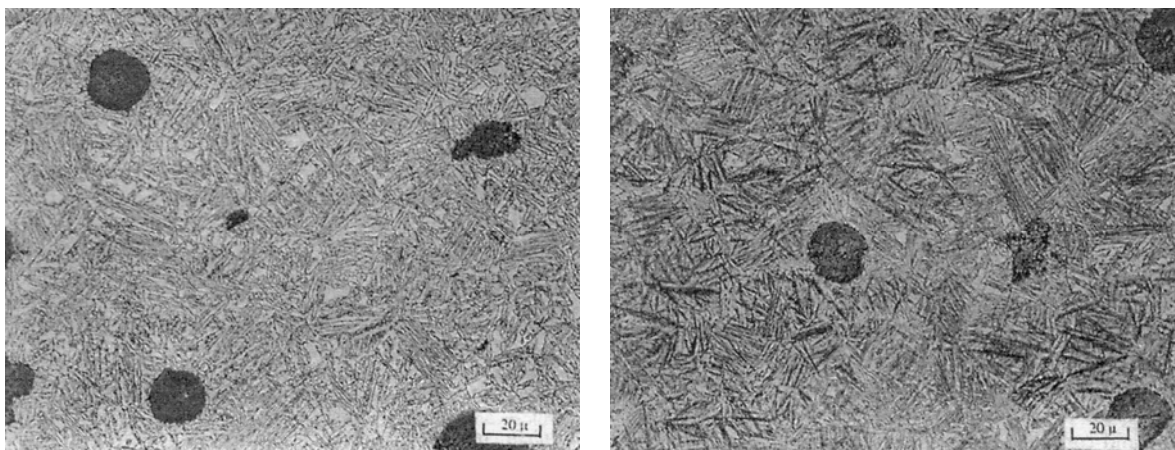
Za vrijeme austenitizacije mora se izbjeći oksidacija površine odljevka, zbog čega se austenitizacija provodi u pećima sa zaštitnom atmosferom.

Izotermičko poboljšavanje (engl. *Austempering*) predstavlja drugu fazu toplinske obrade. Nakon austenitizacije odljevak se brzo prenosi u solnu kupku (rastaljene soli koje sadrže smjese natrijevih i kalijevih nitrata i nitrita) određene temperature gdje se naglo hladi (gašenje) (područje od C do D na slici 3.61a) da bi se izbjeglo stvaranje perlita (slika 3.62) do temperature izotermičkog poboljšavanja koja leži u intervalu od 232 – 400 °C i zadržava na toj temperaturi (područje od D do E na slici 3.61a) dovoljno dugo, ovisno o kvaliteti koja se proizvodi. Temperatura izotermičkog poboljšavanja ima vrlo značajan utjecaj na konačna svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Temperatura izotermičkog poboljšavanja mora biti iznad temperature početka martenzitne pretvorbe ( $M_s$ ).

Tijekom izotermičkog poboljšavanja, razlaže se austenit koji je zasićen ugljikom i nastaje struktura koja je smjesa igličastog ferita i stabiliziranog austenita s visokim sadržajem ugljika ( $\sim 2,0 \%$ ), poznata pod nazivom ausferit (slika 3.63). Austenit se smatra stabilnim kad je sadržaj ugljika u austenitu  $> 1,8 \%C$ .

Ukoliko je toplinska obrada pravilno provedena u strukturi se ne smiju pojaviti karbidi niti bainit (smjesa igličastog ferita i karbida). Nakon izotermičkog poboljšavanja odljevak se vadi iz solne kupke i hladi na zraku do sobne temperature (područje od E do F na slici 3.61a).

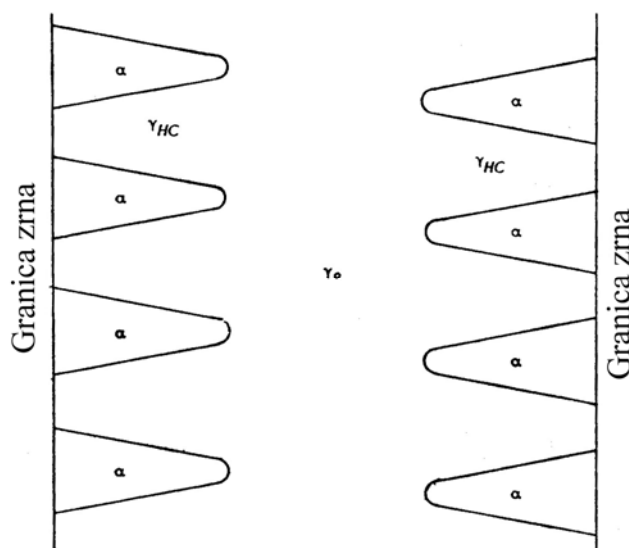
Igličasti ferit izlučuje se iz polaznog austenita (austenit nakon austenitizacije) i urasta u austenit (slika 3.64). Istovremeno se izlučuje ugljik iz rastućih iglica ferita u okružujući austenit zbog različite topljivosti ugljika u feritu i austenitu. Visok sadržaj silicija u nodularnom lijevu sprječava stvaranje karbida (cementita) koji su inače prisutni kod bainitne pretvorbe. Prema tome, preostali austenit i dalje preuzima ugljik tako dugo dok se reakcija odvija.



a)

b)

Slika 3.63. Metalografske snimke ausferitne strukture dobivene nakon izotermičkog poboljšavanja pri temperaturi 360 °C (a) i 310 °C (b)



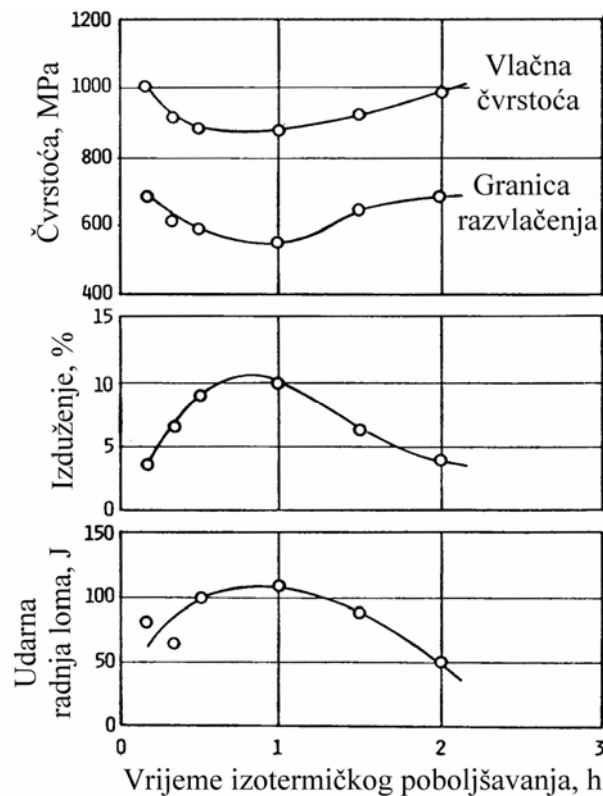
Slika 3.64. Shematski prikaz rasta igličastog ferita ( $\alpha$ ) s granice zrna i napredovanje prema unutrašnjosti polaznog austenita ( $\gamma_0$ ) (austenit nakon austenitizacije) pri čemu nastaju zone austenita zasićenog ugljikom ( $\gamma_{HC}$ )

Kako se austenit obogaćuje ugljikom, sprečava on rast igličastog ferita i reakcija će najzad stati. Sadržaj ugljika u austenitu može doseći  $\sim 2,0\%$ , zbog čega je taj austenit (zasićen s visokim sadržajem ugljika) postojan i kod vrlo niskih temperatura ( $M_s < -120\text{ °C}$ ). Međutim, austenit s visokim sadržajem ugljika nestabilan je kod većine temperatura izotermičkog poboljšavanja, zbog čega se predugim zadržavanjem na temperaturi izotermičkog poboljšavanja raspada na ferit i karbide.

Sukladno prethodno navedenom, izotermičku pretvorbu moguće je opisati kao reakciju u dva stupnja kod koje se najprije polazni austenit (austenit nakon austenitizacije) razlaže na igličasti ferit i ugljikom obogaćeni austenit (prvi stupanj izotermičke pretvorbe), a potom se odvija razlaganje ugljikom obogaćenog austenita u stabilnije produkte: ferit i karbid (drugi stupanj izotermičke pretvorbe), a njegov udio postepeno opada na nulu.

Morfologija igličastog ferita i udjeli, kod prve reakcije nastalog ferita i austenita određeni su uglavnom temperaturom i trajanjem izotermičkog poboljšavanja. Izotermičkim poboljšavanjem kod temperature  $\geq 370$  °C nastaju relativno krupne i jasno izražene iglice ferita u austenitu. Ako je ova reakcija prijevremeno prekinuta, prije nego što se zaostali austenit dovoljno stabilizira ugljikom, ( $M_s$  temperatura padne ispod sobne temperature), dolazi pri naknadnom hlađenju do stvaranja martenzita. Prisustvo martenzita značajno podiže čvrstoću, smanjujući istovremeno plastičnost i žilavost. Snižanjem temperature izotermičkog poboljšavanja smanjuje se razmak igličasti ferit – ugljikom obogaćeni austenit. Međutim, sniženjem temperature izotermičkog poboljšavanja smanjuje se volumni udio stabiliziranog austenita i raste udio karbida na kraju prvog stupnja izotermičkog poboljšavanja.

Napredovanjem izotermičke pretvorbe dolazi do brzog porasta žilavosti i duktilnosti, koji dostižu svoj maksimum nakon određenog vremena zadržavanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja. Daljnjim zadržavanjem na temperaturi izotermičkog poboljšavanja dolazi do pada duktilnosti i žilavosti (slika 3.65), vjerojatno kao posljedica izlučivanja karbida (odvijanje drugog stupnja ili reakcije izotermičkog poboljšavanja)

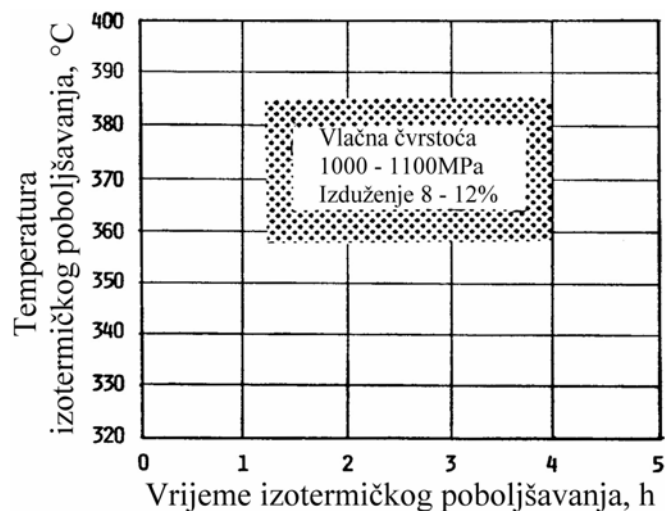


Slika 3.65. Utjecaj vremena zadržavanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Može se zaključiti da vrijeme držanja na temperaturi izotermičke pretvorbe ne smije biti predugo da ne dođe do stvaranja karbida. S druge strane, vrijeme držanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja ne smije biti niti prekratko, jer pri kratkim vremenima izotermičkog poboljšavanja ne postoji dovoljna difuzija ugljika ka austenitu da bi ga stabilizirala i tijekom hlađenja do sobne temperature može nastati martenzit koji uzrokuje smanjenje duktilnosti.

Pri najvišim temperaturama izotermičkog (međustupanjskog) poboljšavanja (400 °C) dovoljno je ~ 30 minuta da bi se ostvarila ausferitna struktura, dok pri temperaturi od 230 °C može biti potrebo i do 4 sata da bi se dobila optimalna svojstva.

Reakcija pri kojoj dolazi do povećanja krhkosti ima veliko značenje jer ona može ograničiti ili suziti područje primjene izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. Legiranjem nodularnog lijeva sa 1,5 % nikla i 0,3 % molibdena može se znatno prolongirati reakcija drugog stupnja izotermičkog poboljšavanja, a to su ujedno i elementi koji se dodaju radi povećanja prokaljivosti. To omogućuje duža vremena zadržavanja na temperaturi izotermičkog poboljšavanja i pruža veći prostor za temperature izotermičkog poboljšavanja (slika 3.66). Na taj se način ostvaruje sigurnije radno područje za postizanje optimalnih svojstava.



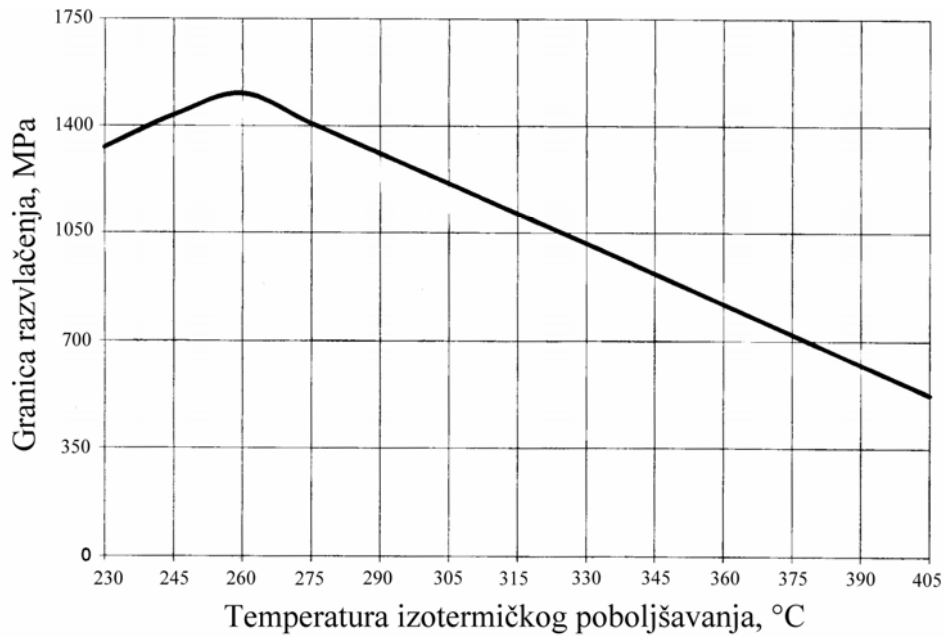
Slika 3.66. Širina „okvira procesa“ kod raznih temperatura i vremena izotermičkog zadržavanja za postizanje visoke žilavosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva legiranog s 1,5 %Ni i 0,3 %Mo

Temperatura izotermičkog poboljšanja je jedan od glavnih faktora koji određuje mehanička svojstva odljevaka od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (slika 3.67 i 3.68). Da bi proizveli izotermički poboljšani nodularni lijev snižene čvrstoće i tvrdoće, ali povišenog izduženja i udarne žilavosti te sposobnosti otvrdnjavanja hladnom deformacijom potrebno je odabrati više temperature međustupanjskog poboljšavanja (350 – 400 °C) i duža vremena što rezultira grubozrnatom ausferitnom metalnom osnovom s većom količinom ugljikom stabiliziranog austenita (20 – 40 %). Potrebno je odabrati optimalno vrijeme da se izbjegne drugi stupanj izotermičkog poboljšavanja (stvaranje krhkosti) i minimalizira udio zaostalog (netransformiranog) austenita (austenit koji se tijekom izotermičkog poboljšavanja nije transformirao u ugljikom obogaćeni austenit, odnosno stabilizirani austenit s visokim sadržajem ugljika).

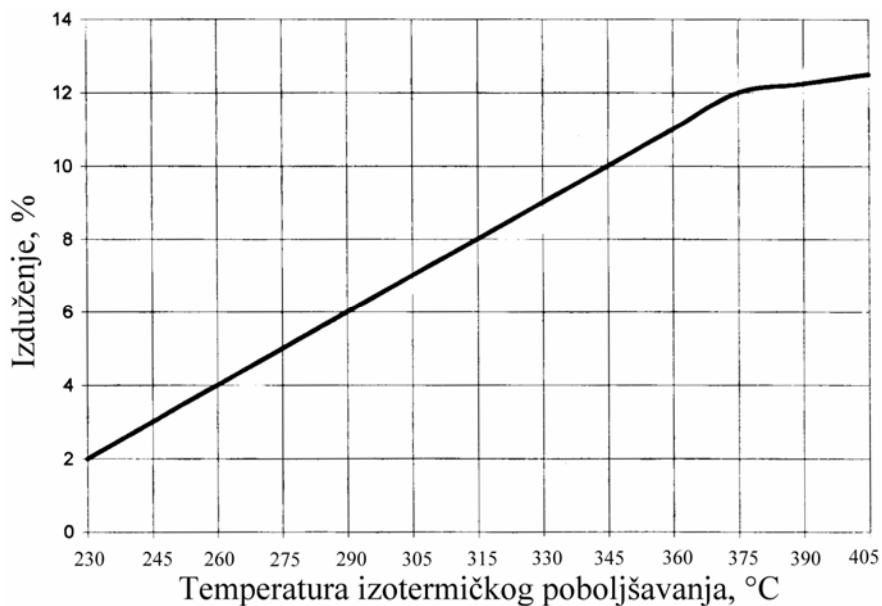
Zaostali austenit može se transformirati u martenzit koji ima štetan utjecaj na mehanička svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva. U praksi je dozvoljeno maksimalno 1,0 % zaostalog austenita.

Proizvodnja izotermički poboljšanog nodularnog lijeva visoke čvrstoće, tvrdoće i otpornosti na trošenje, ali niže udarne žilavosti zahtijeva da se međustupanjsko poboljšavanje provede na temperaturama < 300 °C (250 – 275 °C). Snižanjem temperature izotermičkog poboljšavanja postiže se finija struktura i smanjuje udio ugljikom stabiliziranog austenita u odnosu na kvalitete koje su izotermički poboljšavanje kod povišenih temperatura.



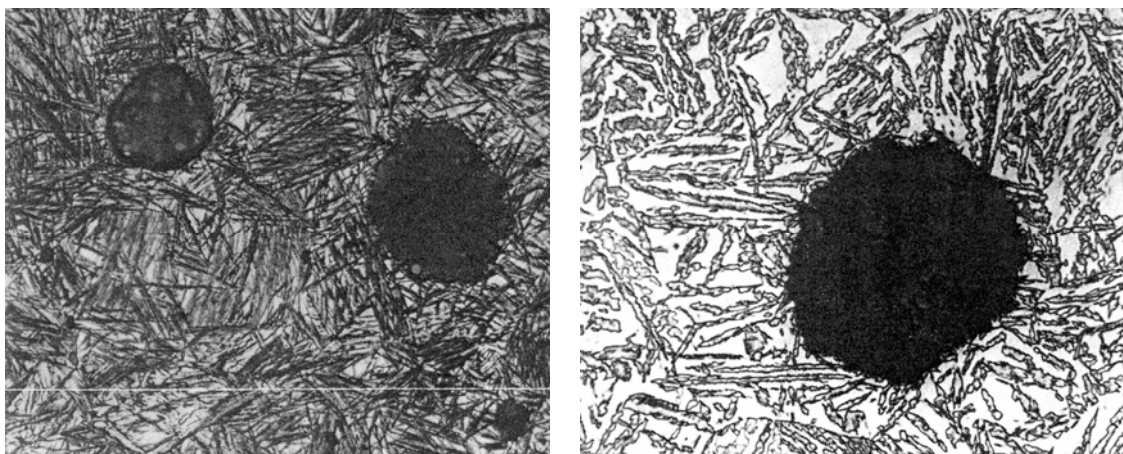


Slika 3.67. Utjecaj temperature izotermičkog poboljšavanja na granicu razvlačenja izotermički poboljšanog nodularnog lijeva



Slika 3.68. Utjecaj temperature izotermičkog poboljšavanja na izduženje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Pri višim temperaturama izotermičkog poboljšavanja može se uočiti znatno veći razmak između feritnih iglica i ugljikom obogaćenog austenita te manji broj feritnih iglica u odnosu mikrostrukturu koja nastaje izotermičkim poboljšavanjem pri nižim temperaturama. Niže temperature izotermičkog poboljšavanja rezultiraju značajnim pothlađenjem austenita i smanjenjem brzine difuzije ugljika. U tim uvjetima nukleacija feritnih iglica odvija se u većem opsegu nego njihov rast, slika 3.69a. Visoke temperature izotermičkog poboljšavanja rezultiraju višim brzinama difuzije ugljika. U tim uvjetima rast feritnih iglica odvija se u većem opsegu nego njihova nukleacija (slika 3.69b).



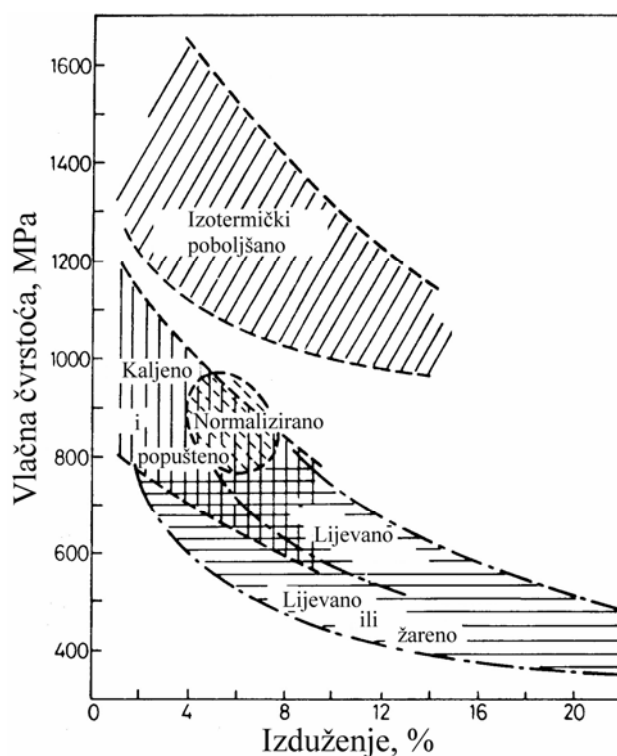
a)

b)

Slika 3.69. Utjecaj temperature izotermičkog poboljšavanja na mikrostrukturu izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, a) temperatura izotermičkog poboljšavanja 240 °C, b) temperatura izotermičkog poboljšavanja 400 °C

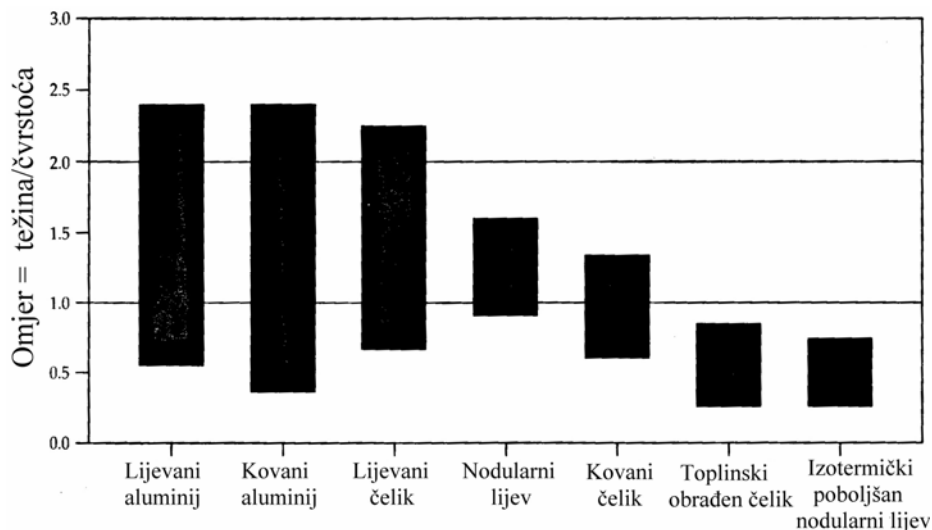
### 3.13.4 Svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Vlačna svojstva izotermički poboljšanog nodularnog lijeva znatno su superiornija u odnosu na uobičajene kvalitete nodularnog lijeva (slika 3.70) i prvenstveno su određena mikrostrukturom materijala.



Slika 3.70. Usporedba vlačne čvrstoće i izduženja izotermički poboljšanog nodularnog lijeva i uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva

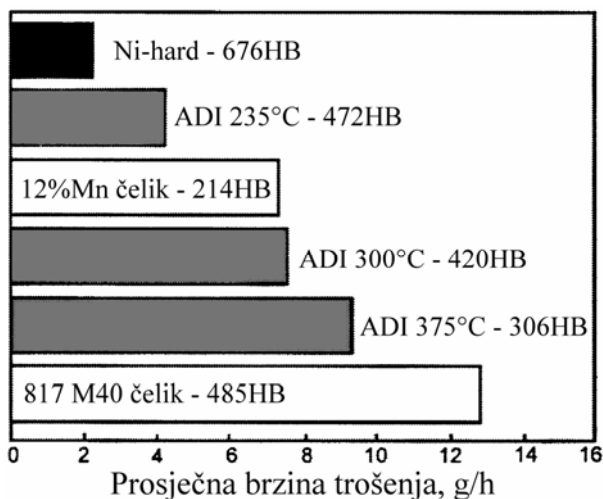
Izotermički poboljšani nodularni ljev može uspješno zamijeniti lijevani ili kovani čelik u mnogim područjima primjene, što nije bilo moguće primjenom uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva. Ako usporedimo odnos težine po jedinici čvrstoće izotermički poboljšanog nodularnog lijeva s različitim kvalitetama aluminija i čelika (slika 3.71) mogu se jasno vidjeti inženjerske i konstrukcijske prednosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva.



Slika 3.71. Usporedba odnosa težine po jedinici čvrstoće za razne inženjerske materijale

Žilavost izotermički poboljšanog nodularnog lijeva znatno je superiornija u odnosu na uobičajene kvalitete nodularnog lijeva. Više vrijednosti postižu se izotermičkim poboljšavanjem na višim temperaturama gdje se postižu viši sadržaji stabiliziranog austenita.

Izotermički poboljšani nodularni ljev ima vrlo dobru otpornost na trošenje, koja je superiornija u odnosu na mnoge konkurentne materijale (slika 3.72).



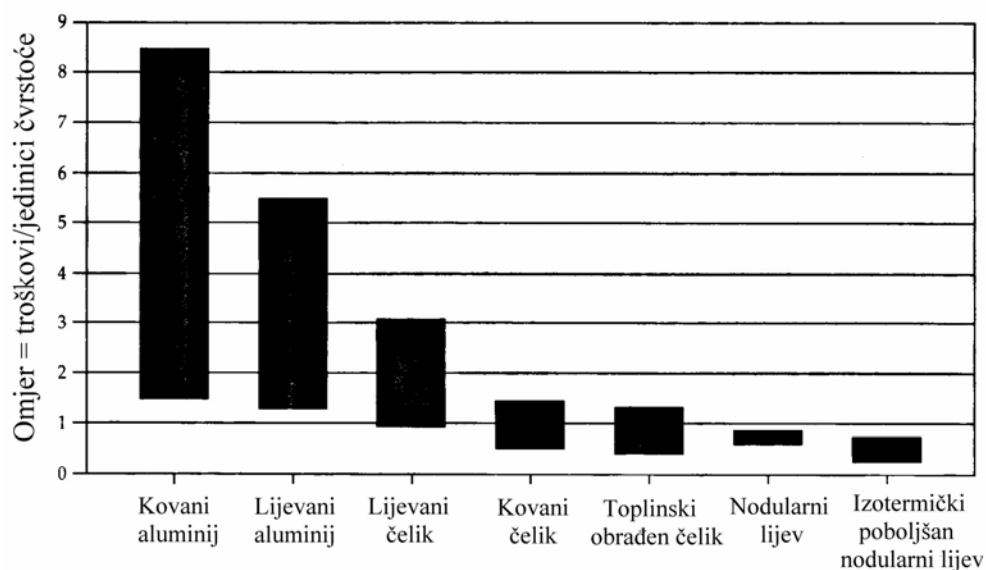
Slika 3.72. Usporedba otpornosti na trošenje pri udaru djelovanju izotermički poboljšanog nodularnog lijeva i konkurentnih materijala

Vrlo dobra otpornost na trošenje povezana je s naprezanjem induciranim pretvorbama stabiliziranog austenita koje se pojavljuju kada je površina komponente izložena deformaciji (hladno otvrdnjavanje). Rezultat tih transformacija je značajan porast površinske tvrdoće u odnosu na ostale dijelove komponente. Efekt hladnog otvrdnjavanja izraženiji je kod onih

kvaliteta izotermički poboljšanog nodularnog lijeva koje imaju viši sadržaj stabiliziranog austenita u mikrostrukturi, tj. kod kojih je izotermičko poboljšavanje provedeno na povišenim temperaturama.

Modul elastičnosti izotermički poboljšanog nodularnog lijeva kreće se u granicama od 155 – 163 GPa i neznatno je niži od modula elastičnosti uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva, ali značajno viši modula elastičnosti sivog i vermikularnog lijeva te aluminija. U odnosu na čelik i temporni lijev, izotermički poboljšani nodularni lijev ima niži modul elastičnosti. Izotermički poboljšani nodularni lijev pokazuje sličnu otpornost na umor kao i kovani čelik.

Za tipične komponente, troškovi proizvodnje izotermički poboljšanog nodularnog lijeva po jedinici mase su ~ 20 % niži u odnosu na čelik i ~ 30 – 50 % niži u odnosu na aluminij. Ako usporedimo troškove po jedinici čvrstoće izotermički poboljšanog nodularnog lijeva i drugih inženjerskih materijala (slika 3.73) može se ponovo uvidjeti superiornost ovog materijala.

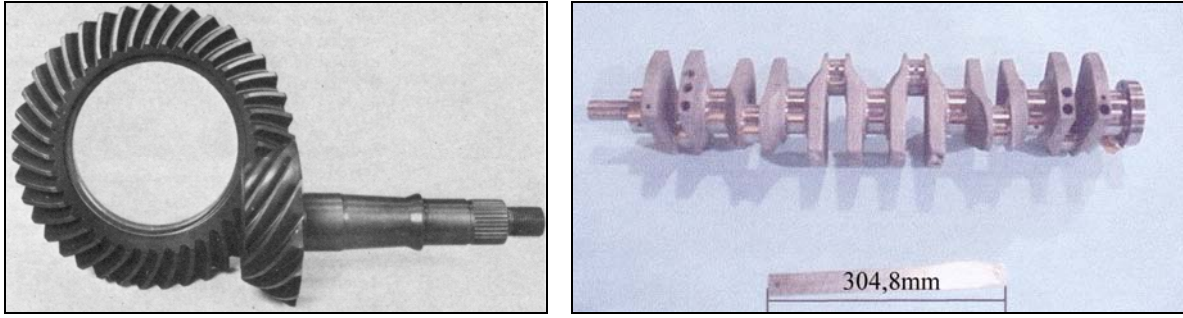


Slika 3.73. Usporedba odnosa troškova proizvodnje po jedinici čvrstoće za rane inženjerske materijale

Pored niza prednosti, postoje i nedostaci izotermički poboljšanog nodularnog lijeva: relativno loša strojna obradivost u izotermički poboljšanom stanju, visoki proizvodni troškovi ukoliko se proizvodi u malim količinama, visoki troškovi za izgradnju postrojenja za toplinsku obradu, niži modul elastičnosti u odnosu na čelik, loša zavarivost, radne temperature ograničene su na područje od – 40 °C do + 200 °C zbog rizika od mikrostrukturnih promjena koje mogu rezultirati promjenom svojstava.

### 3.13.5 Primjena izotermički poboljšanog nodularnog lijeva

Zbog povoljne kombinacije svojstava ovaj materijal pogodan je za mnoge aplikacije. Potencijalno najšire područje primjene nalazi u industriji motornih vozila (automobili, kamioni, autobusi, poljoprivredni i građevinski strojevi) za izradu zupčanika (slika 3.74a), koljenastih vratila (slika 3.74b), klipnjača, bregastih osovina, nosača motora te dijelova prijenosa i ovjesa.



Slika 3.74. Primjeri odljevaka od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva:

Pored niza prednosti koje ovaj materijal pruža u odnosu na lijevani i kovani čelik te uobičajene kvalitete nodularnog lijeva još uvijek se ne primjenjuje u većem opsegu u industriji motornih vozila, odnosno ne primjenjuje se za velikoserijske komponente zbog visokih troškova gradnje postrojenja za toplinsku obradu, različitih tehnika strojne obrade u odnosu na odljevke od čelika te nedovoljnog poznavanja ovog materijala i težnje za upotrebom što lakših materijala.

### 3.14. Legirani nodularni ljevovi

Familija legiranih nodularnih ljevova obuhvaća austenitne (visok sadržaj nikla) i feritne (visok sadržaj silicija) nodularne ljevove. Ovi materijali imaju karakteristična svojstva i razvijeni su za specifična područja primjene za koja nije moguće primijeniti uobičajene kvalitete nodularnih ljevova niti izotermički poboljšane nodularne ljevove.

#### 3.14.1 Nodularni ljevovi legirani silicijem i molibdenom (Si-Mo)

Zahtjevi za vozilima koja omogućuju bolje iskorištenje goriva i imaju manje štetan utjecaj na okoliš rezultirali su razvojem specijalnih materijala. Da bi se ostvarila povećana efikasnost motora s unutarnjim sagorijevanjem zahtijevaju se novi sustavi injektiranja i izgaranja goriva, viši tlakovi u cilindrima, ali i više temperature izgaranja goriva, što rezultira i višom temperaturom izlaznih (ispušnih) plinova, koji mogu doseći i do 870 °C pri visokim opterećenjima motora (temperatura vanjske površine ispušnih grana niža je za ~ 80 – 140. Stoga se za gradnju ispušnih grana i turbopunjača zahtjeva primjena materijala koji na visokim temperaturama ima čvrstoću, otpornost na oksidaciju i puzanje, strukturnu stabilnost, nisku ekspanziju, otpornost na toplinske cikluse (grijanje-hlađenje) te toplinske šokove. Feritni nodularni ljev legiran s 4,0 – 6,0 % silicija i 0,4 – 2,0 molibdena (poznat kao Si-Mo) uspješno se primjenjuje za navedene aplikacije do temperature ~ 870 °C te nudi optimalan odnos troškova i dobivenih svojstava. Sivi i vermikularni ljev ne zadovoljavaju ovako rigorozne kriterije (tablica 3.10).

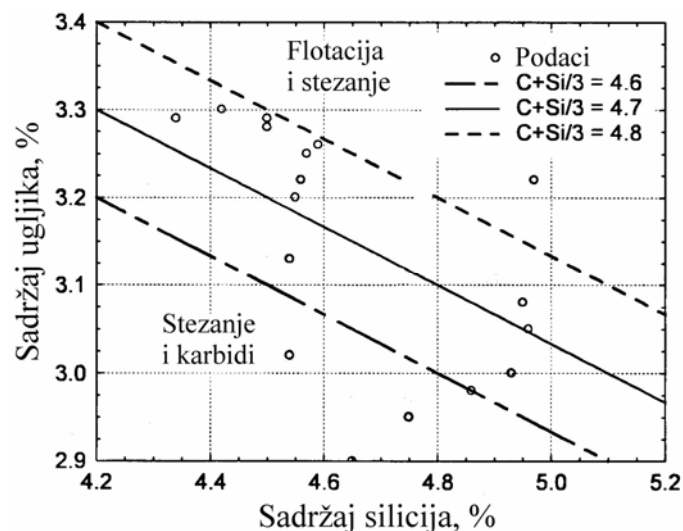
Za sada ne postoje standardi koji klasificiraju Si-Mo nodularne ljevove, odnosno propisuju kemijske sastave i mehanička svojstva.

Tablica 3.10. Maksimalno dozvoljene temperature ispušnih plinova u ispušnim granama od raznih materijala

Materijal	Maksimalna temperatura, °C
Sivi lijev	540
Vermikularni lijev	650
Feritni nodularni lijev	760
Si-Mo nodularni lijev	870
Austenitni nodularni lijev	925
Feritni nehrđajući čelik	955
Austenitni nehrđajući čelik	1050

### 3.14.1.1 Utjecaj elemenata kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Si-Mo

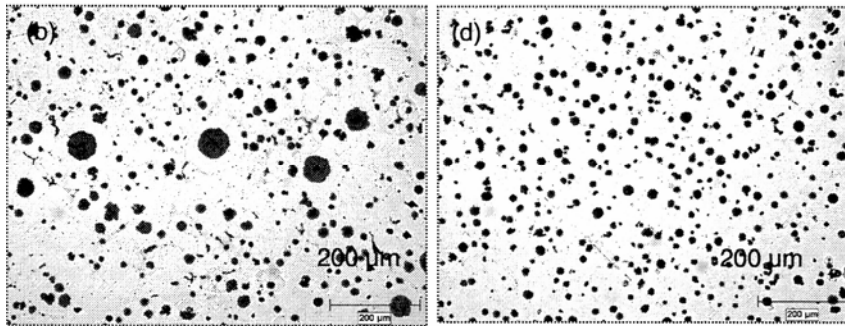
Sadržaj ugljika potrebno je održavati u granicama od 2,5 – 3,4 % da bi se kompenzirao utjecaj visokog sadržaja silicija na povećanje vrijednosti ekvivalenta ugljika (slika 3.75) i spriječila flotacija grafitnih nodula (visoke vrijednosti ekvivalenta ugljika).



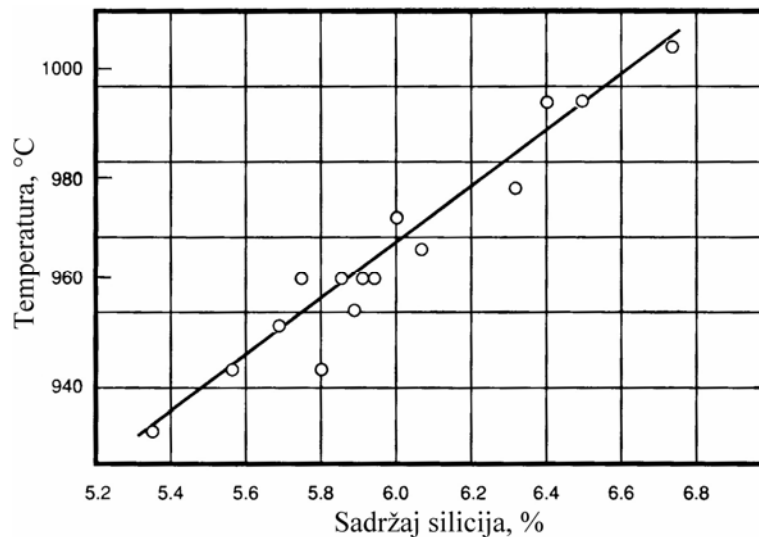
Slika 3.75. Optimalno područje ugljika i silicija u proizvodnji Si-Mo nodularnog lijeva

Optimalna vrijednost ekvivalent ugljika kreće oko 4,7 za odljevke čija debljina stjenke ne prelazi 25 mm, da bi se izbjeglo izlučivanje primarnih karbida i podeutektičkog austenita. U tom slučaju dobiva se mikrostruktura s jednoličnom (ravnomjernom) distribucijom sitnih nodula (slika 3.76b). Kod previsokih vrijednosti ekvivalent ugljika dolazi do izlučivanja nepoželjnih grubih i krupnih grafitnih nodula prije eutektičke reakcije (slika 3.76a). Ako je ekvivalent ugljika prenizak raste tendencija ka stezanju i pojavi odbjela. Pored toga, toplinska vodljivost željeznog lijeva smanjiti će se ako je sadržaj ugljika prenizak ili/i sadržaj silicija previsok, što može reducirati otpornost na toplinski umor.

Silicij poboljšava svojstva nodularnog lijeva na povišenim temperaturama putem stabilizacije feritne metalne osnove i stvaranja silicijem obogaćenog površinskog sloja koji sprječava oksidaciju. Silicij podiže temperaturu pri kojoj se ferit transformira u austenit (slika 3.77). Ova temperatura ujedno predstavlja i maksimalnu radnu temperaturu komponente.



Slika 3.76. Metalografske snimke mikrostrukture Si-Mo nodularnog lijeva:  
a) CE = 4,89, b) CE = 4,7



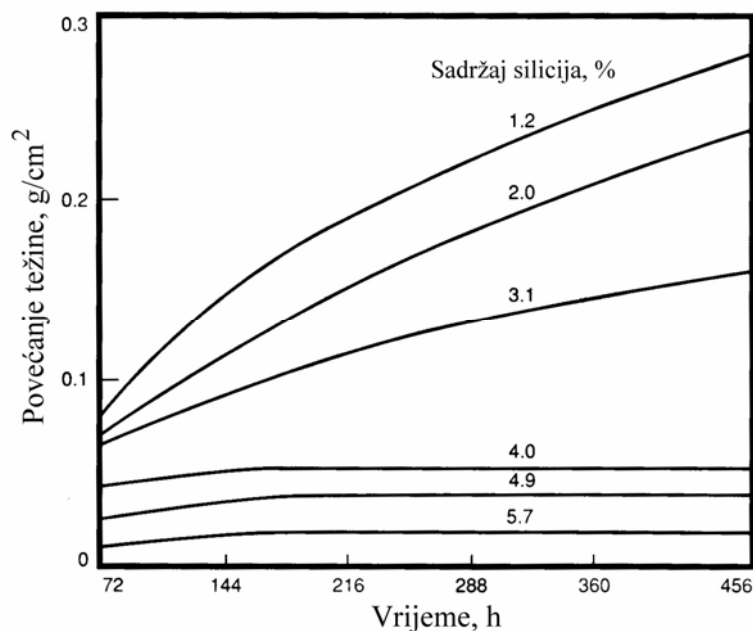
Slika 3.77. Utjecaj sadržaja silicija na temperaturu pretvorbe ferita u austenit

Iznad ove temperature ekspanzija i kontrakcija povezana sa pretvorbom ferita u austenit može uzrokovati deformaciju odljevka i pucanje površinskog oksidnog sloja smanjujući time otpornost na oksidaciju. Manje faznih pretvorbi → viša otpornost na toplinski umor. Snažna tendencija silicija ka feritizaciji značajno smanjuje mogućnost nastajanja karbida i perlita, odnosno smanjuje rast povezan s razlaganjem perlita pri visokim temperaturama (grafitizacija cementitne faze). Feritna mikrostruktura ima višu toplinsku vodljivost od perlitne ili austenitne, što rezultira nižim toplinskim naprezanjima.

Otpornost na oksidaciju raste s porastom sadržaja silicija (slika 3.78). Sadržaji silicija iznad 4,0 % dovoljni su da bi se spriječilo bilo kakvo značajno povećanje težine komponente (uslijed oksidacije) nakon stvaranja početnog oksidnog sloja.

Silicij utječe na mehanička svojstva nodularnog lijeva jer očvršćuje ferit mehanizmom očvršćivanja krute otopine. Porastom sadržaja silicija raste vlačna čvrstoća, tvrdoća i granica razvlačenja, ali se smanjuje izduženje i žilavost nodularnog lijeva. Iznad 6,0 % silicija materijal ima preveliku krhkost i nije primjenjiv za gradnju komponenti koje moraju posjedovati barem nekakvu žilavost. Prema tome, najbolja kombinacija svojstava postiže ako je sadržaj silicija u granicama od 4,0 – 6,0 %.

Efekt očvršćivanja ferita od strane silicija zadržava se do temperature od ~ 540 °C. Iznad ove temperature dolazi do pada vlačne čvrstoće (tablica 3.11).



Slika 3.78. Utjecaj sadržaja silicija na oksidaciju feritnog nod. lijeva na zraku pri 650 °C

Tablica 3.11. Utjecaj sadržaja silicija i molibdena na visokotemperaturnu čvrstoću feritnog nodularnog lijeva

Materijal	Vlačna čvrstoća, MPa		
	425°C	540°C	650°C
Sivi lijev	255	173	83
EN-GJS-400-18	276	173	90
GJS, 4,0% Si	386	248	90
GJS, 4,0%Si, 1,0% Mo	421	304	131
GJS, 4,0%Si, 2,0% Mo	449	317	138

Porastom sadržaja silicija poboljšava se otpornost na toplinski umor i visokotemperaturnu oksidaciju te čvrstoća pri niskim i umjerenim temperaturama, ali reducira žilavost i strojna obrada. Oksidni sloj (rezultat visokotemperaturne oksidacije) koji nastaje na površini Si-Mo s višim sadržajem silicija ima bolji kontakt s ostatkom materijala u odnosu na oksidni sloj koji nastaje na površini Si-Mo s nižim sadržajem silicija.

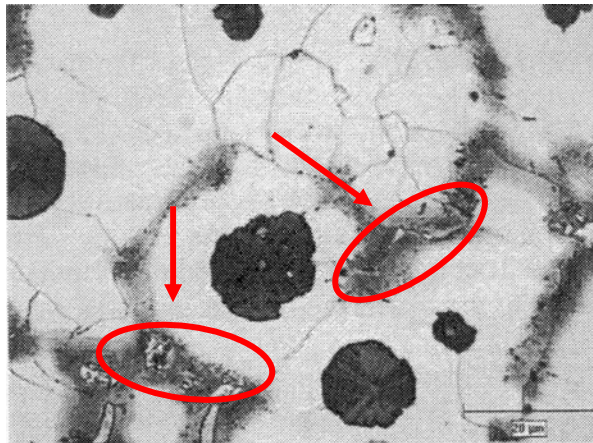
Kod Si-Mo oksidni sloj sastoji se od  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  i  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , gledano od površine prema unutrašnjosti. Viši udio  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  postiže se pri višim sadržajima silicija, a time i bolja otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju. Međutim, previsok sadržaj silicija značajno smanjuje mehanička svojstva odljevaka, tako da je potrebno pronaći svojevrzni kompromis.

Otpornost na oksidaciju u velikoj mjeri ovisi o strukturi grafita. Oksidacija i rast najbrže se odvija u sivom lijevu zbog kontinuirane prirode grafitnih listića i brze difuzije kisika, a najsporije u nodularnom lijevu jer grafitne nodule nisu međusobno povezane.

Legiranje molibdenom povisuje otpornost na puzanje i visokotemperaturnu čvrstoću nodularnog lijeva (tablica 3.11). Međutim, molibden promovira stvaranje karbida i segregira tijekom skrućivanja u intercelijasta područja. Zbog toga povišeni sadržaj molibdena u Si-Mo



nodularnom lijevu može rezultirati izlučivanjem finih precipitata (veličine  $< 1\mu\text{m}$ ) po granicama ćelija (slika 3.79).



Slika 3.79. Metalografska snimka mikrostrukture Si-Mo nodularnog lijeva u lijevanom stanju. Mogu se uočiti fini precipitati (karbidi) po granicama ćelija

Sadržaj elemenata koji pospješuju stvaranje perlita i karbida (mangan, krom) potrebno je održavati što je moguće nižim da bi se ostvarila feritna metalna osnova bez karbida i perlita.

Mehanička svojstva Si-Mo nodularnog lijeva slična su mehaničkim svojstvima feritnih nodularnih ljevova s razlikom u izduženju koje je značajno reducirano zbog visokog sadržaja silicija te prisustva finih precipitata i eventualno perlita po granicama zrna.

### 3.14.1.2 Proizvodni zahtjevi

Kod Si-Mo nodularnog lijeva, slično kao kod većine nodularnih ljevova, zahtijeva se nodularnost  $\geq 80\%$  te  $\geq 100$  nodula/ $\text{mm}^2$ , što znači da je potrebno provesti odgovarajuće cijepljenje taljevine. Potrebno je ostvariti visok broj nodula jer visok sadržaj silicija smanjuje brzinu difuzije ugljika u austenitu. Visok broj nodula rezultira manjom udaljenošću između nodula, čime se nadoknađuje smanjena difuzija. Mikrostruktura mora biti u potpunosti feritna uz eventualno prisutan manji sadržaj finih precipitata po granicama zrna. Poželjno je da u mikrostrukтури ne bude perlita.

Povišen sadržaj troske (zbog visokog sadržaja silicija) zahtijeva dobro razrađenu praksu ulijevanja. Povećanjem sadržaja silicija smanjuje se fluidnost taljevine te povećava tendencija ka stezanju. Zbog povišenog stezanja zahtijeva se dobro razrađen sustav napajanja i velika pojila.

Zbog nižeg sadržaj ugljika prisutno je manje grafita, što znači i manju ekspanziju, odnosno manju kompenzaciju volumnih promjena (kontrakcije) nastalih tijekom skrućivanja. Zbog toga je potrebno osigurati usmjereno skrućivanje te primijeniti veća pojila i veći broj pojila (zbog smanjenje udaljenosti na kojoj pojilo djeluje).

Istresanje i rukovanje odljevcima mora biti pažljivo da bi se izbjeglo stvaranje pukotina i eventualni lomovi. Svi odljevci moraju se toplinski obraditi da bi se poboljšala duktilnost. Obično se provodi žarenje u trajanju od 4 sata pri  $790\text{ }^\circ\text{C}$  s naknadnim hlađenjem u peći do  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Ako je u strukturi prisutna značajna količina karbida i perlita zahtijeva se potpuno žarenje (temperatura  $\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 3.14.1.3 Primjena Si-Mo

Zbog povoljne kombinacije svojstva i relativno niskih proizvodnih troškova ovaj materijal pogodan je za gradnju komponenti koje rade pri povišenim temperaturama (od 650 – 820 °C) i u uvjetima niskih ili umjerenih toplinskih ciklusa. Nodularni lijev sa 4,0 % silicija i 0,6 – 0,8 % molibdena intenzivno se primjenjuju za gradnju ispušnih grana (slika 3.80) i kućišta turbopunjača motora s unutarnjim sagorijevanjem.



Slika 3.80. Ispušna grana automobilskog motora od Si-Mo nodularnog lijeva

### 3.14.2 Austenitni nodularni ljevovi

Austenitni nodularni ljevovi su visokolegirani materijali koji posjeduju austenitnu mikrostrukturu na sobnoj temperaturi. Sadržaj nikla (snažan stabilizator austenita) u ovim materijalima kreće se od 12 – 36 %, a kroma do 6 %. Najznačajnija svojstva austenitnih nodularnih ljevova su: otpornost na koroziju, eroziju i trošenje, dobra čvrstoća, duktilnost i otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, žilavost i stabilnost pri niskim temperaturama, niska (kontrolirana) toplinska ekspanzija, nemagnetičnost, dobra livljivost i strojna obradivost.

#### 3.14.2.1 Kvalitete austenitnih nodularnih ljevova (norme)

Prema normi ASTM A 439 austenitni nodularni ljevovi klasificiraju se u 9 kvaliteta (tablica 3.12 i 3.13), a prema normi ISO 2892-1973 u 11 kvaliteta (tablica 3.16 i 3.17).

Tablica 3.12. Kemijski sastav austenitnih nodularnih ljevova prema ASTM A 439

Element	Kvaliteta								
	D-2 <sup>A</sup>	D-2B	D-2C	D-3 <sup>A</sup>	D-3A	D-4	D-5	D-5B	D-5S
	Kemijski sastav, %								
C, max.	3,0	3,0	2,90	2,60	2,60	2,60	2,4	2,40	2,30
Si	1,5-3,0	1,50-3,0	1,0-3,0	1,0-2,8	1,0-2,8	5,0-6,0	1,0-2,8	1,0-2,8	4,9-5,5
Mn	0,7-1,25	0,7-1,25	1,8-2,4	max.1,0 <sup>B</sup>	max.1,0 <sup>B</sup>	max.1,0 <sup>B</sup>	max.1,0 <sup>B</sup>	max.1,0 <sup>B</sup>	max.1,0
P, max.	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Ni	18,0-22,0	18,0-22,0	21,0-24,0	28,0-32,0	28,0-32,0	28,0-32,0	34,0-36,0	34,0-36,0	34,0-37,0
Cr	1,75-2,75	2,75-4,0	max.0,5 <sup>B</sup>	2,50-3,50	1,0-1,5	4,5-5,5	max. 0,1	2,0-3,0	1,75-2,25

<sup>A)</sup> dodatkom molibdena od 0,7 – 1,0% poboljšavaju se mehanička svojstva iznad 425 °C.

<sup>B)</sup> nije ciljano dodan.

Tablica 3.13. Mehanička svojstva austenitnih nodularnih ljevova prema ASTM A 439

Element	Kvaliteta								
	D-2	D-2B	D-2C	D-3	D-3A	D-4	D-5	D-5B	D-5S
	Vrijednosti mehaničkih svojstava								
R <sub>m</sub> , min. (MPa)	400	400	400	379	379	414	379	379	449
R <sub>p0,2</sub> , min. (MPa)	207	207	193	207	207	-	207	207	207
A, min. %	8,0	7,0	20,0	6,0	10,0	-	20,0	6,0	10,0
HB (300kg)	139-202	148-211	121-171	139-202	131-193	202-273	131-185	139-193	131-193

Za razliku od norme ISO 2892-1973, norma ASTM A 439 ne obuhvaća austenitne nodularne ljeveve pogodne za primjenu pri niskim temperaturama. Ove kvalitete propisane su standardom ASTM A 571 (tablica 3.14 i 3.15). Norma ASTM A 571 zahtijeva da svi odljevci budu toplinski obrađeni (žarenje na temperaturama 870 – 980 °C u trajanju od 1 sata za svakih 25 mm poprečnog presjeka, nakon čega slijedi hlađenje u peći).

Tablica 3.14. Kemijski sastav austenitnih nodularnih ljevova pogodnih za primjenu pri niskim temperaturama prema ASTM A 571

Kvaliteta	Element, %					
	C	Si	Mn	P	Ni	Cr
D-2M	2,2-2,7*	1,5-2,5	3,75-4,5	max.0,08	21,0-24,0	max.0,20

\*) za odljevke čija debljina stjenke ne prelazi ¼“ dozvoljava se maks. sadržaj ugljika od 2,9 %.

Tablica 3.15. Mehanička svojstva austenitnih nodularnih ljevova pogodnih za primjenu pri niskim temperaturama prema ASTM A 571 (vrijednosti u toplinski obrađenom stanju)

Kvaliteta	Mehanička svojstva				
	R <sub>m</sub> , min., (MPa)	R <sub>p0,2</sub> , min., (MPa)	A, min. (%)	HB, 3000kg	KV*, min. (J)
D-2M (klasa 1)	450	207	30	121-171	20
D-2M (klasa 2)	415	170	25	111-171	27

\*) srednja vrijednost 3 mjerenja

Tablica 3.16. Kemijski sastav austenitnih nodularnih ljevova prema ISO 2892-1973

Kvaliteta	Kemijski sastav						
	C max., %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Cr, %	P max., %	Cu max., %
S – Ni Mn 13 7	3,0	2,0–3,0	6,0-7,0	12,0-14,0	max. 0,2	0,08	0,5
S – Ni Cr 20 2	3,0	1,5–3,0	0,5-1,5	18,0-22,0	1,0-2,5	0,08	0,5
S - Ni Cr 20 3	3,0	1,5–3,0	0,5-1,5	18,0-22,0	2,5-3,5	0,08	0,5
S - Ni Si Cr 20 5 2	3,0	4,5-5,5	0,5-1,5	18,0-22,0	1,0-2,5	0,08	0,5
S – Ni 22	3,0	1,0-3,0	1,5-2,5	21,0-24,0	max. 0,5	0,08	0,5
S - Ni Mn 23 4	2,6	1,5-2,5	4,0-4,5	22,0-24,0	max. 0,2	0,08	0,5
S - Ni Cr 30 1	2,6	1,5-3,0	0,5-1,5	28,0-32,0	1,0-1,5	0,08	0,5
S - Ni Cr 30 3	2,6	1,5-3,0	0,5-1,5	28,0-32,0	2,5-3,5	0,08	0,5
S - Ni Si Cr 30 5 5	2,6	5,0-6,0	0,5-1,5	28,0-32,0	4,5-5,5	0,08	0,5
S - Ni 35	2,4	1,5-3,0	0,5-1,5	34,0-36,0	max. 0,2	0,08	0,5
S - Ni Cr 35 3	2,4	1,5-3,0	0,5-1,5	34,0-36,0	2,0-3,0	0,08	0,5

Tablica 3.17. Mehanička svojstva austenitnih nodularnih ljevova prema ISO 2892-1973

Kvaliteta	Mehanička svojstva			
	R <sub>m</sub> , min. (MPa)	R <sub>p0,2</sub> , min. (MPa)	A, min. (%)	KV, min.* (J)
S – Ni Mn 13 7	390	210	15	16
S – Ni Cr 20 2	370	210	7	13
S - Ni Cr 20 3	390	210	7	-
S - Ni Si Cr 20 5 2	370	210	10	-
S – Ni 22	370	170	20	20
S - Ni Mn 23 4	440	210	25	24
S - Ni Cr 30 1	370	210	13	-
S - Ni Cr 30 3	370	210	7	-
S - Ni Si Cr 30 5 5	390	240	-	-
S - Ni 35	370	210	20	-
S - Ni Cr 35 3	370	210	7	-

\*) minimalna srednja vrijednost 3 mjerenja

### 3.14.2.2 Proizvodni zahtjevi

Austenitni nodularni ljevovi proizvode se na isti način kao i uobičajene kvalitete nodularnih ljevova. Glavna razlika je u kemijskom sastavu: zahtijeva se visok sadržaj nikla, niži sadržaj ugljika te dodatak kroma i mangana kod određenih kvaliteta.

Većina kvaliteta austenitnih nodularnih ljevova sadrži krom kao legirajući element što rezultira prisutnošću karbida u mikrostrukturi. Međutim, zbog meke austenitne metalne osnove ne posjeduju visoku tvrdoću (osim kod kvalitete D-4 (prema ASTM A 439) i S - Ni Si Cr 30 5 5 (prema ISO 2892-1973)) i relativno lagano se strojno obrađuju. Žarenje, kojim se smanjuje tvrdoća, poboljšava strojna obrada i duktilnost razlaganjem i sferoidizacijom karbida, provodi se na temperaturama 960 – 1035 °C u trajanju od 1 – 5 sati (ovisno o debljini

stjenke odljevka i željenom stupnju razlaganja i sferoidizacije karbida), nakon čega slijedi sporo hlađenje na zraku ili u peći. Ako se odljevci upotrebljavaju na temperaturama  $\geq 480$  °C, u cilju poboljšana visokotemperaturne stabilnosti (smanjenja rasta i deformacije odljevaka), potrebno je provesti žarenje na 870 °C u trajanju od 1 – 4 sata s naknadnim sporim hlađenjem u peći do 540 °C, a zatim na zraku.

Da bi se uklonila zaostala naprezanja, veliki i kompleksi odljevci od austenitnih nodularnih ljevova ne smiju se istresati iz kalupa do temperature od  $\sim 315$  °C. Uklanjanje zaostalih naprezanja, ako se zahtijeva, može se provesti na temperaturama od 620 – 675 °C u trajanju od 1 sata za svakih 25 mm poprečnog presjeka (debljine stjenke).

### 3.14.2.3 Svojstva i primjena austenitnih nodularnih ljevova

Iz tablica 3.13, 3.15 i 3.17 može se vidjeti da zbog austenitne metalne osnove ne postoje značajne razlike u vrijednostima vlačne čvrstoće i granice razvlačenja između pojedinih kvaliteta austenitnih nodularnih ljevova. Izduženja i žilavosti također su vrlo slični, a ovise o sadržaju kroma i silicija te eventualnom dodatku molibdena radi poboljšavanja visokotemperaturnih svojstava. Zbog stabilnosti austenitne metalne osnove, mehanička svojstva austenitnih nodularnih ljevova ne mijenjaju se značajno primjenom toplinske obrade. Žarenjem se može poboljšati izduženje putem smanjenja sadržaja karbida te sferoidizacije preostalih karbida.

Austenitni nodularni ljevovi zbog austenitne metalne osnove zadržavaju žilavost i duktilnost do vrlo niskih temperatura. Posebno je potrebno istaknuti kvalitetu S - Ni Mn 23 4 koja posjeduju vrlo dobru žilavost do -196°C (tablica 3.18)!. Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja nodularnog lijeva kvalitete S - Ni Mn 23 4 raste s sniženjem temperature, dok je žilavost pri temperaturama od 0 do -150° C viša nego pri sobnoj temperaturi (tablica 3.18).

Tablica 3.18. Mehanička svojstva austenitnog nodularnog lijeva S - Ni Mn 23 4 pri niskim temperaturama

Temperatura, °C	R <sub>m</sub> , (MPa)	R <sub>p0,2</sub> , (MPa)	A, (%)	KV, (J)
+ 20	450	220	35	29
0	450	240	35	31
- 50	460	260	38	32
- 100	490	300	40	34
- 150	530	350	38	33
-183	580	430	33	29
196	620	450	27	27

Modul elastičnosti austenitnih nodularnih ljevova kreće se od 90 – 130 GPa. Ove vrijednosti značajno su niže u odnosu na uobičajene kvalitete nodularnog lijeva i znatno sličnije austenitnim sivim ljevovima.

Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja i otpornost na puzanje austenitnih nodularnih ljevova opada s porastom temperature (tablica 3.19). Legiranjem austenitnih nodularnih ljevova s molibdenom do 1,0 % može se poboljšati otpornost na puzanje, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja pri visokim temperaturama (tablica 3.19).

Tablica 3.19. Promjena vlačne čvrstoće i granice razvlačenja austenitnih nodularnih ljevova s porastom temperature

	Temp. (°C)	Kvaliteta (prema ASTM A 439)								
		D-2	D-2 (s Mo)	D-2C	D-3	D-3 (s Mo)	D-4	D-4 (s Mo)	D-5B	D-5B (s Mo)
R <sub>m</sub> , (MPa)	20	410	424	429	402	421	441	417	419	422
	430	372	-	361	-	-	-	-	-	-
	540	329	255	290	331	323	419	376	325	336
	650	245	265	194	288	303	331	314	280	320
	760	152	172	119	183	199	150	154	172	214
R <sub>p0,2</sub> , (MPa)	20	241	259	235	271	276	305	296	283	283
	430	193	-	181	-	-	-	-	-	-
	540	193	201	159	196	197	285	265	178	197
	650	172	174	167	189	200	234	245	167	206
	760	117	118	114	105	150	128	128	128	168

Austenitni nodularni ljevovi imaju austenitnu strukturu na svim temperaturama, zbog čega ne podliježu faznim promjenama. To rezultira boljom otpornošću na toplinske cikluse (ciklusi zagrijavanja i hlađenja) od uobičajenih nodularnih ljevova i čelika.

Austenitni nodularni ljevovi koje sadrže krom pokazuju vrlo dobru otpornost na oksidaciju. Oksidacijska otpornost ovih kvaliteta nadmašuje oksidaciju otpornost nodularnih ljevova s visokim sadržajem silicija (5,5 %).

Sposobnost otvrdnjavanja hladnom deformacijom (otvrdnjavanje pri radu) osigurava visoku otpornost na trošenje austenitnih nodularnih ljevova pri niskim i visokim temperaturama, koja je superiornija od mnogih konkurentnih materijala.

Austenitni nodularni ljevovi imaju relativno nisku toplinsku vodljivost zbog nodularnog oblika grafita i austenitne metalne osnove.

U tablici 3.20 prikazana su najznačajnija svojstva i područja primjene austenitnih nodularnih ljevova prema ISO 2892-1973.

Tablica 3.20. Svojstva i tipična područja primjene austenitnih nodularnih ljevova prema ISO 2892-1973

Kvaliteta	Svojstva	Tipična područja primjene
S – Ni Mn 13 7	nemagnetičan	Razni dijelovi turbina (tlačni poklopci), kućišta ventila.
S – Ni Cr 20 2	Vrlo dobra otpornost na koroziju, posebno u lužinama, razrijeđenim kiselinama, morskoj vodi i otopinama soli. Dobra toplinska otpornost, nemagnetičan pri niskim sadržajima kroma.	Pumpe, ventili, kompresori, vodilice, kućišta turbina, ispušne grane.
S - Ni Cr 20 3	Slična svojstva kao S – Ni Cr 20 2, ali bolja toplinska otpornost i otpornost na eroziju.	Pumpe, ventili, kompresori, vodilice, kućišta turbina, ispušne grane.
S - Ni Si Cr 20 5 2	Dobra otpornost na koroziju, čak i u razrijeđenoj sumpornoj kiselini, Dobra toplinska otpornost. Ova kvaliteta nije pogodna za upotrebu u temperaturnom području od 500 - 600°C.	Dijelovi pumpi, kućišta ventila industrijskih peći koji su izložena visokim naprezanjima.
S – Ni 22	Visok koeficijent toplinske ekspanzije, niža toplinska otpornost i otpornost na koroziju od S – Ni Cr 20 2. Dobra žilavost do - 100°C. Nemagnetičan.	Pumpe, ventili, kompresori, vodilice, kućišta turbina, ispušne grane.
S - Ni Mn 23 4	Dobra žilavost do - 196°C. Nemagnetičan.	Odljevci za kriogenu tehniku koji se upotrebljavaju do - 196°C.
S - Ni Cr 30 1	Slična svojstva kao S - Ni Cr 30 3	Pumpe, parni kotlovi, ventili, dijelovi filtara, ispušne grane, kućišta turbina.
S - Ni Cr 30 3	Toplinska otpornost i otpornost na toplinske šokove do 800°C. Dobra otpornost na koroziju pri visokim temperaturama, odlična otpornost na eroziju u vodenoj pari i solnim kupkama, prosječna toplinska ekspanzija.	Pumpe, parni kotlovi, ventili, dijelovi filtara, ispušne grane, kućišta turbina.
S - Ni Si Cr 30 5 5	Posebno izražena otpornost na koroziju i eroziju te toplinska otpornost, prosječna toplinska ekspanzija.	Dijelovi pumpi, ventili, odljevci za industrijske peći koji su podvrgnuti visokim mehaničkim naprezanjima.
S - Ni 35	Niska toplinska ekspanzija, otpornost na toplinske šokove	Dijelovi koji moraju posjedovati visoku dimenzijsku stabilnost, znanstveni instrumenti.
S - Ni Cr 35 3	Slična svojstva kao S - Ni 35	Dijelovi kućišta plinskih turbina

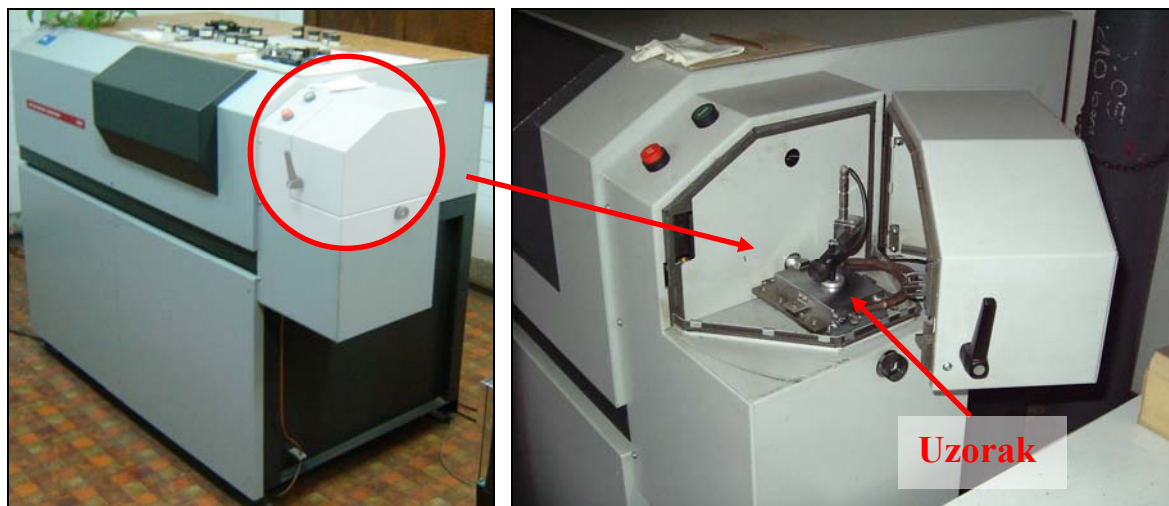
### 3.15 Kontrola kvalitete

Da bi se osigurala ponovljivost proizvodnog procesa potrebno je provesti striktnu kontrolu svih faza u toku procesa proizvodnje. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na uložne materijale koji moraju zadovoljiti definirane specifikacije. Sve podatke o uložnim materijalima potrebno je sustavno voditi. Preporučljivo je pažljivo pratiti nove materijale (sirovine) tijekom početka primjene u proizvodnom procesu.

#### 3.15.1 Kontrola kvalitete primarne taljevine

Prije procesa taljenja uložni materijali moraju se točno odvagnuti i dobivene podatke potrebno je evidentirati. Vrlo je važno strogo se pridržavati propisane procedure ulaganja i taljenja. Provođenje ove procedure treba također evidentirati.

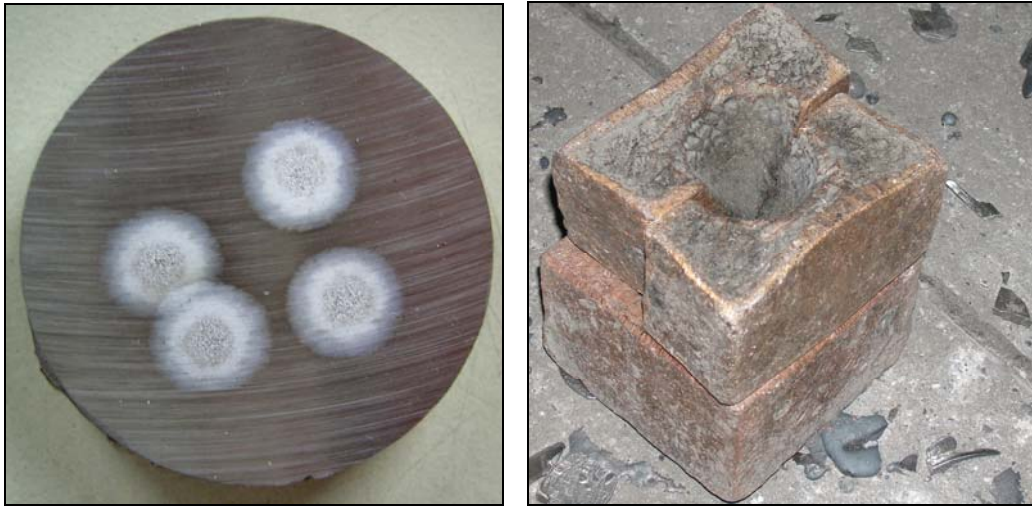
Temperatura taljevine određuje se uranjajućim pirometrom. Optički spektrometar je najčešće upotrebljavani uređaj za kontrolu kemijskog sastava taljevine (slika 3.81). Uzorak za određivanje kemijskog sastava (slika 3.82a) na spektrometru je tanka pločica kružnog presjeka koja se dobiva ulijevanjem taljevine u bakrenu kokilu (slika 3.82b), čime se osigurava metastabilno skrućivanje, tj. skrućivanje bez izlučivanja ugljika u obliku grafita.



Slika 3.81. Spektrometar za određivanje kemijskog sastava

Toplinskom analizom može se odrediti sadržaj ugljika i silicija s relativno visokom točnošću ukoliko se skrućivanje odvija metastabilno (bijelo), tj. bez izlučivanja ugljika u obliku grafita. U slučaju metastabilnog skrućivanja može se jasno uočiti zastoje koji odgovara likvidus temperaturi  $T_L$  i temperaturi eutektičkog skrućivanja  $T_E$ . Važno je da se skrućivanje odvija metastabilno. U tom slučaju i kod varijacije nukleacijskih svojstava taljevina s istim kemijskim sastavom eutektička temperatura određena pri metastabilnom skrućivanju biti će konstantna, dok će eutektička temperatura pri stabilnom skrućivanju značajno varirati. Metastabilno skrućivanje postiže se lijevanjem uzorka taljevine u standardizirani lončić (Quik – cup<sup>®</sup>) koji sadrži telur (slika 3.83). Telur nema utjecaj na iznos navedenih temperatura. Primjer krivulje hlađenja dobivene lijevanjem taljevine u lončić s telurom prikazana je na slici 3.84.





a)

b)

Slika 3.82. a) uzorak za određivanje kemijskog sastava (nakon provedene analize),  
b) bakrena kokila za lijevanje uzorka za određivanje kemijskog sastava



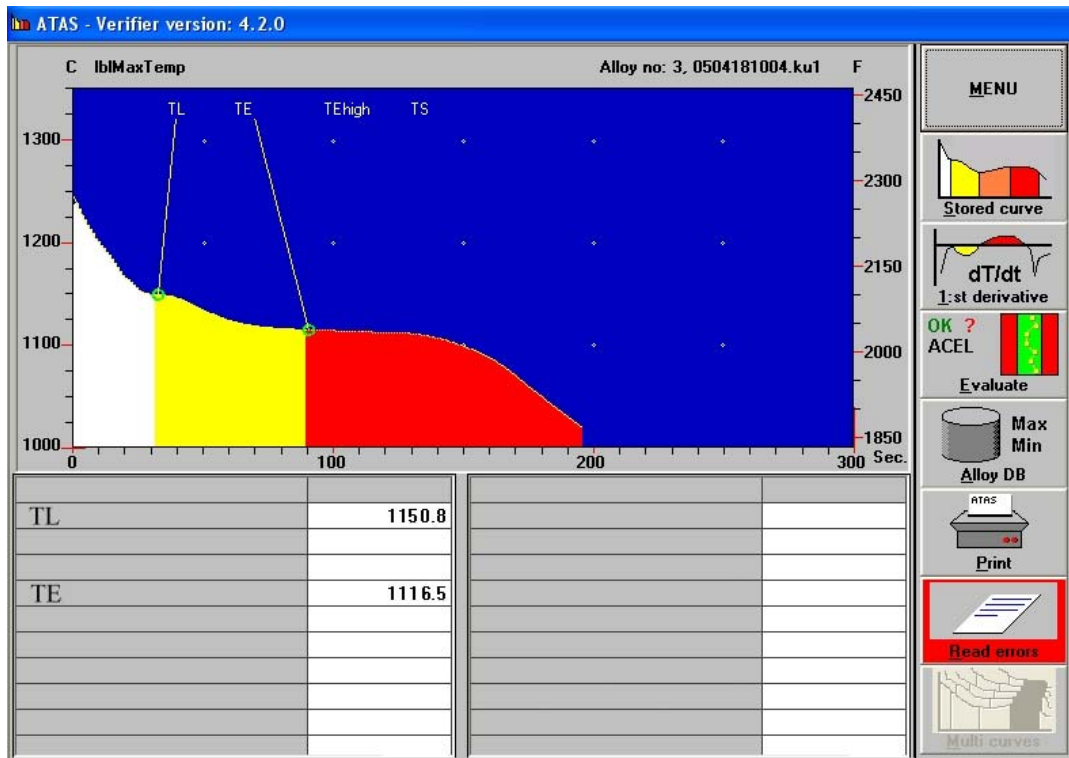
Slika 3.83. Standardizirani lončić sa telurom (Quik – cup<sup>®</sup>) za toplinsku analizu

Primjenom višestruke regresijske analize moguće je dobiti jednadžbe za određivanje sadržaja ugljika i silicija:

$$\%C = - 6,51 + 0,0084T_L + 0,0178T_E \quad (3.6)$$

$$\%Si = 32,37 - 0,00644T_L - 0,02042T_E - 1,73654\%P \quad (3.7)$$

Koeficijenti u jednadžbama (3.6) i (3.7) moraju se eksperimentalno utvrditi unutar svake ljevaonice za pojedinu vrstu lijeva.

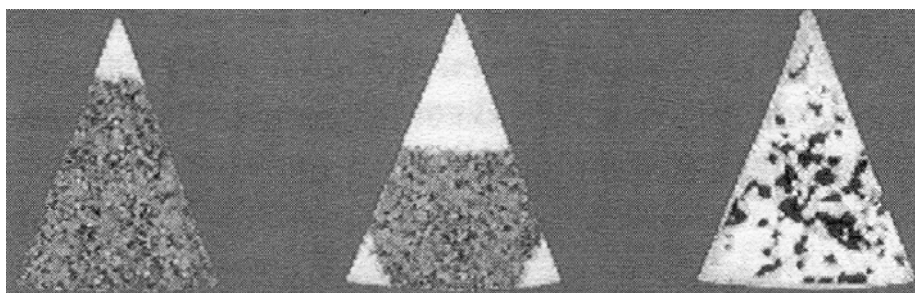


Slika 3.84. Primjer krivulje hlađenja dobivene lijevanjem taljevine u lončić s telurom

Nakon što se ostvari propisani kemijski sastav taljevine i temperatura, a prije obrade taljevine (nodularizacije), mora se provjeriti grafitizacijski potencijal, odnosno sklonost ka odbjelu (metastabilnom skrućivanju). Na osnovi rezultata ovog ispitivanja može se odrediti potreba za cijepljenjem i potrebna količina cjepiva. Kemijski sastav i metalurško stanje taljevine imaju značajan utjecaj na dubinu odbjela.

Određivanje grafitizacijskog potencijala, odnosno sklonosti ka odbjelu provodi se na odvojeno lijevanom ispitnom uzorku (klin probe). Klin proba detaljno je razmatrana u okviru cjeline 2.0 „Sivi lijev“ (poglavlje 2.14 „Kontrola kvalitete“).

Različiti oblici odbjela (slika 3.85) mogu ukazivati na različiti kemijski sastav i metaluršku kvalitetu taljevine.



a)

b)

c)

Slika 3.85. Shematski prikaz određivanja grafitizacijskog potencijala taljevine pomoću klin probe: a) visok grafitizacijski potencijal, b) središnji grafitizacijski potencijal, c) loš grafitizacijski potencijal

Rezultati određivanja grafitizacijskog potencijala, odnosno sklonosti ka odbjelu pomoću klin probe ovise u velikoj mjeri o brojim parametrima koji se moraju strogo kontrolirati te iskustvu operatera. Ova ispitivanja pružaju samo kvalitativne informacije i nisu garancija kvalitete odljevaka. Zbog toga sve više ljevaonica danas primjenjuje toplinsku analizu (snimanje krivulje hlađenja) za potpuniji uvid u grafitizacijski potencijal i metalurško stanje taljevine.

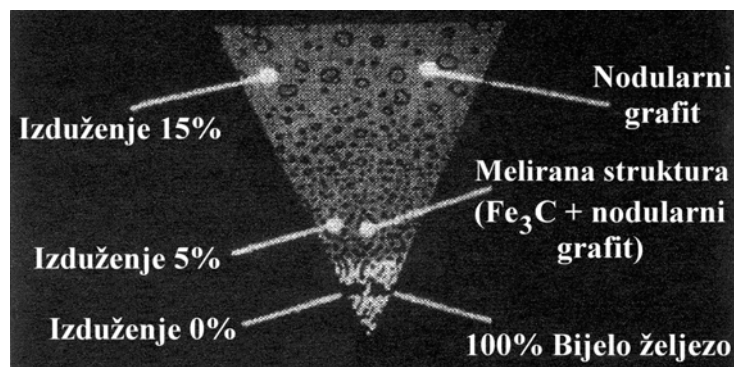
### 3.15.2 Kontrola kvalitete obrađene taljevine

Pod pojmom „obrađena taljevina“ smatra se taljevina nakon nodularizacije, tj. taljevina spreman za ulijevanje u kalupe. Prema tome, nakon skrućivanja, ugljik bi trebao biti izlučen u obliku pravilnih grafitnih nodula u metalnoj osnovi bez karbida (eutektičkih ili interčelijastih).

Prvi korak u kontroli je provjera sadržaja magnezija, koji mora biti unutar propisanih granica. Kemijski sastav određuje se na spektrometru. Važno je ostvariti odgovarajući početni sadržaj magnezija u taljevini nakon obrade. Magnezij odgara tijekom lijevanja (0,001 %/min.), zbog čega postoji opasnost da sadržaj magnezija u zadnjim količinama taljevine u loncu bude prenizak, što u konačnici može rezultirati smanjenjem nodularnosti, nastankom vermikularnog grafitu i pojavom degeneriranih oblika grafitu u zadnje lijevanim odljercima.

Kontrola nodularnosti odljevka može se brzo provjeriti ultrazvučnim ispitivanjem. Ukoliko je brzina signala unutar prihvatljivih granica ( $\sim 4600$  m/s) smatra se da se radi o nodularnom lijevu.

Klin proba također može pružiti vrijedne informacije o grafitizacijskom potencijalu obrađene taljevine (slika 3.86). Obično se lijeva klin proba malih dimenzija da bi se točnije mogla razlikovati dobro cijepljena taljevina od loše cijepljene.



Slika 3.86. Shematski prikaz strukture na prijelomnoj površini klin probe koja je odlivena od obrađene taljevine

Kod ljevaonica koje lijevaju velike serije odljevaka, preporučljivo je provjeriti strukturu ispitnog uzorka odlivenog nakon zadnjeg kalupa. Ako je oblik grafitnih čestica nodularan, postoji velika vjerojatnost da svi odljevci prethodno odliveni imaju zadovoljavajuću strukturu.

Danas su na tržištu dostupni programski paketi koji na osnovi analize krivulje hlađenja i njenih derivacija mogu, prema ugrađenim znanjima u bazi podataka, odrediti mikrostrukturna svojstva. Ove tehnike sve se više razvijaju i primjenjuju u ljevaonicama.

### 3.15.3 Toplinska analiza

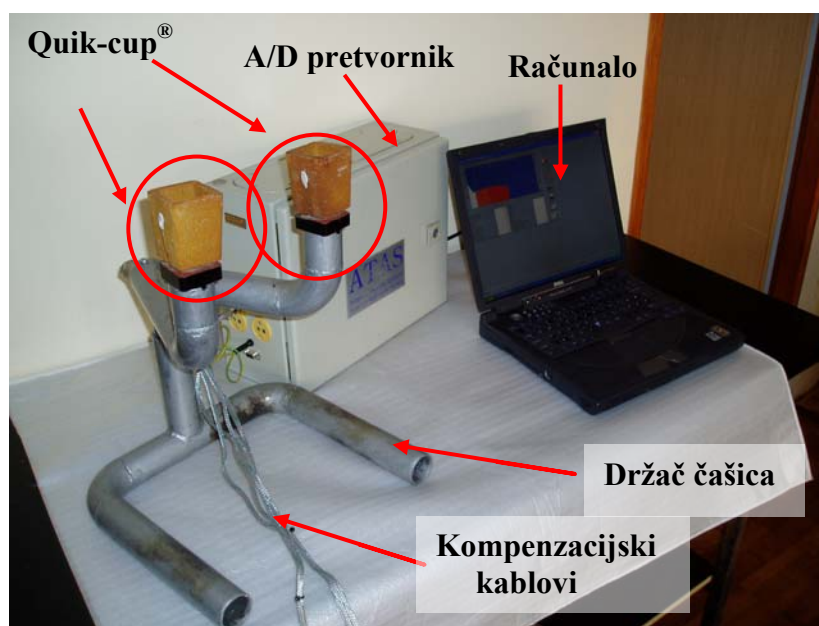
Toplinska analiza (TA) je „on-line“ metoda kontrole taljevine koja omogućuje mjerenje promjena tijekom procesa skrućivanja. U ljevaonicama se provodi snimanjem krivulja hlađenja. Krivulja hlađenja dobiva se praćenjem promjene temperature s vremenom pri skrućivanju uzorka taljevine u standardiziranom lončiću s ugrađenim termoelementom (Quik-cup<sup>®</sup>).

Fazne pretvorbe koje se događaju u analiziranom uzorku tijekom skrućivanja rezultiraju odgovarajućim promjenama nagiba krivulje hlađenja, što omogućuje određivanje karakterističnih temperatura s krivulja hlađenja.

Najširu primjenu u ljevaonicama ima računalom potpomognuta toplinska analiza. Krivulja hlađenja pohranjena je u računalu koje izračunava njenu prvu (i eventualno) drugu derivaciju, što omogućuje potpuniju interpretaciju faznih pretvorbi. Utjecaj različitih elemenata, oksida, silikata itd., kao i izlučivanje ugljika u obliku grafita reflektira se na krivulju hlađenja te njenu prvu i drugu derivaciju. Krivulja hlađenja omogućuje najpotpuniji uvid u metalurško stanje taljevine i predstavlja „metalurški otisak prsta“ taljevine identificirajući je mnogo točnije od analize kemijskog sastava, budući da se dvije taljevine istog kemijskog sastava mogu ponašati sasvim različito.

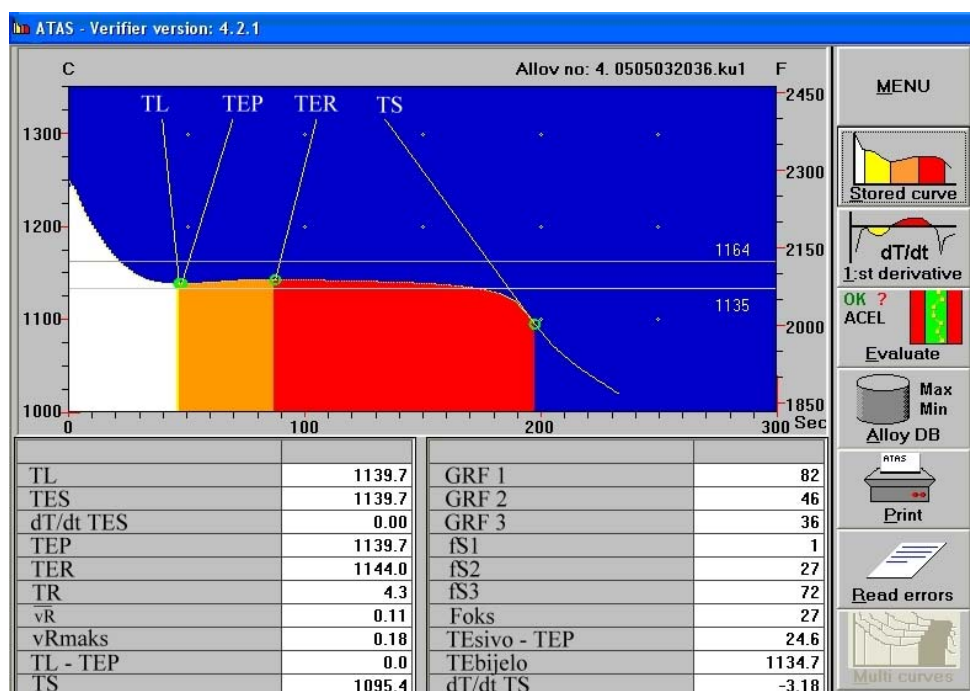
Primjena toplinske analize u ljevaonicama ide u smjeru utvrđivanja korelacije između pojedinih karakterističnih točaka s krivulje hlađenja te njene prve i druge derivacije s kemijskim sastavom, mikrostrukturnim i mehaničkim svojstvima. Na taj način moguće je izgraditi sustav kontrole koji će na osnovi snimljene krivulje hlađenja moći procijeniti navedena svojstva, što omogućuje eventualne korekcije na taljevini u cilju postizanja propisanih svojstava.

U cilju stvaranja sustava kontrole procesa proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova primjenjuje se, kao najnoviji pristup, kombinacija računalom potpomognute toplinske analize taljevine i metoda umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence*). Cilj je ovakvog sustava da na osnovi analize krivulje hlađenja i njene derivacije odredi metalurško stanje taljevine, definira uvjete obrade taljevine (dodatak cjepiva), procijeni mikrostrukturna i mehanička svojstva, te eventualni nastanak grešaka (poroznost, stezanje itd.). Na slici 3.87 prikazan je jedan suvremeni sustav za toplinsku analizu.



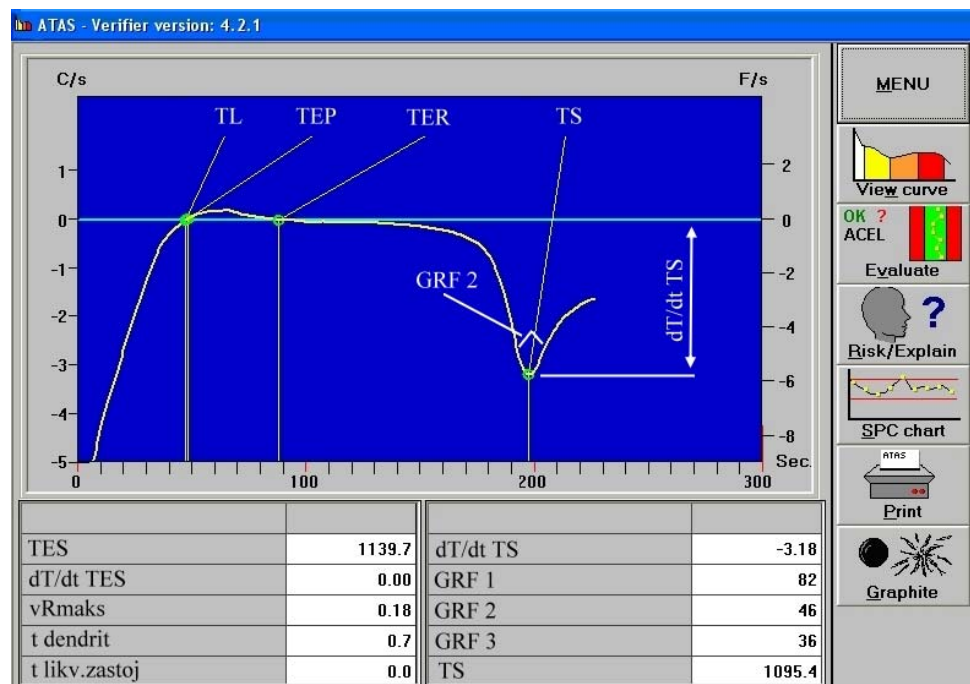
Slika 3.87. Suvremeni sustav za toplinsku analizu

Na slici 3.88 prikazan je primjer krivulje hlađenja taljevine nodularnog lijeva u eutektičkom području i registrirani toplinski parametri. Krivulja hlađenja snimljena je sustavom ta toplinsku analizu koji je prikazan na slici 3.87.



Slika 3.88. Primjer krivulje hlađenja taljevine nodularnog lijeva u eutektičkom području i registrirani toplinski parametri

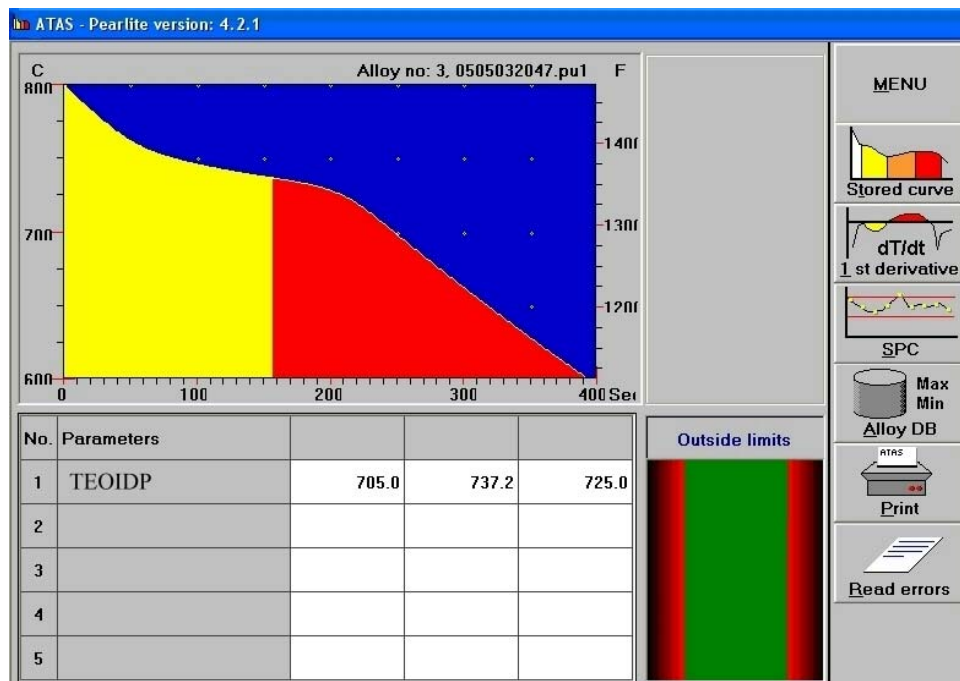
Na slici 3.89 prikazana je prva derivacija krivulje hlađenja nodularnog lijeva u eutektičkom području sa slike 3.88 i registrirani toplinski parametri.



Slika 3.89. Prva derivacija krivulje hlađenja nodularnog lijeva u eutektičkom području sa slike 3.88 i registrirani toplinski parametri

Prva derivacija krivulje hlađenja prikazuje brzinu promjene temperature u promatranoj točki.

Na slici 3.90 prikazana je krivulja hlađenja taljevine nodularnog lijeva u eutektoidnom području.



Slika 3.90. Krivulja hlađenja taljevine nodularnog lijeva u eutektoidnom području i registrirani toplinski parametri

U nastavku biti će prikazan utjecaj (povezanost) nekoliko najznačajnijih toplinskih parametara s krivulje hlađenja u eutektičkom području i njene prve derivacije te sa krivulje hlađenja u eutektoidnom području na mikrostrukturu, a time i mehanička svojstva nodularnog lijeva.

Temperatura eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  je povezana s nukleacijskim stanjem taljevine. Niske vrijednosti temperature eutektičkog pothlađenja ukazuju na slaba nukleacijska svojstva taljevine, odnosno na nizak broj aktivnih mjesta za nukleaciju grafita. Nizak broj aktivnih mjesta za nukleaciju grafita rezultira manjom količinom eutektičkog grafita, odnosno u konačnici nižim brojem nodula u nodularnom lijevu. Pri eutektoidnoj pretvorbi, manji broj nodula rezultira manjim brojem potencijalnih mjesta na koja će izdifundirati ugljik iz austenita. U takvim uvjetima nastat će veći udio perlita u mikrostrukturi.

Temperatura eutektičkog pothlađenja indikator je nastanka primarnih karbida u mikrostrukturi. Ako temperatura eutektičkog pothlađenja leži ispod temperature metastabilnog skrućivanja, pojaviti će se primarni karbidi u mikrostrukturi, odnosno ugljik precipitira kao  $Fe_3C$ , a ne kao grafit. Kod nodularnog lijeva blizu eutektičkog sastava likvidus temperatura, temperatura početka eutektičkog skrućivanja i temperatura eutektičkog pothlađenja gotovo su identičnih vrijednosti (slika 3.88).

Udio površine (parametar  $f_{S1}$ ) ispod krivulje hlađenja između likvidus temperature i temperature eutektičkog pothlađenja u ukupnoj površini ispod krivulje hlađenja (od  $T_L$  do  $T_S$ ) ukazuje na količinu izlučenog primarnog austenita. U slučaju sastava blizu eutektičkog vrijednost ovog parametra je vrlo niska (1,0 – 2,0 %), što ukazuje na vrlo malu opasnost od primarnog stezanja (mala količina izlučenog primarnog (podeutektičkog) austenita).

Kod nodularnog lijeva parametar  $f_{S3}$  treba biti veći od parametra  $f_{S2}$ , što ukazuje na ravnomjerno izlučivanje grafita tijekom eutektičke reakcije. To se u konačnici može povezati s većim brojem nodula u nodularnom lijevu.

