

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

izv. prof. dr. sc. Zoran Glavaš

OSNOVE LIJEVANJA
METALA

Sisak, 2014.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OSNOVNI POJMOVI U LJEVARSTVU	2
3. POVIJEST LJEVARSTVA	5
4. LJEVARSKE SLITINE	20
4.1 Ljevarske slitine na osnovi željeza	20
4.1.1 Čelični ljevovi	21
4.1.1.1 Ugljični (nelegirani) čelični ljevovi	23
4.1.1.2 Niskolegirani čelični ljevovi	24
4.1.1.3 Visokolegirani čelični ljevovi	27
4.1.2 Željezni ljevovi	29
4.1.2.1 Željezni ljevovi s grafitom	30
4.1.2.1.1 Sivi lijev	31
4.1.2.1.2 Nodularni lijev	32
4.1.2.1.3 Vermikularni lijev	35
4.1.2.1.4 Temperirani lijev	37
4.1.2.2 Željezni ljevovi bez grafita	39
4.1.2.2.1 Željezni ljevovi s gradijentnom strukturom i perlitni bijeli željezni ljevovi	40
4.1.2.2.2 Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi sa M_3C karbidima (Ni-Hard 1, 2 i 3)	41
4.1.2.2.3 Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi sa M_7C_3 karbidima (Ni-Hard 4)	41
4.1.2.2.4 Visokokromni bijeli željezni ljevovi	42

4.2	Ljevarske slitine na osnovi obojenih metala	43
4.2.1	Ljevovi na osnovi aluminija	43
4.2.2	Ljevovi na osnovi bakra	47
4.2.3	Ljevovi na osnovi cinka	49
4.2.4	Ljevovi na osnovi magnezija	49
5.	PROCES PROIZVODNJE ODLJEVAKA I ODJELI U LJEVAONICI	50
6.	PROIZVODNJA TALINE	53
6.1	Kupolne peći	53
6.2	Indukcijske peći	58
6.2.1	Indukcijske peći s loncem	59
6.2.2	Kanalne indukcijske peći	63
6.3	Elektrolučne peći	64
6.4	Plamene i šahtne peći	72
6.5	Lončaste peći	76
7.	ULJEVNI SUSTAVI	78
7.1	Osnovne komponente uljevnog sustava	80
7.2	Vrste uljevnih sustava	84
7.3	Dimenzioniranje uljevnog sustava	88
7.3.1	Primjena Bernoullijeve jednadžbe	88
7.3.2	Primjena zakona o kontinuitetu strujanja	90
7.3.3	Učinci momenta	92
7.3.4	Vrijeme lijevanja odljevaka	95
7.3.5	Dimenzioniranje kritičnog presjeka	97
7.4	Uljevni sustavi u kalupima s vertikalnom diobenom ravninom	99

7.5	Primjena keramičkih filtara u uljevnim sustavima	102
7.6	Primjena programskih paketa za simulaciju punjenja kalupa	106
8.	NAPAJANJE ODLJEVAKA	107
8.1	Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka	107
8.2	Utjecaj načina skrućivanja odljevka na mogućnost napajanja	110
8.2.1	Progresivno i usmjereno skrućivanje	111
8.2.2	Način skrućivanja slitine	112
8.3	Dimenzioniranje pojila	116
8.3.1	Dimenzioniranje pojila na osnovi modula odljevka	116
8.3.1.1	Izračunavanje modula	121
8.3.2	Dimenzioniranje pojila Heuversovom metodom upisanih kružnica	123
8.4	Zona djelovanja napajanja	124
8.5	Pojila i vrat pojila	130
8.6	Povećanje efikasnosti pojila egzotermnim i izolirajućim sredstvima	133
8.7	Primjena hladila	136
8.8	Napajanje odljevaka od željeznih ljevova s grafitom	140
9.	ANALIZA I RAZRADA NACRTA ODLJEVKA	143
9.1	Analiza konstrukcije odljevka s gledišta tehnologije lijevanja	143
9.2	Razrada nacrtu odljevka	148
9.2.1	Određivanje položaja odljevka u kalupu pri izradi kalupa i lijevanju	149
9.2.2	Određivanje diobene ravnine kalupa i modela	150
9.2.3	Određivanje dodatka radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka	151
9.2.4	Određivanje dodatka radi strojne obrade odljevka	151
9.2.5	Određivanje dodatka radi lakšeg uklanjanja modela iz kalupa	152

9.2.6	Određivanje broja jezgri i veličine jezgrenih oslonaca	152
9.2.7	Definiranje sustava ulijevanja i napajanja i njihovog položaja u kalupu	154
9.2.8	Određivanje sustava odzračivanja kalupa	154
10.	PREGLED POSTUPAKA PROIZVODNJE ODLJEVAKA	155
11.	PROIZVODNJA ODLJEVAKA U JEDNOKRATNIM KALUPIMA	158
11.1	Modeli	158
11.1.1	Vrste modela	158
11.1.2	Dodatci modelu	164
11.2	Jezgrenici	167
11.3	Vrste jednokratnih kalupa	168
11.4	Jednokratni kalupi od svježe kalupne mješavine	169
11.4.1	Ljevaonički pijesci	169
11.4.1.1	Vrste ljevaoničkih pijesaka prema udjelu osnovnog minerala	170
11.4.1.2	Svojstva ljevaoničkih pijesaka	172
11.4.2	Kaluparske gline	174
11.4.2.1	Minerali glina	174
11.4.2.2	Struktura i svojstva glina	176
11.4.3	Aditivi	179
11.4.4	Priprema svježe kalupne mješavine	180
11.4.5	Svojstva svježe kalupne mješavine	183
11.4.6	Princip izrade jednokratnog kalupa od svježe kalupne mješavine	187
11.4.7	Strojevi za izradu kalupa od svježe kalupne mješavine	189
11.4.7.1	Prva generacija kalupilica	189
11.4.7.2	Druga generacija kalupilica	191

11.4.8	Istresanje odljevaka iz kalupa	195
11.4.9	Priprema korištene svježe kalupne mješavine za ponovnu upotrebu	196
11.4.9.1	Hlađenje korištene svježe kalupne mješavine	197
11.4.9.2	Uklanjanje metala i prosijavanje korištene svježe kalupne mješavine	199
11.5	Jednokratni kalupi od kemijski vezanih mješavina	199
11.5.1	Vrste kemijski vezanih mješavina za izradu jednokratnih kalupa	199
11.5.2	Priprema kemijski vezanih mješavina	206
11.5.3	Izrada kalupa od kemijski vezanih mješavina	207
11.5.4	Vatrostalne premazi u kalupima od kemijski vezanih mješavina	208
11.6	Jednokratni školjkasti kalupi	208
11.6.1	Izrada školjkastih kalupa Croning postupkom	208
11.6.2	Izrada školjkastih kalupa za precizni lijev	210
11.6.3	Izrada školjkastih kalupa za protugravitacijsko lijevanje pod niskim tlakom	211
11.6.4	Izrada školjkastih kalupa za Replicast postupak	212
11.7	Jednokratni kalupi izrađeni od suspenzije gipsa ili keramičkih suspenzija	213
11.7.1	Kalupi od gipsa	213
11.7.2	Keramički kalupi	214
11.8	Jednokratni kalupi izrađeni od ljevaoničkog pijeska bez primjene veziva	217
11.8.1	Izrada kalupa za postupak lijevanja sa isparljivim pjenastim modelom	217
11.8.2	Magnetsko kalupljenje	219
11.8.3	Vakuumsko kalupljenje	220
11.9	Lijevanje taline u jednokratne kalupe	221
11.9.1	Ljevarski lonci	222
11.9.2	Automatski uređaji za lijevanje	225

11.10	Čišćenje odljevaka odlivenih u jednokratne kalupe	227
11.11	Regeneracija ljevaoničkog pijeska	230
11.11.1	Mokra regeneracija	231
11.11.2	Suha regeneracija	231
11.11.3	Toplinska regeneracija	234
12.	IZRADA JEDNOKRATNIH JEZGRI	236
12.1	Jezgrene mješavine i postupci izrade jezgri	237
12.1.1	Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima	237
12.1.2	Postupci izrade jezgri u vrućim i toplim jezgrenicima	242
12.1.3	Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima uz naknadno pečenje jezgri	245
12.2	Premazi za jezgre	245
12.3	Sredstva za razdvajanje jezgre od jezgrenika	246
13.	PROIZVODNJA ODLJEVAKA U TRAJNIM KALUPIMA	247
13.1	Gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe	248
13.2	Niskotlačno lijevanje u trajne kalupe	249
13.2.1	Konvencionalno niskotlačno lijevanje u trajne kalupe	249
13.2.2	Protutlačno lijevanje u trajne kalupe	250
13.2.3	Vakuumsko niskotlačno lijevanje u trajne kalupe	252
13.3	Visokotlačno lijevanje u trajne kalupe	252
13.3.1	Konvencionalno visokotlačno lijevanje	253
13.3.1.1	Uređaji za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom	253
13.3.1.2	Uređaji za visokotlačno lijevanje s vrućom uljevnom komorom	255
13.3.1.3	Nedostaci konvencionalnog visokotlačnog lijevanja	256

13.3.2	Vakuumsko visokotlačno lijevanje	257
13.3.3	Lijevanje tiskanjem	258
13.3.3.1	Lijevanje direktnim tiskanjem	261
13.3.3.2	Lijevanje indirektnim tiskanjem	262
13.3.3.3	Lijevanje lokalnim tiskanjem	264
13.3.3.4	Prednosti i nedostaci postupka lijevanja tiskanjem	265
13.3.4	Lijevanje u djelomično rastaljenom stanju	265
13.3.4.1	Tiksolijevanje	268
13.3.4.2	Reolijevanje	271
13.3.4.3	Tiksooblikovanje	277
14.	PROIZVODNJA ODLJEVAKA CENTRIFUGALNIM LIJEVANJEM	278
14.1	Pravo centrifugalno lijevanje	279
14.2	Polucentrifugalno lijevanje	282
14.3	Lijevanje centrifugiranjem	283
15.	LITERATURA	284

1. UVOD

Lijevanje je jedan od najstarijih postupaka poznatih čovječanstvu za oblikovanje metala. To je vrlo izravna metoda proizvodnje metalnih komponenti koja uključuje ulijevanje rastaljenog metala u šupljinu odgovarajućih dimenzija i oblika formiranu u kalupu i potom skrućivanje rastaljenog metala čime se dobiva komponenta željenog oblika u krutom obliku. Premda je lijevanje postupak čiji su osnovni principi od najstarijih dana ostali isti, to je i danas vrlo konkurentan proizvodni proces budući je po svojim karakteristikama jedan od najefikasnijih načina proizvodnje metalnih predmeta različitih veličina i kompleksnosti uz mogućnost izrade replika i reciklaže.

Lijevanje je jedina proizvodna tehnika sposobna da proizvede metalne predmete kompleksnih oblika u jednoj operaciji. Fleksibilnost postupka lijevanja omogućuje primjenu kompleksnih dizajnerskih pristupa koji nisu mogući u ostalim visokoproduktivnim procesima. Dizajnerska sloboda koju pruža postupak lijevanja omogućuje izradu cjelovite komponente koja bi se drugim tehnikama morala izraditi iz više dijelova i potom spojiti u jedan. Kako se kontrola procesa lijevanja poboljšava, povećava se kompleksnost oblika koji se mogu proizvesti procesom lijevanja, a kvaliteta tih predmeta je značajno pospješana.

Općenito gledajući, proizvode dobivene lijevanjem metala možemo svrstati u dvije skupine. Prvu skupinu čine odljevci, tj. predmeti izrađeni lijevanjem koji imaju gotovo identičan oblik njihovom konačnom obliku i konstruirani su za upotrebu u tom obliku, što znači da ne zahtijevaju naknadno preoblikovanje u krutom stanju. Završne operacije na odljercima često su minimalne i uglavnom uključuju manji opseg strojne obrade, bušenje manjih provrta itd., ali oblik dobiven lijevanjem je konačni oblik predmeta. Odljevci se proizvode u ljevaonicama.

Drugu skupinu proizvoda dobivenih lijevanjem čine proizvodi jednostavne geometrije koji su namijenjeni za daljnju plastičnu preradu u krutom stanju pomoću valjanja, kovanja itd. Obzirom da lijevani oblik nije konačni oblik predmeta, nazivaju se lijevanim poluproizvodima. Najbolji primjer za to su poluproizvodi kvadratnog, pravokutnog ili kružnog poprečnog presjeka koji se lijevaju od čelika u čeličanama i potom se najčešće valjanjem prerađuju u gotove proizvode, kao što su limovi, trake, cijevi, razni konstrukcijski profili, šipke, žica itd. Poluproizvodi od čelika mogu biti relativno malih dimenzija na poprečnom presjeku, npr. 100 x 100 mm u slučaju kvadratnog poprečnog presjeka, ali i vrlo velikih dimenzija, npr. širina lijevanih poluproizvoda pravokutnog poprečnog presjeka može biti veća od 2000 mm. Dužina takvih poluproizvoda iznosi nekoliko metara. U proizvodnji aluminijskih limova, traka itd. također se upotrebljavaju lijevani aluminijski poluproizvodi.

Gledano na masu, lijevani poluproizvodi namijenjeni za daljnju plastičnu preradu znatno su više zastupljeni od odljevaka. Proizvodnja odljevaka u svijet u 2012. godini iznosila je 100,8 mil. t, a svjetska proizvodnja čeličnih poluproizvoda bila je ~ 15 puta veća i iznosila je 1,548 Mt [1, 2]. U okviru ovog predmeta isključivo ćemo se baviti osnovama proizvodnje metalnih odljevaka, odnosno ljevarstvom. Proizvodnja lijevanih poluproizvoda za daljnju plastičnu preradu izučavat će se u okviru drugih predmeta.

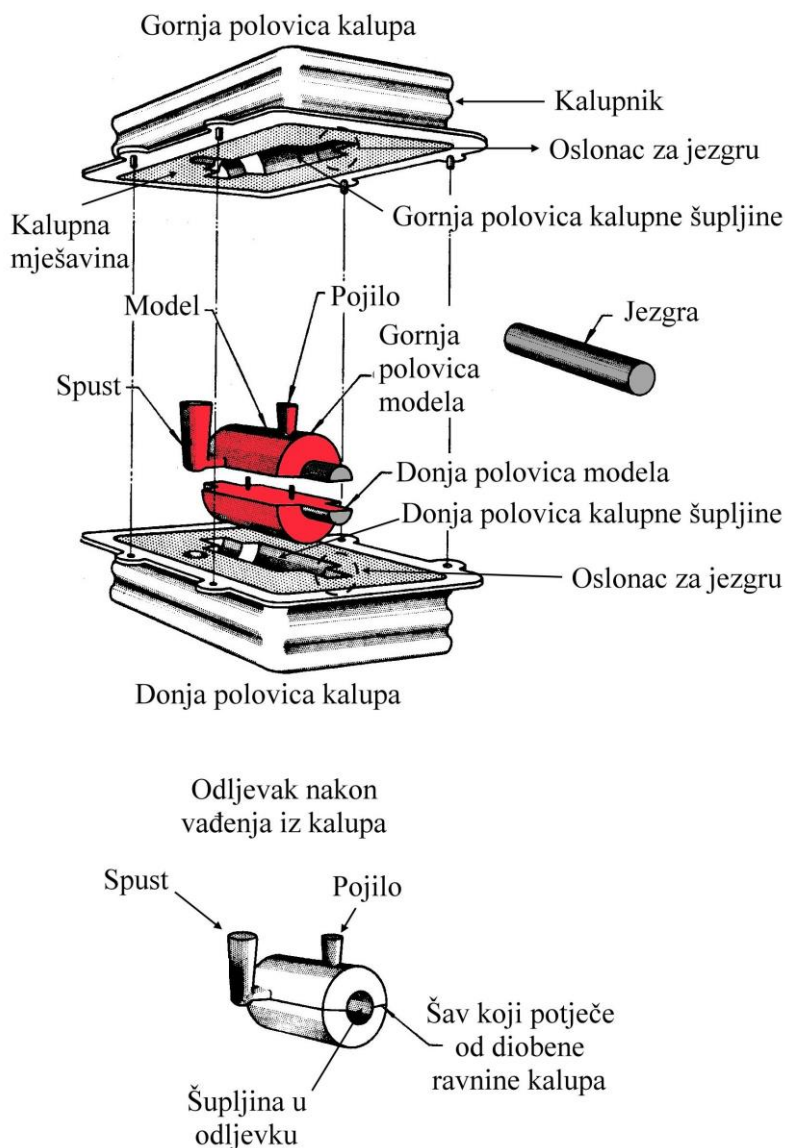
Najveći proizvođač odljevaka u svijetu u 2012. godini bila je Kina sa proizvodnjom od 42,5 mil. t, što predstavlja 42,1 % ukupne svjetske proizvodnje odljevaka [1]. U 10 najvećih proizvođača odljevaka u 2012. godini uz Kinu ubrajaju se SAD sa proizvodnjom od 12,8 mil. t, a potom Indija (9,3 mil. t), Japan (5,3 mil. t), Njemačka (5,2 mil. t), Rusija (4,3 mil. t), Brazil (2,8 mil. t), Koreja (2,4 mil. t), Italija (1,9 mil. t) i Francuska (1,8 mil. t) [1].

Tipična područja primjene odljevaka su: infrastruktura i strukturne komponente, sustavi za distribuciju vode (cijevi, pumpe, ventili itd.), komponente za motorna vozila (blokovi i glave motora, dijelovi kočnica, komponente upravljačkog mehanizma i ovjesa, naplatci itd.), nakit, naoružanje, strojogradnja itd.

2. OSNOVNI POJMOVI U LJEVARSTVU

Danas postoji veći broj različitih postupaka proizvodnje metalnih odljevaka lijevanjem. Međutim, pojedini pojmovi su zajednički i potrebno ih je objasniti.

Praktički, kod svih metala nakon taljenja u odgovarajućim pećima slijedi proces lijevanja. Tekući metal, tj. **talina** (engl. *Melt*) dobivena taljenjem lijeva se u **kalupnu šupljinu** (engl. *Molding Cavity*) koja odgovara obliku predmeta koji se proizvodi, a nalazi se u **kalupu** (engl. *Mold*) (slika 2.1). Nakon skrućivanja tekućeg metala u kalupu, točnije rečeno u kalupnoj šupljini, dobiva se gotov proizvod željenog oblika, koji se u ljevarstvu naziva **odljevak** (engl. *Casting*). Metal od kojeg je odliven odljevak naziva se **lijev**. Razlikuju se dvije velike skupine ljevova: ljevovi na osnovi željeza (koji se dalje dijele prema udjelu ugljika na čelične i željezne ljevove) i ljevovi na osnovi obojenih metala, tj. neželjezni ljevovi (npr. ljevovi na osnovi aluminija, ljevovi na osnovi bakra, ljevovi na osnovi magnezija itd.). Može se zaključiti da su ljevovi koji se upotrebljavaju u praksi za proizvodnju odljevaka zapravo **ljevarske slitine** (engl. *Casting Alloys*), a ne čisti metali.



Slika 2.1. Glavne komponente jednokratnog pješčanog kalupa [3]

Kalupi mogu biti za jednokratnu ili višekratnu upotrebu, ovisno o materijalu od kojeg su napravljeni. **Jednokratni kalupi** (engl. *Expendable Molds*) izrađuju se od **kalupnih mješavina** (engl. *Molding Medium*), čiju osnovu čini ljevaonički pijesak i vezivo. Najčešće se radi o svježoj kalupnoj mješavini (engl. *Green Sand*) kod koje se posebna vrsta gline upotrebljava kao vezivo. Sve širu primjenu danas imaju i kemijski vezane mješavine kod kojih se povezivanje zrna ljevaoničkog pijeska ostvaruje kemijskom reakcijom između različitih anorganskih ili organskih veziva i plinovitog ili tekućeg katalizatora. Nakon skrućivanja tekućeg metala i hlađenja, jednokratni kalup se ruši i iz njega se vadi odljevak. **Višekratni (ili trajni) kalupi** (engl. *Permanent Molds, Dies*) najčešće se izrađuju od metala i mogu se primjenjivati veliki broj puta.

Kalupna šupljina u jednokratnim kalupima izrađuje se tako da se kalupna mješavina nanosi na **model odljevka** (engl. *Pattern*) oko kojeg je postavljen metalni okvir koji se naziva **kalupnik** (engl. *Flask*). Kalupnik je metalni okvir koji nosi masu kalupne mješavine i omogućuje točno sastavljanje dijelova kalupa. Kalupnom mješavinom popunjava se kalupnik do gornjeg ruba. Modeli odljevka mogu biti trajni (engl. *Permanent Patterns*) ili jednokratni (engl. *Expendable Patterns*). Trajni modeli obično se izrađuju u dva dijela da bi se omogućilo njihovo uklanjanje iz kalupa, nakon čega u kalupu ostaje kalupna šupljina odgovarajućeg oblika. Mogu biti izrađeni i u jednom komadu ako su jednostavnog oblika koji omogućuje neometano izvlačenje iz kalupa. To su rijetki slučajevi jer je većina odljevaka kompleksnog oblika tako da se čitav model ne može ukloniti iz kalupa. Ako odljevak ima izbočine u dvije ili više ravnina, model će imati više od dva dijela. U višekratnim kalupima, kalupna šupljina izrađuje se strojnom obradom zbog čega nije potreban model odljevka.