Rekalescencija ( $T_R$ ) predstavlja razliku između temperature eutektičke rekalescencije, odnosno najviše eutektičke temperature  $T_{ER}$  i temperature eutektičkog pothlađenja, tj. najniže eutektičke temperature  $T_{EP}$  (slika 3.88). Visoka rekalescencija ukazuje na veliku količinu izlučenog grafita na početku eutektičke reakcije u kratkom vremenskom periodu te slaba nukleacijska svojstva taljevine. Prevelika količina grafita izlučena u ranoj fazi eutektičkog skrućivanja rezultira manjom količinom raspoloživog grafita tijekom daljnjeg skrućivanja. Zbog toga ne dolazi do aktiviranja sekundarnih mjesta nukleacije u daljnjoj fazi eutektičkog skrućivanja, što za posljedicu ima nizak broj nodula. Ako se u kratkom vremenskom intervalu izluči velika količina grafita, zbog razlike u gustoći između precipitiranog grafita ( $\sim 2,2 \text{ g/cm}^3$ ) i taljevine ( $\sim 7,0 \text{ g/cm}^3$ ) može doći do značajne volumne ekspanzije, što u konačnici može rezultirati pojavom mikro stezanja i poroznosti. Potrebno je izbjeći naglo izlučivanje grafita, odnosno osigurati kontinuiranu precipitaciju grafita tijekom eutektičkog skrućivanja i na taj način rekalescenciju održavati što je moguće nižom. Optimalne vrijednosti rekalescencije kreću u intervalu od  $1 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

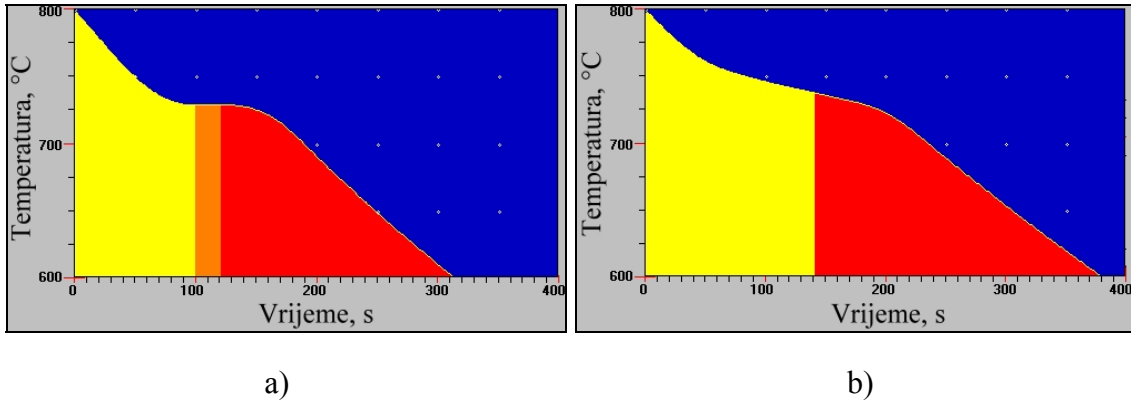
Solidus temperatura ( $T_S$ ) je značajan toplinski parametar za praćenje završetka skrućivanja. Ako solidus temperatura leži ispod temperature metastabilnog skrućivanja, u mikrostrukтури mogu nastati karbidi.

Razlika u toplinskoj vodljivosti najjasnije je izražena na kraju skrućivanja, naročito oko solidus temperature. Grafitni faktor 2 (GRF2) predstavlja kut prve derivacije krivulje hlađenja na solidus temperaturi (slika 3.89) i prikazuje brzinu kojom željezni lijev prolazi zonu ukupnog skrućivanja, mjereći indirektno toplinsku vodljivost. Toplinska vodljivost grafita je  $\sim 4$  puta veća od toplinske vodljivosti austenita u temperaturnom području oko  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , što je upravo temperaturno područje unutar kojeg se nalazi solidus temperatura nodularnog lijeva. Niske vrijednosti grafitnog faktora 2 ukazuju na visoku toplinsku vodljivost, što je znak velike količine izlučenog grafita (velikog broja nodula).

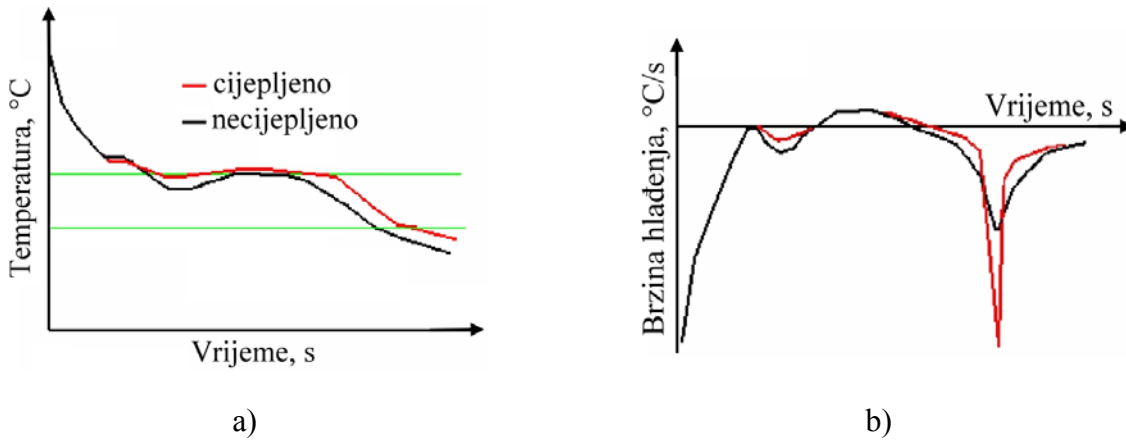
Niska vrijednost prve derivacije krivulje hlađenja na solidusu (veća dubina negativnog pika) (slika 3.89)  $\frac{d}{dt} T_S$  ukazuje na brže odvođenje topline, odnosno veću toplinsku vodljivost i povezana je s visokom količinom eutektičkog grafita na kraju skrućivanja. Grafitni faktor 2 (GRF2) u kombinaciji s vrijednosti prve derivacije krivulje hlađenja na solidus temperaturi snažan je indikator toplinske vodljivosti, odnosno oblika izlučenog grafita i broja nodula u nodularnom lijevu. Zbog kontinuirane prirode grafitnih listića, sivi lijev ima višu toplinsku vodljivost i niže vrijednosti oba navedena parametra u odnosu na nodularni lijev, što je jasan indikator oblika izlučenog grafita.

Pretvorba austenita u krutom stanju u ferit i perlit pojavljuje se pri eutektoidnoj temperaturi ( $T_{E0IDP}$ ). Temperatura eutektoidne pretvorbe biti će veća kod većih udjela ferita u mikrostrukтури. Kod stvaranja većih udjela perlita karakteristična je pojava rekalescencije na krivulji hlađenja u eutektoidnom području (slika 3.91a). Feritni nodularni lijev ne pokazuje rekalescenciju zbog čega krivulja hlađenja ima gotovo kontinuirani pad (slika 3.91b).

Toplinska analiza može se uspješno primijeniti za određivanje potrebne količine i djelovanja cjepljiva te nukleacijskog potencijala taljevina željeznih ljevova. Pravilnim cijepljenjem taljevine povisuje se temperatura eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  i solidus temperatura  $T_S$  te snižava likvidus temperatura  $T_L$  i rekalescencija  $T_R$  (slika 3.92). Indikator slabljenja djelovanja cjepljiva je opadanje temperature eutektičkog pothlađenja  $T_{EP}$  i eutektičke rekalescencije  $T_{ER}$ .

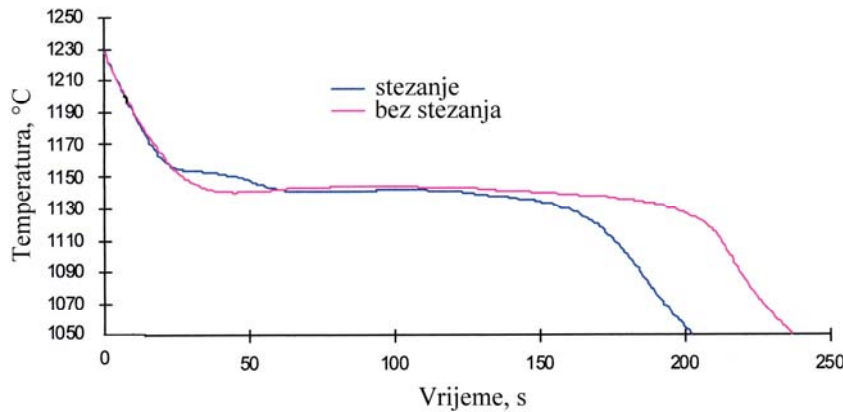


Slika 3.91. a) krivulja hlađenja perlitnog nodularnog lijeva u eutektoidnom području (udio perlita 62,2 %), b) krivulja hlađenja feritnog nodularnog lijeva u eutektoidnom području (udio perlita 3,5 %)



Slika 3.92. Utjecaj cijepljenja na krivulju hlađenja (a) i prvu derivaciju krivulje hlađenja (b)

Primjenom toplinske analize moguće je procijeniti nastanak grešaka na odljercima uslijed stezanja. Sklonost ka stezanju raste s porastom brzine hlađenja, likvidus temperature  $T_L$ , temperature početka eutektičkog skrućivanja  $T_{ES}$  i rekalescencije  $T_R$ , te sniženjem solidus temperature  $T_S$ . Na slici 3.93 prikazane su krivulje hlađenja nodularnog lijeva za slučaj kada se javlja stezanje (plava linija) i kada ne pojavljuje stezanje (crvena linija).



Slika 3.93. Krivulje hlađenja nodularnog lijeva u slučaju pojave stezanja (plava linija) i odsutnosti stezanja (crvena linija)



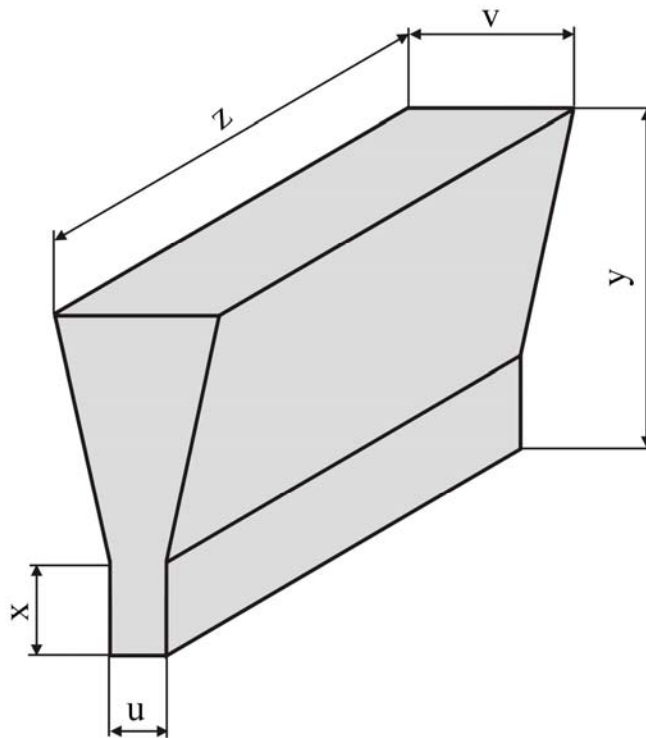
### 3.15.4 Kontrola kvalitete odljevaka

Preuzimanje odljevaka od strane kupca ovisi o rezultatima završne kontrole koja se provodi na svim odljencima ili na reprezentativnim uzorcima odljevaka. Ispitivanje mehaničkih svojstava, dimenzijske točnosti, ultrazvučno ispitivanje, ispitivanje vrtložnim strujama, rendgenska analiza, ispitivanje feromagnetskim prahom, ispitivanje obojenim penetrantom i ispitivanje pod tlakom itd. neke su od metoda koje se primjenjuju za provjeru ispravnosti odljevaka i sukladnosti sa zahtijevanim specifikacijama. Dodatne metode mogu se upotrijebiti za ispitivanje nodularnosti i analizu mikrostrukture.

#### 3.15.4.1 Ispitivanje mehaničkih svojstava

Mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva propisana su normom HRN EN 1563 (tablica 3.1), a mogu biti i stvar dogovora proizvođača odljevaka i kupca.

Standardizirani uzorci za ispitivanje mehanička svojstava nodularnog lijeva najčešće se dobivaju iz lijevanih ispitnih uzoraka (Y-proba) strojnom obradom (slika 3.94).



Slika 3.94. Oblik i dimenzije lijevanog ispitnog uzorka (Y-proba) (sukladno HRN EN 1563)

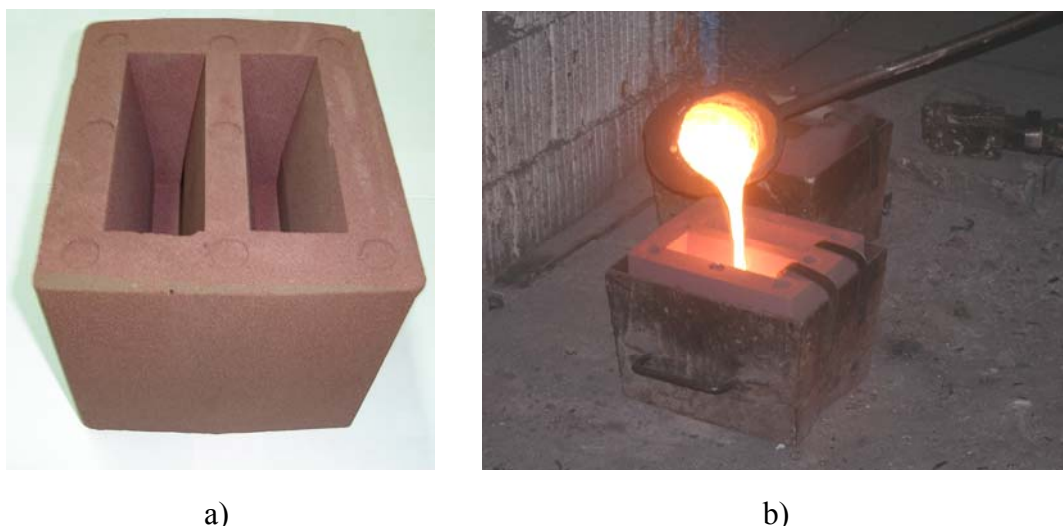
Norma HRN EN 1563 propisuje četiri različita tipa Y-proba. Sva četiri tipa Y-proba imaju isti oblik (konfiguraciju), a razlikuju se međusobno po dimenzijama (tablica 3.21, slika 3.94).

Tablica 3.21. Dimenzije Y-proba sukladno HRN EN 1563

Dimenzija, mm	Tip Y-probe			
	I	II	III	IV
u	12,5	25	50	75
v	40	55	100	125
x	25	40	50	65
y <sup>1)</sup>	135	140	150	175
z	Ovisi o dužini ispitnog uzorka			

y<sup>1)</sup> – samo za informaciju

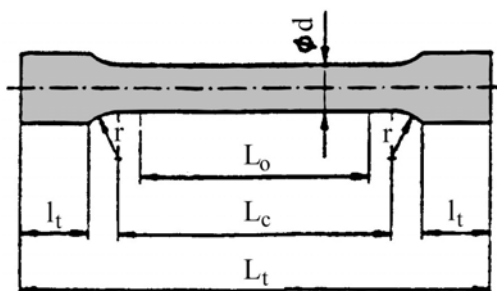
Kalupi za lijevanje Y-proba mogu biti izrađeni od svježe kalupne mješavine ili kemijski vezanih mješavina (slika 3.95a). Uzorak taljevine uzima se nakon obrade (nodularizacije) i lijeva u kalup (slika 3.95b).



Slika 3.95. a) jednokratni kalup za lijevanje ispitnih uzoraka (Y-proba) izrađen Betaset<sup>®</sup> postupkom (kemijski vezane mješavina), b) lijevanje ispitnog uzorka

Kupac može zahtijevati uzimanje ispitnog uzorka iz odljevka. Kod ovog slučaja, kupac mora definirati mjesto uzimanja ispitnog uzorka u odljevku.

Ispitivanje vlačnih svojstava nodularnog lijeva (vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, izduženje) provodi se prema normi HRN EN 10002-1. Ova norma propisuje oblik i dimenzije ispitnih uzoraka (slika 3.96, tablica 3.22) koje se izrađuju strojnom obradom iz odvojeno lijevanih ispitnih uzoraka (Y-proba).



Slika 3.96. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka za vlačna ispitivanja

Tablica 3.22. Dimenzije ispitnih uzoraka za vlačna ispitivanja prema HRN EN 10002-1

$d$ , mm	$L_0$ , mm	$L_c$ <sup>1)</sup> min., mm
5	25	30
7	35	42
10	50	60
14 <sup>2)</sup>	70	84
20	100	120

1) preporuka

2) preferirana dimenzija

gdje je:

$L_0$  – ispitna dužina,

$d$  – promjer ispitnog uzorka na ispitnom dijelu,

$L_t$  – ukupna dužina ispitnog uzorka (ovisi o  $L_c$  i  $l_t$ ),

$L_c > L_0, L_c - L_0 > d$ .

Za vlačna ispitivanja preferira se ispitni uzorak promjera 14,0 mm. Zbog tehničkih razloga i u slučaju uzimanja ispitnog uzorka iz odljevka, ispitivanja se mogu provesti i na ispitnim uzorcima većeg ili manjeg promjera, sukladno tablici 3.22. Pri tome je važno da ispitna dužina i promjer uzorka bude u odgovarajućem odnosu:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0} = 5d \quad (3.8)$$

gdje je  $S_0$  površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka

Ukoliko jednadžbu (3.8) nije moguće primijeniti, dimenzije ispitnog uzorka potrebno je usaglasiti između proizvođača odljevaka i kupca.

Ispitivanje tvrdoće najčešće se provodi metodom po Brinellu, premda se može primijeniti i metoda po Vickersu i Rockwellu. Metoda ispitivanja po Brinellu smatra se najprikladnijom za nodularni lijev. Da bi se dobile pouzdane vrijednosti tvrdoće preporučuje se upotreba kuglice promjera 10,0 mm, opterećenje 3000,0 kg i vrijeme utiskivanja 30,0 s. Sa smanjenjem veličine otiska smanjuje se i točnost mjerenja. Uvjeti i tijek ispitivanja tvrdoće prema Brinellu definirani su normom HRN EN 10003-1.

Kod nodularnog lijeva ne postoji čvrsta korelacija između vlačne čvrstoće i tvrdoće kao kod sivog lijeva, zbog utjecaja broja i oblika nodula, prisutnosti karbida, omjera ferit/perlit itd. na tvrdoću.

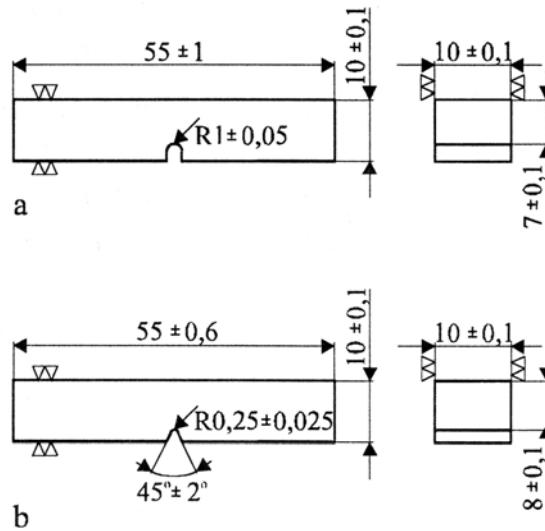
Ispitivanje žilavosti, odnosno određivanje otpornosti na nastajanje loma provodi se na dva načina:

- ispitivanjem u uvjetima udarnog opterećenja ( $KV, KU$ ),
- određivanjem veličina iz mehanike loma - lomna žilavost  $K_{IC}$ .

Ispitivanje žilavosti nodularnog lijeva najčešće se provodi u uvjetima udarnog opterećenja. Pri tome se određuje udarni rad loma. Udarni rad loma, odnosno energija utrošena na lom epruvete predstavlja mjeru udarne žilavosti.

Ispitivanje udarnog rad loma Charpyjevim batom provodi se prema normi HRN EN 10045-1. Dimenzije i oblik epruveta za ispitivanja udarnog rad loma definirane su navedenom

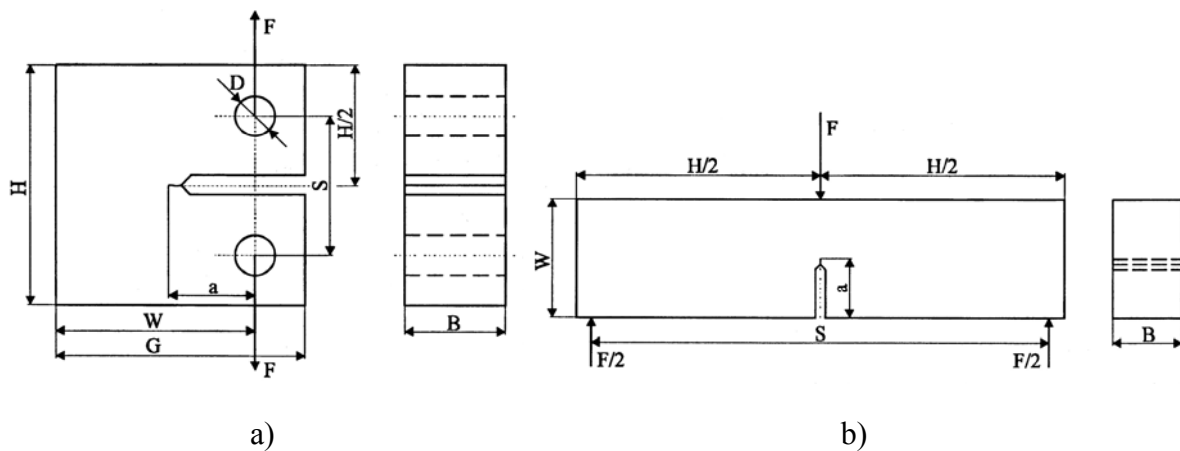
normom. Na slikama 3.97a i b prikazana su dva oblika i dimenzije epruveta koje se najčešće primjenjuju za ispitivanje udarnog rad loma. Epruveta sa „U“ utorom (zarezom) dubine 3,0 mm naziva se DVM epruvetom (slika 3.97a), a epruveta sa „V“ utorom (zarezom) dubine 2,0 mm poznata je pod imenom ISO-V epruveta. Udarni rad loma određen na epruveti s „U“ zarezom označava se kao KU. Udarni rad loma određen na epruveti s „V“ zarezom označava se kao KV.



Slika 3.97. Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rad loma: a) epruveta sa „U“ utorom, b) epruveta sa „V“ utorom

Udarni rad loma izražava se u J uz navođenje uvjeta ispitivanja (maksimalna energija loma bata, vrsta epruvete, temperatura ispitivanja). Vrijednosti udarnog rad loma dobivene ispitivanjem epruveta s različitim utorima ne preračunavaju se nego samo kvalitativno uspoređuju.

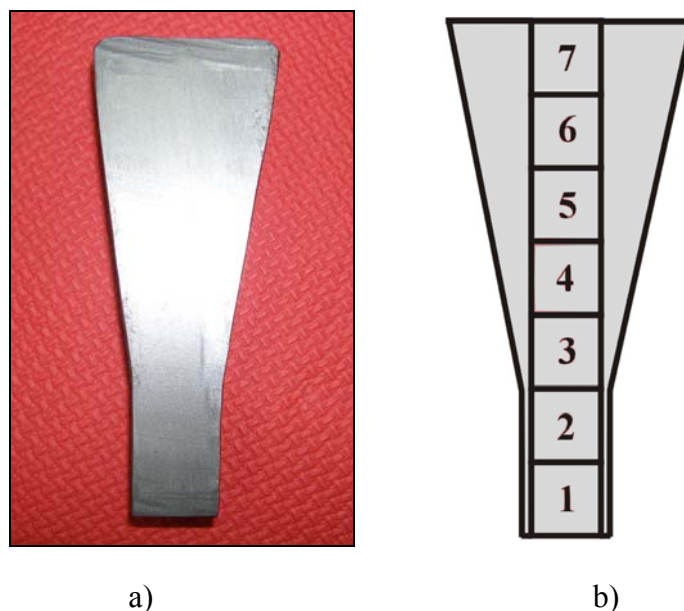
Utvrđivanjem lomne žilavosti dobiva se mjera otpornosti na širenje pukotine, dok se podaci dobiveni Charpyjevom metodom odnose na inicijaciju i širenje pukotine. Određivanje lomne žilavosti provodi se prema standardu ASTM E399-81. Ispitivanje se provodi na kompaktnoj vlačnoj epruveti (slika 3.98a) ili na epruveti za trotočkasto savijanje (slika 3.98b).



Slika 3.98. a) kompaktna vlačna epruveta s karakterističnim dimenzijama, b) epruveta za trotočkasto savijanje s karakterističnim dimenzijama

Postupak ispitivanja provodi se u dva dijela. Prvo se stvara realna pukotina umaranjem epruvete dinamičkim vlačnim naprezanjem, a potom se provodi statičko ispitivanje do loma uz snimanje dijagrama sila - proširenje pukotine iz kojeg se dobivaju podaci za utvrđivanje lomne žilavosti.

Mehanička svojstva nodularnog lijeva određena na uzorcima koji su dobiveni strojnom obradom iz Y-proba mogu varirati ovisno o mjestu uzimanja uzorka u Y-probi (slika 3.99, tablica 3.23).



Slika 3.99. a) segment Y-probe, b) shema uzimanja uzoraka iz segmenta Y-probe

Tablica 3.23. Rezultati mikrostrukturnih ispitivanja segmenta standardiziranog lijevanog ispitnog uzorka (Y-proba, slika 3.99)

Broj uzorka	Udio ferita, %	Udio perlita, %	Broj nodula/mm <sup>2</sup>	Nodularnost, %	Tvrdoća, HBW
1	87,4	12,6	139	72,0	168
2	84,2	15,8	118	71,0	167
3	74,6	25,4	83	70,0	175
4	71,9	28,1	77	66,0	178
5	72,4	27,6	94	70,0	178
6	75,2	24,8	114	71,0	180
7	76,0	24,0	132	72,0	183

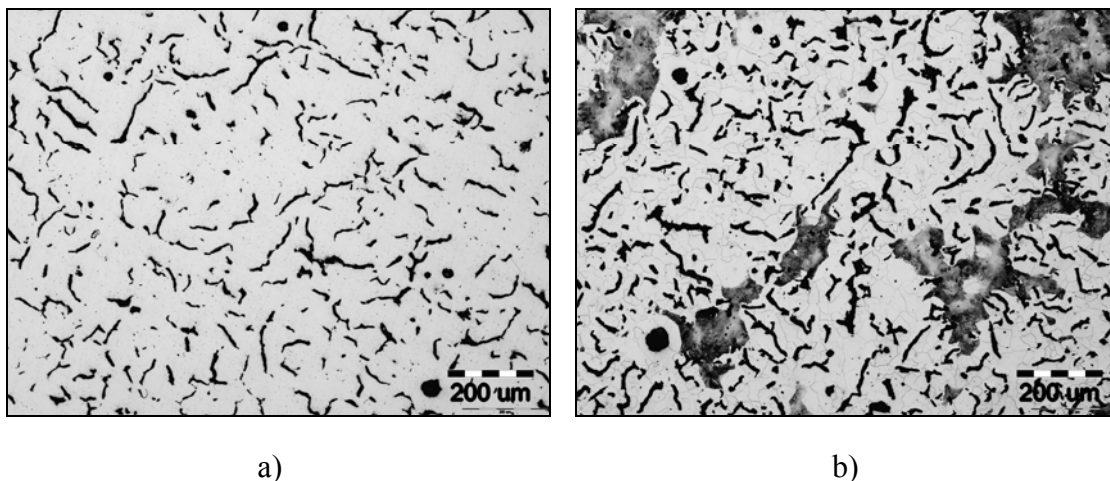
Brzina hlađenja je veća u donjim dijelovima Y-probe i da opada u smjeru toplinskog centra. Zbog toga u donjim dijelovima Y-probe nastaje veći broj nodula manjeg promjera (tablica 3.23).

Veća gustoća grafitnih nodula omogućuje kraće putove difuzije ugljika iz austenita na grafitne nodule tijekom eutektoidne pretvorbe i samim tim veći udio ferita u mikrostrukturi. Sporije hlađenje rezultira manjim brojem nodula većeg promjera. To znači da je mikrostruktura lijevanog ispitnog uzorka (Y-probe) pod jakim je utjecajem toplinskih gradijenata, što ima za posljedicu varijacije mehaničkih svojstava obzirom na mjesto uzimanja uzoraka (tablica 3.23). Varijacije u mikrostrukturi mogu se smanjiti cijepljenjem taljevine.

## 4. VERMIKULARNI LIJEV

### 4.1 Općenito o vermikularnom lijevu

Vermikularni lijev (engl. *Vermicular cast iron; Compacted graphite cast iron*) pripada skupini željeznih lijevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita (slika 4.1)



Slika 4.1. Metalografske snimke mikrostrukture vermikularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital

Naziv ovog lijeva potječe od karakterističnog vermikularnog (kompaktnog) oblika grafita koji izgleda poput “crvića” (engl. *worms*) (slika 4.1).

Prema svojstvima se vermikularni lijev može svrstati između sivog i nodularnog lijeva. U usporedbi sa sivim lijevom, vermikularni lijev ima:

- višu vlačnu i dinamičku čvrstoću, granicu razvlačenja i modul elastičnosti,
- višu žilavost i duktilnost i shodno tome višu otpornost na nastajanje pukotine i pojavu loma,
- nižu osjetljivost na oksidaciju i manji rast tijekom primjene na povišenim temperaturama,
- manju ovisnost svojstava o debljini stjenke što omogućava smanjenje mase putem smanjenja debljine stjenke odljevka.
- nižu toplinsku vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija.

U usporedbi sa nodularnim lijevom, vermikularni lijev ima:

- nižu vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, žilavost i istežanje,
- niži modul elastičnosti,
- niži koeficijent toplinske ekspanzije,
- višu toplinsku vodljivost,
- višu otpornost na toplinski umor pri vrlo brzim temperaturnim promjenama (toplinski šokovi),
- bolju dimenzijsku stabilnost pri radu na povišenim temperaturama,
- viši kapacitet prigušenja vibracija,
- bolju livljivost.

Premda je ova vrsta lijeva poznata više od 50 godina, njegova primjena je bila ograničena otežanim postupkom dobivanja, povezanog prije svega sa striktnom kontrolom proizvodnog procesa.

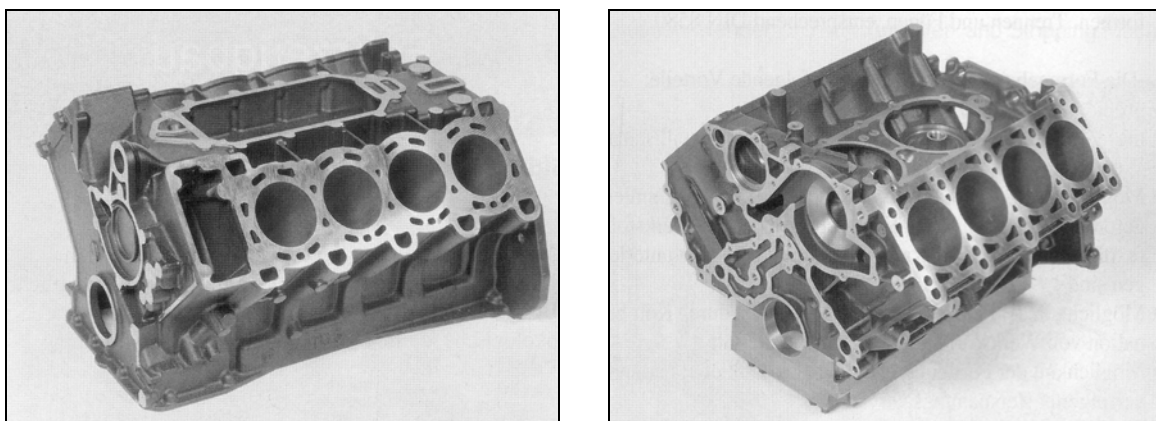
Danas postoji više postupaka proizvodnje vermikularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se vermikularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne (polazne, bazne) taljevine modifikatorima (predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični vermikularni oblik grafita. Najčešće primjenjivani modifikatori su legure na bazi magnezija uz eventualni dodatak antinodularizirajućih elemenata.

Da bi se osigurala ponovljivost proizvodnog procesa zahtijeva se striktna kontrola, odnosno primjena metoda kontrole taljevine koje omogućuju uvid u metalurško stanje taljevine (toplinska analiza).

U prošlosti, vermikularni lijev bio je rezultat pobrade taljevine magnezijem namijenjene za proizvodnju nodularnog lijeva i nije imao praktičnu primjenu. Zbog toga je vermikularni grafit smatran nepoželjnim oblikom grafita u proizvodnji nodularnog lijeva.

Tijekom povijesti uočene su prednosti vermikularnog lijeva i razvijene su metode za njegovu proizvodnju. Od tada se vermikularni lijev postepeno počeo upotrebljavati za gradnju raznih komponenti (čeličanske kokile, razni dijelovi za traktore i kamione, glave i blokovi velikih dizelskih motora).

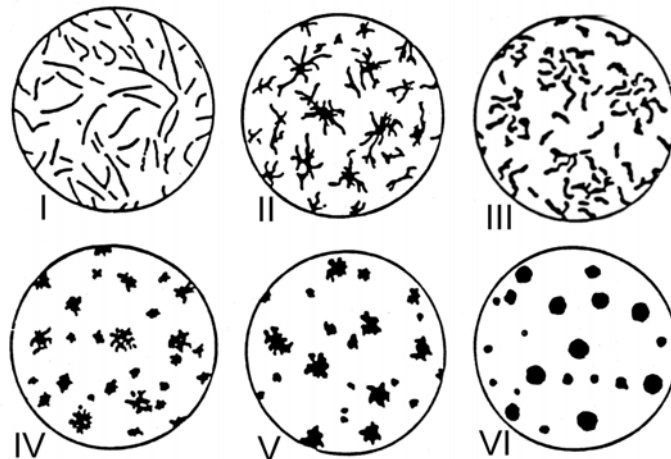
Promjene ekoloških zahtjeva tijekom 90-tih godina prošlog stoljeća rezultirale su značajnim porastom proizvodnje odljevaka od vermikularnog lijeva za potrebe automobilske industrije. Povećanje efikasnosti motora, odnosno djelotvornosti obzirom na potrošnju goriva, dovelo je do porasta interesa za toplinski djelotvornijim dizel motorima. Budući da se primjenjuju viši tlakovi u cilindrima i više temperature izgaranja goriva, zahtijeva se primjena materijala koji imaju višu toplinsku stabilnost i čvrstoću. Očito je da sivi lijev nije pogodan materijal za izgradnju ovakvih motora. Ove činjenice promovirale su vermikularni lijev, koji zbog specifičnog oblika grafita ima povoljnu kombinaciju svojstava (povišena čvrstoća, povišena toplinska vodljivost, dinamička čvrstoća, krutost, otpornost na toplinski umor, prigušenje buke i vibracija, povoljna frikciona svojstva itd.) kao materijal koji se sve više upotrebljava u automobilskoj industriji. Najčešće se primjenjuje za izradu blokova (slika 4.2) i glava motora, ispušnih grana, diskova za kočnice, turbopunjača, potisnih ploča, cilindara, klipnih prstenova itd.



Slika 4.2. Blokovi motora od vermikularnog lijeva: a) BMW 740 d, b) AUDI 3,3i-V8-TDI

## 4.2 Klasifikacija vermikularnog lijeva

Vermikularni lijev je vrsta željeznog lijeva čija je osnovna karakteristika izlučivanje grafita u tzv. vermikularnom ili kompaktnom obliku sukladno HRN EN ISO 945:2002 (“Željezni lijev – označavanje mikrostrukture grafita”). Prema ovoj normi vermikularni grafit označava se kao oblik III. Morfologija nodularnog grafita prikazana je na slici 4.3. Označivanje ovog materijala (GJV) temelji se na HRN EN 1560:1997 (“Ljevarstvo – sustav označivanja željeznih lijevova”).



Slika 4.3. Klasifikacija oblika grafita prema HRN EN ISO 945:2002.  
Oblik III – vermikularni (kompaktni) grafit

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za vermikularni lijev. U tablici 4.1 navedene su neke od njih.

Tablica 4.1. Oznake nekoliko primjenjivanih normi za vermikularni lijev

Zemlja	Oznaka	Godina izdanja
SAD	ASTM A 842-85	1985.
Njemačka	VDG W 50	2002.
Međunarodni standard (za automobilsku industriju)	SAE J 1887	2002.
Međunarodni standard	ISO 16112:2006	2006.
Kina	JB 4403-87	1987.
Rumunjska	STAS 12443-86	1986.

Pored nacionalnih i međunarodnih normi (tablica 4.1) za vermikularni lijev, postoji niz internih normi razvijenih od strane raznih proizvođača motornih vozila (BMW, Caterpillar, DAF, DaimlerChrysler, General Motors, John Deere, Opel, Rolls Royce, Volkswagen, itd.).

Od prethodno navedenih normi za vermikularni lijev, najviše se upotrebljavaju slijedeće: ASTM A 842-85 i VDG W 50.

Norma ASTM A 842-85 (engl. „*Standard Specification for Compacted Graphite Iron Castings*”) je propisana 1985. godine u SAD-u i klasificira vermikularni lijev u 5 kvaliteta (tablica 4.2) prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće (250, 300, 350, 400 i 450 N/mm<sup>2</sup>).



Tablica 4.2. Mehanička svojstva vermikularnog lijeva izmjerena na uzorcima dobivenim mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova (prema ASTM A 842-85)

Oznaka materijala	Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa min.	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , MPa min.	Izduženje A, % min.	Tvrdoća HB
Grade 250	250	175	3,0	max. 179
Grade 300	300	210	1,5	143-207
Grade 350	350	245	1,0	163-229
Grade 400	400	280	1,0	197-255
Grade 450	450	315	1,0	207-269

VDG–Merkblatt W 50 (njem. „*Gußeisen mit Vermiculargraphit*“). U osnovi radi se o preporuci, odnosno prijedlogu za normu koji je propisan 2002. godine u Njemačkoj i klasificira vermikularni ljev u 5 kvaliteta prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće (300, 350, 400, 450 i 500 N/mm<sup>2</sup>) (tablica 4.3). Očekuje se da će u budućnosti prerasti u ISO ili EN normu.

Tablica 4.3. Mehanička svojstva vermikularnog lijeva izmjerena na uzorcima dobivenim mehaničkom obradom odvojeno lijevanih probnih štapova (VDG– Merkblatt W 50)

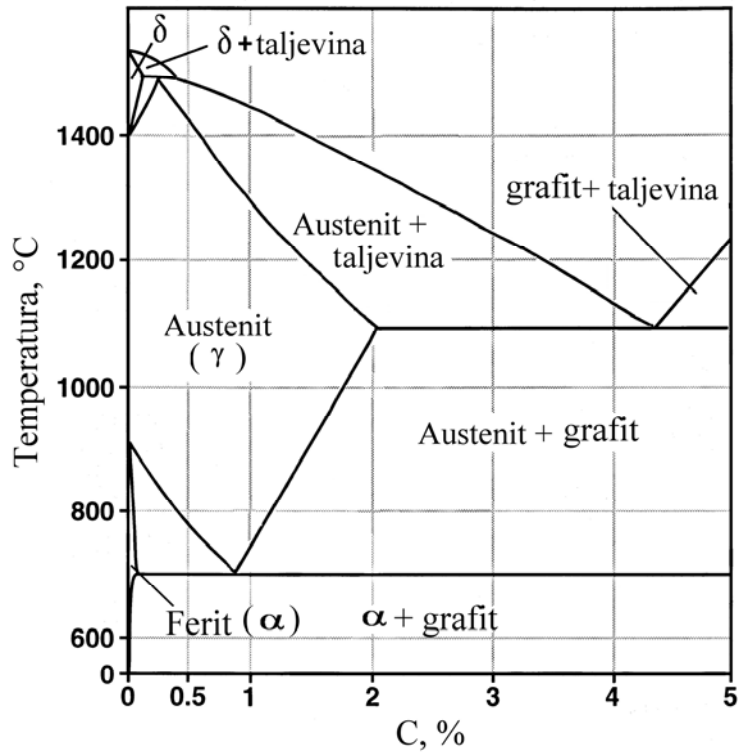
Oznaka materijala	Vlačna čvrstoća *, $R_m$ , N/mm <sup>2</sup> min.	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> min.	Izduženje A, % min.	Tvrdoća HB 30
EN-GJV-300	<b>300-375</b>	<b>220-295</b>	1,5	140-210
EN-GJV-350	<b>350-425</b>	<b>260-335</b>	1,5	160-220
EN-GJV-400	<b>400-475</b>	<b>300-375</b>	1,0	180-240
EN-GJV-450	<b>450-525</b>	<b>340-415</b>	1,0	200-250
EN-GJV-500	<b>500-575</b>	<b>380-455</b>	0,5	220-260

\* u cilju preuzimanja, vlačna čvrstoća lijevane kvalitete mora ležati između navedene vrijednosti  $n$  i  $(n + 75)$ , N/mm<sup>2</sup>.

U Hrvatskoj normizaciji za sada ne postoji norma koja propisuje klasifikaciju vermikularnog lijeva.

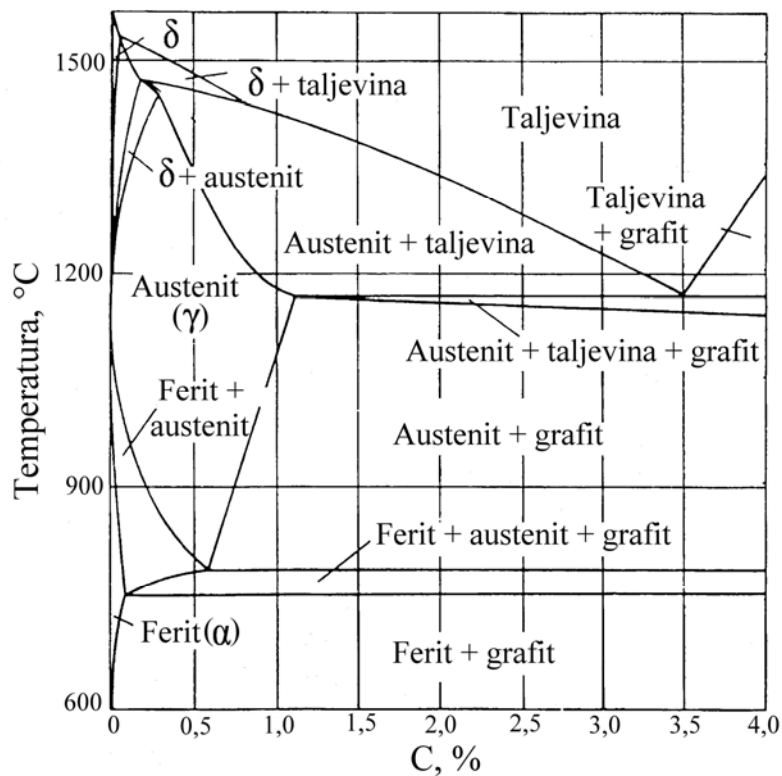
### 4.3 Skrućivanje vermikularnog lijeva

Osnova za proučavanje skrućivanja željeznih ljevova s grafitom je ravnotežni dijagram Fe-C (slika 4.4). Vermikularni ljev, kao i ostale željezne ljevove s grafitom, karakterizira postojanje eutektičke reakcije.



Slika 4.4. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C do 5,0% C

Od svih prisutnih elementa (osim ugljika) u vermikularnom lijevu, silicij ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Ravnotežni dijagram stanja Fe-C-2,5% Si

Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika. Utvrđeno je da 1,0 % silicija snižava eutektički sastav za 0,31 % ugljika. Zbog toga se uvodi koncept ekvivalenta ugljika (CE) ili stupnja zasićenja ( $S_c$ ):

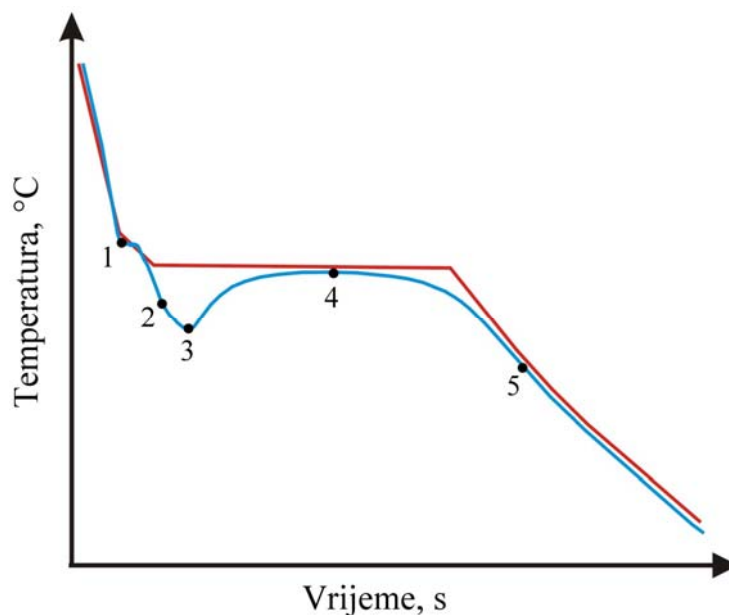
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (4.1)$$

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (4.2)$$

Kad je ekvivalent ugljika, CE, jednak 4,3, govorimo o eutektičkom sastavu. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $< 4,3$  radi se o podeutektičkom sastavu. U tom slučaju prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Ako je vrijednost ekvivalenta ugljika  $> 4,3$  govorimo o nadeutektičkom sastavu.

Kada je  $S_c = 1$  govorimo o eutektičkom sastavu, ukoliko je  $S_c < 1$  govorimo o podeutektičkom sastavu, a u slučaju  $S_c > 1$  o nadeutektičkom sastavu.

Promjene tijekom skrućivanja mogu se pratiti snimanjem krivulja hlađenja, odnosno toplinskom analizom. Promjene u načinu skrućivanja reflektiraju se kao promjene na krivulji hlađenja. Na slici 4.6 prikazana je idealna (crvena linija) i stvarna (plava linija) krivulja hlađenja podeutektičkog vermikularnog lijeva.



Slika 4.6. Shematski prikaz idealne (crvena linija) i stvarne (plava linija) krivulje hlađenja podeutektičkog vermikularnog lijeva

Kad se taljevina vermikularnog lijeva ulije u kalup, ona se kontinuirano hladi sve dok se ne dostigne likvidus temperatura  $T_L$  (točka 1, slika 4.6), kad nukleira primarni (podeutektički) austenit, koji tijekom daljeg hlađenja raste u dendritnom obliku. Veličina dendrita određena je ekvivalentom ugljika, stupnjem zasićenja i brzinom skrućivanja. Niži ekvivalent ugljika rezultira većim dendritima, što je povezano sa širim intervalom skrućivanja. Bržim hlađenjem promovira se stvaranje finijih (sitnijih) dendrita. Tijekom izlučivanja primarnog austenita višak ugljika odbacuje se u taljevinu.

Preostala taljevina nastavlja s kontinuiranim hlađenjem sve do dostizanja temperature početka eutektičkog skrućivanja  $T_{ES}$  (točka 2), gdje između dendritnih grana u taljevini obogaćenoj ugljikom započinje nukleacija grafita i stvaranje eutektika. Kod temperature  $T_{ES}$  u taljevini je dostignut eutektički sadržaj ugljika od 4,3 %. Dakle, po dostizanju eutektičke koncentracije odvija se pretvorba preostale taljevine u dvije krutine – jedna je eutektički austenit, a druga grafit. Umjesto grafita može nastati karbid  $Fe_3C$ , što ovisi o uvjetima pri skrućivanju. Karbidi imaju štetan utjecaj na svojstva i potrebno je izbjeći njihovo stvaranje.

Kod temperature  $T_{ES}$  neće se taljevina u potpunosti transformirati u dvije krute faze zbog nedostatka centara nukleacije, tj. klica u taljevini. Zbog toga temperatura taljevine nastavlja s padom (područje na krivulji hlađenja između točaka 2 i 3) sve dok broj centara s kojih se pojavljuje rast eutektika i brzina rasta ne budu takvi da toplina oslobođena skrućivanjem eutektika (latentna toplina ili entalpija skrućivanja) ne prijeđe brzinu (intenzitet) odvođenja topline od strane kalupa (točka 3 – temperatura eutektičkog pothlađenja ( $T_{EP}$ )). U biti govorimo o pothlađenju taljevine, koje predstavlja pokretačku silu nukleacije. Kod točke 3 prestaje pothlađenje i zbog povoljnih nukleacijskih uvjeta odvija se djelomično povezani rast eutektika austenit-vermikularni grafit. Dok je u kontaktu s taljevinom grafit raste u smjeru *a*-osi, a kad se okruži austenitnom ovojnicom dolazi do promjene smjera rasta (rast u smjeru *c*-osi). Rast se odvija u obliku austenit-grafit eutektičkih ćelija koje su međusobno odvojene taljevinom. Kako skrućivanje napreduje, taljevina se osiromašuje ugljikom.

Budući da se eutektičko skrućivanje odvija u temperaturnom intervalu, s napredovanjem skrućivanja mijenja se sastav nastalog austenita i taljevine. Elementi prisutni u taljevini koji segregiraju pozitivno (u taljevini) koncentriraju se tijekom skrućivanja u interćelijastim područjima koja posljednja skrućuju. Obzirom da toplina oslobođena tijekom skrućivanja eutektika premašuje toplinu odvedenu od strane kalupa, dolazi do povišenja temperature pri skrućivanju (područje od točke 3 do točke 4). Ovaj fenomen poznat je pod nazivom rekalescencija. Točka 4 označava se kao temperatura eutektičke rekalescencije ( $T_{ER}$ ).

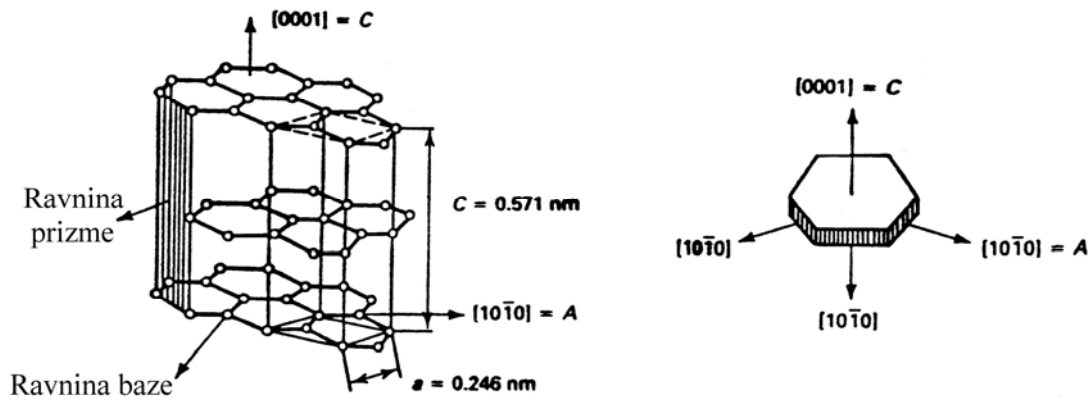
Kako se eutektičko skrućivanje bliži završetku, postepeno se smanjuje oslobađanje entalpije skrućivanja i ponovo dolazi do pada temperature (područje između točaka 4 i 5). Eutektičko skrućivanje završava pri temperaturi solidusa  $T_S$  (točka 5).

Skrucivanje vermikularnog lijeva nadeutektičkog sastava odvija se na identičan način s razlikom da je prva faza koja se izlučuje grafit u vermikularnom obliku. Kada se sadržaj ugljika u taljevini i temperatura dovoljno snize, preostala taljevina skrućuje u obliku eutektičkih ćelija.

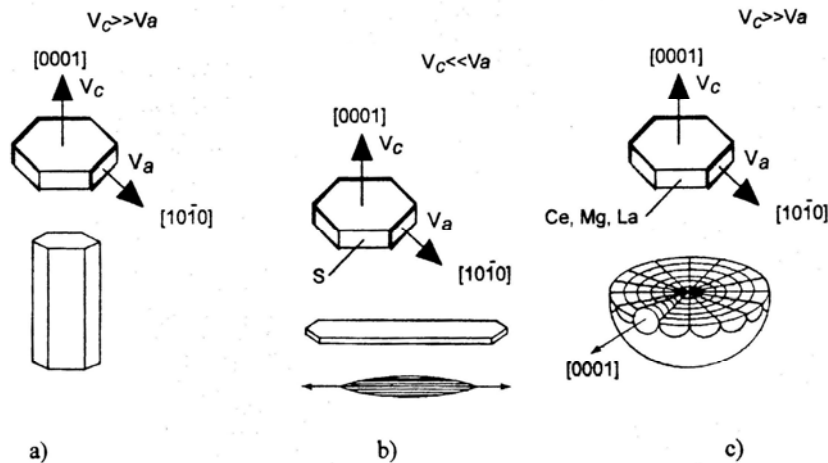
#### 4.4 Mehanizam nukleacije i rasta vermikularnog grafita

Grafit spada u kategoriju kristala s fasetiranom graničnom površinom. Kristalna rešetka grafita sastoji se od heksagonalne mreže atoma ugljika u slojevitoj konfiguraciji (slika 4.7). Površina svakog sloja stvara ravninu baze ili osnove, a rubovi sloja čine ravninu prizme. Ravnina prizme je površina s najvišom energijom na koju se preferirano adsorbiraju „nečistoće“ (sumpor, kisik).

Proces nastajanja različitih oblika grafita u željeznim ljevovima odvija se kao rezultat nukleacije i rasta. Rast kristala grafita iz taljevine u svezi je sa strukturom granične površine i kinetikom pripajanja atoma ugljika na tu površinu. Ukoliko se radi o čistoj Fe-C-Si leguri, najveća brzina rasta grafita odvija se u smjeru *c*-osi okomito na ravninu baze zbog najveće gustoće atoma, što rezultira nastajanjem ne razgranatih pojedinačnih kristala, kako prikazuje slika 4.8a.



Slika 4.7. Struktura kristala grafita



Slika 4.8. Promjena brzine rasta grafita zbog adsorpcije stranih atoma: a) bez prisutnosti nečistoća, b) u prisutnosti površinski aktivnih elemenata, kao što su sumpor i kisik, adsorbiranih na površini prizme, c) u prisutnosti nodularizirajućih elemenata (magnezij, cerij, lantan)

Nakupine nečistoća koje segregacijom na graničnu površinu smanjuju međufaznu energiju pospješuju mobilnost granične površine. Kisik i sumpor predstavljaju nečistoće koje su uvijek prisutne u željeznim ljevovima.

Kao površinski aktivni elementi, kisik i sumpor adsorbiraju se na površinu prizme (površina visoke energije) pri čemu ta površina postaje najgušće zaposjednuta atomima, što doprinosi smanjenju površinske energije i stvaranju kristalografski nefasetirane površine, odnosno stvaranju uvjeta za nesmetano priključenje atoma ugljika iz taljevine. Ovaj mehanizam “žbukanja” površine prizama kristala grafita omogućuje visoku mobilnost ove površine već pri malim pothlađenjima taljevine. U tom slučaju grafit raste u smjeru *a*-osi pripajanjem atoma ugljika iz taljevine pri čemu se debljina stvorenog listića (lamelle) ne mijenja (slika 4.8b). Rast listićavog grafita kontroliran je difuzijom atoma ugljika na graničnu površinu. Listići grafita su tijekom cijelog procesa eutektičkog skrućivanja u direktnom kontaktu s taljevinom. To pospješuje povezani eutektički rast grafitnih listića i austenita.

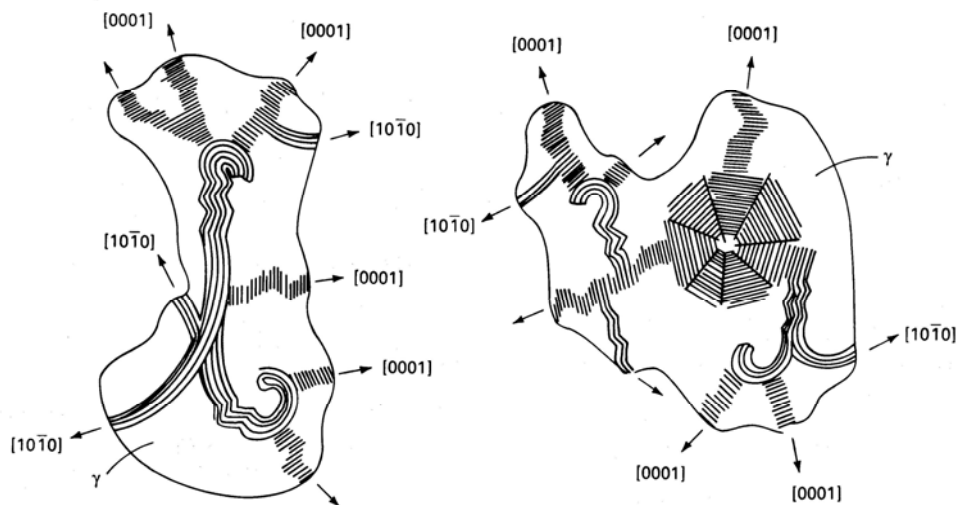
Austenit također ima kristalografski nefasetiranu, hrapavu difuznu graničnu površinu. Karakteristika tih graničnih površina je kontinuirani mehanizam rasta, što uključuje najnižu kinetičku barijeru procesa skrućivanja. Ovakva granična površina pokazuje visoku mobilnost

i za rast je potrebna mala pokretačka sila. Intenzitet rasta kristalografski nefasetirane granične površine određen je intenzitetom transporta (difuzijom) otopljenog elementa na graničnu površinu.

Elementi, kao što su magnezij, cerij, itrij, lantan i gadolinij imaju ograničenu topivost u austenitu i nisku topivost u grafitu i taljevini. Desulfurizacijski i dezoksidacijski utjecaj ovih elemenata (vezanje sumpora i kisika te stvaranje stabilnih sulfida i oksida) ograničava rast kristala grafita, jer uklanjanje površinski aktivnih elemenata doprinosi fasetiranju granične površine kruto-tekuće. Fasetirana granična površina posjeduje slabu mobilnost, zbog čega je za rast kristala potrebna veća pokretačka sila, odnosno veće pothlađenje. Kristali grafita tada rastu u smjeru *c*-osi ili u smjeru okomito na ravninu baze pri čemu iz taljevine nastaje nodularni grafit (slika 4.8c).

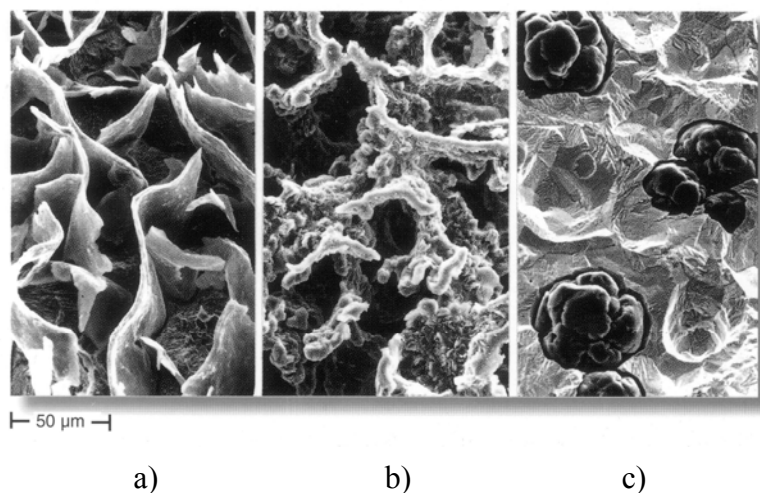
Navedena razmatranja upućuju da se morfologija izlučenog grafita može kvantitativno povezati s količinom površinski aktivnih elemenata u taljevini željeznog lijeva, odnosno rezidualnim sadržajem modificirajućih elemenata. Svakoj vrsti (obliku) grafita odgovara specifična koncentracija aktivnog sumpora i kisika u taljevini željeznog lijeva.

Mehanizam rasta vermikularnog grafita kombinacija je rasta listićavog i nodularnog grafita. Vermikularni grafit nastaje pri srednjem sadržaju kisika i sumpora u taljevini i razvija u više faza. U početnoj fazi mogu nastati listići ili nodule, ovisno o koncentraciji i raspodijeli modificirajućih elemenata. Zbog nestabilnosti rastuće granične površine kruto/tekuće, što je povezano s količinom površinski aktivnih elemenata i nehomogenom raspodjelom modificirajućih elemenata, kod daljnjeg rasta ovih grafitnih kristala mijenja se pravac rasta u smjeru *a*-osi, odnosno *c*-osi i obrnuto, slika 4.9.



Slika 4.9. Shematski prikaz nastajanja vermikularnog grafita: a) rast iz listića, b) rast deformacijom nodula

Na slici 4.10 prikazana je usporedba morfologije listićavog, vermikularnog i nodularnog grafita.



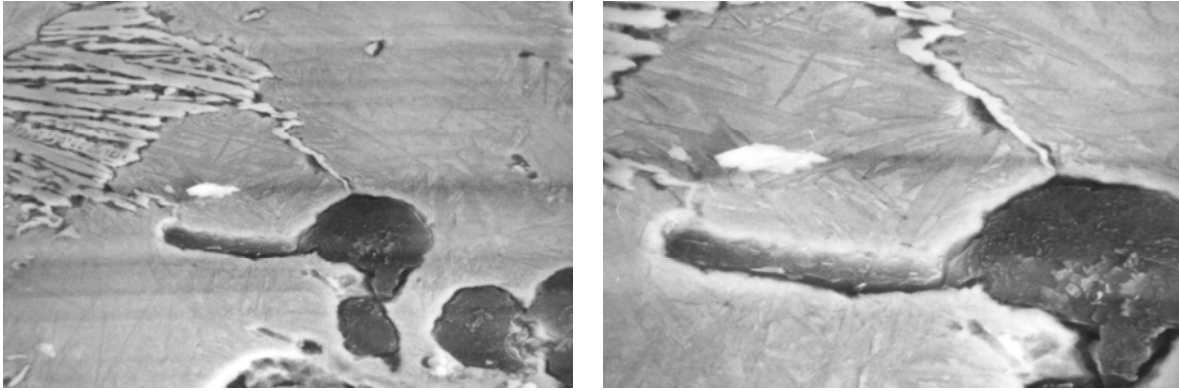
Slika 4.10. Snimke morfologije listićavog (a), vermikularnog (b) i nodularnog (c) grafita

Zbog specifičnog mehanizma rasta, vermikularni grafit za svoj rast zahtjeva veću pokretačku silu, odnosno veće pothlađenje u odnosu na listićavi i nodularni grafit. Sferoidizirajući, odnosno reaktivni elementi (magnezij, cerij itd.) uglavnom se koncentriraju na površine prizme kristala grafita. Kad je koncentracija reaktivnih elemenata dovoljna, ograničen je rast grafita duž a-osi i grafit raste u smjeru c-osi, odnosno u nodularnom obliku. Koncentracija reaktivnih elemenata varira tijekom procesa rasta grafita, odnosno tijekom rasta grafita duž c-osi dolazi do porasta granične površine između površine prizme kristala grafita i taljevine, što uzrokuje smanjenje koncentracije reaktivnih elemenata. Pri nedovoljnoj koncentraciji reaktivnih elemenata dolazi do promjene smjera rasta, odnosno grafit raste u smjeru a-osi. Pri rastu grafita duž a-osi ponovo dolazi do porasta koncentracije reaktivnih elemenata na površini prizme kristala grafita, nakon čega ponovno slijedi ograničenje rasta duž a-osi i rast u smjeru c-osi. Naizmjeničan rast u smjeru a-osi, odnosno c-osi i obrnuto rezultira specifičnom morfologijom vermikularnog grafita.

Kod vermikularnog lijeva postoji djelomično povezani eutektički rast vermikularnog grafita i austenita jer su vrhovi grana vermikularnog grafita do pred sam kraj eutektičkog skrućivanja u kontaktu s taljevinom. Kad se grafit u tijeku kasnijeg stadija skrućivanja okruži austenitnom ovojnicom, daljnji rast odvija se difuzijom atoma ugljika kroz austenitni omotač, pri čemu grafit raste u smjeru c-osi. Međutim, ovaj rast difuzijom ugljika kroz austenitnu ovojnicu manje je značajan od rasta putem direktnog kontakta s taljevinom.

Austenit također ima važnu ulogu u rastu vermikularnog grafita. Istraživanja [36] su pokazala da se vermikularni grafit stvara između dendritnih grana austenita. Nukleacija i rast grafita u taljevini znatno je olakšan u blizini austenita jer su to područja povišene koncentracije ugljika.

Vrlo važnu ulogu u stvaranju vermikularnog grafita ima 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, kao i u uskim kanalima tekućeg metala. Segregacijom navedenih antinodularizirajućih elemenata po granicama eutektičkih ćelija dolazi do sniženja točke taljenja i nastanka tekućih kanala koji povezuju grafit s taljevinom (slika 4.11).



a)

b)

Slika 4.11. Snimka segmenta zakaljenog uzorka vermikularnog lijeva pretražnim elektronskim mikroskopom u snopu sekundarnih elektrona: a) povećanje 1000x; b) povećanje 2000x. Uski kanali tekućeg metala povezuju grafit s interdendritnim ostatkom taljevine (ledeburitom)

Ako se vermikularni lijev proizvodi bez dodatka antinodularizirajućih elemenata, rezidualni sadržaj magnezij mora se kretati unutar vrlo, vrlo uskih granica od 0,007-0,015 %.

Zbog izrazito antinodularizirajućeg djelovanja titana i aluminija, lako se može objasniti njihov učinak na proširenje inače uskog koncentracijskog područja rezidualnog magnezija i dobivanje vermikularnog grafita u uvjetima u kojima bi se inače stvarao nodularni grafit. Premda dodatak titana olakšava proizvodnju vermikularnog lijeva, treba imati na umu da titan štetno djeluje na strojnu obradivost odljevaka jer nastali titanovi karbonitidi imaju visoku tvrdoću.

Iz navedenih razmatranja može se zaključiti da se kod vermikularnog lijeva zahtijeva uravnoteženje između sadržaja površinsko aktivnih elemenata (sumpor, kisik), sferoidizirajućih elemenata (magnezij, cerij, lantan) i antinodularizirajućih elemenata (titan, aluminij).

Količina dodanog cjepiva također ima značajan utjecaj jer povećanje količine cjepiva utječe na povećanje udjela nodularnog grafita. Udio nodularnog grafita u mikrostrukturi vermikularnog lijeva potrebno je svesti na što je moguće manju mjeru.

Početni sadržaj magnezija ne smije biti previsok, jer može rezultirati povišenim udjelom nodularnog grafita. Ako je početni sadržaj magnezija prenizak zbog odgora magnezija tijekom lijevanja postoji opasnost nastajanja listićavog grafita u zadnje lijevanim odljevcima.



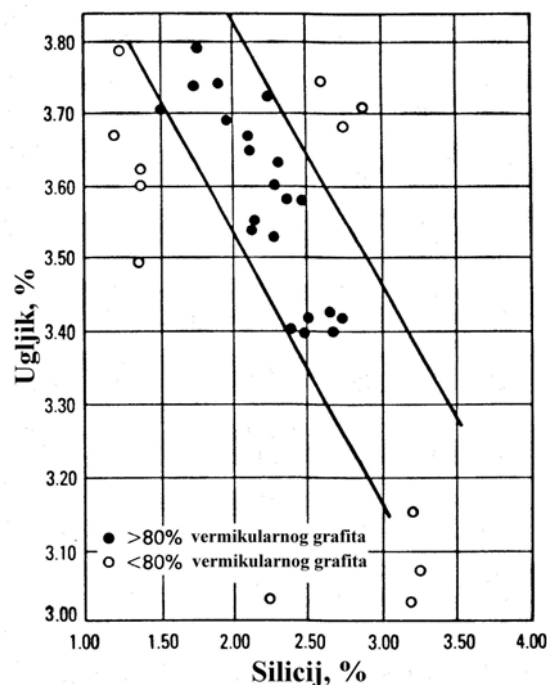
## 4.5 Faktori koji utječu na svojstva vermikularnog lijeva

### 4.5.1 Utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture

Mehanička svojstva vermikularnog lijeva ovise o njegovoj mikrostrukтури. Mikrostruktura ovisi o kemijskom sastavu, metalurškom stanju taljevine i uvjetima pri skrućivanju.

Utjecaj pojedinih elemenata kemijskog sastava na karakteristične temperature tijekom skrućivanja, stvaranje ferita, odnosno perlita te sklonost ka stvaranju grafita, odnosno karbida, detaljno je razmatran u okviru poglavlja 2.0 „Sivi lijev“ i 3.0 „Nodularni lijev“.

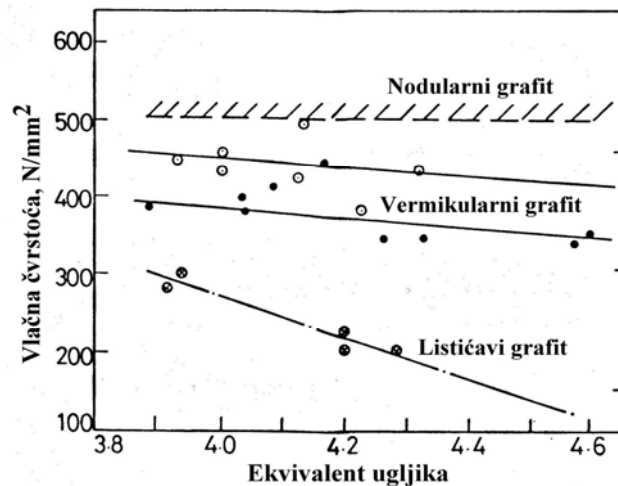
Optimalni sadržaj **ugljika** i **silicija** (ekvivalent ugljika) može se odrediti pomoću dijagrama na slici 4.12. Više vrijednosti sadržaja ugljika preferiraju se za tanje stjenke, a niže vrijednosti za deblje stjenke.



Slika 4.12. Optimalno područje ugljika i silicija za vermikularni lijev

Promjena ekvivalenta ugljika ima manji utjecaj na vlačna svojstva vermikularnog lijeva u odnosu na sivi lijev (slika 4.13). Razlog ovakvog ponašanja svakako treba tražiti u činjenici da mehanička svojstva vermikularnog lijeva prvenstveno ovise o strukturi metalne osnove. Čestice vermikularnog grafita nemaju oštre rubove (završetke) kao listićavi grafit i stoga ne djeluju kao „zarezi“ u metalnoj osnovi koji slabe metalnu osnovu, a samim tim utječu na pad mehaničkih svojstava.

Silicij pospješuje stvaranje ferita zbog čega smanjuje čvrstoću i povećava izduženje feritnog vermikularnog lijeva u lijevanom stanju putem porasta omjera ferit/perlit u lijevanom stanju. Previsok sadržaj silicija, tj. sadržaj iznad potrebnog za stvaranje pretežno feritne metalne osnove rezultira smanjenjem izduženja te porastom čvrstoće i tvrdoće feritnog vermikularnog lijeva jer silicij očvršćuje ferit. U proizvodnji perlitnog vermikularnog lijeva sadržaj silicija treba održavati nižim.



Slika 4.13. Utjecaj ekvivalenta ugljika na vrijednosti vlačne čvrstoće sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva za standardizirane uzorke promjera 30 mm

**Mangan** je element koji pospješuje stvaranje perlita i karbida. Prisustvo karbida u mikrostrukturi utječe na smanjenje vlačne čvrstoće i izduženja. U cilju izbjegavanja stvaranja karbida, sadržaj mangana potrebno je održavati što nižim (< 0,30 %).

**Fosfor** je nepoželjan element jer uzrokuje krhkost, zbog čega ga je potrebno održavati što je moguće nižim (< 0,02 %). Kao i u sivom lijevu, stvara nisko topivi fosfidni eutektik ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ) koji segregira tijekom skrućivanja po granicama ćelija kao tvrda i krhka faza. To rezultira značajnim padom duktilnosti i žilavosti vermikularnog lijeva.

Sadržaj **sumpora** u primarnoj taljevini ima kritičnu ulogu u proizvodnji vermikularnog lijeva. Obzirom da je sumpor površinski aktivan element te da se vermikularni lijev proizvodi obradom primarne taljevine predlegurom na bazi magnezija i da magnezij ima visok afinitet prema sumporu, očito je da se sadržaj sumpora mora održavati niskim. Previsok sadržaj sumpora rezultira stvaranjem (nepoželjnog) listićavog grafita (slike 4.14 i 4.15). Optimalni sadržaj sumpora prije obrade taljevine kreće se od 0,007 – 0,012 %.

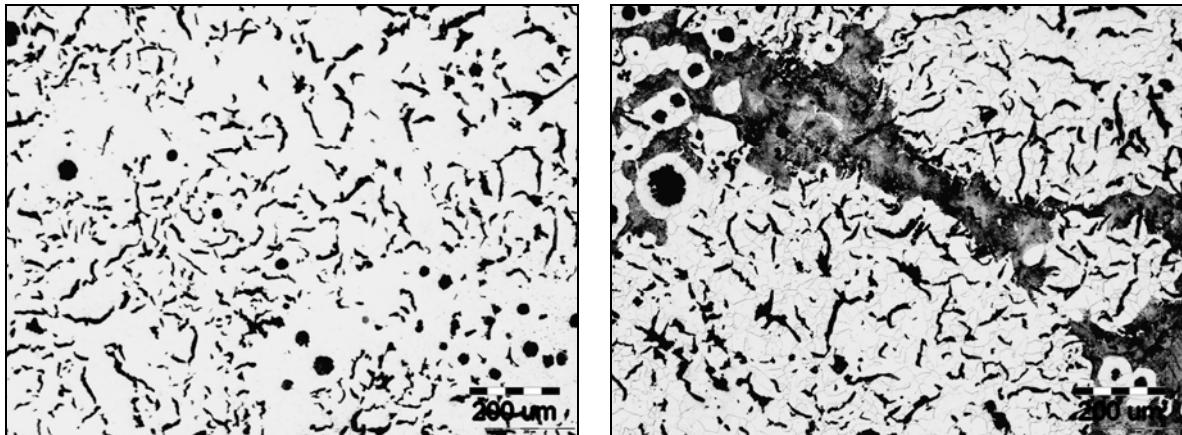


a)



b)

Slika 4.14. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka debljine 25,4 mm iz stepenaste probe, a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital. Mg = 0,006 %, S = 0,035 %



a)

b)

Slika 4.15. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka debljine 25,4 mm iz stepenaste probe: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital. Mg = 0,006 %, S = 0,009 %

Modifikacija oblika grafita, odnosno nastajanje vermikularnog grafita, najčešće se provodi obradom primarne taljevine predlegurom čiji je glavni sastojak **magnezij**. Magnezij dodan u primarnu taljevinu najprije dezoksidira (MgO) i odsumporava (MgS) taljevinu. Na taj način se smanjuje količina magnezija raspoloživog za modifikaciju oblika grafita.

Ostvareni rezidualni sadržaj magnezija ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva vermikularnog lijeva. Ciljani rezidualni sadržaj magnezija ovisi o primijenjenoj metodi proizvodnje (sa ili bez dodatka antinodularizirajućih elemenata). Općenito se može reći da nizak rezidualni sadržaj magnezija rezultira nedovoljnom modifikacijom grafita (opasnost od stvaranja listićavog grafita), dok previsok rezidualni sadržaj magnezija rezultira povišenim udjelom nodularnog grafita u mikrostrukturi. Za svaki specifični odljevak potrebno je odrediti optimalno područje rezidualnog magnezija.

Točno izbalansiran sadržaj elemenata rijetkih zemalja u predleguri za obradu na bazi magnezija ima pozitivan učinak u pogledu osjetljivosti vermikularnog lijeva na debljinu stjenke, rezultirajući manjim varijacijama u mikrostrukturi između tankih i debelih stjenki kompleksnih odljevaka.

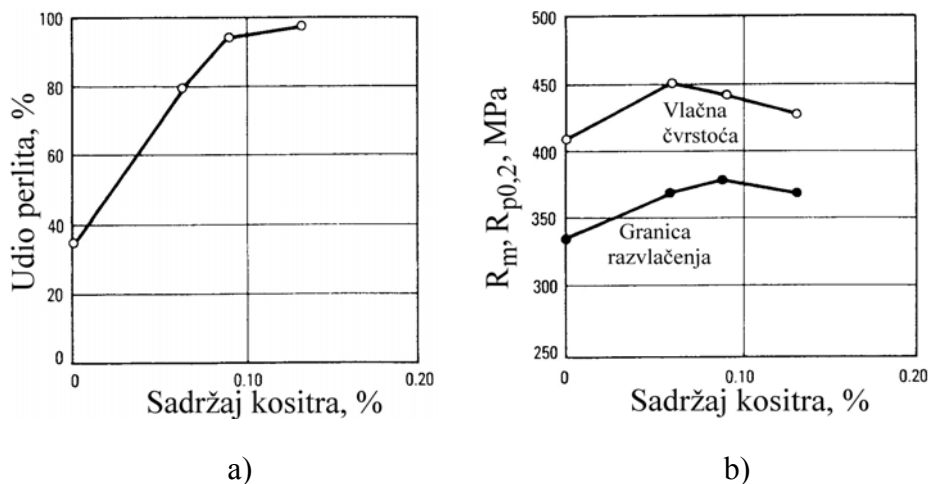
**Bakar** je grafitizirajući element koji pospješuje stvaranje perlita i ne promovira stvaranje karbida. Pri skrućivanju segregira na površinu grafitnih čestica i djeluje kao difuzijska barijera za ugljik. Na taj način onemogućuje pretvorbu austenita u ferit i grafit. U odnosu na mangan, bakar je znatno efikasniji u stvaranju perlita i ne postoji opasnost od nastanka karbida kao u slučaju dodatka mangana. Zbog promoviranja perlita, bakar povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i žilavost vermikularnog lijeva.

**Kositar** je snažan promotor perlita (slika 4.16a) i ne promovira stvaranje karbida. Mehanizam djelovanja je identičan kao kod bakra. U odnosu na bakar, kositar je znatno efikasniji u stvaranju perlita. Zbog toga su potrebni znatno manji dodaci u odnosu na bakar.

Budući da pospješuje stvaranje perlita, kositar povišuje vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje izduženje i žilavost vermikularnog lijeva.

Previsoki sadržaji kositra nisu poželjni jer nastali sloj oko čestica grafita, koji predstavlja difuzijsku barijeru za ugljik, postaje relativno debeo i krhak, što ima negativan učinak na mehanička svojstva (slika 4.16b).

**Krom** i **vanadij** su elementi s visokom sklonosti ka stvaranju karbida. Zbog toga je potrebno njihov sadržaj održavati niskim.



Slika 4.16. Utjecaj kositra na sadržaj perlita (a) te vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja (b) vermikularnog lijeva u lijevanom stanju

**Titan** promovira stvaranje vermikularnog grafita. Dodatkom titana proširuje se koncentracijsko područje rezidualnog magnezija, što omogućuje lakšu proizvodnju vermikularnog lijeva. Negativna strana dodatka titana je stvaranje vrlo tvrdih titanovih nitrida i karbonitrida čime se otežava strojna obradivost.

**Udio i distribucija ferita i perlita u metalnoj osnovi** ima vrlo značajan utjecaj na mehanička svojstva vermikularnog lijeva. Porastom udjela ferita u metalnoj osnovi postižu se viša izduženja i žilavost vermikularnog lijeva, dok porast sadržaja perlita utječe na porast vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i tvrdoće uz smanjenje izduženja i žilavosti.

Pri sličnim udjelima ferita i perlita u mikrostrukтури, porast **udjela nodularnog grafita** rezultira višim vrijednostima vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, izduženja i žilavosti te padom toplinske vodljivosti. U proizvodnji vermikularnog lijeva udio nodularnog grafita najčešće se ograničava na  $< 20\%$ .

**Prisustvo listićavog grafita** u mikrostrukтури vermikularnog lijeva utječe na značajan pad mehaničkih svojstava. Zbog izrazito negativnog utjecaja, listićavi grafit potrebno je svakako izbjeći u proizvodnji vermikularnog lijeva.

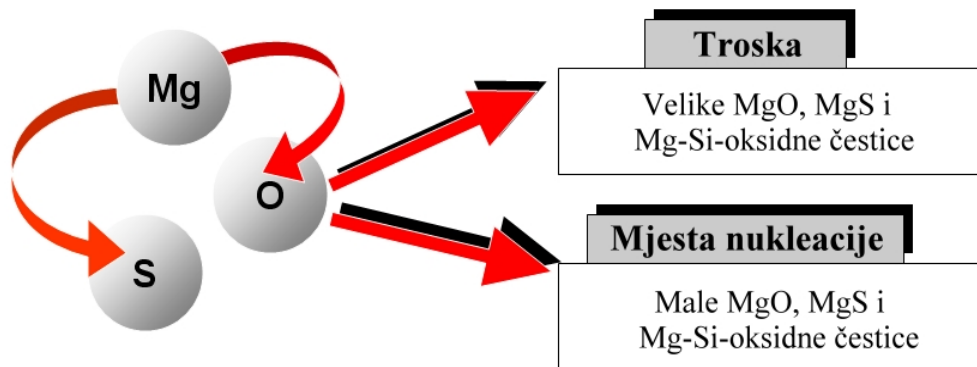
#### 4.5.2 Utjecaj metalurškog stanja taljevine

Čest je slučaj u praksi da se dvije taljevine sličnih kemijskih sastava, koje su obrađene istim postupkom obrade i cijepjenja i odlivene u slične kalupe mogu bitno razlikovati u pogledu udjela pojedine vrste grafita u mikrostrukтури, prisutnih karbida, odnosno ispravnosti. Razlog za to treba tražiti u nepoznavanju metalurškog stanja taljevine koje nije moguće detektirati spektrometrom.

Kod vermikularnog lijeva, izlučivanje grafita u vermikularnom obliku nije samo kontrolirano sadržajem magnezija. Vrlo važnu ulogu ima nukleacijsko stanje taljevine, količina otopljenog kisika i dušika, odnosno sadržaj i vrsta oksida (npr. MgO), sulfida (npr. MgS) te drugih spojeva koji se ne mogu detektirati spektrometrom, kao što su silikati (npr. Mg-silikati), nitridi (npr.  $Mg_3N_2$ ) itd.

Nukleacijsko stanje bitno utječe na količinu izlučenog grafita, a time posredno i na strukturu metalne osnove. Pri obradi taljevine magnezijem nastale čestice magnezijeva sulfida

i oksida te kompleksne Mg-Si-oksodne čestice predstavljaju potencijalna mjesta za nukleaciju grafita (slika 4.17).



Slika 4.17. Interakcija magnezija, sumpora i kisika pri obradi taljevine predlegurom na bazi magnezija

Nepoznavanje metalurškog stanja primarne taljevine pri proizvodnji vermikularnog lijeva, posebno kod metode proizvodnje bez upotrebe antinodularizirajućih elemenata (titana) rezultira različitim usvajanjem magnezija, što ima značajan utjecaj na oblik izlučenog grafita zbog vrlo uskog područja rezidualnog magnezija. Metalurško stanje taljevine ima direktan utjecaj na količinu izlučenog grafita. Iz navedenih razloga, a u cilju osiguranja reproducibilnosti procesa proizvodnje vermikularnog lijeva, potrebno je pored analize kemijskog sastava primijeniti metodu kontrole taljevine koja omogućava uvid u metalurško stanje taljevine, kao što je toplinska analiza.

Registrirani i izmjereni parametri toplinskom analizom mogu se upotrijebiti za procjenu utjecaja proizvodnih varijabli na skrućivanje, odnosno ocjenu metalurškog stanja (kvalitete) taljevine. Za svaki specifični odljevak potrebno je odrediti optimalno područje relevantnih toplinskih parametara.

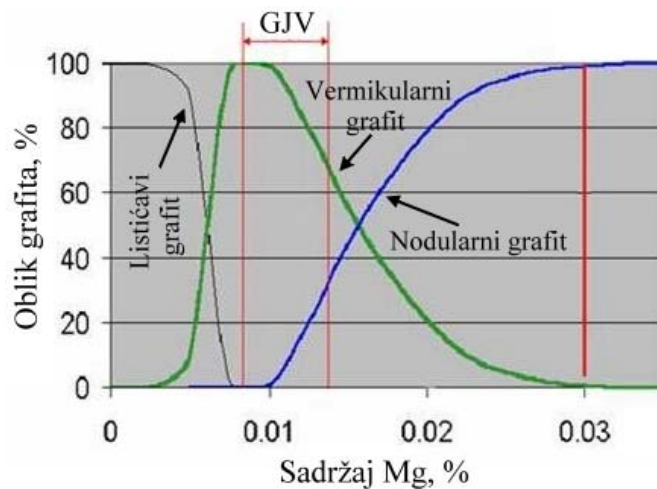
Toplinska analiza sadrži sve informacije o taljevini, samo ih je potrebno „izvući“ iz krivulja hlađenja i pravilno interpretirati. Dvije taljevine koje imaju iste toplinske parametre, odnosno krivulju hlađenja ponašati će se identično, što osigurava reproducibilnost procesa proizvodnje vermikularnog lijeva. Zbog toga se današnji sustavi kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva zasnivaju na kombinaciji analize kemijskog sastava i toplinske analize.

### 4.5.3 Vrsta i količina predlegure za obradu

Najbolje rezultate u praksi pokazale su predlegure za obradu s točno izbalansiranim sadržajem magnezija i elemenata rijetkih zemalja (RE). Elementi rijetkih zemalja smanjuju varijacije u mikrostrukturi (nodularnost) između tankih i debelih stijenki vermikularnog lijeva. Preferiraju se predlegure s manjim sadržajem magnezija (~ 3,0 %) zbog većeg i točnijeg iskorištenja magnezija povezano s burnom reakcijom pri obradi taljevine.

Ako se vermikularni lijev proizvodi metodom točnog dodatka magnezija, odnosno metodom bez titana, količina rezidualnog magnezija mora se kretati unutar vrlo uskih granica da bi se postigla kvalitetna struktura vermikularnog lijeva (maksimalni udio nodularnog grafita u mikrostrukturi ~ 20,0 %, bez listićavog grafita). Odstupanje od područja stabilnosti rezultira nastajanjem listićavog grafita (ako je prenizak sadržaj magnezija) ili nodularnog grafita (previsok sadržaj magnezija). Promjena u sadržaju magnezija od samo 0,001 % može

rezultirati pretvorbom vermikularnog u listićavi grafit. Slika 4.18 prikazuje nastanak različitih oblika grafita ovisno o rezidualnom sadržaju magnezija. Kod sadržaja magnezija od ~ 0,005 % započinje stvaranje vermikularnog grafita.



Slika 4.18. Oblici grafita ovisno o sadržaju rezidualnom sadržaju magnezija

Udio vermikularnog grafita u mikrostrukturi doseže svoj maksimum između ~ 0,008 i 0,012 % magnezija. Pri višim sadržajima magnezija stvara se sve više nodularnog grafita.

Zbog odgora magnezija tijekom lijevanja početni sadržaj magnezija mora se prilagoditi vremenu lijevanja i mora biti dovoljno visok da se prije kraja lijevanja izbjegne stvaranje listićavog grafita. Početni sadržaj magnezija ne smije biti niti preblizu gornjoj graničnoj vrijednosti područja stabilnosti da bi se izbjeglo stvaranje nodularnog grafita u tankim stjenkama. Može se zaključiti da je pri određivanju količine predlegure za obradu, pored kemijskog sastava i metalurškog stanja primarne taljevine treba uzeti u obzir i odgor magnezija tijekom transporta livnog lonca do linije za lijevanje, kao i odgor tijekom samog procesa lijevanja.

#### 4.5.4 Utjecaj procesnih parametara

Varijacije u procesnim parametrima, kao što su struktura uloška, vrijeme zadržavanja u peći, predgrijanje lonca, temperatura obrade (previsoka temperatura – nizak rezidualni magnezij), mjesto udara mlaza taljevine u loncu (izvan ili unutar komore za legure u loncu), priprema komore i količina čeličnog pokrivača, utječu na iskorištenje legure za obradu, a time i na mikrostrukturu i svojstva vermikularnog lijeva.

#### 4.5.5 Utjecaj cijepjenja

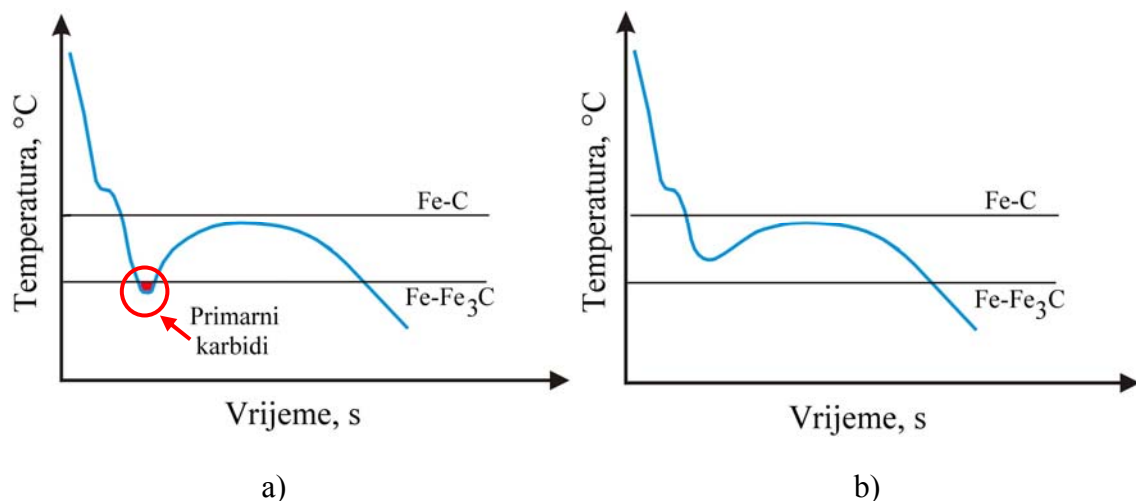
Cijepljenje predstavlja kemijsku modifikaciju taljevine kojom se kontrolira struktura i svojstva željeznog lijeva putem minimalizacije pothlađenja i povećanja broja stvorenih nukleusa tijekom skrućivanja. Cijepljenjem se ne unose u taljevinu nove čestice za nukleaciju grafita, već modificiraju postojeće da bi predstavljale aktivna mjesta za nukleaciju grafita. Cjepivo se dodaje u maloj količini u taljevinu željeznog lijeva neposredno prije ili za vrijeme

lijevanja taljevine u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom naknadnog skrućivanja.

Najpopularnije i najučinkovitije cjepivo za vermikularni lijev FeSi koji sadrži manje količine elemenata, kao što su aluminij, kalcij, barij itd.

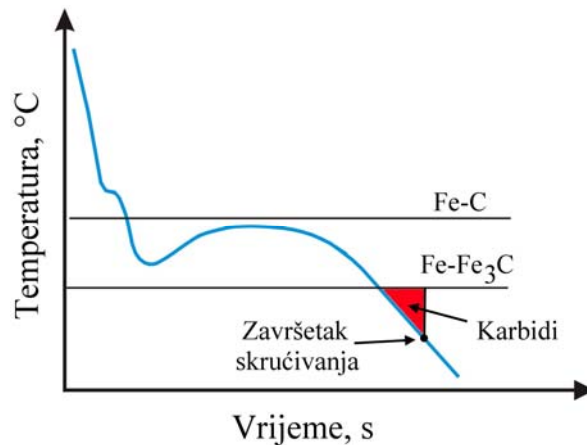
Cijepljenje je važan korak u proizvodnji vermikularnog lijeva, jer utječe na njegova mikrostruktura i mehanička svojstva. Modifikacija postojećih uključaka u vermikularnom lijevu u cilju stvaranja djelotvornih mjesta za nukleaciju grafita svakako je jedan od najvažnijih učinaka cijepljenja u vermikularnom lijevu. Veći broj pogodnih mjesta za nukleaciju grafita rezultirati će većim brojem čestica grafita u mikrostrukturi.

Stvaranje primarnih (eutektičkih) karbida (cementita, odnosno odbjela) u mikrostrukturi može se izbjeći cijepljenjem taljevine. Cijepljenjem taljevine smanjuje se pothlađenje putem stvaranja većeg broja pogodnih mjesta za nukleaciju grafita, odnosno podiže temperatura eutektičkog pothlađenja ( $T_{EP}$ ) iznad temperature metastabilnog eutektika (Fe-Fe<sub>3</sub>C), ispod koje se stvaraju karbidi. Ako temperatura taljevine tijekom eutektičkog skrućivanja padne ispod temperature skrućivanja metastabilnog eutektika doći će do stvaranja eutektičkih (primarnih) karbida, odnosno odbjela (slika 4.19a). Ukoliko se eutektičkom reakcijom oslobodi dovoljno topline, temperatura ostatka taljevine može ponovo porasti iznad temperature skrućivanja metastabilnog eutektika (slika 4.19a), čime se zaustavlja stvaranje odbjela i promovira izlučivanje grafita. U tom slučaju govorimo o meliranoj strukturi, jer je u strukturi prisutan grafit i cementit.



Slika 4.19. Shematski prikaz krivulje hlađenja vermikularnog lijeva: a) stvaranje primarnih karbida, b) bez primarnih karbida

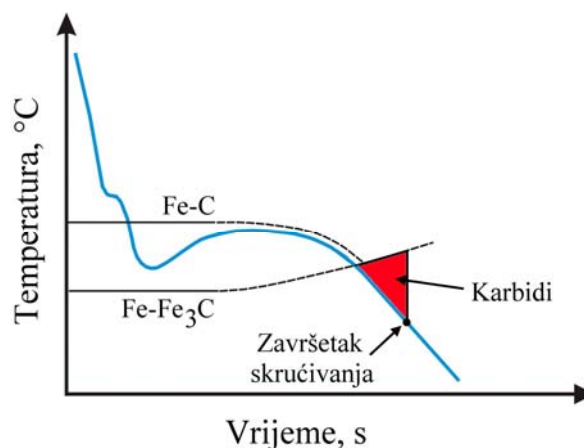
Stvaranje inverznog odbjela i interčelijastih karbida može se također spriječiti cijepljenjem taljevine. Inverzni odbjel može nastati kad je skrućivanje posljednje taljevine u kalupu praćeno lošim nukleacijskim uvjetima (uglavnom zbog slabljenja djelovanja cjepiva). Sa slike 4.20b može se vidjeti da je solidus temperatura,  $T_S$  ispod temperature metastabilnog eutektika. Cijepljenjem taljevine može se povisiti temperatura  $T_S$  i na taj način izbjeći stvaranje inverznog odbjela. Stvaranje inverznog odbjela pospješeno je segregacijom karbidotvornih elemenata u taljevinu koja posljednja skrućuje.