Ako se upotrebljava trajni model, jednokratni kalup u tom se slučaju izrađuje od više dijelova. Najčešća izvedba sastoji se od dva dijela, jer se većina modela sastoji od dva dijela. Takva izvedba je pogodna i za modele izrađene u jednom komadu. Kod dvodijelnog kalupa za izradu gornjeg dijela kalupa, tj. gornjaka (engl. *Cope*) upotrebljava se gornji dio modela, dok se za izradu donjeg dijela kalupa, tj. donjaka (engl. *Drag*) upotrebljava donji dio modela. Nakon uklanjanja gornjeg i donjeg dijela modela kalup se sastavlja, tj. gornji dio kalupa stavlja se na donji dio kalupa i međusobno se spajaju. Spoj gornjeg i donjeg dijela kalupa naziva se **diobena ravnina kalupa** (engl. *Parting Line*). U ovom slučaju radi se o horizontalnoj diobenoj ravnini. Jednokratni kalupi mogu imati i vertikalnu diobenu ravninu, što znači da se sastoje od lijeve i desne polovica kalupa. Kalup će imati više od jedne diobene ravnine ako model ima izbočine u dvije ili više ravnina, tj. sastoji se od tri ili više dijelova.

Višekratni kalupi također se sastoje od dva dijela, da bi se odljevak nakon skrućivanja mogao izvaditi iz kalupa. Ti kalupi mogu imati horizontalnu ili vertikalnu diobenu ravninu.

Jednokratni modeli ne uklanjaju se iz kalupa prije ulijevanja tekućeg metala. Oni se tale ili isparavaju u kontaktu s tekućim metalom. Zbog toga se kalup može izraditi u jednom komadu.

Otvori, odnosno šupljine u odljevku formiraju se pomoću **jezgri** (engl. *Cores*). Jezgre se izrađuju u **jezgrenicima** (engl. *Core Box*), dakle odvojeno od kalupa. Jezgrenik se izrađuje od drveta ili metala i sastoji se od dva dijela da bi se jezgra mogla izvaditi iz njega. Šupljina u jezgreniku, koja odgovara obliku jezgre, izrađuje se strojnom obradom. Za jednokratne kalupe jezgre se izrađuju od jezgrenih mješavina, čiju osnovu čini ljevaonički pijesak i vezivo, dok se za višekratne kalupe upotrebljavaju jezgre načinjene od metala ili jezgrenih mješavina. Gotove jezgre stavljaju se na odgovarajuća mjesta u kalupu i tako zauzimaju dio kalupne šupljine na mjestu gdje treba biti šupljina u odljevku. Mjesta na kojima se jezgra oslanja na kalup nazivaju se **jezgreci oslonci** (engl. *Core Print*).

Mreža kanala u kalupu kroz koje tekući metal dolazi do kalupne šupljine naziva se **uljevni sustav** (engl. *Gating System*). Uljevni sustav sastoji se od nekoliko komponenti (uljevna čaša, spust, razvodnik, ušća) koje moraju biti točno i racionalno dimenzionirane.

Budući da je vezan za odljevak, uljevni sustav odstranjuje se sa odljevka nakon vađenja iz kalupa.

Tijekom skrućivanja ljevarskih slitina u kalupu dolazi do smanjenje njihovog volumena tj. volumnog stezanja, jer je gustoća tekućeg stanja (tj. taline) manja od gustoće krutog stanja (tj. skrutnutog odljevka). Zbog toga nastaju šupljine u odljevku na mjestima gdje završava skrućivanje. Te šupljine nazivaju se **usahline** (engl. *Shrinkage Cavity*). Usahline u odljevku mogu se izbjeći **napajanjem** (engl. *Feeding*), što znači da tijekom skrućivanja odljevka u kalupnoj šupljini treba dovesti manjak metala koji je nastao zbog razlike u gustoći između tekućeg i krutog stanja metala. Tu funkciju obavlja **pojilo** (engl. *Riser*), tj. dio koji je priliven uz odljevak i dimenzioniran tako da skrućuje kasnije od odljevka da bi mogao napajati odljevak. Ako je pojilo pravilno dimenzionirano, usahlina nastala zbog volumnog stezanja ljevarske slitine tijekom skrućivanja neće se nalaziti u odljevku već u pojilu. Pojilo se odstranjuje sa odljevka nakon vađenja iz kalupa.

Ulijevanje taline u kalup može se odvijati gravitacijski, pod niskim ili visokim tlakom. Prema tome, razlikuje se **gravitacijsko** (engl. *Gravity Casting*), **niskotlačno** (engl. *Low-Pressure Casting*) i **visokotlačno lijevanje** (engl. *High-Pressure Casting*). Lijevanje u jednokratne kalupe provodi se gravitacijski, dok se lijevanje u višekratne kalupe može provodi na sva tri navedena načina.

3. POVIJEST LJEVARSTVA

Najstariji predmeti izrađeni od metala, kao što je poznato, stariji su više od 10 000 godina i bili su kovani, a ne lijevani. To su bili mali dekorativni predmeti kovani od samorodnog zlata i bakra [4].

Lijevanje metala je pretpovijesna tehnologija. Međutim, do danas nije točno poznato kada se započelo sa lijevanjem metala, ali čini se relativno rano prema arheološkim zapisima. Period u kojem započinje izučavanje i usvajanje metala arheolozi nazivaju Kalkolitik (grčki: *khalkos* + *lithos* – „bakreni kamen“). Taj period, koji je neposredno prethodio Brončanom dobu, datira između 5000 i 3000 g. p. n. e (tablica 3.1) [4].

Tablica 3.1. Kronološka lista razvoja u primjeni materijala [4]

Razdoblje	Razvoj	Lokacija
9000. g. p. n. e.	Najraniji metalni objekti od kovkog samorodnog bakra	Bliski istok
6500. g. p. n. e.	Najstarije statue u prirodnoj veličini načinjene od gipsa	Jordan
5000. – 3000. g. p. n. e.	Kalkolitik period: taljenje bakra, eksperimentiranje s pretaljivanjem	Bliski istok
3000. – 1500. g. p. n. e.	Brončano doba: arsenska i kositrena bronca	Bliski istok
3000. – 2500. g. p. n. e.	Lijevanje malih predmeta postupkom sa istaljivim (voštanim) modelima	Bliski istok
2500. g. p. n. e.	Granulacija zlata i srebra i njihovih slitina	Bliski istok
2400. – 2200. g. p. n. e.	Bakrena statua faraona Pepija I	Egipat
2000. g. p. n. e.	Brončano doba	Daleki istok
1500. g. p. n. e.	Željezno doba (kovko željezo)	Bliski istok
600. g. p. n. e.	Lijevano željezo	Kina
224. g. p. n. e.	Uništen Kolos s Rodosa	Grčka
200. – 300. g.	Primjena žive za pozlaćivanje	Rim
1200. – 1450. g.	Početak primjene lijevanog željeza (točno vrijeme i mjesto nije poznato)	Europa
~ 1122. g.	Prva monografija o obradi (preradi) metala - Theophilus: <i>On Divers Arts</i>	Njemačka
1252. g.	Veliki Buda – kip: visina 13,35 m, materijal: bronca	Japan
~ 1400. g.	Veliko zvono, Beijing	Kina
16. stoljeće	Uveden pijesak kao materijal za izradu kalupa	Francuska
1709. g.	Lijevano željezo proizvedeno uz primjenu koksa	Engleska
1735. g.	Veliko zvono: materijal bronca, masa 216 t, visina 6,14 m, promjer 6,6 m	Rusija
1740. g.	Benjamin Huntsman razvio lijevani čelik	Engleska
1779. g.	Lijevano željezo upotrijebljeno kao građevni materijal, željezni most Gorge preko rijeke Severn	Engleska
1826. g.	Kipovi od cinka	Francuska
1838. g.	Elektrolitsko nanošenje bakra	Rusija, Engleska
1884. g.	Elektrolitska rafinacija aluminija	SAD, Francuska

Razvoj ljevarstva i primjena metalnih odljevaka konstantno napreduje od svojih ranih početaka (tablica 3.2) [5].

Tablica 3.2. Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

Prije nove ere	
9000. g. p. n. e.	Najraniji metalni objekti od kovkog samorodnog bakra načinjeni na Bliskom istoku.
3200. g. p. n. e.	Najstariji postojeći odljevak - žaba odlivena od bakra u Mezopotamiji (slika 3.1a).
3000. g. p. n. e.	Lijevanje alata i oružja od bronce u trajne kamene kalupe.
3000. – 2500. g. p. n. e.	Lijevanje malih predmeta postupkom sa istaljivim (voštanim) modelima na Bliskom istoku.
2400. – 2200. g. p. n. e.	Bakrena statua faraona Pepija I (Slika 3.1b).
1500. g. p. n. e.	Otkriveno kovko željezo na Bliskom istoku.
600. g. p. n. e.	Odliven prvi predmet od lijevanog željeza (tronožac - masa 270 kg) u Kini.
233. g. p. n. e.	Lijevanje plugova od lijevanog željeza.
200. g. p. n. e.	Najstariji postojeći odljevci od lijevanog željeza načinjeni tijekom Han dinastije.
Nova era	
500. g.	Proizvodnja lijevanog čelika u lončastim pećima u Indiji.
1200. g.	Ljevači sa područja današnje Europe izrađuju kalupe od ilovače za lijevanje zvona za katedrale.
1252. g.	Divovska statua, Veliki Buda (Kamakura, Japan) odliven od kositrene bronce s visokim udjelom olova (slika 3.2). Projekt započet oko 700-te godine. Sama glava statue teži 140 t.
1313. g.	Prvi top od bronce odlio monarh iz grada Ghent (Belgija).
Oko 1400. g.	Tijekom opsade Konstantinopolisa teški topovi lijevani su od bronce na licu mjesta, praktički ispod zidina opsjednutog grada. Pokretni, lijevani simboli (slova) od olova za tiskarske strojeve revolucionirali su svjetske metode komunikacije.
1480. g.	Rođen Vannoccio Biringuccio (1480 – 1539 g.), prvi istinski ljevač i „otac industrije lijevanja metala“ (ljevač u Vatikanu). Njegovo djelo „ <i>De La Pirotechnia</i> “ je prvi napisani dokument o praksi lijevanja metala.
Oko 1500. g.	Pijesak je uveden kao materijal za izradu kalupa u Francuskoj.
1586. g.	Odliven top s najvećim kalibrom na svijetu – kalibar 890 mm, vanjski promjer cijevi 1200 mm, dužina 5,34 m, masa 38,0 t. Nalazi se u Rusiji (Kremlj) (slika 3.3).
17. stoljeće	
1612. g.	Prvi put se spominje ugljena prašina - njemački ljevač i izumitelj Simon Sturtevant.
1645. g.	Najranije zabilježena upotreba izraza „ <i>foundry</i> “ („ljevionica“) pojavljuje se u Oxfordovom engleskom rječniku u svojoj inačici „ <i>funderie</i> “.
18. stoljeće	
1709. g.	Abraham Darby – dva važna otkrića koja su unaprijedila postupke lijevanja. Razvio je prvi kalupnik čime je moderniziran postupak izrade kalupa (do tada se provodio u otvorima u podu primjenom drvenih modela). Nakon toga, uveo je upotrebu koksa kao izvora energije u pećima za proizvodnju sirovog željeza.

Tablica 3.2 (nastavak). Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

1722. g.	A. F. de Reamur, poznat kao prvi svjetski metalurški kemičar, otkrio je temperirani lijev, danas poznat kao bijeli temperirani lijev.
1750. g.	Benjamin Huntsman ponovo je uveo proizvodnju čelika u lončastim pećima u Engleskoj. Taj proces je iščeznuo tijekom vremena, a prvotno je otkriven u Indiji.
1756. g.	Uvedena primjena tramvajskih tračnica od lijevanog željeza (zamjena za tračnice od drveta).
1779. g.	Prvi most od lijevanog željeza (željezni most Gorge preko rijeke Severn) (slika 3.4).
1794. g.	John Wilkinson u Engleskoj izumio prvu kupolnu peć, koristeći parni stroj za upuhivanje zraka u peć.
19. stoljeće	
1809. g.	A. G. Eckhardt of Soho u Engleskoj otkrio centrifugalno lijevanje.
1815. g.	Uvedena primjena kupolnih peći u SAD-u (Baltimore).
1817. g.	Prvi cjevovod za vodu od lijevanog željeza u SAD-u, dužina 120 m (Philadelphia).
1818. g.	Prvi lijevani čelik u SAD-u - proizveden u lončastim pećima.
1825. g.	Danac Hans Oersted izdvojio aluminij (najzatupljeniji metal u Zemljinoj kori) iz aluminijevog klorida.
1837. g.	Prvi pouzdani stroj za izradu kalupa na tržištu – S. Jarvis Adams Co., Pittsbrgh.
1847. g.	Firma Krupp Works iz Njemačke počela izrađivati vatreno oružje od lijevanog čelika. Firma John Deere u suradnji s čeličanama Jones and Quiggs (Pittsburgh) izrađuje plugove od čelika čija je cijena upola manja od cijene do tada izrađivanih plugova.
1849. g.	Patentiran ručno upravljani stroj za lijevanje olovnih slitina (slova za tiskare) u trajne kalupe.
1863. g.	Henry C. Sorby (Sheffield, Engleska) razvio metalografiju, što je omogućilo ljevačima da putem mikroskopa ispituju strukturu metala.
1867. g.	James Nasmythe razvio ljevarski lonac s zupčastim sustavom za nagibanje da bi se smanjile nesreće tijekom lijevanja.
1870. g.	Razvijen postupak pjeskarenja za velike odljevke (R. E. Tilghman, Philadelphia).
1876. g.	Proizvedeni prvi odljevci od aluminijske legure (William Frishmuth, Philadelphia).
1880. – 1887. g.	W. W. Sly razvio prvo postrojenje za čišćenje odljevaka čime se značajno smanjilo ručno čišćenje i brušenje odljevaka.
1884. g.	Prva primjena aluminijske legure u građevinarstvu – piramida odlivena od aluminijske legure postavljena na vrh Washington Monumenta.
1886. g.	Charles M. Hall, dvadesetdvogodišnji student otkrio proces dobivanja aluminijske legure elektrolizom, čime su se značajno smanjili troškovi dobivanja sirovog aluminijske legure.
1887. g.	Eli Millett izumio peć za sušenje malih jezgri.
1890. g.	Instaliran prvi motorom pokretan transporter (tekuća vrpca) za kalupe – integrirana izrada kalupa, lijevanje i hlađenje odljevaka.

Tablica 3.2 (nastavak). Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

1897. g.	Zubar B. F. Philbrook (Iowa) primijenio postupak lijevanja sa istaljivim (voštanim) modelima za izradu zubnih plombi – prva „neumjetnička“ primjena tog procesa u suvremenom ljevarstvu.
1898. g.	Poulson i Hargraves (Engleska) upotrijebili natrijev silikat (vodeno staklo) kao vezivo za izradu jednokratnih kalupa.
1899. g.	Započinje komercijalna proizvodnja elektrolučnih peći (otkriće Paula Heroulta, Francuska).
20. stoljeće	
1900. g.	Prvi patent za niskotlačno lijevanje u trajne kalupe (E. H. Lake, Engleska). Uvedena primjena uređaja za ispitivanje tvrdoće prema Brinnellu.
1901. g.	Proizveden prvi čelični centrifugalno lijevani kotač za vagon (Amerika, St. Louis).
1903. g.	Prvi zrakoplovni motor čiji je blok odliven od aluminija.
1905. g.	H. H. Doehler patentirao stroj za visokotlačno lijevanje.
1906. g.	Instalirana prva elektrolučna peć i prva niskofrekventna indukcijska peć (SAD).
1907. g.	Alfred Wilm je otkrio da se svojstva lijevanih aluminijskih slitina mogu poboljšati toplinskom obradom i umjetnim starenjem.
1908. g.	Razvijena prva razrahljivalica pijeska.
1910. g.	Razvijene modelne ploče.
1911. g.	Metalurški mikroskopi dostupni na tržištu.
1912. g.	Prvi mješač za kalupne mješavine (Peter L. Simpson). E. O. Beardsley i W. F. Piper izumili pjeskomet.
1915. g.	Započinju eksperimenti sa bentonitom (glina – vezivo za izradu kalupa).
1921. g.	Pacz otkrio da dodatak metalnog natrija u rastaljeni aluminij prije lijevanja značajno poboljšava duktilnost Al-Si slitina – uveden postupak modifikacije Al-Si slitina.
1924. g.	Henry Ford proizveo rekordnih 1 milion automobila u 132 radna dana. Automobilaska industrija apsorbira oko 1/3 ukupno proizvedenih odljevaka u SAD-u.
1925. g.	Primjena rendgenske analize kao alata za provjeru kvalitete odljevaka.
1928. g.	Odliven prvi aluminijski kotač za vozilo.
1930. g.	Razvijen proces izotermičkog poboljšavanja odljevaka od željeznih ljevova.
1940. g.	Chvorinov pronašao odnos između vremena skrućivanja i geometrije odljevka. Započinje primjena statistike u kontroli kvalitete u ljevaonicama u SAD-u. Započinje primjena cijepljenja sivog lijeva.
1943. g.	Keith Millis otkrio da dodatak magnezija u talinu sivog željeznog lijeva rezultira promjenom oblika izlučenog grafita (grafit se izlučuje u obliku nodula) – patent za proizvodnju nodularnog lijeva.
1944. g.	Johannes Croning (Njemačka) otkrio prvo toplinski reaktivno, kemijski očvršćujuće vezivo (postupak izrade školjkastih kalupa). Američko udruženje ljevača (AFS) odlikovalo je J. Croninga 1957. godine zlatnom medaljom za to otkriće.
1948. g.	Proizveden prvi odljevak od nodularnog lijeva izvan laboratorija.
1949. g.	Razvijene slitine FeSiMg za proizvodnju nodularnog lijeva.

Tablica 3.2 (nastavak). Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

1950. g.	Započinju eksperimenti s visokotlačnim kalupljenjem. Uvedena primjena brzo sušivih veznih ulja u izradi jezgri. Uvedena primjena pneumatske regeneracije ljevaoničkog pijeska. Započinje primjena mokre regeneracije.
1951. g.	Koljenasta vratila za sva Ford-ova vozila izrađuju se od nodularnog lijeva.
1952. g.	Harry Dietert razvio D-proces za izradu školjkastih kalupa pri čemu se primjenjuje fini pijesak i brzo sušivo ulje. Uvodi se postupak vodeno staklo (natrijev silikat)/CO ₂ .
1953. g.	Razvijen postupak izrade jezgri u vrućim jezgrenicima – izrada i očvršćivanje jezgre provodi se u jednoj operaciji.
1954. g.	Uveden CO ₂ proces (Njemačka) – novi proces za izradu jezgri i kalupa. Primjenjuju se smole kao veziva. Uveden stroj za izradu jezgri upuhivanjem što je omogućilo izradu jezgri od pijeska obloženog smolom – modifikacija Croning postupka.
1955. g.	Cijevi odlivene od nodularnog lijeva dostupne na tržištu. Počeci razvoja postupka lijevanja tiskanjem u Rusiji.
1957. g.	Vagn Aage Jeppesen (Danska) izumio stroj za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom bez primjene kalupnika.
1958. g.	Harold F. Shroyer dobio patent za postupak lijevanja s isparljivim modelom. Uvodi se primjena fenolnih i furanskih smola kao veziva (hladno očvršćivanje veznom smolom).
1959. g.	General Electric koristi digitalni kompjutorski program za praćenje prijenosa topline i uspješno upotrebljava metodu konačnih razlika u proizvodnji velikih čeličnih odljevaka.
1960. g.	Razvijena furanska veziva za postupak izrade jezgri u vrućim jezgrenicima. Razvijeno ispitivanje sabitljivosti svježe kalupne mješavine i određivanje aktivnog bentonita metilenskim modrilom.
1962. g.	Uvedena nova metoda za ispitivanje mješavina kod kojih se kao vezivo primjenjuje natrijev silikat, a očvršćivanje se postiže primjenom CO ₂ . Razvijen prvi automatizirani stroj za izradu kalupa od svježe kalupne mješavine (značajno povećanje produktivnosti). Uvedena fenolna veziva za postupak izrade jezgri u vrućim jezgrenicima.
1964. g.	Prvi stroj za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom bez primjene kalupnika (kapacitet: maks. 240 kalupa/h) izrađen u Danskoj.
1965. g.	Jim Henzel i Jack Keveryan (djelatnici General Electrica) procjenjuju slijed skrućivanja velikih čeličnih odljevaka pomoću kompjutora. Odliveni prvi metal-matriks kompoziti (SAD).
1968. g.	Larry Toriello i Janis Robins uveli postupak izrade jezgri u hladnim jezgrenicima.
1969. g.	Odliveno prvo kućište automobilskog motora potpuno izrađeno od aluminija (automobil Chevrolet Vega). Ukupno odliveno 2,5 mil. kućišta motora. Izumljen pretražni elektronski mikroskop (SEM) u Engleskoj. Toplinska analiza započinje se primjenjivati u ljevaonicama za brzo određivanje ugljičnog ekvivalenta i udjela fosfora. To je ujedno omogućilo proučavanje faznih pretvorbi tijekom skrućivanja slitina.