Slika 4.20. Shematski prikaz krivulje hlađenja vermikularnog lijeva koja ukazuje na nastanak inverznog odbjela

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

Elementi kemijskog sastava utječu na stvaranje interčelijastih karbida putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika. 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 (slika 4.21).

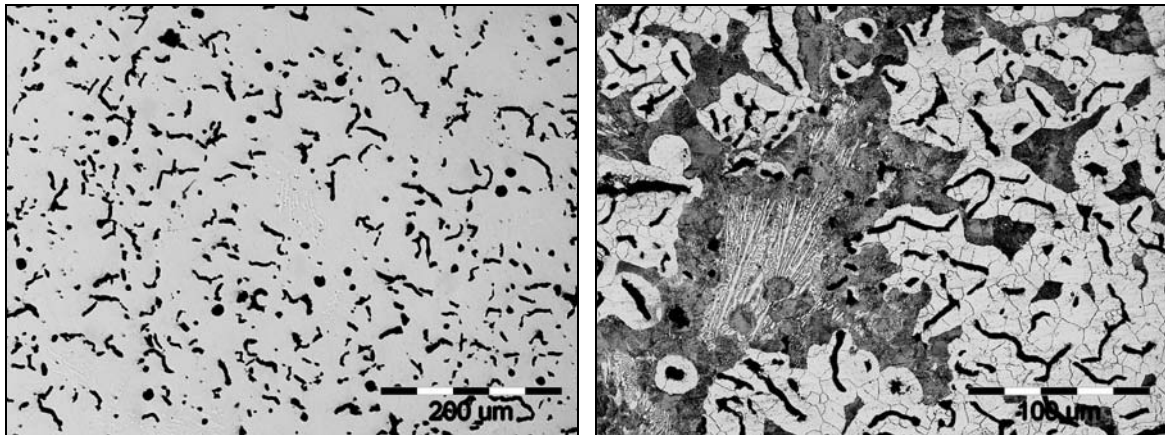


Slika 4.21. Shematski prikaz krivulje hlađenja vermikularnog lijeva koja ukazuje na nastanak interčelijastih karbida

Pravilnim cijepljenjem taljevine može se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida (slike 4.22 i 4.23) bez značajnijeg povećanja udjela nodularnog grafita.

Pri visokim brzinama hlađenja koje potpomažu stvaranje karbida (npr. tanke stjenke odljevka), kao i u prisutnosti povišene koncentracije karbidotvornih elemenata, čak i snažnim cijepljenjem teško će se izbjeći stvaranje interčelijastih karbida.

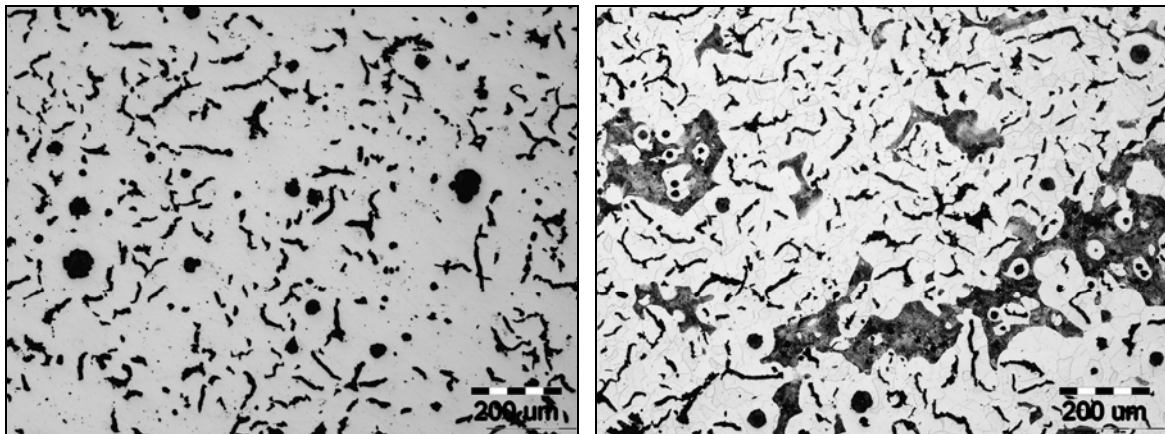




a)

b)

Slika 4.22. Mikrostruktura uzorka taljevine vermikularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital. U mikrostrukтури su prisutni karbidi (necijepljeno)



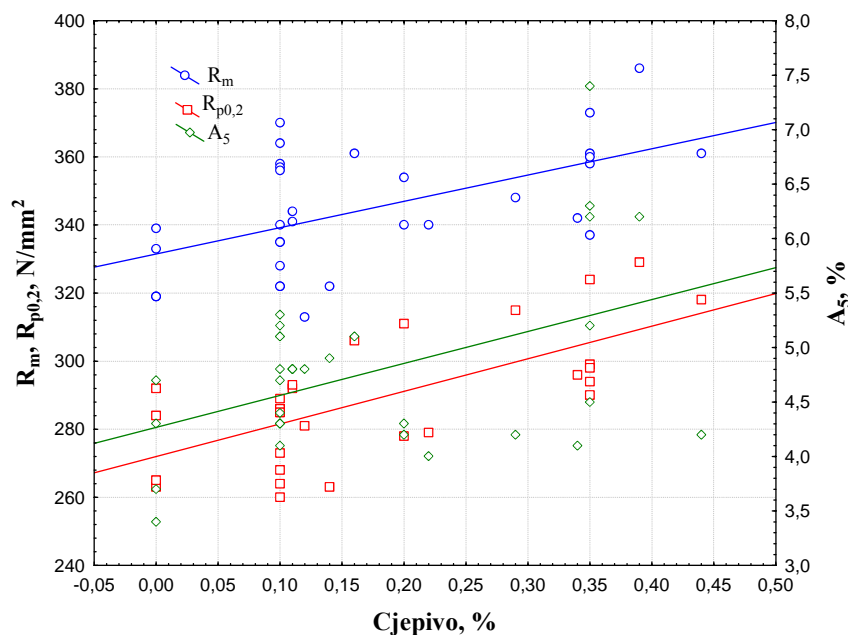
a)

b)

Slika 4.23. Mikrostruktura uzorka taljevine vermikularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital. Ista taljevina kao na slici 4.22 samo cijepljena

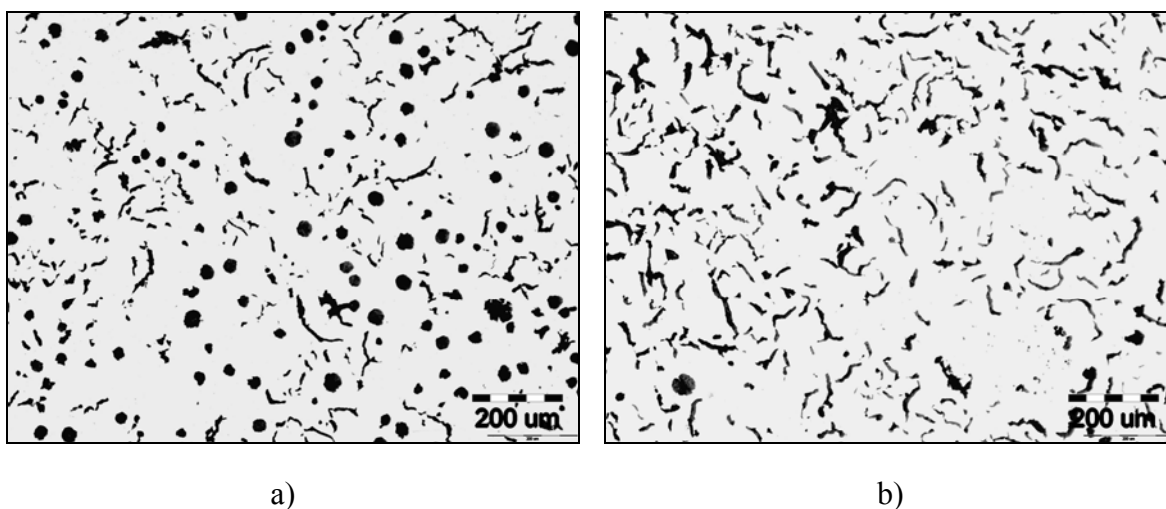
Cijepljenje utječe i na iznos rekalescencije tijekom eutektičkog skrućivanja. Dodatak cjepiva podiže temperaturu eutektičkog pothlađenja ( $T_{EP}$ ) i snižava rekalescenciju jer je u taljevini prisutno više centara nukleacije. Previsoke vrijednosti rekalescencije ukazuju na slabu nukleaciju i mogu uzrokovati nastanak oštećenja u kalupima od svježe kalupne mješavine, zbog velike volumne ekspanzije grafita koja se prvotno dešava pri skrućivanju. Gustoća grafita iznosi  $\sim 2,2 \text{ g/cm}^3$ , dok je gustoća tekućeg željeza  $\sim 6,9 \text{ g/cm}^3$ . Tijekom skrućivanja može doći do porasta volumena taljevine, ako je izlučeno dovoljno eutektičkog grafita.

Cijepljenje utječe na mikrostrukturu, a time i na mehanička svojstva vermikularnog lijeva. Cijepljenjem se poboljšava vlačna čvrstoća, granica razvlačenja i istezanja vermikularnog lijeva (slika 4.24). Razlog za to je kompaktnija i homogenija struktura koja se postiže cijepljenjem taljevine, ali i povećanje udjela nodularnog grafita (rezultira porastom mehaničkih svojstava). Pored navedenog, cijepljenjem se poboljšava homogenost strukture, strojna obradivost, te smanjuje sklonost ka stezanju.



Slika 4.24. Utjecaj količine cjepljiva na vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ), granicu razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) i istezanje ( $A_5$ ) vermikularnog lijeva

Vermikularni lijev posebno je osjetljiv na količinu dodanog cjepljiva. Već vrlo male promjene u količini dodanog cjepljiva mogu bitno povećati udio nodularnog grafita u mikrostrukтури (slika 4.25).



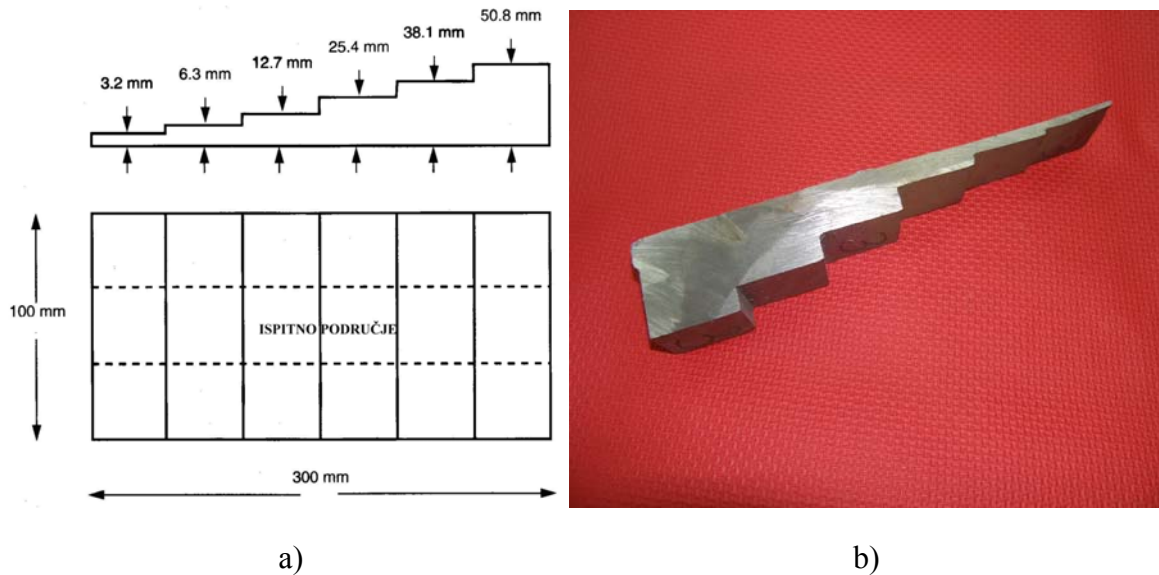
Slika 4.25. Mikrostrukture uzoraka taljevina vermikularnog lijeva izrađenih iz iste primarne taljevine s istim rezidualnim sadržajem magnezija (0,010 %) ali različitim dodatkom cjepljiva, a) 0,35 % cjepljiva, b) 0,20 % cjepljiva

Za svaki specifični odljevak (debljinu stjenke) potrebno je odrediti optimalnu količinu cjepljiva te odabrati adekvatnu metodu cijepljenja.

Cjepivo se može dodati u prijenosni lonac, lonac za lijevanje, mlaz metala tijekom punjenja kalupa ili unutar kalupa.

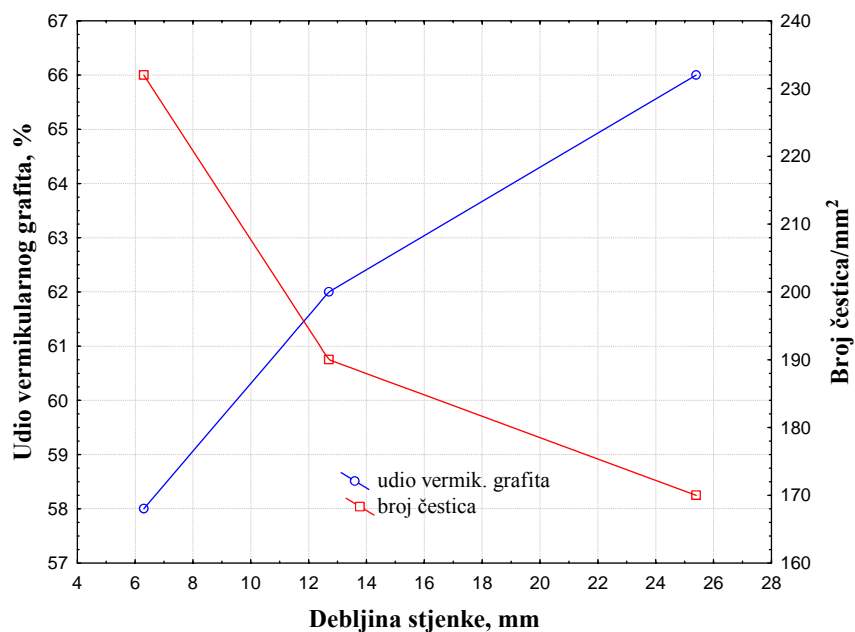
#### 4.5.6 Utjecaj brzine hlađenja (debljine stjenke)

Brzina hlađenja, odnosno debljina stjenke bitno utječe na mikrostrukturna svojstva vermikularnog lijeva. Utjecaj debljine stjenke (brzine hlađenja) na mikrostrukturu, a time i mehanička svojstva vermikularnog lijeva može se efikasno proučavati lijevanjem stepenastih proba s različitim debljinama „stepenica“ koje simuliraju različite debljine stijenki odljevka (slika 4.26).



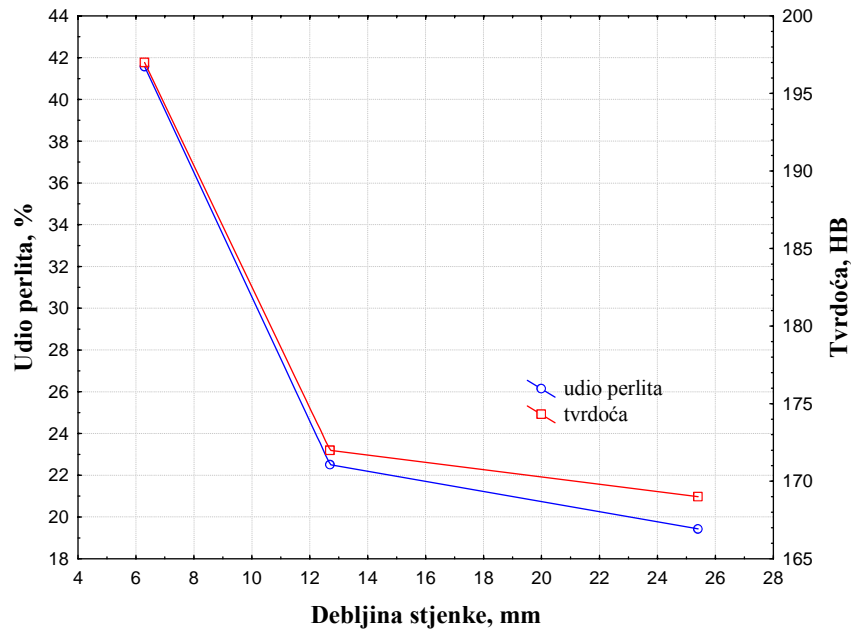
Slika 4.26. a) oblik i dimenzije tipične stepenaste probe, b) presjek odlivene stepenaste probe

Smanjenjem debljine stjenke, odnosno povećanjem brzine hlađenja, povećava se udio nodularnog grafita i broj grafitnih čestica u mikrostrukтури vermikularnog lijeva (slika 4.27).

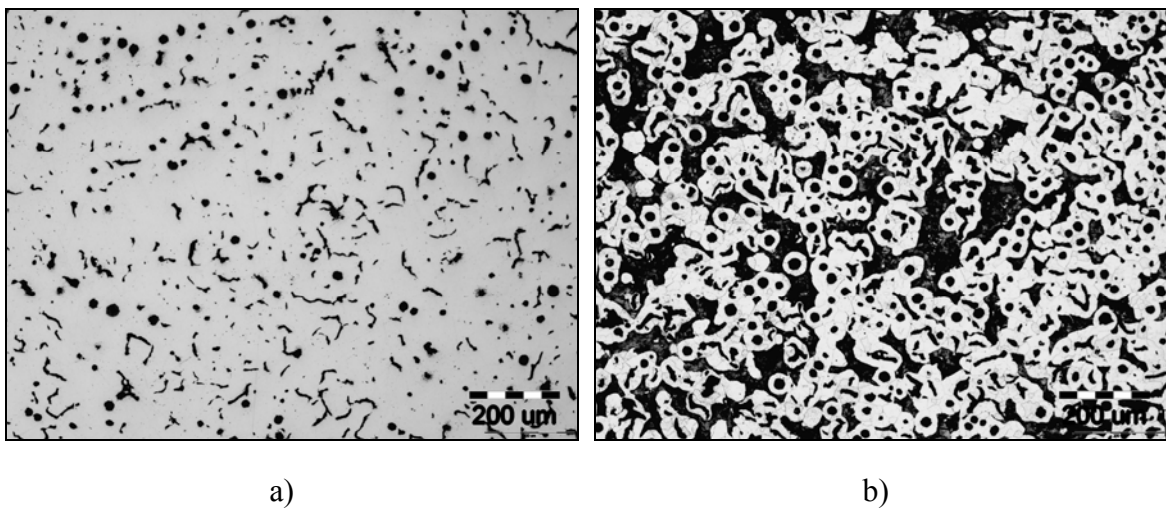


Slika 4.27. Utjecaj debljine stjenke (intenziteta hlađenja) na udio vermikularnog grafita i broj čestica grafita u mikrostrukтури vermikularnog lijeva

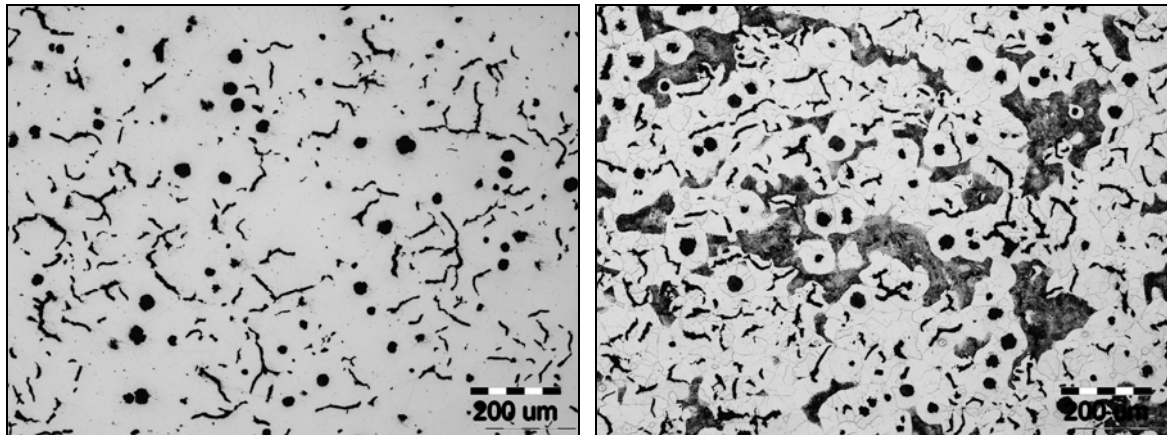
Više brzine hlađenja pogoduju stvaranju višeg udjela perlita u mikrostrukтури, a samim tim i porastom tvrdoće vermikularnog lijeva (slika 4.28). Navedene tvrdnje zorno potkrepljuju metalografske snimke ispitnih uzoraka debljine 6,3 mm, 12,7 mm i 25,4 mm dobivenih iz stepenaste probe (slike 4.29 – 4.31).



Slika 4.28. Utjecaj debljine stjenke (intenziteta hlađenja) na udio perlita u mikrostrukтури i tvrdoću vermikularnog lijeva



Slika 4.29. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka stjenke debljine 6,3 mm dobivenog iz stepenaste probe: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje.  
 $C = 3,4 \%$ ,  $Si = 2,67 \%$ ,  $Mg = 0,007 \%$

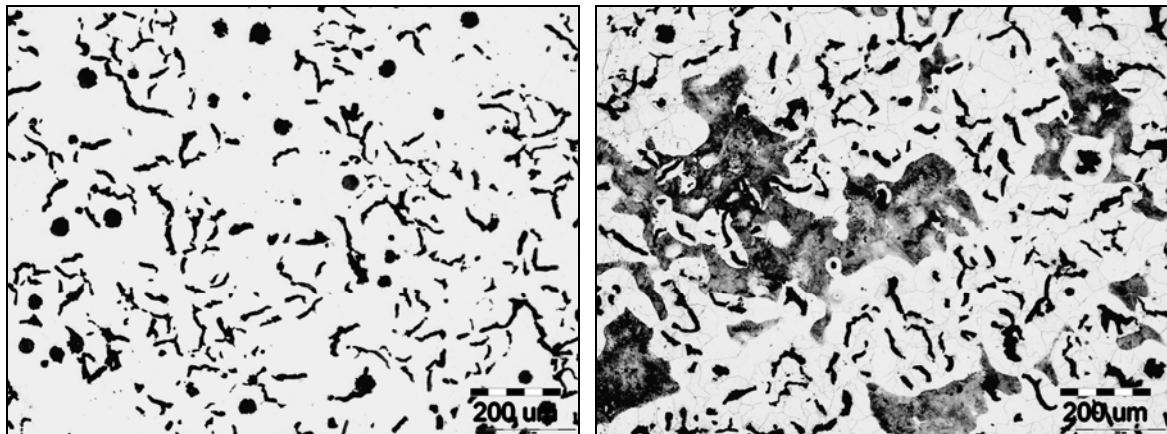


a)

b)

Slika 4.30. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka stijenke debljine 12,7 mm dobivenog iz stepenaste probe: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje.

C = 3,4 %, Si = 2,67 %, Mg = 0,007 %



a)

b)

Slika 4.31. Metalografske snimke mikrostrukture uzorka stijenke debljine 25,4 mm dobivenog iz stepenaste probe: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje.

C = 3,4 %, Si = 2,67 %, Mg = 0,007 %

#### 4.5.7 Utjecaj vremena lijevanja

Vrijeme lijevanja, odnosno vrijeme proteklo od obrade primarne taljevine do kraja lijevanja, ima značajnu ulogu u proizvodnji vermikularnog lijeva zbog odgora magnezija, odnosno smanjenja njegovog sadržaja s vremenom. Magnezij odgara brzinom od ~ 0,001 % svakih 5 minuta gledano od završetka obrade do kraja lijevanja.

Može se zaključiti da je važno ostvariti odgovarajući početni sadržaj magnezija te provesti adekvatno cijepljenje. Ukoliko bi početni sadržaj magnezija bio prenizak, moguć je nastanak listićavog grafita u zadnje lijevanim odljevcima. Početni sadržaj magnezija ne smije biti niti previsok zbog nastanka većeg udjela nodularnog grafita u mikrostrukтури. Optimalni početni sadržaj magnezija potrebno je odrediti za svaki specifični odljevak te ga prilagoditi vremenu lijevanja.

## 4.6 Proizvodnja primarne taljevine

Proizvodnja primarne taljevine obuhvaća taljenje uložnih materijala i pripremu primarne taljevine (korekcija kemijskog sastava, predpriprema (engl. *Preconditioning*), odsumporavanje), te predstavlja važan korak u proizvodnji kvalitetnih odljevaka od vermikularnog lijeva. Nakon izrade primarne taljevine slijedi obrada primarne taljevine, odnosno modifikacija oblika grafita (nastajanje vermikularnog grafita).

Primarna taljevina za proizvodnju vermikularnog lijeva izrađuje se u istim agregatima kao i taljevina sivog i nodularnog lijeva. Pri tome se upotrebljavaju isti uložni materijali, s razlikom da je za proizvodnju vermikularnog lijeva (kao i nodularnog) poželjno upotrijebiti uložne materijale s nižim sadržajem sumpora.

Ako primarna taljevina ima visok sadržaj sumpora treba je odsumporiti prije obrade.

Uložni materijali, agregati za taljenje, tijekom taljenja, odsumporavanje i predpriprema taljevine detaljno su obrađeni u okviru cjeline 2.9 „Proizvodnja taljevine sivog lijeva“.

## 4.7 Proizvodnja vermikularnog lijeva

Postoji više metoda za proizvodnju vermikularnog lijeva:

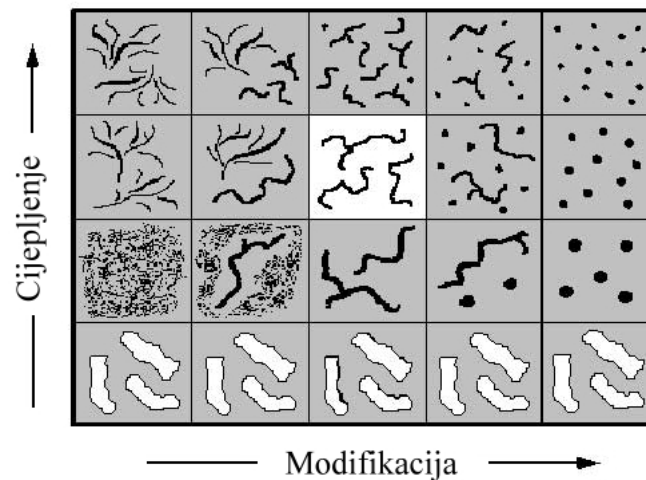
- metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija bez primjene antinodularizirajućih elemenata – metoda postizanja točnog sadržaja magnezija,
- metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz dodatak antinodularizirajućih elemenata (titan),
- metoda obrade taljevine s visokim sadržajem sumpora predlegurom magnezij-cerij uz dodatak aluminija i kalcija,
- metoda obrade taljevine predlegurama na bazi cerija,
- metoda obrade taljevine predlegurom koja sadrži dušik,
- metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz naknadni dodatak sumpora.

### 4.7.1 Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija bez primjene antinodularizirajućih elemenata – metoda postizanja točnog sadržaja magnezija

Obrada primarne taljevine s niskim sadržajem sumpora predlegurom koja sadrži magnezij najčešća je primjenjivana metoda za proizvodnju vermikularnog lijeva. Rezidualni sadržaj magnezija mora se kretati unutar vrlo uskih granica koje je potrebno odrediti za svaki proizvod zasebno. Posebna pažnja mora se posvetiti dodatku cjepiva zbog povećanja udjela nodularnog grafita u mikrostrukturi. Pravilnim dodatkom predlegure i cjepiva postiže se optimalna struktura vermikularnog grafita (slika 4.32). Odstupanje od područja stabilnosti (engl. *process window*) rezultira nastajanjem listićavog grafita (prenizak rezidualni sadržaj magnezija) ili nodularnog grafita (previsok rezidualni sadržaj magnezija).

Prema ovoj metodi, vermikularni lijev proizvodi se primjenom „sandwich“ postupka, dok je postupak obrade u kalupu (In Mould) zastupljen u manjoj mjeri. Kod „sandwich“ postupka točno određena količina predlegure koja sadrži magnezij (Fe-Si-Mg) i cjepiva (FeSi koji sadrži Al, Ba, itd.) stavlja se u komoru na dnu lonca i prekriva čeličnom strugotinom.

Kad je lonac djelomično ispunjen taljevinom, pokrovni materijal postepeno se otapa i taljevina dolazi u kontakt s predlegurom za obradu.

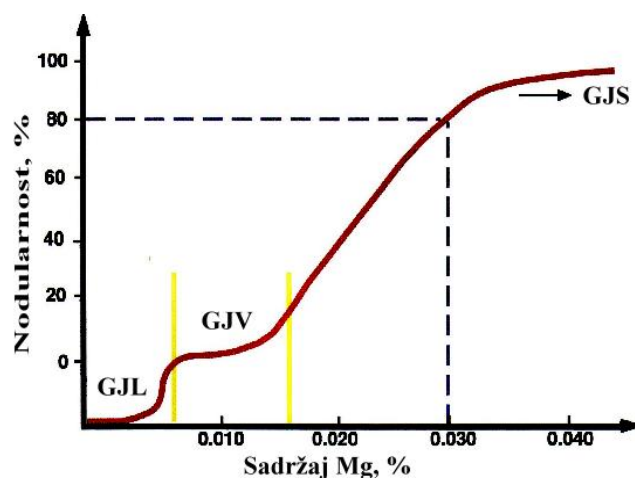


Slika 4.32. Utjecaj dodatka predlegure i cjepiva na strukturu vermikularnog grafitu

Kada taljevina dođe u kontakt s predlegurom dolazi do isparavanja magnezija jer je njegova točka isparavanja  $\sim 1090\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a temperatura taljevine  $\sim 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jedan dio magnezija otapa se u metalu, a jedan dio formira uključke kao što su MgO i MgS te magnezij-silikate. Dio para magnezija odlazi na površinu gdje se povezuje s kisikom i dušikom iz zraka te nastaje tipičan bijeli dim i troska.

Postupak obrade u kalupu (In Mould postupak) karakterizira postojanje reakcione komore unutar kalupa. U reakcionu komoru uljevnog sustava smješta se predlegura za obradu taljevine i cjevivo. Obrada taljevine odvija se u ovoj komori kada primarna taljevina protječe preko predlegure za obradu. Oblik i dimenzije reakcijske komore imaju značajan utjecaj na rezultate obrade.

Zbog vrlo uskog područja stabilnosti koje garantira zadovoljavajuću strukturu vermikularnog lijeva, metoda postizanja točnog dodatka magnezija vrlo teško se provodi u praksi bez striktno kontrole procesa. Područje stabilnosti vermikularnog grafitu egzistira iznad  $0,008\text{ }\%$  Mg (slika 4.33). Širina tog područja različita je za svaki proizvod.



Slika 4.33. Područje stabilnosti vermikularnog lijeva egzistira iznad  $\sim 0,008\text{ }\%$  Mg i odijeljeno je oštom granicom od područja sivog lijeva

Ukoliko ne postoji metoda kontrole koja omogućava uvid u metalurško stanje taljevine, neće se moći ostvariti reproducibilnost, odnosno ponovljivost proizvodnog procesa. U cilju ostvarenja reproducibilnosti procesa proizvodnje vermikularnog lijeva, ova metoda zahtijeva primjenu sustava kontrole procesa koji pored analize kemijskog sastava primjenjuje i toplinsku analizu. Sustav kontrole procesa zasnovan na toplinskoj analizi omogućava uvid u metalurško stanje primarne taljevine što je predispozicija za ostvarenje reproducibilnosti proizvodnog procesa.

#### **4.7.2 Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz dodatak antinodularizirajućih elemenata**

Poznato je da čak i vrlo mali sadržaj titana u nodularnom lijevu štetno djeluje na formiranje nodularnog grafita i pospješuju formiranje vermikularnog grafita. Taj utjecaj titana na oblik izlučenog grafita može se primijeniti pri proizvodnji vermikularnog lijeva da bi se proširilo područje stabilnosti, odnosno širina područja unutar kojeg se mora kretati rezidualni magnezij da bi se dobila zadovoljavajuća struktura vermikularnog lijeva.

Obrada primarne taljevine provodi se „sandwich“ postupkom predlegurom FeSiMgTiCe ili predlegurom koja sadrži magnezij, a titan se dodaje u uložak u obliku FeTi ili otpada koji sadrži titan. Sadržaj sumpora u primarnoj taljevini mora biti nizak, jer magnezij i cerij imaju visok afinitet prema sumporu. Metoda dopušta prilično visok rezidualni sadržaj magnezija (> 0,03 %) u kombinaciji s rezidualnim sadržajem titana od ~ 0,1 %. Vrlo važna karakteristika ove metode obrade je postizanje zadovoljavajuće strukture vermikularnog lijeva u tankim i debelim stjenkama.

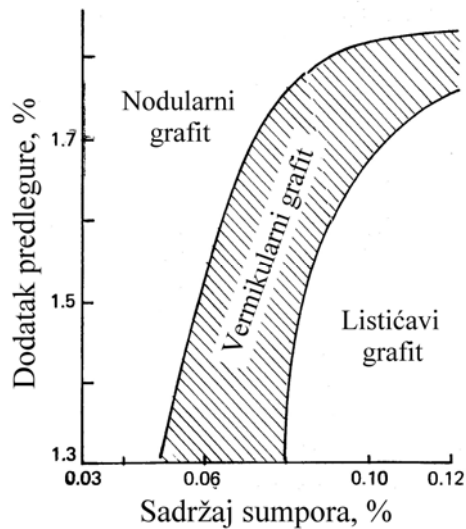
Nedostatci ove metode su: skup proces zbog visokih troškova legura titana, strojna obradivost odljevaka je znatno smanjena zbog prisustva tvrdih titanovih nitrida i karbonitrida, kontaminacija povrata titanom, što otežava proizvodnju nodularnog lijeva,

#### **4.7.3 Metoda obrade taljevine s visokim sadržajem sumpora predlegurom magnezij-cerij uz dodatak aluminija i kalcija**

Vermikularni lijev može se proizvoditi obradom taljevine sivog lijeva s visokim sadržajem sumpora (0,07 do 0,13 %) predlegurom koja sadrži magnezij i cerij uz dodatak malih količina aluminija i kalcija. Potrebit dodatak predlegure ovisi o početnom sadržaju sumpora (slika 4.34).

Metoda zahtijeva striktnu kontrolu temperature obrade, koja se mora nalaziti u intervalu između 1475 – 1510 °C. Zbog odgora magnezija, previsoke temperature obrade rezultiraju podobradom taljevine (prenizak rezidualni sadržaj magnezija), dok preniske temperature obrade uzrokuju povišen udio nodularnog grafita. Brojne sulfidne čestice (sulfidi magnezija, kalcija ili cerija) koje potječu od visokog sadržaja sumpora predstavljaju potencijalna mjesta nukleacije grafita, što smanjuje pothlađenje taljevine i sklonost ka nastajanju karbida zbog čega se ne zahtijeva cijepljene.

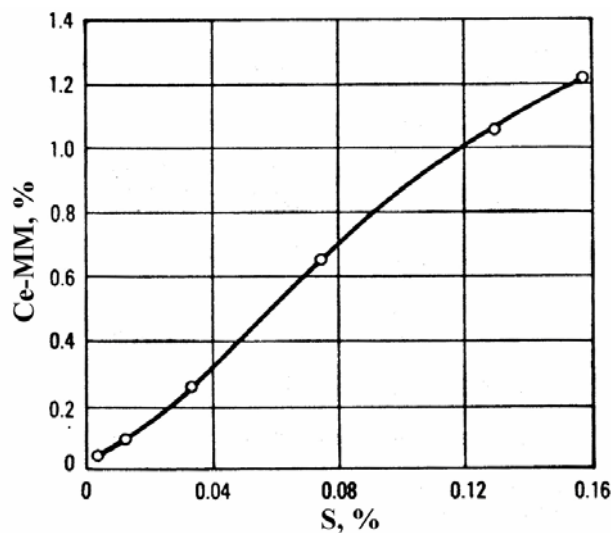




Slika 4.34. Dodatak predlegure ovisno o sadržaju sumpora u primarnoj taljevini

#### 4.7.4 Metoda obrade taljevine predlegurama na bazi cerija

Ova metoda proizvodnje vermikularnog lijeva bazira se na dodatku specijalne legure na bazi cerija (Ce mischmetal -  $Ce_{MM}$ ) u taljevinu s niskim sadržajem sumpora. Da bi se postigla zadovoljavajuća struktura vermikularnog grafita, dodatak predlegure za obradu taljevine mora biti točno doziran obzirom na količinu sumpora (slika 4.35) i debljinu stjenke. Rezidualni sadržaj cerija trebao bi se kretati u granicama od 0,02 - 0,05 %.



Slika 4.35. Dodatak predlegure  $Ce_{MM}$  ovisno o sadržaju sumpora u primarnoj taljevini

Premda obrada taljevine legurom  $Ce_{MM}$  nudi niz prednosti pred obradom taljevine legurom koja sadrži magnezij (sporije slabljenje djelovanja, nema oslobađanja dima tijekom obrade taljevine) ne upotrebljava se u većem opsegu pri serijskoj proizvodnji odljevaka zbog sklonosti cerija ka stvaranju odbjela (stvaranju karbida) u tankim stjenkama. Naknadno cijepljenje ne osigurava zadovoljavajuće rezultate jer rezultira povećanjem udjela nodularnog

grafita. Alternativni pristup predstavlja primjena predlegure Fe-Si-Ce-Ca. Dok je cerij sferoidizirajući element i promotor karbida, kalcij je sferoidizirajući element i promotor grafita. Obradom taljevine ovom predlegurom smanjuje se osjetljivost na debljinu stjenke i sklonost ka stvaranju nodularnog grafita u tankim stjenkama.

#### **4.7.5 Metoda obrade taljevine predlegurom koja sadrži dušik**

Obradom taljevine predlegurom Fe-Mn-N (80,0 % mangana, 4,0 % dušika) može se dobiti vermikularni grafit uz rezidualni sadržaj dušika od ~ 0,015 %. Nedostaci ove metode očituju se u otežanom dobivanju jednolične strukture u odljevcima s različitim debljinama stjenke (umjerena nodularnost u tankim stjenkama i visoka nodularnost u debelim stjenkama) i pojavi grešaka povezanih s visokim sadržajem dušika (poroznost, pukotine). Djelotvornost dušika u taljevini može se kontrolirati dodatkom točno određenih količina titana i aluminija.

Ova metoda proizvodnje vermikularnog lijeva vrlo rijetko se primjenjuje u praksi jer je vođenje ovakvog procesa otežano.

#### **4.7.6 Metoda obrade taljevine predlegurom na bazi magnezija uz naknadni dodatak sumpora**

Vermikularni lijev može se proizvoditi “denodularizacijom” taljevina nodularnog lijeva dodatkom sumpora. Osnovna karakteristika ove metode je proizvodnja vermikularnog lijeva bez dodatka antinodularizirajućih elemenata te mogućnost proizvodnje iz iste primarne taljevine kao za nodularni lijev uz upotrebu istih tehnika obrade taljevine i legura na bazi magnezija.

Postupak proizvodnje vermikularnog lijeva odvija se na isti način kao za nodularni lijev, s tim da se količina predlegure za obradu (najčešće FeSiMg) smanji za 20,0 – 40,0 % u odnosu na nodularni lijev. Pri prelijevanju taljevine iz lonca za obradu u livni lonac, taljevina se cijepi legurom Fe-Si-Ca uz dodatak legure Fe-S ovisno o ciljanom sadržaju magnezija, vremenu zadržavanja taljevine prije lijevanja i debljini stjenke odljevka. Kontrola pretvorbe nodularnog u vermikularni grafit provodi se toplinskom analizom pri čemu je ključni faktor stupanj pothlađenja taljevine.

### **4.8 Kontrola procesa proizvodnje vermikularnog lijeva**

Proizvodnja vermikularnog lijeva klasičnim postupcima ne osigurava reproducibilnost proizvodnog procesa. Zahtjeva se primjena metoda kontrole taljevine koje omogućavaju uvid u metalurško stanje taljevine.

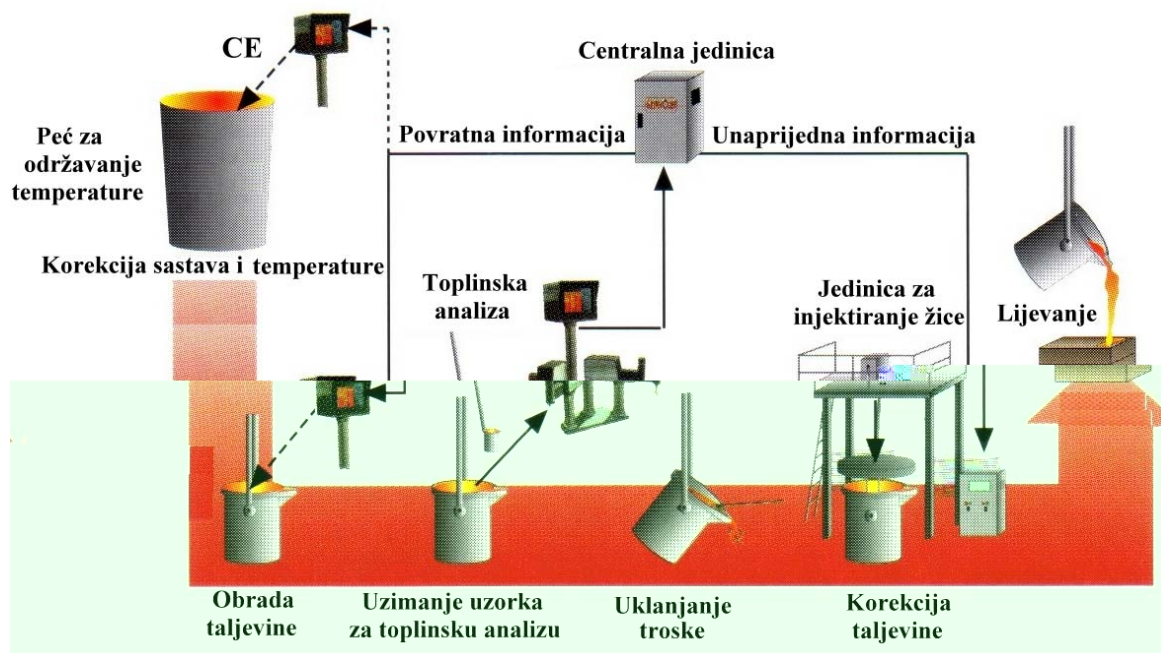
Metode kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva trebaju se bazirati, pored kemijske analize i mjerenja temperature, na toplinskoj analizi i/ili mjerenju aktiviteta kisika u taljevini. Toplinska analiza pruža najpotpuniji uvid u metalurško stanje taljevine i može se smatrati “metalurškim otiskom prsta” taljevine.

#### 4.8.1 Sustav kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva baziran na toplinskoj analizi

Na osnovi toplinske analize razvijeno je nekoliko pouzdanih sustava kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva, odnosno postupaka koji se uspješno komercijalno primjenjuju i osiguravaju reproducibilnost proizvodnog procesa. To su: SinterCast<sup>®</sup> postupak ili postupak obrade u dva koraka te PQ-CGI<sup>®</sup> (engl. *Prime Quality Compacted Graphite Iron*) ili postupak obrade u jednom koraku. Navedeni postupci odnose se na proizvodnju vermikularnog lijeva metodom točnog dodatka magnezija.

##### 4.8.1.1 Postupak obrade u dva koraka

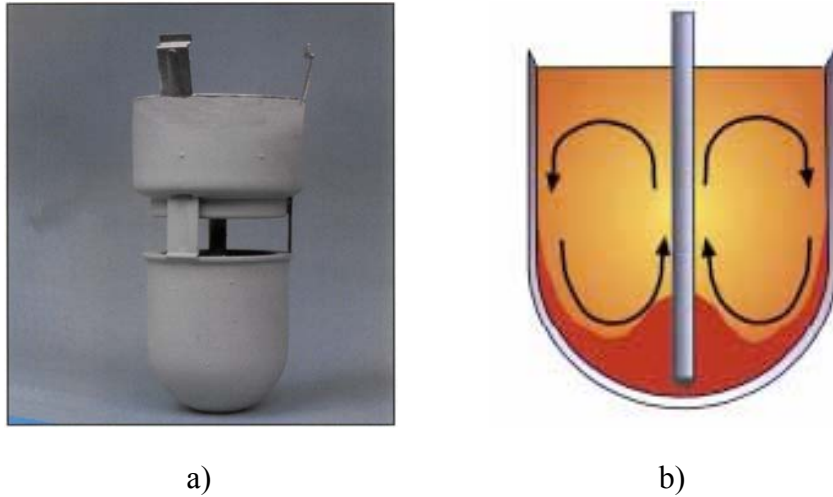
Jedan od prvih pouzdanih postupaka za proizvodnju vermikularnog lijeva koji posjeduje sustav kontrole i osigurava ponovljivost postupka je SinterCast<sup>®</sup> postupak, a razvio ga je prof. L. Bäckerud. Postupak je shematski prikazan na slici 4.36.



Slika 4.36. Shematski prikaz postupka obrade u dva koraka (SinterCast<sup>®</sup> postupak)

SinterCast<sup>®</sup> postupak primjenjuje toplinsku analizu za određivanje potrebnih metalurških parametara za obradu taljevine, odnosno potrebit dodatak predlegure i cjepiva. Primarna taljevina se nakon podešavanja kemijskog sastava obrađuje u loncu „sandwich“ postupkom predlegurom na bazi magnezija proporcionalno sadržaju sumpora, potom cijepi i provodi toplinska analiza specijalno razvijenim sustavom za toplinsku analizu.

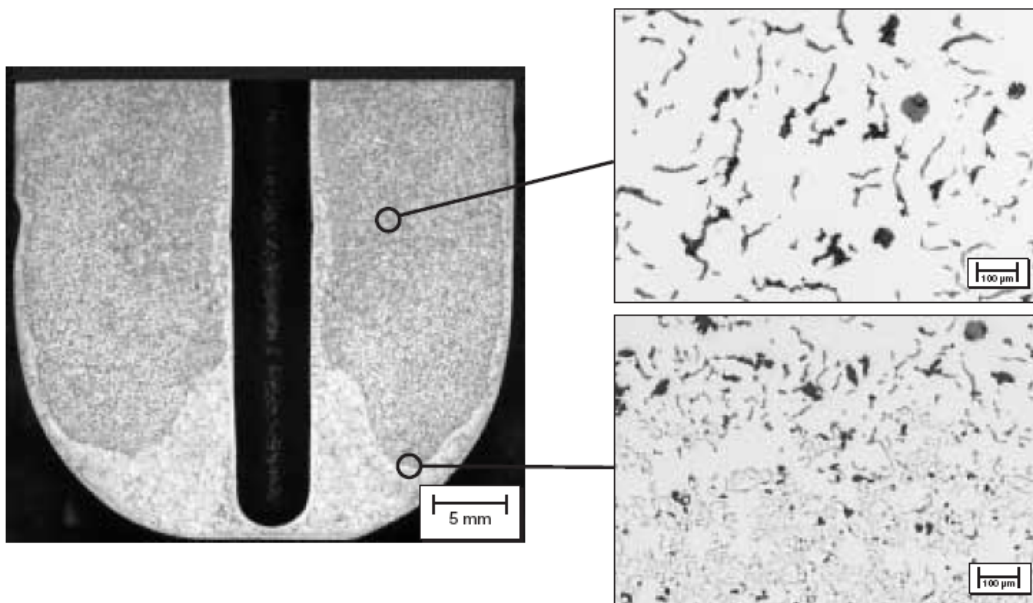
Toplinska analiza provodi se uranjanjem u taljevinu posebno patentiranog lončića za uzorkovanje (SinterCast<sup>®</sup> proba) (slika 4.37a). Masa uzorka taljevine iznosi ~ 200 g. SinterCast<sup>®</sup> proba sadrži dva termoelementa smještena u zaštitnu čeličnu cijev, što omogućava njihovu upotrebu do 200 puta. Jedan termoelement lociran je centru ispitnog uzorka, a drugi na dnu.



Slika 4.37. a) SinterCast<sup>®</sup> proba, b) toplinska strujanja u uzorku taljevine

SinterCast<sup>®</sup> proba izrađena je od čeličnog lima i sadrži dvije stjenke jednako razmaknute po čitavoj visini probe da bi se smanjili gubici topline. Tijekom uranjanja u taljevinu, koje traje ~ 3 sekunde, stjenke probe zagriju se na temperaturu okolne taljevine.

Unutarnje stjenke SinterCast<sup>®</sup> probe obložene su tankim slojem reaktivne prevlake koja reagira s aktivnim magnezijem u taljevini. Sastav reaktivne prevlake podešen je tako da je sadržaj magnezija na dnu uzorka manji za 0,003 % nego u centru uzorka, što dobro simulira odgor magnezija za vrijeme lijevanja (lijevanje obično traje ~ 10 - 15 min.; gubitak magnezija 0,001 %/5 min.) [61]. Zbog sferičnog oblika dna probe u uzorku taljevine dolazi do konvekcijskog strujanja (slika 4.37b) koje promovira reakciju između reaktivne prevlake i aktivnog magnezija u taljevini. Uslijed toga, dio taljevine koji je reagirao s reaktivnom prevlakom skuplja se na dnu probe. To znači da je centralno smješteni termoelement okružen neizreagiranom taljevinom, dok je termoelement lociran na dnu okružen izreagiranom taljevinom (slika 4.38), odnosno centralno smješteni termoelement indicira skrućivanje na početku lijevanja, dok termoelement lociran na dnu simulira skrućivanje na kraju lijevanja.



Slika 4.38. Sumarni efekt reaktivne prevlake i konvekcijskog strujanja simulira odgor magnezija na dnu probe

Ako je početni sadržaj magnezija u taljevini blizu nivoa potrebnog za prijelaz vermikularnog u sivi lijev, sloj taljevine uz stjenke probe skrtnut će kao sivi lijev, odnosno termoelement smješten na dnu probe registrirati će krivulju hlađenja koja odgovara krivulji hlađenja sivog lijeva. Ako je početni sadržaj magnezija dovoljno visok da se tijekom lijevanja spriječi stvaranje listićavog grafita, termoelement na dnu probe registrirat će krivulju hlađenja koja odgovara krivulji hlađenja vermikularnog lijeva.

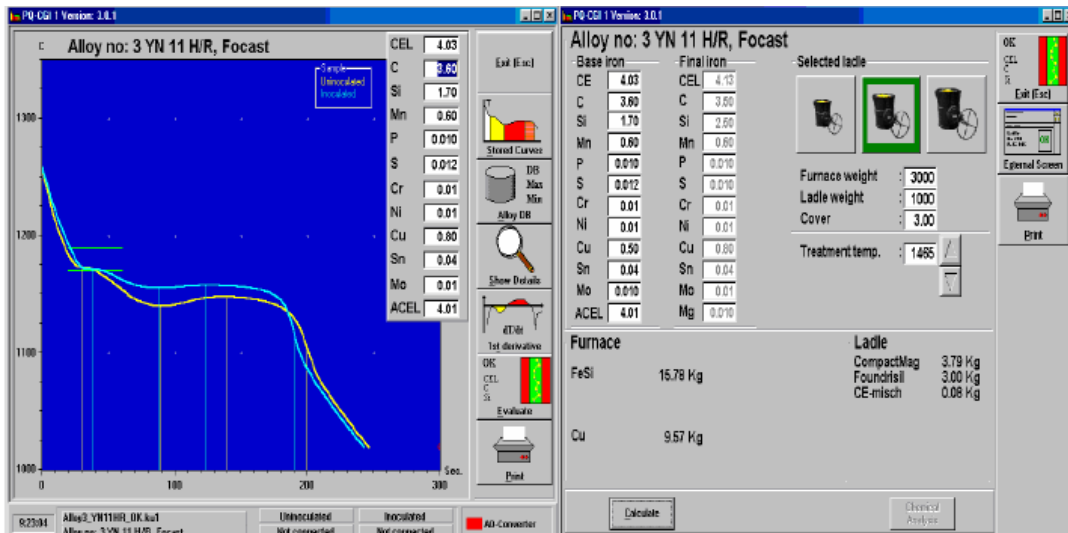
Na osnovi ovako dobivenih podataka toplinskom analizom specijalno razvijeni programski paket, odnosno sustav kontrole određuje potrebnu korekciju sadržaja magnezija i cjepiva, koja se provodi injektiranjem žice u taljevinu (slika 4.36), da bi polazni sadržaj magnezija u taljevini bio dovoljno visok da se i nakon smanjenja sadržaja za 0,003 % zbog odgora tijekom lijevanja izbjegne stvaranje listićavog grafita. Nakon korekcije provodi se ponovo toplinska analiza, čiji rezultati manje služe za detekciju uspješnosti obrade a više kao povratna veza unutar sustava učenja. Na prekomjernu obradu sustav reagira indikacijom potrebnog vremena za smanjenje djelovanja sredstva za obradu. Da bi se osigurao što veći udio vermikularnog grafita u strukturi, sustav se mora konfigurirati za svaki tip odljevka i svaku ljevaonicu. Pravilno konfiguriran sustav omogućuje proizvodnju odljevaka s udjelom nodularnog grafita od ~ 20 % i eliminira stvaranje listićavog grafita. Postupak sa ovakvim sustavom kontrole je potvrđen u praksi i primjenjuje se za industrijsku proizvodnju odljevaka kao što su blokovi i glave motora.

Nedostatak ovog postupka je vrijeme potrebno za analizu koje iznosi ~ 4 – 6 min, što može dovesti do problema s logistikom i rezultirati neproduktivnim vremenom na automatskim linijama za izradu kalupa.

#### **4.8.1.2 Postupak obrade u jednom koraku**

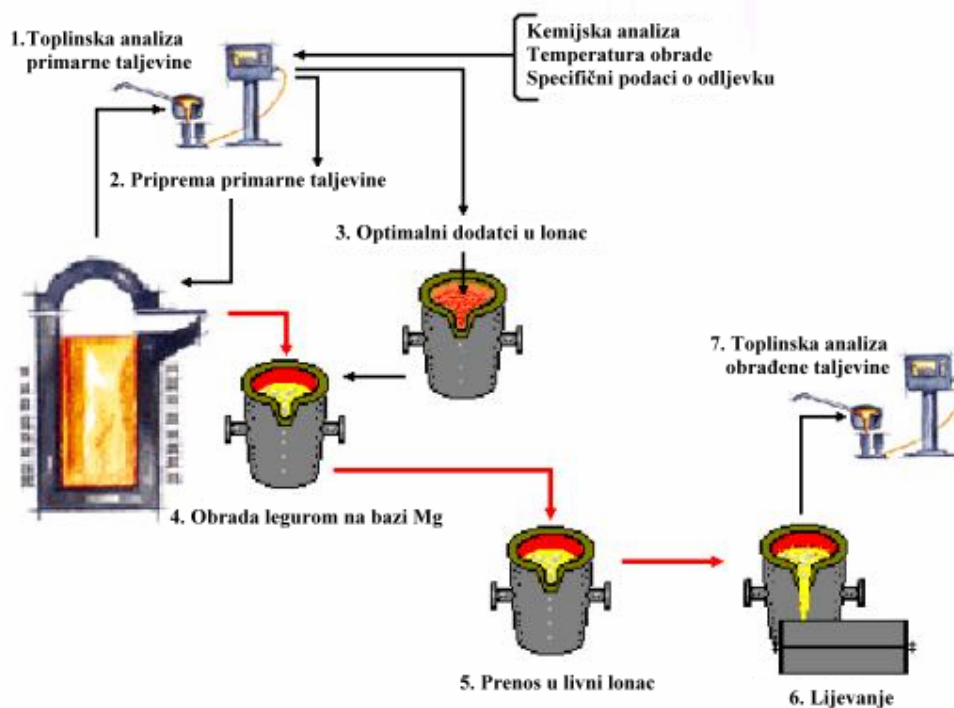
U cilju provjere i optimizacije postupka taljenja i obrade taljevine, specijalno za vermikularni lijev firma NovaCast iz Švedske razvila je sustav kontrole baziran na toplinskoj analizi i metodama umjetne inteligencije poznat pod nazivom PQ-CGI<sup>®</sup> (engl. *Prime Quality Compacted Graphite Iron*).

Toplinska analiza provodi se istovremeno na dva uzorka primarne taljevine lijevana u standardizirane Quik-cup<sup>®</sup> lončice koji sadrže termoelement, s tim da se u jednom lončiću nalazi dezoksidant. Baza podataka u sustavu kontrole sadrži sve granične vrijednosti za primarnu i obrađenu taljevinu i mora se podesiti za svaki tip odljevka. Posebna baza podataka sadrži podatke o primjenjivanim legurama, iskorištenju legura itd. Dobivene podatke toplinskom analizom, koji uključuju ukupan sadržaj kisika u taljevini (slobodni i vezani), ekvivalent ugljika, nukleacijsko stanje taljevine, temperaturu obrade i druga relevantna termodinamička svojstva u kombinaciji s kemijskom analizom, PQ-CGI<sup>®</sup> sustav kontrole baziran na ekspertnom sustavu (zasnovan na umjetnoj inteligenciji) analizira i određuje potrebit dodatak legura za podešavanje primarne taljevine sukladno zadanim specifikacijama (predpriprema taljevine), a potom potrebit dodatak predlegure za obradu taljevine na bazi magnezija i cjepiva da bi se da bi se postigle zahtijevane specifikacije za odljevak koji se proizvodi (slika 4.39). Može se reći da je PQ-CGI<sup>®</sup> sustav kontrole baziran na pažljivoj metalurškoj pripremi primarne taljevine.

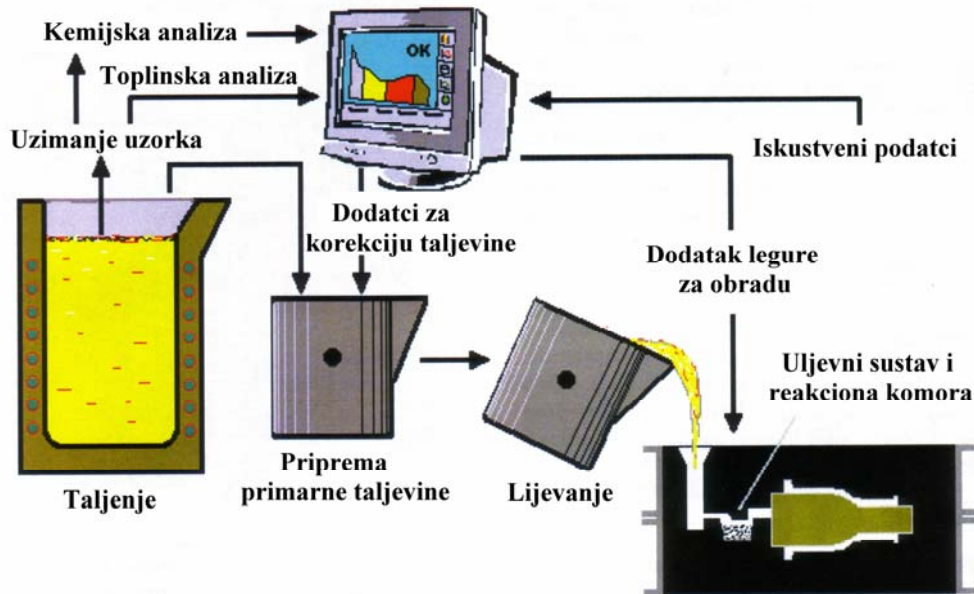


Slika 4.39. Primjer analize taljevine PQ-CGI® sustavom kontrole

PQ-CGI® sustav kontrole primjenjuje se za proizvodnju vermikularnog lijeva „sandwich“ (slika 4.40) i In Mould postupkom (slika 4.41).



Slika 4.40. Shematski prikaz postupka proizvodnje vermikularnog lijeva u jednom koraku (obrada taljevine „sandwich“ postupkom)



Slika 4.41. PQ-CGI In Mould postupak proizvodnje vermikularnog lijeva

In-Mould postupak zasnovan je na smještanju reakcione komore u svaki kalup. Predlegura se smješta u reakcionu komoru koja je povezana s uljevnim sustavom. U uljevni sustav ulijeva se primarna taljevina. Kad taljevina prelazi preko legure u reakcionoj komori dolazi do otapanja legure za obradu i usvajanja magnezija. Obrada je dakle unutar kalupa, otkud i ime In Mould.

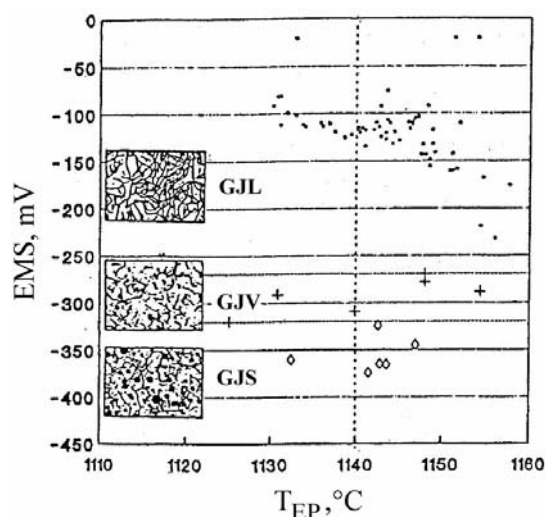
Ovakav postupak proizvodnje vermikularnog lijeva osigurava visok i konzistentan udio vermikularnog grafita u mikrostrukturi uz eliminaciju gubitka magnezija i varijacije u cijepljenju. Prema prethodno navedenom, rizik za greške kao što su uključci troske, karbidi, mikrostezanja, varijacije u obliku grafita i metalnoj osnovi je minimaliziran.

Kombinacija toplinske analize taljevine i metoda umjetne inteligencije omogućuje izgradnju sustava kontrole koji je sposoban, pored određivanja potrebnih dodataka za pripremu primarne taljevine te količine predlegure i cjepiva, predvidjeti nastanak različitih grešaka lijevanja te predložiti korektivne mjere u cilju eliminacije grešaka. Pravilno konfiguriran sustav sposoban je predvidjeti fizikalna svojstva odljevaka.

#### 4.8.2 Sustav kontrole procesa proizvodnje vermikularnog lijeva baziran na toplinskoj analizi i mjerenju aktiviteta kisika u taljevini

Kombinacijom toplinske analize i mjerenja aktiviteta kisika u taljevini (odnosno elektromotorne sile, EMS) može se procijeniti oblik grafita, odnosno može se kontrolirati obrada taljevine i cijepljenje.

Jedna od karakterističnih točaka na krivulji hlađenja vermikularnog lijeva je  $T_{EP}$  (temperatura eutektičkog pothlađenja), koja je znatno niža u odnosu na  $T_{EP}$  sivog, odnosno nodularnog lijeva. Za ocjenu obrade i cijepljenja taljevine potrebno je konstruirati dijagram elektromotorna sila - temperatura eutektičkog pothlađenja ( $EMS-T_{EP}$ ). Na tako konstruiranom dijagramu dobivaju se područja stabilnosti za svaku vrstu lijeva (slika 4.42).



Slika 4.42. Dijagram EMS –  $T_{EP}$  dobiven na osnovi toplinske analize i mjerenja kisikovom sondom. Mogu se jasno uočiti odijeljena područja za sivi, vermikularni i nodularni lijev

Ukoliko mjerna točka leži izvan karakterističnog područja za pojedinu vrstu lijeva, može se očekivati stvaranje drugih oblika grafita. Za svaki postupak obrade potrebno je odrediti optimalno područje unutar kojeg se stvara vermikularni grafit.

Kod vermikularnog lijeva utvrđeno je da se optimalni sadržaj kisika u primarnoj taljevini treba kretati u granicama od 50 – 80 ppm. Više vrijednosti (izvan navedenog intervala) pogoduju stvaranju listićavog grafita, dok niži sadržaji kisika rezultiraju stvaranjem nodularnog grafita.

Izmjerene temperature  $T_{EP}$  ispod 1140 °C ukazuju na jako pothlađenje i s time na slabo cijepljenje koje ima za posljedicu sklonost taljevine ka bijelom skrućivanju.

## 4.9 Svojstva nodularnog lijeva

Mehanička svojstva vermikularnog lijeva leže između mehaničkih svojstava sivog (GJL) i nodularnog lijeva (GJS) (tablica 4.4). U osnovi, vermikularni lijev predstavlja svojevrsni kompromis između sivog i nodularnog lijeva, jer su njegova mehanička svojstva bliža nodularnom lijevu, a fizikalna svojstva (toplinska vodljivost itd.) kao i svojstva kod povišenih temperatura (otpornost na toplinski umor, toplinski udar itd.) bliža sivom lijevu.

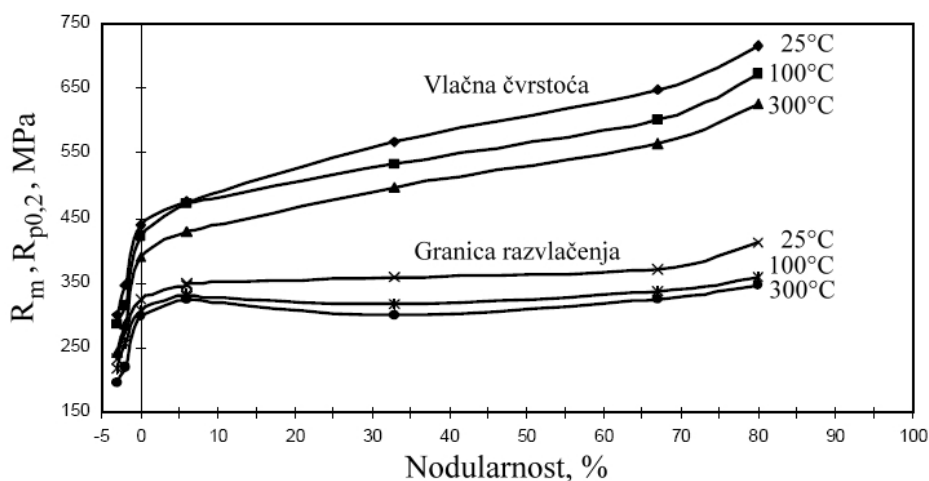
Tablica 4.4. Usporedba mehaničkih svojstava sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva

Vrsta lijeva	Metalna osnova	Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlač., MPa	Tvrdoća, HB	Izduženje, %	Modul elastič. GPa	Dinamička čvrstoća, MPa
GJL	perlitna	200 - 270	115 - 210	175 - 230	0 - 1	105 - 115	95 - 110
GJV	feritna	330 - 410	240 - 305	130 - 190	5 - 10	130 - 150	155 - 185
	peritna	420 - 580	345 - 415	200 - 250	2 - 5	130 - 155	190 - 225
GJS	feritna	400 - 600	285 - 315	140 - 200	15 - 25	155 - 156	185 - 210
	perlitna	600 - 700	375 - 482	240 - 300	3 - 10	160 - 170	245 - 290



Mehanička svojstva vermikularnog lijeva određena su njegovom mikrostrukturom, odnosno oblikom, raspodjelom i količinom izlučenog grafita, strukturom metalne osnove te prisutnošću ostalih mikrostrukturnih konstituenata (npr. Karbidi, fosfidni eutektik itd.). Ovisno o strukturi metalne osnove, te prisutnosti ostalih oblika grafita (nodularni, listićavi itd.) vlačna čvrstoća vermikularnog lijeva može biti dvostruko veća od vlačne čvrstoće sivog lijeva (vidi tablicu 4.4).

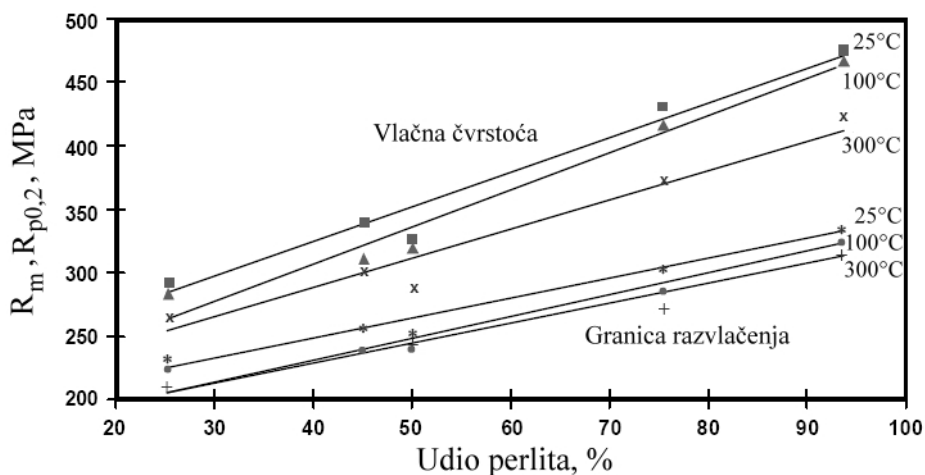
Porast vlačne čvrstoće vermikularnog lijeva u odnosu na sivi lijev povezan je direktno s morfologijom grafita. Povećanje udjela nodularnog grafita u mikrostrukтури rezultira porastom vlačne čvrstoće i granice razvlačenja vermikularnog lijeva (slika 4.43). Međutim, porast udjela nodularnog grafita ima negativan utjecaj na toplinsku vodljivost vermikularnog lijeva.



Slika 4.43. Ovisnost vlačne čvrstoće i granice razvlačenja perlitnog vermikularnog lijeva u ovisnosti o udjelu nodularnog grafita i temperaturi

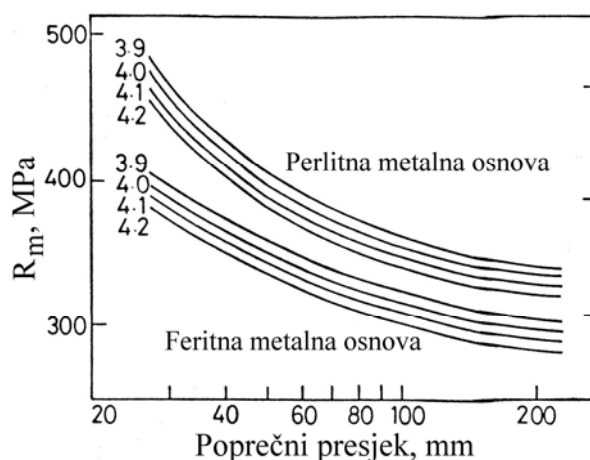
Prisustvo listićavog grafita čak i u vrlo malim količinama rezultira ostrim i naglim padom vlačnih svojstava vermikularnog lijeva.

Metalna osnova ima značajan utjecaj na mehanička svojstva vermikularnog lijeva. Kod istog udjela vermikularnog grafita u mikrostrukтури, viši udio perlita u strukturi rezultira višom vlačnom čvrstoćom i granicom razvlačenja (slika 4.44).

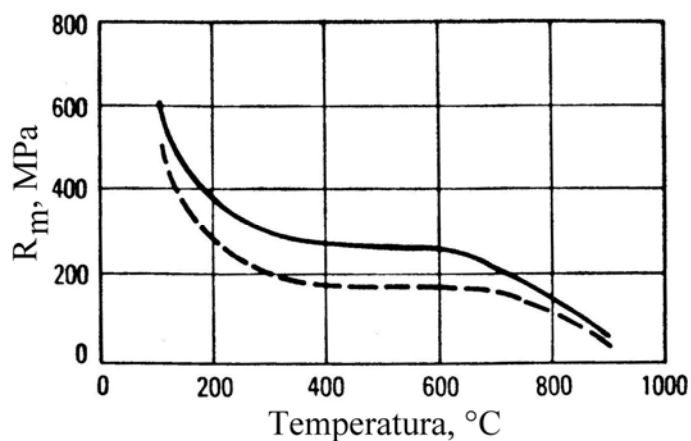


Slika 4.44. Ovisnost vlačne čvrstoće i granice razvlačenja vermikularnog lijeva (udio nodularnog grafita od 0 – 10 %) u ovisnosti o udjelu perlita i temperaturi

Čvrstoća vermikularnog lijeva smanjuje se s povećanjem debljine stjenke (slika 4.45) i temperature (slika 4.46). Osjetljivost vlačne čvrstoće na debljinu stjenke je značajno niža kod vermikularnog lijeva nego kod sivog lijeva.



Slika 4.45. Utjecaj poprečnog presjeka i ekvivalenta ugljika na vlačnu čvrstoću vermikularnog lijeva s feritnom i perlitnom metalnom osnovom



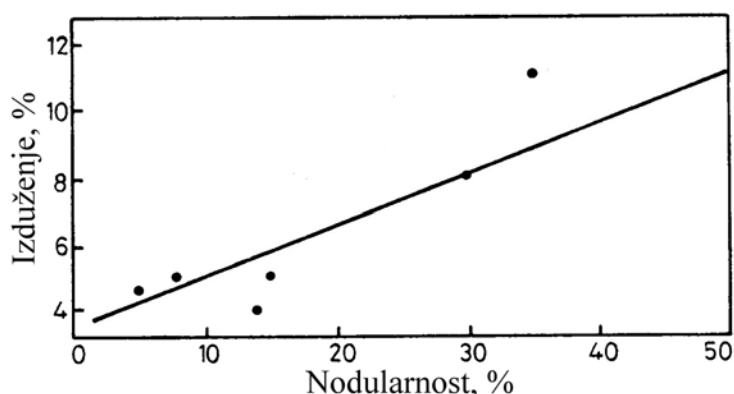
Slika 4.46. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću sivog (isprekidana linija) i vermikularnog (puna linija) lijeva

Vrijednosti izduženja vermikularnog lijeva leže između vrijednosti izduženja sivog i nodularnog lijeva (tablica 4.4). U tablici 4.5 prikazana je promjena izduženja sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva s temperaturom.

Tablica 4.5. Ovisnost izduženja nelegiranog sivog lijeva s perlitnom metalnom osnovom te vermikularnog i nodularnog lijeva s feritnom metalnom osnovom o temperaturi

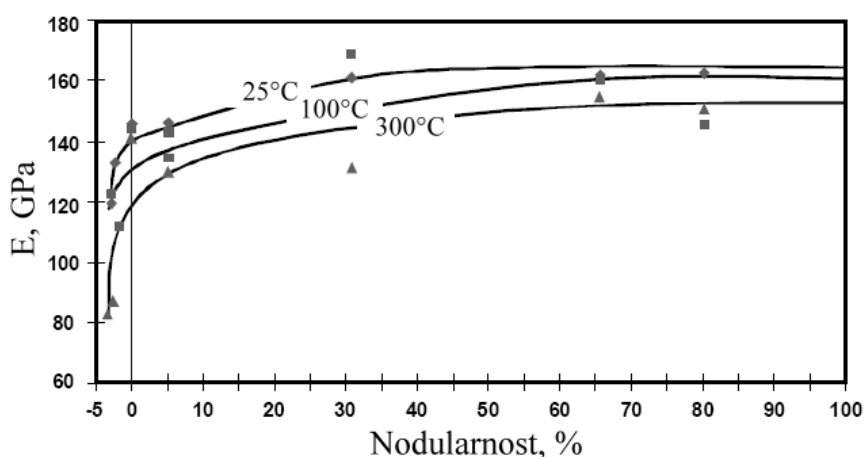
Vrsta lijeva	Izduženje, %							
	20°C	100°C	250°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
GJV	3-5	3-6	3-6	3-6	4-6	5-8	8-10	11-15
GJS	18-24	15-20	8-12	5-10	5-10	7-13	10-15	12-17
GJL	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	~1

Izduženje vermikularnog lijeva raste s porastom udjela nodularnog grafita (slika 4.47), a smanjuje se s porastom udjela perlita u mikrostrukturi.



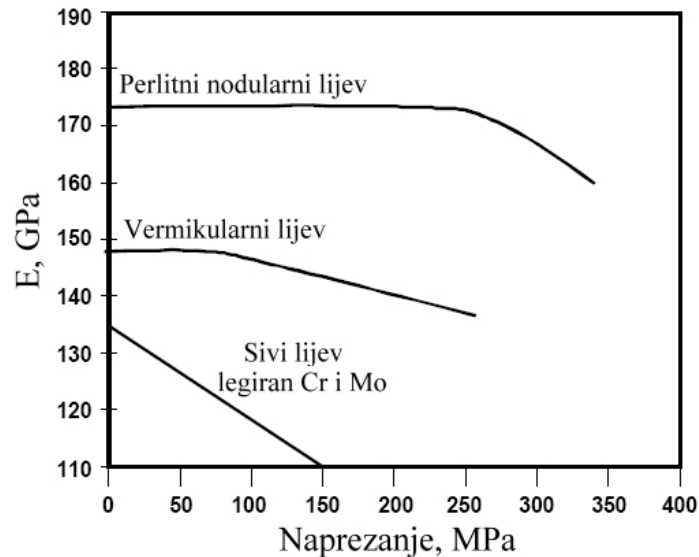
Slika 4.47. Utjecaj udjela nodularnog grafita u mikrostrukturi na izduženje vermikularnog lijeva

Modul elastičnosti vermikularnog lijeva raste s porastom udjela nodularnog grafita, a smanjuje se s porastom udjela listićavog grafita i temperature (slika 4.48).



Slika 4.48. Utjecaj nodularnosti grafita i temperature na modul elastičnosti perlitnog vermikularnog lijeva

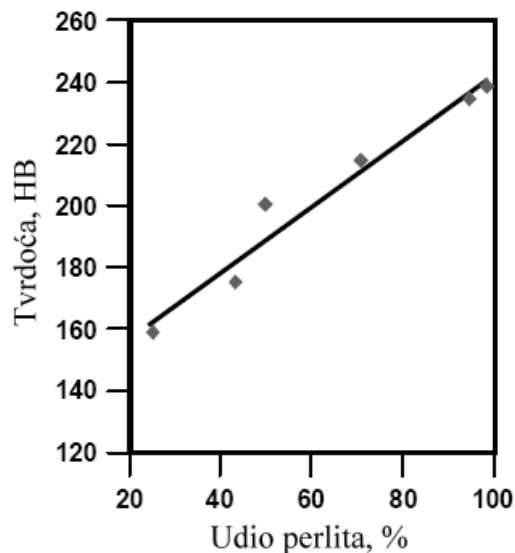
Modul elastičnosti vermikularnog lijeva, za razliku od modula elastičnosti sivog lijeva, ostaje približno konstantan do određenog primijenjenog vlačnog naprežanja nakon čega se linearno i postepeno smanjuje (slika 4.49). Po karakteristikama sličan je modulu elastičnosti nodularnog lijeva, samo nižih iznosa. Modul elastičnosti, odnosno krutost dinamički opterećenih komponenti od vermikularnog lijeva je ~ 50 – 70 % viša od identično konstruiranih i opterećenih komponenti od sivog lijeva.



Slika 4.49. Utjecaj vlačnog naprezanja na modul elastičnosti sivog lijeva legiranog kromom i molibdenom, te perlitnog vermikularnog i nodularnog lijeva

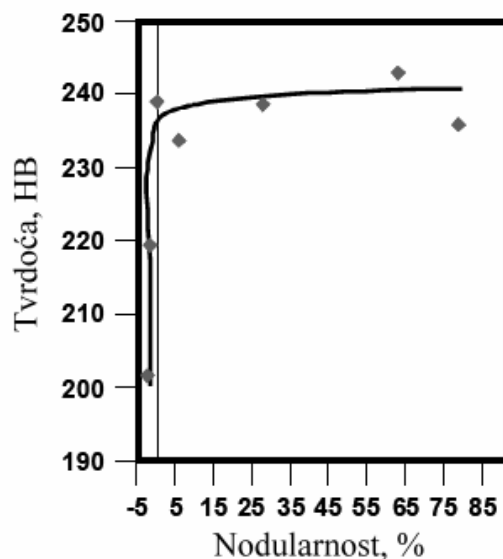
Tlačna čvrstoća perlitnog vermikularnog lijeva je ~ 3 puta veća od vlačne čvrstoće i ~ 25% viša od tlačne čvrstoće sivog lijeva legiranog s kromom i molibdenom. Tlačna čvrstoća pri sobnoj temperaturi raste linearno s porastom udjela perlita u mikrostrukturi.

Kod iste strukture metalne osnove tvrdoća vermikularnog lijeva je viša od tvrdoće sivog lijeva i niža od tvrdoće nodularnog lijeva. Porast udjela perlita u metalnoj osnovi vermikularnog lijeva rezultira višim vrijednostima tvrdoće (slika 4.50).



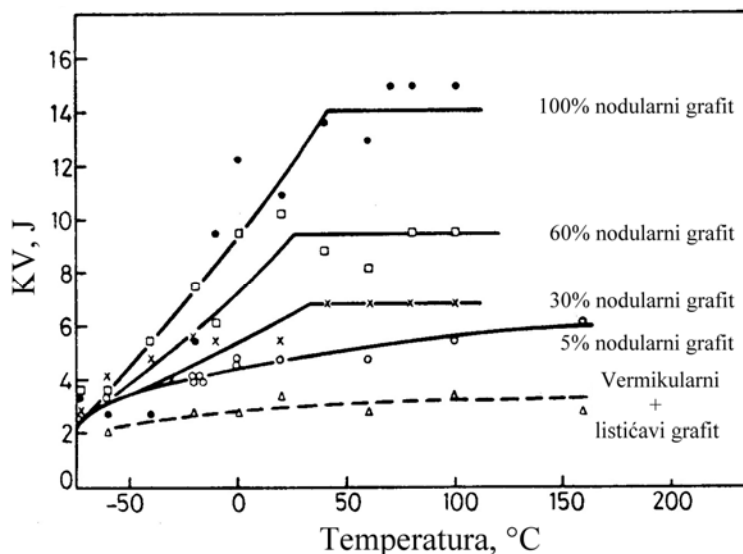
Slika 4.50. Utjecaj udjela perlita u metalnoj osnovi na tvrdoću nelegiranog vermikularnog lijeva s udjelom nodularnog grafita < 10 %

Oblik izlučenog grafita utječe na tvrdoću vermikularnog lijeva. Kod vermikularnog lijeva s udjelom perlita od 85 – 100 % tvrdoća neznatno raste s porastom udjela nodularnog grafita (slika 4.51). Prisustvo listićavog grafita kod istog sadržaja perlita utječe na oštar (nagli) pad tvrdoće jer listići grafita djeluju kao zarezi u metalnoj osnovi i time je znatno slabe.



Slika 4.51. Utjecaj nodularnosti grafita na tvrdoću vermikularnog lijeva s udjelom perlita od 85 – 100 %

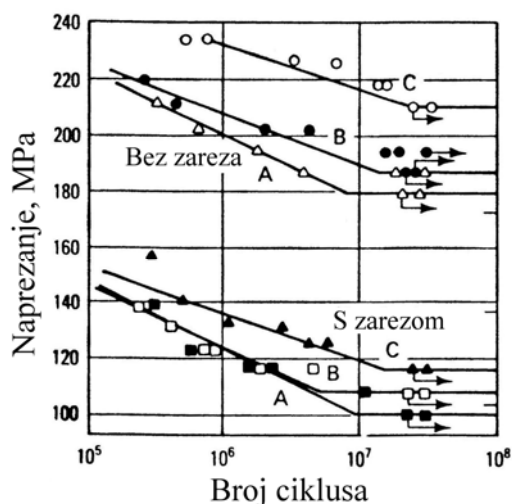
Oblik izlučenog grafita i vrsta metalne osnove imaju dominantan utjecaj na žilavost vermikularnog lijeva. Više vrijednosti žilavosti postižu se pri nižim udjelima perlita u metalnoj osnovi te pri višim udjelima nodularnog grafita u mikrostrukturi (slika 4.52).



Slika 4.52. Utjecaj temperature i udjela nodularnog grafita u mikrostrukturi na udarnu žilavost vermikularnog lijeva (eprovete s V-zarezom)

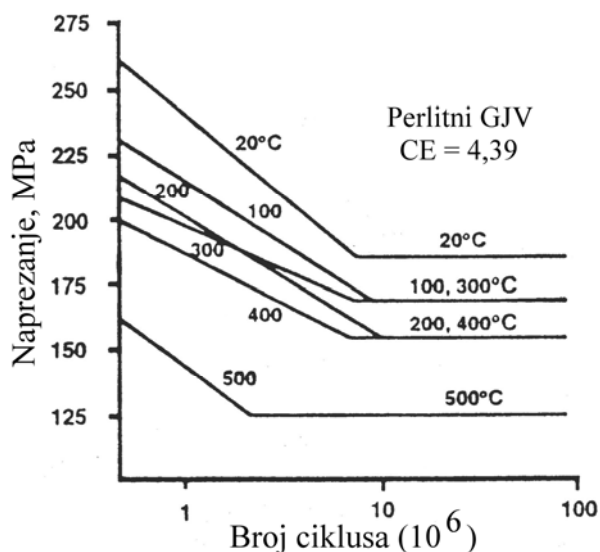
Na povišenim temperaturama vermikularni lijev ima veću žilavost u odnosu na sivi lijev.

Dinamička čvrstoća vermikularnog lijeva ovisi o mikrostrukturi. Perlitna struktura, viša nodularnost i odsutnost zarez rezultira superiornijom dinamičkom izdržljivošću vermikularnog lijeva (slika 4.53). Zbog karakteristične morfologije vermikularnog grafita, dinamička čvrstoća perlitnog vermikularnog lijeva približno je 2 puta veća od dinamičke čvrstoće perlitnog sivog lijeva i slična je dinamičkoj izdržljivošću feritnog nodularnog lijeva.



Slika 4.53. Dinamička izdržljivost uzoraka vermikularnog lijeva sa i bez zareza: a) s feritnom metalnom osnovom, b) s perlitnom metalnom osnovom, c) s visokim stupnjem nodularnosti

Dinamičku izdržljivost vermikularnog lijeva smanjuje se s porastom temperature (slika 4.54). Međutim, ona je još uvijek 2 – 4 puta veća od dinamičke izdržljivosti sivog lijeva na povišenim temperaturama.



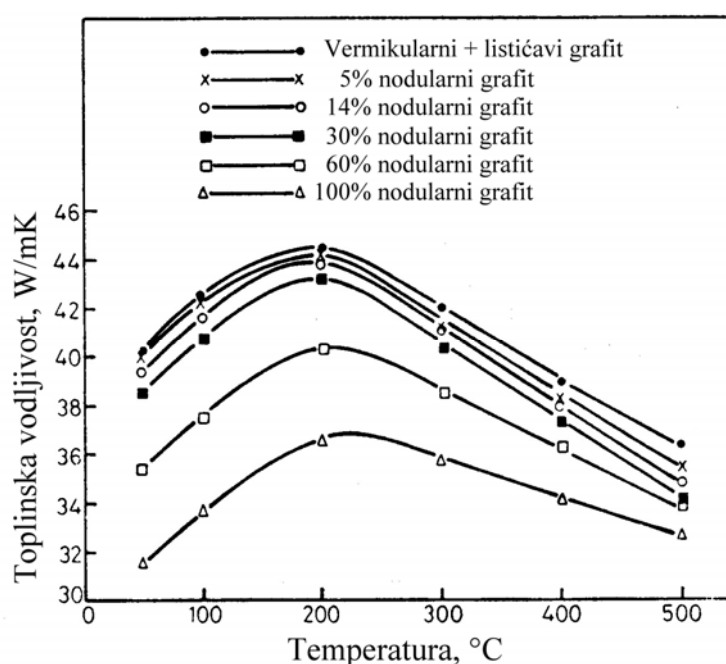
Slika 4.54. Utjecaj temperature na dinamičku izdržljivost vermikularnog lijeva s perlitnom metalnom osnovom

Toplinska vodljivost vermikularnog lijeva pod snažnim je utjecajem morfologije i udjela grafita. Iz tablice 4.6 može se vidjeti da je toplinska vodljivost vermikularnog lijeva tek neznatno niža od toplinske vodljivosti sivog lijeva i 25 – 30 % viša od toplinske vodljivosti nodularnog lijeva zbog kontinuirane, povezane morfologije grafitnih vermikula, slično listićavom grafitu u sivom lijevu.

Kao i kod sivog lijeva, porast ekvivalenta ugljika povećava toplinsku vodljivost vermikularnog lijeva. Toplinska vodljivost nodularnog lijeva opada s porastom udjela nodularnog grafita (slika 4.55).

Tablica 4.6. Utjecaj temperature, strukture metalne osnove i ekvivalenta ugljika na toplinsku vodljivost sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva

Vrsta lijeva	Metalna osnova	CE	Toplinska vodljivost (W/mK)				
			100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
GJV	perlitna	4,2	41	44	41	38	35
	feritna	4,3	46	45	44	44	42
GJL	perlitna	3,8	49	47	45	43	40
	perlitna	4,0	53	51	47	43	39
GJS	perlitna	4,2	32	35	33	31	29
	feritna	4,4	37	38	37	36	35
	perlitna	4,4	31	32	32	31	30



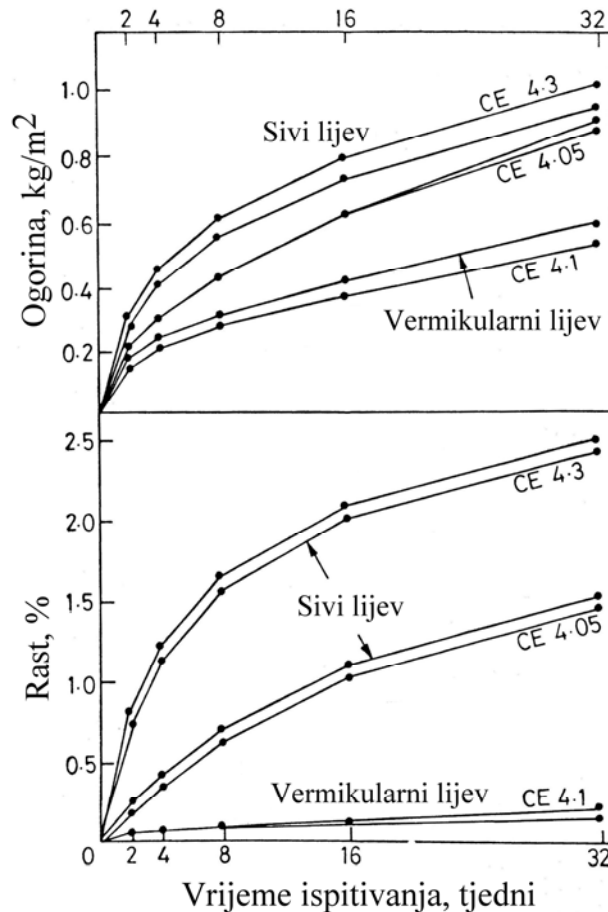
Slika 4.55. Utjecaj temperature i udjela nodularnog grafita u mikrostrukтури na toplinsku vodljivost vermikularnog lijeva

Vermikularni lijev predstavlja optimalno rješenje za specifična područja primjene gdje se zahtijeva umjerena čvrstoća i duktilnost (žilavost) te visoka toplinska vodljivost (blokovi i glave motora sa unutarnjim sagorijevanjem, kočioni diskovi, potisne ploče, čeličanske kokile itd.).

Otpornost na toplinski umor vermikularnog lijeva leži između otpornosti na toplinski umor sivog i nodularnog lijeva, ali mnogo bliže nodularnom nego sivom lijevu.

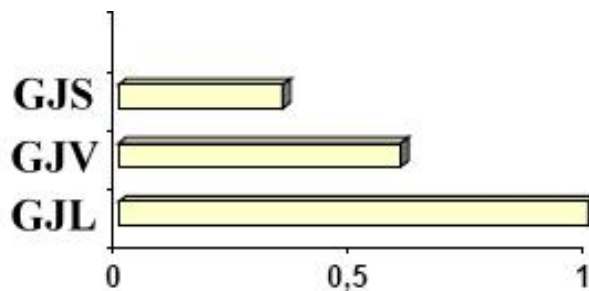
Kod oštih toplinskih uvjeta (naizmjenično grijanje – hlađenje) pri visokim brzinama hlađenja, visoka toplinska vodljivost i nizak modul elastičnosti sivog lijeva s visokim sadržajem ugljika (3,6 – 4,0 %) čine sivi lijev superiornijim od legiranog i nelegiranog feritnog nodularnog lijeva te vermikularnog lijeva. Pri umjerenim brzinama hlađenja feritni vermikularni i feritni nodularni ljevovi imaju najvišu otpornost na nastajanje pukotine, ali pokazuju deformaciju. Pri niskim brzinama hlađenja, visoko čvrsti perlitni nodularni ljevovi te nodularni ljevovi legirani sa silicijem i molibdenom pokazuju superiornost obzirom na nastajanje pukotine i pojavu deformacija.

Ispitivanja pri kontinuiranom zagrijavanju vermikularnog i sivog lijeva većih poprečnih presjeka na zraku tijekom 32 tjedna pokazala su da se pri temperaturi od 500° C rast i stvaranje ogorine kod vermikularnog lijeva nije značajno razlikovalo od sivog lijeva sličnog sastava. Pri temperaturi od 600 °C rast vermikularnog lijeva manji je od rasta sivog lijeva, a njegova otpornost na stvaranje ogorine superiornija, kao što prikazuje slika 4.56.



Slika 4.56. Stvaranje ogorine i rast debelostjenih odljevaka od vermikularnog i sivog lijeva različitih vrijednosti ekvivalenta ugljika (CE) pri temperaturi 600 °C

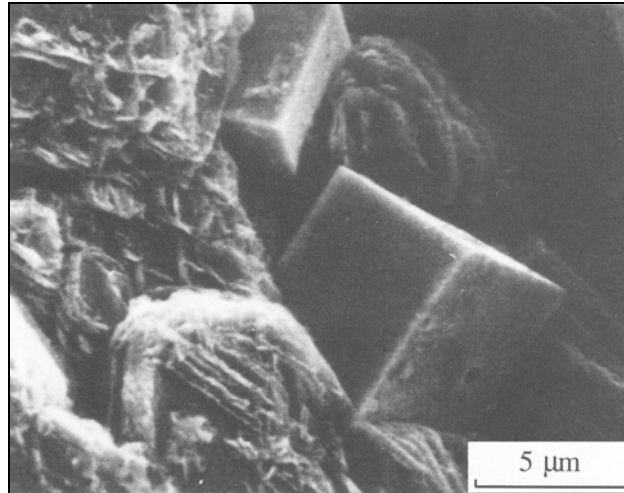
Sposobnost prigušenja vibracija željeznih ljevova usko je povezan s oblikom i količinom grafita. Najveću sposobnost prigušenja vibracija ima sivi, a najmanju nodularni lijev (slika 4.57).



Slika 4.57. Usporedba relativnog kapaciteta prigušenja sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva



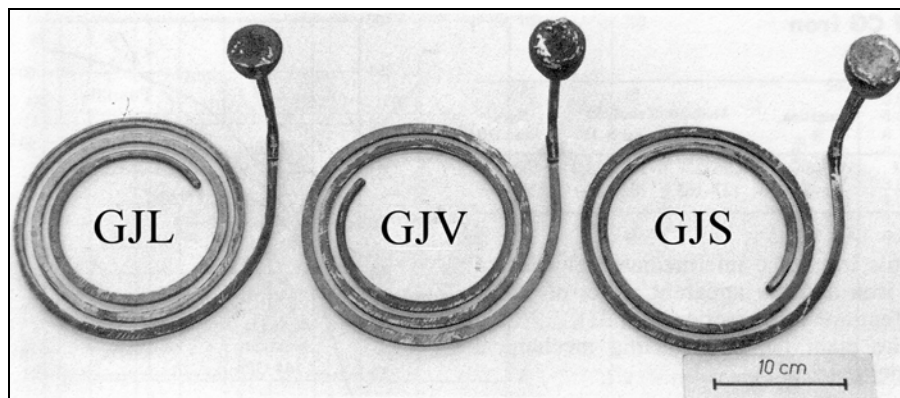
Strojna obradivost vermikularnog lijeva bitno ovisi o udjelu nodularnog grafita, kemijskom sastavu te strukturi metalne osnove. Vermikularni lijev s niskim udjelom nodularnog grafita bez prisustva titanovih karbonitrida (slika 4.58) u mikrostrukturi ima vrlo sličnu strojnu obradivost kao sivi lijev, što omogućuje obradu odljevaka na linijama konstruiranim za obradu odljevaka od sivog lijeva.



Slika 4.58. Snimka titanovih karbonitrida pretražnim elektronskim mikroskopom

Prisustvo titanovih karbonitrida znatno otežava strojnu obradivost odljevaka od vermikularnog lijeva zbog njihove visoke tvrdoće.

Sa slike 4.59 može se vidjeti da sivi lijev ima najbolju livljivost, a nodularni lijev najlošiju. Livljivost vermikularnog lijeva leži između livljivosti sivog i nodularnog lijeva.



Slika 4.59. Spiralne probe odlivene od sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva. Temperatura taljevine ista u sve tri slučaja

## 5. NAPAJANJE ODLJEVAKA OD SIVOG, VERMIKULARNOG I NODULARNOG LIJEVA

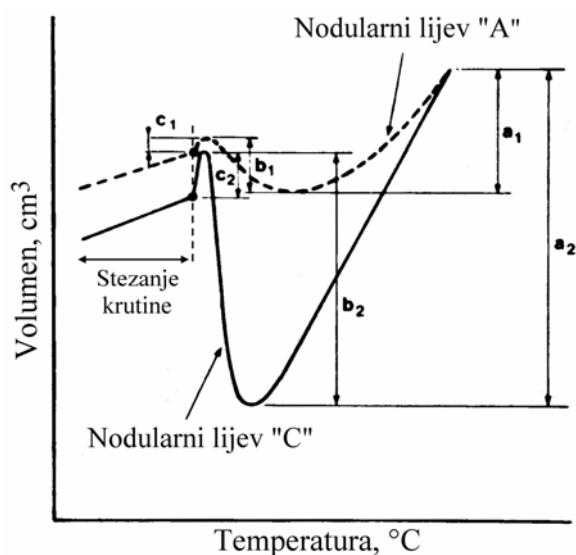
### 5.1 Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja željeznih ljevova s grafitom

Tijekom skrućivanja sivog (GJL), vermikularnog (GJV) i nodularnog (GJS) lijeva (željezni ljevovi s grafitom) dolazi do volumnog stezanja materijala zbog razlike u gustoći između tekućeg i krutog stanja.

Greške uslijed stezanja materijala jedan su od najčešćih oblika grešaka u odljercima. Glavni uzrok nastajanja usahlina (šupljina u odljevku) je volumno stezanje prilikom hlađenja taljevine od temperature lijevanja do solidus temperature. Volumno stezanje obično se kreće od 3,0 – 5,0 %, što ovisi o brojnim faktorima (metalurško stanje taljevine, modul odljevka, temperatura lijevanja itd.). Ako volumno stezanje nije kompenzirano dotokom taljevine iz priključnih dijelova odljevka (koja se nazivaju pojila) u odljevku će se pojaviti usahlina uslijed stezanja.

Za razliku od čelika koji se kontinuirano steže tijekom skrućivanja, kod sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva postoji tijekom skrućivanja period kada dolazi do ekspanzije, odnosno povećanja volumena. Do povećanja volumena dolazi zbog izlučivanja grafita, jer grafit ima značajno manju gustoću ( $2,2 \text{ g/cm}^3$ ) u odnosu na taljevinu ( $\sim 7,0 \text{ g/cm}^3$ ). Ako se pravilno iskoristi, ekspanzija zbog izlučivanja grafita (porast volumena) može u velikoj mjeri nadoknaditi stezanje taljevine i austenita.

Kod sivog lijeva, vermikularnog i nodularnog lijeva postoji primarno i sekundarno stezanje. Između ovih perioda odvija se ekspanzija zbog izlučivanja grafita (slika 5.1).



Slika 5.1. Shematski prikaz volumnih promjena u nodularnom lijevu od temperature lijevanja do sobne temperature (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> – primarno stezanje, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> – ekspanzija, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> – sekundarno stezanje. Nodularni lijev „A“ ima bolju metaluršku kvalitetu taljevine od nodularnog lijeva oznake „C“. Vrijedi i za vermikularni i sivi lijev.

Primarno stezanje povezano je sa stezanjem taljevine i primarnog austenita od temperature lijevanja do početka eutektičke reakcije. Sekundarno stezanje nastaje na kraju

skrućivanja kada se ekspanzijom uslijed izlučivanja grafita ne može kompenzirati stezanje austenita.

Nakon završetka lijevanja započinje skrućivanje uz stjenke kalupne šupljine. Pri tome nastaje tanka kruta kora koja odvaja taljevinu unutar kalupne šupljine od stjenki kalupa. S daljnjim padom temperature nastavlja se stezanje taljevine te stezanje već skrutnutih dijelova unutar kalupne šupljine (stezanje nastalog primarnog austenita) – primarno stezanje (slika 5.1, područja označena s  $a_1$  i  $a_2$ ). Ako se navedeno stezanje ne kompenziraju taljevinom iz uljevnog sustava ili pojila, stezanje će uzrokovati negativan tlak unutar kalupne šupljine. Da bi se izjednačio tlak u kalupnoj šupljini s atmosferskim tlakom, dolazi do uleknuća (uvlačenja) tanke krute kore uz stjenke kalupa. Na ovaj način kontrakcija je kompenzirana smanjenjem volumena odljevka, što je naravno nepovoljan slučaj. Glavni uzrok stvaranja uleknuća na krutoj kori uz stjenke kalupa je previsoka temperatura lijevanja i nedovoljna količina taljevine za kompenziranje stezanja u početnoj fazi skrućivanja. Zbog nekompensiranog stezanja taljevine i već skrutnutih dijelova unutar kalupne šupljine, pored nastanka uleknuća (uvlaka) na površini odljevka, može doći i do stvaranja velikih šupljina u blizini toplinskog centra odljevka..

Kada se dostigne temperatura eutektičke reakcije započinje izlučivanje grafita, što je povezano sa ekspanzijom, odnosno porastom volumena zbog razlike u gustoći između taljevine i grafita (slika 5.1, područja označena sa  $b_1$  i  $b_2$ ). Tijekom izlučivanja grafita nastavlja se stezanje taljevine i već skrutnutih dijelova. Međutim, ovo stezanje je manje od ekspanzije zbog izlučivanja grafita, što u konačnici rezultira povećanjem volumena. Zbog toga se primarno stezanje može smatrati završenim kad započne eutektička reakcija.

Sekundarno stezanje (slika 5.1, područja označena sa  $c_1$  i  $c_2$ ) pojavljuje se u završnoj fazi skrućivanja. Budući da su u završnoj fazi skrućivanja značajno smanjeni putovi za napajanje (zbog velikog udjela krute faze), ovaj problem je teže riješiti promjenom uljevnog sustava ili sustava napajanja, odnosno sekundarno stezanje predstavlja više metalurški problem (metalurška kvaliteta taljevine). Glavni uzrok sekundarnog stezanja je nedovoljna količina izlučenog grafita na kraju skrućivanja (nedovoljna količina eutektičkog grafita), odnosno nedovoljna ekspanzija da bi se kompenziralo stezanje austenita. Može se zaključiti da je potrebno ostvariti jednolično izlučivanje grafita od početka do završetka eutektičkog skrućivanja. Greške nastale uslijed sekundarnog stezanja su male šupljine nepravilnih površina i nalaze se obično blizu toplinskog centra odljevka.

Kalupi u koje se lijevaju odljevci od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva moraju posjedovati određenu krutost, odnosno čvrstoću. Ako kalup nema dovoljnu čvrstoću, porast volumena uslijed ekspanzije zbog izlučivanja grafita za vrijeme skrućivanja može dovesti do oštećenja kalupa (povećanje volumena kalupne šupljine, pucanje kalupa). Utjecaj metalurške kvalitete taljevine na volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja zorno je prikazan na slici 5.1. Taljevine koje imaju bolju metaluršku kvalitetu imaju manje stezanje tijekom skrućivanja, a samim tim i manju potrebu za napajanjem.

Taljevine izrađene u kupolnoj peći imaju bolju metaluršku kvalitetu (nukleacijski potencijal) od taljevina izrađenih u indukcijskim pećima. Veći udio sivog sirovog željeza u ulošku rezultira boljom metalurškom kvalitetom taljevine. Previsoke temperature u peći i preduga vremena zadržavanja negativno utječu na metalurško stanje taljevine jer se smanjuje broj nukleacijskih mjesta. Metalurško stanje taljevine može se poboljšati predobradom i cijepljenjem.

Modul odljevka (omjer volumena i površine odljevka) također utječe na iznos volumnih promjena). Ako je modul odljevka dovoljno velik (u većini slučajeva  $\geq 25,0$  mm), a taljevina visoke metalurške kvalitete lijeva u kalup visoke čvrstoće, moguće je odliti ispravne odljevke bez primjene pojila (samonapajanje).

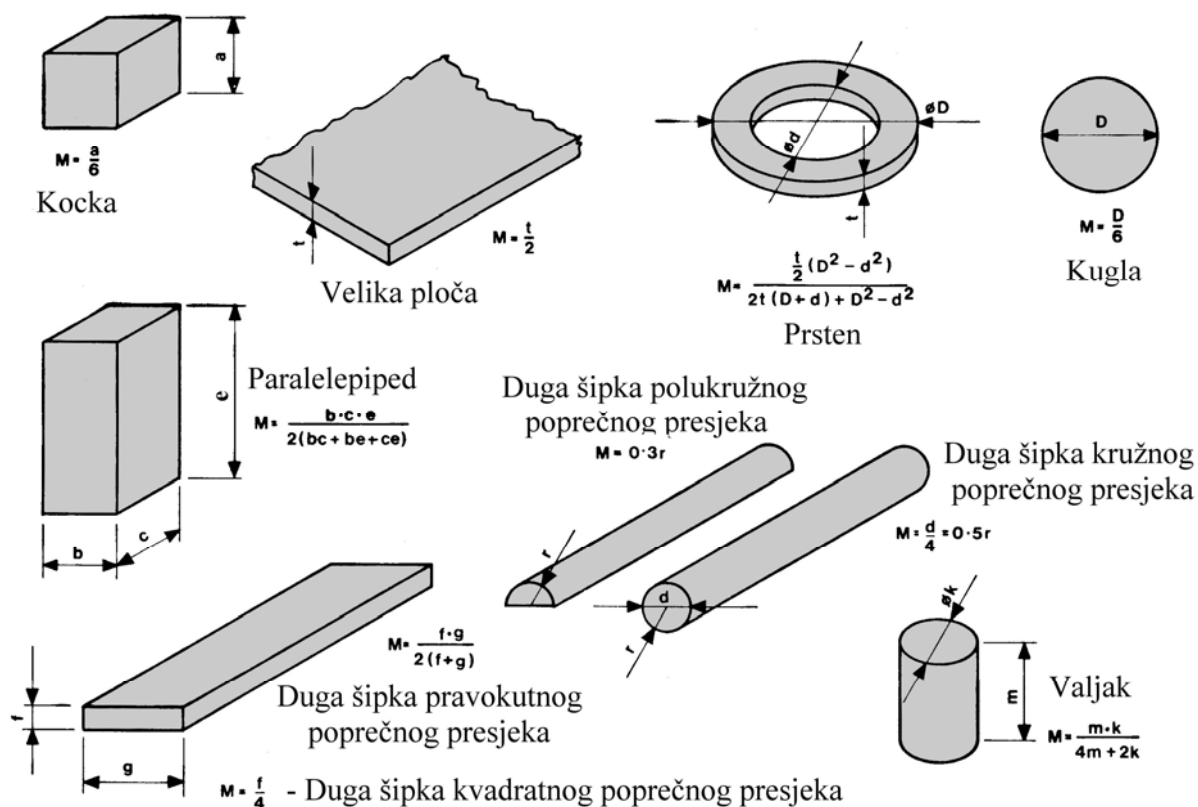
Napajanjem se mogu kompenzirati samo volumne promjene tijekom skrućivanja.

Nakon završetka skrućivanja, tijekom hlađenja do sobne temperature, također dolazi do stezanja. To stezanje naziva se često modelarsko stezanje (stezanje u krutom stanju) i mora se uzeti u obzir pri izradi modela jer utječe na konačne dimenzije odljevka. Dodatak na dimenzije zbog linearnog stezanje iznosi ~ 1,0 %. Zbog dodatka na stezanje u krutom stanju, kalupna šupljina je nešto uvećana u odnosu na konačne dimenzije odljevka.

## 5.2 Hlađenje i modul odljevka

Brzina hlađenja odljevka od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva ovisi o: toplinskim svojstvima taljevine, toplinskim svojstvima kalupa, te obliku i veličini odljevka.

Oblik i veličina odljevka ili bilo kojeg njegovog dijela, najčešće se opisuje omjerom njegovog volumena i površine. Ovaj omjer naziva se modulom odljevka (M). Izračunavanje modula za jednostavne oblike prikazano su na slici 5.2.



Slika 5.2. Izračun modula za jednostavne oblike. Osim kocke, svi ostali oblici smatraju se beskonačno dugima

Brzina hlađenja ili skrućivanja ne ovisi o masi odljevka već o omjeru volumena i površine koja se hladi, odnosno modulu. Napravimo jedan jednostavan primjer za odljevak čija težina iznosi 45,0 kg. Ovaj odljevak može biti npr. kocka sa stranicom od 18,7 cm ili npr. ploča debljine 1,27 cm sa stranicama od 71,8 cm. U danom primjeru, volumeni odljevaka su jednaki ( $6555 \text{ cm}^3$ ). Kod kocke, površina koja se hladi iznosi:

$$6 \times 18,7^2 = 2098 \text{ cm}^2$$

Omjer volumena i površine koja se hladi za kocku je :

$$\frac{6555}{2098} = 3,12 \text{ cm}$$

Isti omjer (modul) za odljevak iste mase ali u obliku ploče prethodno navedenih dimenzija iznosi 0,61 cm. Kad god se razmatra brzina hlađenja odljevka, modul se mora uzeti u obzir prije nego masa ili debljina odljevka.

Prema izrazu Chvorinova brzina odvođenja topline od strane kalupa (pod uvjetom da je velik u usporedbi s volumenom odljevka) definirana je slijedećim izrazom:

$$t = c \times M^2 \quad (5.1)$$

gdje je :

t – vrijeme potrebo za odvođenje određene količine topline od odljevka (min.),

c – konstanta (ovisi o toplinskim svojstvima kalupa i odljevka),

M - modul odljevka.

Ako se vratimo na naš prethodni primjer, možemo izračunati da je vrijeme skrućivanja kocke:

$$\frac{M_{\text{kocke}}^2}{M_{\text{ploči}}^2} = \frac{3,12^2}{0,61^2} = 26 \text{ puta duže od skrućivanja ploče iste težine!}$$

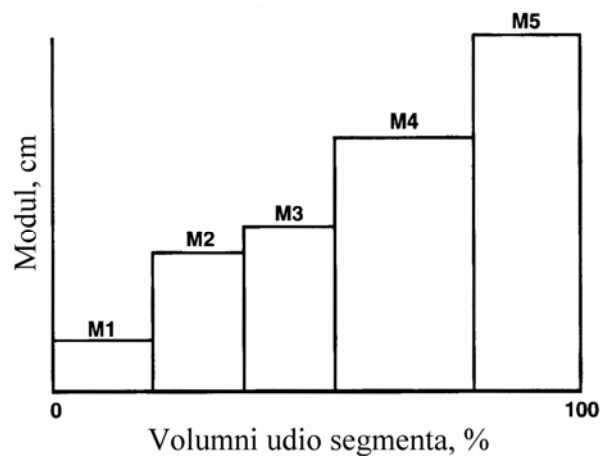
Vrijednost modula je proporcionalna brzini hlađenja samo za beskonačno velike ploče, kugle i beskonačno duge šipke kružnog poprečnog presjeka. Premda se beskonačno dugi odljevci nikada ne lijevaju, ovo pojednostavljene primjenjivo je ako je jedna dimenzija barem 4 – 5 puta veća od najmanje dimenzije.

Na prvi pogled može se zaključiti da izračunavanje modula zahtijeva dosta vremena. Međutim, to je dosta rijedak slučaj jer se odljevci ili dijelovi odljevaka mogu se gotovo uvijek aproksimirati jednostavnim geometrijskim oblicima, što omogućuje brzo izračunavanje modula. Jedan od načina je upotreba specijalnih računarskih paketa za ovu svrhu te simulaciju hlađenja i skrućivanja odljevaka.

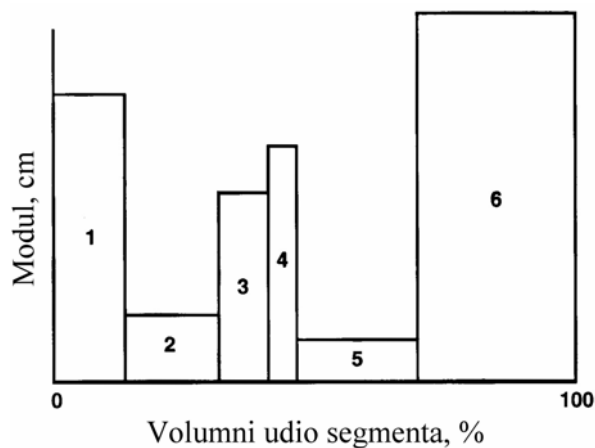
Nažalost, mnogi odljevci su kompleksnog oblika, tako da svaki segment ima svoj modul. Za kompleksne odljevke potrebno je konstruirati kumulativni dijagram. Odljevak se podijeli u jednostavne geometrijske oblike i za svaki segment računa se modul i volumni udio (udio u ukupnom volumenu odljevka). Primjeri ovakvih kumulativnih dijagrama prikazani su na slikama 5.3 i 5.4.

Ako pogledamo sliku 5.3 možemo vidjeti da skrućivanje kreće od segmenta br. 1 i odvija se prema segmentima s višim modulima, a zadnji segment koji ima najviši modul posljednji će skrutnuti. Pojilo je potrebno postaviti na zadnji segment (br. 5). U većini slučajeva skrućivanje nije usmjereno, slika 9.4. Očito je da skrućivanje započinje u segmentu br. 5, nakon čega slijedi segment 2, pa segment 3, pa segment 4, zatim segment 1 i na kraju segment 6. Ako se primijenjena tehnika napajanja oslanja na usmjereno skrućivanje, ovaj odljevak treba smatrati kao tri odvojena odljevka. U „prvom“ odljevku, skrućivanje započinje u segmentu 2 a završava u segmentu 1. U „trećem“ odljevku, skrućivanje započinje u segmentu 5. Najzad, segmenti 3 i 4 smješteni su između dva tanja segmenta, tako da

skrućivanje napreduje od segmenta 2 prema segmentu 3 i 4, a sa suprotne strane od segmenta 5 do segmenta 6. Pojila su, prema tome postavljena na segmente 1, 4 i 6.



Slika 5.3. Dijagram moduli - volumni udjeli pojedinih segmenata kompleksnog odljevka (usmjereno odvođenje topline)



Slika 5.4. Dijagram moduli - volumni udjeli pojedinih segmenata kompleksnog odljevka (neusmjereno odvođenje topline)

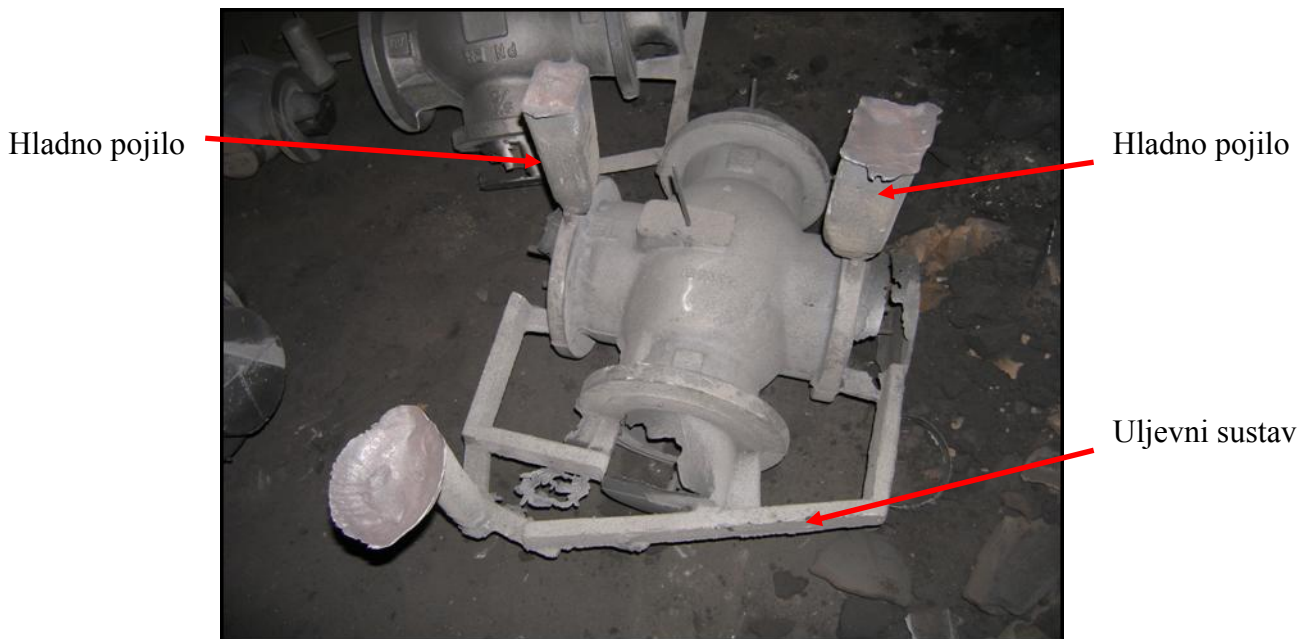
### 5.3 Metode napajanja odljevaka

Na mjestima koja zadnja skrućuju u odljevku nastaju usahline, zbog čega takva mjesta ne smiju biti u odljevku, nego u njegovom priljevnom dijelu koje se zove pojilo. Svrha pojila je nadoknada volumnog stezanja odljevka. To znači da tijekom skrućivanja moraju dovesti odljevku manjak taljevine da bi skrutnuo bez usahline.

Obzirom na uljevni sustav razlikujemo hladno i toplo pojilo. U hladno pojilo taljevina dolazi tek kada je popunila kalupnu šupljinu, zbog čega se pojilo ispuni hladnijom taljevinom nego odljevak (slika 5.5). Kod toplog pojila taljevina na putu prema kalupnoj šupljini najprije prolazi kroz pojilo tako da toplo pojilo ostaje popunjeno najtoplijom taljevinom.

Pojila mogu biti otvorena i zatvorena. Otvoreno pojilo smješteno je tako da je završetak pojila vidljiv na površini gornje polovice kalupa. Kod napajanja željeznih ljevova zatvorena pojila primjenjuju se u znatno većem opsegu od otvorenih pojila. Zatvorena pojila

postavljaju na niže, masivne dijelove odljevka gdje nije moguće napajanje pomoću otvorenih pojila te su potpuno okružena pijeskom.

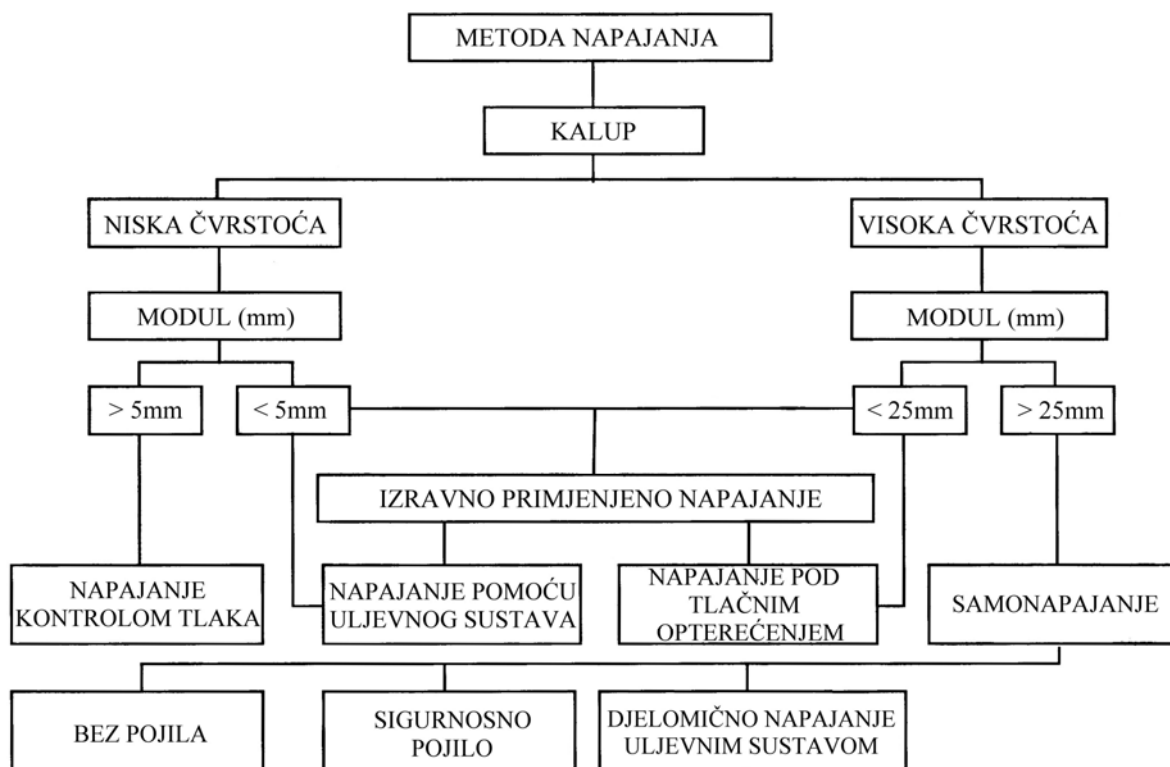


Slika 5.5. Odljevak zajedno s uljevnim sustavima i pojilom

Za napajanje odljevaka od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva primjenjuju se slijedeće metode:

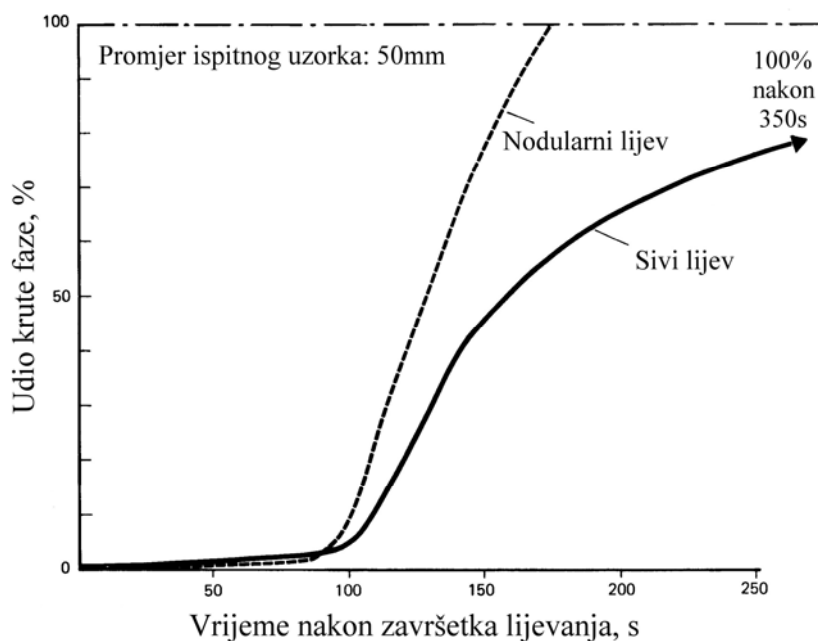
- konvencionalno ili klasično (usmjereno) napajanje,
- izravno primijenjeno napajanje (napajanje pod tlačnim opterećenjem (tlačno napajanje), napajanje pomoću uljevnog sustava),
- napajanje kontrolom tlaka ili metoda regulacije tlaka,
- napajanje bez primjene pojila (samonapajanje).

Na slici 5.6 sumarno su prikazane raspoložive metode za napajanje sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva i mogućnosti primjene pojedinih metoda ovisno o čvrstoći kalupa i modulu odljevka. Metoda konvencionalnog napajanja nije uključena u sumarni prikaz na slici 5.6 zbog niske ekonomičnosti. Granične vrijednosti modula koje su navedene u shematskom prikazu na slici 5.6 sadrže određeni faktor sigurnosti. Naime, u slučaju lijevanja odljevaka od sivog lijeva u kalupe male čvrstoće granična vrijednost modula može biti nešto veća od navedene (5,0 mm). Međutim, ako postoje određene nedoumice oko čvrstoće kalupa, navedene vrijednosti predstavljaju sigurniji pristup. Ako kalup ima nisku čvrstoću, a modul odljevka je  $> 5,0$  mm potrebno je upotrijebiti metodu napajanja kontrolom tlaka. U slučaju primjene kalupa visoke čvrstoće kod odljevaka s modulom  $< 25,0$  mm ili primjene kalupa niske čvrstoće kod odljevaka čiji je modul  $< 5,0$  mm, za napajanje je potrebno primijeniti metode izravnog napajanja (napajanje pod tlačnim opterećenjem, odnosno napajanje pomoću uljevnog sustava). Napajanje bez primjene pojila (samonapajanje) potrebno je primijeniti ako se lijevaju odljevci s modulom  $> 25,0$  mm u kalupe visoke čvrstoće.



Slika 5.6. Odabir metode napajanja ovisno o čvrstoći kalupa i modulu odljevka

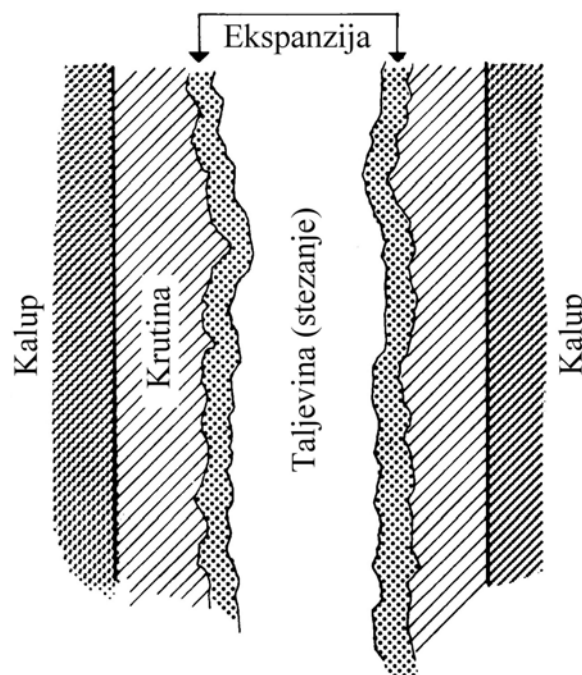
Napajanje odljevaka od sivog lijeva je lakše od napajanja odljevaka od nodularnog lijeva zbog različitih morfologija skrućivanja. U usporedbi s nodularnim lijevom, skrućivanje sivog lijeva odvija se u dužem vremenskom intervalu (slika 5.7), što je posljedica različitih morfologija skrućivanja.



Slika 5.7. Vremenski slijed skrućivanja sivog (puna linija) i nodularnog (isprekidana linija) lijeva



Sivi lijev posjeduje 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 smanjenje temperature taljevine unutar odljevka (kalupne šupljine) brže nego u slučaju sivog lijeva. Sivi lijev skrućuje na slojevit način (slika 5.8) jer se oslobođena toplina mora transportirati kroz postojeći kruti sloj koji postaje sve deblji tijekom daljnjeg skrućivanja.



Slika 5.8. Napredovanje skrućivanja odljevka od sivog lijeva u kalupu

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.

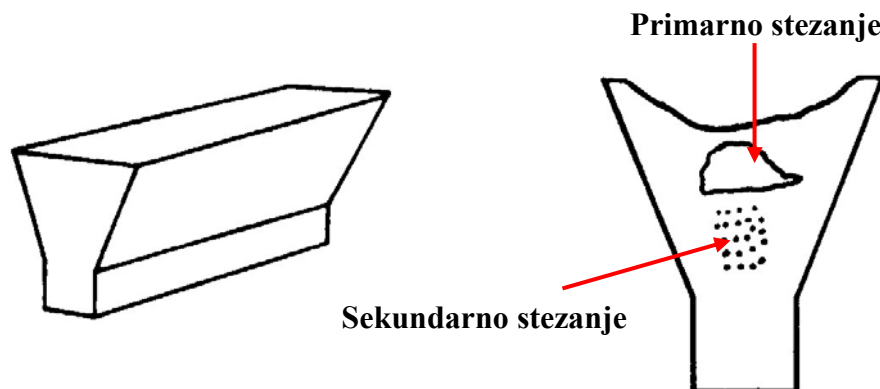
### 5.3.1 Konvencionalno napajanje

Konvencionalno ili klasično napajanje (engl. *Conventional risering*) zasniva se na usmjeravanju skrućivanja od hladnih točki (tanke stjenke) kroz deblje presjeke (stjenke) i smještanju pojila adekvatne veličine na kraju svakog puta skrućivanja, tako da skrućivanje završi u pojilu a ne u odljevku.

Tipičan primjer konvencionalnog napajanja je lijevani ispitni uzorak, tzv. Y-proba, slika 5.9.

Sustav konvencionalnog napajanja zasniva se na pažljivoj analizi konfiguracije odljevka, odnosno dijeljenju odljevka na segmente i izračunavanju pripadajućih modula, kao što je već opisano ranije.

Kod konvencionalnog napajanja ušća treba postaviti tako da se postignu maksimalne temperaturne razlike unutar ulivenog kalupa. Preferira se da ušća ulaze u pojilo ili primjena vršnih pojila (pojila odozgo).



Slika 5.9. Primjer konvencionalnog napajanja (Y-proba)

Potrebno je smjestiti po jedno pojilo na kraju svakog puta skrućivanja. Pojilo treba biti dimenzionirano tako da susjedni segmenti ostaju u tekućem stanju nakon što se završi skrućivanje tanjih segmenata. Ako je moguće, deblje presjeke odljevka potrebno je smjestiti u gornji dio kalupa (skrućivanje napreduje od dna ka vrhu). Ako je potrebno, mogu se primijeniti egzotermna pojila ili izolacijska pojila. Da bi se ostvarilo usmjereno skrućivanje mogu se primijeniti hladila. Visoke temperature lijevanja doprinose usmjerenom skrućivanju od dna prema gornjim dijelovima kalupa.

Prednosti konvencionalnog napajanja su: nije posebno zahtjevno na čvrstoću kalupa, nije potrebna precizna kontrola temperature lijevanja, manja osjetljivost na metaluršku kvalitetu taljevine.

Nedostatci konvencionalnog napajanja su: konstrukcija odljevka ima snažan utjecaj na ostvarene rezultate napajanja, neekonomičnost zbog niskog izvatka (velika pojila), moguće otežano uklanjanje pojila, ne iskorištava ekspanziju grafitu za kompenzaciju stezanja taljevine i austenita.

### 5.3.2 Izravno primijenjeno napajanje

Kod izravno primijenjenog napajanja (engl. *Directly applied risering desing (DAR)*) upotrebljava se pojilo (napajanje pod tlačnim opterećenjem) ili uljevni sustav (napajanje pomoću uljavnog sustava) za kompenzaciju stezanja. Kod ovih metoda samo se primarno stezanje kompenzira dotokom taljevine iz pojila ili uljavnog sustava, dok se sekundarno stezanje kompenzira ekspanzijom uslijed izlučivanja grafitu. Sustav napajanja mora biti tako konstruiran da se tijekom ekspanzije uslijed izlučivanja grafitu taljevina ne vrati u pojilo ili uljevni sustav. Budući da se kod ovih metoda napajanja stvaraju značajni tlakovi u kalupnoj šupljini, kalupi koji se upotrebljavaju moraju biti dovoljno čvrsti.

### 5.3.2.1 Napajanje pod tlačnim opterećenjem

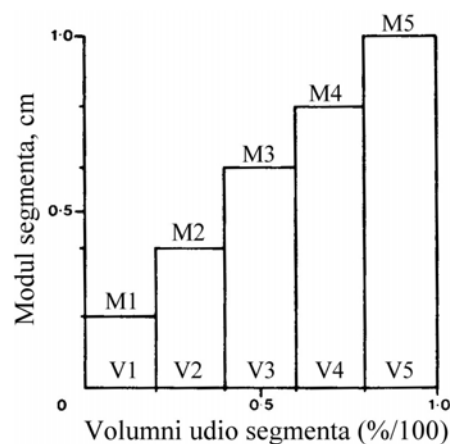
Napajanje pod tlačnim opterećenjem primjenjuje se za napajanje odljevaka s najvećim modulom  $> 5,0$  mm, ali  $< 25,0$  mm u slučaju lijevanja u čvrste kalupe (npr. kemijski vezane mješavine). Ako je najveći modul  $< 5,0$  mm može se primijeniti napajanje pomoću uljevnog sustava. Odljevci s modulom  $> 25,0$  mm mogu se napajati bez primjene pojila.

Ako se lijevanje provodi u kalupe male čvrstoće (npr. kalupi izrađeni od svježe kalupne mješavine, školjkasti kalupi), ovom metodom mogu se napajati odljevci s najvećim modulom  $< 5,0$  mm. Iznad ove vrijednosti modula potrebno je primijeniti metodu napajanja kontrolom tlaka.

Kod napajanja pod tlačnim opterećenjem ili tlačnog napajanja (engl. *Pressure rising*) iskorištava se, za razliku od konvencionalnog napajanja, volumna ekspanzija tijekom izlučivanja grafita. Primarno stezanje kompenzira se dotokom taljevine iz pojila. Kada započne ekspanzija ili neposredno nakon početka ekspanzije, vrat pojila (spoj pojila i odljevka) mora skrtnuti. Na taj način tijekom ekspanzije ne dolazi do povratnog napajanja od odljevka prema pojilu (taljevina ne teče od odljevka prema pojilu). Zbog toga se taljevina unutar kalupne šupljine nalazi pod povišenim tlakom koji se iskorištava za kompenzaciju sekundarnog stezanja.

Kod jednostavnih odljevaka, primjena ove metode je prilično lagana i ekonomična, što nije slučaj kod kompleksnih odljevaka. Kod kompleksnih odljevaka, odnosno odljevka koji se sastoji od dva ili više segmenata s različitim modulima potrebno je odrediti koji je segment značajan (modul značajnog segmenta označen je sa  $M_s$ ). Kod metode napajanja pod tlačnim opterećenjem značajni segment je onaj koji ima najmanji modul čijim se skrućivanjem i ekspanzijom u svim segmentima većeg poprečnog presjeka sva taljevina može održati na tlaku većem od atmosferskog, sve dok ovi segmenti ne započnu sa skrućivanjem i ekspanzijom. Ekspanzija u značajnom segmentu mora kompenzirati stezanje taljevine u svim debljim segmentima sve dok u njima ne počne ekspanzija.

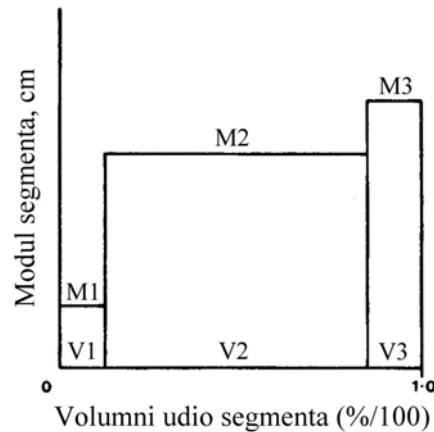
Određivanje značajnog segmenta može biti znatno otežano u slučaju kompleksnih odljevaka i često se zasniva na iskustvu te metodi pokusa i pogreške. Međutim, danas se sve više u tu svrhu primjenjuju specijalizirani programski paketi. Ako se ne primjenjuju specijalizirani programski paketi, potrebno je konstruirati kumulativni dijagram (dijagram moduli pojedinih segmenata odljevka - volumni udjeli pojedinih segmenata). Odljevak se podijeli u jednostavne geometrijske oblike i za svaki segment računa se modul i volumni udio (udio u ukupnom volumenu odljevka). Primjeri kumulativnog dijagrama kod jednog jednostavnog odljevka prikazan je na slici 5.10.



Slika 5.10. Primjer dijagrama moduli – volumni udjeli pojedinih segmenata za slučaj jednostavnog odljevka

U slučaju distribucije modula kao na slici 5.10, segment br. 1 smatra se značajnim iz nekoliko razloga. Pored toga što ima najmanji modul, može se sa slike 9.10 vidjeti da ne postoji velika razlika u modulima između segmenta br. 2 i segmenta br. 1. Također i kod ostalih segmenata ne postoji značajna razlika u modulima. U usporedbi sa ostalim segmentima, volumni udio segmenta br. 1 je relativno velik.

Kod kompleksnijeg odljevka s kumulativnim dijagramom kao na slici 5.11, određivanje značajnog modula je nešto kompliciranije.



Slika 5.11. Primjer dijagrama modula – volumni udjeli pojedinih segmenata za slučaj kompleksnijeg odljevka

U ovom slučaju segment br. 1 ne smatra se značajnim segmentom, iako ima najmanji modul. Razlog za to je velika razlika u modulima te volumnim udjelima između segmenta br. 1 i segmenta br. 2. Stoga, segment br. 2 smatra značajnim zbog njegovog velikog volumnog udjela u ukupnom volumenu odljevka i manje razlike u modulima između segmenta br. 3 i segmenta br. 2.

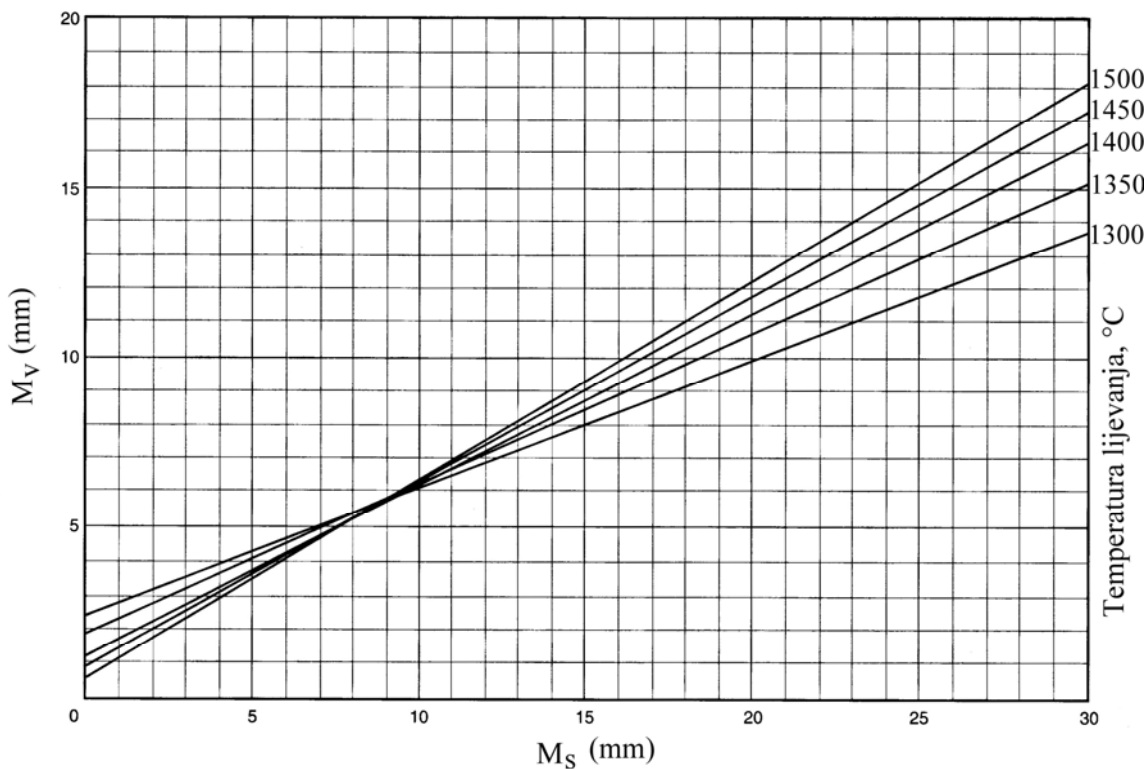
Da bi se vrat pojila skrutnuo u odgovarajućem trenutku, modul vrata pojila mora biti:

$$M_v = \frac{M_s \cdot c(T_p - 1150)}{c(T_p - 1150) + L_t} \quad (5.2)$$

gdje je :

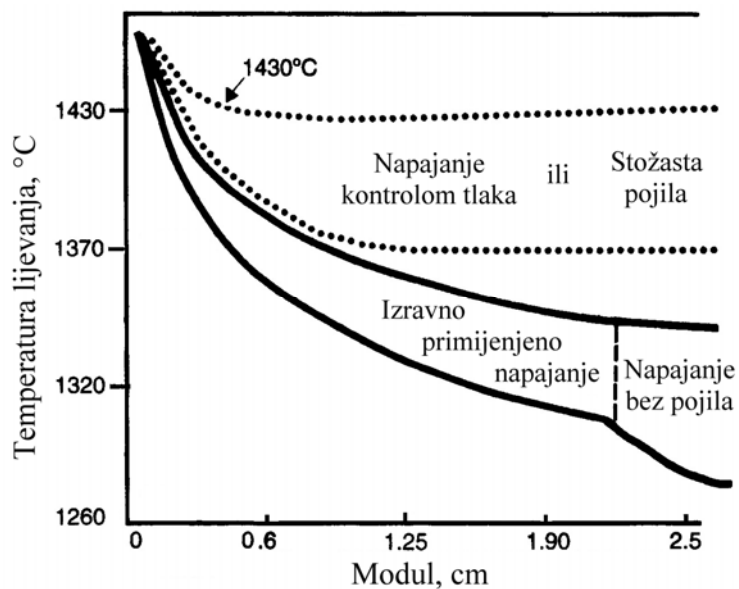
- $M_s$  – modul značajnog segmenta (cm),
- $c$  – specifični toplinski kapacitet (0,84 J/g°C),
- $T_p$  – temperatura lijevanja, °C,
- $L_t$  – latentna toplina taljenja (209 J/g),
- 1150 – temperatura skrućivanja željeznog lijeva (pojednostavljeno uz pretpostavku CE = 4,3).

Jednadžbi (5.2) potrebno je dodati korekcijski faktor koji uzima u obzir toplinu taljenja koju je potrebno odvesti od odljevka da bi se formirao tanki sloj krute faze uz stijenke kalupa ili jezgre. Korekcijski faktor uzima u obzir toplinske gubitke tijekom lijevanja. Rezultirajuća jednadžba najčešće se prikazuje u obliku dijagrama (5.12). Iz poznate vrijednosti modula vrata pojila mogu se izračunati dimenzije njegovog poprečnog presjeka (kvadratni, pravokutni) (slika 5.1).



Slika 5.12. Dijagram za određivanje modula vrata pojila ( $M_v$ ) za odljevke kod kojih je primijenjena metoda tlačnog napajanja ovisno o modulu značajnog segmenta ( $M_s$ ) i temperaturi lijevanja

Temperatura lijevanja ovisi o debljini stjenke odljevka, odnosno modulu (slika 5.13).

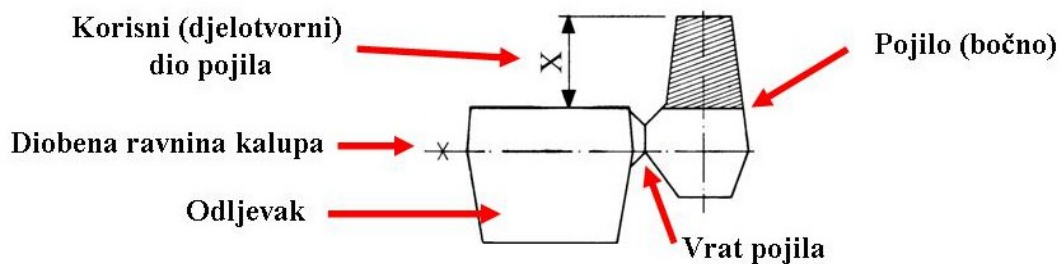


Slika 5.13. Preporučene temperature lijevanja ovisno o modulu odljevka i metodi napajanja

Tankostjeni odljevci zahtijevaju više temperature lijevanja od debelostjenih. Kod ove metode napajanja temperaturu lijevanja potrebno je striktno kontrolirati (ne smije varirati više od  $\pm 15$  °C).

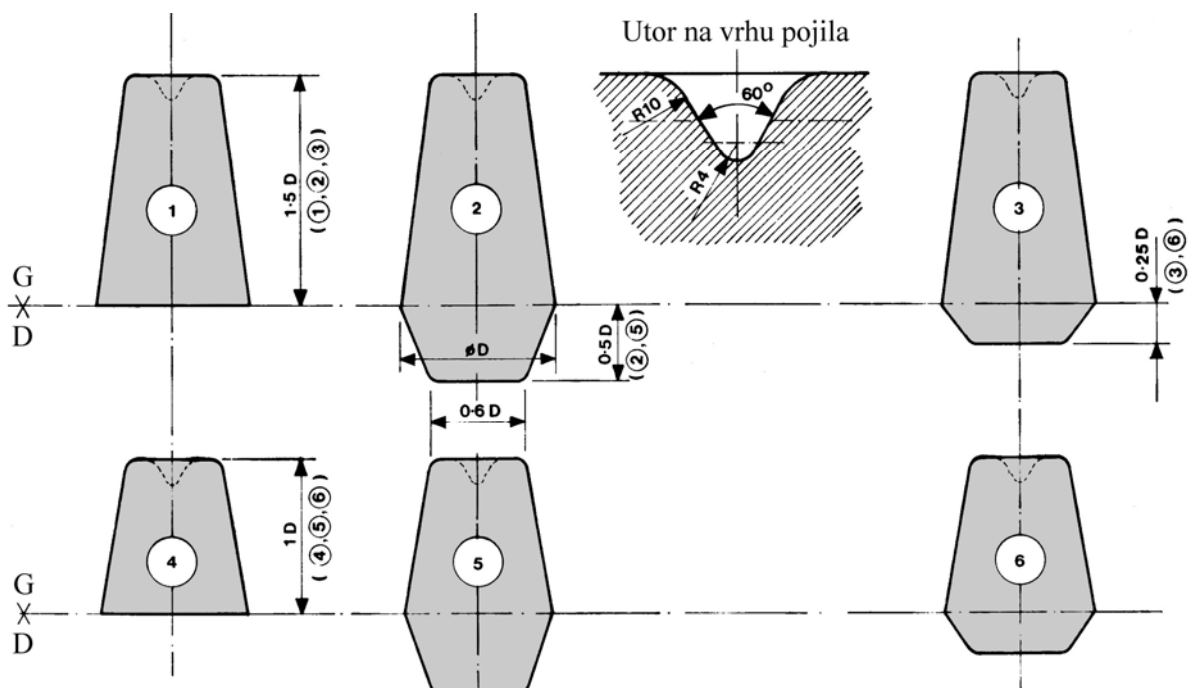
Bez obzira na oblik poprečnog presjeka vrata pojila, vrat pojila ne smije biti pod značajnijim toplinskim utjecajem odljevka ili pojila. Zbog toga dužina vrata pojila treba biti 4 – 5 puta veća od najmanje dimenzije poprečnog presjeka i treba biti postavljen vodoravno (primjena bočnih pojila (pojila sa strane odljevka)). Svako toplinsko djelovanje odljevka ili pojila može odgoditi skrućivanje vrata pojila, tako da skrućivanje vrata pojila ne završi u trenutku kada započinje skrućivanje odljevka, što u konačnici rezultira lošim napajanjem.

Pojilo se dimenzionira tako da se za napajanje odljevka osigura količina taljevine koja iznosi 5,0 % volumena odljevka, tj. volumen pojila iznosi 5,0 % volumena odljevka, ako je čitavo pojilo smješteno iznad najviše točke odljevka. Samo onaj dio pojila koji je iznad najviše točke odljevka može uspješno napajati odljevak (slika 5.14) i taj segment odljevka mora osigurati potrebnu količinu taljevine za napajanje.



Slika 5.14. Korisna (djelotvorna) količina taljevine za napajanje iz pojila

Preporučljiva je upotreba toplih zatvorenih pojila. Na slici 5.15 prikazani su oblici standardiziranih pojila. Upotreba nestandardnih pojila prihvatljiva je samo u slučaju ako se primjenom takvog pojila postiže veći izvadak.

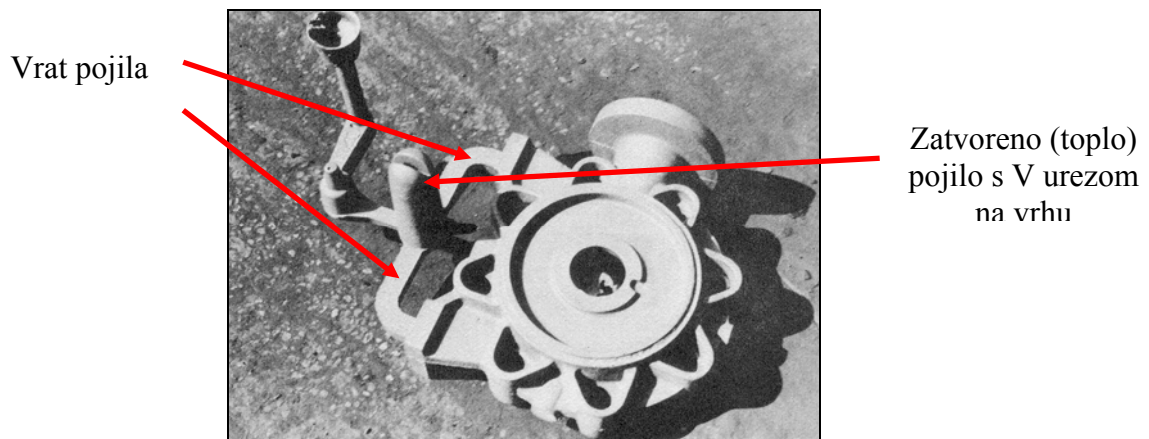


Slika 5.15. Oblici i odnosi dimenzija standardiziranih pojila. Tip 1 i 4 su vršna pojila (pojilo odozgo). G – gornja polovica kalupa, D – donja polovica kalupa

Potrebno je osigurati da je taljevina u pojilu u direktnom kontaktu sa atmosferom sve dok vrat pojila skrućuje, odnosno izbjeći stvaranje krute kore na vrhu pojila koja sprječava

djelovanje atmosferskog tlaka u pojilu. Iz navedenog razloga zatvorena pojila moraju imati utor na vrhu (dubine do 20,0 mm, što ovisi o veličini pojila, slika 5.15) ili V urez ili umetnutu Williamsovu jezgru.

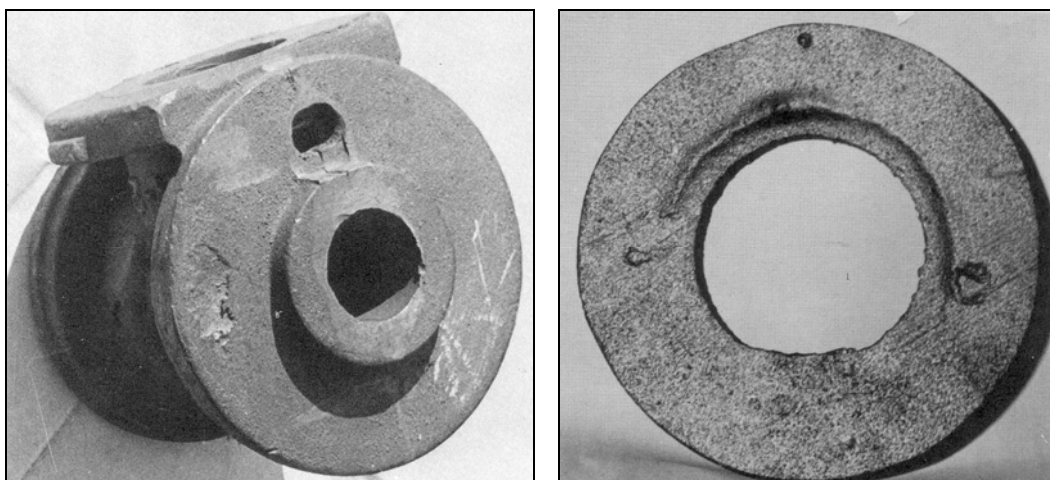
Pojilo može biti postavljeno na bilo koji segment sa modulom jednakim ili većim od značajnog. Ako su segmenti s većim poprečnim presjecima odijeljeni segmentima koji imaju modul manji od modula značajnog segmenta, svaki dio zahtjeva zasebno pojilo i/ili vrat pojila. Budući da je kod ove metode zona napajanja neograničena, obično je dovoljno jedno pojilo koje ima dva ili više vrata pojila (slika 5.16).



Slika 5.16. Komplexan odljevak koji se napaja iz jednog pojila ali kroz dva duga vrata pojila

Budući da se taljevina u kalupu nalazi pod povišenim tlakom, zahtijeva se odgovarajuća čvrstoća kalupa. Kod kalupa niske čvrstoće može doći do njihovog oštećenja. Osim toga, ako se kalup deformira, doći će do pada tlaka u kalupnoj šupljini što u konačnici rezultira nedovoljnim napajanjem (greške u odljercima).

Odljevci kod kojih je primijenjeno napajanje pod tlačnim opterećenjem mogu sadržavati greške koje potječu od nekompensiranog stezanja taljevine ili gubitka tlaka ekspanzije (greške uslijed sekundarnog stezanja – poroznost). Primjer grešaka na odljercima nastalih uslijed nekompensiranog stezanja taljevine prikazan je na slici 5.17. Greške su najčešće u obliku raznih uleknuća na površini.

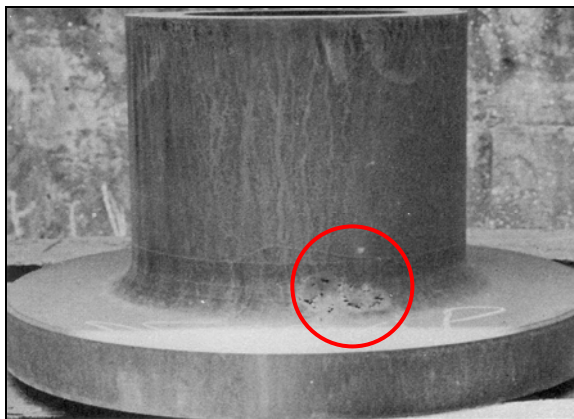


Slika 5.17. Greške na odljercima nastale uslijed nekompensiranog stezanja taljevine

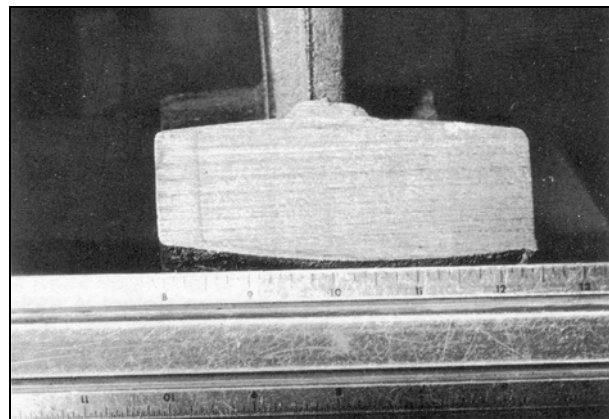
Ako se u odljevku pojavi greška uslijed nekompenziranog stezanje taljevine, najprije je potrebno provjeriti pojilo, tj. da li volumen pojila iznad najviše točke odljevka iznosi najmanje 5,0 % volumena odljevka, da li je taljevina u pojilu dovoljno dugo u kontaktu sa atmosferom i da li postoji usahlina (šupljina) uslijed stezanja na vrhu pojila. Ako nisu zadovoljeni ovi uvjeti pojilo vjerojatno ne obavlja svoju funkciju.

Ukoliko je pojilo pravilno dimenzionirano, uzrok greške je prerano skrućivanje vrata pojila. U tom slučaju potrebno je povećati modul vrata pojila.

Daleko češće greške u odljevcima kod kojih je primijenjeno napajanje pod tlačnim opterećenjem uzrokovana je sekundarnim stezanjem. Do grešaka uslijed sekundarnog stezanja dolazi ako je vrat pojila prevelik pa ekspanzija u odljevku napaja pojilo umjesto odljevak (slika 5.18a), ako kalup nije dovoljno čvrst (slika 5.18b), odnosno ne može izdržati tlak pri ekspanziji bez znatne plastične deformacije ili ako je loša metalurška kvaliteta taljevine (nedovoljna ekspanzija).



a)



b)

Slika 5.18. a) poroznost uzrokovana sekundarnim stezanjem otkrivena nakon strojne obrade, b) deformacija („napuhivanje“) odljevka odlivenog u svježu kalupnu mješavinu zbog nedovoljne čvrstoće kalupa (premda se ne može vidjeti sa slike, odljevak je porozan u segmentu koji zadnji skrućuje).

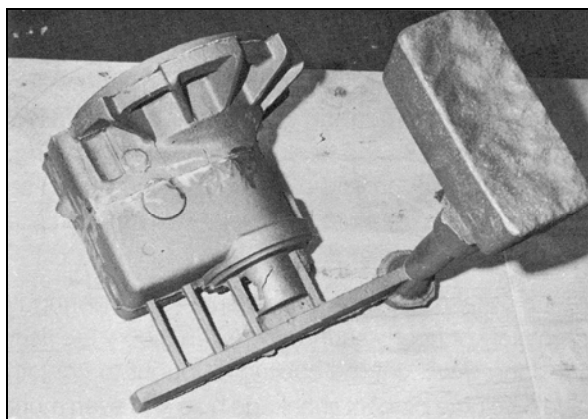
### 5.3.2.2 Napajanje pomoću uljevnog sustava

Metoda napajanja pomoću uljevnog sustava (engl. *Risering with the gating system*) ne zahtijeva primjenu pojila. Kod ove metode uljevni sustav djeluje kao pojilo (slika 5.19).

Ova metoda napajanja inačica je metode napajanja pod tlačnim opterećenjem i primjenjuje se samo za napajanje tankostjenih odljevaka. Osnovni principi ove metode isti su kao kod metode napajanja pod tlačnim opterećenjem, s razlikom da se za kompenzaciju stezanja taljevine ne primjenjuje pojilo već uljevni sustav.

Metoda napajanja pomoću uljevnog sustava može se primijeniti za napajanje odljevaka s najvećim modulom < 5,0 mm. Teorijski gledano, svi odljevci mogu se napajati pomoću uljevnog sustava. Međutim, ako je najveći modul odljevka > 5,0 mm ekonomičnije je primijeniti metodu napajanja pod tlačnim opterećenjem, jer bi u protivnom trebali veliki uljevni sustavi što bi smanjilo iskorištenje, odnosno izvadak.



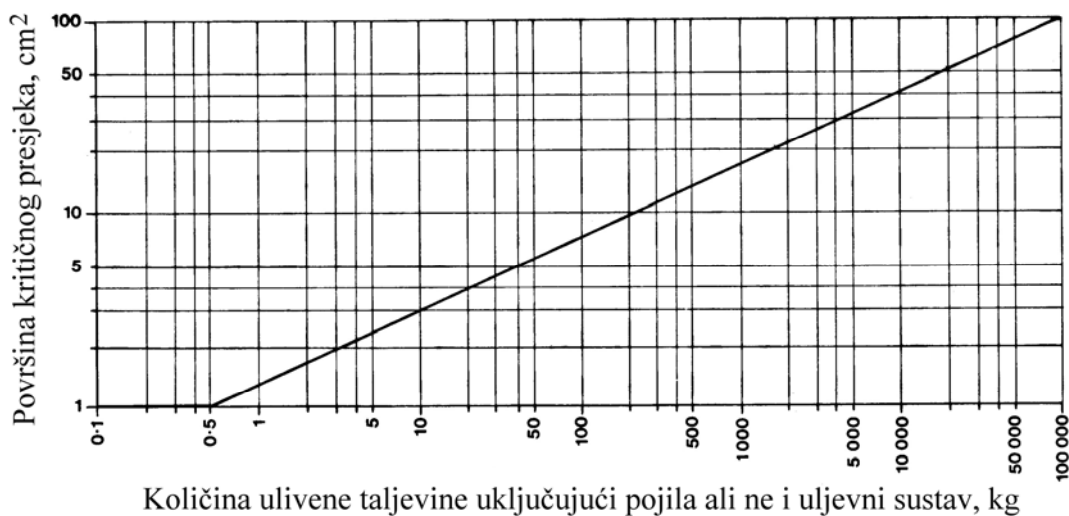


Slika 5.19. Primjer napajanja pomoću uljavnog sustava (uljevna čaša je predimenzionirana)

Sa smanjenjem značajnog modula odljevka ( $M_s$ ) smanjuje se i modul vrata pojila ( $M_v$ ). Stoga, kod tankostjenih odljevaka, ušće može preuzeti funkciju vrata pojila. Uljevna čaša i dio spusta koji se nalazi iznad najviše točke odljevka (odljevaka) djeluje kao pojilo.

Kod napajanja pomoću uljavnog sustava posebnu pažnju potrebno je obratiti na dijagram na slici 5.12, jer se zahtijeva stroga kontrola temperature lijevanja te pravilno dimenzioniranje ušća koja preuzimaju ulogu vrata pojila. Ako je temperatura taljevine u kalupu nakon ulijevanja preniska, javiti će se greške uslijed stezanja taljevine. Temperatura taljevine u kalupu nakon završetka lijevanja ne razlikuje se značajno od temperature lijevanja kod debelostjenih odljevaka. Međutim, ove dvije temperature mogu se značajno razlikovati kod lijevanja tankostjenih odljevaka, posebno ako je vrijeme lijevanja dugo. Zbog toga je potrebno primijeniti nešto više temperature lijevanja (slika 5.13).

Ako se tijekom dimenzioniranja ustanovim da je ušće pretjerano veliko, prekida se dimenzioniranje i mijenja metoda napajanja, odnosno primjenjuje se metoda napajanja pod tlačnim opterećenjem (u slučaju krutih kalupa) ili metoda napajanja kontrolom tlaka (u slučaju primjene kalupa niske čvrstoće). Definiranje da li je ušće prekomjerne veličine provodi se usporedbom površina ušća izračunatih na osnovi modula ušća sa onima u dijagramu na slici 5.20.



Slika 5.20. Površina kritičnog presjeka u uljevnom sustavu ovisno o ukupnoj količini ulivene taljevine

Prilikom dizajniranja uljavnog sustava koji se primjenjuje za napajanje potrebno je osigurati da je modul svake komponente uljavnog sustava barem jednako velik kao modul ušća ili veći. Sva količina taljevine potrebna za napajanje mora se nalaziti iznad najviše točke odljevka.

Greške koje se mogu pojaviti kod ovog načina napajanja, kao i korektivne mjere iste su kao kod metode napajanja pod tlačnim opterećenjem.

### 5.3.3 Napajanje kontrolom tlaka

Napajanje kontrolom tlaka ili metoda regulacije tlaka (engl. *Pressure control risering (PCR) ili Pressure-relief risering*) je vrlo često primjenjivana metoda za napajanje odljevaka od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva

Metoda napajanja kontrolom tlaka primjenjuje se za napajanje odljevaka s najvećim modulom  $> 5,0$  mm koji se lijevaju u kalupe od svježe kalupne mješavine, dakle kalupe niske čvrstoće.

Metoda napajanja kontrolom tlaka zasniva se na slijedećim principima (slika 5.21). Kada započne skrućivanje taljevine i ekspanzija uslijed izlučivanja grafita, potrebno je omogućiti da odljevak napaja pojilo. Povratno napajanje (odljevak  $\rightarrow$  pojilo) potrebno je zaustaviti prije završetka perioda ekspanzije, tako da se u kalupnoj šupljini zadrži upravo toliki tlak koji je dovoljan za kompenziranje sekundarnog stezanja.

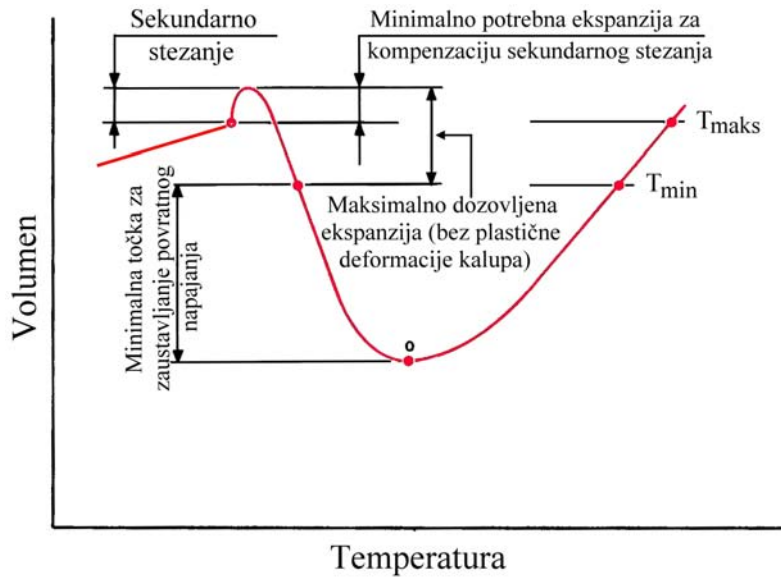


Slika 5.21. Princip metode napajanja kontrolom tlaka

Na slici 5.22 prikazan je utjecaj volumnih promjena tijekom skrućivanja na mehanizam napajanja kontrolom tlaka.

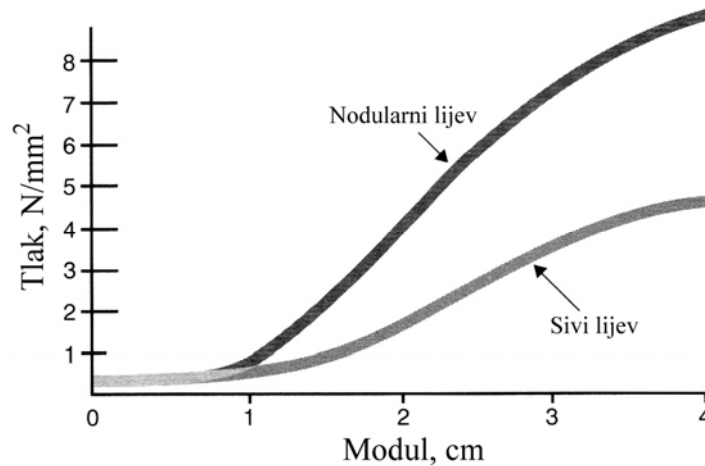
Nakon što je čitava kalupna šupljina, uključujući i uljevni sustav i pojila, ispunjena taljevinom, započinje hlađenje i stezanje taljevine. Stezanje taljevine odvija se od temperature koju taljevina ima u kalupu nakon završetke lijevanja do temperature u točki „o“ (slika 5.22) na krivulji volumnih promjena i kompenzira se dotokom taljevine iz pojila. Stezanje taljevine odvija se i u pojilu, odnosno pojilo napaja i svoje stezanje. Zbog ovog dvostrukog napajanja u pojilu se formira slobodan prostor. Kad završi period stezanja taljevine i započne ekspanzija zbog izlučivanja grafita dolazi do vraćanja taljevine iz odljevka u pojilo (povratno napajanje), pod uvjetom da je još uvijek kontakt između odljevka i pojila u tekućem stanju. Ako povratno napajanje nije spriječeno neće se razviti nikakav tlak i u odljevku će se pojaviti greške nastale uslijed sekundarnog stezanja. Greške u odljevku koje nastaju uslijed sekundarnog stezanja neće se pojaviti ako se povratno napajanje (odljevak  $\rightarrow$  pojilo) zaustavi (zbog punog pojila ili skrutnutog vrata pojila) u trenutku kada još uvijek preostaje dovoljno naknadne ekspanzije uslijed izlučivanja grafita da se kompenzira sekundarno stezanje. Tlak, odnosno porast

volumena, koji nastaje tijekom završnog dijela ekspanzije, tj. tijekom perioda kada se taljevina ne može vratiti u pojilo, mora biti dostatan za kompenzaciju sekundarnog stezanja, ali manji od granične vrijednosti tlaka iznad koje dolazi do plastične deformacije kalupa (oštećenje kalupa, „napuhivanje“ odljevka).



Slika 5.22. Utjecaj volumnih promjena tijekom skrućivanja na mehanizam napajanja kontrolom tlaka

Tlakovi koji se razvijaju tijekom perioda ekspanzije ne mogu se mjeriti sa adekvatnom točnošću. Ovi tlakovi nekoliko su puta veći od atmosferskog tlaka i uvijek veći kod nodularnog lijeva u odnosu na sivi lijev (slika 5.23).



Slika 5.23. Odnos između tlaka nastalog tijekom perioda ekspanzije kod skrućivanja sivog i nodularnog lijeva i modula odljevka

Iznos povratnog napajanja (odljevak → pojilo) može se kontrolirati na dva različita načina:

- odabirom modula vrata pojila koji skrućuje unutar zahtijevanog vremenskog perioda ili

- ograničenjem iznosa povratnog napajanja putem upotrebe zatvorenih pojila. Čim se zatvoreno pojilo napuni taljevinom tijekom povratnog napajanja, više nije moguće daljnje povratno napajanje. Smatra se da je primjena zatvorenih pojila sigurnija.

Pored utjecaja temperature lijevanja, dizajniranje sustava napajanja kontrolom tlaka u velikoj mjeri ovisi i o metalurškoj kvaliteti taljevine. Kod taljevine koja ima visoku metaluršku kvalitetu, potrebit tlak za kompenzaciju sekundarnog stezanja nakon zaustavljanja povratnog napajanja (koji ne dovodi do plastične deformacije kalupa) dostiže se u kraćem vremenskom roku nego kod taljevine koja ima lošu metaluršku kvalitetu. To znači da će kod taljevine s visokom metalurškom kvalitetom u trenutku dostizanja prethodno navedenog tlaka biti manji udio nastale krute faze u odnosu na taljevinu s lošom metalurškom kvalitetom, što omogućuje lakši tok, odnosno prijenos taljevine u sustavu napajanja. Udio krute faze od ~ 70 % smatra se gornjom granicom za prijenos taljevine u sustavu napajanja.

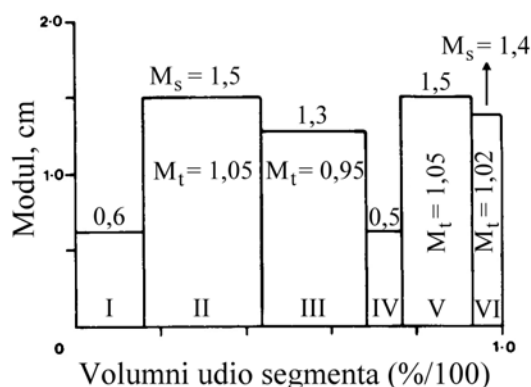
Kod ove metode napajanja mogu se primijeniti bočna i vršna pojila (pojilo odozgo). Uvijek je potrebno primijeniti zatvorena pojila. Potrebno je osigurati da vrh pojila ne skrutne prije vrata pojila, odnos da ima kontakt sa atmosferom. Stoga je na vrhu pojila potrebno napraviti urez (utor) (slika 5.15) ili primijeniti Williamsovu jezgru. Pri upotrebi otvorenih pojila sva ekspanzija tijekom izlučivanja grafita biti će „potrošena“ pri povratnom napajanju, odnosno prijenosu taljevine iz odljevka u pojilo. To će rezultirati velikim greškama između odljevka i pojila koje su nastale uslijed sekundarnog stezanja.

Vrat pojila treba biti vrlo kratak s najvećim mogućim modulom. Ušća mogu ulaziti u pojilo ili u odljevak i moraju biti tanka ( $\leq 6,0$  mm), ali široka i dugačka (4 puta debljina ušća). Ušća s malim modulima skrućuju neposredno nakon završetka lijevanja i na taj način omogućuju stvaranje dovoljno velike usahline u pojilu.

Temperatura lijevanja mora biti što je moguće viša (slika 5.13) i strogo kontrolirana, jer se time smanjuje veličina pojila te olakšava tečenje taljevine i napajanje. Lijevanje je potrebno provesti što brže, jer se time smanjuju temperaturni gubitci.

Za razliku od metode napajanja pod tlačnim opterećenjem, kod metode napajanja kontrolom tlaka značajni segment je onaj koji ima najveći modul.

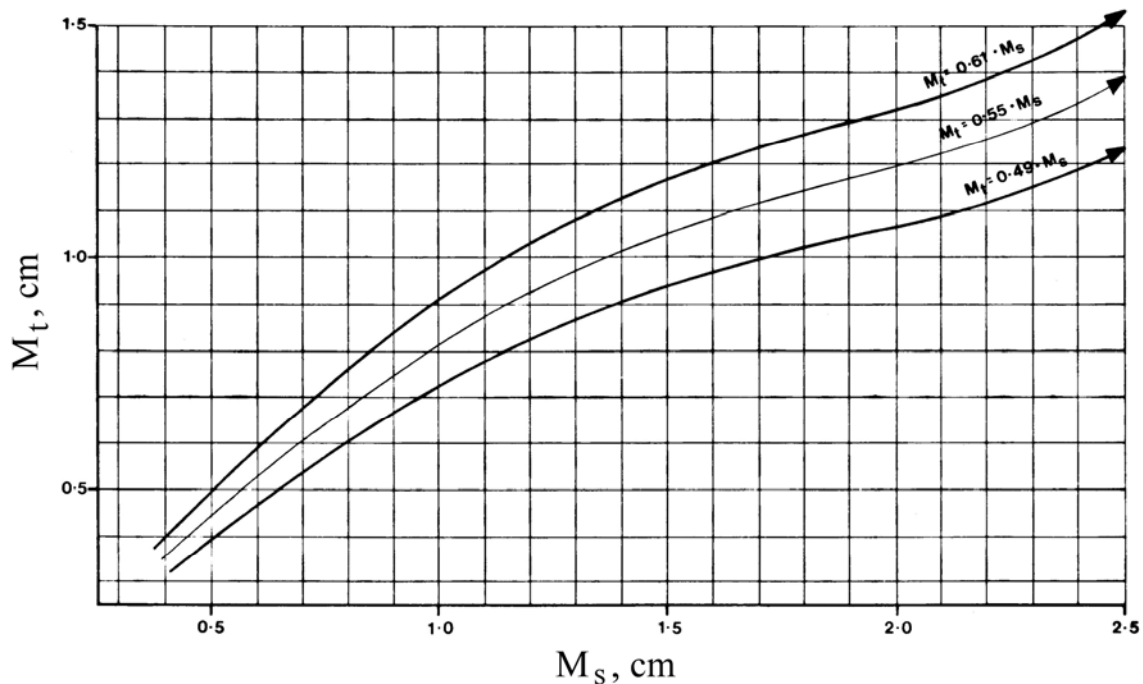
Prva faza u dizajniranju sustava napajanja obuhvaća pažljivu analizu odljevka i određivanje modula pojedinih segmenata. Ako se radi o kompleksnom odljevku, potrebno je konstruirati kumulativni dijagram (dijagram moduli - volumni udjeli pojedinih segmenata odljevka). Primjer kumulativnog dijagrama dan je na slici 5.24.



Slika 5.24. Primjer dijagrama moduli - volumni udjeli pojedinih segmenata za odljevak kompleksne konfiguracije

Sa slike 5.24 može se zaključiti da se odljevak neće moći napajati pomoću jednog pojila jer su deblji segmenti (II i III, V i VI) odvojeni tanjim segmentom (IV).

Za svaki deblji segment odljevka (segmenti s najvećim modulima u odljevku) potrebno je odrediti tzv. modul prijenosa ( $M_t$ ) (engl. *Transfer modul*) (slika 5.25). Modul prijenosa ( $M_t$ ) je važan za dimenzioniranje pojila te određivanje potrebnog broja pojila i njihovog položaja na kompleksnom odljevku.



Slika 5.25. Modul prijenosa ( $M_t$ ) u ovisnosti o značajnom modulu ( $M_s$ ) i metalurškoj kvaliteti taljevine (minimalna temperatura lijevanja 1380 °C). U slučaju loše metalurške kvalitete taljevine potrebno je upotrijebiti gornju krivulju, dok je u slučaju dobre metalurške kvalitete taljevine potrebno primijeniti donju krivulju.

Da bi se omogućio transport taljevine od pojila prema odljevku i obrnuto i još uvijek zadržala minimalna veličina pojila i vrata pojila, modul pojila, odnosno pojilo trebao bi biti dimenzioniran tako da je propustan za taljevinu do što je moguće dužih vremena, kada je ~ 70 % krute faze prisutno u sustavu napajanja, što je granična vrijednost za prijenos taljevine.

Susjedni segmenti s modulima koji su  $\geq M_t$  zajedno čine jednu jedinicu napajanja. Vrlo često jedan odljevka može biti jedna jedinica napajanja. U primjeru na slici 5.24, segmenti II i III te segmenti V i VI predstavljaju jedinice napajanja. Može se vidjeti da su jedinice napajanja odvojene sa svih strana segmentima (I i IV) čiji su moduli manji od susjednog modula  $M_t$ .

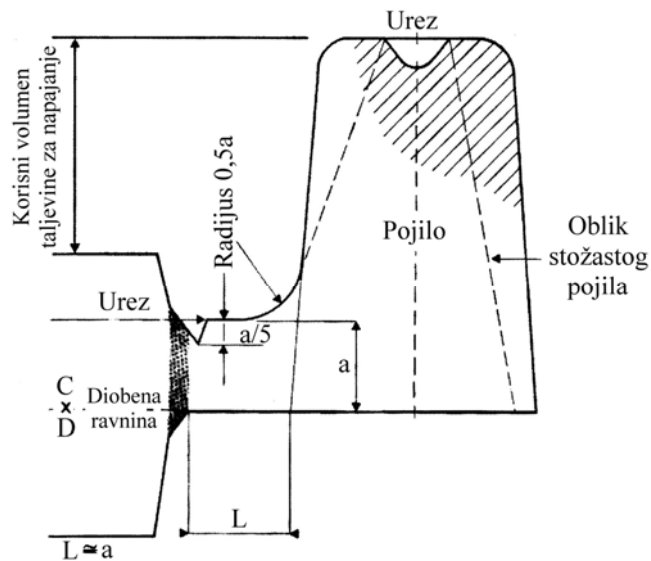
Za svaku jedinicu napajanja modul najvećeg segmenta smatra se značajnim modulom. U primjeru na slici 5.24 značajni modul ( $M_s$ ) za jedinicu napajanja koju čine segmenti II i III iznosi 15,0 mm. Značajno modul za jedinicu napajanja koju čine segmenti V i VI iznosi također 15,0 mm. Za svaku jedinicu napajanja potrebno je odrediti modul prijenosa  $M_t$  (slika 5.25).

Zatvorena pojila potrebno je dizajnirati prema slici 5.15. Svaka jedinica napajanja ima svoje pojilo. Modul pojila ( $M_p$ ) jednak je modulu prijenosa ( $M_t$ ).

Gornje točke (vrhovi) svih pojila moraju biti u istoj vodoravnoj ravnini. Niže pozicionirana pojila napajati će se iz pojila koja su smještena na višem nivou. To može rezultirati stvaranjem vrlo velikih usahlina u pojilima koja su na višoj razini, dok pojila koja su na nižim nivoima postaju ne funkcionalna.

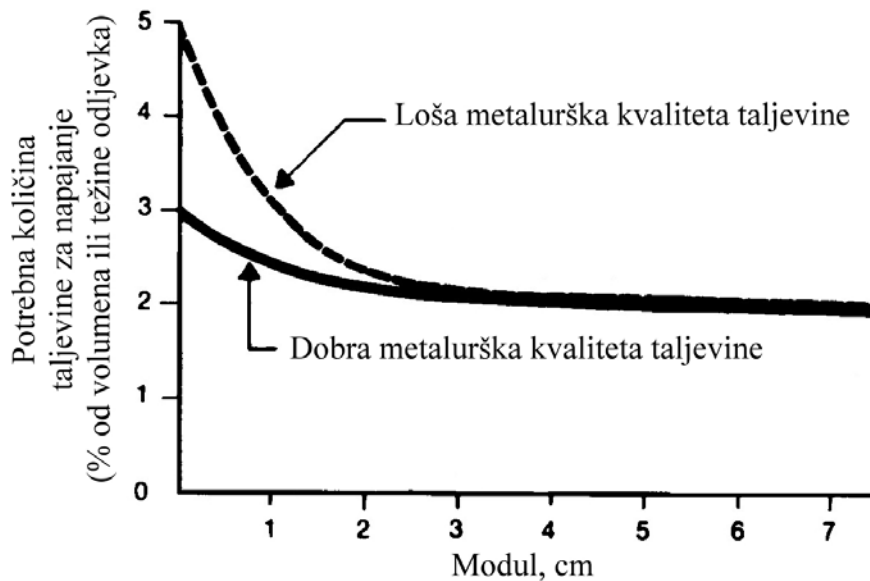
Vrat pojila treba biti kratak. Modul vrata pojila ( $M_v$ ) = 0,6 x  $M_t$ .

Spoj vrata pojila i odljevka može se usjeći, s tim da dubina ureza ne prelazi 1/5 debljine vrata pojila (slika 5.26). Time se postiže lakše uklanjanje pojila i vrata pojila sa odljevka.



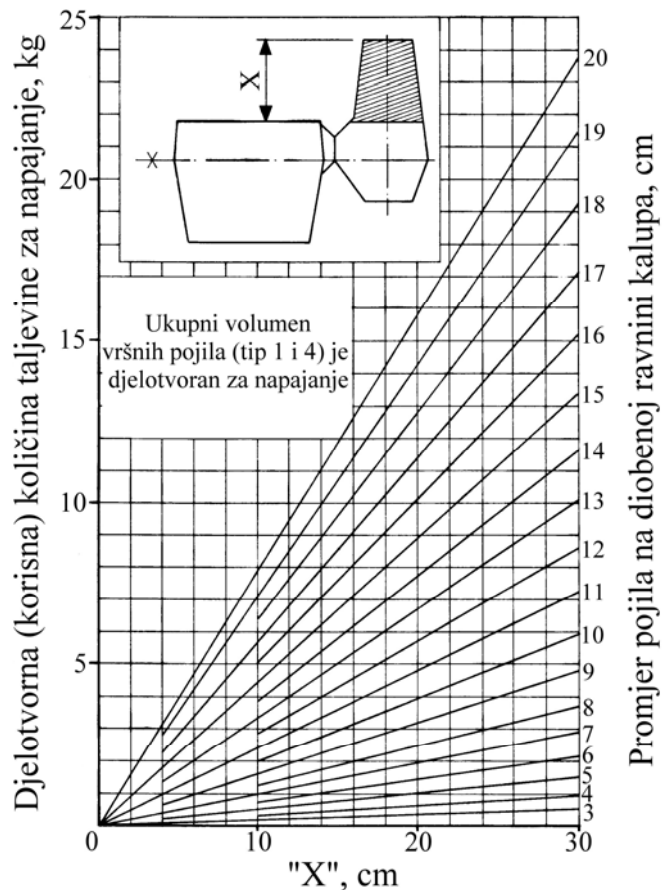
Slika 5.26. Zasijecanje spoja vrata pojila i odljevka u cilju lakšeg uklanjanja pojila

Potrebna (zahtijevana) količina taljevine za napajanje može se odrediti pomoću dijagrama na slici 5.27.



Slika 5.27. Potrebna količina taljevine za napajanje ovisno o modulu odljevka i metalurškoj kvaliteti taljevine

Raspoloživa (korisna djelotvorna) količina taljevine za napajanje (ovisi o veličini pojila i položaju pojila) može se odrediti iz dijagrama na slici 5.28. Samo onaj dio pojila koji se nalazi iznad najviše točke odljevka na koji je pričvršćen može kompenzirati stezanje taljevine u odljevku,



Slika 5.28. Korisna (djelotvorna) količina taljevine za napajanje iz Standardiziranih pojila sa slike 5.15

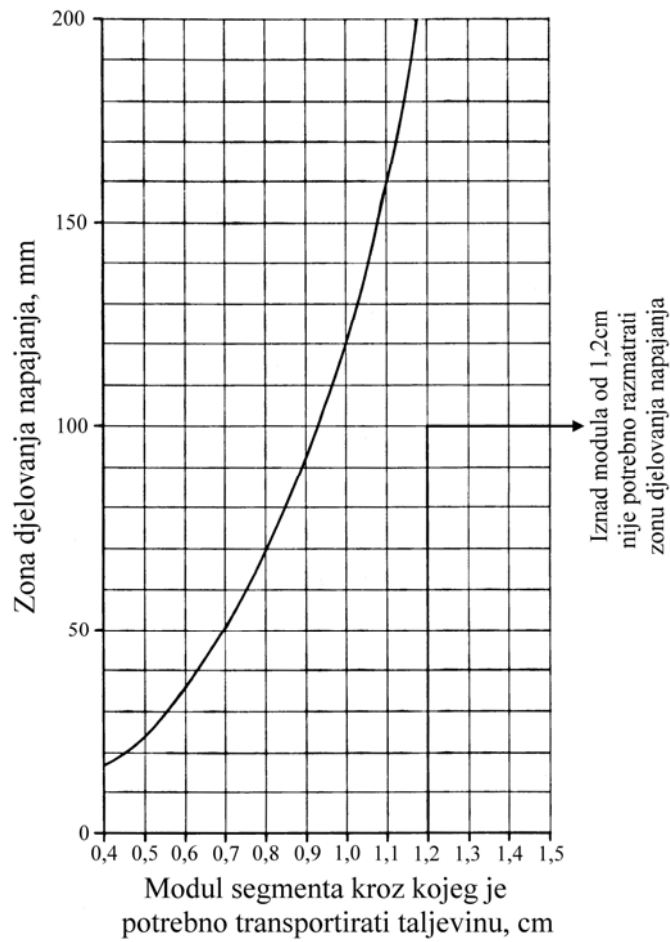
Ako pojila dimenzionirana na osnovi modula prijenosa ( $M_t$ ) ne osiguravaju potrebnu količinu taljevine za napajanje potrebno je povećati njihovu visinu. U tom slučaju pojila će imati veći modul od zahtijevanog. To međutim ne utječe na dimenzije vrata pojila.

Ušća trebaju skrutnuti odmah nakon završetka lijevanja. Zbog toga modul ušća ( $M_u$ ) mora biti  $< 0,3 \times M_t$ . Ako  $M_u$  ne zadovoljava navedeni uvjet, potrebno je povećati broj ušća (uz zadržavanje istog sumarnog poprečnog presjeka ušća kao prije povećanja broja ušća) (slika 5.20). Na taj način smanjuju se dimenzije i moduli pojedinačnih ušća, ali se ne mijenja vrijeme punjenja kalupa.

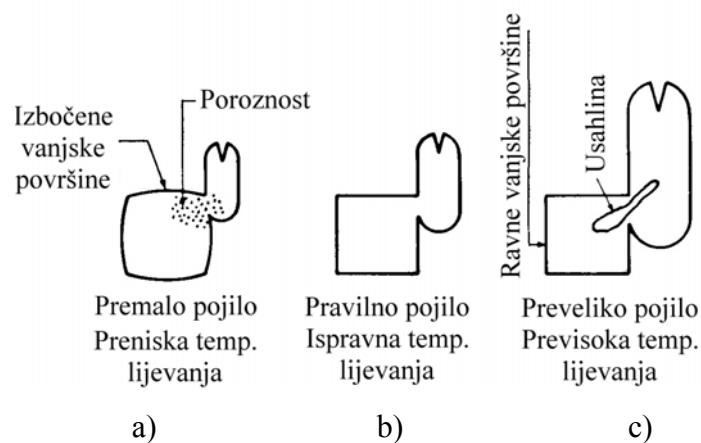
Zona djelovanja napajanja (slika 5.29) provjerava se na osnovi modula segmenata kroz koje se odvija prijenos (transport) taljevine. Ako nije osigurana adekvatna zona djelovanja napajanja potrebno je postaviti dodatna pojila. Provjera zone djelovanja napajanja provodi se samo kod metode napajanja kontrolom tlaka.

Problem povezan s zonom djelovanja napajanja je znatno izraženiji kod sivog lijeva u odnosu na nodularni lijev zbog različitih morfologija skrućivanja. Iznad modula od 1,2 cm nije prisutan problem povezan sa zonom djelovanja napajanja. Poboljšanjem metalurške kvalitete taljevine može se u vrlo velikoj mjeri eliminirati ovaj problem.

Greške koje se mogu pojaviti u odljevcima koji su napajani metodom kontrole tlaka prikazane su na slici 5.30.