Tablica 3.2 (nastavak). Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

1970. g.	Uveden postupak izrade kalupa i jezgri kod kojeg se kao vezivo upotrebljava natrijev silikat (vodeno staklo), a kao očvršćivač ester.
1971. g.	U Japanu razvijen postupak vakuumskog kalupljenja (V-postupak). Eksperimentiranje na polju lijevanja u djelomično rastaljenom stanju – odliveni prvi odljevci.
1972. g.	U SAD-u proizvedeni prvi odljevci od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva (ADI) (koljenasta osovina za kompresor hladnjaka, masa 0,5 kg). Kanadski centar za minerale i energiju (CANMET) upotrijebio ispitivanje pomoću X zraka za studiranje toka čelika u kalupima.
1974. g.	Tvornica automobila Fiat uvela postupak proizvodnje nodularnog lijeva obradom primarne taline u kalupu odgovarajućom predlegurom. Uvedena primjena fenol-uretana veziva.
1975. g.	Razvijeno ispitivanje nodularnosti u nodularnom lijevu ultrazvukom. Ispituju se mogućnosti upotrebe otpadne kalupne mješavine u industriji cementa, opeka itd.
1976. g.	Foot Mineral Co. i B. C. I. R. A. (<i>British Cast Iron Research Association</i>) razvili vermikularni lijev. Započinje primjena kisele troske u kupolnim pećima uz odsumporavanje izvan peći primjenom CaC_2 kao zamjena za proces s bazičnom troskom.
1977. g.	GM (General Motors) započinje primjenu izotermički poboljšanog nodularnog lijeva za izradu komponenti diferencijala na putničkim automobilima.
1978. g.	Uveden postupak izrade kalupa i jezgri kod kojeg se kao vezivo upotrebljava furanska smola, a kao očvršćivač plin SO_2 .
1981. g.	General Motors (GM) započinje intenzivnu proizvodnju glava automobilskog motora od aluminijskih slitina postupkom sa isparljivim pjenastim modelom.
1982. g.	Uveden postupak proizvodnje jezgri u toplim jezgrecima.
1983. g.	Razvijen postupak kalupljenja zračnim impulsima.
1984. g.	Charles Hull – patent za proces stereolitografije. Nakon toga ubrzo se pojavljuju i druge tehnike brze izrade prototipa. Uveden samoočvršćivajući postupak izrade kalupa i jezgri kod kojeg se kao vezivo upotrebljava fenolna smola, a kao katalizator razni esteri. Toplinska analiza počinje se primjenjivati u ljevaonicama aluminijske za određivanje usitnjenja zrna i modifikacije silicijske faze.
Sredina 80-ih	Komercijaliziran programski paket za računsku simulaciju skrućivanja. Ube Machinery uvela prvu opremu za lijevanje tiskanjem.
Kasne 80-e	Razvijene 3-D tehnike vizualizacije. Počinje primjena odsumporavanja primarne taline za proizvodnju nodularnog lijeva iz kupolne peći sa CaO/CaF_2 umjesto CaC_2 . Testiranje metode proizvodnje nodularnog lijeva obradom taline žicom koja sadrži magnezij.
1988. g.	Intenzivira se primjena brze izrade prototipa i primjena računala u dizajnu (konstrukciji) komponenti. Ford primjenjuje Cosworth proces za serijsku proizvodnju.

Tablica 3.2 (nastavak). Vremenski tijek razvoja ljevarstva i primjene metalnih odljevaka [5]

1990. g.	Alumax Engineered Materials i Buhler Inc. uvode opremu za lijevanje u djelomično rastaljenom stanju.
1991. g.	Razvijena primjena „suhog leda“ za čišćenje jezgrenika i ljevarske opreme. AFS Lost-Foam konzorcij razvio uređaj za bezkontaktnu preciznu dimenzijsku analizu isparljivih modela i jezgri izrađenih od pijeska. Osam godina kasnije navedeni je konzorcij razvio instrument za mjerenje propusnosti plinova kroz prevlake na isparljivim modelima.
1993. g.	Prva primjena plazme u ljevaonicama čelika.
1994. g.	Delphi Chassis Systems i Casting Technology Co. prvi primjenjuju postupak lijevanja tiskanjem za velikoserijsku proizvodnju komponenti za prednji ovjes automobila od aluminijskih slitina (1,5 mil. automobila).
Sredina 90-ih	Razvijeni programski paketi za simulaciju mikrostrukture materijala, što je doprinijelo boljem razumijevanju metalurških efekata te procjeni i kontroli mehaničkih svojstava odljevaka. Započinje sve veća primjena odljevaka proizvedenih lijevanjem u djelomično rastaljenom stanju.
1996. g.	Primjena lijevanih metalnih kompozitnih materijala u automobilskoj industriji za kočione diskove. Worcester Polytechnic Institute razvio i komercijalizirao ekološki prihvatljive talitelje (bez fluora). GM uvodi primjenu veziva (nazvanog GMBond) za izradu jezgri koje je bazirano na bioplimerima, topljivo je u vodi, nije toksično i može se reciklirati.
1997. g.	AFS konzorcij razvio i komercijalizirao slitine bakra bez olova uz upotrebu bizmuta i selena. American Cast Iron Pipe Co. razvio elektrolučnu peć za proizvodnju željeznih ljevova.
Kasne 90-e	Simulacije naprezanja i deformacija donose prednosti u kontroli deformacije odljevaka, smanjenju rezidualnih naprezanja, eliminaciji toplih pukotina, minimalizaciji deformacije kalupa i povećanju vijeka trajanja kalupa.
2003. g.	AFS Magnesium Division dovršio projekt kojim je dokazao da se magnezij može lijevati postupkom s isparljivim modelom.



a)



b)

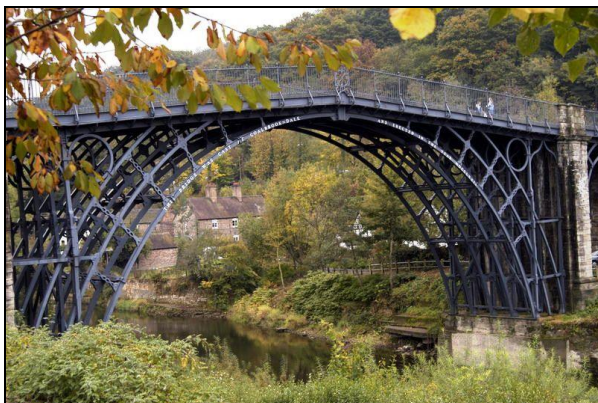
Slika 3.1. a) najstariji postojeći odljevak - žaba odlivena od bakra u Mezopotamiji (3200 g. p. n. e.), b) bakrena statua faraona Pepija I (2400 – 2200 g. p. n. e.) [6]



Slika 3.2. Veliki Buda (Kamakura, Japan, 1252. g.) [6]

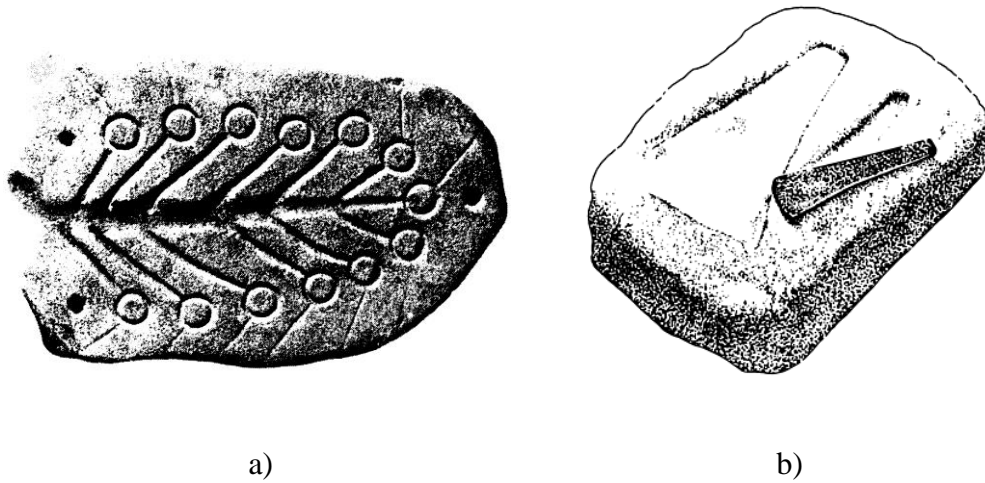


Slika 3.3. Top s najvećim kalibrom na svijetu odliven 1586. godine u Rusiji (masa 38 t, kalibar 890 mm) [6]



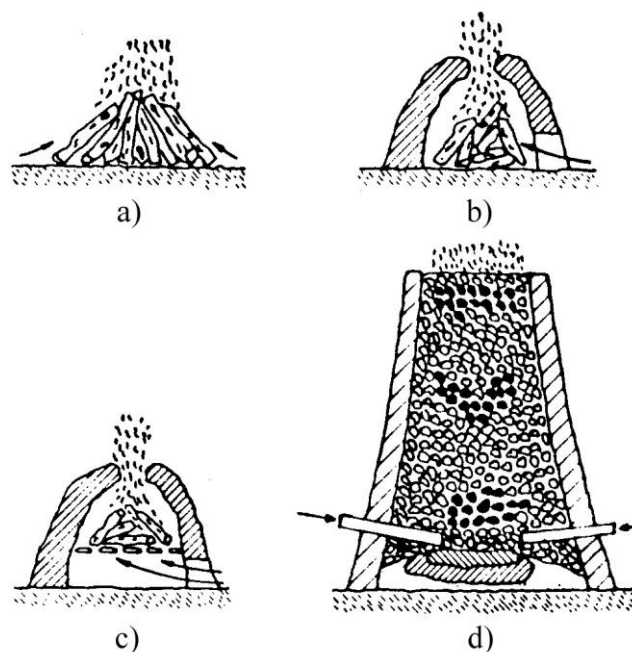
Slika 3.4. Prvi most izrađen od lijevanog željeza (most Gorge preko rijeke Severn, Engleska, 1779. g) [6, 7]

Prvi kalupi izrađivani su od kamena (slika 3.5). Klesani kamen bio je mekane strukture. U početku su izrađivani otvoreni kalupi. Arheolozi su pojedine kalupe označivali kao multipovršinske, jer su imali uklesane reljefe sa obje strane, čime se efikasno koristio odgovarajući komad kamena.



Slika 3.5. Kalupi od kamena: a) polovica kamenog kalupa sa uklesanim prstenima, kanalima za dotok taline i bočnim odzračnicima za odvod plinova. Ukupna dužina kalupa 13 cm, 2000 g. p. n. e. [8], b) kameni kalup za lijevanje sjekira iz Brončanog doba [4]

Taljenje bakra provodilo se u početku u pećima od ilovače. U tim jednostavnim pećima upotrebljavan je drveni ugljen, koji je stvarao reducirajuću atmosferu u glinom obzidanim ognjištima. Kasnije se prešlo na upotrebu zidanih šahtnih peći. Zrak potreban za izgaranje upuhivan je pomoću mjeхова. Ugalj i mijeh bili su osnovne metalurške tehnike, koja se sve do osamnaestog stoljeća nije značajnije promijenila. Na slici 3.6 prikazan je razvoj metalurških peći.