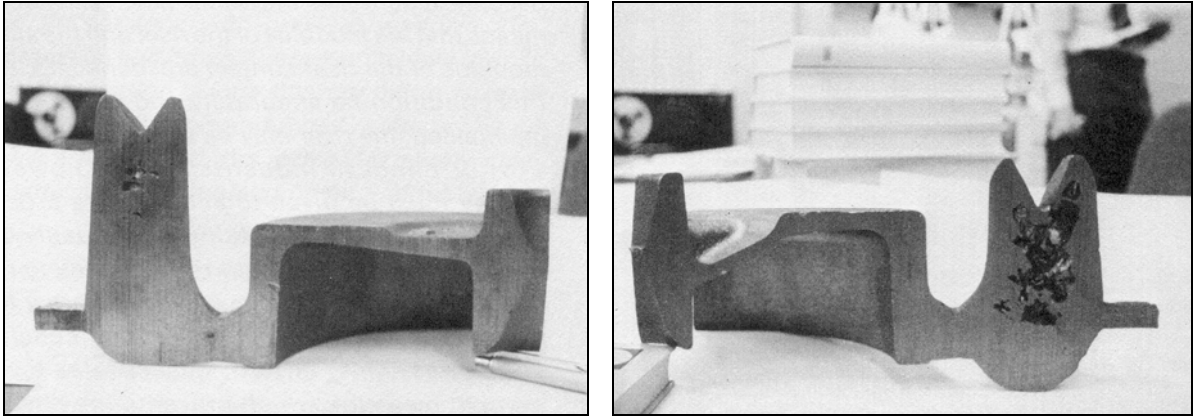
Slika 5.29. Određivanje zone djelovanja napajanja



Slika 5.30. Greške koje se mogu pojaviti u odljevcima koji su napajani metodom kontrole tlaka

Pojila kod napajanja metodom kontrole tlaka često su potpuno ispravna (bez grešaka). Postoje i slučajevi kada pojila nisu potpuno ispunjenja pri povratnom napajanju, odnosno u pojilima postoje usahlina, ali su odljevci bez grešaka (slika 5.31). Uzrok za to je prerano skrućivanje vrata pojila. Vrat pojila je skrutnuo prije no što je pojilo ispunjeno taljevinom pri povratnom napajanju od strane odljevka.





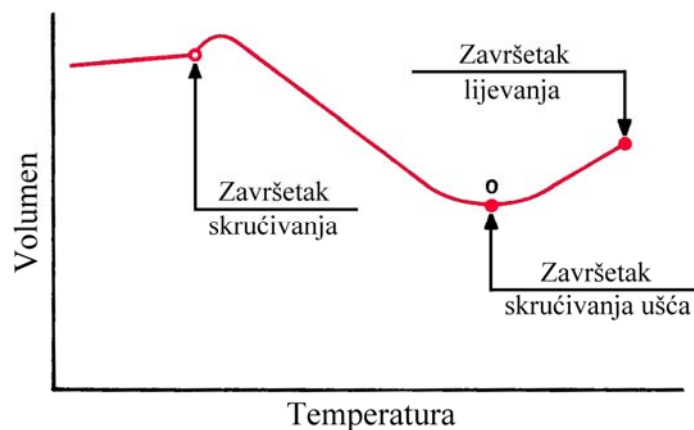
Slika 5.31. Primjer nekompletno ispunjenog pojila pri povratnom napajanju pojila od strane odljevka. Odljevci su bez grešaka

Kompletno ispunjeno pojilo ne mora u svim slučajevima biti garancija ispravnih odljevka, odnosno odsutnosti grešaka nastalih uslijed sekundarnog stezanja. Ako je u kalupnoj šupljini prisutan previsok tlak nakon povratnog napajanja (pojilo ispunjeno taljevinom) može doći do plastične deformacije kalupa. U tom slučaju u pojilu nema grešaka, dok su stranice odljevka izbočene i prisutne su greške uslijed sekundarnog stezanja.

### 5.3.4 Napajanje bez primjene pojila

Napajanje bez primjene pojila (engl. *Riserless design*) ili samonapajanje je ekonomski najpovoljniji način napajanja. Metoda je zasnovana na ekspanziji do koje dolazi tijekom izlučivanja grafita.

Princip metode napajanje bez primjene pojila prikazan je na slici 5.32. Ekspanzija započinje odmah nakon završetka lijevanja i skrućivanja ušća. Budući da nije prisutno stezanje taljevine (primarno stezanje), pojila nisu potrebna. Nastali tlak tijekom ekspanzije je više no dovoljan za kompenzaciju sekundarnog stezanja.



Slika 5.32. Utjecaj volumnih promjena tijekom skrućivanja na mehanizama napajanja bez primjene pojila

Tijek volumnih promjena prikazan na slici 5.32 prisutan je samo u slučajevima kada je prosječni modul odljevka  $\geq 25,0$  mm, a taljevina ima visoku metaluršku kvalitetu.

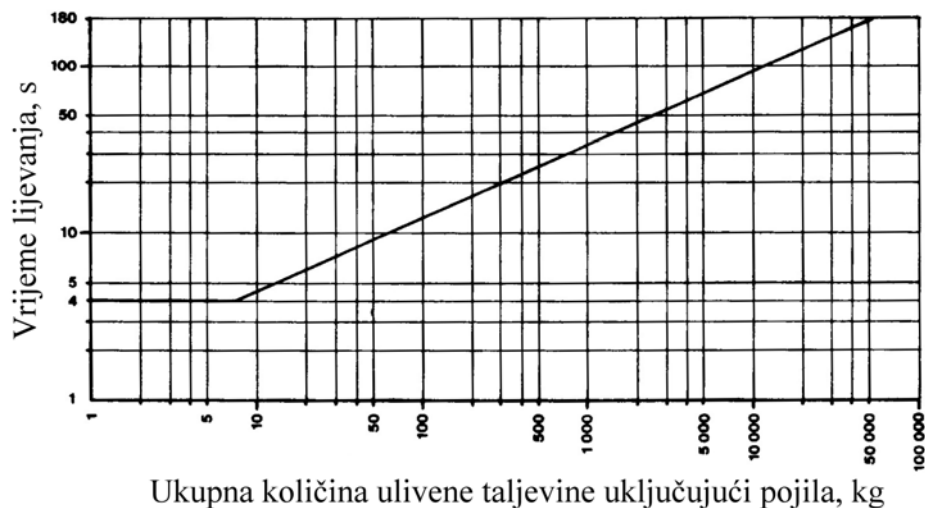
Analizom mehanizma skrućivanja željeznih ljevova ustanovljeno je da s porastom modula raste tlak nastao uslijed ekspanzije i temperatura početka ekspanzije. Maksimum se dostiže pri modulu 25,0 mm. Iznad modula od 25,0 mm ne događaju se značajnije promjene tlaka nastalog uslijed ekspanzije niti temperature pri kojoj započinje ekspanzija, jer iznad vrijednosti modula od 25mm uvjeti hlađenja približavaju se gotovo ravnotežnim uvjetima.

Temperatura lijevanja treba iznositi 1300 (može biti i niža) – 1350 °C, što se može vidjeti iz dijagrama na slici 5.13. Lijevanjem na relativno niskim temperaturama minimalizira se primarno stezanje (stezanje taljevine).

Da bi se u kalupnoj šupljini razvio potrebit tlak za kompenzaciju sekundarnog stezanja ušća moraju skrutnuti neposredno nakon završetka lijevanja. Zbog toga ušća moraju biti tanka, ali i ne pretanka da skrutnu tijekom lijevanja. Ušća moraju imati pravokutan poprečni presjek, s tim da je širina ušća 4 puta veća od debljine (visine), a dužina jednaka ili veća od širine.

Budući da se u kalupu razvijaju visoki tlakovi, zahtijeva se primjena kalupa visoke čvrstoće (kemijski vezane mješavine).

Lijevanje treba brzo provesti. Vrijeme lijevanja može se odrediti iz dijagrama na slici 5.33, a može biti i kraće.



Slika 5.33. Preporučeno vrijeme lijevanja odljevaka ovisno o ukupnoj količini taljevine koja se ulijeva u kalup (uključujući i pojila)

U praksi se primjenjuje i jedna varijacija metode samonapajanja koja koristi malo zatvoreno (sigurnosno) pojilo. Funkcija ovog pojila je kompenzacija potencijalnih odstupanja nekih od prethodno navedenih uvjeta.

Sigurnosno pojilo smješteno je na vrhu odljevka i ne treba biti veće od ~ 2,0 % mase taljevine koja se ulijeva u kalup. Potrebno je odabrati standardizirano pojilo (tip 1 ili tip 4) sa slike 5.15.

Greške uslijed stezanja taljevine, obično uleknuća vanjske površine, mogu biti rezultat neispunjenja nekih uvjeta: visoka čvrstoća kalupa, modul odljevka > 25,0 mm, ušća moraju brzo skrutnuti, visoka metalurška kvaliteta taljevine. U tom slučaju potrebno je primijeniti sigurnosno pojilo.

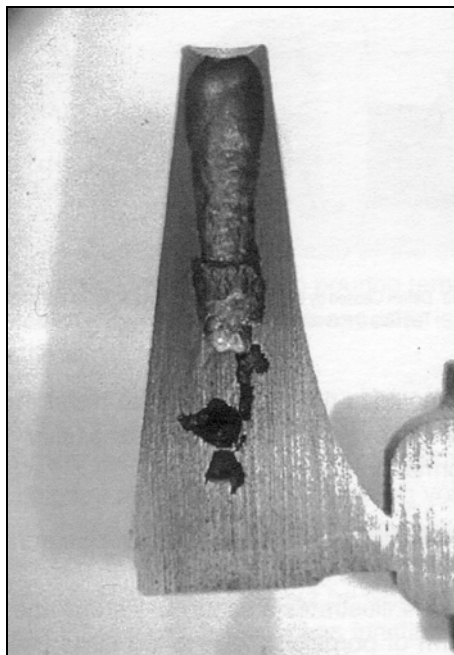
Unutarnje greške, obično u obliku poroznosti, mogu biti uzrokovane lošom metalurškom kvalitetom taljevine, nepravilno dimenzioniranim ušćima ili neadekvatnom čvrstoćom kalupa. Ako nije moguće povećati čvrstoću kalupa, potrebno je primijeniti metodu napajanja kontrolom tlaka.

### 5.3.5 Stožasta pojila

Vrlo je važno da se usahlina zbog primarnog stezanja brzo formira u pojilu, tako da pojilo može napajati odljevak taljevinom. Taljevina u pojilu mora biti u dodiru sa atmosferom da bi pojilo bilo funkcionalno. Prisutnost atmosferskog tlaka je obvezatna radi tlačenja taljevine u odljevak.

Klasični oblik pojila s zaokruženim ili ravnim vrhom, čak i sa „V“ urezom ili malim utorom na vrhu neće uvijek garantirati nastanak usahline u pojilu. Kontrola temperature kod primjene ovih pojila također je vrlo važna, jer ova pojila dobro funkcioniraju pri povišenim temperaturama lijevanja, ali ne i pri niskim temperaturama lijevanja.

Noviji pristup u tehnologiji napajanja je upotreba takvog oblika pojila koji uvijek garantira stvaranje usahline u vrhu pojila duž širokog područja temperatura lijevanja. Ova pojila poznata su pod nazivom stožasta pojila (engl. *bottle risers*). Na slici 5.34 prikazano je vertikalno presječeno stožasto pojilo koje ispravno funkcionira.



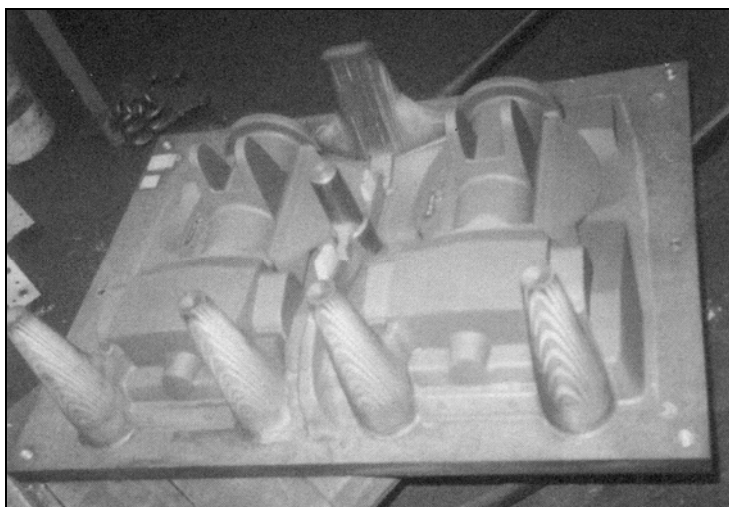
Slika 5.34. Stožasto pojilo koje ispravno funkcionira

Zbog koničnog oblika pojila i male površine vrha pojila usahlina se brzo formira, jer stezanje započinje gotovo odmah nakon završetka lijevanja u kalup. Ako usahlina postoji u pravom trenutku, stezanje taljevine u pojilu nastavlja se i potiskuje taljevinu u kalupnu šupljinu. Stožasto pojilo uvijek mora biti visoko i relativno tanko u odnosu na klasična pojila kod kojih omjer visina pojila : promjer pojila iznosi 1,5:1 (slika 5.15). Visina pojila daje potreban tlak taljevine, ali i osigurava potrebnu količinu taljevine za napajanje. Omjer visine i promjera kod stožastih pojila varira ovisno o količini taljevine potrebne za napajanje. Stožasta pojila za svoje funkcioniranje ne zahtijevaju strogu kontrolu temperature lijevanja. Na slici 5.35 prikazana je modelna ploča sa stožastim pojilima.

Ušća moraju biti dovoljno tanka (nizak modul) da bi se osiguralo njihovo rano skrućivanje i odvajanje odljevka od uljevnog sustava.

Dimenzioniranje stožastog pojila provodi se na osnovi značajnog modula odljevka i težine odljevka, koja određuje količinu potrebne taljevine za napajanje (uzima se 4,0 % od mase odljevka). Promjer pojila na dnu (bazi) iznosi  $4M_s$  + promjer vrha pojila, gdje  $M_s$  označava značajni modul odljevka. Visina pojila = omjer visine i promjera pojila x promjer

vrha pojila. Količina raspoložive taljevine za napajanje iz pojila različitih veličina može se odrediti iz tablice 5.1.



Slika 5.35. Modelna ploča s modelima odljevaka i stožastim pojilima

Tablica 9.2. Raspoloživa količina taljevine za napajanje iz stožastih pojila različitih veličina

Omjer visina pojila: promjer vrha pojila					
8:1		6:1		5:1	
Promjer vrha pojila, mm	Taljevina za napajanje, g	Promjer vrha pojila, mm	Taljevina za napajanje, g	Promjer vrha pojila, mm	Taljevina za napajanje, g
10	44	10	32	10	28
20	352	20	264	20	219
30	1186	30	890	30	741
40	2813	40	2110	40	1758
50	5495	50	4121	50	3434

Uvijek je potrebno primijeniti što je moguće više pojila. Smiju se samo primijeniti zatvorena pojila. Stožasta pojila također moraju imati mali utor na gornjoj površini (slika 5.34 i 5.35).

### 5.3.6 Egzotermna pojila

Temperatura taljevine u pojilu može se povećati primjenom egzotermne košuljice oko pojila (slika 5.36). Time se postiže efikasniji rad pojila i smanjuje opasnost od nastanka grešaka uslijed stezanja, posebno kod vršnih pojila.

Egzotermne košuljice načinjene su materijala kod kojih se, kada su izloženi temperaturi taljevine, odvijaju egzotermne kemijske reakcije ( $2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe$ ) koje rezultiraju oslobađanjem topline i zagrijavanjem taljevine u pojilu.

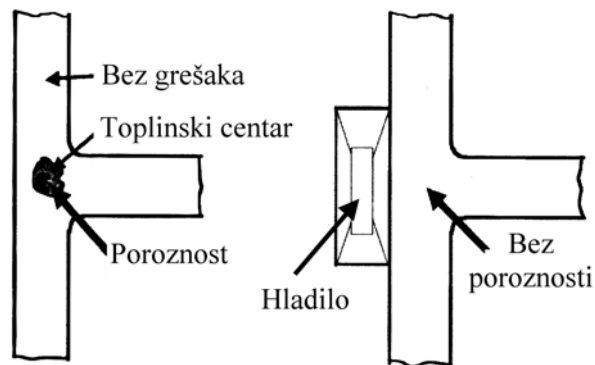
Pad temperature taljevine u pojilu može se smanjiti postavljenjem izolacijske košuljice oko pojila. Ove košuljice načinjene su od izolacijskih materijala koji omogućuju sporije odvođenje topline iz pojila.



Slika 5.36. Primjer egzotermnih košuljica

## 5.4 Hladila

Često je oblik odljevka tako kompleksan da je napajanje otežano i ne postoji povoljna lokacija za smještanje pojila. U tom slučaju na skrućivanje se može utjecati postavljanjem hladila u kalup koja oduzimaju dio topline iz taljevine u kalupu. Hladila lokalno mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka, pa se na tom mjestu formira "umjetna" krajnja zona odljevka. Tako se s velikom sigurnošću može postići usmjereno skrućivanje odljevka u smjeru prema pojilima. Princip upotrebe hladila prikazan je na slici 5.37.



Slika 5.37. Princip upotrebe hladila

Debljina hladila mora biti minimalno 50,0 % debljine stjenke odljevka na koju je postavljeno hladilo. Najčešće se primjenjuju hladila čija je debljina jednaka debljini stjenke koju hlade.

Smještanje ušća na tanke stjenke pomaže izjednačavanju temperaturne raspodjele i skrućivanja kroz kalup. Smještanje hladila na deblje presjeke ima isti učinak.

## 6. ULJEVNI SUSTAVI ZA SIVI, VERMIKULARNI I NODULARNI LIJEV

Uljevni sustav (engl. *Running system*, *Gating system*) je mreža kanala preko kojih se taljevina uvodi u kalup i ispunjava kalupnu šupljinu. Pravilno konstruiran uljevni sustav mora ispuniti niz zahtjeva:

- brzo popunjavanje kalupne šupljine bez turbulencije,
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgara,
- uklanjanje troske, oksidnih uključaka i erodiranog kalupnog materijala prije ulaska u kalupnu šupljinu,
- spriječiti zahvaćanje zraka i ukloniti plinove iz kalupne šupljine,
- izbjegavanje deformacije odljevaka,
- stvaranje pogodnih toplinskih gradijenata (općenito je pogodno uvesti najtopliji dio taljevine u onaj dio odljevka koji će se posljednji skrutnuti),
- omogućiti proizvodnju odljevaka uz korištenje minimalne količine taljevine (maksimalni izvadak),
- ekonomičnost uklanjanja uljevnog sustava,
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupovanja i lijevanja.

Neppravilno konstruirani uljevni sustav može uzrokovati različite greške na odljencima, što u konačnici može rezultirati njihovim odbacivanjem.

Općenito, uljevni sustav koji dobro funkcionira kod nodularnog lijeva obično će dobro funkcionirati i kod sivog lijeva. Međutim, to ne mora biti tako u obrnutom slučaju.

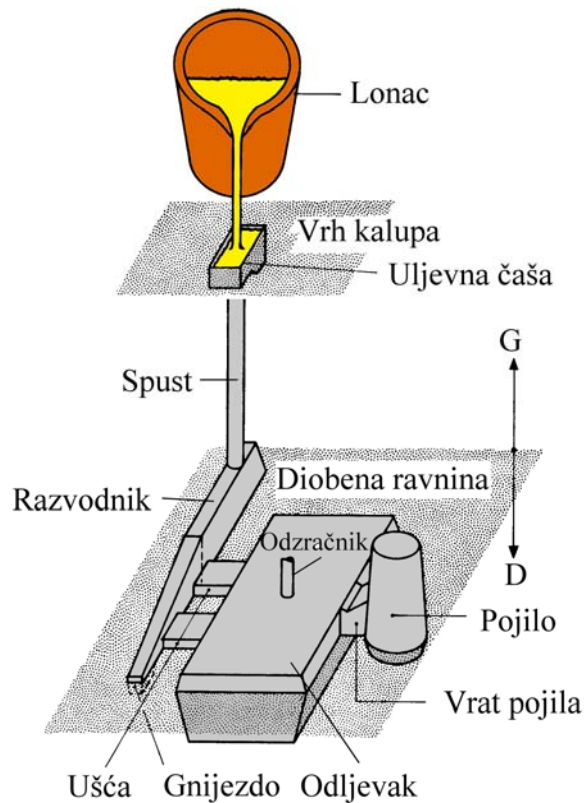
### 6.1 Osnovne komponente uljevnog sustava

Osnovne komponente uljevnog sustava su (slika 6.1):

- uljevna čaša,
- spust,
- podnožje spusta,
- razvodnik,
- ušće (ušća),
- odzračnik (odzračnici).

Uljevna čaša je prvi dio uljevnog sustava preko kojeg se taljevina uvodi u ostale dijelove sustava. Ona predstavlja rezervoar taljevine tijekom lijevanja održavajući uljevni sustav tijekom cijelog lijevanja punim, sprječava rasprskavanje taljevine pri izlivanju iz lonca te sprječava nasisavanje zraka i plinova, kao i ulaz troske u spust i ostale dijelove uljevnog sustava.

Dubina uljevne čaše treba biti 3 - 4 puta veća od promjera spusta kako se iznad spusta ne bi pojavilo vrtloženje koje uvlači zrak i trosku s površine taljevine. Postoje dva osnovna oblika uljevne čaše: koritasta i ljevkaasta. Koritasta uljevna čaša (slika 6.1) omogućuje izdvajanje metalnih oksida i troske iz taljevine prije ulaza u uljevni sustav, zbog čega se znatno češće primjenjuje.



Slika 6.1. Osnovne komponente uljavnog sustava (kalup s horizontalnom diobenom ravninom). G – gornja polovica kalupa, D – donja polovica kalupa

Prilikom lijevanja taljevina se ulijeva u dio uljevne čaše koji ima veću dubinu (slika 6.1), odnosno na suprotnoj strani od otvora spusta, a greben (prijelaz s dubljeg na plići dio uljevne čaše) koji se nalazi na dnu čaše olakšava izdvajanje nemetalnih uključaka iz taljevine.

Ljevka čaša ne ispunjava funkcije koje ima koritasta čaša i služi jedino da operateru olakša direktno lijevanje taljevine.

Spust je vertikalni kanal kružnog poprečnog presjeka. Na dnu spusta u većini slučajeva nalazi se podnožje spusta (zdenac), čija je uloga smanjiti turbulenciju i tendenciju nasisanja, tj. usisavanja zraka.

Prema zakonu o kontinuitetu strujanja spust bi se trebao sužavati prema dolje (u pravcu diobene ravnine kalupa), slično obliku mlaza fluida pri slobodnom padu, da bi se održala jednolična brzina toka taljevine. Ako se presjek spusta ne sužava prema dolje taljevina može nasisivati plinove za vrijeme ulijevanja.

Tijekom cijelog postupka lijevanja spust treba biti ispunjen taljevinom. Pri određivanju površine poprečnog presjeka na gornjem kraju spusta (na dnu čaše) koji se sužava prema dolje polazi se od toga da za isto vrijeme treba ista količina taljevine proteći na gornjem i na donjem kraju spusta (zakon o kontinuitetu strujanja). Primjenom jednadžbe kontinuiteta za presjeke na vrhu i dnu spusta ( $A_1$  i  $A_2$ ) dobiva se:

$$Q_1 = A_1 v_1, Q_2 = A_2 v_2 \quad (6.1)$$

gdje je:  $Q_1$  protok taljevine kroz presjek  $A_1$ ,  $v_1$  brzina protjecanja u presjeku  $A_1$ ,  $A_1$  površina poprečnog presjeka spusta na dnu čaše,  $Q_2$  protok taljevine kroz presjek  $A_2$ ,  $v_2$  brzina protjecanja u presjeku  $A_2$ ,  $A_2$  površina poprečnog presjeka na donjem kraju spusta.

Razvodnik prihvaća i umiruje taljevinu iz spusta, omogućuje izdvajanje uključaka i metalnih oksida te usmjerava taljevinu u ušća. Kod lijevanja u kalupe s horizontalnom

diobenom ravninom, razvodnik se obično postavlja vodoravno u donju ili gornju polovicu kalupa, što ovisi o vrsti uljevnog sustava.

Ušće (ušća) predstavljaju završni element uljevog sustava i povezuju razvodnik s kalupnom šupljinom.

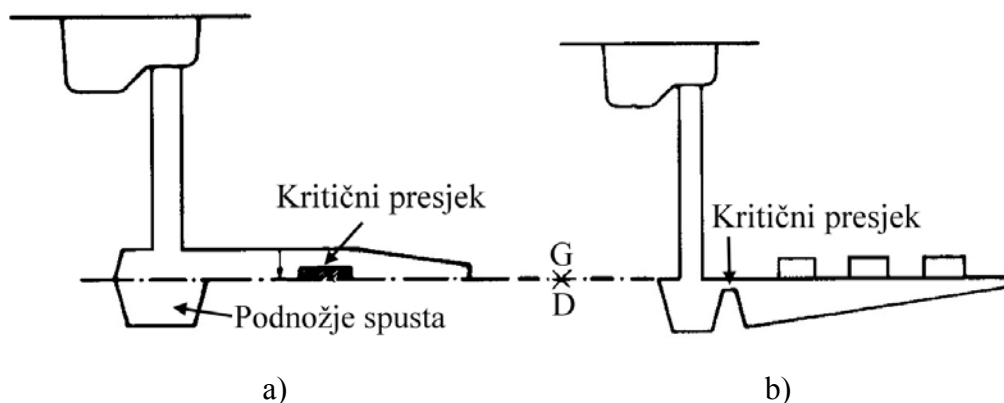
## 6.2 Vrste uljevnih sustava

Obzirom na tehniku izrade kalupa, odnosno diobenu ravninu, uljevni sustavi mogu se podijeliti na horizontalne i vertikalne. Horizontalni uljevni sustavi češći su u praksi. Vertikalni uljevni sustavi primjenjuju se kod automatskih linija za izradu kalupa (npr. Disamatic® linije).

Dio uljevnog sustava koji ima najmanji poprečni presjek određuje brzinu strujanja taljevine u sustavu, odnosno vrijeme punjenja kalupa i naziva se kritični presjek ili prigušenje (engl. *Choke*).

Uljevni sustavi klasificiraju se u dvije osnovne skupine ovisno o položaju kritičnog presjeka:

- tlačni uljevni sustavi ili uljevni sustavi s prigušenjem. Po obliku su konvergentni, jer se presjeci kanala sužavaju od spusta prema kalupnoj šupljini. Vrijedi odnos  $A_S > A_R > A_U$ , gdje je  $A_S$  površina poprečnog presjeka spusta,  $A_R$  površina poprečnog presjeka razvodnika,  $A_U$  površina poprečnog presjeka ušća (slika 6.2a),
- semitlačni uljevni sustavi ili uljevni sustavi bez prigušenja. Po obliku su divergentni, jer se u smjeru toka taljevine šire, pa za njih vrijedi odnos:  $A_S < A_R < A_U$  (slika 6.2b).



Slika 6.2. Vrste uljevnih sustava: a) tlačni uljevni sustav, b) semitlačni uljevni sustav (prigušenje na izlazu iz spusta ili u razvodniku u blizini spusta). Kalupi s horizontalnom diobenom ravninom

Kod tlačnih uljevnih sustava kritični presjek je presjek ušća, dok kod semitlačnih uljevnih sustava to može biti presjek na izlazu iz spusta ili presjek razvodnika u blizini spusta (spoj sa podnožjem spusta) (slika 6.2).

U praksi se primjenjuju i tzv. hibridni uljevni sustavi (engl. *Hybrid gating systems*) koji inkorporiraju povoljna svojstva, odnosno prednosti tlačnih i semitlačnih uljevnih sustava u jednom uljevnom sustavu. Hibridni uljevni sustav sadrži elemente tlačnog i semitlačnog uljevnog sustava.



Najvažnije karakteristike tlačnih uljernih sustava su:

- svi dijelovi uljernih sustava su puni tijekom lijevanja,
- ako ima više ušća na jednom razvodniku, kroz svako ušće prolazi približno jednaka količina taljevine (pod uvjetom da imaju jednake površine presjeka),
- masa taljevine u uljernih sustavu je manja u usporedbi s uljernih sustavom bez prigušenja, tj. postiže se veće iskorištenje taljevine,
- zbog velike brzine strujanja taljevine u ušću može se dogoditi rasprskavanje i stvaranje vrtloga oko ušća,
- uklanjanje uljernih sustava sa odljevka zahtijeva manje rada i kraće brušenje na mjestu dodira ušća i odljevka u odnosu na uljevni sustav bez prigušenja.

Najvažnije karakteristike semitlačnih uljernih sustava su:

- zbog velike površine poprečnog presjeka ušća taljevina ulazi u kalupnu šupljinu s malom brzinom. pa je manja vjerojatnost rasprskavanja, oksidacije taljevine i stvaranja vrtloga oko ušća,
- kroz svako ušće ne prolazi jednaka količina taljevine. Ovaj nedostatak može se ukloniti prikladnom konstrukcijom razvodnika: presjek razvodnika sužava se u smjeru tečenja taljevine,
- da bi svi dijelovi sustava bili uvijek puni razvodnik treba postaviti u donji dio kalupa,
- masa taljevine u ovom uljernih sustavu je veća nego u sustavu s prigušenjem, zbog čega je manje iskorištenje taljevine.

Kod tlačnog uljernih sustava razvodnik i ušće (ušća) smješteni su u gornjoj polovici kalupa na diobenoj ravnini (slika 6.2a). Kod semitlačnog uljernih sustava razvodnik (zajedno s kritičnim presjekom) je smješten u donjoj polovici kalupa ispod diobene ravnine, a ušća u gornjoj polovici kalupa na diobenoj ravnini (slika 6.2b).

Ako se jedan odljevak nalazi u kalupu i potrebno ga je odliti za npr. 8 s, onda 10 takvih identičnih odljevaka koji se nalaze u jednom velikom kalupu također treba odliti za 8. Ako se primjenjuje tlačni uljevni sustav u oba slučaja, to bi rezultiralo povećanjem ukupne površine kritičnog presjeka za 10 puta u odnosu na površinu kritičnog presjeka u slučaju lijevanja samo jednog odljevka, što utječe na dimenzije razvodnika i spusta (smanjuje se izvadak). Ako se umjesto tlačnog uljernih sustava upotrijebi semitlačni uljevni sustav u slučaju lijevanja većeg broja odljevaka u jednom kalupu, potrebna površina kritičnog presjeka biti će znatno manja. Semitlačni uljevni sustavi pogodniji su u slučajevima lijevanja većeg broja manjih odljevaka u jednom kalupu, jer pružaju veći izvadak. Tlačni uljevni sustavi pogodniji su za lijevanje manjeg broja težih odljevaka u jednom kalupu.

### **6.3 Osnove dimenzioniranja uljernih sustava**

Uljevni sustav može se dimenzionirati (proračunati) numeričkim ili grafičkim metodama. Grafičke metode daju brže rezultate i zasnovane su na dijagramima koji su rezultat numeričkih proračuna za veliki broj različitih slučajeva.

Konstruiranje, odnosno dimenzioniranje uljernih sustava zasniva se na nizu teorema, odnosno zakonitosti: Bernoullijev teorem, Torricellijev teorem, zakon o kontinuitetu strujanja, Pascalov zakon, Stokesov zakon, Newtonovim zakonima, Reynoldsov broj itd.

Uljevni sustav se dimenzionira počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek (kritični presjek), koji određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Vrijeme punjenja kalupne šupljine također ovisi o kritičnom presjeku.

Za dimenzioniranje kritičnog presjeka upotrebljava se jednačba kontinuiteta primijenjena na najuži, odnosno kritični presjek ( $A_k$ ):

$$Q_k = A_k v_k \quad (6.2)$$

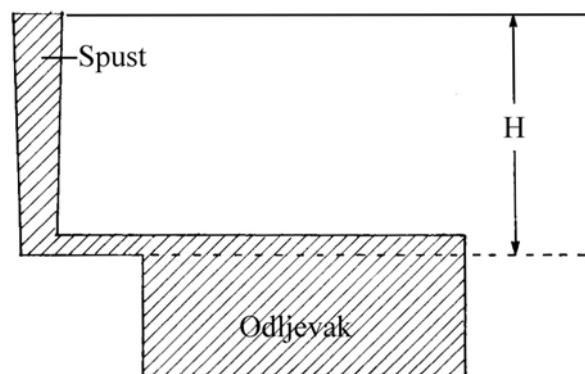
gdje je:  $Q_k$  – intenzitet strujanja kroz kritični presjek ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $A_k$  – površina kritičnog presjeka ( $\text{cm}^2$ ),  $v_k$  – brzina taljevine kroz kritični presjek ( $\text{cm}/\text{s}$ ).

Brzina taljevine u kritičnom presjeku može se izračunati na osnovi Torricellijeve jednačbe, s tim da se uvede korektivni faktor koji uzima u obzir gubitke uslijed trenja:

$$v_k = \mu \sqrt{2gH} \quad (6.3)$$

gdje je:  $\mu$  – faktor gubitaka uslijed trenja,  $g$  – gravitacijsko ubrzanje ( $9,81\text{m}/\text{s}^2$ ),  $H$  – vertikalna udaljenost između nivoa taljevine u čaši i razine kritičnog presjeka (cm).

Jednačba (6.3) vrijedi za slučaj kada je odljevak u smješten u donji dio kalupa (slika 6.3).



Slika 6.3. Određivanje kritičnog presjeka u slučaju kada je odljevak smješten u donji dio kalupa

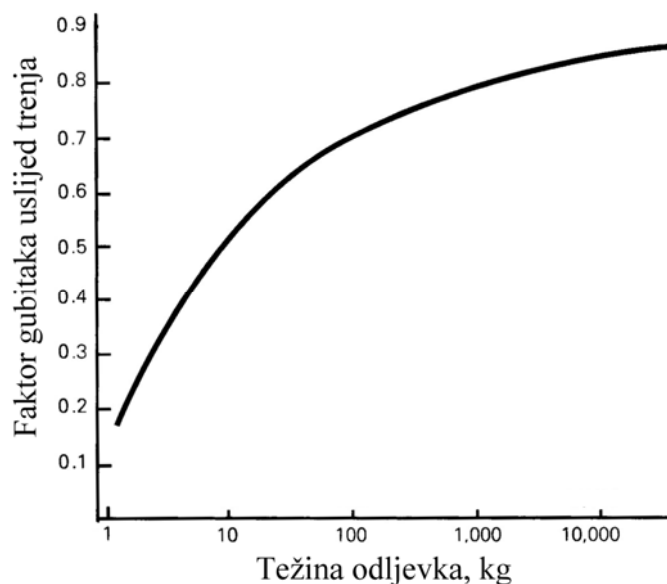
Tijekom lijevanja taljevine u kalup dio potencijalne energije taljevine (najveća je na vrhu uljevne čaše) gubi se uslijed trenja u uljevnom sustavu. Zbog toga je u jednačbu (6.3) uvršten faktor gubitaka uslijed trenja ( $\mu$ ).

Gubitak energije zbog trenja produžuje vrijeme punjenja kalupa i mora se uzeti u obzir pri proračunu površine kritičnog presjeka i vremena lijevanja. Vrijednost faktora gubitaka uslijed trenja može se odrediti iz dijagrama na slici 6.4.

Na osnovi jednačbe (6.2) i (6.3) uzimajući u obzir faktor gubitaka uslijed trenja, može se izračunati površina kritičnog presjeka kada je cijeli odljevak smješten u donji dio kalupa:

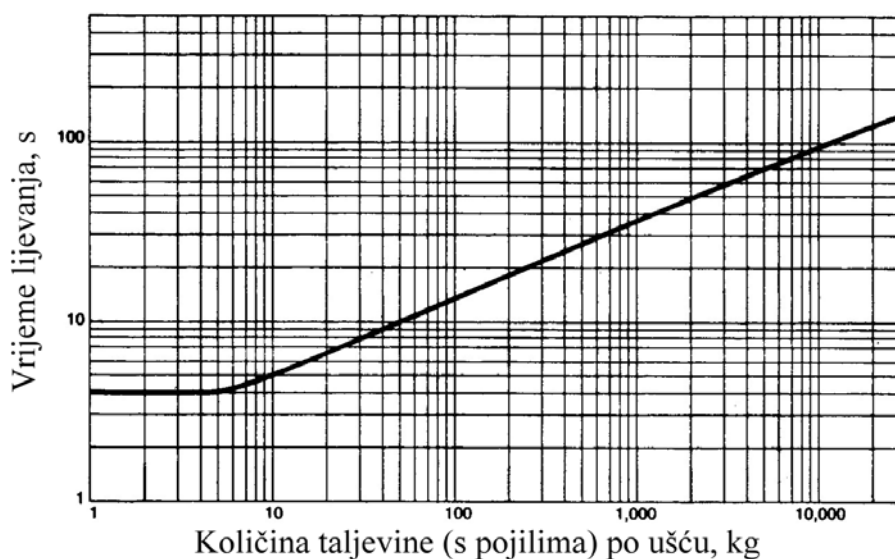
$$A_k = \frac{V_D}{t\mu\sqrt{2gH}} \quad (6.4)$$

gdje je:  $V_D$  – volumen odljevka u donjem dijelu kalupa (u ovom slučaju jednak je ukupnom volumenu odljevka) ( $\text{cm}^3$ ),  $t$  – vrijeme lijevanja (s).



Slika 6.4. Dijagram za određivanje faktora gubitaka uslijed trenja ovisno o težini odljevka

Vrijeme lijevanja može se odrediti iz dijagrama na slici 6.5.



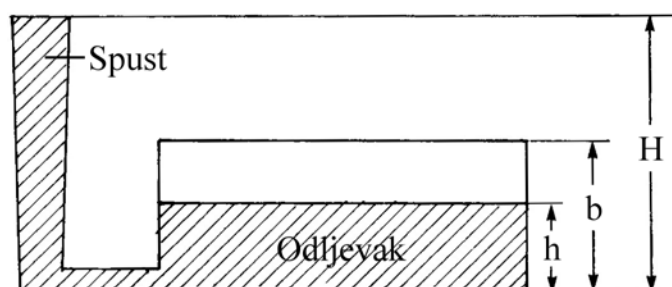
Slika 6.5. Preporučeno vrijeme lijevanja odljevaka ovisno o količini taljevine koja se ulijeva u kalup (uključujući i pojila)

Ako se ušće nalazi na diobenoj ravnini (kao u prethodnom slučaju), a odljevak u gornjem dijelu kalupa umjesto u donjem (slika 6.6), tijekom lijevanja smanjuje se tlačna visina taljevine u spustu, odnosno metalostatski tlak, a s time i brzina taljevine u ušćima. Pored faktora gubitaka uslijed trenja potrebno je uzeti u obzir i povratni tlak koji nastaje kada nivo taljevine u kalupnoj šupljini bude viši od razine kritičnog presjeka.

Ako se npr. radi o tlačnom uljevnom sustavu, sukladno slici 6.6, brzina u ušću (predstavlja kritični presjek kod tlačnog uljavnog sustava) u bilo kojem trenutku lijevanja određena je slijedećim izrazom:

$$v_U = \mu\sqrt{2g}\sqrt{H-h} \quad (6.5)$$

gdje  $h$  predstavlja trenutnu visinu taljevine u kalupnoj šupljini.



Slika 6.6. Određivanje kritičnog presjeka u slučaju kada je odljevak smješten u gornji dio kalupa

Prosječna brzina u ušću definirana je slijedećom jednačinom:

$$v_U = \frac{\mu}{b} \sqrt{2g} \int_0^b (H-h)^{\frac{1}{2}} dx = \frac{2\sqrt{2g\mu}}{3b} \left[ H^{\frac{3}{2}} - (H-b)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (6.6)$$

gdje je:  $b$  – visina odljevka u gornjem dijelu kalupa, odnosno visina odljevka iznad diobene ravnine (u ovom slučaju ukupna visina odljevka) (cm).

Primjenom jednačine kontinuiteta i jednačine (6.6) moguće je dobiti jednačinu za izračunavanje kritičnog presjeka u slučaju kada je cijeli odljevak smješten u gornji dio kalupa:

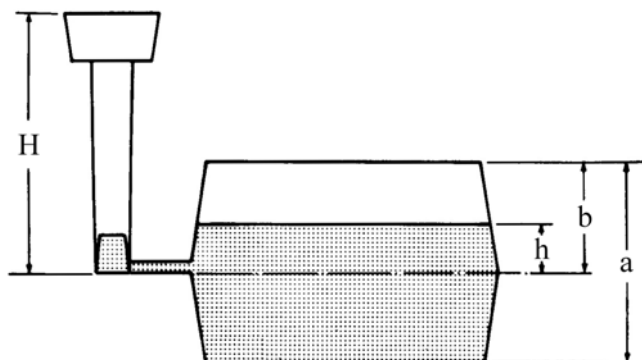
$$A_k = \frac{1,5(b)V_G}{\mu\sqrt{2g} \left[ \sqrt{H^3} - \sqrt{(H-b)^3} \right]} \quad (6.7)$$

gdje je:  $V_G$  – volumen odljevka u gornjem dijelu kalupa (u ovom slučaju volumen odljevka) (cm<sup>3</sup>)

Kod određivanja volumena odljevka mora se uzeti u obzir i volumen pojila.

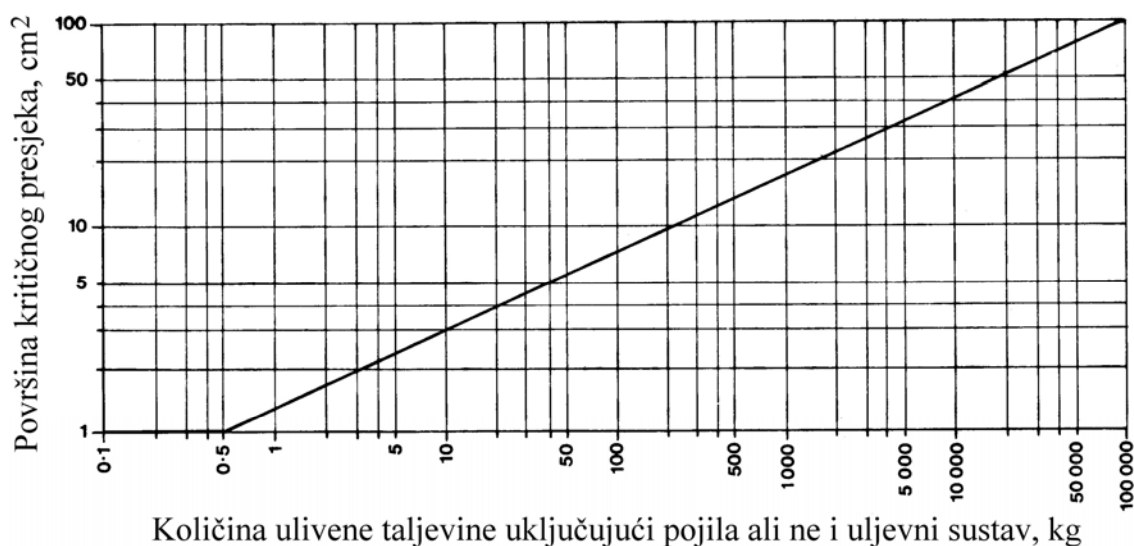
Ako se odljevak nalazi djelomično u gornjem dijelu, a djelomično u donjem dijelu kalupa (slika 6.7), ne djeluje jednaka visina taljevine tijekom cijelog vremena lijevanja. Pored faktora gubitaka uslijed trenja potrebno je uzeti u obzir i povratni tlak koji nastaje kada nivo taljevine u kalupnoj šupljini bude viši od razine kritičnog presjeka. U tom slučaju površina kritičnog presjeka može se odrediti prema izrazu:

$$A_k = \frac{1}{\mu\sqrt{2g}} \left[ \frac{V_D}{\sqrt{H}} + 1,5(b) \frac{V_G}{\sqrt{H^3} - \sqrt{(H-b)^3}} \right] \quad (6.8)$$



Slika 6.7. Određivanje kritičnog presjeka u slučaju kada je odljevak smješten jednim dijelom u gornji, a jednim dijelom u donji dio kalupa

Za brzo određivanje površine kritičnog presjeka može se primijeniti dijagram na slici 6.8. Ovaj dijagram baziran je na određenim pretpostavkama koje u većini slučajeva nose zanemarive greške u proračun.



Slika 6.8. Ukupna površina kritičnog presjeka u uljevnom sustavu ovisno o ukupnoj količini ulivene taljevine

Ako se kritični presjek ( $A_k$ ) odnosi na poprečni presjek ušća (tlačni uljevni sustav), dobivenu površinu kritičnog presjeka ušća potrebno je podijeliti s brojem ušća povezanih s odljevkom:

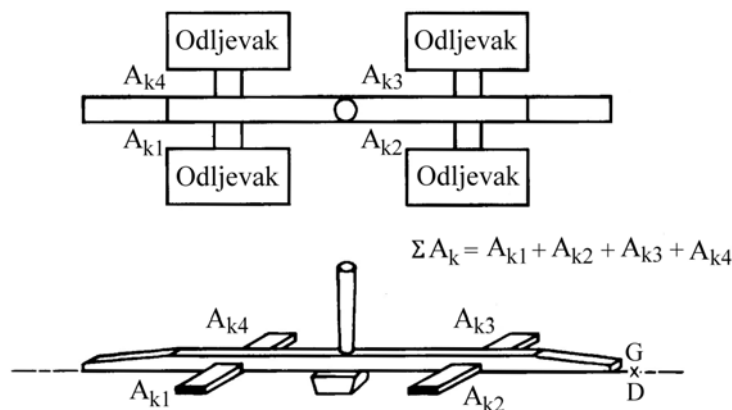
$$A_U = \frac{A_k}{n} \quad (6.9)$$

gdje je  $n$  broj ušća.

Na osnovi površine kritičnog presjeka određuje se površina poprečnog presjeka spusta i razvodnika.

## 6.4 Principi konstruiranja tlačnih uljernih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom

Kritični presjek mora biti spoj razvodnika i ušća jer ušće ima najmanji poprečni presjek u uljevnom sustavu. Površina kritičnog presjeka (ušća) može se izračunati na prethodno opisani način ili odrediti pomoću dijagrama na slici 6.8. Površina kritičnog presjeka ( $A_k$ ) određena iz dijagrama na slici 6.8 vrijedi samo za jedan odljevak, odnosno predstavlja ukupnu površinu poprečnih presjeka svih ušća na jednom odljevku. Ako se u kalupu nalazi nekoliko identičnih odljevaka, površinu kritičnog presjeka određenu iz dijagrama na slici 6.8 potrebno je pomnožiti s brojem odljevaka u kalupu (slika 6.9) i na osnovi tog podatka provesti dimenzioniranje razvodnika i spusta.



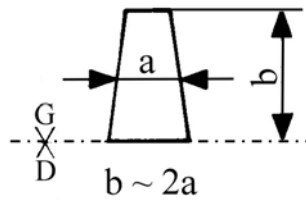
Slika 6.9. Određivanje kritičnog presjeka u tlačnom uljevnom sustavu pri lijevanju nekoliko odljevaka u kalupu

Preferira se primjena širokih ušća s malom visinom (širina ušća = 4 puta visina ušća). Ako se primjenjuje napajanje pomoću uljernih sustava mogu se primijeniti i drugi odnosi širine i visine ušća (širina ušća = 2 puta visina ušća, (širina ušća = visina ušća)). Maksimalna vrijednost modula ostvaruje se primjenom ušća s kružnim ili kvadratnim poprečnim presjekom.

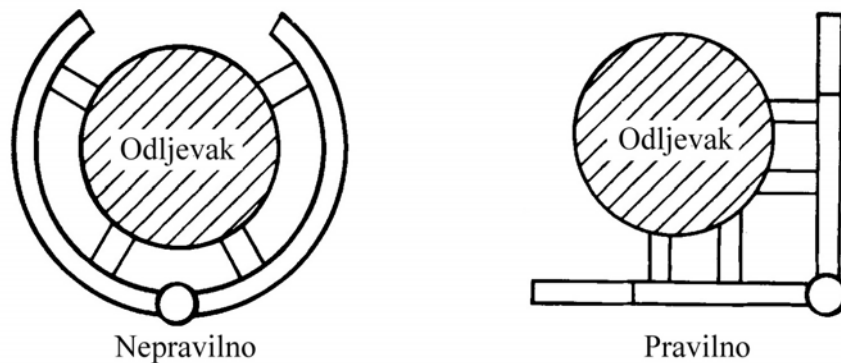
Površinu kritičnog presjeka određenu za jedan odljevak potrebno je podijeliti s brojem ušća koja su vezana na taj odljevak i na taj način se dobije površina poprečnog presjeka jednog ušća. Ušća trebaju biti spojena s razvodnikom pod kutom od  $90^\circ$ . Poželjno je da ušće bude ravno od spoja s razvodnikom do spoja s odljevkom. Dužina ušća (udaljenost od razvodnika do odljevka) treba biti barem 5 puta veća od visine ušća.

Dvije komponente uljernih sustava, koje mogu zadržati trosku, odnosno spriječiti njen ulazak u kalupnu šupljinu su uljevna čaša i razvodnik. Najvažnija funkcija razvodnika je smanjiti brzinu taljevine koja prolazi kroz njega omogućujući time da zahvaćena troska ispliva na površinu mlaza taljevine. Površina poprečnog presjeka razvodnika ( $A_R$ ) treba biti 2 - 4 puta veća od ukupne površine poprečnih presjeka svih ušća ( $A_U$ ) koja su povezana s razvodnikom. Veći omjeri primjenjuju se kod nodularnog lijeva zbog veće količine troske, a manji omjeri kod sivog lijeva. Što je veći omjer površine poprečnog presjeka razvodnika i ukupne površine poprečnih presjeka svih ušća, potrebna je manja udaljenost između spusta i prvog ušća.

Budući da troska i nečistoće plivaju na površini taljevine u razvodniku, razvodnik mora biti visok i uzak (omjer visine i prosječne širine trebao bi iznositi  $\sim 2:1$ ), slika 6.10. Potrebno je izbjeći primjenu zakrivljenih (slika 6.11) i stupnjevitih (stepenastih) razvodnika.

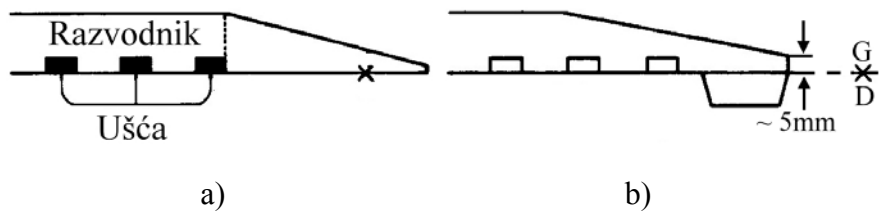


Slika 6.10. Odnos dimenzija razvodnika u tlačnom uljevnom sustavu



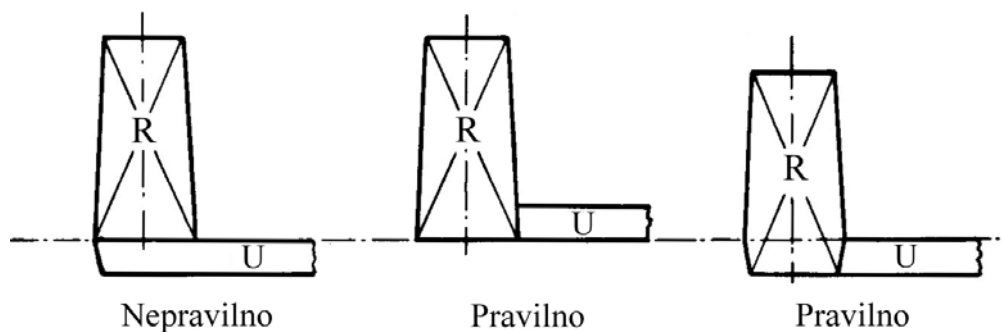
Slika 6.11. Nepravilan i pravilan oblika razvodnika

Razvodnik mora imati dovoljnu dužinu nakon zadnjeg ušća (minimalno 2 puta visina razvodnika). Time se izbjegava unošenje troske s taljevinom, do kojeg može doći u prvim trenucima lijevanja zbog udara mlaza taljevine u kraj razvodnika. Završetak razvodnika, odnosno produžetak od zadnjeg ušća do kraja razvodnika, mora se stanjivati (smanjivanje visine) prema kraju tako da poprimi klinasti oblik (slika 6.12a). U slučaju ograničenog prostora u kalupu (posebno ako je produžetak razvodnika od zadnjeg ušća do kraja razvodnika  $< 50,0$  mm), može se dodati tzv. „gnijezdo“, odnosno podnožje (slično kao kod spusta) ispod razvodnika na njegovom kraju (slika 6.12b).



Slika 6.12. Primjeri završetka razvodnika: a) klinasti oblik razvodnika od zadnjeg ušća do završetka razvodnika, b) dodatak tzv. „gnijezda“ na kraju klinastog dijela razvodnika

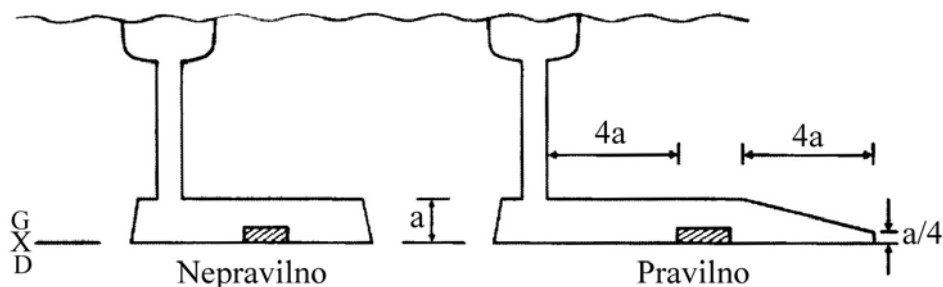
Da bi se izbjegao ulaz troske u kalupnu šupljinu, donja stranica (dno) ušća i razvodnika moraju biti u istom nivou (u istoj horizontalnoj ravnini) (slika 6.13).



Slika 6.13. Nepravilan i pravilni načini povezivanja razvodnika i ušća u tlačnom uljevnom sustavu (R – razvodnik, U – ušće)

Produženje razvodnika nakon zadnjeg ušća ne rješava problem ulaska troske (koja dolazi s taljevinom) u ušća kada je uljevni sustav u potpunosti ispunjen taljevinom. Da bi se izbjegla ova opasnost potrebno je ispuniti nekoliko zahtjeva:

- održavati dovoljnu udaljenost između spusta i prvog ušća (slika 6.14),



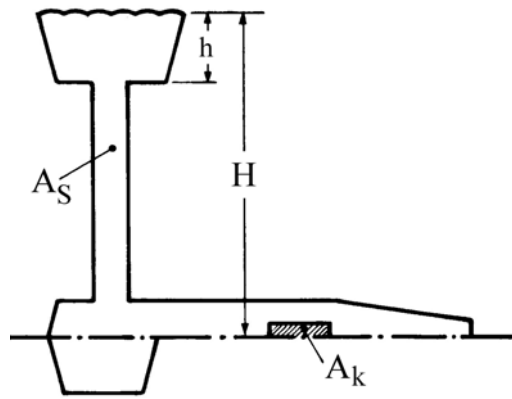
Slika 6.14. Preporučene udaljenosti ušća od spusta i završetka razvodnika

- minimalizirati turbulenciju u razvodniku (izbjegavati primjenu razvodnika kružnog poprečnog presjeka),
- osigurati malu brzinu taljevine u razvodniku, što se postiže odabirom relativno velikog omjera između poprečnog presjeka razvodnika i ukupnog poprečnog presjeka svih ušća,
- osigurati dovoljnu udaljenost između ušća i vrha razvodnika, što se postiže primjenom uskih i visokih razvodnika.

Spust (vertikalni kanal kružnog poprečnog presjeka) mora biti tako dimenzioniran da ne predstavlja kritični presjek, odnosno prigušenje. Kod dimenzioniranja spusta potrebno je ispuniti zahtjev prema kojem kroz spust mora moći proteći barem toliko taljevine koliko kroz sva ušća. Koristeći jednadžbu za određivanje intenziteta strujanja, odnosno brzinu punjenja kalupa i oznake sa slike 6.15, sukladno prethodnim zahtjevima, može se napisati slijedeći izraz:

$$A_s \mu \sqrt{2g} \sqrt{h} \geq A_k \mu \sqrt{2g} \sqrt{H} \quad (6.10)$$





Slika 6.15. Shematski prikaz pojednostavljenog tlačnog uljavnog sustava

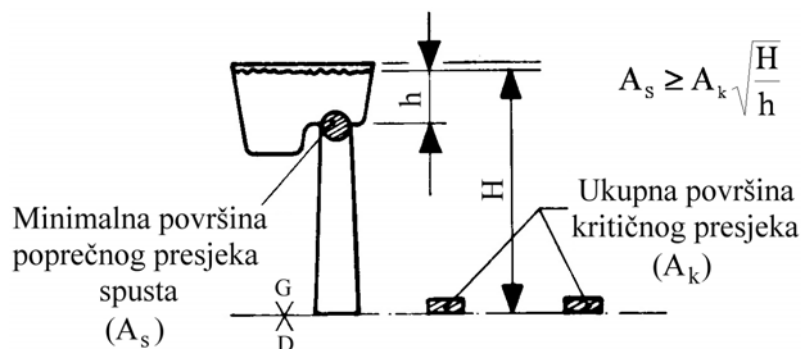
U jednadžbi (6.10)  $A_S$  predstavlja površinu poprečnog presjeka spusta (najmanji poprečni presjek spusta),  $A_k$  ukupnu površinu kritičnog presjeka (suma površina poprečnog presjeka svih ušća, jer je kritični presjek kod tlačnih uljavnih sustava je ušće (ušća)), dok  $h$  predstavlja visinu taljevine u uljevnoj čaši, a  $H$  vertikalnu udaljenost između nivoa taljevine u čaši i razine kritičnog presjeka. Ukupna površina kritičnog presjeka ( $A_k$ ) dobije se na taj način da se površina kritičnog presjeka određena za jedan odljevak iz dijagrama na slici 6.8 pomnoži s brojem odljevaka u kalupu. Kod primjene spusta koji se sužava prema diobenoj ravnini kalupa, visina  $h$  mjeri se do od vrha uljevne čaše do spoja razvodnika i spusta, jer je to mjesto na kojem spust ima najmanji poprečni presjek.

Iz jednadžbe (6.10) slijedi:

$$A_S \geq A_k \sqrt{\frac{H}{h}} \quad (6.11)$$

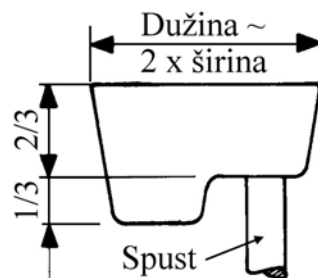
Prema jednadžbi (6.11) poprečni presjek spusta mora biti veći od ukupne površine poprečnih presjeka svih ušća, da bi se osiguralo da ušća predstavljaju kritični presjek.

Optimalno bi bilo da se spust sužava prema dolje kako bi se mogla spriječiti prekomjerna turbulencija i nasisavanje zraka tijekom početnog perioda lijevanja. Budući da se uljevni sustav kompletno ispuni taljevinom vrlo brzo nakon početka lijevanja, prekomjerna turbulencija je prisutna samo u kratkom vremenskom periodu. To znači da se može primijeniti i ravan spust (slika 6.15) te, što je još češće, spust čija se površina poprečnog presjeka blago povećava od uljevne čaše prema diobenoj ravnini (slika 6.16), čime se olakšava izvlačenje modela nakon kalupovanja.



Slika 6.16. Dimenzioniranje spusta koji se proširuje s povećanjem udaljenosti od uljevne čaše

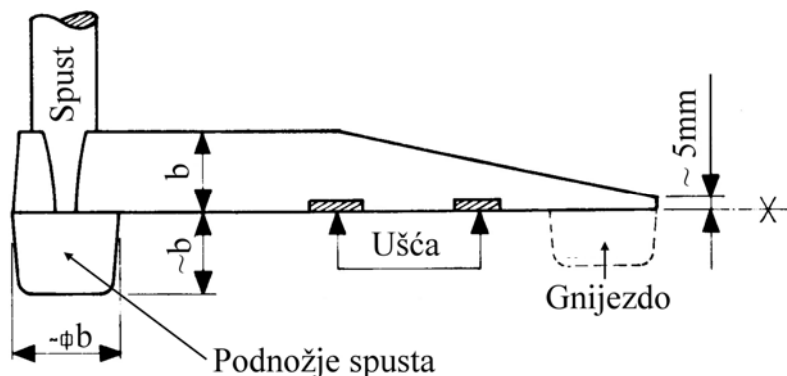
Zbog lakšeg i sigurnijeg ulijevanja taljevine uljevna čaša treba biti barem dva puta šira od promjera spusta i dvostruko duža od širine (slika 6.17). Dubina uljevne čaše iznad spusta treba biti jednaka njezinoj širini.



Slika 6.17. Preporučeni odnos dimenzija uljevne čaše

Konstrukcijom uljevne čaše prema slici 6.17, odnosno spuštanjem dijela dna čaše koji se ne nalazi nad spustom ispod razine spusta smanjuje se mogućnost da prva taljevina, koja obično sa sobom nosi dosta troske ne uđe odmah u spust. Ovakvom konstrukcijom smanjuje se i turbulencija prve taljevine koja ulazi u spust.

Kod tlačnih uljernih sustava, podnožje spusta treba biti smješteno u donju polovicu kalupa. Podnožje spusta može imati oblik kocke sa lagano zaobljenim rubovima. Preporučene dimenzije prikazane su na slici 6.18.

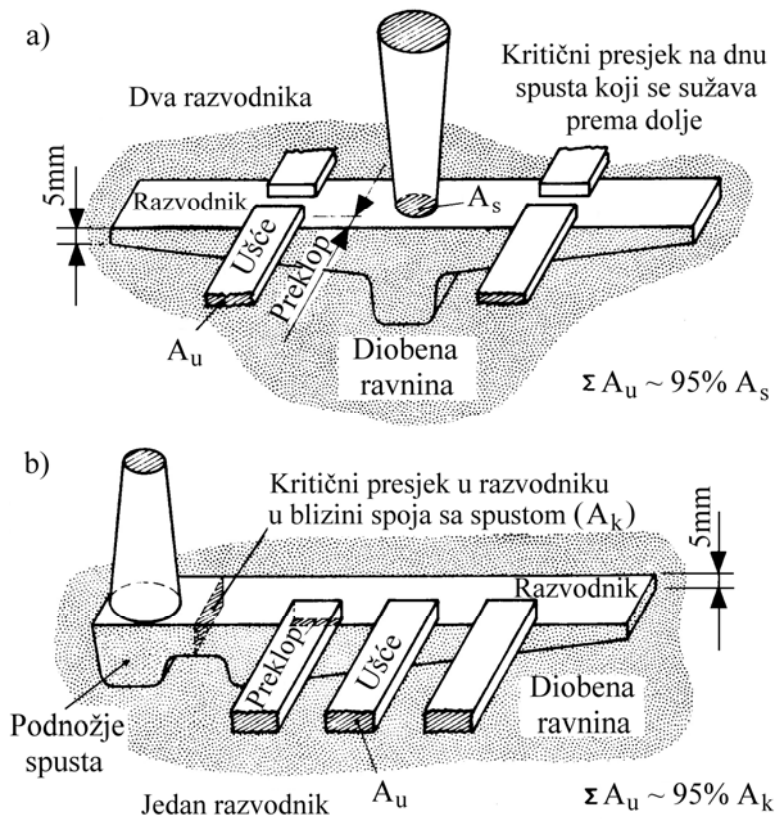


Slika 6.18. Preporučene dimenzije podnožja spusta

## 6.5 Principi konstruiranja semitlačnih uljernih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom

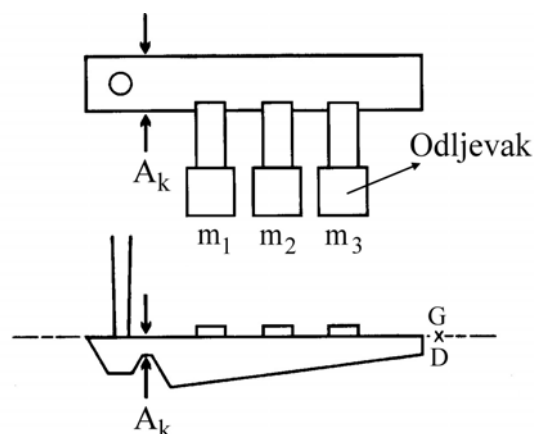
Kritični presjek u semitlačnom uljernom sustavu nalazi se na spoju razvodnika i spusta. Može biti formiran na dva načina: suženjem spusta (najmanji presjek na dnu spusta) (slika 6.19a) ili formiranjem kritičnog presjeka u razvodniku (razvodnicima kod centralno smještenog spusta) u blizini mjesta spajanja sa spustom (slika 6.19b).

Površina kritičnog presjeka određuje se na osnovi količine ulivene taljevine, uključujući i pojila (slika 6.8), što predstavlja razliku u odnosu na tlačne uljevne sustave.



Slika 6.19. Strukturne komponente semitlačnog uljavnog sustava. a) kritični presjek predstavlja presjek spusta na njegovom dnu, b) kritični presjek lociran u razvodniku u blizini mjesta spajanja sa spustom

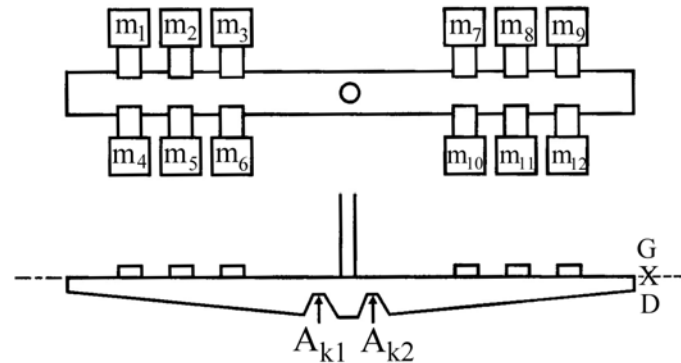
Ako se lijevaju 3 odljevka s masama  $m_1$ ,  $m_2$  i  $m_3$  zajedno u jednom kalupu uz primjenu semitlačnog uljavnog sustava s jednim razvodnikom u kojem se nalazi kritični presjek (slika 6.20), površina kritičnog presjeka određuje se tako da se mase sva tri odljevka (s pojilima) zbroje i na osnovi sumarne težine pomoću dijagrama na slici 6.8 odredi površina kritičnog presjeka.



Slika 6.20. Određivanje kritičnog presjeka kod semitlačnog uljavnog sustava s jednim razvodnikom i kritičnim presjekom lociranim u razvodniku

U slučaju lijevanja npr. 12 odljevaka u jednom kalupu (slika 6.21) uz primjenu semitlačnog uljavnog sustava s dva razvodnikom u kojima se nalaze kritični presjeci ( $A_{k1}$  i

$A_{k2}$ ) ukupna površina kritičnog presjeka je  $A_k = A_{k1} + A_{k2}$ . Površina kritičnog presjeka koji je smješten u razvodniku lijevo od spusta ( $A_{k1}$ ) određuje se na osnovi sumarne mase odljevaka 1 – 6 (slika 6.21) pomoću dijagrama na slici 6.8, dok se površina kritičnog presjeka koji je smješten u razvodniku desno od spusta ( $A_{k2}$ ) određuje na osnovi sumarne težine odljevaka 7 – 12 (slika 6.21) također uz primjenu dijagrama na slici 6.8.

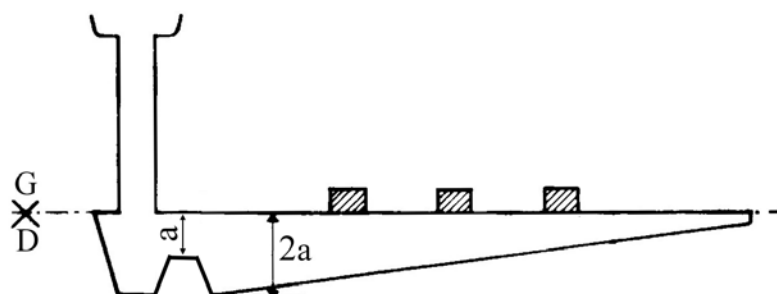


Slika 6.21. Određivanje ukupnog kritičnog presjeka kod semitlačnog uljavnog sustava s dva razvodnika u kojima se nalaze pojedinačni kritični presjeci

Dimenzioniranje ušća provodi se na slijedeći način. Površina kritičnog presjeka smanjuje se za  $\sim 5,0\%$  pri dimenzioniranju ukupne površine poprečnog presjeka svih ušća na jednom razvodniku (kritični presjek u razvodniku), odnosno ukupne površine poprečnog presjeka svih ušća (na svim razvodnicima) u slučaju kada je kritični presjek lociran na dnu spusta (slika 6.19). Ako je potrebna relativno velika površina poprečnog presjeka ušća za napajanje odljevka, može se odstupiti od prethodno navedenog pravila. Može se zaključiti da brzinu punjenja kalupa u početku kontrolira kritični presjek u razvodniku, odnosno kritični presjek lociran na dnu spusta. Kada se uljevni sustav ispuni taljevinom, ušća kontroliraju brzinu lijevanja.

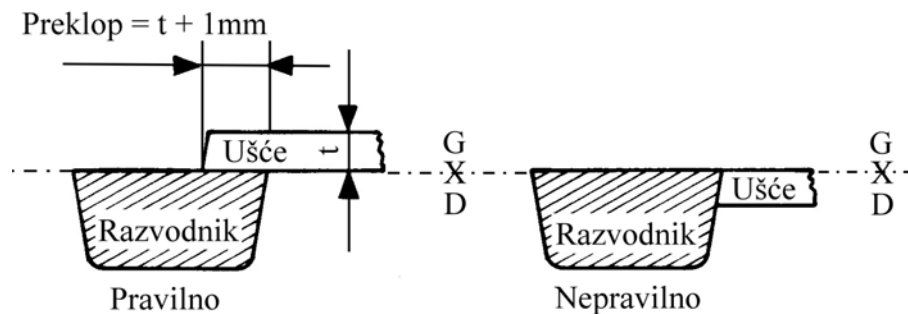
Preferira se primjena širokih ušća s malom visinom (širina ušća = 4 puta visina ušća). Iznimka su slučajevi kod kojih se napajanje odvija pomoću uljavnog sustava. Dužina ušća (udaljenost od razvodnika do odljevka) treba biti barem 5 puta veća od visine ušća.

Razvodnik i kritični presjek moraju biti smješteni u donju polovicu kalupa, a ušća u gornju (slika 6.19). Površinu poprečnog presjeka razvodnika potrebno je povećati nakon kritičnog presjeka tako da omjer površine poprečnog presjeka razvodnika i površine kritičnog presjeka iznosi barem 2:1 u slučaju sivog lijeva, odnosno 4:1 kod nodularnog lijeva. Visinu razvodnika potrebno je postepeno smanjivati prema njegovom završetku tako da poprimi oblik klina (slika 6.22). Osim što pomaže u zadržavanju troske, ovakav oblik razvodnika omogućuje relativno mirno punjenje razvodnika.



Slika 6.22. Izgled i odnos dimenzija razvodnika u semitlačnom uljavnom sustavu za slučaj lijevanja odljevaka od sivog lijeva

Vjerojatnost ulaska troske u ušća može se minimalizirati primjenom širokih razvodnika male visine. Omjer širine i visine razvodnika na sredini njegove dužine treba iznositi 2:1. Preklop razvodnika sa ušćima treba biti samo neznatno veći od visine ušća (za ~ 1,0 mm) (slika 6.23).



Slika 6.23. Pravilan i nepravilan spoj razvodnika i ušća u semitlačnom uljevnom sustavu

Minimalni omjer površine poprečnog presjeka spusta na spoju sa uljevnom čašom i površine kritičnog presjeka može se odrediti prema načinu opisanom u poglavlju o principima konstruiranja tlačnih uljevni sustava i slici 6.15:

$$\frac{A_s}{A_k} = \sqrt{\frac{H}{h}} \quad (6.12)$$

gdje je  $A_s$  – površina poprečnog presjeka spusta na spoju sa uljevnom čašom ( $\text{cm}^2$ ),  $A_k$  površina kritičnog presjeka ( $\text{cm}^2$ ),  $H$  – vertikalna udaljenost između vrha uljevne čaše i kritičnog presjeka (cm) i  $h$  – visina taljevine u uljevnoj čaši (cm). Potrebno je osigurati da vrh spusta ne djeluje kao kritični presjek, odnosno prigušenje.

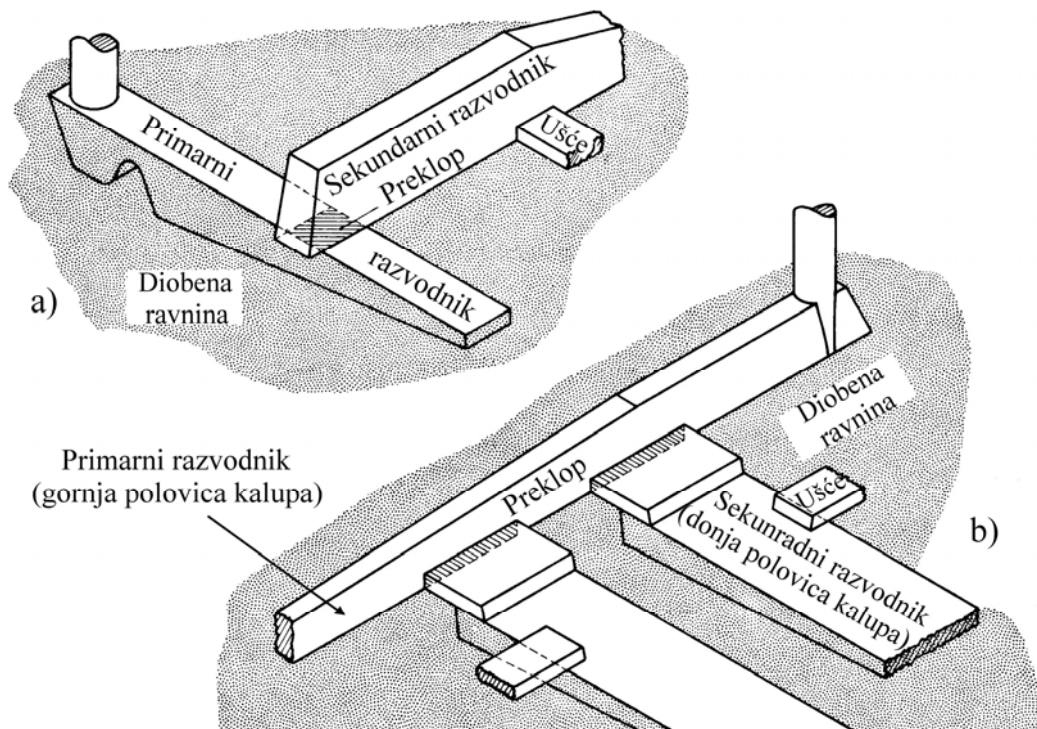
Udaljenost prvog ušća od spusta treba iznositi minimalno 100,0 mm. Ista udaljenost preporučuje se između zadnjeg ušća i završetka razvodnika. Ušća trebaju biti spojena s razvodnikom pod kutom od  $90^\circ$ .

Podnožje spusta treba biti smješteno u donju polovicu kalupa. Podnožje spusta može imati oblik kocke s lagano zaobljenim rubovima. Preporučene veličine prikazane su na slici 6.18. Za konstrukciju uljevne čaše u semitlačnom uljevnom sustavu primjenjuju se ista pravila kao kod konstrukcije uljevne čaše u tlačnom uljevnom sustavu (slika 6.17).

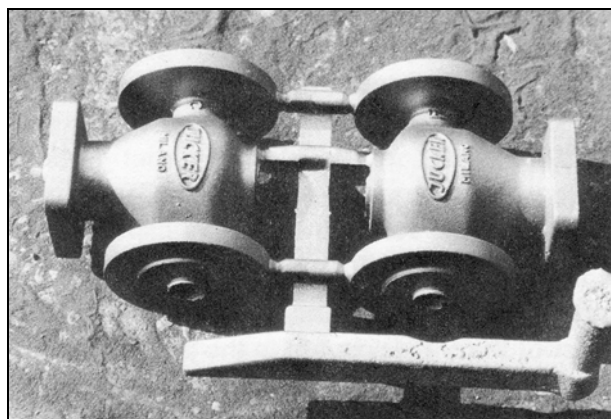
## 6.6 Principi konstruiranja hibridnih (kombiniranih) uljevni sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom

Hibridni (kombinirani) uljevni sustavi (engl. *Hybrid gating systems*) koji inkorporiraju povoljna svojstva, odnosno prednosti tlačnih i semitlačnih uljevni sustava u jednom uljevnom sustavu. Uspješno se primjenjuju kod lijevanja kompleksnih odljevaka, odnosno primjene velikih modelnih ploča kod kojih je potrebna dobro razrađena mreža razvodnika da bi se dostigla sva potrebna mjesta.

Najčešće je uljevni sustav u početku konstruiran kao semitlačni, a nakon toga prelazi u tlačni uljevni sustav (slika 6.24a). Hibridni uljevni sustav kod kojeg tlačni uljevni sustav prelazi u semitlačni (slika 6.24b, slika 6.25) rjeđe je zastupljen od prethodno navedenog.



Slika 6.24. Schematski prikaz hibridnih uljernih sustava: a) semitlačni uljevni sustav prelazi u tlačni uljevni sustav, b) tlačni uljevni sustav prelazi u semitlačni uljevni sustav



Slika 6.25. Primjer hibridnog uljernog sustava kod kojeg tlačni uljevni sustav prelazi u semitlačni

Kod uljernih sustava kod kojeg semitlačni uljevni sustav prelazi u tlačni kritični presjek je presjek ušća u tlačnom uljernom sustavu. Određivanje površine kritičnog presjeka, kao i ostalih komponenti u tlačnom uljernom sustavu, provodi prema postupku opisanom u poglavlju 6.4. Broj razvodnika (smješteni u gornjoj polovici kalupa jer se radi o tlačnom uljernom sustavu) ovisi o rasporedu i kompleksnosti odljevaka.

Razvodnici smješteni u gornju polovicu kalupa u ovom se slučaju označavaju kao sekundarni razvodnicu koji se granaju, odnosno preklapaju s primarnim razvodnikom (razvodnik od semitlačnog uljernog sustava) koji je smješten u donju polovicu kalupa (slika 6.24a). Mjesta na kojima se razvodnici preklapaju ne smiju djelovati kao prigušenje, odnosno kritični presjek. Površina poprečnog presjeka preklopa sekundarnog i primarnog razvodnika treba biti neznatno veća od ukupne površine poprečnog presjeka svih ušća koja se granaju iz sekundarnog razvodnika.

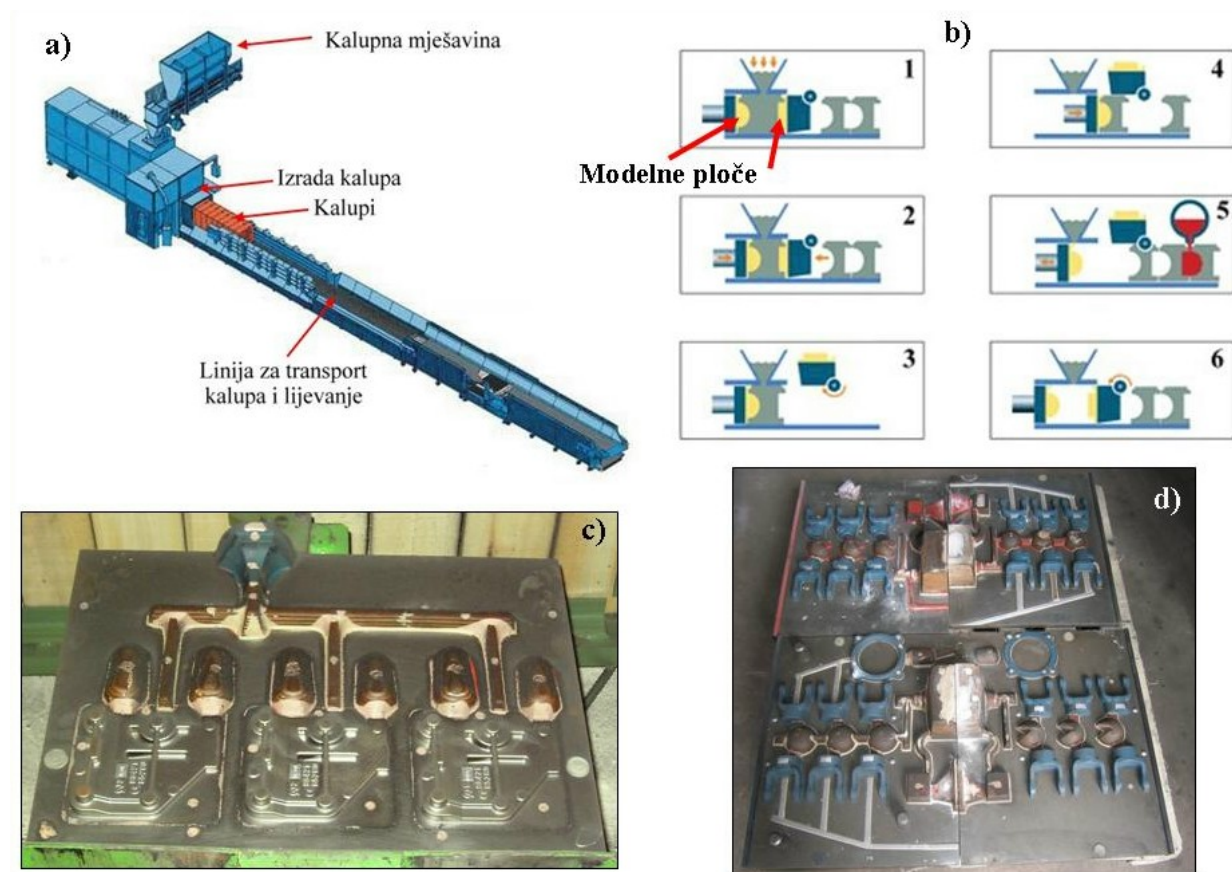
Određivanje dimenzija komponenti u semitlačnom uljevnom sustavu provodi se prema postupku opisanom u poglavlju 6.5.

Površina kritičnog presjeka u primarnom razvodniku (razvodnik od semitlačnog uljavnog sustava lociran u donjoj polovici kalupa) treba biti za ~ 5,0 % veća od ukupne površine poprečnih presjeka svih ušća u svim sekundarnim razvodnicima koji se preklapaju s primarnim razvodnikom.

Primjenom hibridnih uljavnih sustava značajno se smanjuju opasnosti od nastanka grešaka koje potječu od troske. Negativna strana je slabiji izvadak.

## 6.7 Principi konstruiranja uljavnih sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom

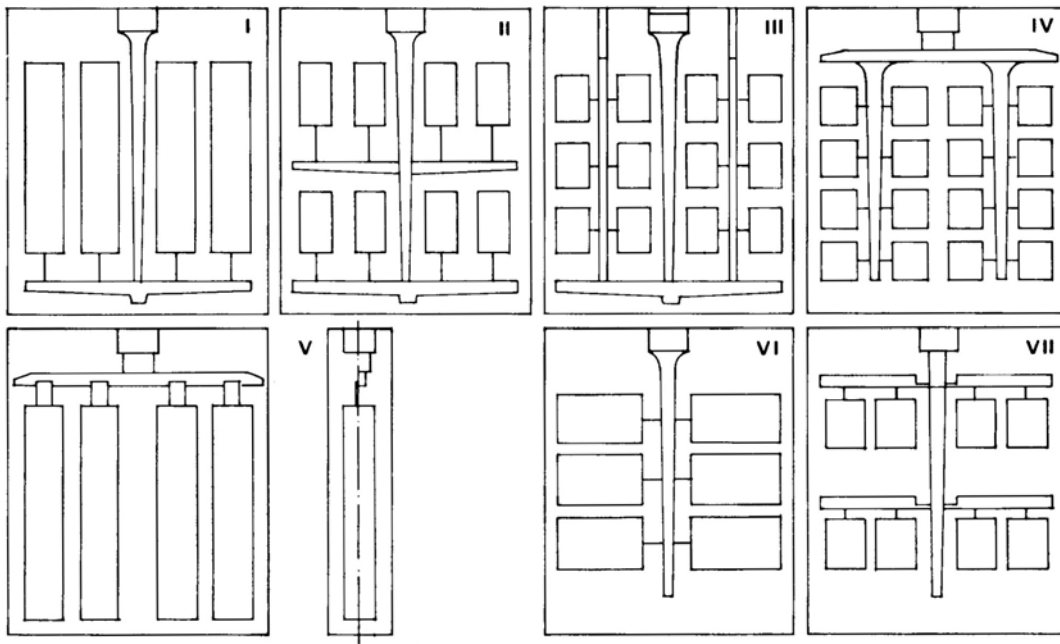
Napredak tehnologije i želja za sve većom produktivnošću rezultirali su razvojem linija za automatsku izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom (Disamatic® linije, slika 6.26). Na Disamatic® liniji kalupi se izrađuju bez primjene kalupnika. Kalupi s vertikalnom diobenom ravninom danas se široko primjenjuju, posebno za lijevanje većeg broja manjih odljevaka u jednom kalupu.



Slika 6.26. Disamatic® linija: a) shematski prikaz, b) princip rada, c) i d) modelne ploče

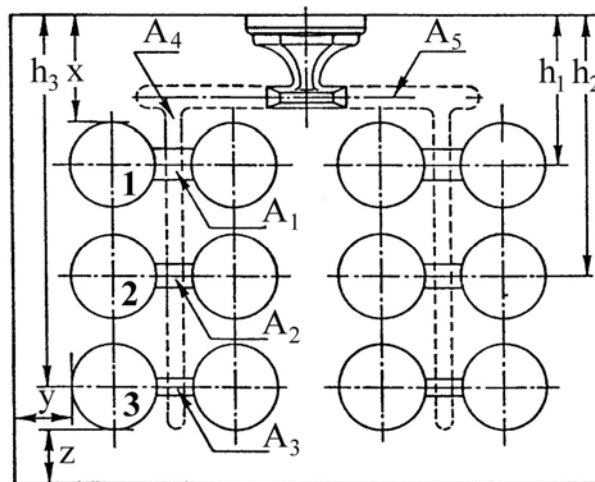
Konstruiranje uljavnog sustava i sustava napajanja kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom zahtjevnije je nego kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom. Kod vertikalno podijeljenog kalupa, kalupne šupljine smještene su na nekoliko različitih

nivoa, zbog čega se pri dimenzioniranju uljavnog sustava moraju razmotriti uvjeti posebno za svaki pojedinačni nivo te utjecaj lijevanja na jednom nivou na uvjete na ostalim nivoima. Osnovni zadatak je osigurati da se svi odljevci na različitim nivoima pune istom brzinom, tj. za isto vrijeme lijevanja. Prema tome, brzine punjenja gornjih i donjih kalupnih šupljina moraju biti približno jednake. To se ostvaruje pravilnim dimenzioniranjem površine poprečnog presjeka ušća na različitim nivoima prema brzini istjecanja na tom nivou. Na slici 6.27 prikazano je nekoliko najčešće upotrebljivanih konfiguracija uljavnih sustava, odnosno rasporeda odljevka kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom.



Slika 6.27. Shematski prikaz najčešće upotrebljivanih konfiguracija uljavnih sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom

U nastavku je prikazan postupak dimenzioniranja jednog tipičnog vertikalnog uljavnog sustava za slučaj kada su modeli raspoređeni na modelnoj ploči prema slici 6.28.



Slika 6.28. Raspored modela na modelnoj ploči.  $x = \text{min. } 70,0 \text{ mm}$ ,  $y = \text{min. } 60,0 \text{ mm}$ ,  $z = \text{min. } 50,0 \text{ mm}$ .  $A_1, A_2, A_3$  – površine poprečnih presjeka ušća,  $A_4$  – površina poprečnog presjeka spusta u gornjem dijelu,  $A_5$  – površina poprečnog presjeka razvodnika



Konfiguracija uljavnog sustava na slici 6.28 odgovara tipičnom uljavnom sustavu broj IV prikazanom na slici 6.27.

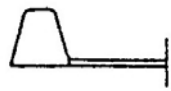
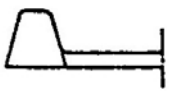
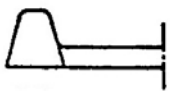
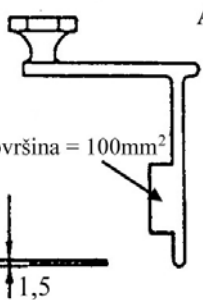
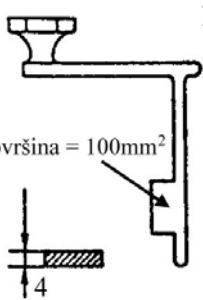
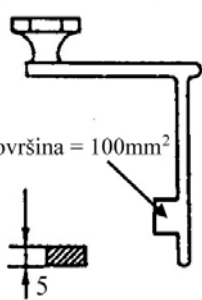
Podaci potrebni za proračun uljavnog sustava (slika 6.28):

- masa jednog odljevka:  $m = 3,0 \text{ kg}$ ,
- ukupna masa odljevaka u kalupu:  $12 \times 3,0 \text{ kg} = 36,0 \text{ kg}$ ,
- vrijeme potrebno da bi se odlio jedan kalup:  $10 \text{ s}$ ,
- vrijeme potrebno za transport kalupa:  $2 \text{ s}$ ,
- vrijeme potrebno da se napuni uljevni sustav do ušća:  $2 \text{ s}$ ,
- vrijeme punjenja kalupne šupljine jednog odljevka:  $10 \text{ s} - 2 \text{ s} - 2 \text{ s} = 6 \text{ s}$ ,
- metalostatske visine:  $h_1 = 150,0 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 250,0 \text{ mm}$ ,  $h_3 = 350,0 \text{ mm}$ .

Da bi se ostvarilo jednako vrijeme punjenja kalupnih šupljina na različitim nivoima, brzine punjenja kalupnih šupljina moraju biti jednake. Time se osigurava da vrijeme punjenja kalupa odgovara vremenskom ciklusu automatske linije za izradu kalupa, odnosno vremenu potrebnom za izradu jednog kalupa.

Brzina punjenja jedne kalupne šupljine =  $v \times A \times \mu \times \rho$  (kg/s), gdje je  $v$  – brzina taljevine na ušću (m/s),  $A$  – površina poprečnog presjeka ušća ( $\text{cm}^2$ ),  $\mu$  – faktor gubitaka uslijed trenja (koeficijent trenja ili stupanj iskorištenja protoka (strujanja)), a  $\rho$  – gustoća ( $\text{kg/m}^3$ ). Uzimajući da je faktor gubitaka uslijed trenja ( $\mu$ ) približno jednak za sva ušća koja su povezana sa spustom te da je gustoća taljevine jednaka na svim ušćima, brzina punjenja ušća (a time i kalupne šupljine) određena je brzinom taljevine i površinom poprečnog presjeka ušća, tj.  $A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = A_3 \times v_3$ . Teorijska brzina taljevine na prvom nivou, odnosno kod prvih ušća (gledano od razvodnika, vidi sliku 6.28) je  $\sqrt{2gh_1}$ , na drugom nivou  $\sqrt{2gh_2}$ , odnosno  $\sqrt{2gh_3}$  na trećem nivou. Brzina taljevine na ušćima ovisi o brzini dotoka taljevine iz viših dijelova uljavnog sustava.

Faktor gubitaka uslijed trenja ( $\mu$ ) ovisi u velikoj mjeri o obliku (poprečnom presjeku) ušća. Na slici 6.29 prikazan je utjecaj uobičajenih oblika poprečnih presjeka ušća na vrijednost faktora gubitaka uslijed trenja.

Poprečni presjek ušća		
		
$\mu = 0,3$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$
 <p>Površina = <math>100\text{mm}^2</math></p> <p>1,5</p>	 <p>Površina = <math>100\text{mm}^2</math></p> <p>4</p>	 <p>Površina = <math>100\text{mm}^2</math></p> <p>5</p>

Slika 6.29. Utjecaj oblika poprečnog presjeka ušća na vrijednost

### faktora gubitaka uslijed trenja

Masa jednog odljevka u kalupu iznosi 3,0 kg, a vrijeme punjenja kalupne šupljine jednog odljevka iznosi 6,0 s. To znači brzina punjenja po ušću mora iznositi  $3,0\text{kg} / 6,0\text{ s} = 0,5\text{ kg/s}$ . Na osnovi potrebne brzine punjenja kalupne šupljine jednog odljevka ( $0,5\text{ kg/s}$ ), vrijednosti brzina punjenja na svakom nivou, vrijednosti faktora gubitaka uslijed trenja ( $\mu = 0,5$ ), metalostatskih visina ( $h_1, h_2, h_3$ ) i gustoće može se odrediti potrebna površina poprečnog presjeka ušća na svakom nivou. Površina poprečnog presjeka ušća na prvom nivou iznosi:

$$A_1 = \frac{0,5\text{kg/s}}{0,5 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81\text{m/s}^2} \cdot 0,15\text{m} \cdot 6890\text{kg/m}^3} = 8,46 \cdot 10^{-5}\text{m}^2 = 84,6\text{mm}^2 \approx 85\text{mm}^2 \quad (6.13)$$

Prema slici 6.29, za odabranu vrijednost faktora gubitaka uslijed trenja 0,5, debljina ušća s površinom poprečnog presjeka  $85,0\text{ mm}^2$  iznosi 4,0 mm, a širina 21,25 mm ( $85,0\text{ mm}^2 / 4,0\text{ mm}$ ).

Površina poprečnog presjeka ušća na slijedećem nivou (drugom nivou) određuje se na slijedeći način:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \Rightarrow A_2 = \frac{A_1 \cdot v_1}{v_2} = \frac{85 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,15}}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,25}} = 66,1\text{mm}^2 \approx 66\text{mm}^2 \quad (6.14)$$

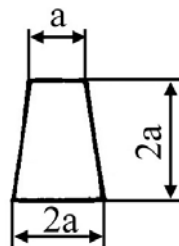
Prema slici 6.29, za odabranu vrijednost faktora gubitaka uslijed trenja 0,5, debljina ušća s površinom poprečnog presjeka  $66,0\text{ mm}^2$  iznosi 4,0 mm, a širina 16,5 mm ( $66,0\text{ mm}^2 / 4,0\text{ mm}$ ).

Površina poprečnog presjeka ušća na najnižem nivou (trećem nivou) određuje se na slijedeći način:

$$A_2 \cdot v_2 = A_3 \cdot v_3 \Rightarrow A_3 = \frac{A_2 \cdot v_2}{v_3} = \frac{66 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,25}}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,35}} \approx 55\text{mm}^2 \quad (6.15)$$

Prema slici 6.29, za odabranu vrijednost faktora gubitaka uslijed trenja 0,5, debljina ušća s površinom poprečnog presjeka  $55,0\text{ mm}^2$  iznosi 4,0 mm, a širina 13,8 mm ( $55,0\text{ mm}^2 / 4,0\text{ mm}$ ).