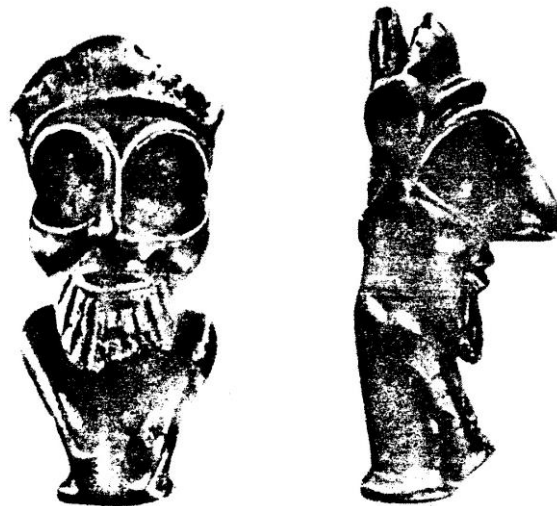
Slika 3.6. Razvoj metalurških peći: a) plamen koji slobodno gori, b) jednostavna peć od ilovače, c) peć s rešetkom, d) šahtna peć s puhaljkama [9]

Brončano doba započinje oko 3000 g. p. n. e. na području Bliskog istoka (tablica 3.1) [4, 5]. Prva bronca sadržavala je bakar i ~ 4 %As, premda su pronađeni predmeti od bronce sa 12 %As. Ti su predmeti ponekad imali srebrnaste površine, koja se javlja uslijed inverzne segregacije arsenom bogate lakotopive faze na površinu. To je navelo arheologe da opišu te predmete kao posrebrene.

Dodatak 10 do 15 %Sn kao legirnog elementa bakru imao je očigledne prednosti koje su se manifestirale u sniženju točke taljenja, povećanju čvrstoće i dobivanju glatkih, lakopolirajućih površina odljevka. Postoji nekoliko hipoteza koje objašnjavaju razvoj kositrene bronce. Jedna je ona o tzv. prirodnoj slitini, kad se slitina dobije taljenjem mješane rude bakra i kositra. Problematičnije je međutim objašnjenje izvora kositra, bakra i srebra u području Mezopotamije, gdje nema lokalnih nalazišta.

Empirijski je utvrđeno da odljevak ima manje grešaka ako se otvorena površina kalupa prekrije. To zapažanje vjerojatno je dovelo do upotrebe dvodijelnog kalupa. Takvi kalupi mogli su se koristiti za lijevanje predmeta s dvostranom simetrijom, kao što su razne sjekire, bodeži i slični predmeti.

Postoje također dokazi da su u trećem mileniju p. n. e. lijevani manji predmeti od bronce i srebra postupkom sa istaljivim modelom od voska (slika 3.7).



Slika 3.7. Odljevak izrađen postupkom sa istaljivim (voštanim) modelom, južni Libanon, 2000 g. p. n. e. [10]

Egipćani su unaprijedili tehniku lijevanja razvijenu na Bliskom istoku. Njima se pripisuje daljnji razvoj postupaka lijevanja sa istaljivim modelom. Na slici 3.8 prikazan je izgled jedne egipatske ljevaonice bronce oko 1450 g. p. n. e. Broncu su topili u glinenoj posudi na peći sa otvorenim plamenom, a zrak je upuhivan pomoću mjeхова. Lonac je s peći podizan pomoću zakrivljenih motki, a lijevanje se provodilo preko uljevnih čaša smještenih na vrhu kalupa.

Brončano doba na Dalekom istoku počinje 2000 g. p. n. e., odnosno više od milenijima nakon početka na Bliskom istoku (tablica 3.1) [4]. Još uvijek nije jasno da li se pojavilo u Kini ili u jugoistočnoj Aziji. Podaci o razvoju metalurgije na Dalekom istoku vode do pretpostavke da su metalurške spoznaje došle na to područje sa zapada. Međutim, vrlo stara metalurška nalazišta u Kini indiciraju da je razvoj išao u smjeru istok – zapad.



Slika 3.8. Taljenje i lijevanje - grob Rahmira, Egipat 1450 g. p. n. e. [11]

Lijevanje je bilo dominantan postupak oblikovanja na Dalekom istoku [4]. Antikne kineske posude (slika 3.9) bile su tako kompleksne da se sve do nedavno smatralo da su lijevane postupkom sa istaljivim modelom. Međutim, brojni fragmenti pronađenih kalupa u Anyangu doveli su do preispitivanja te hipoteze. Utvrđeno je da su to bili keramički kalupi sastavljeni od više komada, što svjedoči o vrlo dobroj kontroli konstrukcije kalupa i lijevanja metala. Lijevani metal je obično bio olovno-kositrena bronca.



Slika 3.9. Posuda za hranu, Kina, 11. stoljeće p. n. e. [6]

Na području Hrvatske, na lokaciji Gradec-Vučedol, registrirana je iz prapovijesnog razdoblja metalurška radionica s prvom serijskom proizvodnjom metala, za sada najstarija takva u Europi (3000 do 2200 g. p. n. e.). Iz tog područja datira poznata vučedolska golubica (slika 3.10), simbol cijele kulture. Metalurgija je tada imala veliki procvat i iz Vučedola se proširila po velikom dijelu Europe. Uz ostale lokalitete važno je istaknuti razvijenu metalurgiju Kelta i Rimljana (Siscija – radionice za izradu oružja i oruđa te kovnica novca).



Slika 3.10. Vučedolska golubica [6]

Lijevano željezo pojavilo se u Kini približno 600 g. p. n. e. [4, 5]. Njegova upotreba nije bila ograničena samo na praktične primjene. Postoje mnogi primjeri kipova u Kini koji su načinjeni od lijevanog željeza. Većina lijevanih željeza iz Kine imala je neuobičajeno visok udio fosfora te visok udio sumpora zbog česte primjene ugljena kao izvora energije u procesu taljenja. Zbog toga je točka taljenja tih lijevanih željeza bila slična točki taljenja bronce. Iz istih razloga lijevana željeza imala su neuobičajeno visoku livljivost, što je omogućilo, kao i u slučaju lijevanih bronci, lijevanje tankostjenih odljevaka.

Postoji određena neslaganja oko vremena uvođenja lijevanog željeza u Europu [4]. Pretpostavlja se da je lijevano željezo u Europu došlo sa istoka. Općenito se prihvaća da je taljenje željeznih ruda i dobivanje lijevanog željeza u Europi započeto prije 15. stoljeća (tablica 3.1). Dobivanje željeza iz rude bilo je u osnovi jednako dobivanju bakra, s tim da su primjenjivane više temperature, što je zahtijevalo poboljšanu konstrukciju peći. U to vrijeme lijevano željezo manje se smatralo slitinom za lijevanje, a više kao sirovina koja je zahtijevala „pročišćavanje“ da bi se dobilo kovko željezo, oblik u kojem se željezo upotrebljavalo u lokalnim kovačnicama.

Prvim istinskim ljevačem i „ocem ljevačke industrije“ smatra se Vannoccio Biringuccio (1480 do 1539), ljevač iz Vatikana (tablica 3.2). Njegovo djelo „*De La Pirotechnia*“ je prvi napisani dokument o praksi lijevanja metala.

U Engleskoj 1709. godine Abraham Darby upotrijebio je koks za proizvodnju sirovog željeza (tablica 3.2). Na taj se način moglo ekonomičnije proizvoditi sirovo željezo uz postizanje znatno viših temperatura, te je koks postao osnovna sirovina u ljevaonicama željeza. Prva kupolna peć po izgledu slična današnjoj pojavila se 1794. godine (tablica 3.2). Da bi se osigurala dovoljna količina zraka upotrijebljena je parna turbina koju je konstruirao James Watt 1765. godine.

Lijevanje ima dugu tradiciju na području izrade zvona i topova [4]. Tijekom srednjovjekovnih ratova ljevači su proizvodili topove, a tijekom perioda bez ratova pretaljivali su metal i izrađivali zvona. U Srednjem vijeku, crkvena zvona lijevali su svećenici, opati ili biskupi koji su također obučavali ljevače metala. Tijekom taljenja metala, oko peći pjevale su se crkvene pjesme i izgovarale molitve. Nakon toga rastaljeni metal je blagoslovljen i zatražena je božja zaštita za zvono koje je obično nosilo ime jednog od svetaca [5].

Općenito, zvana i topovi morali su se lijevati u komadu ako se željela zadržati njihova funkcionalnost. Lijevanje velikih zvona tradicionalno je ograničavao kapacitet ljevaonica. U početku 13. stoljeća glavni interes ljevača predstavljalo je lijevanje zvona za katedrale koje su se gradile diljem Europe. Kalupi za zvana rađeni su neposredno uz katedrale. Najveće zvono odliveno je u Rusiji 1735. godine (slika 3.11). Danas to zvono nije u funkciji jer je oštećeno. Najveće zvono koje još uvijek funkcionira nalazi se u Bejingu. Odliveno je za vrijeme Ming dinastije, oko 1400. godine, a masa tog zvona je 46,5 t. Slitina od koje je to zvono odliveno sadrži 15 %Sn i 1 %Pb [4]. Jačina zvuka tog zvona može doseći 120 dB i tijekom tihe večeri može se čuti na udaljenost od 20 km.



Slika 3.11. Veliko zvono od bronce, masa 216 t, visina 6,14 m, promjer 6,6 m (Kremlj, Rusija) [6]

Prema Theophilusu zvana su se u 12. stoljeću lijevala u kalupe izrađene od gline postupkom sa istaljivim modelom koristeći biljnu mast umjesto voska [4]. Glinena jezgra morala se slomiti prije no što se metal ohladio, jer bi se u protivnom zvono prilikom hlađenja čvrsto stegnulo oko jezgre, što je rezultiralo pucanjem zvona. Zvana su se u Europi lijevala od bronce koja je obično sadržavala 20 do 25 %Sn, a zvana na Dalekom istoku, koja su imala znatno drugačiji oblik i zvuk, lijevana su od bronce s nižim udjelom kositra. Istraživanja su pokazala da oblik odljevka kao i njegov integritet imaju znatno veći utjecaj na zvuk zvona nego slitina od koje se zvono lijevalo. Zbog toga je velika pažnja posvećena proporcijama zvona.