Ukupna površina poprečnog presjeka svih ušća na jednom spustu iznosi  $\sum A = 2 \cdot A_1 + 2 \cdot A_2 + 2 \cdot A_3 = 412,0\text{ mm}^2$ . Površina poprečnog presjeka spusta u gornjem dijelu ( $A_4$ ) mora biti za 10,0 – 20,0 % veća od ukupne površine poprečnog presjeka svih ušća na tom spustu ( $A_4 = 1,1 - 1,2 \times \sum A$ ) da bi se kompenzirali gubitci toka uslijed promjene smjera te trenja. Ako se uzme povećanje od 10,0%,  $A_4 = 1,1 \times 412,0\text{ mm}^2 = 453,0\text{ mm}^2$ , dok kod povećanja od 20,0 % površina poprečnog presjeka spusta u gornjem dijelu ( $A_4$ ) mora iznositi  $494,0\text{ mm}^2$ . Spust, kao i razvodnik ima trapezni poprečni presjek (slika 6.30).

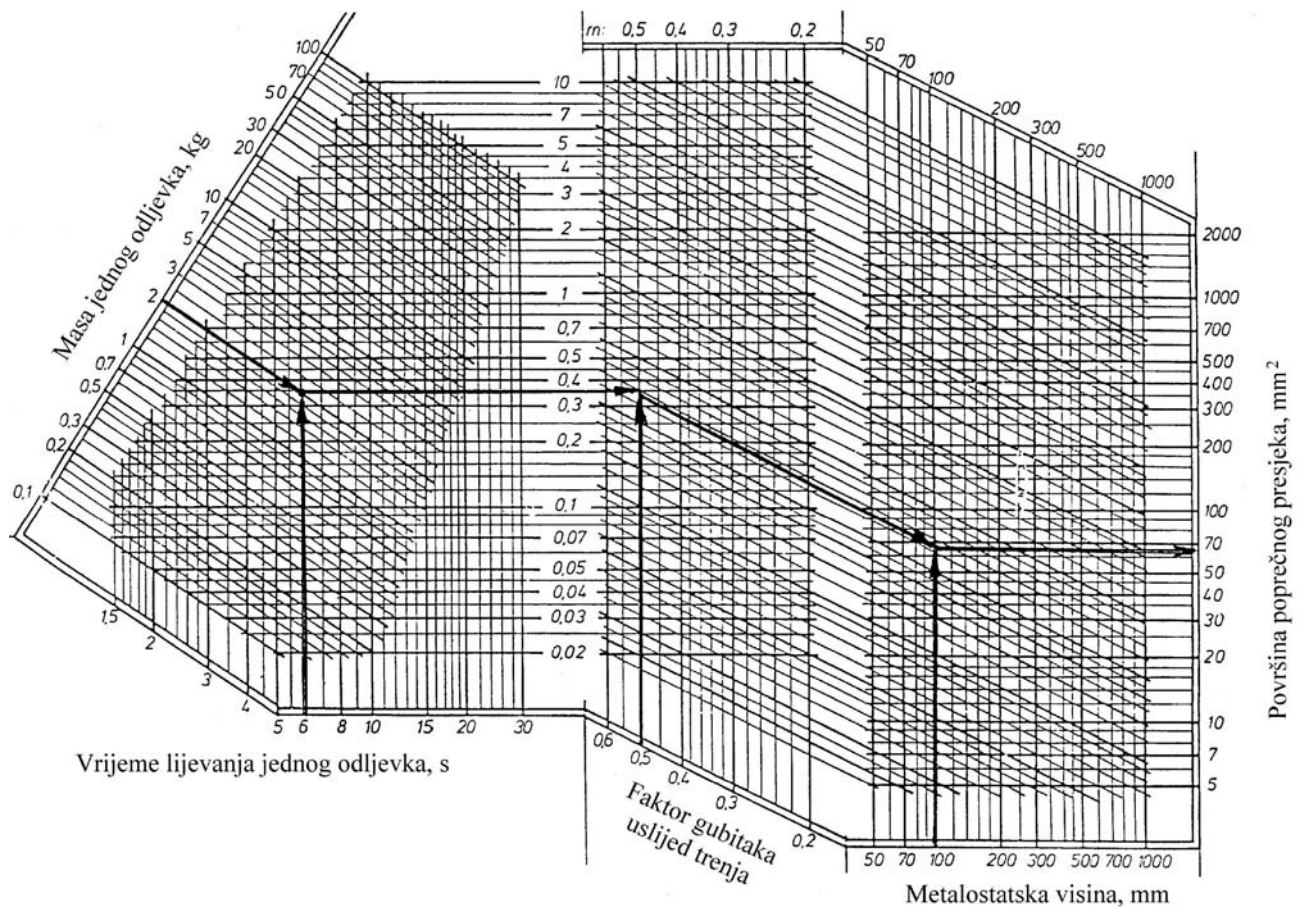


Slika 6.30. Poprečni presjek spusta i razvodnika

Površina poprečnog presjeka trapeza na slici 6.30 iznosi  $3a^2$ . Ako je površina poprečnog presjeka spusta  $494,0 \text{ mm}^2$  (povećanje za 20,0 % u odnosu na ukupnu površinu poprečnog presjeka svih ušća na tom spustu) dimenzije spusta u gornjem dijelu iznose  $26,0 \times 26,0 \times 13,0 \text{ mm}$  ( $3a^2 = 494 \rightarrow a \approx 13,0 \text{ mm}$ ). Pravilno dimenzioniran spust ima važnu ulogu u održavanju potrebitog tlaka u spustu koji je važan za pravilno punjenje kalupnih šupljina.

Površina poprečnog presjeka razvodnika ( $A_5$ ) mora biti za 30,0 % veća od površine poprečnog presjeka spusta u njegovom gornjem dijelu ( $A_5 = 1,3 \times A_4$ ). Sukladno tome, površina poprečnog presjeka razvodnika iznosi  $1,3 \times 494,0 \text{ mm}^2 = 642,0 \text{ mm}^2$ . Iz toga proizlaze dimenzije razvodnika:  $30,0 \times 30,0 \times 15,0 \text{ mm}$  ( $3a^2 = 642 \rightarrow a \approx 15,0 \text{ mm}$ ).

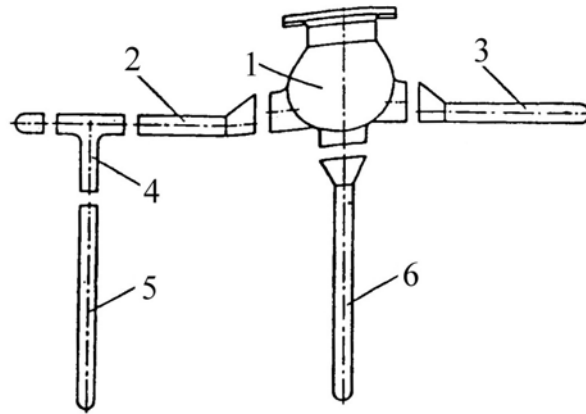
Pored prikazanog numeričkog proračuna, površine poprečnih presjeka ušća mogu se odrediti i grafičkom metodom pomoću Hessovg nomograma (slika 6.31).



Slika 6.31. Hessov nomogram

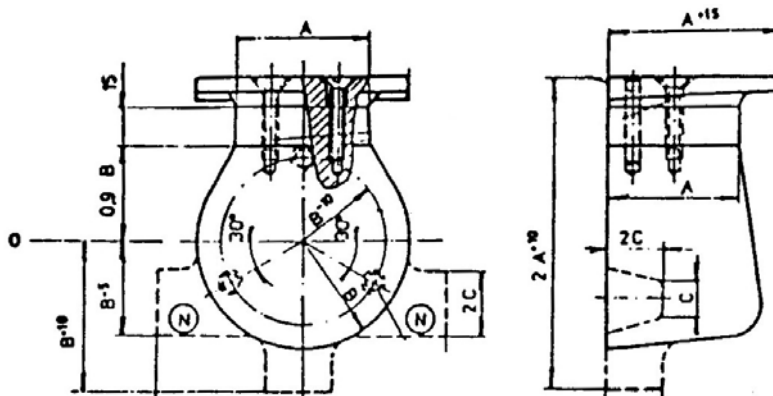
Da bi se olakšala izrada modela i dimenzioniranje uljevnih sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom, razvijeni su razni tipski uljevni sustavi koji su naročito zastupljeni kod automatskih linija za izradu kalupa Disamatic<sup>®</sup>. Na slici 6.32 prikazan je jedan tipski uljevni sustav kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom.

Na osnovi površine poprečnog presjeka ušća (koja se mora odrediti numeričkom i grafičkom metodom) odabiru se standardizirane komponente uljevnog sustava za svaki pojedinačni slučaj.



Slika 6.32. Primjer tipskog uljavnog sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom (1 – uljevna čaša, 2, 3 – razvodnici, 4 – segment za spajanje razvodnika i spusta (T element), 5, 6 – spustovi)

Na slici 6.33 prikazan je izgled i odnos karakterističnih dimenzija standardiziranih uljavnih čaša za tipski uljevni sustav sa slike 6.32, dok su u tablici 6.1 navedene dimenzije standardiziranih uljavnih čaša ovisno o brzini punjenja kalupa.



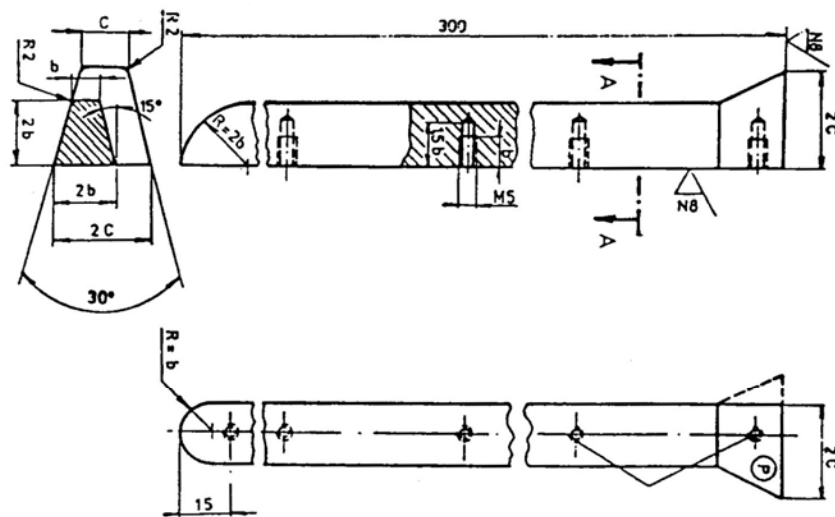
Slika 6.33. Primjer standardizirane uljevne čaše za uljevni sustav kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom

Tablica 6.1. Dimenzije standardiziranih uljavnih čaša sa slike 6.33 ovisno o brzini punjenja kalupa

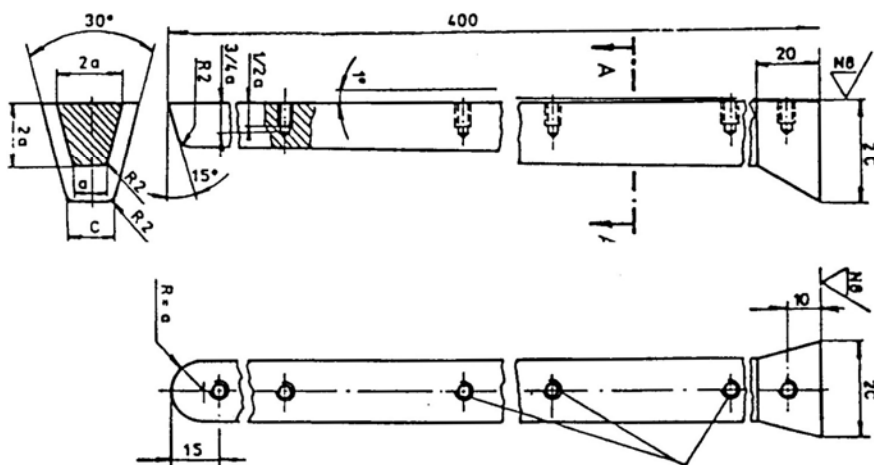
Redni broj	Brzina punjenja kg/s	A, mm	B, mm	C, mm
1	0 – 3	40	30	15
2	3 – 5	45	35	15
3	5 – 7	50	40	22
4	7 - 11	60	45	22

Na slici 6.34 prikazan je izgled i odnos karakterističnih dimenzija standardiziranih razvodnika i spustova za tipski uljevni sustav sa slike 6.32.

U tablici 6.2 prikazane dimenzije standardiziranih razvodnika i spustova ovisno o njihovim poprečnim presjecima koji se izračunavaju na osnovi ukupne površine poprečnih presjeka ušća.



a)



b)

Slika 6.34. Standardizirani razvodnik (a) i spust (b) za uljevni sustav kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom

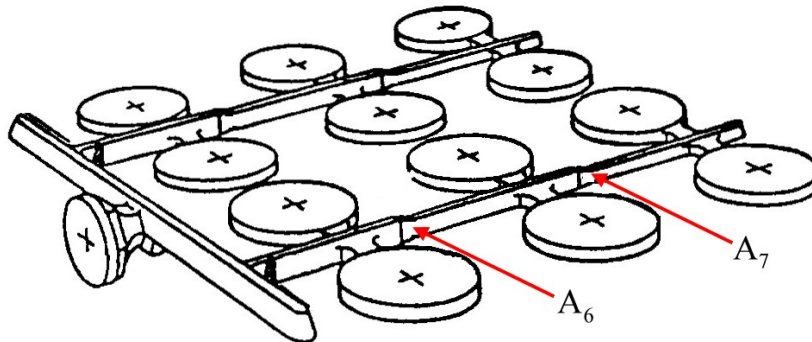
U analiziranom primjeru izračunata vrijednost poprečnog presjeka spusta na njegovom gornjem dijelu iznosi  $494,0 \text{ mm}^2$ , što znači da se iz tablice 6.2 odabire se standardizirani spust pod rednim brojem 9 čija površina poprečnog presjeka iznosi  $507,0 \text{ mm}^2$ . Izračunata površina poprečnog presjeka razvodnika u razmatranom primjeru iznosi  $642,0 \text{ mm}^2$ , što znači da se iz tablice 6.2 odabire standardizirani razvodnik pod brojem 9 čija površina poprečnog presjeka iznosi  $675,0 \text{ mm}^2$ .

Da bi se osiguralo brzo punjenje spusta i adekvatni tlak na ulazu u ušća preporučuje se sužavanje spusta prema dolje ( $1,0 - 5,0^\circ$ , slika 6.34b). Alternativna metoda je stvaranje stepenice na spustu (smanjenje poprečnog presjeka) na maloj udaljenosti nakon svakog nivoa (ulaska u ušća), slika 6.35. Površina poprečnog presjeka spusta nakon prvih ušća (površina  $A_6$ , slika 6.35) određuje se tako da se zbroje površine poprečnih presjeka svih ušća na nižim nivoima i na taj iznos doda  $10,0 \%$  ili  $20,0 \%$ .

Tablica 6.2. Dimenzije standardiziranih razvodnika i spustova sa slike 6.34

Standardizirani razvodnik			
Redni broj	A, mm <sup>2</sup>	a, mm	c, mm
1	108	6	15
2	147	7	15
3	192	8	15
4	243	9	15
5	300	10	15
6	363	11	22
7	432	12	22
8	588	14	22
9	675	15	22
10	768	16	22
11	867	17	22
12	972	18	22
13	1083	19	22
14	1200	20	22
15	1320	21	22
16	1460	22	22

Standardizirani spust			
Redni broj	A, mm <sup>2</sup>	b, mm	c, mm
1	75	5	15
2	108	5	15
3	147	7	15
4	192	8	15
5	243	9	15
6	300	10	22
7	363	11	22
8	432	12	22
9	507	13	22
10	588	14	22
11	675	15	22
12	768	16	22
13	867	17	22
14	972	18	22
15	1083	19	22
16	1200	20	22



Slika 6.35. Vertikalni uljevni sustav kod kojeg se nakon svakog nivoa smanjuje poprečni presjek spusta

Površina poprečnog presjeka spusta nakon prvog nivoa ( $A_6$ ) iznosi:

$$A_6 = (2 \cdot A_2 + 2 \cdot A_3) + 10\% = (2 \cdot 66 + 2 \cdot 55) = 242 + 10\% = 266 \text{ mm}^2 \quad (6.16)$$

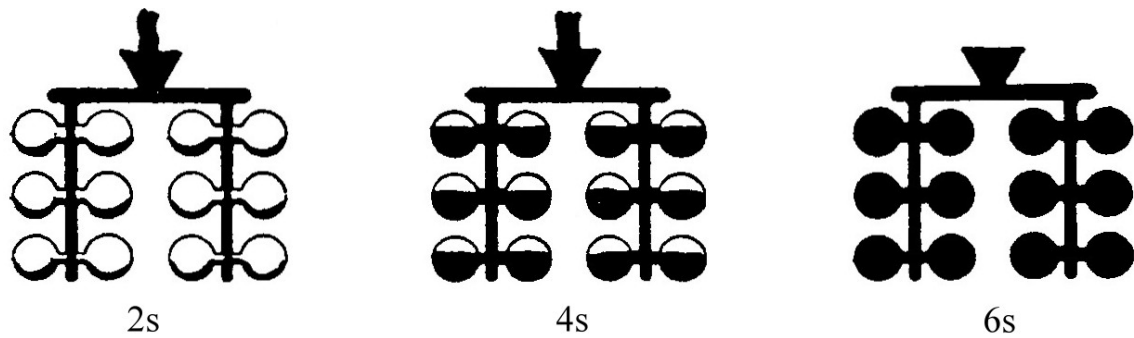
odnosno 291,0 mm<sup>2</sup> kod povećanja od 20,0%.

Površina poprečnog presjeka spusta nakon drugog nivoa ( $A_7$ ) iznosi:

$$A_7 = (2 \cdot A_3) + 10\% = (2 \cdot 55) = 110 + 10\% = 121 \text{ mm}^2 \quad (6.17)$$

odnosno 145,0 mm<sup>2</sup> kod povećanja od 20,0 %.

Punjenje kalupa u razmatranom primjeru odvijati će se prema slici 6.36 ako je uljevni sustav pravilno dimenzioniran. Svi odljevci biti će odliveni u istom vremenu.

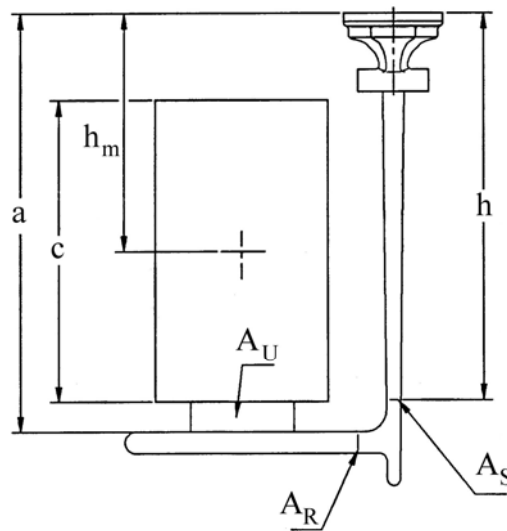


Slika 6.36. Pravilan tijek punjenja kalupa u razmatranom primjeru.  
Svi odljevci odliveni su u istom vremenu

Razmatrani uljevni sustav nije pogodan za lijevanje svih odljevaka. U slučajevima kada postoji opasnost od zahvaćanja plinova ili stvaranja oksida primjenjuje se uljevni sustav s centralno smještenim spustom koji se u donjem dijelu povezuje s horizontalnim razvodnikom iz kojeg su vertikalno izvedeni kanali koji se spajaju s ušćima, odnosno odljercima (uljevni sustav br. III, slika 6.27). Na ovaj način omogućeno je mirnije punjenje kalupa i oslobađanje plinova.

Ako je razvodnik smješten u donji dio kalupa, a odljevak se lijeva odozdo (slika 6.37), prije određivanja površine poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu ( $A_s$ ) potrebno je odrediti metalostatsku visinu  $h_m$ :

$$h_m = a - \frac{c}{2} \quad (6.18)$$

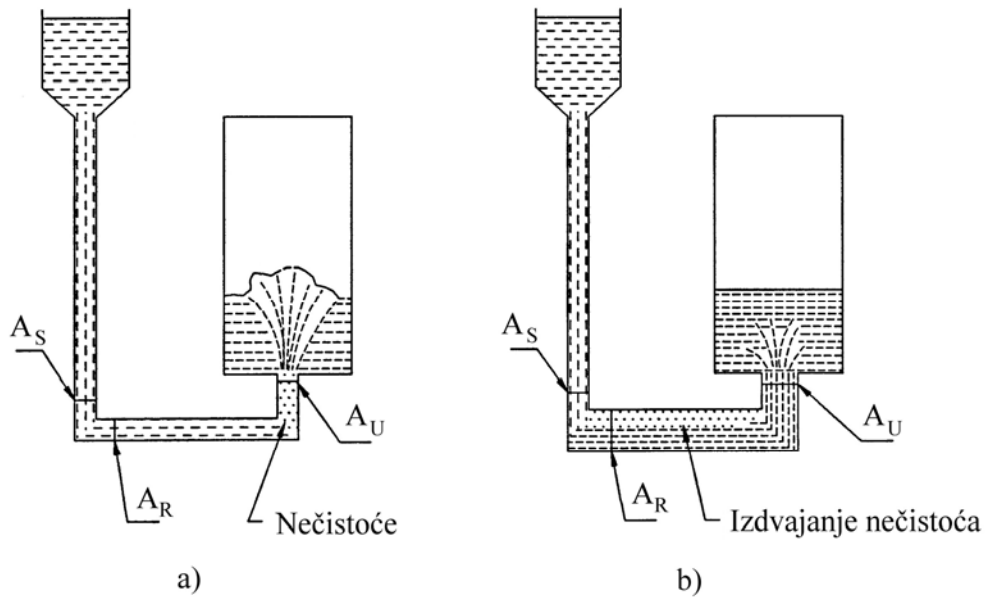


Slika 6.37. Shematski prikaz jednostavnog vertikalnog uljevnog sustava kod kojeg je razvodnik smješten u donju polovicu kalupa, a odljevak se lijeva odozdo

Površina poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu ( $A_s$ ) određuje se prema jednadžbi (6.13).

Da bi se izbjegle turbulencije tijekom punjenja kalupa (slika 6.38a), odnosno osiguralo mirno punjenje kalupa i spriječio ulaz nečistoća (slika 6.38b) potrebno je da površina

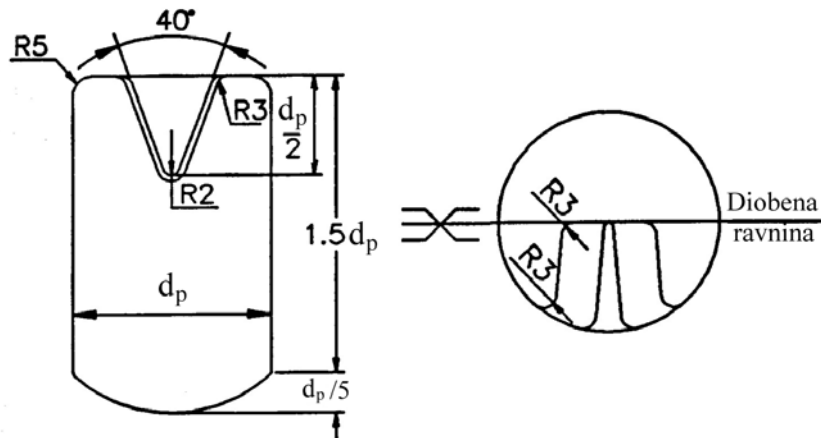
poprečnog presjeka razvodnika ( $A_R$ ) te površina poprečnog presjeka ušća ( $A_U$ ) bude 2 puta veća od površine poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu ( $A_S$ ).



Slika 6.38. a) turbulencije tijekom punjenja kalupa i ulaz nečistoća u kalupnu šupljinu ( $A_S = A_R = A_U$ ), b) mirno punjenje kalupa ( $A_R = 2 \cdot A_S, A_U = 2 \cdot A_S$ )

U mnogim slučajevima kod kalupa s vertikalnom diobenom ravlinom moguće je primijeniti metodu napajanja pomoću uljavnog sustava, čak i kod uljernih sustava kod kojih se površina i modul ušća povećava s približavanjem ka vrhu kalupa.

Ako su za napajanje potrebna pojila, potrebno je primijeniti standardizirana pojila (slike 6.39 – 6.42).

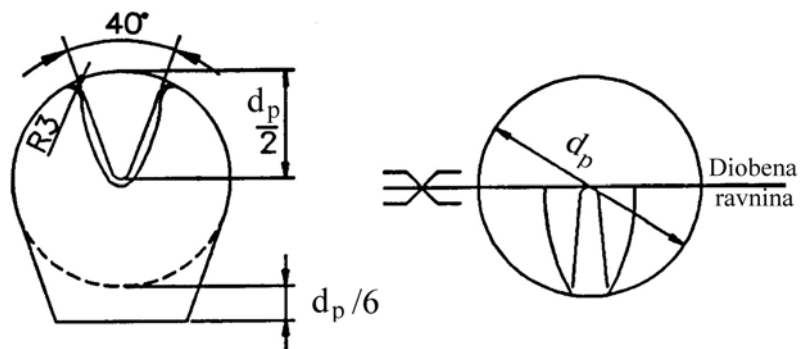


Slika 6.39. Standardizirano pojilo u obliku valjka. Na vrhu pojila potrebno je s jedne strane načiniti V urez





Slika 6.40. Modelna ploča (pojila u obliku valjka)



Slika 6.41. Standardizirano pojilo u obliku kugle. Na vrhu pojila mora biti načinjen urez



Slika 6.42. Modelne ploče (strelicama su označena standardizirana pojila u obliku kugle)

U tablicama 6.3 i 6.4 dani su podatci za promjere, volumene i module standardiziranih pojila u obliku valjka i kugle.

Tablica 6.3. Promjeri, volumeni i moduli standardiziranih pojila u obliku valjka

Broj	Promjer pojila, $d_p$ , mm	Volumen pojila, $V_p$ , $\text{cm}^3$	Modul pojila, $M_p$ , cm
1	20	9,4	0,37
2	25	18,4	0,47
3	30	31,8	0,56
4	35	50,5	0,66
5	40	75,4	0,75
6	45	107,3	0,84
7	50	147,3	0,94
8	55	196,0	1,03
9	60	254,5	1,13
10	65	323,5	1,22
11	70	404,0	1,31
12	75	497,0	1,41
13	80	603,0	1,50
14	85	723,0	1,59
15	90	859,0	1,69
16	95	1010,0	1,78
17	100	1178,0	1,89

Tablica 6.4. Promjeri, volumeni i moduli standardiziranih pojila u obliku kugli

Broj	Promjer pojila, $d_p$ , mm	Volumen pojila, $V_p$ , $\text{cm}^3$	Modul pojila, $M_p$ , cm
1	20	4,2	0,33
2	25	8,1	0,42
3	30	14,0	0,50
4	35	22,3	0,58
5	40	33,3	0,67
6	45	47,4	0,75
7	50	65,0	0,83
8	55	86,5	0,92
9	60	112,3	1,00
10	65	142,8	1,08
11	70	178,4	1,17
12	75	219,4	1,25
13	80	266,2	1,33
14	85	319,3	1,42
15	90	379,1	1,50
16	95	445,8	1,58
17	100	520,0	1,67

Za brzo određivanje modula pojila primjenjuje se slijedeća jednadžba:

$$M_p \geq k \cdot M_s \quad (6.19)$$

gdje je:  $M_p$  – modul pojila,  $k$  - koeficijent koji ovisi o vrsti materijala koji se lijeva (0,6 do 1,0 za podeltektički sivi lijev, 0,8 do 1,1 za nodularni lijev, 1,2 – 1,4 za tempelni i čelični lijev), a  $M_s$  – modul značajnog segmenta odljevka (segment s najvećim modulom).

Na osnovi podatka o modulu pojila (jednadžba 6.19) iz tablice 6.3 i 6.4 odabire se standardizirano pojilo.

Promjer vrata pojila određuje se prema slijedećoj formuli:

$$d_v \geq \frac{d_p}{3} \quad (6.20)$$

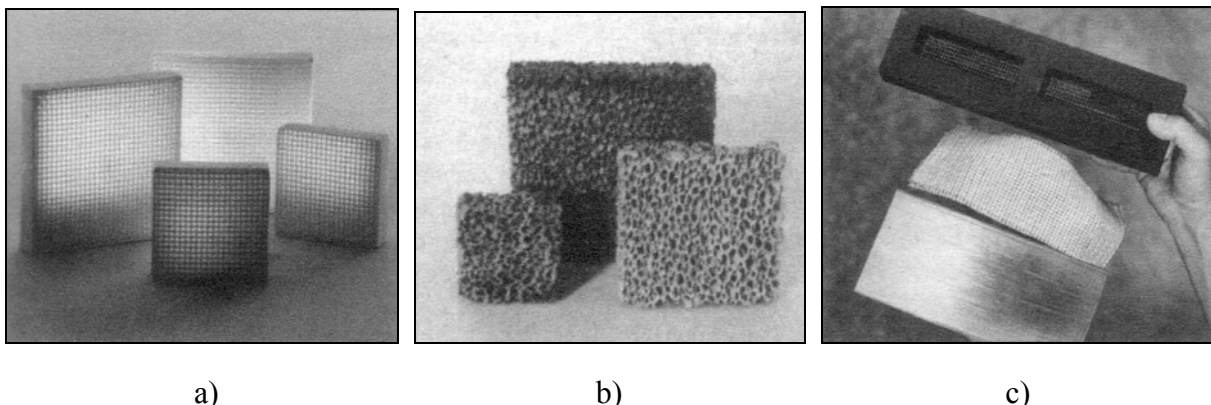
gdje je:  $d_v$  – promjer vrata pojila,  $d_p$  – promjer pojila.

## 6.8 Primjena filtara u uljevnim sustavima

Sve taljevine obično sadrže određenu količinu nemetalnih uključaka (troske) koji mogu potjecati od oksidacije tijekom taljenja i lijevanja, obrade (proizvodnja nodularnog i vermikularnog lijeva) i cijepljenja taljevine, vatrostalne obloge peći i lonca ili pijeska od kojeg je načinjen kalup.

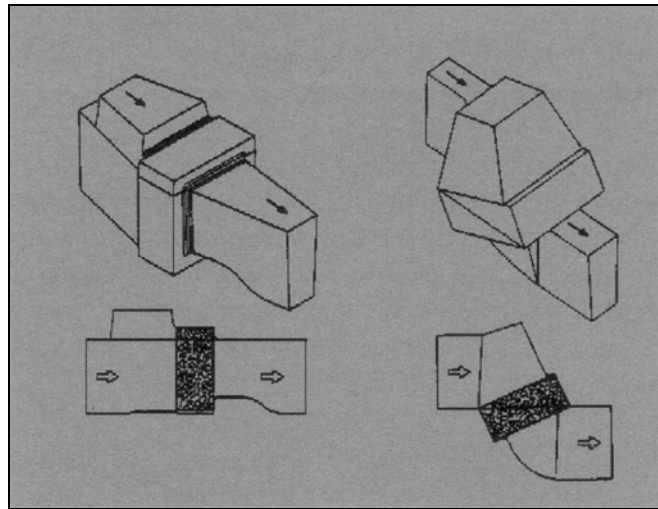
Ako uljevni sustav ne može spriječiti ulaz nemetalnih uključaka u kalupnu šupljinu, potrebno je u uljevni sustav ugraditi odgovarajući filtar. Za pravilnu primjenu filtara u uljevnom sustavu, potrebno je poznavati način funkcioniranja filtara. Nije dovoljno da filtar ima samo dobru sposobnost filtriranja. Filtar mora imati visoku i konstantnu protočnost, adekvatnu čvrstoću, visok kapacitet, adekvatnu dimenzijsku točnost i nisku cijenu. Najefikasniji su oni filtri koji osiguravaju optimalnu kombinaciju navedenih parametara.

Na tržištu je dostupno nekoliko tipova filtara (slika 6.43): spužvasti (pjenasti) tip, ćelijasti tip i filtri od keramičkih vlakana.



Slika 6.43. Primjeri različitih tipova filtara: a) ćelijasti keramički filtri, b) pjenasti keramički filtri, c) filtri od keramičkih vlakana

Postoji veći broj načina smještanja filtra u uljevni sustav (slika 6.44). Filtar je rijetko smješten direktno na dnu spusta, jer uvijek postoji rizik lomljenja filtra na početku lijevanja.



Slika 6.44. Primjeri smještanja filtra u uljevni sustav

Pri konstruiranju uljavnog sustava s filtrom, ista procedura može se primijeniti za dimenzioniranje spusta kao kod uljavnog sustava bez filtra. Područje filtra (obično u razvodniku) mora se povećati. Ovo područje često je barem dvostruko veće od poprečnog presjeka uobičajeno dimenzioniranog razvodnika (bez filtra). Ukoliko se ne primjeni ovo pravilo može se očekivati prevelik pad brzine taljevine kroz sustav. Pored odgovarajuće brzine lijevanja, vrlo važno je održavati i pravilnu temperaturu lijevanja, jer se troska znatno lakše formira pri nižim temperaturama. Filtri koji se primjenjuju kod sivog lijeva mogu imati manje dimenzije pora u odnosu na one koji se primjenjuju kod nodularnog lijeva.

## 7. TEMPERNI LIJEV

### 7.1 Općenito o tempernom lijevu

Temperni lijev (engl. *Malleable Cast Iron*) je vrsta željeznog lijeva koju karakterizira prisustvo tzv. tempernog ili čvorastog grafita u metalnoj osnovi. Ovaj oblik grafita u velikoj mjeri podsjeća na nepravilni nodularni grafit.

Temperni lijev proizvodi se toplinskom obradom polazne bijele strukture (bijeli željezni lijev) odgovarajućeg kemijskog sastava. Odljevak se lijeva od bijelog željeznog lijeva odgovarajućeg kemijskog sastava tako da se ugljik u potpunosti izluči u obliku cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (slika 7.1).

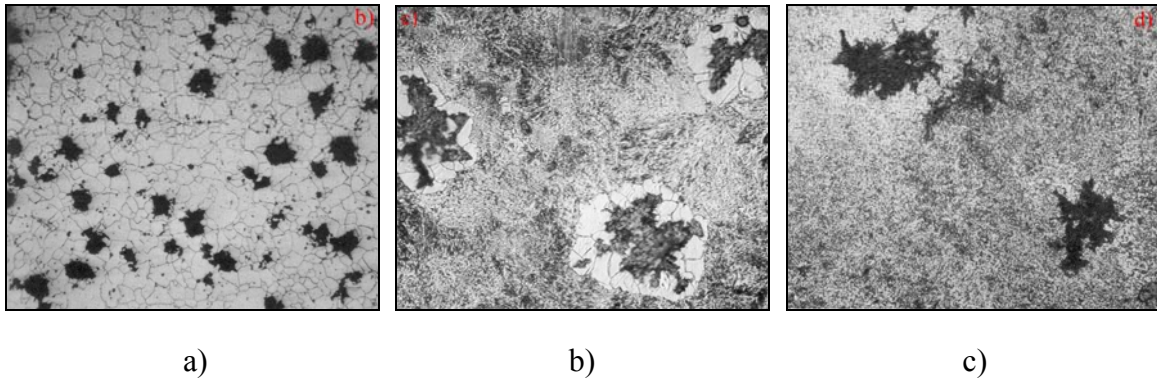


Slika 7.1. Metalografska snimka mikrostrukture polazne bijele strukture (eutektički karbidi + perlit), nagrizeno stanjem nital, 400x

Bijela struktura mora se ostvariti po cijelom presjeku odljevka. Ako se u mikrostrukтури u lijevanom stanju pojavi slobodni grafit (grafitni listići), tijekom druge faze proizvodnje tempernog lijeva, odnosno toplinske obrade, dolazi do rasta, deformacije i pojave pukotina, što rezultira odbacivanjem odljevka. Naknadnom toplinskom obradom (temperiranjem) polazne bijele strukture razlaže se cementit na ferit i slobodni ugljik koji se izlučuje u obliku kompaktnih nakupina (poznatih pod nazivom temperni ili čvorasti grafit) koju se relativno ravnomjerno raspoređene u feritnoj (slika 7.2a), perlitnoj (slika 7.2b) ili martenzitnoj (slika 7.2c) metalnoj osnovi, što ovisi o sadržaju legirajućih elemenata i uvjetima pri toplinskoj obradi.

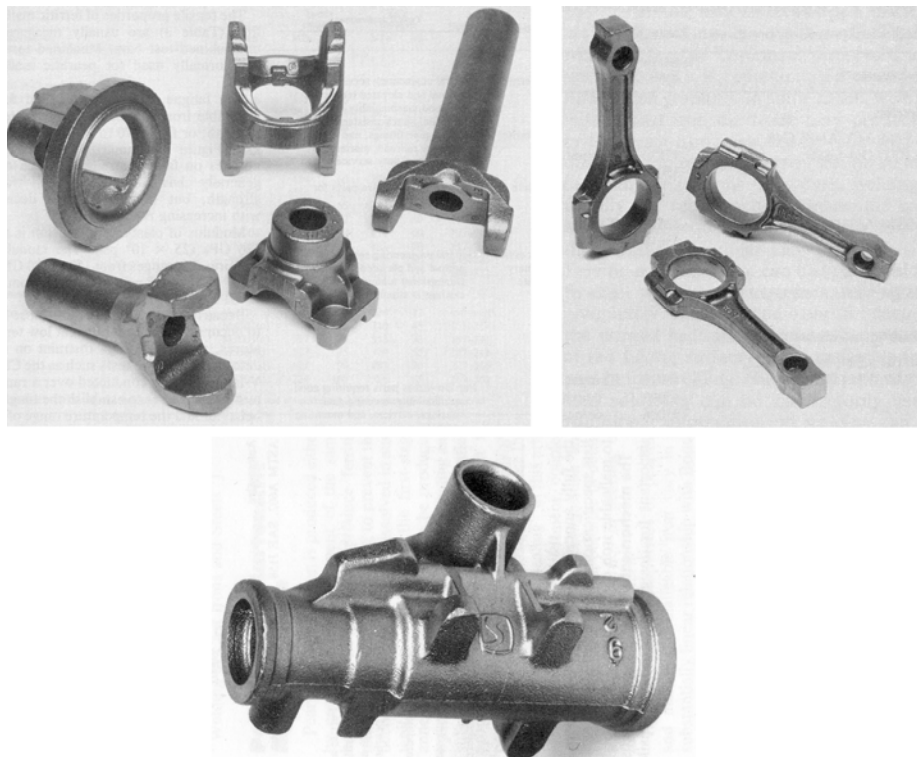
Svojstva tempernog lijeva u velikoj mjeri su slična svojstvima nodularnog lijeva, zbog sličnog oblika izlučenog grafita. Feritni temperni lijev ima nisku čvrstoću i tvrdoću, ali visoku žilavosti i istežanje. Perlitni i martenzitni temperni lijev ima visoku čvrstoću i tvrdoću, ali nisku žilavost i istežanje. Zbog nižih troškova proizvodnje, nodularni lijev u velikoj je mjeri potisnuo proizvodnju tempernog lijeva.

U određenim područjima primjene temperni lijev ima prednost pred nodularnim lijevom. Temperni lijev preferira se za proizvodnju tankostjenih odljevaka, odljevaka kod kojih se zahtijeva visoka strojna obradivost, odljevaka koji moraju zadržati dobru otpornost na udar pri niskim temperaturama te odljevke kod kojih se zahtijeva otpornost na trošenje (samo martenzitni temperni lijev).



Slika 7.2. Metalografske snimke mikrostrukture tempornog lijeva: a) feritni temporni lijev (temper grafit i ferit), 100x; b) perlitni temporni lijev (temper grafit i perlit), 400x; c) martenzitni temporni lijev (temper grafit i martenzit), 500x

Odljevci o tempornog lijeva imaju široku primjenu u gotovo svim granama industrije: automobilske industriji, industriji kamiona, poljoprivrednih i građevinskih strojeva (kućišta diferencijala, klipnjače, bregaste osovine, nosači motora, potisne ploče, poklopci ležajeva, kućišta upravljača, dijelovi automatskih mjenjača, kočione čeljusti itd. (slika 7.3)), građevinarstvu (armature za vodovode, plinovode i parovode), elektroindustriji (kućišta i spojnice izolatora itd.), industriji vagona (dijelovi kočnica, spojke, poluge) itd.



Slika 7.3. Primjeri odljevaka od tempornog lijeva za automobilsku industriju

## 7.2 Klasifikacija tempernog lijeva

Ovisno o atmosferi u peći tijekom toplinske obrade, razlikuju se dvije vrste tempernih ljevova:

- bijeli temperni ljevovi i
- crni temperni ljevovi.

Bijeli temperni ljevovi (engl. *Whiteheart Malleable Cast Irons*) proizvode se toplinskom obradom polazne bijele strukture u kontroliranoj oksidacijskoj atmosferi pri čemu dolazi do razlaganja cementita i stvaranja temper grafita te manjeg ili većeg razugljičenja (izgaranje ugljika). Razugljičenje površinskog sloja je potpuno, a sa udaljavanjem od površine prema sredini odljevka sve slabije. U sredini debljih odljevaka ugljik je prisutan u obliku temperiranog grafita. Pored ferita i perlita, u metalnoj osnovi mogu biti prisutni i drugi produkti pretvorbe austenita.

Crni temperni ljevovi (engl. *Blackheart Malleable Cast Irons*) proizvode se toplinskom obradom polazne bijele strukture u kontroliranoj neutralnoj atmosferi, zbog čega se sadržaj ugljika u odljevku ne mijenja (ne dolazi do razugljičenja). Cementit se razlaže pri čemu se nastali slobodni ugljik izlučuje u obliku tempernog grafita preko cijelog presjeka odljevka. Ako se sav ugljik izluči u obliku tempernog grafita, metalna osnova biti će feritna. Ako dio ugljika ostane vezan u perlitu, u metalnoj osnovi biti će prisutan i perlit. Osim ferita i perlita, u metalnoj osnovi mogu biti prisutni i drugi produkti pretvorbe austenita.

U svijetu postoji više prihvaćenih normi za temperni ljev. U SAD-u se za klasifikaciju tempernog lijeva primjenjuju slijedeće norme: ASTM A47, ASTM A338, ASTM A220, ASTM A602. U Hrvatskoj se za klasifikaciju tempernog lijeva primjenjuje norma HRN EN 1562:1997. U osnovi radi se o preuzetoj europskoj normi EN 1562:1997, koja se primjenjuje u zemljama EU.

Prema HRN EN 1562:1997 bijeli temperni ljev klasificira se u 5 kvaliteta (tablica 7.1), a crni temperirani ljev u 9 kvaliteta (tablica 7.2), prema minimalnoj vrijednosti vlačne čvrstoće. Klasifikacija je provedena na osnovi vrijednosti vlačne čvrstoće i izduženja koje su određene na ispitnom uzorku promjera 12,0 mm kod bijelog tempernog lijeva, odnosno ispitnom uzorku promjera 12,0 ili 15,0 mm u slučaju crnog tempernog lijeva.

U oznaci HRN EN-GJMW-350-4, HRN se odnosi na hrvatsku normu, EN označava da se radi o europskoj normi, slovo G označava ljev, slovo J željezo, slova MW označavaju bijeli temperirani ljev (engl. *Malleable White*), broj 350 predstavlja minimalnu vrijednost vlačne čvrstoće, a 4 predstavlja minimalnu vrijednost istezanja.

Tablica 7.1. Mehanička svojstva bijelih tempernih ljevova prema HRN EN 1562:1997 određena na odvojeno lijevanim ispitnim uzorcima

Označivanje materijala		$d^1$ , mm	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> , min.	$A$ , %, min.	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , min.	$HB$ , maks.
Oznaka, HRN	Broj					
EN-GJMW-350-4	EN-JM1010	6	270	10	-	230
		9	310	5	-	
		12	350	4	-	
		15	360	3	-	
EN-GJMW-360-12	EN-JM1020	6	280	16	-	200
		9	320	15	170	
		12	360	12	190	
		15	370	7	200	
EN-GJMW-400-5	EN-JM1030	6	300	12	-	220
		9	360	8	200	
		12	400	5	220	
		15	420	4	230	
EN-GJMW-450-7	EN-JM1040	6	330	12	-	220
		9	400	10	230	
		12	450	7	260	
		15	480	4	280	
EN-GJMW-550-4	EN-JM1050	6	-	-	-	250
		9	490	5	310	
		12	550	4	340	
		15	570	3	350	

<sup>1)</sup> nominalni promjer ispitnog uzorka

Tablica 9.2. Mehanička svojstva crnih tempernih ljevova prema HRN EN 1562:1997 određena na odvojeno lijevanim ispitnim uzorcima

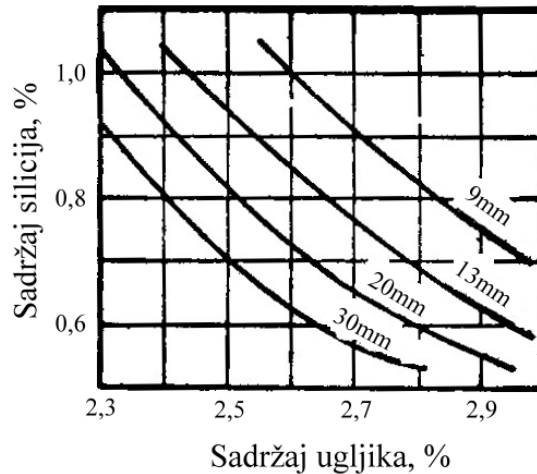
Označivanje materijala		$d^1$ , mm	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> , min.	$A$ , %, min.	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , min.	$HB$
Oznaka	Broj					
EN-GJMB-300-6	EN-JM1110	12 ili 15	300	6	-	maks.150
EN-GJMB-350-10	EN-JM1130	12 ili 15	350	10	200	maks.150
EN-GJMB-450-6	EN-JM1140	12 ili 15	450	6	270	150-200
EN-GJMB-500-5	EN-JM1150	12 ili 15	500	5	300	165-215
EN-GJMB-550-4	EN-JM1160	12 ili 15	550	4	340	180-230
EN-GJMB-600-3	EN-JM1170	12 ili 15	600	3	390	195-245
EN-GJMB-650-2	EN-JM1180	12 ili 15	650	2	430	210-260
EN-GJMB-700-2	EN-JM1190	12 ili 15	700	2	530	240-290
EN-GJMB-800-1	EN-JM1200	12 ili 15	800	1	600	270-320

<sup>1)</sup> nominalni promjer ispitnog uzorka



### 7.3 Kemijski sastav

Pravilnim izborom kemijskog sastava potrebno je osigurati bijelu strukturu u lijevanom stanju preko čitavog presjeka odljevka, odgovarajuću livljivost i potpuno raspadanje cementita tijekom toplinske obrade (temperiranja). Da bi se spriječilo izlučivanje grafita tijekom skrućivanja, kemijski sastav tempernog lijeva potrebno je prilagoditi debljini stijenke odljevka (slika 7.4) i brzini hlađenja.



Slika 7.4. Najviši sadržaji ugljika i silicija kod kojih tijekom skrućivanja ne dolazi do izlučivanja grafita u raznim debljinama stijenki

Kod bijelog temperiranog lijeva sadržaj **ugljika** kreće se od 2,8 do 3,2 %, a **silicija** 0,5 do 0,8 %. Sadržaj ugljika kod crnog tempernog lijeva kreće se od 2,2 do 2,8 %, a silicija 0,8 do 1,4 %.

Zbroj sadržaja ugljika i silicija ovisi o debljini stijenke odljevka. S povećanjem debljine stijenke odljevka smanjuje se zbroj udjela ugljika i silicija da bi se izbjeglo izlučivanje grafita tijekom skrućivanja. Da bi se ostvarila visoka mehanička svojstva odljevaka sadržaj ugljika treba da bude što je moguće niži. Prenizak sadržaj ugljika rezultira značajnim padom livljivosti, porastom stezanja tijekom skrućivanja te lošijim odzivom na toplinsku obradu. Ako je sadržaj silicija previsok može doći do izlučivanja grafita tijekom skrućivanja. Kod preniskih sadržaja silicija značajno se produžuje vrijeme temperiranja. Kod bijelog tempernog lijeva sadržaj ugljika može biti viši nego kod crnog tempernog lijeva jer ugljik djelomično izgara u oksidacijskoj atmosferi.

Sadržaj **sumpora** potrebno je održavati niskim jer sumpor otežava proces grafitezacije (stabilizira cementit). Sumpor sa željezom stvara nepoželjni željezni sulfid FeS koji se izlučuje po granicama eutektičkih zrna i uzrokuje krhkost. Kod crnog tempernog lijeva udio sumпора ne smije biti veći od 0,15 %, a kod bijelog tempernog lijeva udio sumпора mora biti < 0,18 %.

Sadržaj **mangana** prilagođava se sadržaju sumпора tako da se sav sumpor veže s manganom pri čemu nastaje manganov sulfid (MnS). Na taj način se eliminira štetno djelovanje sumпора. Ako je sadržaj mangana 1,7 puta veći od sadržaja sumпора, teorijski gledano, sav će sumpor reagirati s manganom, a produkt reakcije je manganov sulfid.

Budući da mangan stabilizira cementit, poželjno je da njegov sadržaj bude < 0,45 %, osim kod proizvodnje perlitnog tempernog lijeva gdje je dozvoljeno i do 1,0 % mangana. Prekomjerni sadržaji mangana ili sumпора otežavaju proces temperiranja.

**Fosfor** povećava livljivost, ali smanjuje žilavost te povećava tvrdoću i krtost odljevaka. Zbog toga je udio fosfora potrebno održavati  $< 0,10\%$ .

**Krom, molibden i vanadij** stabiliziraju karbide i značajno otežavaju proces grafitizacije, odnosno produžuju proces temperiranja, zbog čega je potrebno održavati nizak sadržaj ovih elemenata.

**Aluminij i titan** u količini od  $0,007$  do  $0,015\%$  neutraliziraju štetno djelovanje kroma i ubrzavaju proces grafitizacije, odnosno proces temperiranja.

**Nikal** se smatra korisnim elementom u tempernom lijevu jer djeluje kao grafitizator. Osim toga, nikal povoljno utječe na strukturu i mehanička svojstva tempernog lijeva.

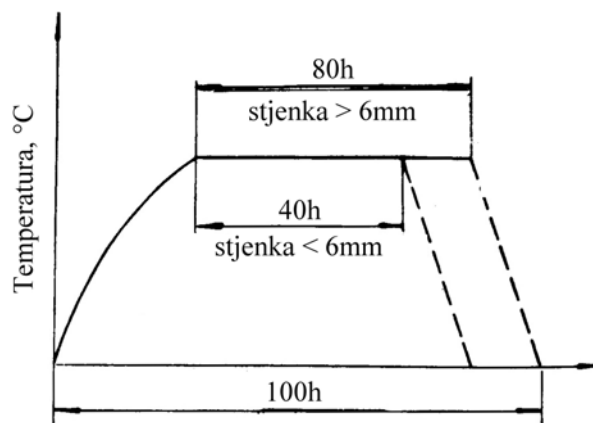
Ako se primjenjuju viši sadržaji silicija i ugljika da bi se povećala livljivost, dodatkom **bizmuta** i **bora** može se spriječiti stvaranje melirane strukture. Tipični dodatak bizmuta iznosi  $0,01\%$  (u obliku čistog metala), odnosno  $0,001\%$  bora (u obliku legure FeB). Bizmut otežava grafitizaciju tijekom skrućivanja. Bor u malim količinama ima neznatan utjecaj na grafitizaciju tijekom skrućivanja, ali ubrzava raspad karbida tijekom temperiranja.

Dodatkom **telura** u količinama od  $0,0005$  do  $0,001\%$  može se spriječiti stvaranje melirane strukture. Telur znatno snažnije promovira stvaranje karbida od bizmuta tijekom skrućivanja, ali značajno otežava proces temperiranja ako je njegov udio  $> 0,003\%$ . Telur je znatno efikasniji ako se doda zajedno s bakrom i bizmutom.

## 7.4 Toplinska obrada (temperiranje)

### 7.4.1 Proizvodnja bijelog tempernog lijeva

Kod proizvodnje bijelih tempernih ljevova (slika 7.5) odljevci s bijelom strukturom (nakon lijevanja) određenog kemijskog sastava zagrijavaju se na temperaturu od  $950$  do  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  (austenitno područje) u oksidacijskoj atmosferi i zadržavaju dovoljno dugo na toj temperaturi (od  $40$  do  $80$  h, što ovisi o debljini stjenke odljevka i karakteristikama oksidacijske atmosfere u peći).



Slika 7.5. Shematski prikaz procesa temperiranja kod proizvodnje bijelog tempernog lijeva

Tijekom temperiranja najprije dolazi do razlaganja cementita, a zatim oksidacije nastalog slobodnog ugljika. Stupanj razugljičenja ovisi o oksidacijskoj atmosferi u peći i kemijskom sastavu odljevka te temperaturi i vremenu temperiranja.

Temperatura na kojoj se provodi temperiranje ovisi o kemijskom sastavu odljevaka. Brzina zagrijavanja ovisi o obliku i konfiguraciji odljevka. Odljevci kompleksnih oblika moraju se zagrijavati sporije da bi se izbjegla pojava pukotina. Vrijeme zagrijavanja (do temperature temperiranja) obično iznosi 20 do 30 h.

Nakon dovoljno dugog zadržavanja na temperaturi temperiranja, odljevci se sporo hlade do 600 °C brzinom od 10 do 12 °C/h. Nakon toga, brzina hlađenja može se povećati. Tijekom hlađenja smanjuje se topljivost ugljika u austenitu, pri čemu se ugljik koji je izdifundirao iz austenita izlučuje u obliku temper grafitita.

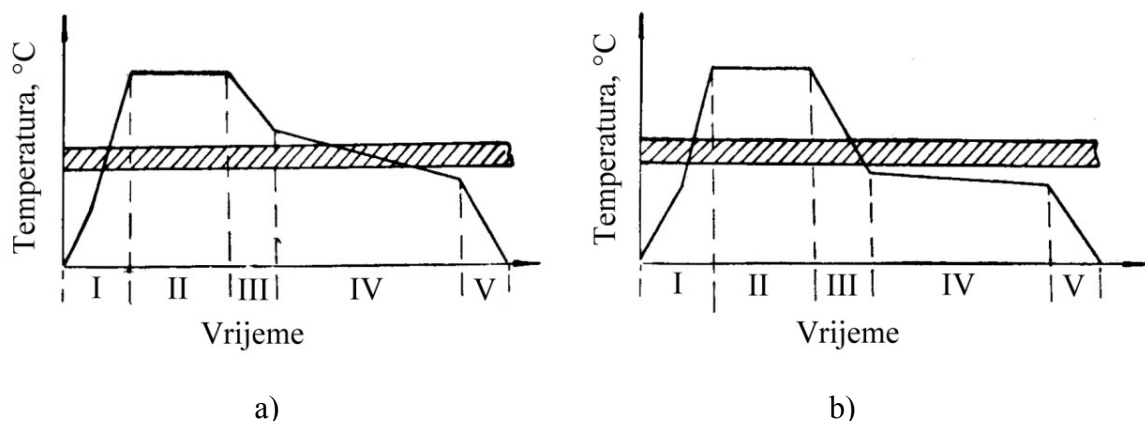
Nekada se temperiranje provodilo tako da su se odljevci nakon uklanjanja uljavnog sustava i pojila te čišćenja stavljali u čelične lonce i ravnomjerno zasipavali oksidacijskim sredstvom. Nakon toga lonci se zatvaraju i zagrijavaju na temperaturu temperiranja. Izvor kisika najčešće je bila željezna ruda krupnoće od 5 do 10 mm.

Toplinska obrada, odnosno temperiranje, danas se provodi u specijalnim pećima različitih konstrukcija. Najsuvremenije peći su protočno-tunelske peći s reguliranim ogrjevnim zonama. Proces je potpuno automatiziran i kontinuiran. Grijanje peći je kombinirano: plinom ili električnom energijom. Peći su opremljene postrojenjem za osiguranje potrebne atmosfere u peći, a ugrađene su i stanice za uljno i zračno kaljenje (proizvodnja martenzitnog tempnog lijeva).

#### 7.4.2 Proizvodnja crnog tempnog lijeva

Kod proizvodnje crnih tempnih lijeva odljevci s bijelom strukturom (nakon lijevanja) određenog kemijskog sastava zagrijavaju se na temperaturu od 850 do 970 °C (austenitno područje) u neutralnoj atmosferi i zadržavaju dovoljno dugo na toj temperaturi (od 20 do 40 h) pri čemu dolazi do razlaganja cementita, odnosno stvaranja tempnog grafitita.

Proces temperiranja pri proizvodnji crnih tempnih lijeva sastoji se iz 5 perioda (slika 7.6).



Slika 7.6. Shema procesa grafitizacije kod proizvodnje crnog tempnog lijeva: a) sporo hlađenje kroz eutektoidno područje, b) brzo hlađenje kroz eutektoidno područje i dovoljno dugo zadržavanje u podkritičnom eutektoidnom području

U prvom periodu odljevci s bijelom strukturom (nakon lijevanja) zagrijavaju se na temperaturu iznad eutektoidne (od 850 do 970 °C, tj. u austenitno područje). Vrijeme zagrijavanja do temperature temperiranja iznosi od 18 do 30 h.

U drugom periodu odljevak se zadržava od 20 do 40 h na prethodno navedenim temperaturama da bi došlo do potpunog raspada primarnih karbida, odnosno eutektičkog cementita (prvi stupanj grafitizacije) pri čemu nastaje temperni grafit (stvaranje i rast tempernog grafita).

U trećem periodu odljevak se nakon dovoljno dugoga zadržavanja na prethodno navedenim temperaturama relativno brzo hladi (od 1 do 6 h) do eutektoidnog područja pri čemu se ugljik koji je otopljen u austenitu tijekom zadržavanja u austenitnom području izlučuje u obliku grafita koji difundira na postojeći temper grafit (drugi stupanj grafitizacije), što rezultira njegovim daljnjim rastom.

U četvrtom periodu odljevak se hladi kroz područje eutektoidne pretvorbe i eventualno dovoljno dugo zadržava neposredno ispod područja eutektoidne pretvorbe (treći stupanj grafitizacije). Ako se odljevak sporo hladi (od 3 do 11 °C/h) kroz područje eutektoidne pretvorbe (od 720 do 760 °C) dolazi do pretvorbe austenita u ferit i grafit (slika 7.6a) i dobiva se feritni temperni lijev (slika 7.2a). Pri bržem hlađenju kroz područje eutektoidne pretvorbe dolazi do stvaranja perlita. Ukoliko se odljevak dovoljno dugo zadržava na temperaturi neposredno ispod područja eutektoidne pretvorbe dolazi do razlaganja cementita iz perlita na ferit i grafit (slika 7.6b).

U petom periodu odljevak se hladi do sobne temperature.

Primjenom suvremenih peći za temperiranje (vidi „Proizvodnja bijelog tempernog lijeva“) proces se može skratiti na 30 do 40 h.

Temperni grafit izlučuje se pretežno na granicama između primarnih (eutektičkih) karbida i zasićenog austenita tijekom zadržavanja na temperaturi temperiranja. Temperatura na kojoj se provodi temperiranje značajno utječe na vrijeme temperiranja i broj nastalih čestica tempernog grafita. Povećanje temperature pri kojoj se provodi temperiranje rezultira povećanjem brzine razlaganja primarnih karbida te povećanjem broja čestica tempernog grafita po jedinici volumena. Međutim, visoke temperature temperiranja mogu rezultirati prekomjernom deformacijom odljevaka. Niske temperature temperiranja znatno produžuju proces temperiranja.

Martenzitni temperni lijev (slika 7.2c) proizvodi se tako da se odljevak nakon dovoljno dugog zadržavanja na temperaturi temperiranja ohladi u peći na temperaturu od 845 do 870 °C, zadrži na toj temperaturi od 15 do 30 min. da bi se homogenizirala metalna osnova i potom gasi u ulju da bi se dobila martenzitna metalna osnova. Nakon toga, provodi se popuštanje na temperaturama od 590 do 725 °C. Konačna mikrostruktura sastoji se od popušenog martenzita i temperiranog grafita. U debelim stjenkama može biti prisutan fini perlit.

## 8. BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI

### 8.1 Općenito o bijelim željeznim ljevovima

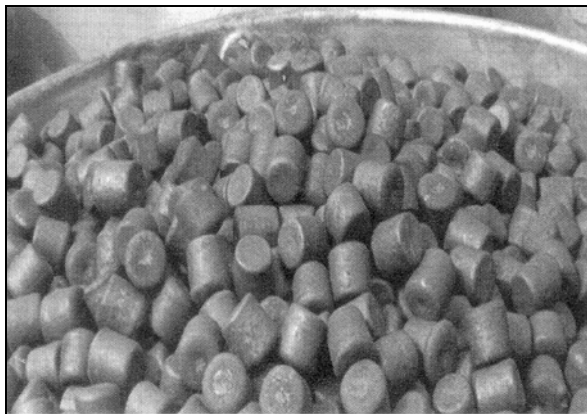
Bijeli željezni ljevovi (engl. *White Cast Irons*) su vrsta željeznih ljevova čija je osnovna karakteristika prisustvo karbida visoke tvrdoće u mikrostrukturi. Za razliku od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva, u mikrostrukturi bijelih željeznih ljevova nije prisutan grafit, već se ugljik izlučuje u obliku karbida, zbog čega imaju bijelu boju na prijelomnoj površini. Većina karbida formira se tijekom skrućivanja, tj. precipitira iz taljevine tijekom eutektičke reakcije.

Zbog prisustva vrlo tvrdih karbida u mikrostrukturi najveći dio proizvodnje bijelih željeznih ljevova odnosi se na odljevke koji moraju imati visoku otpornost na trošenje, zbog čega su poznati pod nazivom željezni ljevovi otporni na trošenje. Kod željeznih ljevova otpornih na trošenje odgovarajućim legiranjem nastoje se dobiti specijalni karbidi visoke tvrdoće u martenzitnoj metalnoj osnovi.

Osim što se primjenjuju za aplikacije u kojima se zahtijeva visoka otpornost na trošenje, bijeli željezni ljevovi u određenom opsegu primjenjuju se i za aplikacije kod kojih se zahtijeva visoka otpornost na koroziju te visoke temperature. Za te aplikacije primjenjuju se feritni bijeli željezni ljevovi visokolegirani kromom ( $> 30,0$  % kroma).

Vrlo tvrdi karbidi prisutni u mikrostrukturi željeznih ljevova otpornih na trošenje zaslužni su za visoku otpornost ovih materijala na sve tipove trošenja, ali negativno utječu na žilavost ovih materijala. Da bi se izbjegao lom komponente u radnim uvjetima, nije dovoljno ostvariti samo visoku otpornost na trošenje, već je potrebno postići i odgovarajuću žilavost.

Na slikama 8.1 i 8.2 prikazani su primjeri odljevaka od željeznih ljevova otpornih na trošenja.



a)

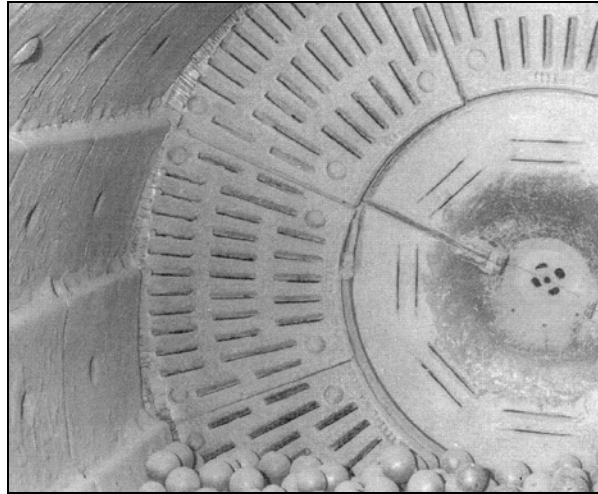


b)

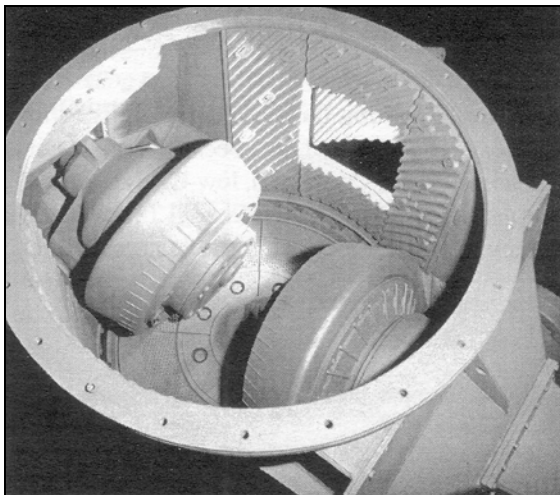
Slika 8.1. a) odljevci od željeznog lijeva s gradijentnom strukturom koji služe kao medij za usitnjavanje (npr. Proizvodnja kvarcne prašine), b) valjci za valjaonice čelika izrađeni od Ni-Hard 1 željeznog lijeva otpornog na trošenje



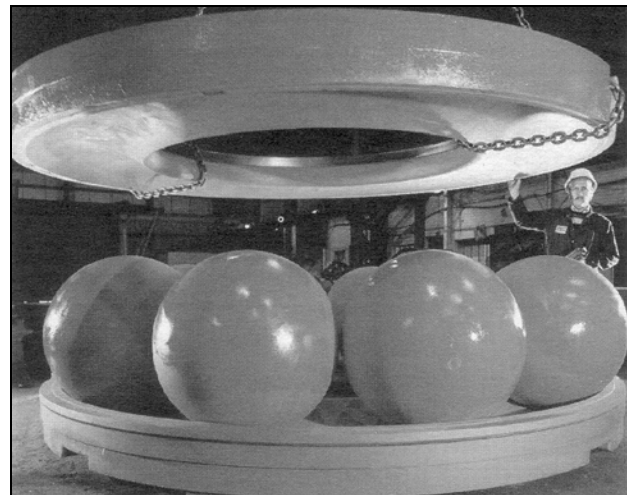
a)



b)



c)



d)

Slika 8.2. a) ploče (oplate) od Ni-Hard 1 željeznog lijeva u kugličnom mlinu, b) kugle i ploče (oplate) od visokokromnog željeznog lijeva u kugličnom mlinu za usitnjavanje klinkera u industriji cementa, c) valjci i oplate od Ni-Hard 4 željeznog lijeva u drobilici za usitnjavanje ugljena, d) dijelovi drobilice za ugljen izrađeni od visokokromnog željeznog lijeva

## 8.2 Klasifikacija željeznih ljevova otpornih na trošenje

Željezni ljevovi otporni na trošenje klasificiraju se u 4 skupine, ovisno o legiranju i mikrostrukturi:

1. Perlitni ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) željezni ljevovi,
2. Ni-Cr ( $\text{M}_3\text{C}$ ) želj. ljevovi (poznati pod trgovačkim nazivom Ni-Hard 1, 2 i 3),
3. Ni-Cr ( $\text{M}_7\text{C}_3$ ) željezni ljevovi (poznati pod trgovačkim nazivom Ni-Hard 4),
4. Visokokromni željezni ljevovi ( $\text{M}_7\text{C}_3$ ),
5. Specijalni željezni ljevovi ( $\text{M}_x\text{C}$ ).

U prethodno prikazanoj podjeli kod svake skupine željeznih ljevova otpornih na trošenje u zagradi je naveden i tip karbida koji se izlučuje. Karbidi tipa  $\text{M}_3\text{C}$  i  $\text{M}_7\text{C}_3$  su kompleksni, odnosno miješani karbidi koji se razlikuju od klasičnog  $\text{Fe}_3\text{C}$  karbida (cementita). U miješanim karbidima pored željeza prisutni su u većem ili manjem udjelu karbidotvorni elementi (npr. Krom, molibden itd.). Slovo „M“ u oznaci karbida ukazuje na mješovitu prirodu karbida (npr. Karbid  $(\text{Cr}_3\text{Fe}_2)\text{C}_3$  je karbid  $\text{M}_7\text{C}_3$  tipa).

### 8.2.1 Perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje

Familija perlitnih bijelih željeznih ljevova najstarija je vrsta željeznih ljevova proizvedenih isključivo za aplikacije gdje se zahtijeva otpornost na trošenje.

Perlitni željezni ljevovi dijele se u dvije skupine:

- željezni ljevovi s gradijentnom strukturom, odnosno željezni ljevovi s nedefiniranim udjelom karbida (cementita) (engl. *Indefinite Chill Irons*),
- željezni ljevovi s potpuno bijelom strukturom (engl. *White Cast Irons*).

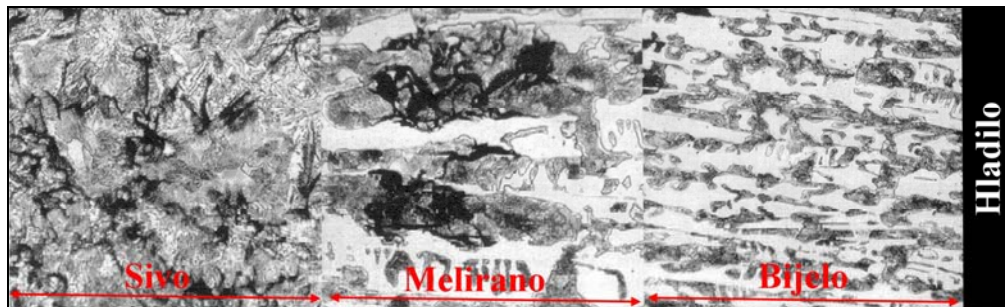
Kod željeznih ljevova s gradijentnom strukturom prisutan je postepen prijelaz od bijele (površinski sloj odljevka) ka sivoj (jezgra odljevka) strukturi. Kod željeznih ljevova s potpuno bijelom strukturom iz samog naziva može se zaključiti da odljevak preko čitavog presjeka ima bijelu strukturu. U oba slučaja metalna osnova je perlitna.

Kod željeznih ljevova s gradijentnom strukturom uslijed naglog (brzog) hlađenja do kojeg dolazi zbog kontakta s hladnom površinom koja dobro odvodi toplinu (primjena rashladnih tijela, odnosno hladila (metalnih kokila) u kalupu), formira se mreža karbida otpornih na trošenje u površinskom sloju. To znači da se u površinskom sloju koji je u kontaktu s hladilom ugljik se ne izlučuje u obliku grafita (stabilna ili ravnotežna faza) već u obliku karbida (metastabilna ili neravnotežna faza).

Brzo skrućivanje rezultira odvijanjem eutektičke reakcije prema metastabilnom sustavu, odnosno dolazi do stvaranja austenita i karbida ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Ako su prisutni legirajući elementi, karbid koji nastaje tijekom skrućivanja može biti  $\text{M}_3\text{C}$  tipa.

Sa udaljavanjem fronte skrućivanja od rashladne površine smanjuje se brzina skrućivanja i sve više se javlja tendencija ka stabilnom (ravnotežnom) skrućivanju. Zbog toga se na većim udaljenostima od rashladne površine eutektička reakcija odvija se prema stabilnom sustavu tj. nastaje austenit i grafit. Prijelaz od metastabilnog ka stabilnom skrućivanju ne odvija se naglo već postepeno. Prema tome, kod debelostjenih odljevaka razlikuje se površinski sloj koji ima potpuno bijelu strukturu i visoku otpornost na trošenje

koja potječe od prisutnih karbida, prijelazno područje koje se nalazi ispod prethodno navedenog područja i ima meliranu strukturu (karbidi + grafit), nakon čega slijedi područje (središnji dio odljevka) u kojem je ugljik u potpunosti izlučen u obliku grafita (struktura koja odgovara sivom lijevu) (slika 8.3).



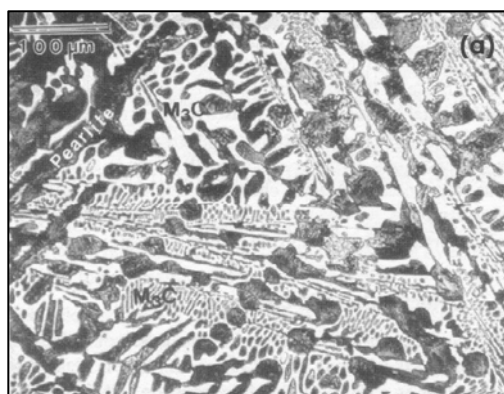
Slika 8.3. Mikrostruktura željeznog lijeva s gradijntnom strukturom pri povećanju 100x

Osim primjene različitih rashladnih tijela (deblja ili tanja), postoji nekoliko metalurških postupaka za dobivanje različite debljine površinskog sloja otpornog na trošenje. Ako se želi postići manja debljina površinskog sloja otpornog na trošenje može se povećati sadržaj silicija, čime se pospješuje stvaranje grafita umjesto karbida. Veća debljina površinskog sloja otpornog na trošenje može se postići dodatkom malih količina kroma ili mangana ili dodatkom elemenata koji sprječavaju stvaranje grafita (npr. sumpor, bizmut, telur).

Ovakav tip „miješane“ mikrostrukture (površinski sloj otporan na trošenje + područje u kojem je ugljik u potpunosti izlučen u obliku grafita (praktički sivi lijev)) pokazao se korisnim u mnogim slučajevima, jer sivi lijev osigurava podlogu za tvrdi, bijeli površinski sloj otporan na trošenje. Duktilnija podloga sivog lijeva povećava otpornost na lom komponente. Nedostatak ovih materijala leži u činjenici da površinski sloj otporan na trošenje ima ograničenu debljinu i može se istrošiti, nakon čega je abrazivnom djelovanju podvrgnut podpovršinski sloj niske tvrdoće.

Nakon skrućivanja, zbog niskog sadržaja legirajućih elemenata, austenit se gotovo uvijek transformira u perlit. Samo u rijetkim slučajevima, kod vrlo tankih stjenki i vrlo visokih brzina hlađenja, austenit može biti prisutan pri sobnoj temperaturi (zaostali austenit).

Ako se mikrostruktura odljevka preko čitavog presjeka sastoji od perlita i eutektičkih karbida, ova legura naziva se perlitni željezni lijev s potpuno bijelom strukturom (u mikrostrukтури nije prisutan grafit) (slika 8.4).



Slika 8.4 Metalografska snimka mikrostrukture perlitnog željeznog lijeva s potpuno bijelom strukturom.



Danas postoji nekoliko normi za klasifikaciju perlitnih bijelih željeznih ljevova: norma EN 12 513 (tablica 8.1) primjenjuje se u zemljama EU, BS 4844 Part 1: 1974 (tablica 8.2) u Engleskoj, IS 7925 – 1976 u Indiji itd.

Tablica 8.1. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće nelegiranih ili niskolegiranih perlitnih bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema EN 12 513

Oznaka <sup>(1)</sup> (Simbol)	Broj	Kemijski sastav, mas.% <sup>1)</sup>									HV <sub>min.</sub>
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	
EN-GJN-HV350	EN-JN 2019	2,4-3,9	0,4-1,5	0,2-1,0	-	-	2,0	-	-	-	350

<sup>2)</sup> Žilavost i otpornost na ponovljene udare raste sa smanjenjem sadržaja ugljika

Tablica 8.2. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće nelegiranih ili niskolegiranih perlitnih bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema BS 4844

Norma	Kval.	Kemijski sastav, mas.%									HV <sub>min.</sub> <sup>1)</sup>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	P <sub>maks</sub>	S <sub>maks</sub>	
BS 4844 Part I: 1974	1A	2,4-3,4	0,5-1,5	0,2-0,8	-	maks. 2,0	-	-	0,15	-	400
	1B	2,4-3,4	0,5-1,5	0,2-0,8	-	maks. 2,0	-	-	0,5	-	400
	1C	2,4-3,4	0,5-1,5	0,2-0,8	-	maks. 2,0	-	-	0,15	-	250

<sup>1)</sup> kod odljevaka s debljinom stjenke > 50,0 mm, tvrdoća može biti za 50 HB manja od specificirane

Iz tablica 8.1 i 8.2 može se vidjeti da je sadržaj silicija potrebno održavati niskim jer promovira stvaranje grafita, dok se dodatkom mangana i/ili kroma pospješuje stvaranje karbida. Tvrdoća perlitnih bijelih željeznih ljevova obično se kreće u intervalu od 350 – 500 HB. S porastom udjela karbida u mikrostrukturi ili povećanjem tvrdoće perlita (usitnjenje perlita putem smanjenja razmaka između lamela cementita) povećava se tvrdoća perlitnih željeznih ljevova otpornih na trošenje.

### 8.2.2 Željezni ljevovi otporni na trošenje legirani niklom i kromom (Ni-Hard 1, 2 i 3)

Željezni ljevovi otporni na trošenje legirani niklom i kromom poznati su pod trgovačkim nazivom Ni-Hard. U osnovi radi se o porodici željeznih ljevova kod kojih se nikel upotrebljava kao primarni legirajući element za povećanje prokaljivosti. Nikal u koncentracijama od 3,0 – 5,0 % efikasno sprječava pretvorbu austenita u perlit, tj. povećava prokaljivost. Zbog toga se austenit tijekom hlađenja nakon skrućivanja većim djelom transformira u martenzit.

Dodatkom kroma (1,4 – 4,0 %) promovira se stvaranje karbida (M<sub>3</sub>C tipa) umjesto grafita (sprječavanje grafitizirajućeg djelovanja nikla) bez obzira na brzinu hlađenja tijekom skrućivanja (karbidi prisutni u tankim i debelim stjenkama neovisno o upotrebi hladila).

Za klasifikaciju bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje legiranih kromom i niklom (Ni-Hard) primjenjuje se nekoliko normi: norma EN 12 513 (tablica 8.3) primjenjuje

se u zemljama EU, BS 4844 Part 2: 1972 (tablica 8.4) u Engleskoj, ASTM A 532/A 532M – 1993 u SAD-u (tablica 8.5 i 8.6), IS 4771 – 1972 u Indiji itd.

Tablica 8.3. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje legiranih niklom i kromom (Ni-Hard) prema EN 12 513

Oznaka <sup>(1)</sup> (Simbol)	Broj	Kemijski sastav, mas. % <sup>(1,2)</sup>									HV <sub>min.</sub>
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	
EN-GJN-HV520	EN-JN 2029	2,5-3,0	0,8	0,8	0,1	0,10	1,5-3,0	3,0-5,5	-	-	520
EN-GJN-HV550	EN-JN 2039	3,0-3,6	0,8	0,8	0,1	0,10	1,5-3,0	3,0-5,5	-	-	550
EN-GJN-HV600 <sup>3)</sup>	EN-JN 2049	2,5-3,5	1,5-2,5	0,3-0,8	0,08	0,08	8,0-11,0	4,5-6,5	-	-	600

<sup>1)</sup> Žilavost i otpornost na ponovljene udare raste sa smanjenjem sadržaja ugljika

<sup>2)</sup> Ako se isporučuju debelostjeni odljevci ili odljevci s niskim sadržajem legirajućih elemenata u lijevanom stanju, teško se može ostvariti minimalna zahtijevana tvrdoća. U tom slučaju zahtjevi se moraju usuglasiti između kupca i proizvođača.

<sup>3)</sup> Odgovara kvaliteti Ni-Hard 4 prema ASTM A 532/A 532M

Tablica 8.4. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje legiranih niklom i kromom (Ni-Hard) prema BS 4844

Norma	Kval.	Kemijski sastav, mas. %									HV <sub>min.</sub> <sup>1)</sup>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	P <sub>maks</sub>	S <sub>maks</sub>	
BS 4844 Part II: 1972	2A	2,7-3,2	0,3-0,8	0,2-0,8	3,0-5,5	1,5-2,5	maks. 0,5	-	0,3	0,15	500
	2B	3,2-3,6	0,3-0,8	0,2-0,8	3,0-5,5	1,5-2,5	maks. 0,5	-	0,3	0,15	550
	2C <sup>2)</sup>	2,4-2,8	1,5-2,2	0,2-0,8	4,0-6,0	8,0-10,0	maks. 0,5	-	0,3	0,15	500
	2D	2,8-3,2	1,5-2,2	0,2-0,8	4,0-6,0	8,0-10,0	maks. 0,5	-	0,3	0,15	550
	2E	3,2-3,6	1,5-2,2	0,2-0,8	4,0-6,0	8,0-10,0	maks. 0,5	-	0,3	0,15	600

<sup>1)</sup> Kod odljevaka s debljinom stjenke > 125,0 mm, tvrdoća može biti za 50,0 HB manja od specificirane

<sup>2)</sup> Odgovara kvaliteti Ni-Hard 4 prema ASTM A 532/A 532M

Tablica 8.5. Propisani kemijski sastavi bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje legiranih niklom i kromom (Ni-Hard) prema ASTM A 532/A 532M

Klasa	Tip	Oznaka	Kemijski sastav, %								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
I	A	Ni-Cr-HC <sup>1)</sup> (Ni-Hard 1)	2,8-3,6	maks 2,0	maks 0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	B	Ni-Cr-LC <sup>2)</sup> (Ni-hard 2)	2,4-3,0	maks 2,0	maks 0,8	3,3-5,0	1,4-4,0	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	C	Ni-Cr-GB <sup>3)</sup> (Ni-Hard 3)	2,5-3,7	maks 2,0	maks 0,8	maks 4,0	1,0-2,5	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	D	Ni-HiCr (Ni-Hard 4)	2,5-3,6	maks 2,0	maks 2,0	4,5-7,0	7,0-11,0	maks 1,5	-	maks 0,1	maks 0,15

<sup>1)</sup> HC – (eng. high carbon) – visok sadržaj ugljika

<sup>2)</sup> LC – (eng. low carbon) – nizak sadržaj ugljika

<sup>3)</sup> GB – (Great Britain) – Engleska

Tablica 8.6. Minimalne vrijednosti tvrdoće bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje legiranih niklom i kromom (Ni-Hard) prema ASTM A 532/A 532M

Klasa			Lijevano stanje ili lijevano stanje + uklanjanje zaostal. naprezanja		Lijevanje u pijesak, min <sup>1)</sup>				Lijevanje uz primjenu hladila, min <sup>2)</sup>	
					Otvrdnjavanje (top. obrada) ili otvrdnjavanje + uklanjanje zaostalih nap.		Nivo 1			
					Tip	Oznaka	HB	HV	HB	HV
I	A	Ni-Cr-HC <sup>1)</sup> (Ni-Hard 1)	550	600	600	660	650	715	600	660
I	B	Ni-Cr-LC <sup>2)</sup> (Ni-Hard 2)	550	600	600	660	650	715	600	660
I	C	Ni-Cr-GB <sup>3)</sup> (Ni-Hard 3)	550	600	600	660	650	715	600	660
I	D	Ni-HiCr (Ni-Hard 4)	500	540	600	660	650	715	550	600

<sup>1)</sup> 90% minimalne vrijednosti tvrdoće površine potrebno je zadržati do 40% debljine stjenke.

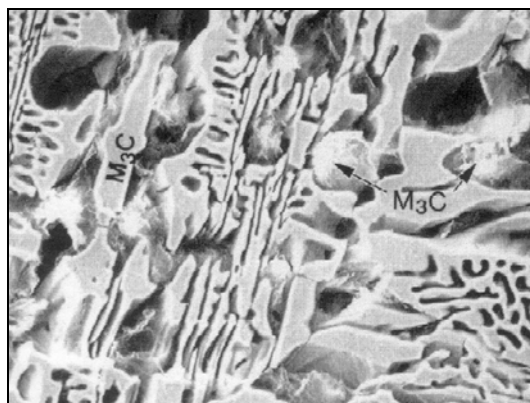
<sup>2)</sup> Područja odljevka koja nisu brzo hlađenja udovoljavaju minimalnim zahtjevima za tvrdoćom ili imaju tvrdoću koja se zahtijeva u slučaju lijevanja u pijesak.

Kada se krom (ili u određenom opsegu mangan i molibden) upotrebljava za stabiliziranje karbidne faze, karbid se označava kao  $M_3C$ , što ukazuje na mješovitu prirodu ove faze.  $M_3C$  karbid vizualno se ne može razlikovati od  $Fe_3C$  karbida koji nastaje u perlitnim bijelim željeznim ljevovima. Osim toga, navedeni karbidi nastaju putem iste eutektičke reakcije.

Tvrdoća Ni-Hard željeznih ljevova je kombinacija tvrdoće karbida i metalne osnove. Visoka tvrdoća je najznačajnije svojstvo po kojem se Ni-Hard 1, 2, 3 željezni ljevovi razlikuju od perlitnih bijelih željeznih ljevova i rezultat je stvaranja martenzita u lijevanom stanju umjesto perlita, zbog visokih sadržaja nikla (povećava prokaljivost). Prisustvo 3,0 – 5,0 % nikla omogućuje da austenit dostigne temperaturu početka stvaranja martenzita ( $M_s$ ), bez da dođe do pretvorbe u perlit. U većini slučajeva ne dolazi do stvaranja perlita i mikrostruktura Ni-Hard 1, 2 i 3 željeznih ljevova u lijevanom stanju sastoji se od martenzita i zaostalog austenita. Ukoliko su prisutne različite debljine stjenki u odljevku, u najdebljim stjenkama postoji mogućnost prisustva tragova perlita. Tipična mikrostruktura Ni-Hard željeznog lijeva prikazana je na slici 8.5.



a)



b)

Slika 8.5. a) metalografska snimka mikrostrukture Ni-Hard 1 željeznog lijeva, nagrizeno stanje, povećanje 500x, b) snimka mreže  $M_3C$  karbida elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizeno stanje, povećanje 1000x.

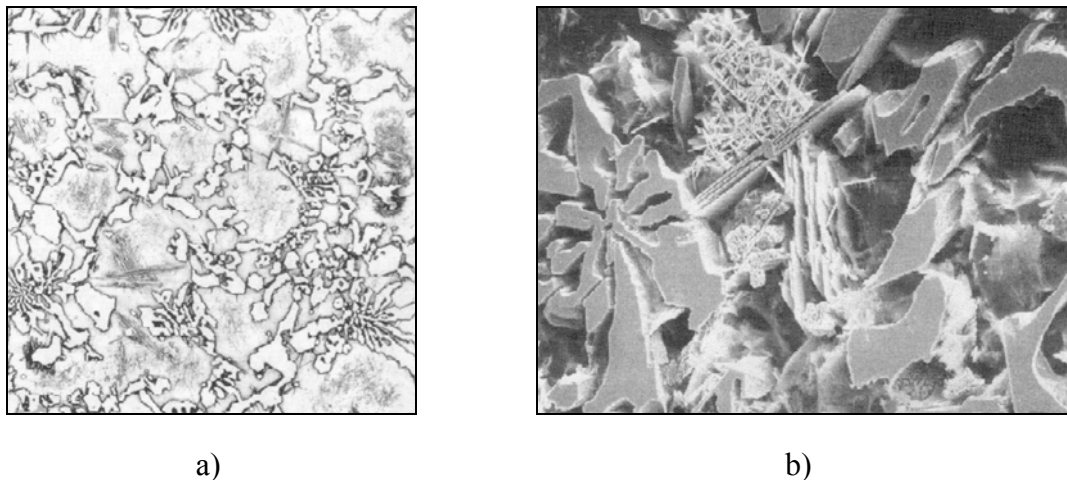
Sa slike 8.6b može se vidjeti da su  $M_3C$  karbidi gotovo kontinuirano raspoređeni kroz metalnu osnovu, što negativno utječe na žilavost.

Povećanje sadržaja ugljika i kroma rezultira povećanjem tvrdoće jer se povećava udio karbida. S povećanjem udjela karbida povećava se krhkost komponente, što rezultira povećanom opasnošću od loma komponente u radu.

Ako se kod Ni-Hard 1, 2 i 3 željeznih ljevova zahtijevana tvrdoća ne ostvari u lijevanom stanju potrebno je provesti odgovarajuću toplinsku obradu.

### 8.2.3 Željezni ljevovi otporni na trošenje legirani niklom i kromom (Ni-Hard 4)

Jedan od glavnih nedostataka prethodno razmatrane familije Ni-Cr bijelih željeznih ljevova (Ni Hard 1, 2 i 3) je njihova niska udarna žilavost. Glavni razlog niske udarne žilavosti Ni-Hard 1, 2 i 3 željeznih ljevova je kontinuiranost karbidne mreže ( $M_3C$ ) u mikrostrukturi ovih materijala. Zbog niske udarne žilavosti Ni-Hard 1, 2 i 3 željeznih ljevova razvijen je novi materijal u familiji željeznih ljevova otpornih na trošenje poznat pod trgovačkim nazivom Hard 4 (kemijski sastav prikazan je u tablicama 8.3, 8.4 i 8.5). Za razliku od Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova, u mikrostrukturi Ni-Hard 4 bijelih željeznih ljevova prisutni su karbidi tipa  $M_7C_3$  koji su povoljniji obzirom na udarnu žilavost. Tvrdoća Ni-Hard 4 željeznih ljevova varira ovisno o toplinskoj obradi. Mogu se ostvariti tvrdoće kao kod Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova ili više. Tipična mikrostruktura Ni-Hard 4 željeznog lijeva prikazana je na slici 8.6.



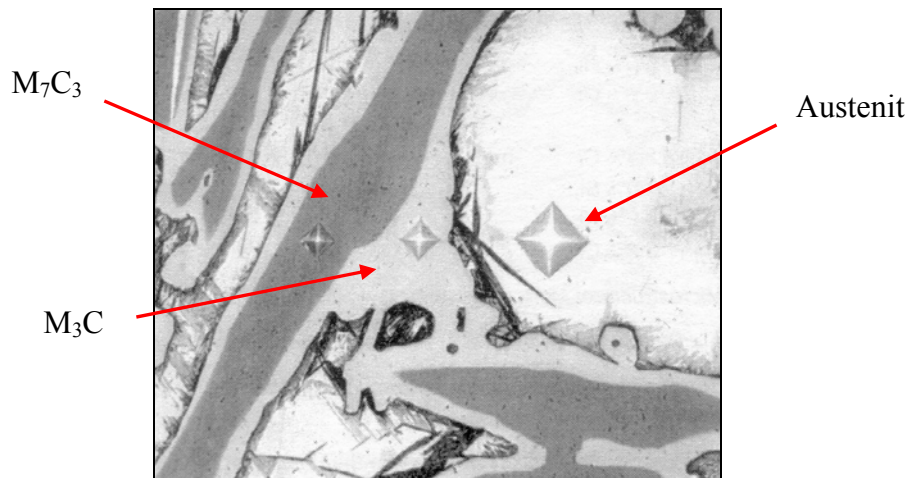
Slika 8.6. a) metalografska snimka mikrostrukture Ni-Hard 4 željeznog lijeva, nagrizano stanje, povećanje 500x, b) snimka  $M_7C_3$  karbida u Ni-Hard željeznom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizano stanje, povećanje 1200x.

Struktura metalne osnove Ni-Hard 4 bijelih željeznih ljevova u lijevanom stanju sastoji se od zaostalog austenita i martenzita. Zbog višeg sadržaja legirajućih elemenata prisutna je veća količina zaostalog austenita nego kod Ni-Hard 1, 2 i 3.

Eutektički karbidi  $M_7C_3$  tipa kod Ni-Hard 4 bijelih željeznih ljevova imaju znatno manju kontinuiranost u metalnoj osnovi (slika 8.6b) u odnosu na karbide  $M_3C$  tipa kod Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova, što rezultira višom žilavosti.

Povećanje sadržaja kroma na min. 7,0 % i silicija na ~ 1,8 % (tablice 8.3, 8.4 i 8.5) rezultira nastajanjem  $M_7C_3$  karbida.

Ako sadržaj silicija nije pažljivo kontroliran, odnosno ako je prenizak (< 1,5 %), može doći do stvaranja dupleks karbida, kod kojih je jezgra koju čine tvrdi  $M_7C_3$  karbidi okružena ovojnicom niže tvrdoće koju čine  $M_3C$  karbidi (slika 8.7). Pri sadržajima silicija > 1,5 % karbid je u potpunosti sastavljen od  $M_7C_3$ .



Slika 8.7. Metalografska snimka mikrostrukture podeutektičkog Ni-Hard 4 željeznog lijeva s niskim sadržajem silicija (~ 1,0 %) pri povećanju od 250x. Zbog niskog sadržaja silicija, u mikrostrukтури su prisutni dupleks karbidi

Na osnovi otisaka nakon mjerenja tvrdoće metodom po Vickersu (slika 8.7) može se zaključiti da  $M_7C_3$  karbid ima najvišu tvrdoću (najmanji otisak),  $M_3C$  karbid nešto nižu, a austenit najnižu (najveći otisak). Prisutnost  $M_3C$  karbida oko  $M_7C_3$  karbida nije poželjna jer negativno utječe na otpornost na trošenje i žilavost.

Ni-Hard 4 bijeli željezni ljevovi imaju vrlo dobru livljivost zbog kemijskog sastava koji je blizu eutektičkog i visokog sadržaja silicija. Pažljivom kontrolom proizvodnog procesa moguće je u lijevanom stanju ostvariti tvrdoće koje prelaze 600 HB, a toplinskom obradom tvrdoće iznad 700 HB. Negativna strana Ni-Hard 4 bijelih željeznih ljevova su viši troškovi proizvodnje jer se zahtijeva veći dodatak legirajućih elemenata.

Tvrdoća Ni-Hard 1, 2, 3 i 4 bijelih željeznih ljevova u lijevanom stanju može se dodatno povećati (za ~ 80 – 120 HB) ako se odljevci ohlade na temperature koje leže znatno ispod sobne temperature da bi se smanjio udio zaostalog austenita.

#### 8.2.4 Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje

Visokokromni željezni ljevovi su materijali visokolegirani kromom i predstavljaju najbolji izbor za aplikacije u kojima se zahtijeva otpornost na trošenje i određena žilavost te, u nekim slučajevima, otpornost na koroziju. Većina visokokromnih željeznih ljevova je podeutektičkog sastava. Mehanička svojstva i otpornost na trošenje kod ove familije željeznih ljevova prvenstveno su povezana s mikrostrukturom, odnosno finom raspodjelom  $M_7C_3$  karbida. Pravilnim legiranjem može se i u vrlo debelim stjenkama odljevaka od visokokromnih željeznih ljevova postići gotovo jednolična tvrdoća po čitavom presjeku. Visoka prokaljivost potječe od kombinacije legirajućih elemenata (krom, molibden, nikal i bakar).

Za klasifikaciju visokokromnih bijelih željeznih ljevova otpornih na trošenje primjenjuje se nekoliko normi: norma EN 12 513 (tablica 8.7) primjenjuje se u zemljama EU,

BS 4844 Part 3: 1974 (tablica 8.8) u Engleskoj, ASTM A 532/A 532M – 1993 u SAD-u (tablica 8.9 i 8.10), IS 4771 – 1972 u Indiji itd.