Velika zvana obično su se lijevala od bronce. Međutim, za lijevanje zvona upotrebljavali su se i drugi materijali. U Kini i Rusiji zvana su se lijevala od bijelog lijevanog željeza. Nakon što je 1750. godine Benjamin Huntsman razvio lijevani čelik (tablica 3.2), zvana od lijevanog čelika postaju specijalnost u Sheffieldu (Engleska).

Na osnovi ruševina jedne crkve iz 12. stoljeća koja se nalazila u sklopu benediktinskog samostana „*De Bella*“ (kraj Daruvara), može se pretpostaviti da su se na području Hrvatske zvana počela lijevati u 11. stoljeću. Zbog poteškoća u prijevozu velikih zvona, najprikladnije rješenje je bilo da ljevači presele ljevaonicu na mjesto narudžbe i tamo odliju zvono. Istodobno se na području vojnog naoružanja prelazi na proizvodnju topova od bronce koja je sadržavala 10 %Sn. Lijevalo se u kalupe u koje je bila postavljena jezgra da bi se formirao otvor.

Prema povijesnim dokumentima u Dubrovniku su se već 1336. godine lijevala zvana koja su se odlikovala izvanrednom izradom i zvukom. Najstarija zagrebačka ljevaonica zvona osnovana je 1456. godine. Zbog velikog područja koje je gravitiralo prema ljevaonici, ta je

ljevaonica praktično radila i poslije prvog svjetskog rata. U prilog su išli i rudnici bakrene rude, kao npr. Čabar, Petrova i Zrinska gora itd. U toj je ljevaonici odliveno zvono zagrebačke katedrale teško 6400 kg. Prva industrijska ljevaonica na području današnje Hrvatske osnovana je 1853. godine u Rijeci.

Pronalaskom baruta u Europi krajem 13. stoljeća, lijevanje topova od bronce u idućih 400 godina bio je najrašireniji ljevački obrt. Ljevaonica topova i zvona u Dubrovniku osnovana je 1463. godine. S Raba, gdje je imao ljevaonicu, u Dubrovnik je došao Ivan Rabljanin i osnovao ljevaonicu koja ubrzo postaje poznata u tadašnjem svijetu, pa je topove koje je on lijevao Dubrovačka Republika prodavala u južnu Italiju i Španjolsku [12].

Prvi topovi od lijevanog čelika napravljeni su u Njemačkoj 1847. godine od firme Krupp (tablica 3.2). Henry Bessmer je uveo direktnu proizvodnju čelika iz tekućeg sirovog željeza 1856. godine. Uvođenje konvertora i elektrolučnih peći povećalo je mogućnost ekonomične proizvodnje većih količina čelika.

Tijekom 19. stoljeća pojavio se značajni napredak u tehnologiji [5]. Metalurgija dobiva na važnosti tijekom 1889. kada se počeo upotrebljavati nikal za legiranje čelika da bi se povećala njegova čvrstoća. Što se tiče ljevarstva u tom periodu, 1809. godine A. G. Eckhardt of Soho iz Engleske razvio je postupak centrifugalnog lijevanja (tablica 3.2). Prema tom postupku rastaljeni metal se lijeva u brzo rotirajući metalni kalup. Taj postupak lijevanja brzo je usvojen u ljevaonicama cijevi, a prvi put je upotrijebljen u Baltimoru 1848. godine. H. Bessmer, čuven po razvoju konvertora, upotrebljavao je postupak centrifugalnog lijevanja da bi uklonio plinove i bio je prvi koji je ulio dva ili više metala u jedan rotirajući kalup. Centrifugalno lijevanje čelika prvi put je isprobano 1898. godine u St. Louisu, Missouri. Postupak centrifugalnog lijevanja uveden je 1901. godine za lijevanje kotača za željezničke vagoni. Brzina rotacije metalnog kalupa iznosila je 620 o/min.

Nakon ranog razvoja i primjene postupka centrifugalnog lijevanja, uveden je postupak lijevanja šupljih tankostjenih odljevaka u trajne kalupe bez primjene jezgre. Prema tom postupku rastaljeni metal ulijevao se u dvodijelni metalni kalup (uglavnom izrađen od bronce), a nakon što se kalup ispuni odmah se okreće i metal koji je još uvijek u tekućem stanju istječe van. Vrijeme potrebno za ovu operaciju lijevanja je dovoljno da dođe do stvaranja krute metalne kore uz stjenke kalupa koja ima oblik kalupne šupljine. Debljina stjenke odljevka ovisi o vremenskom intervalu između punjenja i okretanja kalupa, kao i o kemijskim i fizikalnim svojstvima slitine te temperaturi i sastavu kalupa. Obično su se tim postupkom proizvodili odljevci od slitina olova i cinka. Postupak je ograničen na proizvodnju šupljih odljevaka i upotrebljavan je za proizvodnju komponenti za svjetiljke [5].

Prve ručno upravljane strojeve za visokotlačno lijevanje metala patentirali su J. J. Sturgiss 1849. godine i W. P. Barr 1852. godine da bi se omogućilo brzo lijevanje olova za potrebe tiskara [5]. Između ranih inovacija na tom polju ističe se Ottmar Mergenthalerov Linotype – automatski stroj za lijevanje kod kojeg se hodom stapa potiskuje rastaljeno olovo u metalni kalup. Prvi stroj za visokotlačno lijevanje koji nosi ime Linotype patentirao je H. H. Doehler 1905. godine. Dvije godine nakon toga pojavio se prototip stroja za visokotlačno lijevanje s vrućom komorom (izumio ga je E. B. Wagner). Tijekom prvog svjetskog rata taj stroj se u velikoj mjeri upotrebljavao za izradu komponenti za dalekozore i gas-maske. Tijekom 1907. godine počele se upotrebljavati slitine cinka za visokotlačno lijevanje. U početku primjena slitina cinka za visokotlačno lijevanje nije bila konkurentna sve dok Price & Anderson nisu otkrili slitinu pod nazivom Zamak (1929. godina).

U Chicagu 1852. godine J. Bogardus izgradio je prvi neboder čija je konstrukcija načinjena od profila od lijevanog željeza. Jedan od najstarijih postupaka lijevanja, precizni lijev (postupak sa istaljivim voštanim modelima) ponovo je otkrio B. F. Philbrook 1897. godine i upotrebljavao ga je za lijevanje zubnih plombi (tablica 3.2). Industrija je posvećivala malo pažnje tom sofisticiranom procesu sve do prvog svjetskog rata kada se intenzivno počeo

upotrebljavati za brzu izradu kompleksnih komponenti za vojnu industriju, čime se izbjegla strojna obrada, zavarivanje i montaža. U tu vrijeme nastala je i prva potpuno automatizirana ljevaonica u SAD-u (Rockford, Illinois) u kojoj su se lijevale ručne granate za američku vojsku tijekom 1918. godine.

Prvo izdvajanje aluminijske legure načinjeno je 1825. godine, ali je izostala značajnija inženjerska primjena sve dok se nisu snizili troškovi iskorištenja aluminijske legure kao rezultat poboljšanja procesa taljenja (kraj 19. stoljeća). Osim za slitine (aluminijske bronce, cink-aluminijske slitine) i dezoksidaciju čelika, odljevci su bili prvo važno područje primjene aluminijske legure. Proces lijevanja je bio jednostavan, a troškovi su bili niski. U početku je primjena bila ograničena na izradu kućnih brojeva, ručnih ogledala, češljeva, četki, dugmadi za manšete, kućišta dekorativnih lampi itd. Lagano, korozijski otporno i toplinski vodljivo aluminijsko posuđe moglo se proizvoditi koristeći iste modele koji su se rabili za izradu lonaca, tava i kotlova od lijevanog željeza i mesinga.

Tehnologija lijevanja značajno je napredovala tijekom 20. stoljeća na mnogim poljima (tablica 3.2). Napredak ljevarstva od II. svjetskog rata je veći je nego u prethodnih 3000 godina [5]. Do 1920. godine kalupna mješavina ispitivala se stiskanjem u ruci da bi se ocijenila njena kompaktnost i sposobnost oblikovanja. Tijekom 1924. godine razvijeni su standardi koji pokrivaju različita svojstva kalupnih mješavina.

Od II. svjetskog rata intenzivirano je istraživanje na polju kemijskih veziva za izradu kalupa i jezgri. Razvijen je Croning postupak te primjena fenolnih i furanskih veziva. Kontinuirani razvoj veziva za proizvodnju kemijski vezanih jezgri i kalupa usmjeren je ka povećanju produktivnosti te postizanju dimenzijske reproducibilnosti potrebne da bi se zadovoljili novi izazovi lijevanja na gotovo konačnu dimenziju. Mnogi modeli načinjeni su od epoksidnih smola i poliuretana te polistirena.

U navedenom periodu stekle su se nove spoznaje na polju lijevanja u pješčane kalupe. Proučavane su osnove mineralogije glina, priprema kalupne mješavine, sabijanje kalupne mješavine i fizikalna svojstva pijeskova za izradu kalupa i jezgri. Potpunije razumijevanje pijesaka za izradu kalupa rezultiralo je većim stupnjem ujednačenosti pijesaka za kalupne mješavine. Rezultat je to značajnog napretka na polju ispitivanja pijesaka i kalupnih mješavina te razvoja instrumenata za ispitivanje pijesaka, odnosno kalupnih mješavina. Trajni kalupi za visokotlačno, niskotlačno i gravitacijsko lijevanje te centrifugalno lijevanje također su napredovali, kao i kalupi za hibridne procese kao što su lijevanje tiskanjem i lijevanje u djelomično rastaljenom stanju.

Ostali doprinosi kontinuiranom napretku lijevanja metala uključuju:

- automatizaciju ljevaonica,
- znanstveni pristup sustavima ulijevanja i napajanja odljevaka primjenom računalne simulacije skrućivanja odljevaka,
- razvoj postupka lijevanja s isparljivim modelom te postupka lijevanja u djelomično rastaljenom stanju,
- taljenje u kupolnoj peći primjenom plazme,
- lijevane metalne kompozite.

Iz ovog kratkog pregleda može se uočiti da je razvoj lijevanih metala neposredno vezan za otkriće pojedinih metala, razvoj agregata za taljenje i općenito povezan s razvojem civilizacije. Lijevanje metala ima izuzetan značaj i dugu tradiciju na području Republike Hrvatske. Treba također primijetiti da su osnovni principi izrade kalupa, koji su nastali u antičko doba, zadržani i u najsuvremenijoj tehnologiji.

4. LJEVARSKE SLITINE

Ljevarska slitina ili lijev je metalni materijal kojem se uporabni oblik daje lijevanjem, odnosno postupkom pri kojem se metalni materijal rastali i u rastaljenom stanju ulijeva u odgovarajući kalup, gdje skrućuje zadržavajući oblik kalupne šupljine. Ljevarske slitine možemo podijeliti na dvije osnovne skupine:

- **ljevarske slitine na osnovi željeza**, odnosno ljevovi kod kojih je željezo dominantan element u kemijskom sastavu,
- **ljevarske slitine na osnovi obojenih metala**, odnosno ljevovi kod kojih su obojeni metali (npr. Al, Mg, Cu itd.) dominantni u kemijskom sastavu te ne sadrže željezo ili je ono prisutno u niskim koncentracijama.