Tablica 8.7. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema EN 12 513

Oznaka <sup>(1)</sup> (Simbol)	Broj	Kemijski sastav, mas.% <sup>(1,2,3)</sup>									HV <sub>min.</sub>
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	
EN-GJN-HV600(XCr11)	EN-JN 3019	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	11,0-14,0	2,0	3,0	1,2	600
EN-GJN-HV600(XCr14)	EN-JN 3029	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	14,0-18,0	2,0	3,0	1,2	600
EN-GJN-HV600(XCr18)	EN-JN 3039	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	18,0-23,0	2,0	3,0	1,2	600
EN-GJN-HV600(XCr23)	EN-JN 3049	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	23,0-26,0	2,0	3,0	1,2	600

<sup>1)</sup> Žilavost i otpornost na ponovljene udare raste sa smanjenjem sadržaja ugljika.

<sup>2)</sup> Mikrostruktura visokokromnih željeznih ljevova ovisi o brzini hlađenja (debljini stijenke). Da bi se ostvarila specifična svojstva (unutar područja navedenih u tablici) može biti potrebna određena prilagodba sadržaja legirajućih elemenata, ovisno o varijacijama dimenzija odljevka

<sup>3)</sup> Ako se isporučuju debelostjeni odljevci ili odljevci s niskim sadržajem legirajućih elemenata u lijevanom stanju, teško se može ostvariti minimalna zahtijevana tvrdoća. U tom slučaju zahtjevi se moraju usuglasiti između kupca i proizvođača.

Tablica 8.8. Propisani kemijski sastavi i minimalne vrijednosti tvrdoće visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema BS 4844

Norma	Kval.	Kemijski sastav, mas.%									HV <sub>min.</sub> <sup>1)</sup>
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	P <sub>maks</sub>	S <sub>maks</sub>	
BS 4844 Part III: 1974	3A	2,4-3,0	maks 1,0	0,5-1,5	≤1,0	14,0-17,0	≤2,5	≤1,2	0,1	-	450 <sup>3)</sup>
	3B	3,0-3,6	maks 1,0	0,5-1,5	≤1,0	14,0-17,0	1,0-3,0	≤1,2	0,1	-	500 <sup>3)</sup>
	3C	2,2-3,0	maks 1,0	0,5-1,5	≤1,0	17,0-22,0	≤3,0	≤1,2	0,1	-	450
	3D	2,4-2,8	maks 1,0	0,5-1,5	≤1,0	22,0-28,0	≤1,5	≤1,2	0,1	-	400
	3E	2,8-3,2	maks 1,0	0,5-1,5	≤1,0	22,0-28,0	≤1,5	≤1,2	0,1	-	450

<sup>1)</sup> Lijevano stanje

Tablica 8.9. Propisani kemijski sastavi visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema ASTM A 532/A 532M

Klasa	Tip	Oznaka	Kemijski sastav, %								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
II	A	12%Cr	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	11,0-14,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
II	B	15% Cr-Mo	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	14,0-18,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
II	D	20 % Cr-Mo	2,0-3,3	maks 2,0	1,0-2,2	maks 2,5	18,0-23,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
III	A	25% Cr	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	23,0-30,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06

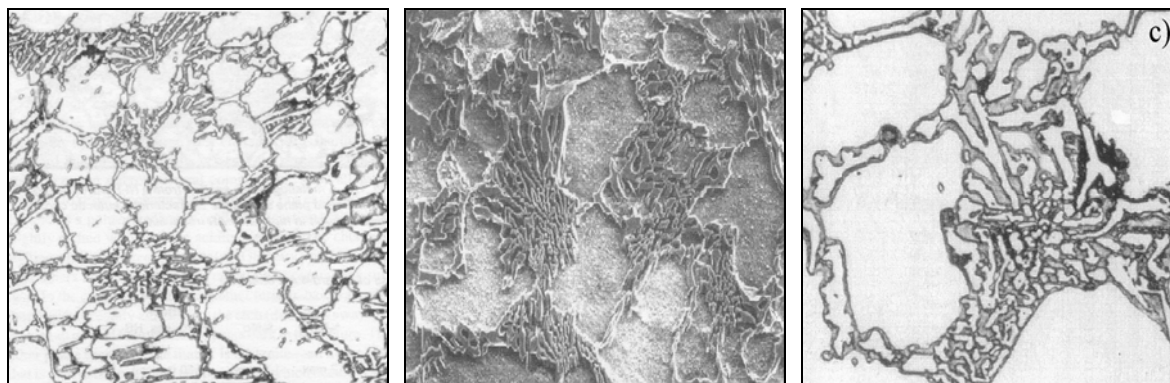
Tablica 8.10. Minimalne vrijednosti tvrdoće visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prema ASTM A 532/A 532M

			Lijeivano stanje ili lijevano stanje + uklanjanje zaostal. naprezanja		Lijevanje u pijesak, min. <sup>1)</sup> Otvrdnjavanje (top. obrada) ili otvrdnjavanje + uklanjanje zaostalih nap.				Lijevanje uz primjenu hladila, min. <sup>2)</sup>	
					Nivo 1		Nivo 2			
II	A	12%Cr	550	600	600	660	650	715	550	600
II	B	15% Cr-Mo	450	485	600	660	650	715	-	-
II	D	20 % Cr-Mo	450	485	600	660	650	715	-	-
III	A	25% Cr	450	485	600	660	650	715	-	-

<sup>1)</sup> 90 % minimalne vrijednosti tvrdoće površine potrebno je zadržati do 40 % debljine stjenke.

<sup>2)</sup> Područja odljevka koja nisu brzo hlađenja udovoljavaju minimalnim zahtjevima za tvrdoćom ili imaju tvrdoću koja se zahtijeva u slučaju lijevanja u pijesak.

Budući da je raspon kemijskih sastava vrlo širok kod ove vrste željeznih ljevova, mikrostruktura u lijevanom stanju može biti austenitna, perlitna, martenzitna, feritna ili bainitna, a vrlo često je kombinacija prethodno navedenih konstituenata. Tipična mikrostruktura visokokromnog željeznog lijeva prikazana je na slici 8.8.



a)

b)

c)

Slika 8.8. a) metalografska snimka mikrostrukture visokokromnog željeznog lijeva, nagrizeno stanje, povećanje 500x. U mikrostrukturi je prisutan visok udio zaostalog austenita. b) snimka  $M_7C_3$  karbida u visokokromnom željeznom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizeno stanje, povećanje 320x, c) metalografska snimka mikrostrukture visokokromnog željeznog lijeva, nagrizeno stanje, povećanje 1000x. Oko karbida nalazi se tanki sloj martenzita.

Ako se zahtijevana tvrdoća ne ostvari u lijevanom stanju potrebno je provesti odgovarajuću toplinsku obradu.

## 8.2.5 Specijalni željezni ljevovi otporni na trošenje

Kemijski sastavi specijalnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prikazani su u tablici 8.11. Za razliku od prethodno analiziranih željeznih ljevova, ne postoje norme koje klasificiraju specijalne željezne ljevove otporne na trošenje.

Tablica 8.11. Kemijski sastav i tvrdoća specijalnih željeznih ljevova otpornih na trošenje

Vrsta lijeva	Kemijski sastav, %								Tvrdoća <sup>1)</sup> , HB
	C	Cr	V	Nb	Mo	Mn	Si	Ni	
Feritni visokokromni željezni ljev	1,5 -2,4	30,0 -40,0	-	-	-	-	-	-	300 -450
A7 <sup>2)</sup>	2,3	5,25	4,75	-	maks. 1,1	0,5	0,5	-	500-750
Željezni ljev baziran na niobiju	2,9	16,7	-	2,0	0,8	0,8	-	0,7	440-630

<sup>1)</sup> Tvrdoća varira ovisno o toplinskoj obradi,

<sup>2)</sup> Ovi željezni ljevovi mogu sadržavati do 7,0 % volframa čime se promovira stvaranje tvrdih volframovih karbida (WC)

Feritni visokokromni željezni ljevovi primjenjuju se u slučajevima kada se prije svega zahtijeva visoka otpornost na koroziju, a potom dobra otpornost na trošenje. Mikrostruktura ovih materijala sastoji se od feritne metalne osnove i tvrdih  $M_7C_3$  karbida. Ključni faktor koji određuje svojstva (otpornost na koroziju) je visoki sadržaj kroma u metalnoj osnovi. Da bi se ostvario visok sadržaj kroma u metalnoj osnovi, potrebno je smanjiti sadržaj ugljika jer se na taj način smanjuje volumni udio karbida, odnosno količina kroma vezanog u karbide. Zbog visokog sadržaja kroma ova familija željeznih ljevova pokazuje vrlo dobru otpornost na djelovanje oksidirajućih kiselina (npr.  $HNO_3$ ), ali ne i naročitu otpornost na djelovanje reducirajućih kiselina (npr. HCl).

Ako se taljevina vrlo visoko legira kromom (30,0 – 39,0 %), značajno se poboljšava otpornost na visoke temperature. U tom slučaju odljevci su pogodni za visokotemperaturne primjene do temperature od 1040 °C.

Specijalne željezne ljevove bazirane na vanadiju (trgovačka oznaka A7) karakteristika prisustvo tvrdih, otpornih na trošenje  $M_xC$  eutektičkih karbida u metalnoj osnovi. Dominantan karbid je zasnovana na vanadiju i često se u literaturi označava kao MC. Vanadijem legirani željezni ljevovi imaju vrlo visoku žilavost i visku otpornost na trošenje. Mikrostruktura željeznog lijeva legiranog vanadijem prikazana je na slici 8.9.

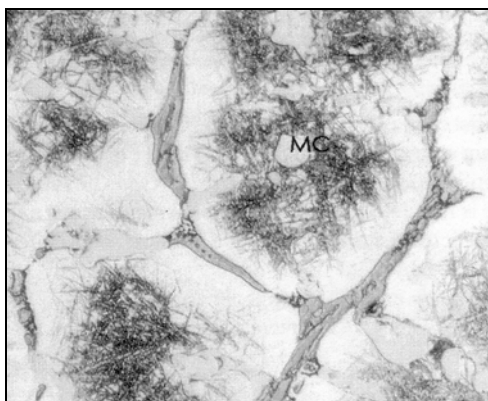
Primjena specijalnih željeznih ljevova baziranih na vanadiju ograničena je zbog visokih proizvodnih troškova. Od ovih materijala izrađuju se valjci za valjaonice za toplo valjanje traka.

Specijalne željezne ljevove bazirane na niobiju karakterizira prisustvo vrlo tvrdih niobijevih karbida (NbC) u metalnoj osnovi, što rezultira visokom otpornošću na trošenje.

Proizvodnja ovih željeznih ljevova je otežana. Dodatkom niobija pogoršava se livljivost taljevine željeznog lijeva i odmah dolazi do stvaranja niobijevih karbida u taljevini čim započne skrućivanje. Ovi karbidi otežavaju tok taljevine u kalupu i mogu rezultirati stvaranjem grešaka u odljevku.

Dodatak niobija pogoršava prokaljivost željeznog lijeva.





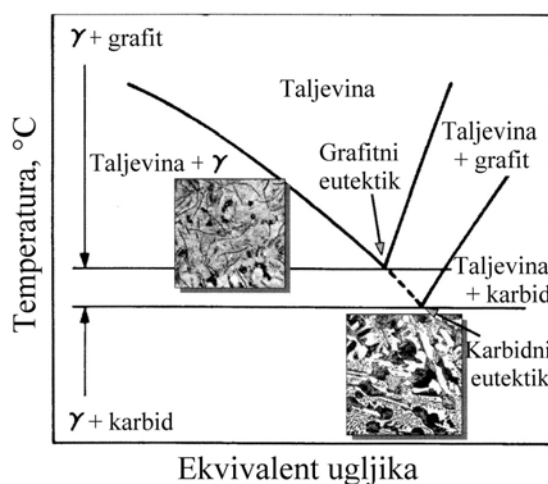
Slika 8.9. Metalografska snimka mikrostrukture specijalnog željeznog lijeva baziranog na vanadiju u nagrizenom stanju, nital, povećanje 1000x. U mikrostrukтури su prisutni karbidi tipa  $M_7C_3$  i MC, a metalna osnova se sastoji od austenita i martenzita. MC karbidi locirani su u centru austenitnih dendrita

### 8.3 Skrućivanje željeznih ljevova otpornih na trošenje

#### 8.3.1 Binarni Fe-C sustavi (željezni ljevovi otporni na trošenje sa $Fe_3C$ i $M_3C$ karbidima)

Perlitni bijeli željezni ljevovi i Ni-Hard 1 i 2 bijeli željezni ljevovi spadaju u kategoriju željeznih ljevova s  $Fe_3C$  i  $M_3C$  eutektičkim karbidima. Slovo M (engl. *mixture*) u formuli  $M_3C$  eutektičkih karbida ukazuje da se radi o kompleksnim karbidima koji pored željeza i ugljika sadrže i ostale legirajuće elemente (npr. krom, molibden, mangan).

Brzina skrućivanja je jedan od najvažnijih faktora koji utječe na pretvorbu sivog lijeva u bijeli željezni ljev. Brzo hlađenje taljevine željeznog lijeva rezultira pothlađenjem, odnosno spuštanjem temperature ispod temperature metastabilnog skrućivanja. Na taj način se promovira stvaranje karbida (neravnotežno ili metastabilno skrućivanje) umjesto grafita (ravnotežno ili stabilno skrućivanje), slika 8.10.



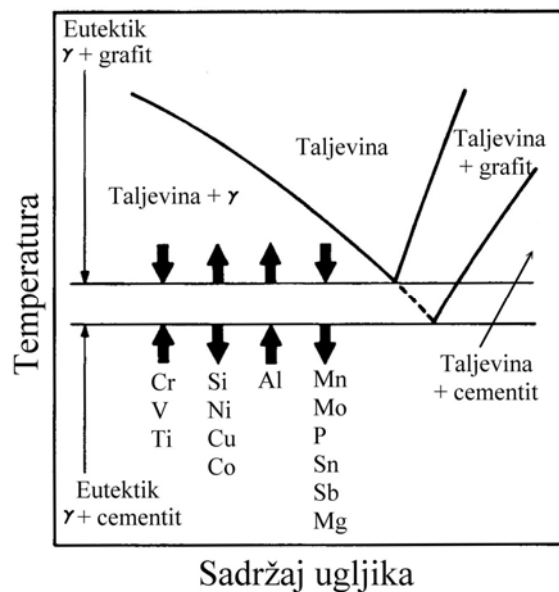
Slika 8.10. Segment faznog dijagrama koji ilustrira interval između temperature stabilnog ( $\gamma$  + grafit) i metastabilnog ( $\gamma$  +  $Fe_3C$ ) skrućivanja

Ravnotežno (stabilno) skrućivanje odvija se pri višim temperaturama i nižim brzinama skrućivanja, a rezultira stvaranjem grafita umjesto karbida. Zbog toga se ostrim hlađenjem brzo prolazi kroz područje u kojem je moguće stvaranje grafita i dolazi u područje u kojem se stvaraju karbidi.

Kada vruća taljevina dođe u kontakt s hladnim kalupom, dolazi do vrlo velikog povećanja brzine hlađenja. Brzina hlađenja opada sa udalžavanjem od stjenke kalupa prema centru odljevka, čime se stvaraju povoljni uvjeti za izlučivanje grafita.

Kontrola stvaranja karbida umjesto grafita zasnovana striktno na kontroli brzine skrućivanja je otežana, ali tehnološki moguća. Ako se zahtijevaju karbidi u mikrostrukтури, znatno konzistentnija metoda je smanjenje sadržaja silicija do najnižeg mogućeg nivoa.

Legirajući elementi utječu na stvaranje karbida, odnosno grafita putem utjecaja na temperaturu skrućivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog eutektika ( $\gamma + \text{karbid}$ ), slika 8.11.



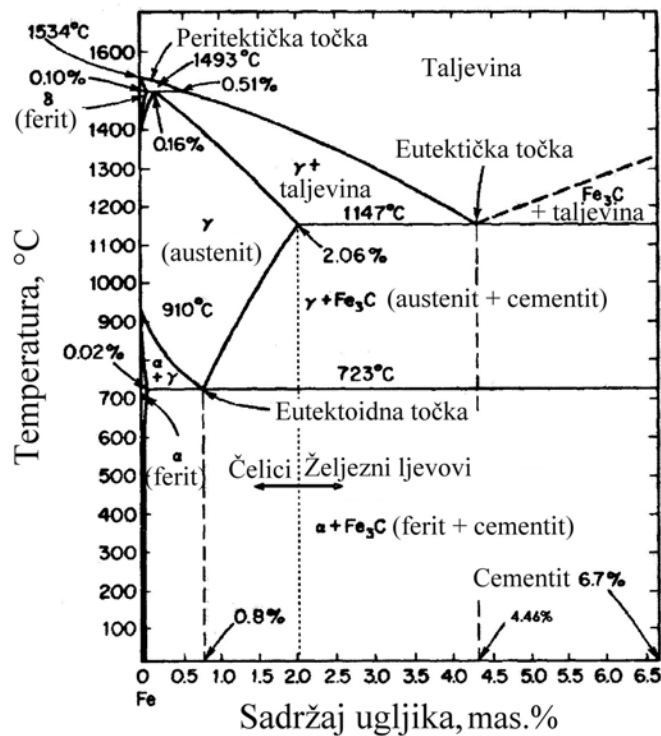
Slika 8.11. Utjecaj elemenata kemijskog sastava na temperaturu skrućivanja stabilnog ( $\gamma + \text{grafit}$ ) i metastabilnog ( $\gamma + \text{karbid}$ ) eutektika

Elementi koji proširuju interval između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (npr. silicij, nikel, bakar) promoviraju stvaranje grafita i nazivaju se grafitizatorima, dok elementi koji sužavaju interval između temperature skrućivanja stabilnog i metastabilnog eutektika (npr. krom, vanadij, titan) promoviraju stvaranje karbida i nazivaju se karbidotvorcima (slika 8.11). Mangan, molibden i volfram također promoviraju stvaranje karbida, ali imaju nešto slabiji efekt od kroma vanadija i titana.

Debljina površinskog sloja otpornog na trošenje kod željeznih ljevova s gradijentnom strukturom može se kontrolirati legiranjem. U tu svrhu najčešće se primjenjuje krom.

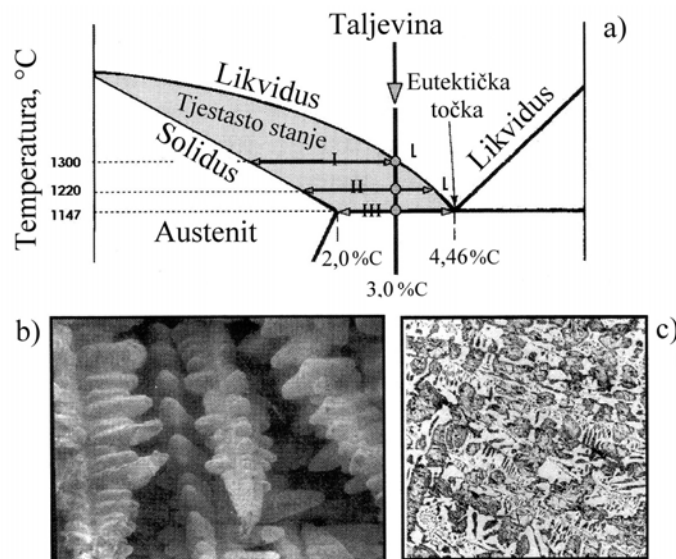
Krom je snažan karbidotvorni element koji promovira stvaranje karbida bez obzira na brzinu hlađenja. Pri nižim sadržajima ( $< 2,0 \%$ ) efekt kroma nije toliko snažan da može spriječiti djelovanje povišenog sadržaja silicija ili ugljika u taljevini, što rezultira stvaranjem melirane strukture. Može se zaključiti da se varijacijom sadržaja kroma, ugljika i silicija kod željeznih ljevova s gradijentnom strukturom mogu ostvariti različite dubine površinskog sloja otpornog na trošenje.

Binarni (dvokomponentni) fazni dijagram prikazan na slici 8.12 odgovara za sve komercijalne perlitne i Ni-Hard 1 i 2 bijele željezne ljevove otporne na trošenje.



Slika 8.12. Metastabilni fazni dijagram željezo-ugljik (Fe-Fe<sub>3</sub>C)

U nastavku je prikazan tijek skrućivanja željeznog lijeva otpornog na trošenje koji sadrži 3,0 % ugljika i eutektičke karbide Fe<sub>3</sub>C ili M<sub>3</sub>C u mikrostrukturi. Željezni ljev sa 3,0 % ugljika spada u kategoriju podeutektičkih željeznih ljevova. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja ovog željeznog lijeva je austenit (γ) koji ima dendritnu morfologiju (slika 8.13, dolje, lijevo).



Slika 8.13. Slijed skrućivanja željeznog lijeva otpornog na trošenje koji sadrži 3,0 % ugljika i Fe<sub>3</sub>C ili M<sub>3</sub>C eutektičke karbide u mikrostrukturi: a) segment faznog dijagrama, b) dendritni austenita, c) rezultirajuća mikrostruktura

Nastali dendriti rastu, a različiti legirajući elementi nastoje se raspodijeliti između dendrita i preostale taljevine. U binarnoj leguri željezo-ugljik postoji samo jedan element koji se mora raspodijeliti između dendrita i preostale taljevine, a to je ugljik. Prvi dendriti koji nastaju sadrže ~ 1,4 % ugljika (faza I, temperatura 1300 °C, slika 8.13 gore). S daljnjim hlađenjem, prema faznom dijagramu, austenit apsorbira sve više i više ugljika. Prema tome, u fazi II (temperatura 1220 °C (slika 8.13 gore)) novo formirani austenitni dendriti sadrže ~ 1,75 % ugljika. Višak ugljika je odbačen u taljevinu. Kako austenitni dendriti nastavljaju s rastom, preostala taljevina postaje sve više i više obogaćena ugljikom.

Kada se dostigne eutektički sadržaj ugljika u preostaloj taljevini (~ 4,4 %), dolazi do eutektičke reakcije kojom nastaju dvije krute faze: austenit i karbid (faza III, slika 8.13 gore). Rast austenita i karbida odvija se približno istom brzinom. U trenutku dostizanja eutektičkog sadržaja ugljika u preostaloj taljevini, sadržaj ugljika u austenitu iznosi ~ 2,0 %. Na kraju skrućivanja mikrostruktura se sastoji od primarnih austenitnih dendrita i smjese eutektičkog austenita i karbida. Kod perlitnih bijelih željeznih ljevova tijekom hlađenja nakon skrućivanja dolazi do pretvorbe austenita u perlit. Tipična mikrostruktura perlitnog željeznog lijeva otpornog na trošenje sa sadržajem ugljika od 3,0 % prikazana je u donjem desnom kutu slike 8.13. U metalnoj osnovi Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova može biti prisutan austenit, martenzit i perlit, što ovisi o sadržaju legirajućih elemenata i brzini hlađenja.

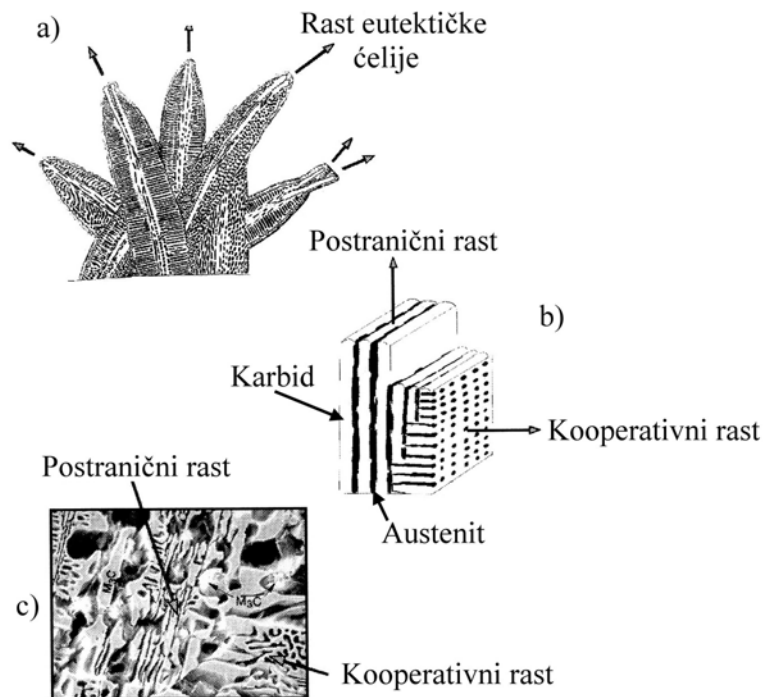
U perlitnim i Ni-Hard 1 i 2 bijelim željeznim ljevovima karbidi se sastoje od tri atoma metala i jednog atoma ugljika ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{M}_3\text{C}$ ). U čistim željezo-ugljik legurama (npr. perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje), karbidi se mogu stehiometrijski označiti kao  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cementit). U većini željeznih ljevova otpornih na trošenje (npr. Ni-Hard 1 i 2) prisutni su u određenim koncentracijama krom, mangan ili molibden. Ovi legirajući elementi djelomično zamjenjuju atome željeza u kristalnoj rešetci karbida, zbog čega se karbidi u tom slučaju označavaju kao  $\text{M}_3\text{C}$ . Ovi karbidi također se u većini slučajeva nazivaju cementitom. Eutektička smjesa austenita i cementita naziva se ledeburit.

Na slici 8.14 može se vidjeti nekoliko shematskih prikaza eutektičkog rasta u perlitnim te Ni-Hard 1 i 2 željeznim ljevovima otpornim na trošenje. Na globalnoj skali, svaka eutektička kolonija predstavlja zasebni slučaj rasta i donekle je neovisna o susjednim eutektičkim ćelijama.

U perlitnim i Ni-Hard 1 i 2 željeznim ljevovima otpornim na trošenje kod svake eutektičke kolonije prisutno je „kolebanje“ između postraničnog (engl. *edgewise*) i kooperativnog rasta (slika 8.14b). Postranični rast pojavljuje se kada je rast karbida dominantan, što se očituje u strukturi kao niz pločica koje se nalaze jedna do druge (slika 8.14b). Kooperativni rast pojavljuje se kada obje faze rastu približno istom brzinom, što rezultira strukturom koja podsjeća na švicarski sir (sačasta struktura – ledeburit) (slika 8.14b). Konkretni primjer postraničnog i kooperativnog rasta može se vidjeti na slici 8.14b i c.

Teorijski, kooperativni rast trebao bi biti dominantan. Međutim, rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da se obje vrste rasta odvijaju sličnim brzinama, što u konačnici rezultira prilično kompleksnom strukturom.

U većini slučajeva količina nastalih karbida u ovim željeznim ljevovima direktno je povezana sa sadržajem ugljika. Ako kao primjer uzmemo prethodno analizirani željezni lijev s 3,0 % ugljika i pretpostavimo da lijevamo debelostjeni odljevak (sporo hlađenje i shodno tome ograničena dendritna segregacija ugljika (dendritna segregacija – neravnomjerna raspodjela ugljika u austenitnim dendritima)), mikrostruktura željeznog lijeva nakon skrućivanja sastojati će se od austenita koji sadrži ~ 2,0 % ugljika i  $\text{Fe}_3\text{C}/\text{M}_3\text{C}$  karbida koji sadrže ~ 6,7 % ugljika.



Slika 8.14. Proces skrućivanja niskolegiranih (perlitnih) željeznih ljevova otpornih na trošenje: a) makroskopski prikaz rasta eutektičke ćelije, b) mikroskopski prikaz pojedinačnih eutektičkih ćelija, c) snimka mikrostrukture Ni-Hard željeznog lijeva otpornog na trošenje u nagrizenom stanju pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

Maseni udio karbida u analiziranom željeznom lijevu može se odrediti na slijedeći način (pravilo poluge):

$$\% \text{ eutektičkih karbida} = \left( \frac{(\%C_{\text{lijev}} - \%C_{\text{austenit}})}{(\%C_{\text{karbid}} - \%C_{\text{austenit}})} \right) \cdot 100 = \left( \frac{3,0 - 2,0}{6,7 - 2,0} \right) \cdot 100 = 21,0\% \quad (8.1)$$

gdje je.

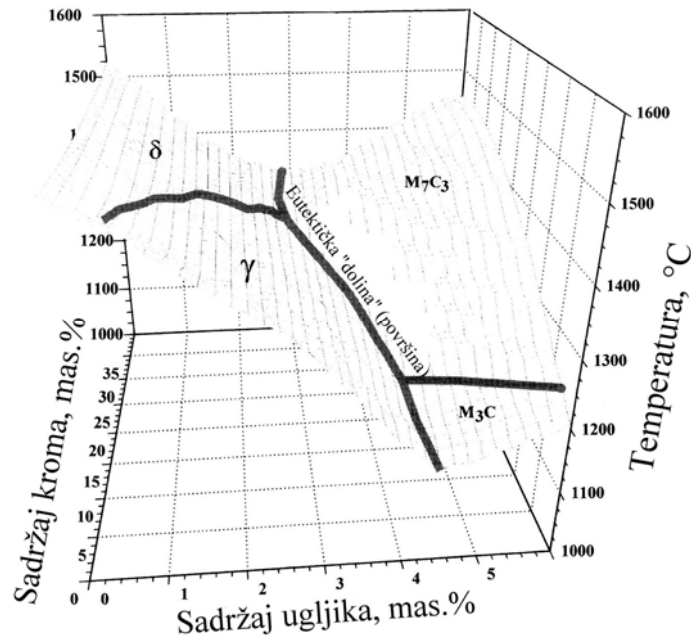
- % eutektičkih karbida – maseni udio karbida u željeznom lijevu, %
- %C<sub>lijev</sub> – sadržaj ugljika u taljevini željeznog lijeva, %
- %C<sub>austenit</sub> – sadržaj ugljika u austenitu, %
- %C<sub>karbid</sub> – sadržaj ugljika u karbidima, %

Budući da je gustoća karbida i željeza vrlo slična, težinski udio karbida je analogan volumnom udjelu karbida.

S porastom sadržaja ugljika u taljevini raste i maseni udio karbida. Npr. pri sadržaju ugljika od 4,2 %, maseni udio karbida iznosi ~ 45,0 %. Ovako veliki udio karbida rezultira značajnim porastom otpornosti na trošenje, ali i krhkosti.

### 8.3.2 Ternarni Fe-Cr-C sustavi (željezni ljevovi otporni na trošenje sa $M_7C_3$ karbidima)

Ni-Hard 4 i visokokromni bijeli željezni ljevovi otporni na trošenje spadaju u grupu željeznih ljevova koji sadrže eutektičke  $M_7C_3$  karbide. Kod ovih željeznih ljevova tijekom eutektičkog skrućivanja (eutektičke reakcije) nastaje austenit i  $M_7C_3$  karbidi. U većini slučajeva, ternarni Fe-Cr-C fazni dijagram može opisati njihovo skrućivanje (slika 8.15).



Slika 8.15. Trodimenzionalni prikaz ternarnog Fe-Cr-C faznog dijagrama

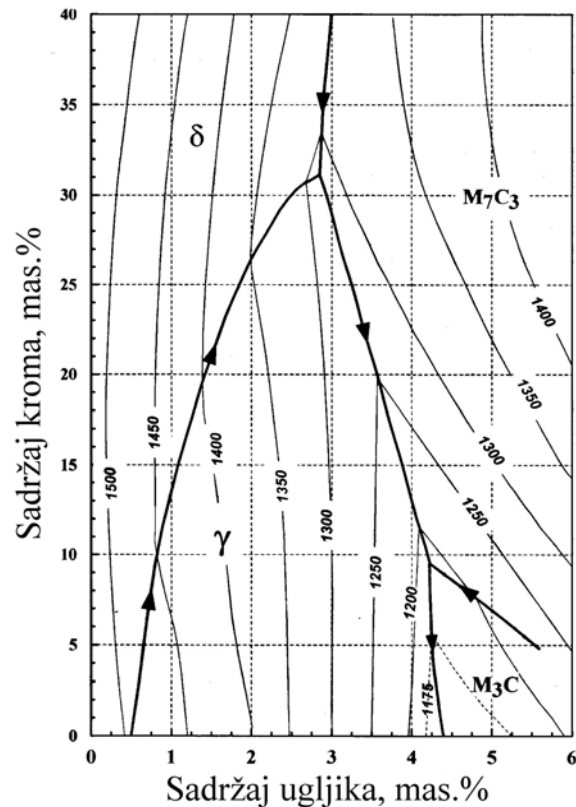
Puni naziv ternarnog faznog dijagrama prikazanog na slici 8.15 je Fe-Cr-C metastabilna likvidus površina. Ternarni fazni dijagram pokriva skrućivanje ~ 95 % današnjih komercijalnih željeznih ljevova otpornih na trošenje.

Na slici 8.16 dan je dvodimenzionalni prikaz (2D) ternarnog faznog dijagrama sa slike 8.15. Iz dijagrama na slici 8.16 može se vidjeti da postoje 4 različite likvidus površine. Ove površine odgovaraju fazama koje nastaju tijekom skrućivanja: austenit ( $\gamma$ ),  $\delta$  ferit ( $\delta Fe$ ),  $M_3C$  i  $M_7C_3$ .

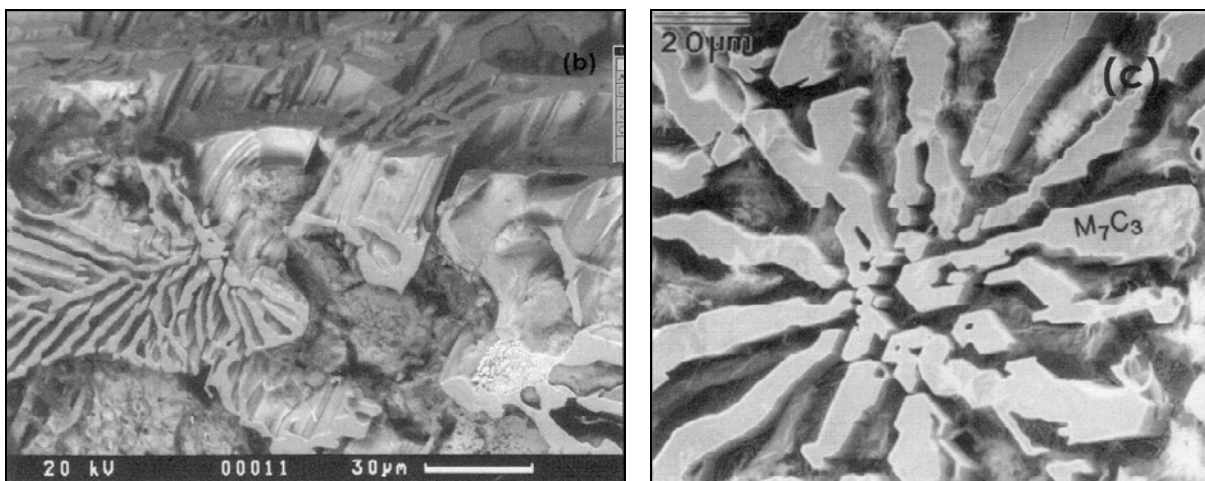
Ako je sastav željeznog lijeva takav da se točka u kojoj se siječe vertikalna linija koja predstavlja sadržaj ugljika s horizontalnom linijom koja predstavlja sadržaj kroma nalazi na  $\gamma$  likvidus površini, prva faza koja nastaje tijekom skrućivanja je austenit (dendriti austenita) i željezni lijev klasificira se kao podeutektički. S daljnjim hlađenjem i skrućivanjem nastaje sve više i više primarnog austenita i sastav preostale taljevine približava se eutektičkom „usjeku“ („dolini“) (slika 8.15). Kada se dostigne eutektički „usjek“ preostala taljevina skrućuje kao eutektička smjesa austenita i  $M_7C_3$  karbida.

$M_7C_3$  karbid znatno se razlikuje od  $Fe_3C/M_3C$  karbida koji se susreću kod perlitnih i Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje. Za stvaranje  $M_7C_3$  karbida potrebno je minimalno 25,0 % kroma u taljevini, dok se sadržaj kroma u karbidu kreće od 45,0 – 60,0 %. Kristalne strukture ova dva karbida također se razlikuju.  $M_7C_3$  karbid ima heksagonalnu kristalnu strukturu, dok  $M_3C$  karbid ima ortogonalnu kristalnu strukturu. Zbog različite kristalne strukture,  $M_7C_3$  karbid ima znatno veću tvrdoću od  $M_3C$  karbida (~ 1400 HV) u odnosu na  $M_3C$  karbid (~ 900 HV). Osim toga, morfologija  $M_7C_3$  karbida je drugačija od

morfoloije  $M_3C$  karbida. Oblik  $M_7C_3$  karbida (slika 8.17) često se opisuje kao štapićasti (engl. *rod*) i listićavi (engl. *blade*), dok  $M_3C$  karbid ima pločasti oblik.



Slika 8.16. Dvodimenzionalni prikaz Fe-Cr-C metastabilne likvidus površine. Linije u dijagramu predstavljaju konstantne likvidus temperature (tj. temperatura pri kojoj prva taljevina započinje sa skrućivanjem)



Slika 8.17. Snimke  $M_7C_3$  karbida u visokokromnom željeznom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

$M_7C_3$  karbid ima znatno manju kontinuiranost od  $M_3C$  karbida. Premda postoje razlike između navedenih karbida, oni nastaju na identičan način – kao eutektički ili nadeutektički karbidi.

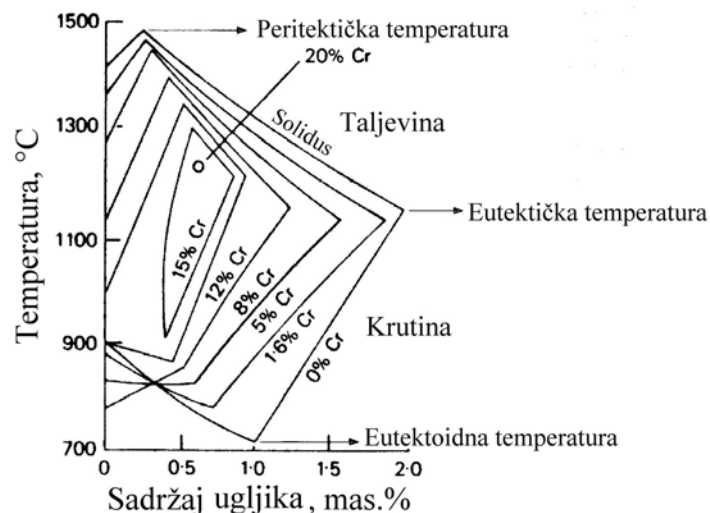
Ako je sastav željeznog lijeva takav da se točka u kojoj se siječe vertikalna linija koja predstavlja sadržaj ugljika s horizontalnom linijom koja predstavlja sadržaj kroma nalazi na  $M_7C_3$  likvidus površini (slika 8.15 i 8.16), radi se o nadeutektskom željeznom lijevu i prva faza koja nastaje tijekom skrućivanja je  $M_7C_3$  karbid.

Kod ternarnog Fe-Cr-C sustava, eutektska reakcija ovisi o sadržaju kroma i ugljika i ne odvija se pri fiksnoj temperaturi već u temperaturnom intervalu.

Većina željeznih ljevova otpornih na trošenje započinje skrućivanje na austenitnoj likvidus površini, što znači da su podeutektskog sastava. Prema tome, prva faza koja nastaje pri skrućivanju je austenit. Bitna razlika u skrućivanju je ta da kod niskolegiranih željeznih ljevova otpornih na trošenje (IA, IB i IC prema ASTM A532) nastaje eutektska smjesa austenita i  $M_3C$  karbida, dok kod svih ostalih željeznih ljevova (ID, IIA, IIB, IID i IIIA prema ASTM A532) nastaje eutektska smjesa austenita i  $M_7C_3$  karbida.

Prema kemijskom sastavu kod Ni-Hard 4 željeznih ljevova trebali bi se stvarati  $M_3C$  karbidi jer je sadržaj kroma manji od 25,0 %. Međutim, tijekom skrućivanja dolazi do stvaranja  $M_7C_3$  karbida. U ternarnom Fe-Cr-C sustavu podeutektski željezni ljevovi tijekom skrućivanja odbacuju višak ugljika i kroma u taljevinu. Kako austenitni dendriti rastu tijekom skrućivanja, preostala taljevina postaje obogaćena ugljikom i kromom, odnosno u taljevini se dostiže potrebni sadržaj ugljika (~ 8,9 % ugljika) i kroma (~25,0 %) za stvaranje  $M_7C_3$  karbida tijekom eutektskog skrućivanja.

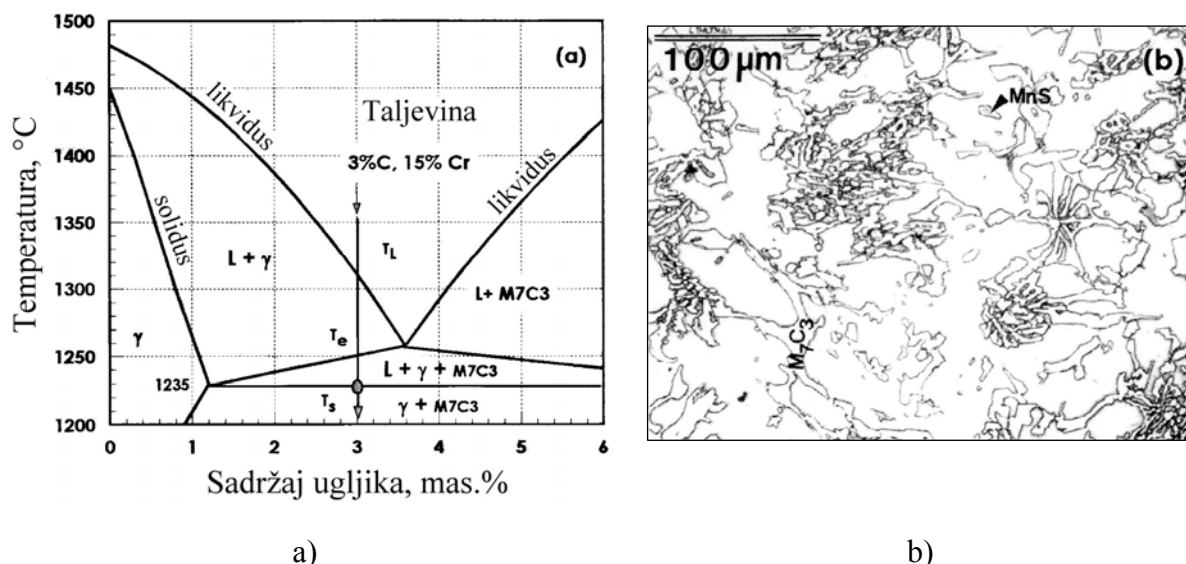
Na slici 8.18 prikazan je utjecaj kroma na austenitno područje. Austenitno područje sužava s porastom sadržaja kroma te pri sadržaju kroma od 20,0 % potpuno nestaje. Prema tome, krom se smatra promotorom ferita, jer se austenitno područje sužava a feritno područje proširuje.



Slika 8.18. Utjecaj kroma na austenitno područje

Drugi način za razmatranje skrućivanja Fe-Cr-C legura je konstruiranje segmenta 2D faznog dijagrama koji predstavlja okomiti presjek kroz trodimenzionalni Fe-Cr-C dijagram pri konstantnom sadržaju kroma (slika 8.19a).





Slika 8.19. a) segment 2D faznog dijagrama koji predstavlja okomiti presjek kroz trodimenzionalni Fe-Cr-C dijagram (slika 8.15) pri konstantnom sadržaju kroma (15,0 %), b) metalografska snimka mikrostrukture podeutektičkog bijelog željeznog lijeva koji sadrži 3,0 % ugljika i 15,0 % kroma

Skrucivanje započinje pri likvidus temperaturi ( $T_L$ ). Prva faza koja se izlučuje tijekom skrucivanja je primarni (ili proeutektički) austenit dendritnog oblika. S daljnjim hlađenjem stvara se sve više austenitnih dendrita, a višak kroma i ugljika odbacuje se u taljevinu, čime se dobiva smjesa austenitnih dendrita i ugljikom te kromom obogaćene taljevine. Pri temperaturi  $T_e$  (temperatura početka eutektičke reakcije) započinje eutektička reakcija kojom iz taljevine nastaje austenit i karbidi. Eutektička reakcija odvija se u temperaturnom intervalu od  $T_e$  do  $T_s$  (temperatura završetka eutektičke reakcije ili solidus temperatura). Na kraju skrucivanja nastaje mikrostruktura koja se sastoji od austenita i  $M_7C_3$  karbida (slika 8.19b).

Volumni udio karbida (engl. *carbide volume fraction* - CVF) može se jednostavno odrediti i primjenom slijedeće formule:

$$\%CVF = 12,33 \%C + 0,55 \%Cr - 15,2 \quad (8.2)$$

(točnost =  $\pm 2,1\%CVF$ )

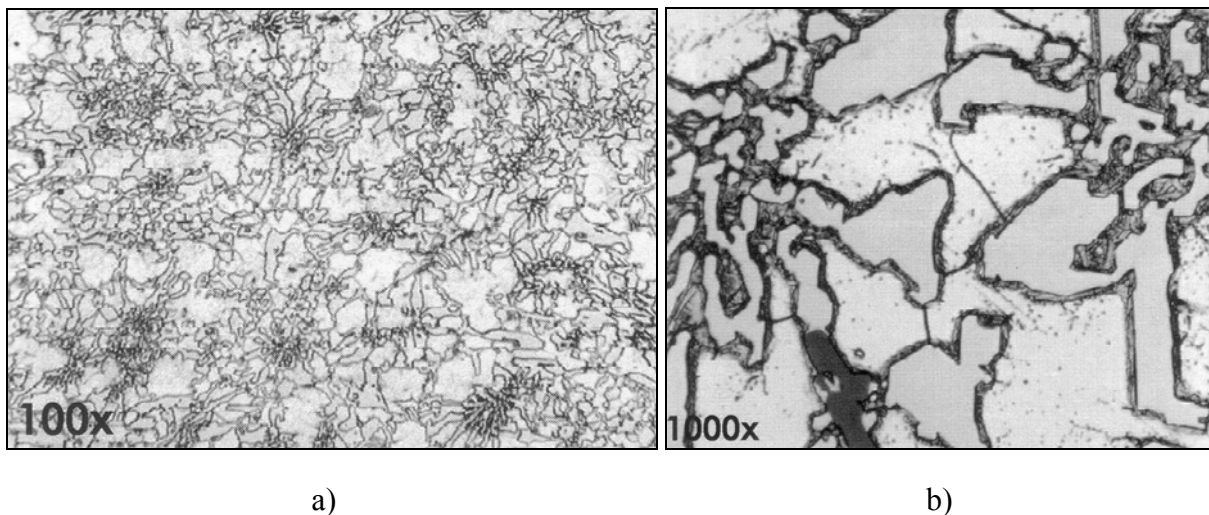
Kod prethodno analiziranog željeznog lijeva sa 3,0 % ugljika i 15,0 % kroma, volumni udio karbida izračunat na osnovi jednadžbe 3.2 iznosi 30,0 %.

Struktura karbida kod Ni-Hard 4 željeznog lijeva u velikoj mjeri ovisi o sadržaju silicija u taljevini. Kada započne skrucivanje podeutektičkog Ni-Hard 4 željeznog lijeva otpornog na trošenje s niskim sadržajem silicija (npr. 0,3 %) dolazi do izlučivanja proeutektičkog (primarnog) austenita u dendritnom obliku. Preostala taljevina obogaćuje se ugljikom i kromom. Zbog toga se s porastom sadržaja ugljika i kroma u taljevini točka koja predstavlja njen sadržaj pomiče u faznom dijagramu prema gore i u desno sve dok se ne dostigne eutektička linija (eutektički sadržaj). Kada se dostigne eutektički sadržaj u taljevini dolazi do eutektičke reakcije:  $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$ . Preostala taljevina kontinuirano skrucuje i njezin sastav se mijenja duže eutektičke linije sve dok se ne dostigne peritektička točka kod 4,2 % ugljika i 9,7 % kroma (slika 8.16) kada započinje peritektička reakcija ( $L + M_7C_3 \rightarrow \gamma + M_3C$ ), odnosno stvaranje  $M_3C$  karbida oko postojećih  $M_7C_3$  karbida (stvaranje dupleks karbida) (slika 8.7).

Silicij utječe na strukturu karbida u Ni-Hard 4 željeznom lijevu jer povećava koeficijent aktiviteta ugljika u taljevini. Kada započne eutektičko skrućivanje, rastući  $M_7C_3$  karbidi u potpunosti odbacuju silicij. Zbog toga oko karbida nastaje područje s visokim sadržajem silicija. Lokalno povećanje sadržaja silicija rezultira lokalnim povećanjem aktiviteta ugljika i pomicanjem sastava taljevine u desno tj. ka većim sadržajima ugljika. Na taj način je spriječeno odvijanje peritektičke reakcije (stvaranje  $M_3C$  karbida), odnosno pospješen rast postojećih  $M_7C_3$  karbida dok sva preostala taljevina skrućuje. Iz navedenih razloga sadržaj silicija u Ni-Hard 4 željeznom lijevu treba se kretati od 1,5 – 2,0 %. Optimalni sadržaj silicija iznosi 1,9 %.

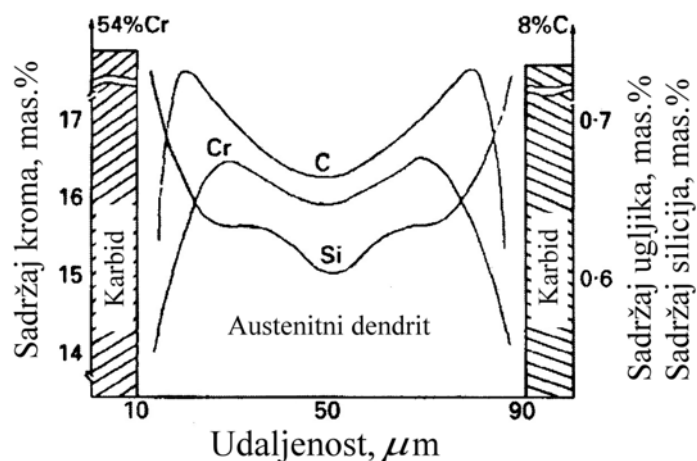
U Fe-Cr-C sustavu odvijaju se dvije peritektičke reakcije kojima iz tekuće i krute faze nastaju dvije krute faze. U faznom dijagramu navedenog sustava (slika 8.16) postoje dvije točke u kojima se sijeku tri likvidus površine (2,8 % ugljika i 32,0 % kroma, temperatura 1289 °C, odnosno 4,2 % ugljika i 9,7 % kroma, temperatura 1183 °C). te točke nazivaju se peritektičkim točkama.

Zanimljiva mikrostrukturna karakteristika visokokromnih željeznih ljevova u lijevanom stanju je česta prisutnost tankog sloja martenzita oko eutektičkih  $M_7C_3$  karbida, (slike 8.8c, 8.19b i 8.20).



Slika 8.20. Metalografske snimke mikrostrukture podeutektičkog visokokromnog željeznog lijeva (3,0 % ugljika, 20,0 % kroma, 1,9 % molibdena, 0,7 % mangana, 0,5 % silicija, 0,4 % nikla i 0,8 % bakra) u lijevanom stanju pri povećanju 100x (a) i 1000x (b). Tvrdoća iznosi 480 HB. Na slici (b) može se vidjeti tanak sloj martenzita oko eutektičkih karbida. Sitne „točkice“ koje se mogu vidjeti u dendritima i duž njihovih granica su  $Mo_2C$  karbidi.

Sa shematskog prikaza profila koncentracija (slika 8.21) može se vidjeti da je austenit u blizini karbida osiromašen ugljikom i kromom, dok je sadržaj silicija povećan, jer ga karbidi tijekom skrućivanja u potpunosti odbacuju u taljevinu. U uskom destabiliziranom području uz karbide  $M_7C_3$  temperatura leži iznad sobne temperature, zbog čega se oko i između eutektičkih  $M_7C_3$  karbida stvara martenzit. Ako je sadržaj silicija previsok ili sadržaj kroma prenizak, doći će do stvaranja perlita

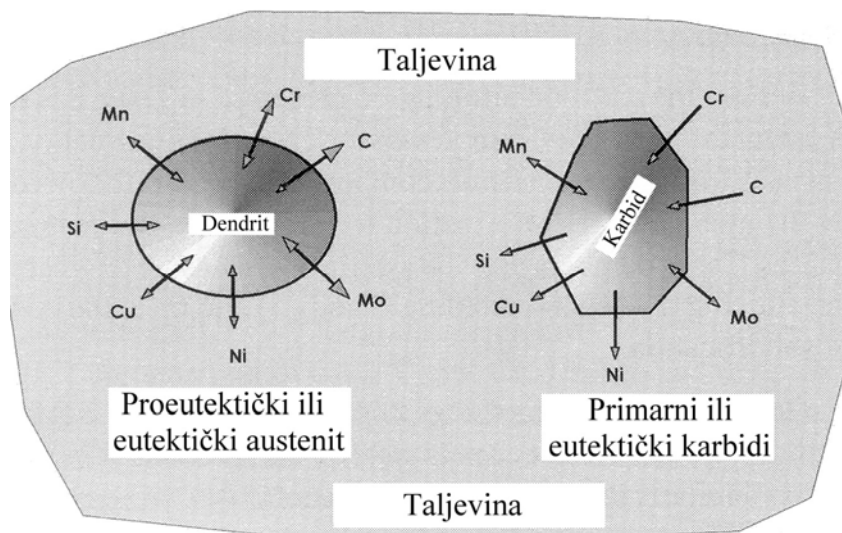


Slika 8.21. Promjena sadržaj kroma, ugljika i silicija u austenitnom dendritu (profil koncentracija)

### 8.3.3 Segregacije legirajućih elemenata

Pri dodatku legirajućih elemenata kod proizvodnje željeznih ljevova otpornih na trošenje od velike je važnosti da li će ti legirajući elementi biti sastavni dio metalne osnove ili karbida. Ako je legirajući element sastavni dio karbida, on neće utjecati na prokaljivost željeznog lijeva, odnosno metalne osnove. To znači da je prokaljivost metalne osnove određena legirajućim elementima koji su sastavni dio metalne osnove.

Na slici 8.22 shematski je prikazano kako elementi za povećanje prokaljivosti, odnosno legirajući elementi segregiraju, tj. kako se raspodjeljuju tijekom skrućivanja.



Slika 8.22. Shematski prikaz segregacije, odnosno raspodjele legirajućih elemenata (elementa za povećanje prokaljivosti) tijekom skrućivanja

Tijekom skrućivanja rastući dendriti austenita u većoj mjeri odbacuju ugljik i krom u taljevinu. Pored toga, austenit u taljevinu odbacuje i molibden te ostale snažne karbidotvorne elemente, kao što vanadij, volfram i niobij.

Mangan je slab promotor karbida, zbog čega ga austenit tijekom skrućivanja ne odbacuje u taljevinu istoj mjeri kao prethodno navedene elemente. Ako taljevina sadrži 1,0 % mangana, on je gotovo podjednako raspodijeljen između metalne osnove i karbida.

Bakar i nikal također su elementi za povećanje prokaljivosti koji se ponašaju na sličan način kao mangan. Tijekom skrućivanja dendriti austenita u maloj mjeri odbacuju ove elemente.

Tijekom stvaranja karbida ( $M_3C$  ili  $M_7C_3$ ) odvijaju se upravo suprotni procesi od prethodno opisanih. Silicij, bakar i nikal nisu topljivi u karbidima, zbog čega ih karbidi u potpunosti se odbacuju u taljevinu. Ova činjenica važna je obzirom na prokaljivost, jer s porastom količine karbida nastalih tijekom skrućivanja raste sadržaj silicija, bakra i nikla u metalnoj osnovi. Sadržaj nikla u metalnoj osnovi može se izračunati na slijedeći način:

$$\%Ni_{\text{metalna osnova}} = \%Ni_{\text{taljevina}} / (1 - \text{CVF}/100) \quad (8.3)$$

Gdje CVF – volumni udio karbida.

Ugljik, krom i u određenom opsegu molibden i vanadij apsorbirani su u karbidima. Molibden se raspodjeljuje između metalne osnove i karbida te stvara vlastite eutektičke karbide  $Mo_2C$ . Procjenjuje se da se samo ~ 1/3 od ukupnog sadržaja molibdena u taljevini apsorbira u metalnoj osnovi gdje djeluje na povećanje prokaljivosti. Kod sadržaja molibdena iznad 2,0 % na granicama austenitnih i eutektičkih zrna mogu se uočiti točkasto raspoređeni  $Mo_2C$  karbidi. Ovi karbidi smješteni su po granicama zrna jer skrućuju tijekom odvojene eutektičke reakcije koja se odvija pri nižim temperaturama.

S porastom sadržaja kroma u željeznom lijevu na sličan način povećava se i sadržaj kroma u metalnoj osnovi. Količina kroma sadržana u metalnoj osnovi ne ovisi samo o početnom sadržaju kroma već i o sadržaju ugljika u taljevini. Na osnovi faznog dijagrama može se zaključiti da s porastom sadržaja ugljika raste količina karbida. S porastom količine karbida raste i količina kroma vezanog u karbide i na taj način smanjuje količina kroma u metalnoj osnovi.

Krom je snažan element za povećanje prokaljivosti, zbog čega je čest slučaj da visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje u lijevanom stanju imaju djelomično austenitnu strukturu. Pored toga, ako je sadržaj kroma u metalnoj osnovi > 11,0 %, željezni lijev imati će značajnu otpornost na koroziju.

### 8.3.4 Utjecaj cijepjenja na skrućivanje željeznih ljevova otpornih na trošenje

Cijepjenje željeznih ljevova otpornih na trošenje je segment koji nije još u potpunosti istražen. Do sada je učinak cijepjenja razmatran samo na podeutektičkim željeznim ljevovima otpornim na trošenje kod kojih se nukleacija  $\delta$ -ferita ili austenita pospješuje prisutnim česticama TiC karbida.

Ako se taljevina cijepi titanom prva faza koja nastaje tijekom skrućivanja je titanov karbid (TiC), nakon čega dolazi do izlučivanja  $\delta$ -ferita ili austenita, što ovisi o kemijskom sastavu. Sukladno tome, može se reći da titanovi karbidi (TiC) djeluju kao mjesta za nukleaciju  $\delta$ -ferita ili austenita. Kada se taljevina podeutektičkog sastava hladi i približava likvidus površini, brojne krute čestice titanovih karbida (TiC) predstavljaju mjesta za nukleaciju i rast  $\delta$ -ferita ili austenita. Rast se pojavljuje na mnogim mjestima i u svim smjerovima, što rezultira većim brojem manjih zrna.

## 8.4 Toplinska obrada željeznih ljevova otpornih na trošenje

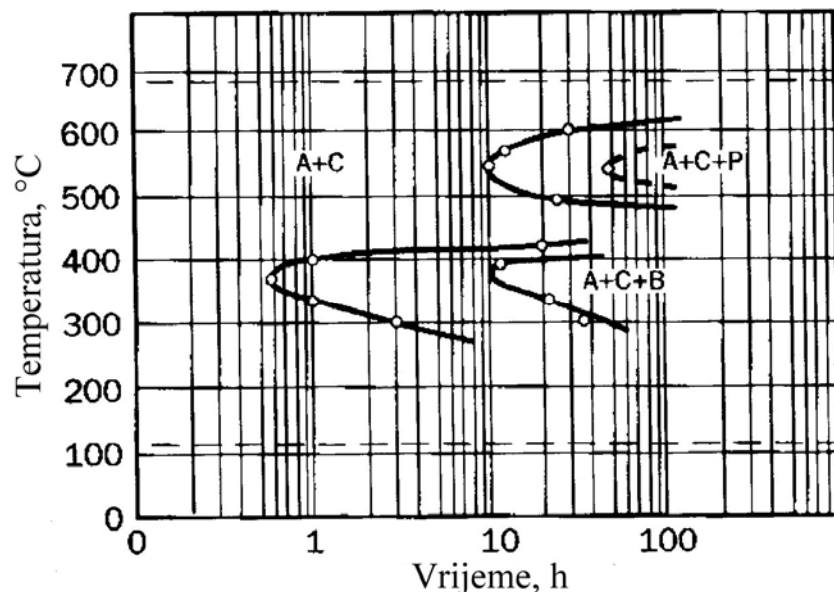
Općenito gledano, može se reći da se željezni ljevovi otporni na trošenje sastoje od dvije komponente: metalne osnove koja se može toplinski obraditi i mreže karbida (bilo da se radi o  $M_3C$ ,  $M_7C_3$ ,  $Mo_2C$  ili nekim drugim karbidima) koji se ne mijenjaju toplinskom obradom. Toplinskom obradom može se povećati tvrdoća željeznih ljevova otpornih na trošenje.

Osnova za toplinsku obradu željeznih ljevova otpornih na trošenje je metastabilni fazni dijagram Fe-Fe<sub>3</sub>C (slika 8.12). Dodatak legirajućih elementa utječe na fazni dijagram. Krom sužava austenitno područje (promovira stvaranje ferita). Mangan i nikal proširuju austenitno područje. S povećanjem sadržaja legirajućih elemenata varira eutektoidna temperatura ( $A_1$ ) te eutektoidni sadržaj ugljika. Svi legirajući elementi snižavaju eutektoidni sadržaj ugljika. Elementi koji stabiliziraju austenit (mangan, nikal) snižavaju eutektoidnu temperaturu; elementi koji stabiliziraju ferit (krom, silicij, molibden, volfram) povisuju eutektoidnu temperaturu.

Dodatkom legirajućih elemenata usporava se kinetika faznih pretvorbi kojima nastaje perlit i bainit, odnosno povećava prokaljivost (sposobnost nastajanja martenzita). Prema tome, legirajući elementi povećavaju vrijeme potrebno za nukleaciju i rast perlita, odnosno potiskuju perlitnu reakciju ka dužim vremenima. Na taj način moguće je izbjeći stvaranje perlita (i bainita) i dobiti martenzit pri nižim brzinama gašenja nego u slučaju kada nije provedeno legiranje. Prema tome, čak se i debelostjeni odljevci mogu otvrdnuti hlađenjem zrakom.

Kinetika faznih pretvorbi značajno utječe na konačnu mikrostrukturu, a time i svojstva željeznih ljevova otpornih na trošenje. Fazne pretvorbe mogu se pratiti pomoću dva različita tipa dijagrama pretvorbi: dijagrami izotermne pretvorbe (engl. *Isothermal transformation diagrams*) i dijagrami pretvorbe tijekom kontinuiranog hlađenja (engl. *Continuous-cooling transformation diagrams*).

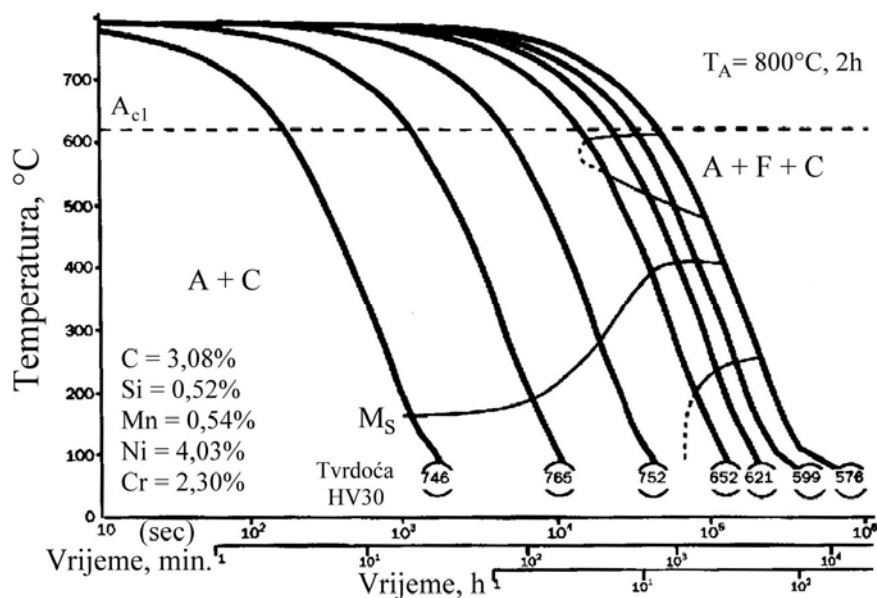
Dijagrami izotermne pretvorbe (IT), poznati i kao TTT dijagrami (engl. *Time – Temperature – Transformation*) prikazuju raspad austenita pri konstantnim temperaturama ispod eutektoidne temperature (slika 8.23).



Slika 8.23. Dijagram izotremne pretvorbe (IT dijagram) za Ni-Hard 1 (A – austenit, B – bainit, C – karbid, P – perlit)

Sa slike 8.23 može se vidjeti da se pri temperaturi od 550 °C pretvorba austenita u perlit odvija tek nakon 10 h.

Dijagrami pretvorbe tijekom kontinuiranog hlađenja (CCT) prikazuju raspad austenita tijekom kontinuiranog hlađenja iz austenitnog područja do sobne temperature (slika 8.24). Sa slike 8.24 može se vidjeti da različite brzine hlađenja rezultiraju i različitim mikrostrukturama, odnosno tvrdoćama.



Slika 8.24. Dijagram pretvorbe tijekom kontinuiranog hlađenja (CCT dijagram) za Ni-Hard 1 (A – austenit, C – karbid, F – ferit,  $M_s$  – temperatura početka stvaranja martenzita,  $T_A$  – temperatura austenitizacije)

#### 8.4.1 Ni-Hard 1 i 2 željezni ljevovi otporni na trošenje

Optimalna mikrostruktura metalne osnove kod Ni-Hard 1 i 2 (kvalitete IA – IC prema ASTM A 532) željeznih ljevova često se postiže u lijevanom stanju (nastoji se ostvariti što veći udio martenzita i što manji udio zaostalog austenita). Stvaranje perlita potrebno je izbjeći. Zbog toga, jedina toplinska obrada koja se u većini slučajeva zahtijeva je popuštanje (ili dvostruko popuštanje) da bi se poboljšala otpornost na udarno opterećenje i uklonila zaostala naprezanja. Visok sadržaj legirajućih elemenata osigurava adekvatnu prokaljivost čime se izbjegava stvaranje perlita ili bainita (faze niže tvrdoće).

Da bi se osigurala odgovarajuća prokaljivost, sadržaj nikla mora se kretati od 3,3 do 5,0 %. Sadržaj nikla potrebno je prilagoditi debljini stjenke i brzini hlađenja. S porastom debljine stjenke raste i potrebit dodatak nikla da bi se osigurala odgovarajuća prokaljivost (tablica 8.12). Kod određene debljine stjenke prenizak sadržaj neće osigurati potrebitu prokaljivost, što u konačnici rezultira stvaranjem perlita i padom tvrdoće. Previsok sadržaj nikla negativno utječe na tvrdoću zbog prekomjernog potiskivanja temperaturnog područja u kojem se stvara martenzit ka nižim temperaturama, što rezultira povećanjem količine zaostalog austenita (faza s niskom tvrdoćom). S porastom sadržaja nikla i debljine stjenke odljevka zahtijeva se povećanje dodatka kroma da bi se spriječila grafitizacija (nikal je grafitizator).

Tablica 8.12. Preporučeni sadržaji nikla i kroma kod Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova ovisno o debljini stjenke odljevka

Debljina stjenke, mm	Ni-Hard 1				Ni-Hard 2			
	Lijev. u pijesak		Primjena hladila		Lijev. u pijesak		Primjena hladila	
	%Ni	%Cr	%Ni	%Cr	%Ni	%Cr	%Ni	%Cr
<12m	3,8	1,6	3,3	1,5	4,0	1,5	3,5	1,4
12-25	4,0	1,8	3,6	1,7	4,2	1,7	3,8	1,5
25-50	4,2	2,0	3,9	1,9	4,4	1,8	4,1	1,6
50-75	4,4	2,2	4,2	2,1	4,6	2,0	4,4	1,8
75-100	4,6	2,4	4,5	2,3	4,8	2,2	4,7	2,0
>100	4,8	2,6	4,8	2,5	5,0	2,4	5,0	2,2

Kod iste debljine stjenke odljevka, niži sadržaj nikla i kroma je potreban u slučaju lijevanja odljevaka u kalupe u kojima se nalaze hladila nego u slučaju lijevanja u klasične pješčane kalupe, zbog veće brzine hlađenja (tablica 8.12).

Osim što potiskuju pretvorbu austenita u perlit ka dužim vremenima, legirajući elementi potiskuju  $M_s$  temperaturu, odnosno temperaturno područje u kojem se stvara martenzit ka nižim temperaturama, što rezultira povećanjem količine zaostalog austenita.

Iz jednadžbe za određivanje  $M_s$  temperature na osnovi sadržaja legirajućih elemenata može se vidjeti da ugljik ima najsnažniji utjecaj na  $M_s$  temperaturu:

$$M_s (\text{°C}) = 539 - 423(\%C) - 30,4(\%Mn) - 12,1(\%Cr) - 17,7(\%Ni) - 7,5(\%Mo) \quad (8.3)$$

Mangan ima veći utjecaj na udio zaostalog austenita od nikla. Premda oba elementa snižavaju  $M_s$  temperaturu, nikla povećava aktivitet ugljika, snižava topljivost ugljika u austenitu i shodno tome u manjoj mjeri snižuje  $M_s$  temperaturu.

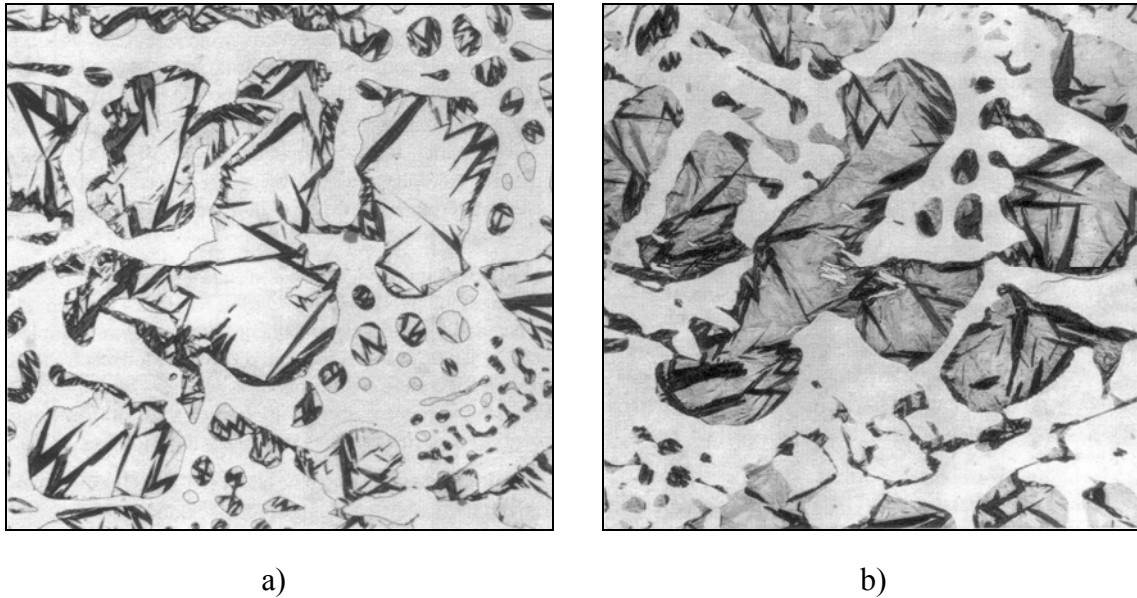
Silicij ima značajan utjecaj na količinu zaostalog austenita. On značajno povećava aktivitet ugljika i smanjuje topljivost ugljika u austenitu zbog čega podiže  $M_s$  temperaturu, što rezultira povećanjem količine martenzita i smanjenjem količine zaostalog austenita. Međutim, silicij je grafitizator zbog čega se njegov sadržaj mora održavati niskim.

Tvrdoća opada s porastom udjela zaostalog austenita u metalnoj osnovi, a raste s porastom udjela martenzita. Zbog toga tvrdoća Ni-Hard 1 i 2 bijelih željeznih ljevova može varirati od 450 do > 700 HB, što ovisi o kemijskom sastavu i debljini stjenke. Maksimalna otpornost na trošenje postiže se ako je metalna osnova potpuno martenzitna. S porastom količine martenzita u metalnoj osnovi opada žilavost.

Najčešće primjenjivane toplinske obrade za Ni-Hard željezne ljeveve su:

- **Popuštanje u jednom koraku.** Provodi se u temperaturnom području od 225 – 275 °C u trajanju od najmanje 4h. Popuštanjem pri niskim temperaturama snižava se krhkost martenzita te u manjoj mjeri poboljšava žilavost, bez utjecaja na tvrdoću. Istovremeno se uklanjaju zaostala naprezanja,
- **Dvostruko popuštanje ili popuštanje u dva koraka.** Najprije se provodi popuštanje na 450 °C nakon čega slijedi hlađenje na zraku, a zatim popuštanje na 275 °C. Ovim pristupom nešto se snižava tvrdoća, ali se značajno povećava otpornost na udarno opterećenje,
- **Visokotemperaturna toplinska obrada.** Sastoji se od zagrijavanja na temperaturu od 750 do 850 °C nakon čega slijedi sporo hlađenje i niskotemperaturno popuštanje. Ovom toplinskom obradom može se značajno poboljšati tvrdoća i otpornost na trošenje.

Kod većine odljevka od Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova primjenjuje se popuštanje u jednom koraku, odnosno dvostruko popuštanje, dok se kod većine odljevaka od Ni-Hard 4 provodi visokotemperaturna toplinska obrada, zbog povišenog udjela zaostalog austenita. Kod izrazito kompleksnih odljevaka, kod kojih se toplinskom obradom može unijeti velika količina naprezanja, provodi se duboko hlađenje (hlađenje na temperaturu od  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  u trajanju od  $1/2 - 1\text{ h}$  u tekućem dušiku) da bi se zaostali austenit pretvorio u martenzit i time povećala tvrdoća (slika 8.25).



Slika 8.25. Mikrostruktura Ni-Hard 1 željeznog lijeva prije (a) i nakon (b) dubokog hlađenja. Nakon dubokog hlađenja u mikrostrukturi je prisutna veća količina martenzita

Destabilizacija austenita u Ni-Hard 1 i 2 željeznim ljevovima može se provesti dovoljno dugim zadržavanjem ( $10 - 20\text{ h}$ ) na temperaturama između  $425$  do  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tijekom zadržavanja na prethodno navedenim temperaturama dolazi do izlučivanja sekundarnih karbida, što rezultira smanjenjem količine otopljenog ugljika u austenitu. Smanjenje količine otopljenog ugljika u austenitu rezultira porastom  $M_s$  temperature, pa se tijekom hlađenja sve više austenita transformira u martenzit i time povećava tvrdoća.

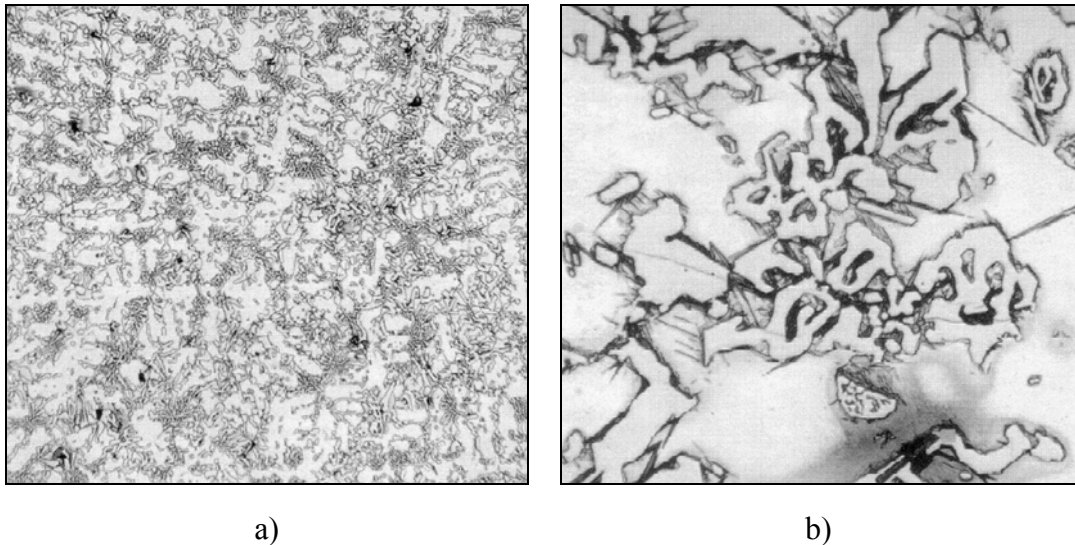
#### 8.4.2 Ni-Hard 4 željezni ljevovi otporni na trošenje

Optimalna mikrostruktura metalne osnove kod Ni-Hard 4 (kvaliteta ID prema ASTM A 532) željeznih ljevova rijetko se postiže u lijevanom stanju (nastoji se ostvariti što veći udio martenzita i što manji udio zaostalog austenita; stvaranje perlita potrebno je izbjeći).

Zbog većeg sadržaja legirajućih elemenata i nedovoljno sporog hlađenja u kalupu, u mikrostrukturi Ni-Hard 4 željeznih ljevova prisutna je povišena količina zaostalog austenita (slika 8.26). Veće količine zaostalog austenita negativno utječu na tvrdoću.

Toplinskom obradom nastoji se povećati udio martenzita i smanjiti udio zaostalog austenita. Austenitizacija obično se provodi zagrijavanjem na temperaturu od  $750 - 790\text{ }^{\circ}\text{C}$  uz zadržavanje od  $8\text{ h}$ , nakon čega slijedi hlađenje na zraku ili u peći s tim da brzina hlađenja ne bude veća od  $30\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ , a potom popuštanje, odnosno uklanjanje zaostalih naprezanja.





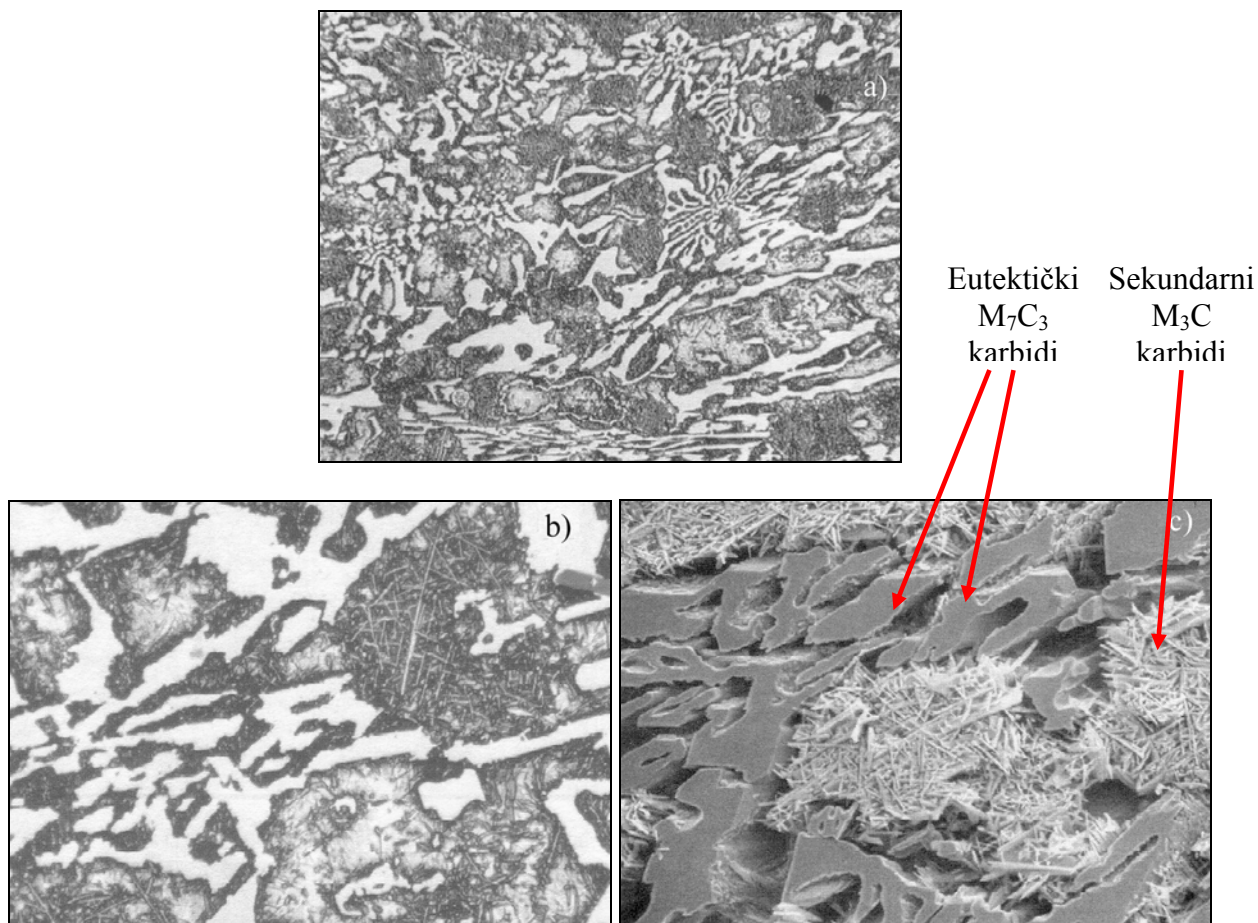
Slika 8.26. Metalografske snimke mikrostrukture Ni-Hard 4 željeznog lijeva u lijevanom stanju pri povećanju 100x (a) i 1000x (b). Nagriženo nitalom. Kemijski sastav: 2,9 % ugljika, 1,8 % silicija, 5,8 % nikla, 1,0 % mangana i 8,4 % kroma. Tvrdoća iznosi 450 HB zbog povišenog udjela zaostalog austenita

Tijekom sporog hlađenja prisutna je u određenoj mjeri destabilizacija austenita putem izlučivanja sekundarnih karbida, što rezultira smanjenjem količine otopljenog ugljika u austenitu te povišenjem  $M_s$  temperature, odnosno povećanjem količine martenzita i smanjenjem količine zaostalog austenita (slika 8.27). Nakon popuštanja može se provesti duboko hlađenje da bi se dodatno smanjio udio zaostalog austenita i na taj način povećala tvrdoća, a potom ponovo popuštanje.

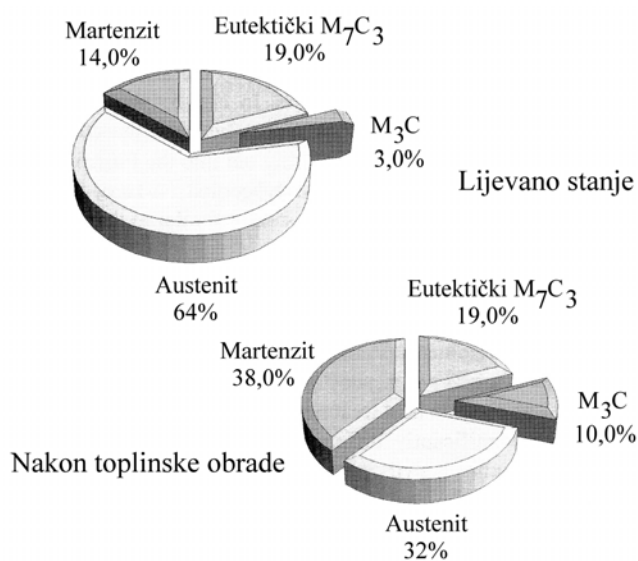
Toplinska obrada kojom se povećava tvrdoća odljevaka od Ni-Hard 4 željeznih ljevova potpuno je suprotna toplinskoj obradi kojom se povećava tvrdoća čeličnih odljevaka i odljevaka od visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje. Kod odljevaka od čelika te visokokromnih željeznih ljevova potrebno je brzo hlađenje ili gašenje sa temperature austenitizacije do temperature koja leži ispod temperaturnog područja u kojem se stvara bainit ili perlit.

Na slici 8.28 prikazana je usporedba udjela pojedinih mikrostrukturnih konstituenata u mikrostrukтури Ni-Hard 4 željeznog lijeva sa slike 8.26 prije i nakon toplinske obrade. Nakon toplinske obrade udio martenzita povećava se sa 14,0 na 38,0 %, a udio sekundarnih  $M_3C$  karbida sa 3,0 na 10,0 %. Zbog toga dolazi do porasta tvrdoće sa 450 HB (lijevano stanje) na 700 HB (nakon toplinske obrade).

Iz prethodne analize može se zaključiti da tvrdoća Ni-Hard 4 željeznih ljevova otpornih na trošenje ovisi o volumnom udjelu eutektičkih  $M_7C_3$  karbida, volumnom udjelu sekundarnih  $M_3C$  karbida te udjelu austenita i martenzita u metalnoj osnovi. Prisutnost sekundarnih  $M_3C$  karbida u metalnoj osnovi značajno utječe na žilavost Ni-Hard 4 željeznog lijeva. Može se reći da će žilavost Ni-Hard 4 željeznog lijeva nakon toplinske obrade uvijek biti manja od žilavosti prije toplinske obrade (za ~ 10,0 %).



Slika 8.27. Metalografske snimke mikrostrukture Ni-Hard 4 željeznog lijeva sa slike 8.26 nakon toplinske obrade (austenitizacija na 750 °C): a) povećanje 500x, b) povećanje 1000x. Na slici (c) prikazana je snimka načinjena pretražnim elektronskim mikroskopom (povećanje 1200x, nagrizeno stanje) sa koje se jasno mogu vidjeti eutektički  $M_7C_3$  karbidi te sekundarni  $M_3C$  karbidi u austenitu. Tvrdoća 700 HB



Slika 8.28. Usporedba udjela pojedinih mikrostrukturnih konstituenata u mikrostrukтури Ni-Hard 4 željeznog lijeva prije (slika 8.26) i nakon toplinske obrade (slika 8.27)

### 8.4.3 Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje

Optimalna tvrdoća visokokromnih željeznih ljevova rijetko se ostvaruje u lijevanom stanju. Zbog toga se u veći slučajeva provodi toplinska obrada.

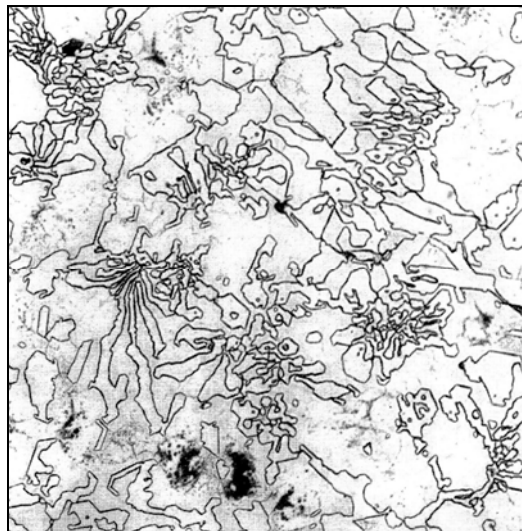
Metalna osnova kod ove vrste željeznih ljevova otpornih na trošenje može biti perlitna, austenitna ili martenzitna, odnosno njihova kombinacija.

Premda imaju relativno nisku tvrdoću (500 – 600 HB), željezni ljevovi s austenitnom strukturom u lijevanom stanju mogu imati zadovoljavajuće karakteristike za određene aplikacije u kojima se zahtijeva otpornost na trošenje, zbog sposobnosti otvrdnjavanja hladnom deformacijom, odnosno otvrdnjavanja tijekom primjene (pretvorba austenita u martenzit). Perlitna metalna osnova ima umjerenu otpornost na trošenje te nisku žilavost, zbog čega se općenito smatra nepoželjnom. Perlit se pojavljuje u slučajevima kada dodatak legirajućih elemenata nije dovoljan da spriječi njegovo nastajanje.

Kod visokokromnih željeznih ljevova kvalitete IIA, B i D prema ASTM A 532 većina kroma vezana je u kromove karbide, zbog čega je gotovo uvijek potreban dodatak ostalih legirajućih elemenata da bi se osigurala adekvatna prokaljivost. Kod visokokromnih željeznih ljevova kvalitete III prema ASTM A 532 veća količina kroma otapa se u metalnoj osnovi, zbog čega je potreban manji dodatak ostalih legirajućih elemenata da bi se osigurala potrebna prokaljivost.

Ako su uspostavljeni ravnotežni uvjeti u kalupu, tijekom hlađenja od solidus temperature do eutektoidne temperature dodatni karbidi kroma precipitirati će iz austenitne metalne osnove (sekundarni karbidi). Kada se dostigne eutektoidna temperatura dolazi do pretvorbe austenita u ferit i karbide. Kada se hlađenje odvija pod neravnotežnim uvjetima, što je daleko češći slučaj u praksi, spriječena je precipitacija karbida kroma i austenit postaje prezasićen ugljikom i kromom.

Zbog povišenog sadržaja ugljika i kroma nastaje metastabilna austenitna struktura (slika 8.29), ako je spriječena pretvorba u perlit i bainit. Dovoljnim dodatkom molibdena, mangana, nikla i bakra osigurava se adekvatna prokaljivost, odnosno sprječava pretvorba austenita u perlit ili bainit u bilo kojoj debljini stijenke.



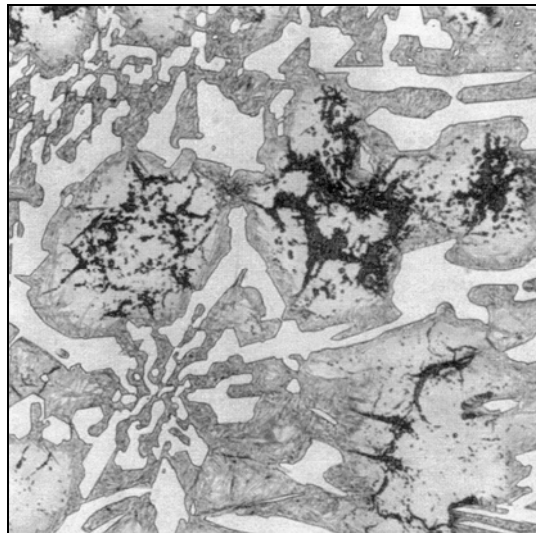
Slika 8.29. Metalografska snimka mikrostrukture visokokromnog željeznog ljeva sa austenitnom metalnom osnovom (lijevano stanje)

Kod odljevaka koji će toplinski obrađivati često se želi ostvariti perlitna metalna osnova u lijevanom stanju, jer se postižu bolji rezultati toplinskom obradom. Budući da perlit

ima manju tvrdoću lakše se sa odljevka uklanjaju uljevni sustavi i pojila. Osim toga, odljevci s perlitnom metalnom osnovom imaju niža rezidualna naprezanja, nižu opasnost od stvaranja pukotina i bolju strojnu obradivost. Da bi se dobila visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, potrebno je ostvariti martenzitnu metalnu osnovu, odnosno primijeniti toplinsku obradu koja se sastoji od gašenja i popuštanja.

Pažljivim odabirom i količinom legirajućih elemenata potrebno je osigurati stvaranje perlitne metalne osnove u lijevanom stanju, ali i dovoljna prokaljivost da se spriječi stvaranje perlita tijekom naknadne toplinske obrade.

Kod debelostjenih odljevka, odnosno odljevaka koji se sporo hlade u kalupu može se ostvariti djelomično martenzitna struktura metalne osnove u lijevanom stanju. Tijekom sporog hlađenja prisutna je u određenoj mjeri destabilizacija austenita što rezultira djelomičnom pretvorbom u martenzit. U tim odljercima martenzit je pomiješan s velikom količinom zaostalog austenita (slika 8.30), što znači da je tvrdoća niža nego kod toplinski obrađenih odljevaka s martenzitnom metalnom osnovom. Kod debelostjenih odljevaka potrebno je posebnu pažnju obratiti na sadržaj legirajućih elemenata da bi se spriječilo stvaranje perlita.



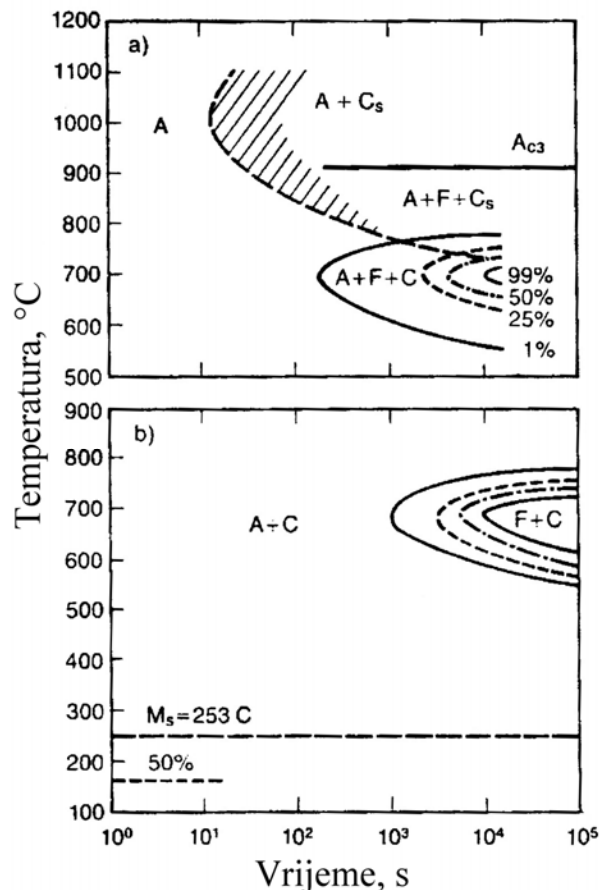
Slika 8.30. Metalografska snimka mikrostrukture visokokromnog željeznog lijeva sa austenitno-martenzitnom metalnom osnovom (lijevano stanje)

Martenzitna struktura koja se postiže u lijevanom stanju obično se sastoji od pločastog martenzita (sadržaj ugljika  $> 1,0$  mas.%) i značajne količine zaostalog austenita, zbog čega odljevci ne pokazuje tvrdoću i žilavost koja se inače može ostvariti kod visokokromnih željeznih ljevova. Superiorna svojstva postižu se ako je ostvarena jednolika distribucija igličastog martenzita (sadržaj ugljika  $< 0,6$  mas.%), zbog čega se zahtijeva primjena toplinske obrade. Za većinu aplikacija zahtijeva se da sadržaj zaostalog austenita ne bude  $> 10,0$  %. Međutim, čest je slučaj da i nakon toplinske obrade količina zaostalog austenita bude visoka ( $> 30,0$  %), zbog čega se zahtijeva daljnje smanjenje njegovog sadržaja.

Količina zaostalog austenita može se smanjiti toplinskom obradom koja se zasniva na destabilizaciji austenita (austenit je stabiliziran visokim sadržajem ugljika i kroma). Toplinskom obradom, odnosno destabilizacijom austenita nastoji se smanjiti sadržaj ugljika i kroma u austenitu putem precipitacije sekundarnih  $M_7C_3$  karbida. Tijekom destabilizacije austenita, sekundarni karbidi koji nastaju mogu biti i  $M_{23}C_6$  tipa. Tip karbida ( $M_7C_3$  ili  $M_{23}C_6$ ) ovisi o kemijskom sastavu.

Precipitacijom sekundarnih karbida smanjuje se sadržaj ugljika i kroma u austenitu i podiže temperaturno područje u kojem se stvara martenzit iznad sobne temperature, što u konačnici rezultira pretvorbom zaostalog austenita u martenzit tijekom hlađenja.

Toplinska obrada komercijalnih visokokromnih željeznih ljevova obično se provodi u temperaturnom području od 930 do 1060 °C. Da bi se omogućila precipitacija sekundarnih karbida  $M_7C_3$  tipa potrebno je dugo zadržavanje na prethodno navedenim temperaturama austenitizacije. Vrijeme potrebno da se dostigne ravnoteža ovisi o temperaturi austenitizacije. Precipitaciju karbida kod većine austenitnih visokokromnih željeznih ljevova detaljno je istražio F. Maratray. Tipičan dijagram pretvorbe prikazan je na slici 8.31.



Slika 8.31. Dijagram izotermne pretvorbe (IT dijagram) za visokokromni željezni ljev koji sadrži 2,5 % ugljika, 20,0 % kroma i 1,0 % molibdena: a) prije destabilizacije austenita, b) poslije destabilizacije austenita (A – austenit, C – karbid, P – perlit, F – ferit,  $M_s$  – temperatura početka stvaranja martenzita,  $C_s$  – sekundarni karbidi)

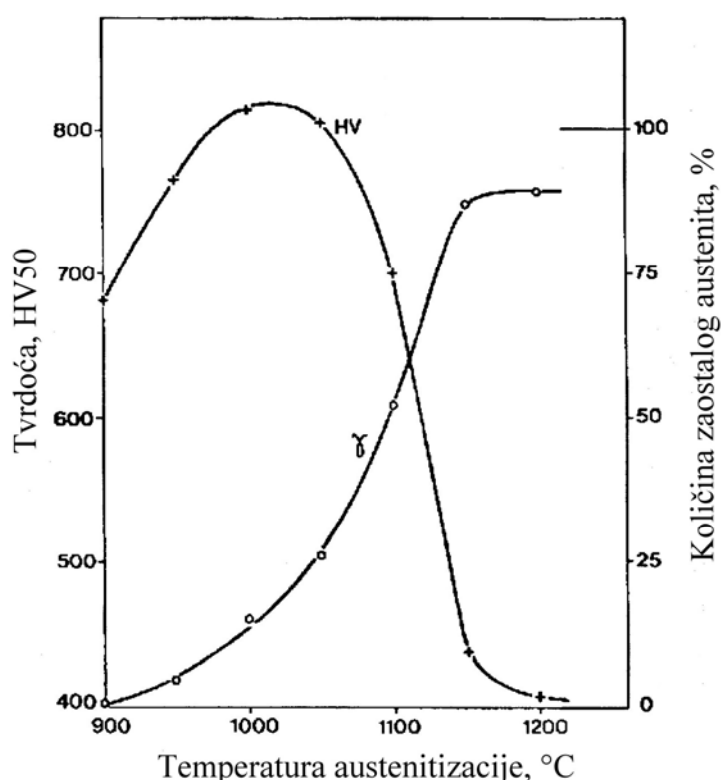
Na slici 8.31 može se vidjeti karakteristični „C“ oblik krivulje, kao i kod ostalih difuzijski kontroliranih pretvorbi. Nos krivulje (točka infleksije) leži kod temperature ~ 1000 °C. Prema tome, pri višim ili nižim temperaturama od navedene potrebna su nešto duža vremena da se dostigne ravnoteža (potpuna destabilizacija austenita).

Precipitacija karbida pri temperaturi > 930 °C odvija se u prihvatljivom vremenskom intervalu. Npr. pri temperaturi od 1010 °C adekvatno vrijeme zadržavanja iznosi 2 h, dok se pri temperaturi od 927 °C zahtijeva najmanje 8 h. Pri nižim temperaturama precipitacija i brzina rasta kromovih karbida odvija se vrlo sporo zbog prilično niske brzine difuzije kroma ka rastućim karbidima.

Kod odljevaka koji imaju perlitnu metalnu osnovu u lijevanom stanju (prije toplinske obrade) ravnotežni sadržaj ugljika vrlo se brzo dostiže u odnosu na austenitnu metalnu osnovu u lijevanom stanju, što znači da su potrebna kraća zadržavanja na temperaturi austenitizacije.

Temperatura austenitizacije je usko povezana s kemijskim sastavom željeznog lijeva. Količina ugljika otopljenog u austenitu kontrolirana je temperaturom austenitizacije. S porastom temperature austenitizacije raste topljivost ugljika u austenitu.

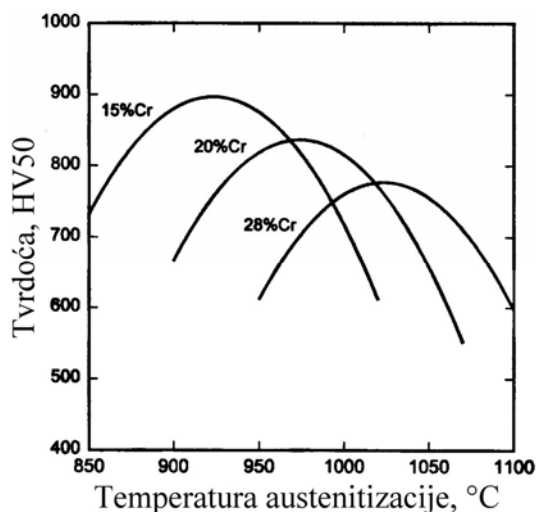
Premda viši sadržaji ugljika rezultiraju martenzitom više tvrdoće, visok sadržaj ugljika uz visok sadržaj legirajućih elemenata može potisnuti temperaturno područje u kojem se stvara martenzit ispod sobne temperature. Prema tome, tvrdoća raste s porastom temperature austenitizacije do određenog nivoa, a nakon toga s daljnjim porastom temperature austenitizacije tvrdoća se smanjuje zbog potiskivanja temperaturnog područja u kojem se stvara martenzit ka nižim temperaturama, što je povezano s porastom količine zaostalog austenita (slika 8.32).



Slika 8.32. Tipičan odnos između temperature austenitizacije, količine zaostalog austenita i tvrdoće nakon gašenja

Previsoka temperatura austenitizacije povećava stabilnost austenita, odnosno količinu zaostalog austenita, što rezultira smanjenjem tvrdoće. Niske temperature austenitizacije rezultiraju martenzitom s niskim sadržajem ugljika, čime se smanjuje tvrdoća i otpornost na trošenje.

Krom ima značajan utjecaja na topljivost ugljika u austenitu. Kod određene temperature topljivost ugljika u austenitu smanjuje se s porastom sadržaja kroma. Kod određenog sadržaja kroma topljivost ugljika u austenitu raste s porastom temperature. Može se zaključiti da se s povećanjem sadržaja kroma mora povećavati i temperatura austenitizacije da bi se ostvario isti sadržaj ugljika u austenitu (slika 8.33).



Slika 8.33. Utjecaj sadržaja kroma u visokokromnom željeznom lijevu na optimalnu temperaturu austenitizacije

Temperatura austenitizacije kod visokokromnih željeznih ljevova kvalitete II prema ASTM A 532 koji sadrže 12,0 – 20,0 % kreće se od 950 – 1010 °C, dok kod željeznih ljevova kvalitete III prema ASTM A 532 koji sadrže 23,0 – 28, 0% kroma temperatura austenitizacije treba ležati u temperaturnom intervalu od 1010 – 1090 °C.

S porastom sadržaj kroma snižava se  $M_s$  temperatura i austenit postaje stabilniji. S porastom sadržaja ugljika raste količina kroma vezanog u eutektičke karbide zbog čega se smanjuje količina kroma u metalnoj osnovi. Može se reći da s porastom omjera sadržaja kroma i ugljika u željeznom lijevu (omjer %Cr/%C) raste količina kroma u metalnoj osnovi, a shodno tome i optimalna temperatura austenitizacije.

Legirajući elementi dodani u visokokromni željezni lijev u cilju povećanja prokaljivosti utječu na optimalnu temperaturu austenitizacije. Većina legirajućih elemenata, kao što su molibden, mangan, nikal i bakar, snižava  $M_s$  temperaturu i nastoje stabilizirati austenit. Pored toga, ovi elementi utječu na topljivost ugljika u austenitu, a time i na temperaturu austenitizacije.

U tablici 8.13 prikazano je kako 1,0 % dodatka pojedinog legirajućeg elementa utječe na temperaturu austenitizacije.

Tablica 8.13. Utjecaj legirajućih elementa na temperaturu austenitizacije s koje se gašenjem dobiva 50, odnosno 20,0 % zaostalog austenita u metalnoj osnovi. Ostatak je martenzit.

Element	Povećanje sadrž. elementa, %	$\Delta T$ , °C	50 % $\gamma$ , $\Delta T/\%$ elementa	20 % $\gamma$ , $\Delta T/\%$ elementa
Mn	1,94	-64	-33	-35
Ni	1,80	-38	-21	-22
Cr	14,25	22	1,6	1,2
Cr	13,30	16	1,2	2,5
Mo	1,85	24	13	43
Si	1,23	42	34	79

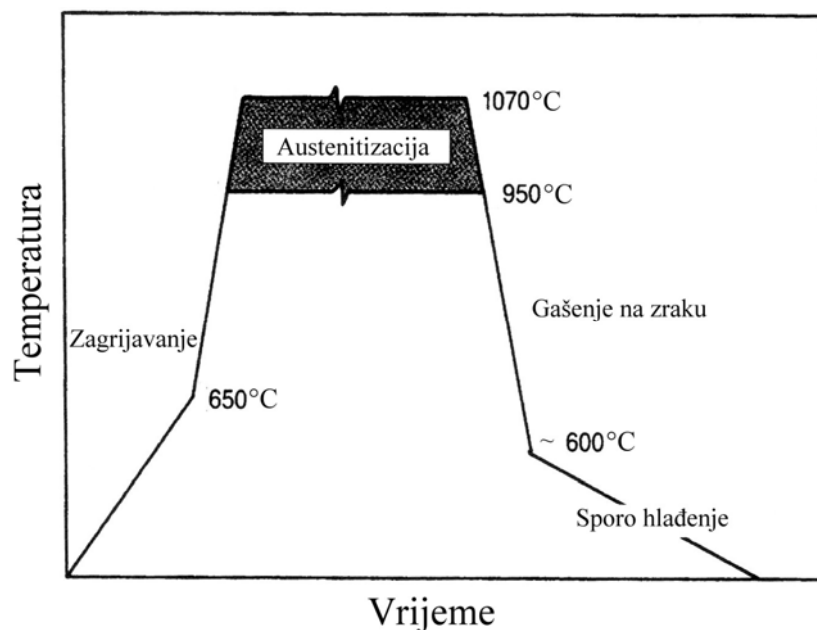
Iz tablice 8.13 može se vidjeti da mangan i nikal snižavaju optimalnu temperaturu austenitizacije, dok je molibden i silicij povećavaju. Silicij ima minimalan utjecaj na  $M_s$  temperaturu, ali značajno snižava topljivost ugljika u austenitu. To je razlog zašto je silicij

efikasan element za povećanje tvrdoće (sadržaja martenzita) kod visokolegiranih bijelih željenih ljevova s martenzitnom metalnom osnovom u lijevanom stanju.

Brzina hlađenja također utječe na konačnu strukturu nakon toplinske obrade. Tijekom hlađenja s temperature austenitizacije može se pojaviti dodatna precipitacija karbida, posebno u debelim presjecima. Precipitacija karbida tijekom hlađenja s temperature austenitizacije rezultira daljnjim osiromašenjem austenita ugljikom i podizanjem  $M_s$  temperature, ali i eventualnim smanjenjem tvrdoće martenzita ako je sadržaj ugljika prenizak.

Stabilnost austenita, odnosno količina zaostalog austenita smanjuje se sa smanjenjem brzine hlađenja s temperature austenitizacije. Međutim, hlađenje kroz područje pretvorbe u martenzit ne smije biti presporo jer može rezultirati stabilizacijom austenita, što u konačnici znači veću količinu zaostalog austenita.

Na slici 8.34 shematski je prikazan proces toplinske obrade visokokromnih željeznih ljevova.



Slika 8.34. Shematski prikaz toplinske obrade visokokromnih željeznih ljevova

Odljevci se moraju sporo zagrijavati do 650 °C da bi se izbjeglo stvaranje pukotina. Preporučuje se da maksimalna brzina zagrijavanja odljevka kompleksnih oblika ne bude veća od 30 °C/h. Odljevci jednostavnih oblika te odljevci s potpuno perlitnom metalnom osnovom mogu se brže zagrijavati.

Nakon dovoljno dugog zadržavanja odljevaka na temperaturi austenitizacije, provodi se gašenje, odnosno hlađenje zrakom (primjena ventilatora) u temperaturno područje od 550 – 600 °C, odnosno na temperaturu koja leži ispod temperaturnog područja u kojem se stvara perlit. Na taj način se izbjegava stvaranje perlita. Nakon toga, potrebno je smanjiti brzinu hlađenja da bi se minimalizirala zaostala naprezanja (hlađenje do sobne temperature na mirnom zraku ili u peći). Visoke brzine hlađenja moraju se izbjegavati zbog mogućnosti stvaranja pukotina i visokih zaostalih naprezanja (gašenje se ne smije provesti u vodi ili ulju). Osim toga, zahtijeva se odgovarajuće legiranje da bi se osigurala adekvatna prokaljivost na zraku.

Opsežna istraživanja na ovom polju rezultira su jednadžbom pomoću koje je moguće odrediti potrebit dodatak legirajućih elemenata na osnovi debljine stjenke odljevka:



$$\log T = 0,06 + 0,39(\%Ni) + 0,40(\%Cu) + 0,23(\%Cr/C) + 0,53(\%Mo \times \%Mn) + 0,50(\%Mo \times \%Ni) \quad (8.4)$$

gdje je T debljina stjenke odljevka (mm).

Budući da nikal i bakar promoviraju, odnosno povećavaju količinu zaostalog austenita, njihov zbirni sadržaj obično se ograničava na maks. 1,2 %. Mangan djeluje slično i obično se ograničava na maks. 1,0 %.

Molibden je snažan element za povećanje prokaljivosti. Djelovanje molibdena pojačava se ako se kombinira sa ostalim elementima za povećanje prokaljivosti (nikal, bakar) (tablica 8.14).

Tablica 8.14. Minimalni sadržaji legirajućih elemenata ovisno o debljini stjenke da bi se izbjeglo stvaranje perlita u odljencima od visokokromnih željeznih ljevova tijekom toplinske obrade, odnosno gašenja na zraku

Kvaliteta prema ASTM A 532	%Cr <sup>1)</sup>	%C <sup>1)</sup>	Debljina ploče ili radijus okrugle šipke		
			25mm	50mm	100mm
IIB	14,0-18,0	2,0	1,5%Mo	1,5%Mo + 0,5%(Ni+Cu)	2,0%Mo+1,0%(Ni+Cu)
		3,5	3,0%Mo	2,0%Mo+ 1,0%(Ni+Cu)	2,5%Mo+1,0%(Ni+Cu) <sup>2)</sup>
IID	18,0-23,0	2,0	1,0%Mo	2,0%Mo	2,0%Mo + 0,5%(Ni+Cu)
		3,2	1,5%Mo	2,0%Mo + 0,7%(Ni+Cu)	2,0%Mo+1,2%(Ni+Cu) <sup>2)</sup>
IIIA	23,0-28,0	2,0	0,5%Mo	1,5%Mo	1,5%Mo+ 0,5%(Ni+Cu)
		3,0	1,5%Mo	1,5%Mo+ 0,6%(Ni+Cu)	1,5%Mo+1,2%(Ni+Cu) <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> bazne taljevine sadrže 0,6 % silicija i 0,8 % mangana

<sup>2)</sup> nikal i bakar promoviraju zaostali austenit zbog čega se njihov zbirni sadržaj ograničava na maks. 1,2 %. Mangan se ponaša slično zbog čega se ograničava na maks. 1,0 %

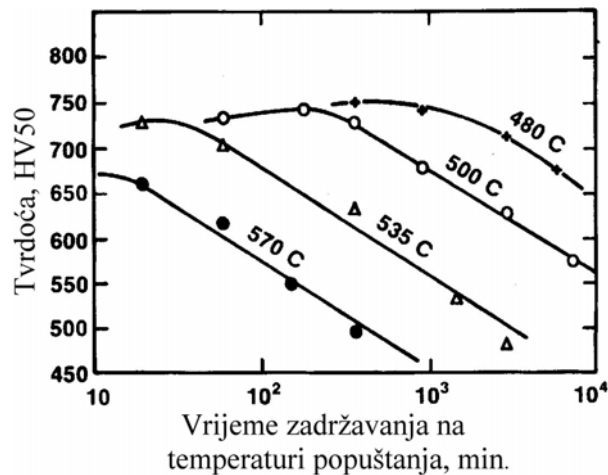
Premda se odljevci mogu primijeniti odmah nakon toplinske obrade, preporučuje se da se nakon gašenja provede popuštanje na temperaturama od 200 – 230 °C u trajanju od 2 – 4 h čime se u određenoj mjeri povećava žilavost martenzitne metalne osnove te smanjuje količina zaostalih naprezanja. Nakon austenitizacije i gašenja, u mikrostrukturi odljevaka obično je prisutno 10,0 – 30,0 % zaostalog austenita. Određeni (manji) udio zaostalog austenita transformira se u martenzit tijekom niskotemperaturnog popuštanja. Za veće uklanjanje zaostalog austenita zahtijeva se primjena viših temperatura popuštanja (450 – 600 °C).

Tijekom popuštanja na višim temperaturama dolazi do destabilizacije austenita putem precipitacije sekundarnih M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ili M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbida, što ovisi o kemijskom sastavu (M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> karbidi nastaju kod viših sadržaja kroma).

Visoki udjeli zaostalog austenita zahtijevaju visoku temperaturu popuštanja (~ 600 °C) da bi došlo do njegove pretvorbe, s tim da će se pretvorba austenita u velikoj mjeri odvijati na temperaturi popuštanja, a u manjoj mjeri tijekom naknadnog hlađenja. Niži sadržaji zaostalog austenita zahtijevaju i niže temperature popuštanja, a pretvorba austenita odvija se tijekom hlađenja.

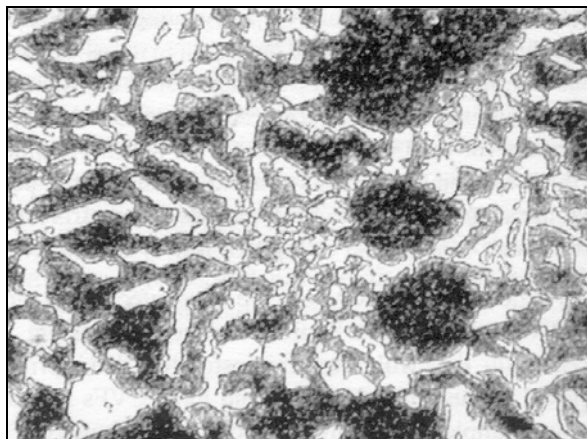
Previsoka temperatura ili predugo vrijeme popuštanja rezultira omekšavanjem martenzita i drastičnim smanjenjem otpornosti na trošenje (slika 8.35).

Neadekvatno provedeno popuštanje rezultira nepotpunom eliminacijom zaostalog austenita.



Slika 8.35. Utjecaj temperature popuštanja na tvrdoću visokokromnog željeznog lijeva koji sadrži 1,6 % ugljika, 16,0 % kroma i 3,0 % molibdena. Gašenje provedeno s temperature austenitizacije od 1000 °C. Tvrdoća prije popuštanja ~ 840 HV

Uspješnom toplinskom obradom destabilizira se austenit putem precipitacije finih sekundarnih karbida (slika 8.36). Sekundarni karbidi nalaze se u otvrdnutoj martenzitnoj metalnoj osnovi.



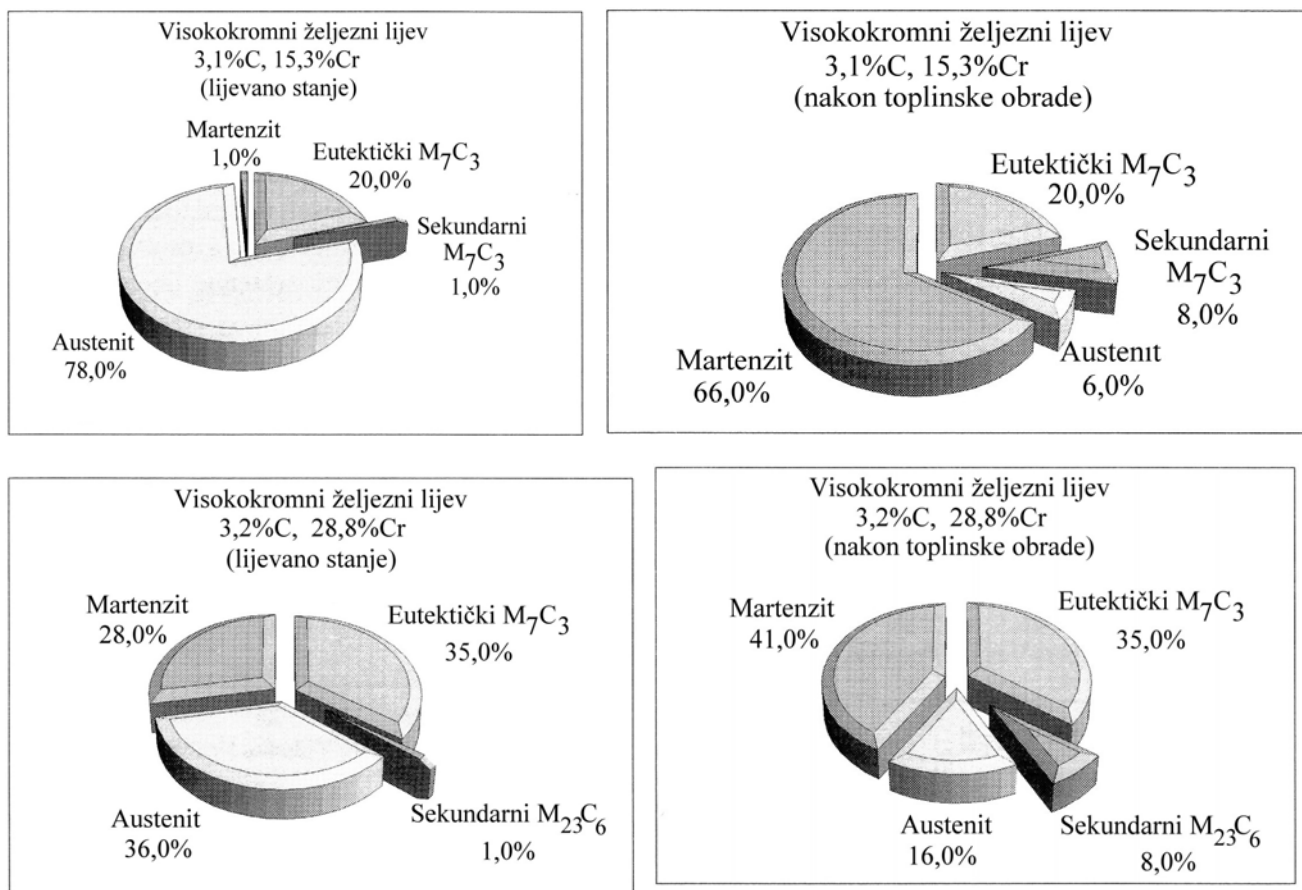
Slika. 8.36. Metalografska snimka mikrostrukture toplinski obrađenog visokokromnog željeznog lijeva koji sadrži 3,0 % ugljika i 25,0 % kroma. Zbog visokog sadržaja kroma tijekom toplinske obrade izlučeni su sekundarni  $M_{23}C_6$  karbidi

Imajući u vidu prirodu martenzitne pretvorbe u visokokromnim željeznim ljevovima, austenit se nikada neće u potpunosti transformirati u martenzit. Metalna osnova nakon toplinske obrade uvijek je sastoji od martenzita, zaostalog austenita i sekundarnih karbida (slika 8.37).

Da bi se ostvarila visoka tvrdoća i otpornost na trošenje kod visokokromnih željeznih ljevova bez primjene toplinske obrade, potrebno je provesti tzv. duboko hlađenje koje rezultira pretvorbom zaostalog austenita u martenzit.

Učinak dubokog hlađenja ovisi o stabilnosti austenita. Što je  $M_s$  temperatura niža (viša stabilnost austenita) može se očekivati manje uklanjanje zaostalog austenita tijekom dubokog hlađenja.

Za duboko hlađenje obično se primjenjuje tekući dušik. Vrijeme zadržavanja na odgovarajućoj temperaturi obično iznosi 1/2 h.



Slika 8.37. Usporedba udjela pojedinih mikrostrukturnih konstituenata u mikrostrukтури visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje prije i nakon toplinske obrade

## 8.5 Morfologija karbida u željeznim ljevovima otpornim na trošenje

Tip, volumni udio i morfologija karbida u velikoj mjeri utječe na svojstva željeznih ljevova otpornih na trošenje.

U tablici 8.15 prikazana su osnovna svojstva karbida koji se pojavljuju u željeznim ljevovima otpornim na trošenje.

Od svih karbida prikazanih u tablici 8.15 najznačajniji su  $M_3C$  i  $M_7C_3$  karbidi.

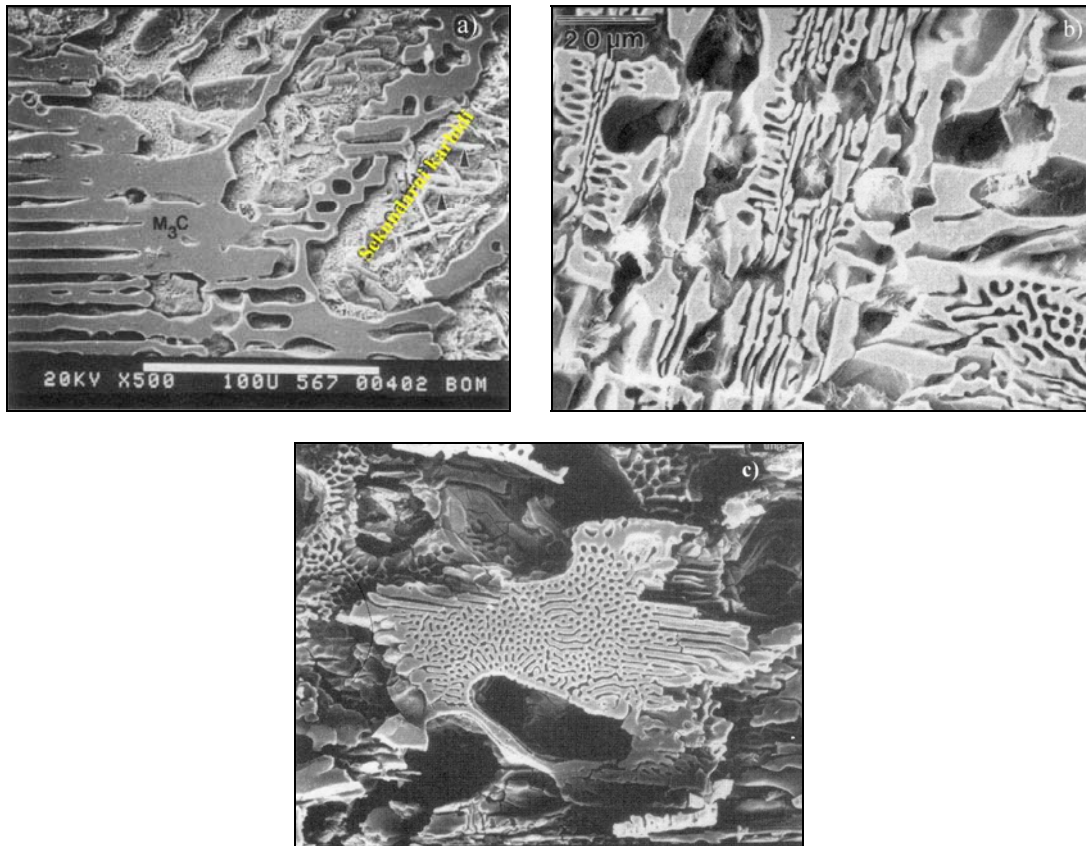
Svi željezni ljevovi obuhvaćeni normom ASTM A 532 sadrže eutektičke  $M_3C$  ili  $M_7C_3$  karbide.

Tablica 8.15. Osnovna svojstva karbida u željeznim ljevovima otpornim na trošenje

Tip karbida	Kemijski sastav, %	%C	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Kristal. sustav	Morfolog.	Tvrdoća, HV	Gibbsova energija (kJ/mol)
M <sub>3</sub> C	Uglavnom Fe, u većini Ni-Hard želj. ljevova do 5,0%Cr i 1,5%Ni. Ima visoku topljivost Mn. Ako je dodano 1,0%Mn u taljevinu, 1,0% mangana biti će sadržano u karbidu. Cr se također otapa u M <sub>3</sub> C karbidu do 17,0%. Mo, V i ostali atomi metala imaju vrlo malu topljivost u M <sub>3</sub> C karbidu	6,7 - 6,9	7,4 - 7,6	Ortorompski	Pločice	800 - 1100	+1 do -10
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Uglavnom Cr. Sadržaj Cr može varirati od 24,0 – 50,0%. Može sadržavati do 7,0%Mo i do 30,0%V, ovisno o njihovom sadržaju. Topljivost Mn slična kao kod M <sub>3</sub> C karbida	8,6 - 8,9	6,6 - 6,9	Pseudo-heksagonalni	Štapići i tanki listići (poput oštrica)	1000 - 1800	-10 do -20
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Uglavnom Cr (donja granica ~ 60,0%). Topljivost ostalih elemenata: W<10,0%, Mo<10,0%, V<10%.	5,3 - 5,7	7,2 - 7,7	Kompleksni kubični plošno centrirani (D8 <sub>4</sub> tip)	Štapići	1000	-8 do -15
Mo <sub>2</sub> C	U željez. ljevovima otpornim na trošenje koji sadrže nekoliko % Mo ovaj karbid najčešće je prisutan po granicama austenitnih zrna. Nije ustanovljena prisutnost ostalih karbidotvornih elemenata (osim Mo) unutar ovog karbida. Međutim, smatra se da sadrži određenu količinu kroma ako je prisutan u visokokromnom željeznom lijevu.	5,9	9,1	Ortorompski	Tanki listići (poput oštrica)	1500 - 1800	-25 do -30
MC (VC)	Pojavljuje se kao eutektički karbid samo ako je sadržaj vanadija u taljevini > 4,5%. Pri nižim sadržajima raspodijeljen je između M <sub>x</sub> C <sub>y</sub> tipa karbida i metalne osnove. V-karbidi nastali u željeznim ljevovima koji sadrže Cr mogu sadržavati do 20%Cr.	17,0 - 20,0	5,6 - 7,0	Kompleksni kubični plošno centrirani (B1 tip)	Štapići	2000 - 3000	-40 do -80
NbC	Nije ustanovljena prisutnost ostalih elemenata unutar ovog karbida. Nb ima vrlo ograničenu topljivost u feritu i austenitu, zbog čega je sav prisutan u obliku karbida.	11,0	7,8	Kompleksni kubični plošno centrirani (B1 tip)	Poput koralja ili latica	2000 - 2500	-110 do -140
TiC	Javlja se u „čistom“ obliku (ostali elementi nisu prisutni u ovom karbidu)	20,0	4,9	Kompleksni kubični plošno centrirani (B1 tip)	Kubični oblik	2000 - 3100	-180

### 8.5.1 Morfologija $M_3C$ karbida

Na slikama 8.38a – 8.38c prikazana je pločasta morfologija  $M_3C$  karbida u slučaju podeutektičkog, eutektičkog i nadeutektičkog sastava željeznog lijeva.

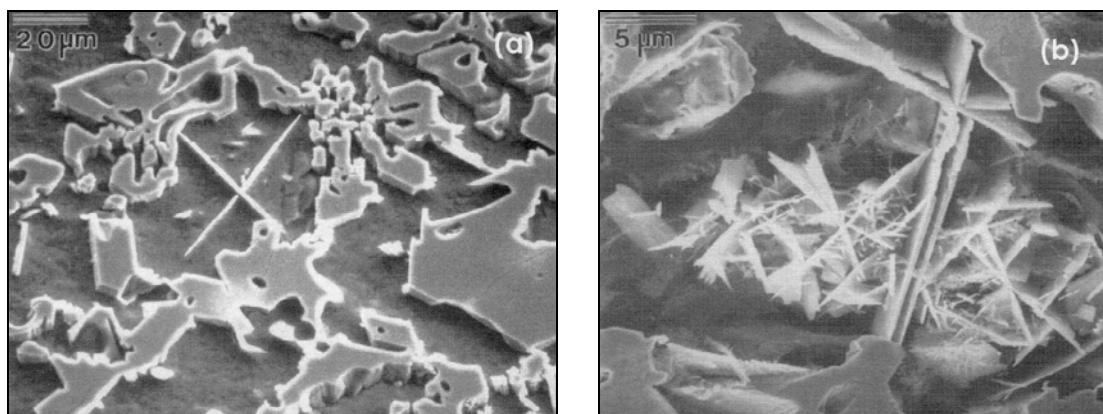


Slika 8.38. Primjeri morfologije  $M_3C$  karbida u slučaju podeutektičkog (a), eutektičkog (b) i nadeutektičkog (c) sastava željeznog lijeva. Snimke načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

Morfologija  $M_3C$  karbida načinjena je od tankih pločica. Pločice mogu biti kompaktne (slika 8.38a) ili sačaste (slika 8.38c). Međutim, u svim slučajevima mreža karbida je kontinuirana. Kontinuiranost ove pločaste strukture je jedna od najvažnijih mikrostrukturnih karakteristika željeznih ljevova koji sadrže  $M_3C$  karbide.

$M_3C$  karbidi imaju nižu tvrdoću od  $M_7C_3$  karbida te nižu stabilnost (lakše se razlažu).

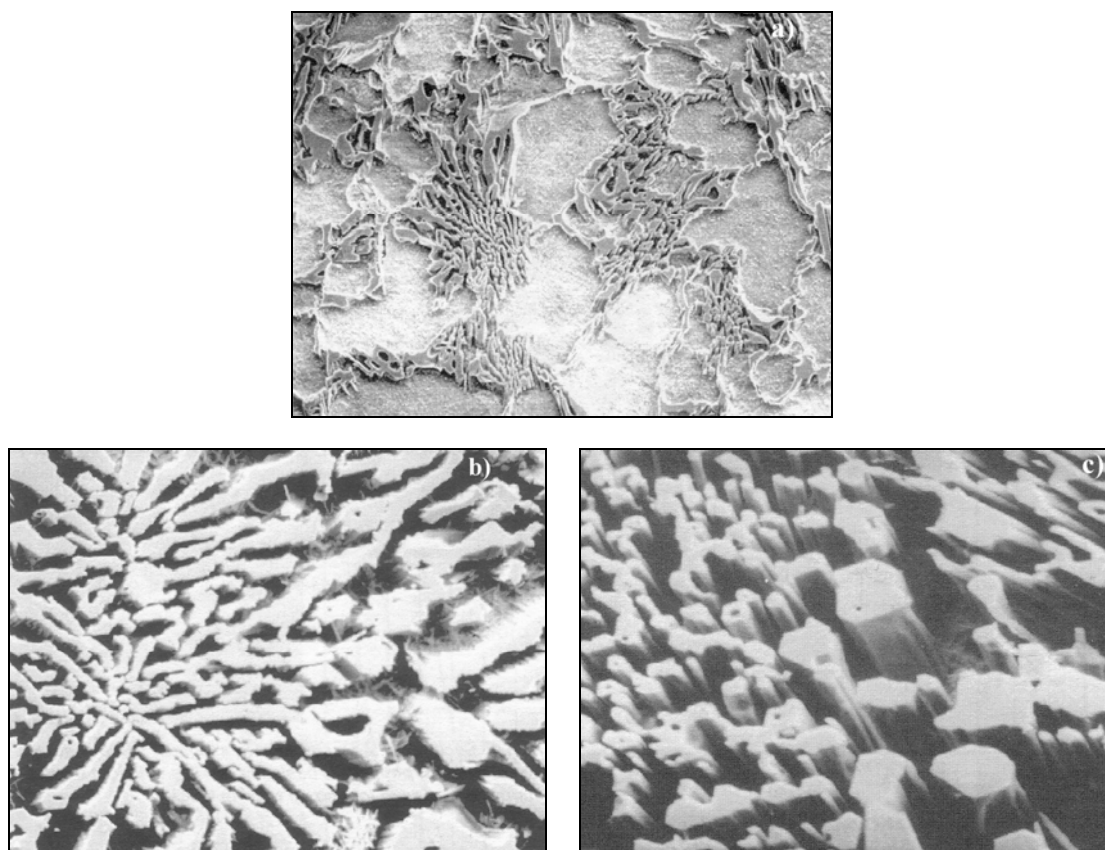
Kod Ni-Hard 4 te Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova  $M_3C$  karbidi mogu se također pojaviti kao sekundarni karbidi u austenitnoj metalnoj osnovi tijekom hlađenja do sobne temperature (slika 8.39).



Slika 8.39. Snimke sekundarnih  $M_3C$  karbida u Ni-Hard 4 željeznom lijevu načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM). Može se vidjeti da  $M_3C$  karbidi zadržavaju svoju karakterističnu pločastu morfologiju. Tijekom brzog hlađenja (a) nastaje manji broj  $M_3C$  karbida, dok tijekom sporog hlađenja (b) nastaje znatno više  $M_3C$  karbida

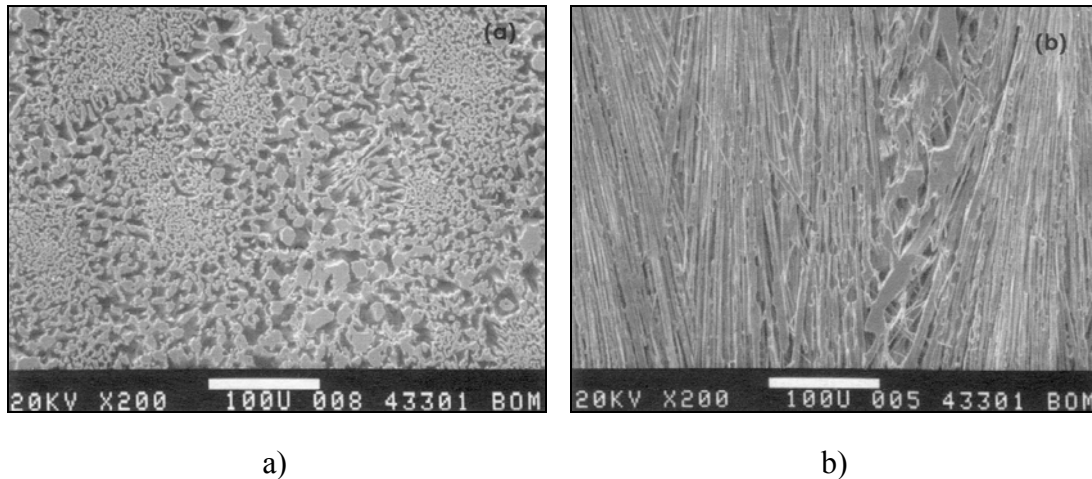
### 8.5.2 Morfologija $M_7C_3$ karbida

Na slikama 8.40a – 8.40c prikazana je morfologija  $M_7C_3$  karbida u slučaju podeutektičkog, eutektičkog i nadeutektičkog sastava željeznog lijeva.



Slika 8.40. Primjeri morfologije  $M_7C_3$  karbida u slučaju podeutektičkog (a), eutektičkog (b) i nadeutektičkog (c) sastava željeznog lijeva. Snimke načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)

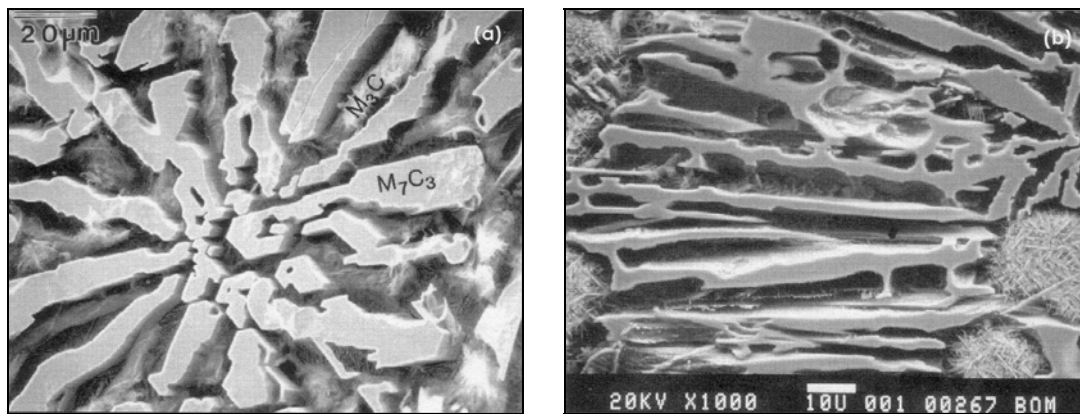
Morfologija  $M_7C_3$  karbida načinjena je od štapića i tankih listića (popu oštrica). Kod podeutektičkih i eutektičkih željeznih ljevova rast štapića i tankih listića odvija se unutar eutektičkih ćelija, odnosno dužina pojedinog štapića ili listića ograničena je veličinom eutektičke kolonije. Nasuprot tome, kod nadeutektičkih željeznih ljevova karbidi mogu biti izrazito debeli i dugi, odnosno dužina štapića ograničena je samo rastom susjednih štapića u taljevini. Prema tome, u nadeutektičkim željeznim ljevovima mogu biti prisutna pojedinačna karbidna „vlakna“ koja imaju vrlo veliku dužinu (red veličine nekoliko mm) (slika 8.41).



Slika 8.41. Snimke morfologija  $M_7C_3$  karbida u nadeutektičkom željeznom lijevu pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) ovisno o ravni presijecanja uzorka: a) izolirane čestice (uzorak presječen okomito na dominantan smjer rasta), b) dugi štapići (uzorak presječen u smjeru u kojem se odvija dominantan rast).

Jedinstvena karakteristika morfologije  $M_7C_3$  karbida je stvaranje karbida koji imaju oblik tankih listića (poput oštrica) unutar interdendritnih prostora. Ako željezni lijev ima izrazito podeutektički sastav (volumni udio karbida  $< 20,0\%$ ), taljevina eutektičkog sastava potisnuta je u prostoru između dendrita. Kada započne eutektičko skrućivanje, rast karbida ograničen je na prostor između postojećih dendrita. U tom slučaju nastala mikrostruktura karbida prikazana je na slici 8.40a.

Osnovna konstituirajuća jedinica je štapićasta struktura (slika 8.42a), koja može biti prisiljena da raste u obliku tankih listića (slika 8.42b) ako se nalazi u interdendritnom prostoru. Prethodno spomenuta listićava struktura karbida može se također pojaviti unutar eutektičkih kolonija.



a)

b)

Slika 8.42. Snimke morfologija  $M_7C_3$  karbida u Ni-Hard 4 željeznom lijevu načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM): a) štapićasta morfologija, b) listićava morfologija (tanki listići poput oštrica). Prisutni  $M_3C$  karbidi nastali su tijekom toplinske obrade (sekundarni  $M_3C$  karbidi)

Sekundarni  $M_7C_3$  karbidi (nastali tijekom toplinske obrade) uglavnom imaju štapićastu morfologiju (slika 8.43).

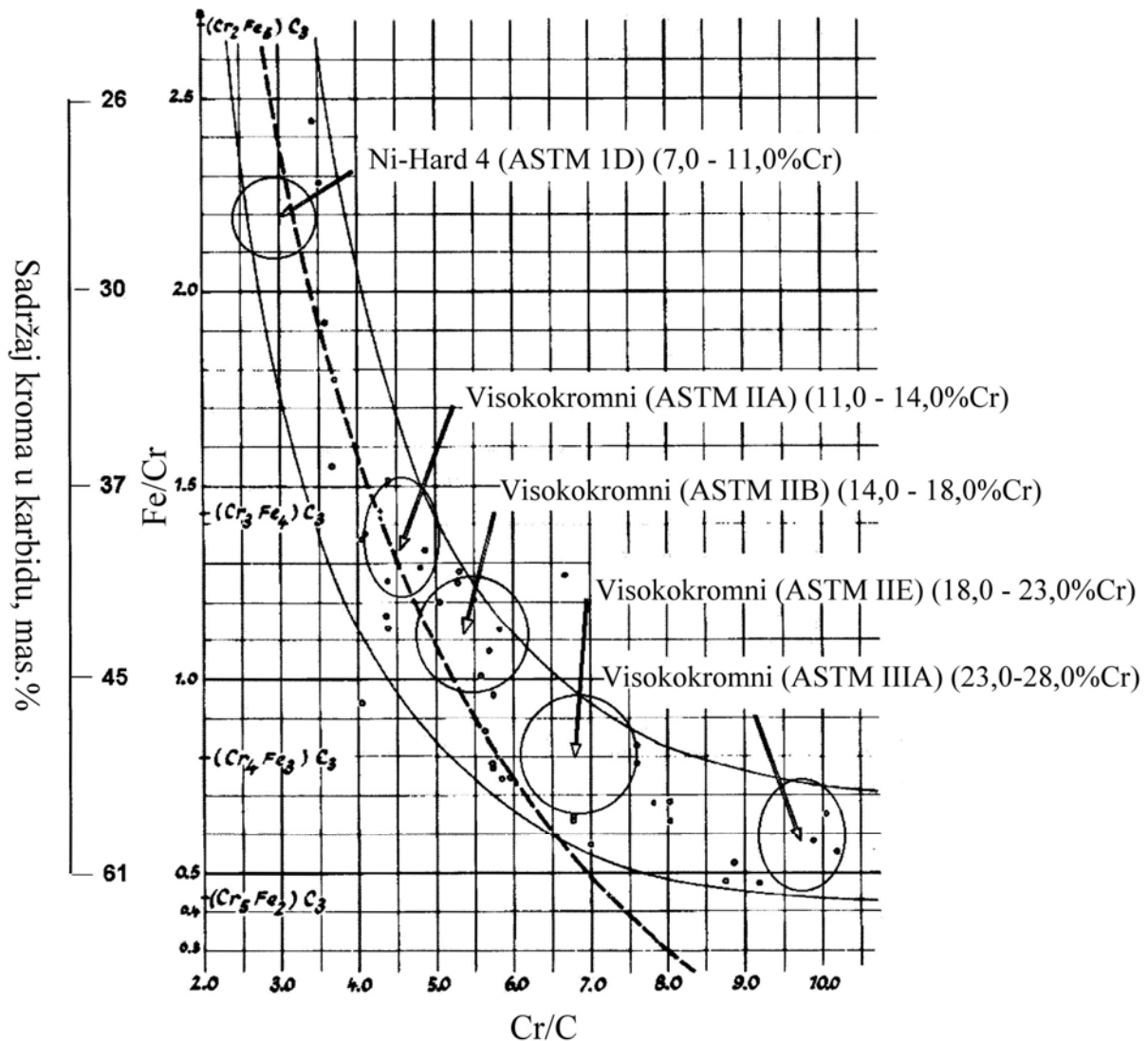


Slika 8.43. Snimka morfologije sekundarnih  $M_7C_3$  karbida u visokokromnom željeznom lijevu načinjena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM)



Tvrdoća  $M_7C_3$  karbida varira od 1000 – 1800 HV (tablica 8.15). S porastom sadržaja kroma u željeznom lijevu raste tvrdoća  $M_7C_3$  karbida.

Pomoću dijagrama prikazanog na slici 8.44 može se lako procijeniti sadržaj kroma u  $M_7C_3$  karbidu kod većine željeznih ljevova otpornih na trošenje.

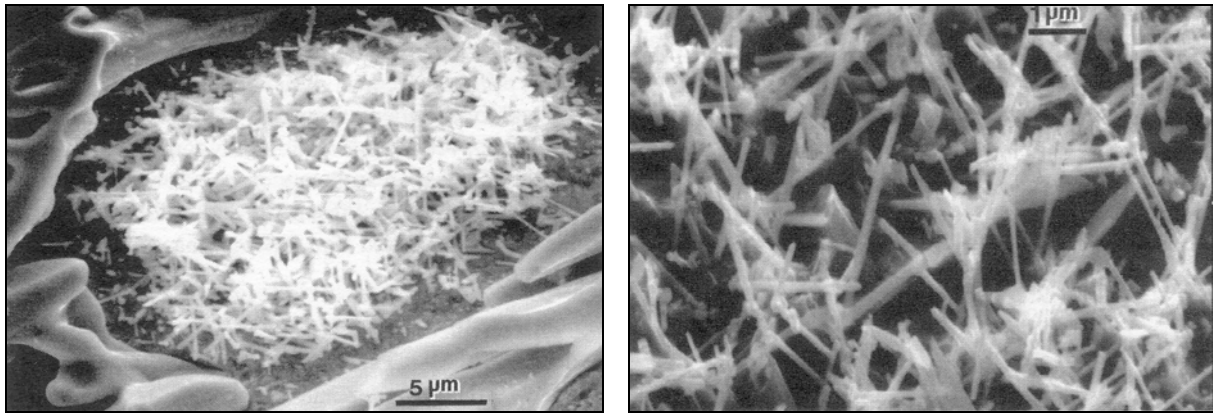


Slika 8.44. Odnos između Cr:C omjera u željeznom lijevu i očekivanog sadržaja kroma u  $M_7C_3$  karbidu. Npr.  $(Cr_2Fe_5)C_3$  karbid sadrži ~ 24,0 % kroma, dok  $(Cr_5Fe_2)C_3$  karbid sadrži ~ 65,0 % kroma

### 8.5.3 Morfologija $M_{23}C_6$ karbida

$M_{23}C_6$  karbid pojavljuje se kao sekundarni karbid u visokokromnim željeznim ljevovima (slika 8.45).

Tvrdoća  $M_{23}C_6$  karbida niža je od tvrdoće  $M_7C_3$  karbida, ali je neznatno viša od tvrdoće  $M_3C$  karbida. U literaturi nisu dostupni podatci koji govore o području u kojem se kreće tvrdoća  $M_{23}C_6$  karbida, osim za slučaj čistog  $Cr_{23}C_6$  karbida čija tvrdoća iznosi 1000HV.



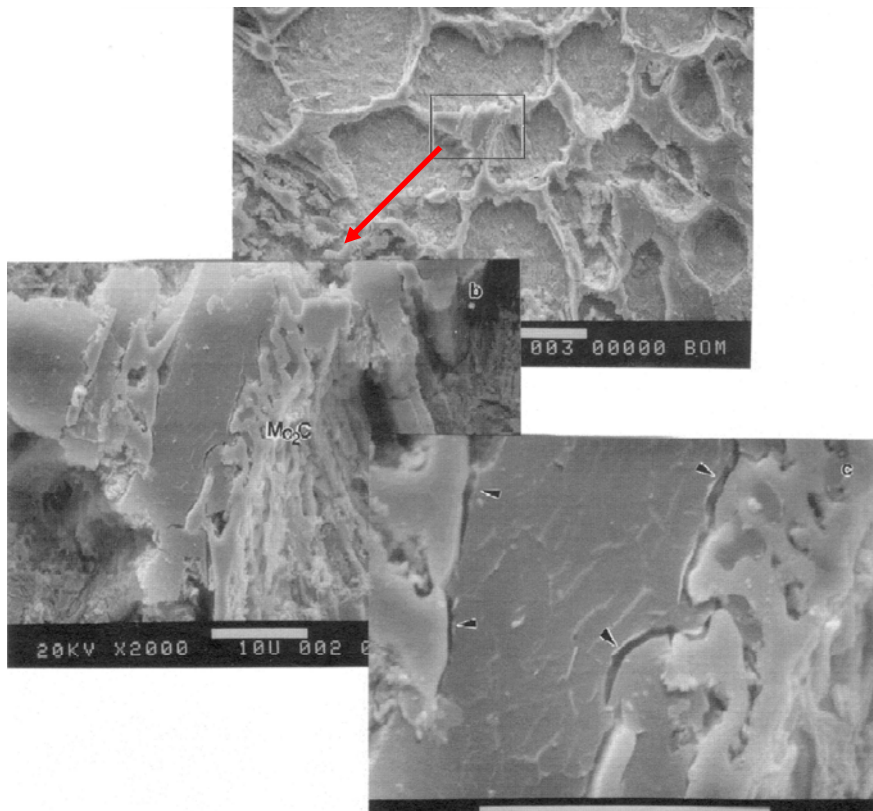
a)

b)

Slika 8.45. Snimka morfologije  $M_{23}C_6$  karbida pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) u visokokromnom željeznom lijevu koji sadrži 2,5 % ugljika i 29,0 % kroma

#### 8.5.4 Morfologija $Mo_2C$ karbida

Sa slike 8.46 može se vidjeti da je morfologija  $Mo_2C$  karbida načinjena od vrlo tankih vlakana, odnosno listića (poput oštrica).



Slika 8.46. Snimke morfologije  $Mo_2C$  karbida pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) u željeznom lijevu otpornom na trošenje sa 2,3 % ugljika i 5,0 % molibdena. Pored karakteristične listićave morfologije  $Mo_2C$  karbida (b), može se vidjeti da je ovaj karbid slabo povezan s  $M_3C$  karbidom. Pukotine između  $M_3C$  i  $Mo_2C$  karbida prikazane su na slici c)

Mo<sub>2</sub>C karbid nastaje na samom kraju skrućivanja. Budući da nastaju unutar vrlo uskih interdendritnih prostora, morfologija Mo<sub>2</sub>C karbida često je određena ostalim faza koje prije nastaju tijekom skrućivanja (slika 8.46a).

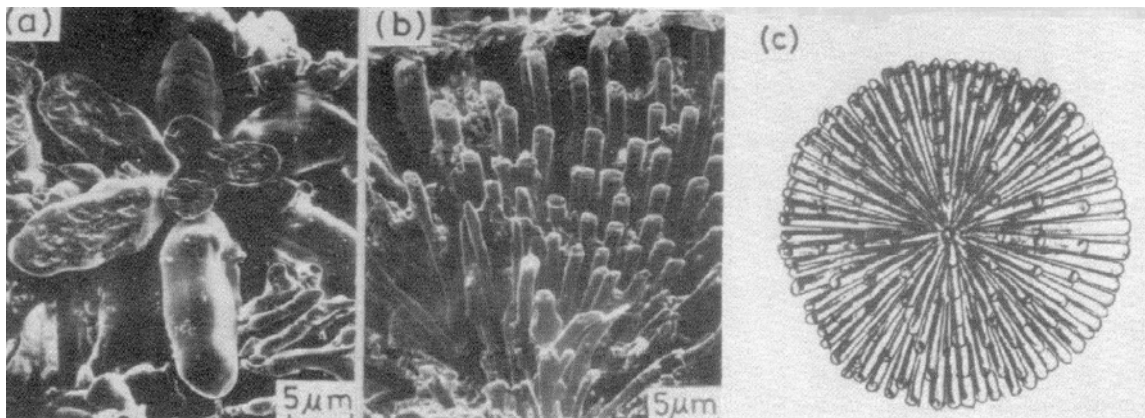
Eutektički Mo<sub>2</sub>C karbid lako se može pronaći u željeznim ljevovima otpornim na trošenje koji su legirani sa > 3,0 % molibdena. Pri niskim sadržajima, molibden se otapa u austenitnoj metalnoj osnovi i M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbidu.

Mo<sub>2</sub>C karbid uvijek se javlja u „čistom“ obliku, odnosno kao Mo<sub>2</sub>C, a ne kao miješani karbid tipa M<sub>2</sub>C.

Tvrdoća Mo<sub>2</sub>C karbida kreće se od 1500 – 1800 HV (tablica 8.15). Budući da se radi o vrlo finim interdendritnim karbidima te da su u većini željeznih ljevova otpornih na trošenje prisutni u vrlo malim količinama (volumni udio < 1,0 %), može se reći da imaju neznatan utjecaj na ukupnu tvrdoću i otpornost na trošenje željeznog lijeva.

### 8.5.5 Morfologija MC (VC) karbida

Vanadijev karbid (VC) je miješani karbid, odnosno sličan je M<sub>3</sub>C ili M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbidu. Na slici 8.47 prikazana je morfologija VC karbida.



Slika 8.47. Snimke morfologije primarnih VC karbida (a) i eutektičkih VC karbida (b) načinjene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM). Na slici (c) shematski je prikazana VC eutektička kolonija

Sa slike 8.47b i c može se vidjeti da je eutektički MC (VC) karbid načinjen od tankih, pojedinačnih štapića koji rastu iz jedne (središnje, centralne) nukleacijske točke. Zbog toga, u kombinaciji s odgovarajućom metalnom osnovom (npr. popušteni martenzit), može se dobiti željezni lijev otporan na trošenje s povišenom žilavosti.

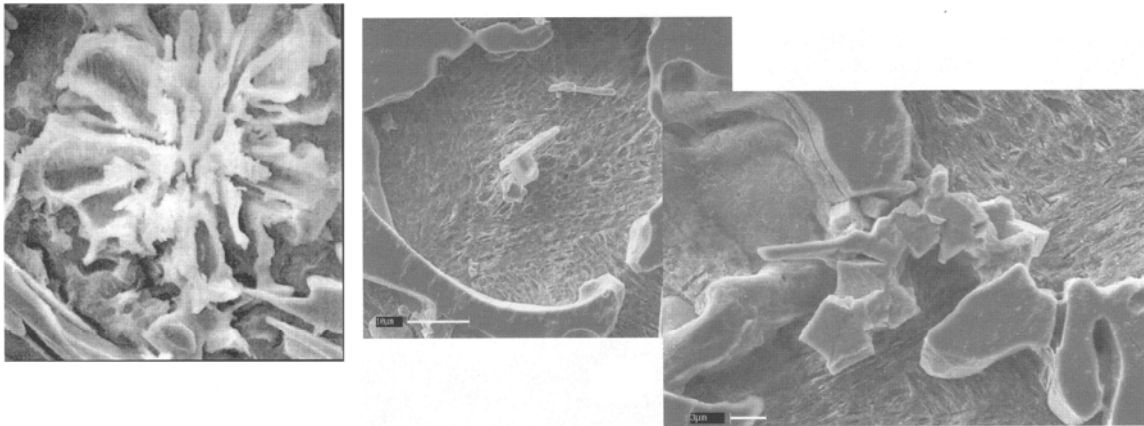
Tvrdoća MC (VC) karbida kreće se od 2000 – 3000 HV (tablica 8.15). U većini slučajeva tvrdoća ovog miješanog karbida koji nastaje eutektičkom reakcijom kreće se od 2000 – 2500 HV.

### 8.5.6 Morfologija NbC karbida

NbC karbid javlja se su u „čistom“ obliku, odnosno kao NbC, a ne kao miješani karbid MC tipa. Ima visoku tvrdoću (2000 – 2500 HV) i stabilnost.

Niobij nije topljiv ili ima vrlo nisku topljivost u ostalim fazama koje su prisutne u željeznim ljevovima otpornim na trošenje (tj.  $\gamma$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_3C$ ). Zbog toga NbC karbidi nastaju u prilično ranoj fazi skrućivanja.

Na slikama 8.48a – 8.48c prikazana je morfologija NbC karbida.



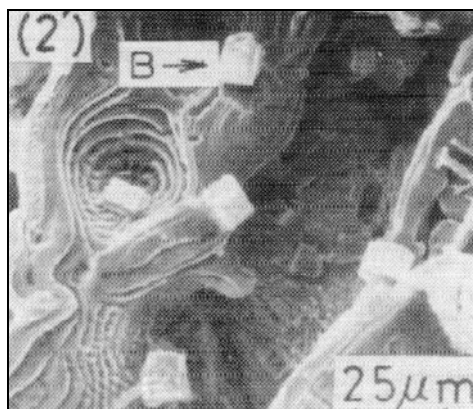
a)

b)

Slika 8.48. a), morfologija eutektičkog NbC karbida, b) morfologija primarnog NbC karbida okruženog  $M_3C$  karbidima.

### 8.5.7 Morfologija TiC karbida

Titanov karbid (TiC) je najstabilniji i najtvrdi karbid (2000 – 3000 HV). Kod željeznih ljevova otpornih na trošenje, titan se ponekad dodaje kao cjepivo. U visokokromnim željeznim ljevovima otpornim na trošenje, odmah nakon dodatka, titan stvara male, kockaste čestice TiC. Ove čestice djeluju kao nukleacijska mjesta za austenit i ostale karbide. Morfologija TiC karbida prikazana je na slici 8.49.



Slika 8.49. Snimka morfologije TiC karbida u podeutektičkom željeznom lijevu otpornom na trošenje načinjena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM).

## 8.6 Proizvodnja željeznih ljevova otpornih na trošenje

Željezni ljevovi otporni na trošenje značajno se razlikuju od uobičajenih sivih ili nodularnih ljevova. Može se reći da su znatno sličniji čelicima.

Za razliku od sivog i nodularnog lijeva, u mikrostrukturi željeznih ljevova otpornih na trošenje nije prisutan grafit. Ova glavna razlika drastično mijenja karakteristike napajanja. Volumno stezanje tijekom skrućivanja željeznih ljevova otpornih na trošenje nije kompenzirano ekspanzijom grafita kao kod sivog ili nodularnog lijeva. Zbog toga je napajanje željeznih ljevova otpornih na trošenje u velikoj mjeri slično napajanju čelika. Stezanje tijekom skrućivanja željeznih ljevova otpornih na trošenje obično iznosi 4,0 – 5,0 %.

### 8.6.1 Perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje s potpuno bijelom strukturom

Obzirom na nizak zahtjev što se tiče točnosti kemijskog sastava i metalurške kvalitete, taljenje se može provesti u bilo kojem agregatu (kupolna peć, indukcijska peć, rotacijska peć itd.). Najekonomičnije je taljenje provesti u kupolnoj peći. Uložni materijal sastoji se od čeličnog otpada, otpadnog željeznog lijeva, lijevaoničkog povrata i, ako je neizbježno, ferolegura. Koks, kao sastavni dio zasipa kupolne peći, naugljičuje taljevinu. Sumpor vezan iz koksa blagotvorno utječe na stvaranje bijele strukture.

Odljevci od perlitnih željeznih ljevova otpornih na trošenje s potpuno bijelom strukturom mogu se proizvoditi lijevanjem taljevine u trajne kalupe od sivog lijeva (odljevci manjih dimenzija i jednostavnijih oblika) i jednokratne (pješčane) kalupe.

Za izradu jednokratnih (pješčanih) kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni materijali i veziva. Pri lijevanju u pješčane kalupe potrebno je imati na umu da se mora izbjeći stvaranje grafita uslijed sporog hlađenja. Prema tome, uvjeti u kalupu moraju biti takvi da se hlađenja odvija dovoljno brzo da bi se izbjeglo stvaranje grafita. U tu svrhu korisna je primjena rashladnih tijela (hladila) u kalupima. Hladila se premazuju različitim odgovarajućim sredstvima da bi se izbjeglo njihovo izgaranje. Pri tome taljevina nije izolirana od hladila.

Uljevni sustav i pojila moraju biti pravilno dimenzionirani i smješteni da se ostvari usmjereno skrućivanje. Volumno stezanje tijekom skrućivanja kreće se od 4,0 – 5,0 %. Stezanje u krutom stanju (modelarsko stezanje) obično iznosi 1,8 – 2,0 %.

Pojila se moraju smjestiti podalje od površina kod kojih se zahtijeva visoka otpornost na trošenje, jer zbog sporijeg skrućivanja u području u kojem se nalazi pojilo može doći do stvaranja grafita. Modul pojila trebao bi biti ~ 1,2 puta veći od modula segmenta odljevka kojeg pojilo napaja. Pojilo može usporiti i usmjeriti skrućivanje u području oko sebe. Nakon završetka lijevanja taljevine u kalup, pojila bi trebalo pokriti s nekom vrstom izolirajućeg ili egzotermnog materijala da bi se održala u kontaktu s atmosferom (taljevina se iz pojila potiskuje u odljevak pod djelovanjem atmosferskog tlaka).

Prilikom rukovanja, čišćenja i završne obrade potrebno je imati na umu da su željezni ljevovi otporni na trošenje znatno krhkiji od čelika, nodularnog ili sivog lijeva. Pojila se ne smiju uklanjati plinskim rezalicama (plamenom) zbog opasnosti od stvaranja štetnih toplih pukotina. Tijekom brušenja ne smije se primijeniti previsok tlak da ne dođe do stvaranja toplih pukotina.

Perlitni željezni ljevovi otporni na trošenje ne mogu se zavarivati jer je njihova krhka struktura vrlo osjetljiva na stvaranje toplih pukotina. Tijekom zavarivanja neizbježno nastaju tople pukotina, osim u slučaju primjene vrlo visokih temperatura predgrijanja ( $> 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Visoke temperature predgrijavanja nisu praktične i povezane su sa opasnošću od grafitizacije. Može se zaključiti da se greške na odljercima ne mogu popraviti reparacijskim zavarivanjem.

Strojna obrada obično se provodi brušenjem. Glodanje i tokarenje može se provesti bez većih problema.

Bušenje malih rupa i urezivanje navoja odvija se otežano zbog problema povezanih sa uklanjanjem strugotine. Stoga se otvori moraju formirati tijekom lijevanja.

Prije strojne obrade ne provodi se žarenje u cilju smanjenja tvrdoće jer dolazi do grafitizacije bez mogućnosti naknadnog otvrdnjavanja.

### **8.6.2 Željezni ljevovi otporni na trošenje s gradijentnom strukturom**

Željezni ljevovi s gradijentnom strukturom imaju postepeni prijelaz od potpuno bijele (površinski sloj otporan na trošenje) prema sivoj (središnji dio, jezgra) strukturi. Da bi se ostvarila takva struktura zahtijeva se pažljiva kontrola kemijskog sastava, faktora koji utječu na nukleaciju grafita i intenziteta hlađenja.

Sadržaj ugljika, silicija, sumpora, mangana, fosfora te eventualno dodanog kroma i ostalih elemenata mora biti pažljivo izbalansiran i održavan unutar uskih granica. Da bi se ostvario površinski sloj s bijelom strukturom lijevanje je potrebno provesti uz primjenu hladila.

Taljevina se može izraditi u bilo kojem agregatu za taljenje koji omogućuje zahtijevanu kontrolu kemijskog sastava i nukleacijskog potencijala. Premda se ostvaruju odlični rezultati, proizvodnja ove vrste željeznih ljevova otpornih na trošenje putem kupolne peći uglavnom nije ekonomski opravda, jer su rijetki slučajevi kada su narudžbe dovoljno velike da bi se iskoristile prednosti kupolne peći.

Iz prethodno navedenih razloga, taljevina se u većini slučajeva izrađuje u indukcijskim pećima. Uložni materijal, sastavljen od sirovog željeza, povrata unutar lijevaonice, otpadnog željeznog lijeva, čeličnog otpada i ferolegura, mora imati zadovoljavajuću i konzistentnu kvalitetu.

Sklonost ka stvaranju odbjela, odnosno dubina bijelog sloja, može se odrediti lijevanjem ispitnog uzorka. Obično je to ploča visine 200 mm, dužine 100 mm i širine 20 mm koja svojom širinom naliježe na hladilo. Dubina odbjela, odnosno bijelog sloja, može se, u određenoj mjeri, prilagoditi korekcijom kemijskog sastava taljevine u loncu. Dodatkom sumpora ili kroma povećava se dubina bijelog sloja, dok dodatak FeSi (cjepivo) djeluje suprotno. Međutim, vrlo je teško korigirati taljevinu čiji kemijski sastav znatno odstupa zahtijevanog.

Lijevanje taljevine provodi se u jednokratne (pješčane) kalupe u kojima se nalaze odgovarajuća hladila. Za izradu pješčanih kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni postupci i veziva. Hladila se uvijek premazuju odgovarajućim sredstvima da bi se na njima izbjegla oštećenja nastala uslijed izgaranja, te proizvela glatka, čista i fino-zrnata površina odljevka.

Napajanje željeznih ljevova otpornih na trošenje s gradijentnom strukturom obično ne predstavlja problem, jer se površinski bijeli sloj napaja taljevinom iz središnjeg sivog sloja (sivi lijev). Središnji sloj, odnosno sivi lijev, djeluje kao pojilo i pri tome je moguće iskoristiti sve pogodnosti ovog materijala u pogledu napajanja (ekspanzija). Ako je potrebno, odgovarajuće pojilo može se smjestiti na segment odljevka koji ima strukturu sivog lijeva. Budući da se bijeli površinski sloj steže tijekom skrućivanja, dok segment odljevka sa strukturom sivog lijeva expandira, može doći do stvaranja pukotina u površinskom sloju.

Pri rukovanju i čišćenju potrebno je imati na umu da odljevci od željeznih ljevova otpornih na trošenje s gradijentnom strukturom mogu sadržavati prilično visoka unutarnja

naprezanja koja potječu od njihove karakteristične strukture. Zbog toga je potrebno izbjeći oštre udarce, dinamička opterećenja i nagle temperaturne promjene. Uklanjanje zaostalih naprezanja provodi se na temperaturama do ~600 °C.

Zavarivanje se može provesti samo na segmentu odljevka sa strukturom sivog lijeva. Ako je zavarivanje potrebno provesti u većem obimu, preporučuje se predgrijavanje cijelog odljevka na temperaturu 300 – 500 °C.

Strojna obrada segmenta odljevka sa strukturom sivog lijeva provodi se na identičan način kao i strojna obrada odljevaka od uobičajenog sivog lijeva. Ako je potrebna, strojna obrada površinskog bijelog sloja provodi se na identičan način kao i strojna obrada željeznih ljevova otpornih na trošenje s potpuno bijelom strukturom.

### **8.6.3 Ni-Hard 1 i 2 željezni ljevovi otporni na trošenje**

Kod kemijskog sastava Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje posebnu pažnju je potrebno obratiti na sadržaj ugljika, silicija te nikla i kroma.

Ni-Hard željezni ljevovi otporni na trošenje mogu se uspješno proizvoditi u kupolnim (samo kupolna peć ili u kombinaciji s indukcijskom peći – dupleks postupak), indukcijskim i rotacijskim pećima. Danas se preferira upotreba indukcijskih peći, jer omogućuju lakšu proizvodnju (precizniju kontrolu kemijskog sastava i temperature) Ni-Hard željeznih ljevova nego u kupolnoj peći.

Pri proizvodnji Ni-Hard željeznih ljevova u kupolnoj peći (najčešće s kiselim oblogom), uložni materijal (pored koksa) sastoji se od povratnog ili otpadnog Ni-Hard željeznog lijeva, čeličnog otpada (legiranog ili nelegiranog), sirovog željeza (ponekad) i ferolegura. Primjenom čeličnog otpada visokolegiranog niklom i kromom može se smanjiti potrebit dodatak ferolegura.

Tip obloge peći utječe na gubitke (odgor) pojedinih elemenata tijekom taljenja. Tijekom taljenja gubitak silicija iznosi 0,0 – 10,0 %, mangana 20,0 – 30,0 %, nikla 0,0 %, a kroma 10,0 – 15,0 %.

Sadržaj ugljika u taljevini iz kupolne peći može biti prilično visok (~ 3,3 – 3,6 %). Visok sadržaj ugljika negativno utječe na udarnu žilavost Ni-Hard željeznih ljevova. Osim toga, kod visokih sadržaja ugljika postoji opasnost od stvaranja grafita ukoliko je sadržaj silicija visok. Lijevanjem u trajne kalupe ili kalupe u kojima se nalaze hladila rješava navedene probleme. Stoga se smatra da je kupolna peć znatno pogodniji agregat za proizvodnju Ni-Hard željeznih ljevova ako se odljevci lijevaju u trajne kalupe ili kalupe u kojima se nalaze hladila nego u uobičajene pješćane kalupe.

Slijedeći problem povezan s kupolnom peći je visok sadržaj sumpora (i do ~ 0,15 %). Ovako visok sadržaj sumpora štetno djeluje na otpornost na trošenje i udarnu žilavost, a može biti uzrokom stvaranja pukotina. U takvim slučajevima potrebno je provesti odsumporavanje.

Tipični problemi povezani s visokim sadržajem ugljika, sumpora i varijacijama u sadržaju legirajućih elemenata mogu se efikasno riješiti ako se primjeni dupleks postupak, odnosno kupolna peć u kombinaciji sa indukcijskom peći. Sadržaj ugljika i legirajućih elemenata može se lako korigirati dodatkom čeličnog otpada u indukcijsku peć. Osim toga, taljevina se u indukcijskoj peći može dogrijati u cilju efikasnijeg odsumporavanja.

Pri proizvodnji Ni-Hard željeznih ljevova u indukcijskoj peći uložni materijal sastoji se od čeličnog otpada (legirani ili nelegirani), povratnog ili otpadnog Ni-Hard željeznog lijeva, eventualno bijelog sirovog željeza s niskim sadržajem silicija, sumpora i fosfora, odgovarajućih ferolegura te (ako je potrebno) sredstva za naugljčenje (npr. petrol koksa).

Dodatak otpadnog ili povratnog sivog i nodularnog lijeva može promovirati izlučivanje grafita.

Za izradu jednokratnih (pješčanih) kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni materijali i veziva.

Odljevci od Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje jednostavnih oblika mogu se proizvoditi lijevanje u kalupe s hladilima ili u trajne kalupe. Primjenom hladila postižu se visoke brzine hlađenja i finožrnata struktura. Primjena hladila pri lijevanju odljevaka od Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje pruža mogućnost da se iskoriste prednosti višeg sadržaja ugljika i silicija bez opasnosti od stvaranja grafita, čime se značajno poboljšava otpornost na trošenje. Kod visokokromnih i Ni-Hard 4 željeznih ljevova otpornih na trošenje situacija je obrnuta. Primjena hladila ne osigurava nikakve prednosti, već štetno djeluje na otpornost na trošenje.

Zbog prednosti upotrebe hladila u pogledu povećanja otpornosti na trošenje i mehaničkih svojstava Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova, često se hladilo postavlja na dio odljevka koji mora imati visoku otpornost na trošenje. Međutim, ako je hladilo postavljeno samo sa jedne strane odljevka, zbog različitih brzina hlađenja može doći do deformacije odljevka (distorzije) koju je potrebno uzeti u obzir. Ovaj problem može se riješiti adekvatnom konstrukcijom modela i hladila.

Uljevni sustav i pojila potrebno je pravilno dimenzionirati i postaviti tako da se ostvari usmjerenom skrućivanje. U tu svrhu mogu se primijeniti i mala pojedinačna hladila.

Volumno stezanje tijekom skrućivanja iznosi 4,0 – 5,0 %. Stezanje u krutom stanju (modelarsko stezanje) obično iznosi 1,0 - 2,0 % i ovisi o količini zaostalog austenita, jer austenit ima viši koeficijent stezanja od martenzita, perlita ili ferita.

Pojila se moraju smjestiti podalje od površina kod kojih se zahtijeva visoka otpornost na trošenje, jer pojila, zbog svoje mase može usporiti skrućivanje, što može rezultirati stvaranjem grafita u području ispod pojila. Modul pojila trebao bi biti ~ 1,2 puta veći od modula segmenta odljevka kojeg pojila napaja.

Kad god je moguće, potrebno je primijeniti egzotermne ili izolirajuće košuljice oko pojila, da bi se povećala njihova efikasnost i poboljšao izvadak. Nakon završetka lijevanja taljevine u kalup, pojila bi trebalo pokriti s nekom vrstom izolirajućeg ili egzotermnog materijala da bi se održala u kontaktu s atmosferom (taljevina se iz pojila potiskuje u odljevak pod djelovanjem atmosferskog tlaka). Kod velikih odljevaka moguće je i nakon prilično dugog vremenskog perioda od završetka lijevanja kroz otvoreno pojilo uliti taljevinu iz lonca, dakle osigurati dodatno napajanje.

Pojilo, zbog svoje mase, može usporiti skrućivanje, što može rezultirati stvaranjem grafita u području ispod pojila. Temperaturne razlike između pojila i tankih stjenki odljevka mogu rezultirati oštrim toplinskim naprezanjima te oštrim naprezanjima tijekom pretvorbi.

Temperature lijevanja trebaju biti što je moguće niže obzirom na tip i debljinu stjenke odljevka. Pri određivanju temperature lijevanja korisno je konzultirati dijagrama na slici 8.16.

Istresanje odljevaka iz kalupa, odnosno kontrola brzine hlađenja, ima vrlo velik utjecaj na konačna svojstva odljevaka. Brzina hlađenja trebala bi biti što je moguće niža do temperature koja leži ispod kritičnog područja u kojem se stvara martenzit, tj. do temperature  $< \sim 100$  °C. Odljevci malih dimenzija trebaju se sporo hladiti u pješčanom kalupu do temperature  $< 50$  °C. Ponekad se kompleksni odljevci smještaju u peć da bi se osiguralo kontrolirano hlađenje. Generalno rečeno, u svim slučajevima preporučuje se da se odljevci hlade u kalupu do sobne temperature, jer pretvorba u martenzit započinje na temperaturama  $\sim 230$  °C.

Uljevni sustavi i pojila odvajaju se od odljevka odlamanjem. Pri tome je potrebno obratiti pažnju da se ne zalomi odljevak. Pojila se ne smiju uklanjati plamenim (plinskim) rezalicama jer postoji opasnost od stvaranja pukotina. Prekomjerne pritiske alata za brušenje



na odljevak potrebno je izbjeći da ne dođe do pregrijanja površine i nastanka pukotina. Kompleksni odljevci mogu sadržavati značajna unutarnja naprezanja. Zbog toga, u određenim slučajevima preporučljivo je prije brušenja provesti toplinsku obradu kojom se uklanjaju zaostala naprezanja da bi se minimalizirala mogućnost nastanka toplih pukotina.

Ni-Hard 1 i 2 željezni ljevovi ne mogu se zavarivati zbog vrlo visoke osjetljivosti na stvaranje pukotina. Sukladno tome, može se zaključiti da nije moguće provesti niti reparaturno zavarivanje (popravljanje grešaka zavarivanjem).

Odljevci od Ni-Hard željeznih ljevova obično se izrađuju na konačnu dimenziju, ali mogu se i strojno obrađivati unatoč visokoj tvrdoći. Ni-Hard 2 željezni ljevovi otporni na trošenje lakše se strojno obrađuju od Ni-Hard 1 zbog nižeg volumnog udjela karbida u mikrostrukturi.

Strojna obrada Ni-Hard željeznih ljevova najčešće se provodi brušenjem. Primjenom suvremenih keramičkih alata moguće je provesti glodanje i tokarenje bez da se izgubi kvaliteta površine i točnost zbog trošenja alata.

Bušenje rupa i urezivanje navoja također je moguće primjenom suvremenih keramičkih alata. U mnogim slučajevima, rupe je moguće načiniti primjenom odgovarajućih jezgri.

#### **8.6.4 Ni-Hard 4 željezni ljevovi otporni na trošenje**

Indukcijske peći su najpogodniji agregati za izradu taljevina Ni-Hard 4 željeznih ljevova. Kupolna peć ne omogućuje potrebitu striktnu kontrolu kemijskog sastava. Međutim, kombinacijom kupolne i indukcijske peći, odnosno dupleks postupkom, može se uspješno proizvoditi taljevina Ni-Hard 4 željeznog lijeva.

Uložni materijal sastoji se od povratnog Ni-Hard željeznog lijeva (Ni-Hard 4 ili Ni-Hard 1 i 2), čeličnog otpada (legiranog ili nelegiranog), ferolegura i eventualno sirovog željeza s niskim sadržajem sumpora i fosfora. Umjesto ferolegura, potrebna količina nikla i kroma može se unijeti otpadnim legiranim čelikom. Sadržaj silicija može se povisiti dodatkom FeSi.

Za izradu jednokratnih (pješčanih) kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni materijali i veziva.

Stezanje u krutom stanju, poznato kao modelarsko stezanje, kreće se od 1,5 – 2,5 % i ovisi o količini zaostalog austenita. Pretvorba austenita u martenzit praćena je porastom volumena. Ovaj porast volumena potrebno je uzeti u obzir jer utječe na konačne dimenzije odljevka.

Sve informacije o izradi kalupa, uljevnim sustavima i napajanju Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova vrijede i za Ni-Hard 4 željezne ljevove.

Kao i kod Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova, primjenom pojedinačnih malih hladila može se ostvariti usmjereno skrućivanje. Međutim, za razliku od Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova, lijevanje u kalupe u koje su postavljena hladila ili lijevanje u trajne kalupe nije korisno kod proizvodnje odljevaka od Ni-Hard 4 željeznih ljevova. Postignuto usitnjenje zrna neće poboljšati svojstva i otpornost na trošenje.

Uklanjanje pojila i uljevnog sustava te čišćenje provodi se kao kod Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje.

Ni-Hard 4 željezni ljevovi otporni na trošenje ne mogu se zavarivati zbog vrlo visoke osjetljivosti na stvaranje pukotina. Sukladno tome, može se zaključiti da nije moguće provesti niti reparaturno zavarivanje (popravljanje grešaka zavarivanjem).

Strojna obrada Ni-Hard 4 željeznih ljevova otpornih na trošenje provodi se na identičan način kao i strojna obrada Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova otpornih na trošenje.

### **8.6.5 Visokokromni željezni ljevovi otporni na trošenje**

Široko područje kemijskih sastava u kombinaciji s različitim toplinskim obradama omogućuje dobivanje širokog spektra svojstava, odnosno optimizaciju za specifična područja primjene.

Visokokromni željezni ljevovi najčešće se proizvode u indukcijskim pećima s kiselim oblogom. Kupolna peć nije pogodan agregat za proizvodnju taljevine visokokromnih željeznih ljevova jer dolazi do visokog i nekontroliranog usvajanja ugljika zbog visokog sadržaja kroma.

Za proizvodnju visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje koriste se slijedeći uložni materijali: niskougljični čelični otpad, povratni visokokromni željezni ljev otporan na trošenje, sirovo željezo s niskim sadržajem sumpora, sredstva za naugljičavanje (eventualno), ferolegure kroma s niskim sadržajem ugljika, FeMo, ljevaonički FeSi75, metalni nikel, FeNi, bakar i ostale potrebite ferolegure.

U peć se najprije ulažu materijali koji imaju najmanju sklonost ka oksidaciji (sirovo željezo, čelični otpad, povratni materijal, legure molibdena i nikla itd.), potom materijali s nešto većom sklonosti ka oksidaciji (FeCr), da bi se na kraju dodali materijali s najvišom sklonosti ka oksidaciji (FeSi). Pri taljenju posebnu pažnju potrebno je obratiti na temperaturu i vrijeme. Što je kraće vrijeme zadržavanja u rastaljenom stanju, smanjuje se količina vezanog kisika iz zraka, troske i vatrostalne obloge peći, te količina vodika vezanog iz vlage u zraku.

Povišeni sadržaj kisika u taljevini štetno djeluje na livljivost te otpornost na trošenje pod udarnim opterećenjem. Osim što uzrokuje stvaranje mjehura, vodik može biti uzrokom spontanog pucanja i loma odljevaka.

Za izradu jednokratnih (pješčanih) kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni materijali i veziva.

Sredstva za premaz kalupa ne smiju sadržavati ugljik jer može doći do stvaranja tvrde, krte košuljice na površini odljevka. Dobri rezultati ostvaruju se primjenom premaza na bazi cirkonija.

Visokokromni željezni ljevovi osjetljivi su na stvaranje pukotina. Zbog toga je potrebno izbjegavati oštre radijuse na modelima i nagle promjene presjeka da bi se smanjila mogućnost nastanka pukotina.

Stezanje u krutom stanju, poznato kao modelarsko stezanje, kreće se od 1,3 – 2,5 % (obično se uzima 2,0 %) i u velikoj mjeri ovisi o strukturi metalne osnove. Stezanje je veće u slučaju austenitne metalne osnove nego perlitne.

Pretvorba austenita u martenzit tijekom toplinske obrade praćena je porastom volumena. Ovaj porast volumena potrebno je uzeti u obzir jer utječe na konačne dimenzije odljevka.

Za konstruiranje, odnosno dimenzioniranje uljevnih sustava i pojila mogu se primijeniti ista pravila kao kod Ni-Hard željeznih ljevova.

Kao i kod Ni-Hard željeznih ljevova te čelika, primjenom pojedinačnih manjih hladila može se ostvariti usmjereno skrućivanje. Međutim, za razliku od Ni-Hard 1 i 2 željeznih ljevova, lijevanje u kalupe u koje su postavljena hladila ili lijevanje u trajne kalupe nije korisno kod proizvodnje odljevaka od visokokromnih željeznih ljevova. Premda se primjenom hladila postiže usitnjenje zrna, otpornost na trošenje neće se poboljšati (čak se može i smanjiti).

Pri određivanju temperature lijevanja korisno je konzultirati dijagrama na slici 8.16. Likvidus temperatura prvenstveno je određena sadržajem ugljika i raste s porastom sadržaja kroma (slika 8.16).

Odljevci bi se trebali hladiti u kalupu do sobne temperature, pogotovo ako martenzit nastaje u završnim fazama hlađenja. Sporim hlađenjem u kalupu izbjegava se stvaranje pukotina.

Uklanjanje pojila i uljavnog sustava te čišćenje provodi se kao kod Ni-Hard željeznih ljevova otpornih na trošenje. Preporučljivo je prije uklanjanja pojila i brušenja provesti toplinsku obradu kojom se uklanjaju zaostala naprezanja da bi se minimalizirala mogućnost nastanka pukotina. Sukladno tome, posebnu pažnju potrebno je obratiti na odljevke s austenitnom metalnom osnovom u lijevanom stanju zbog mogućih visokih unutarnjih naprezanja.

Većina visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje ne može se zavarivati zbog vrlo visoke osjetljivosti na stvaranje pukotina. Sukladno tome, može se zaključiti da nije moguće provesti niti reparaturno zavarivanje (popravljanje grešaka zavarivanjem). Uspješno se mogu zavarivati samo visokokromni željezni ljevovi s niskim sadržajem ugljika koji su prethodno visoko predgrijani.

Odljevci od visokokromnih željeznih ljevova otpornih na trošenje uglavnom se lijevaju na konačnu dimenziju, ali mogu se i strojno obrađivati primjenom suvremenih keramičkih alata te brušenjem. Prije strojne obrade moguće je provesti omekšavajuće žarenje (žarenje u cilju smanjenja tvrdoće radi lakše strojne obrade), a nakon strojne obrade provodi se toplinska obrada kojom se povećava tvrdoća.

Postupkom žarenja kojim se smanjuje tvrdoća nastoji se ostvariti potpuno perlitna metalna osnova. Tvrdoća odljevaka u tom slučaju biti će manja od 400 HB. Pretvorba u perlit lakše se odvija u legurama koje sadrže < 20,0 % kroma i ne sadrže značajnije količine nikla ili bakra. U tom slučaju, obično je dovoljno sporo hlađenje sa 950 °C na temperaturu < 500 °C.

## 9. ČELIČNI LJEVOVI

Čelični ljevovi dijele se prema kemijskom sastavu, strukturi, načinu proizvodnje, primjeni i čistoći (sadržaju primjesa).

Prema kemijskom sastavu čelični ljev se dijeli na ugljični i legirani. Ugljični čelični ljev dijeli se prema sadržaju ugljika na niskougljični (0,05 – 0,25 % C), srednjeugljični (0,25 – 0,60 % C) i visokougljični (>0,60).

Pored ugljika, ugljični čelični ljevovi sadrže samo osnovne elemente: silicij, mangan, sumpor, fosfor. Legirani čelični ljev, pored osnovnih prethodno navedenih elemenata sadrži legirajuće elemente (krom, nikal, vanadij, volfram, mangan itd.).

Prema sadržaju legirajućih elemenata čelični ljev se dijeli na: niskolegirani (ukupni sadržaj legirajućih elemenata do 2,5 %), srednjelegirani (ukupni sadržaj legirajućih elemenata od 2,5 – 10,0 %) i visokolegirani (ukupni sadržaj legirajućih elemenata (> 10,0 %):

Prema strukturi čelični lije se dijeli na: feritni, perlitni, austenitni, martenzitni bainitni. Osim toga, struktura se može sastojati od nekoliko prethodnih konstituenata.

Prema načinu proizvodnje čelični ljev se dijeli na: čelik proizveden u konvertorima, čelik proizveden u elektrolučnim pećima, čelik proizveden u indukcijskim pećima itd.

Prema namjeni čelični ljev se dijeli na konstrukcijski, alatni te čelični ljev za posebne namjene (otporan prema habanju (Hadfieldov čelik legiran s 12,0 – 14,0 % mangana, čelici legirani kromom), vatrootporan (čelici legirani kromom), otporan prema kiselinama i lužinama (čelici legirani niklom i kromom) itd.).

Prema sadržaju primjesa čelični ljev se dijeli na: čelike trgovačke čistoće, kvalitetne čelike i visokokvalitetne čelike (plemenite).

Čelični ljevovi najčešće se proizvode u elektrolučnim pećima te u određenom opsegu u indukcijskim pećima. U indukcijskim pećima s kiselom oblogom nije moguće provesti uklanjanje sumpora i fosfora, odnosno rafinaciju, zbog čega se zahtijeva primjena indukcijskih peći s baznom oblogom. Za razliku od elektrolučnih peći, u indukcijskim pećima nije prisutno naugljičenje zbog djelovanja elektroda. Odgor elemenata tijekom taljenja u indukcijskoj peći je znatno manji nego u elektrolučnoj peći. Budući da se dobiva čelik veće kvalitete, indukcijske peći primjenjuju se u većem opsegu u ljevaonicama legiranog čeličnog lijeva.

Proizvodnja čelika u elektrolučnim pećima detaljnije se razmatra u okviru kolegija „Metalurgija željeza i čelika“. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva čelika razmatra se u okviru kolegija „Metalurgija željeza i čelika“ te „Specijalni čelici“ i „Toplinska obrada“.

Zakovitosti i postupak koji se primjenjuje pri konstrukciji (dimenzioniranju) uljevnih sustava za željezne ljevove s grafitom (sivi, nodularni i vermikularni) primjenjuju se i pri konstrukciji (dimenzioniranju) uljevnih sustava za čelike. Kod čeličnog lijeva primjenjuje se tlačni i semitlačni uljevni sustav, ovisno o konkretnim uvjetima. U okviru kolegija „Osnove lijevanja metala“ detaljnije je razmatrana konstrukcija uljevnih sustava.

Ukupno volumno stezanje čeličnog lijeva tijekom skrućivanja iznosi ~ 7,0 %. Od toga na tekuće i tjestasto stanje (od početka do kraja skrućivanja) odnosi se 4,0 – 4,5 %. Stezanje tijekom skrućivanja potrebno je nadoknaditi taljevinom iz pojila.

Tijekom skrućivanja čelika ne dolazi do izlučivanja grafita. Zbog toga se primjenjuje konvencionalno ili klasično napajanje koje se oslanja na usmjereno skrućivanje. To znači da taljevina treba najprije skrutnuti na mjestu koje je najviše udaljeno od pojila, u tzv. rubnoj zoni (najtanji dio) i skrućivati se odatle korak po korak prema pojilu koje zadnje skrućuje.

Prema tome, skrućivanje mora završiti u pojilu, a ne u odljevku. Drugim riječima, da bi se omogućilo pritjecanje rastopljenog metala iz pojila preko vrata pojila u odljevak treba se ostvariti usmjereno skrućivanje u pravcu odljevak – vrat pojila – pojilo.

Vrat pojila i pojilo treba tako dimenzionirati da njihovo vrijeme potpunog skrućivanja bude duže od vremena potrebnog za skrućivanje odljevka, odnosno da modul pojila bude nešto veći od modula odljevka ili dijela odljevka što ga napaja:

$$M_o < M_v > M_p \quad (9.1)$$

gdje je:  $M_o$  – modul odljevka ili dijela odljevka kojeg pojilo napaja,  $M_v$  – modul vrata pojila,  $M_p$  – modul pojila.

Iskustvo je pokazalo da modula vrata pojila treba biti 10,0 % veći od modula odljevka ili dijela odljevka kojeg pojilo napaja, a modul pojila 10,0 % veći od modula vrata pojila:

$$M_o : M_v : M_p = 1,0 : 1,1 : 1,2 \quad (9.2)$$

Potrebit broj pojila ovisi o konfiguraciji odljevka. Ako su dva deblja segmenta odljevka odijeljena tanjim segmentom neće se moći ostvariti usmjereno skrućivanje, tj. svaki deblji segment u tom slučaju treba napajati iz zasebnog pojila. To znači da je odljevak potrebno detaljno analizirati te kod kompleksnih odljevaka konstruirati kumulativni dijagram. Odljevak se podijeli u jednostavne geometrijske oblike i za svaki segment računa se modul i volumni udio (udio u ukupnom volumenu odljevka). Postupak je detaljno objašnjen u okviru napajanja odljevaka od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva.

Sustav napajanja mora ispuniti i tzv. uvjet zasićenja. To znači da se svaka točka u odljevku mora nalaziti u zoni napajanja (djelovanja) jednog od pojila.

Kod napajanja čeličnih odljevaka primjenjuju se pojila različitih oblika i dimenzija: pojila u obliku valjka čiji je promjer (D) jednak visini (H), pojila u obliku valjka čija je visina (H) 1,5 puta veća od promjera (D), pojila čiji horizontalni presjek ima oblik elipse itd.

Pri napajanju odljevaka od čelika primjenjuju se otvorena (sa ili bez egzotermne, odnosno izolirajuće obloge) i zatvorena pojila. Primjenom egzotermnih pojila ostvaruje se iskorištenje pojila od ~ 30,0 %, dok je iskorištenje klasičnih pojila ~ 14,0 %. Vrijeme skrućivanja egzotermnih pojila obično je dva puta duže od vremena skrućivanja klasičnih pojila. Modul egzotermnog pojila je za ~ 1,41 puta veći od modula klasičnog pojila jednakih dimenzija, što omogućuje upotrebu manjeg pojila ako se upotrijebi egzotermna košuljica na pojilu, uz zadržavanje istog potrebitog modula pojila koji je određen na osnovi modula odljevka ili segmenta odljevka kojeg to pojilo napaja.

Često je radi usmjerenog skrućivanja potrebno smanjiti modul jednog dijela odljevka s vrijednosti  $M_o$  na manju tj. reduciranu vrijednost  $M_R$ , pa se na takvim mjestima u kalup ugrađuju hladila koja oduzimaju dio topline od taljevine u kalupu. Hladila time lokalno mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka, pa se na tom mjestu formira umjetna rubna, odnosno krajnja zona odljevka (mjesto na kojem započinje skrućivanje). Na taj način se s velikom sigurnošću može postići usmjereno skrućivanje odljevka u smjeru prema pojilu (pojilima). Dimenzioniranje pojila i hladila pri lijevanju čeličnih ljevova detaljnije je razmatrano u okviru kolegija „Osnove lijevanja metala“.