Ljevarske slitine na osnovi željeza u znatno većoj mjeri se upotrebljavaju za proizvodnju odljevaka od ljevarskih slitina na osnovi obojenih metala. Od ukupne mase proizvedenih odljevaka u svijetu u 2012. godini, ~ 83 % je odliveno od ljevarskih slitina na osnovi željeza, a ~ 17 % od ljevarskih slitina na osnovi obojenih metala [1].

4.1 Ljevarske slitine na osnovi željeza

Najčešća klasifikacija ljevarskih slitina na osnovi željeza provodi se na prema udjela ugljika. Prema udjelu ugljika ljevarske slitine na osnovi željeza mogu se svrstati u dvije skupine:

- **čelični ljevovi** i
- **željezni ljevovi**.

Čelični ljevovi (engl. *Cast Steels*) u osnovi su slitine željeza i ugljika. Teorijski maksimalni udio ugljika iznosi 2,06 %. Iznad te granice govorimo o željeznim ljevovima (engl. *Cast Irons*). Osim željeza i ugljika, čelični i željezni ljevovi sadrže i niz drugih elemenata (npr. fosfor, sumpor, mangan, bakar, nikal, krom, kositar itd.).

Čelični i željezni ljevovi vrlo su kompleksni sustavi. Ovisno o kemijskom sastavu, uvjetima tijekom skrućivanja i primijenjenoj toplinskoj obradi može se ostvariti širok spektar mikrostruktura i svojstava.

Čelični i željezni ljevovi, osim po udjelu ugljika, razlikuju se i po načinu skrućivanja, a samim tim i svojstvima. Tijekom skrućivanja željeznih ljevova odvija se eutektična reakcija, što nije slučaj kod čeličnih ljevova. Eutektična reakcija u sustavu željezo-ugljik odvija se na 1147 °C pri udjelu ugljika u talini od 4,3 %. Tom reakcijom dolazi do pretvorbe taline u dvije krute faze: jedna je eutektični austenit (γ -Fe), a druga grafit (C), kao samostalna faza. U tom slučaju govorimo o **sivim željeznim ljevovima, odnosno željeznim ljevovima s grafitom**. Eventualno, umjesto grafita može nastati karbid (Fe_3C), također kao samostalna faza, što ovisi o uvjetima tijekom skrućivanja. Izlučivanje karbida tijekom skrućivanja željeznih ljevova s grafitom nije poželjno. Ako se tijekom skrućivanja sav ugljik izluči u obliku karbida kao samostalne faze, govorimo o **bijelim željeznim ljevovima, odnosno željeznim ljevovima bez grafita**. Kod čeličnih ljevova ugljik je vezan u cementit (Fe_3C) ili mješovite karbide, ovisno o kemijskom sastavu.

4.1.1 Čelični ljevovi

Čelici su kompleksni i široko upotrebljavani inženjerski materijali zbog velike količine željeza u Zemljinoj kori, visoke temperature taljenja i izrazito širokog spektra svojstava koja se postižu varijacijom kemijskog sastava i prilagodbom mikrostrukture toplinskom obradom. Intenzivnije se počinju primjenjivati od 19. stoljeća, što je povezano s razvojem pouzdanih postupaka proizvodnje.

Čelici su slitine željeza koje sadrže do 2,06 %C. Osim što se mogu ljevati, čelici se za razliku od željeznih ljevova mogu prerađivati plastičnom deformacijom. Niti jedna druga slitina nema tako velik broj kvaliteta i tako široko područje primjene kao što je to slučaj kod čelika. Osim toga, čelik je „zeleni materijal“ jer ima veći stupanj recikliranja od svih drugih materijala.

Osim željeza i ugljika, čelik uvijek sadrži i niz drugih elemenata. Silicij i mangan korisne su primjese i stalni su pratioci željeza i ugljika u čeliku. Sumpor i fosfor štetne su primjese, odnosno nečistoće zbog čega se njihov udio strogo ograničava. Često su prisutni i oligoelementi (prvenstveno bakar i kositar). Oni negativno utječu na svojstva čelika, zbog čega se njihov udio mora ograničiti. Dodatkom legiranih elemenata (npr. krom, nikal, vanadij, molibden) u određenim udjelima mogu se značajno poboljšati svojstva čelika, odnosno svojstva se mogu prilagoditi specifičnim uvjetima primjene odljevaka.

Svi proizvedeni čelici se ljevaju. Međutim, < 10 % od ukupne svjetske proizvodnje čelika odnosi se na čelične ljevove, odnosno čelike od kojih se u ljevaonicama ljevaju odljevci različitih oblika i veličina. Ostatak čine čelici koji se u čeličanicama ljevaju u različite poluproizvode namijenjene za daljnju preradu plastičnom deformacijom (npr. valjanjem). Tijekom 2012. godine u svijetu je proizvedeno ~ 11,3 mil. t odljevaka od čeličnih ljevova, što predstavlja ~ 13,5 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od ljevova na osnovi željeza te ~ 11,2 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od željeznih i neželjeznih ljevova [1].

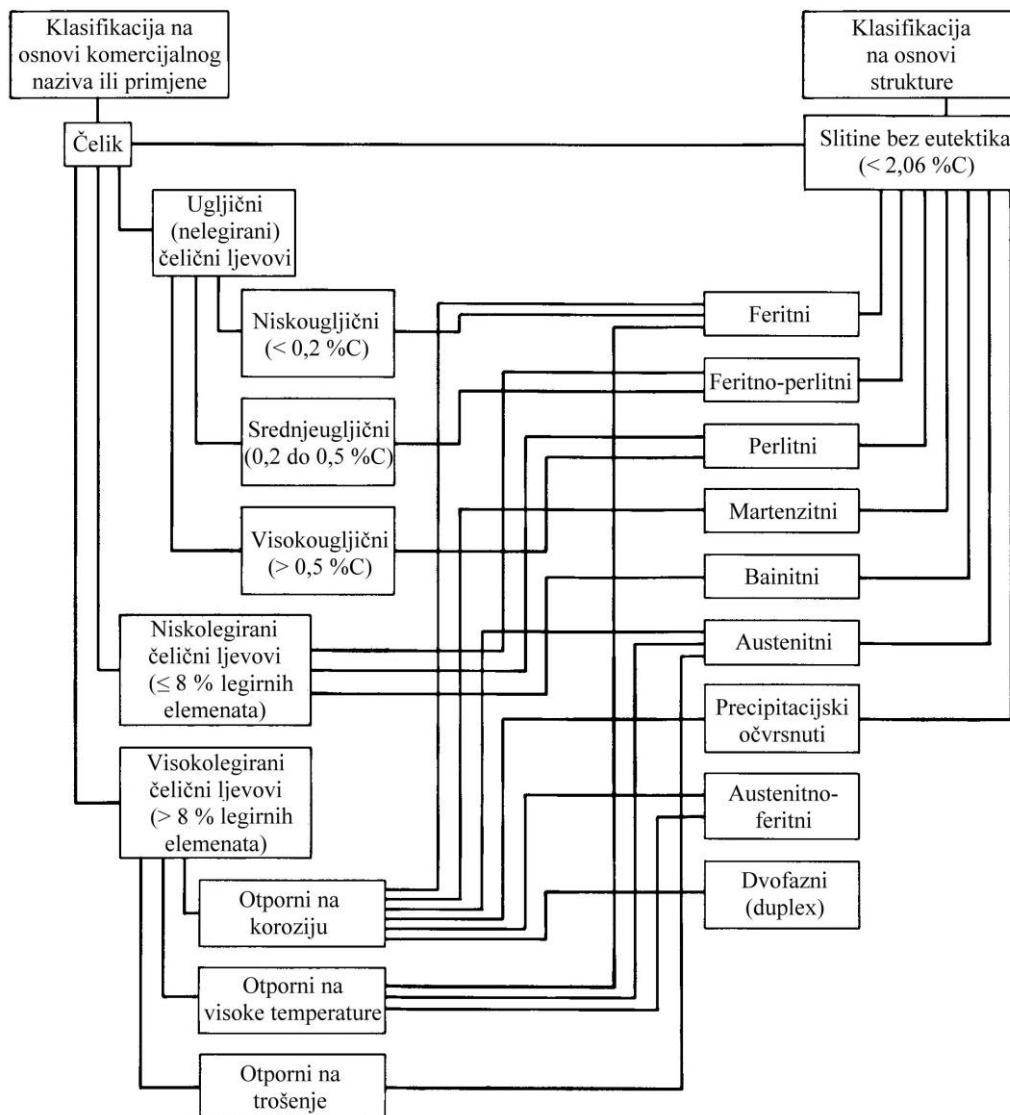
Klasifikacija čeličnih ljevova može se provesti prema kemijskom sastavu, mikrostrukтури, području primjene, svojstvima itd. (slika 4.1). Prema kemijskom sastavu mogu se npr. razvrstati na **nelegirane (ugljične)**, **niskolegirane i visokolegirane**, a prema području primjene na **konstrukcijske** (opći konstrukcijski, čelici povišene čvrstoće, korozijski postojani, čelici za rad na povišenim i visokim temperaturama, čelici za rad pri niskim temperaturama itd.) i **alatne** (za hladni rad, za topli rad, itd.) čelične ljevove.

Danas postoji veći broj prihvaćenih normi za čelične odljevke koje propisuju kemijski sastav, svojstva, ispitivanje i uvjete isporuke. Tako su razvijene posebne norme za konstrukcijske čelike, korozijski otporne čelike, toplinski otporne čelike, čelike otporne na trošenje itd.

Svojstva čeličnih ljevova mogu značajno varirati ovisno o kemijskom sastavu, mikrostrukтури, uvjetima hlađenja odljevaka u kalupu te primijenjenoj toplinskoj obradi i značajno su različita od svojstava željeznih ljevova. U odnosu na sive željezne ljevove, čelični ljevovi su superiorniji u pogledu vlačne, tlačne i dinamičke čvrstoće, granice razvlačenja, žilavosti, istezanja, modula elastičnosti, otpornosti na umor, zavarljivosti, otpornosti na trošenje i visoke temperature. Sivi željezni ljevovi imaju veću sposobnost prigušenja vibracija od čeličnih ljevova, bolju livljivost, strojnu obradivost i niže troškove proizvodnje. Otpornost na koroziju sivih željeznih ljevova bolja je od otpornosti na koroziju uobičajenih ugljičnih (nelegiranih) čeličnih ljevova. Bijeli željezni ljevovi zamijenili su čelične ljevove u mnogim aplikacijama gdje se zahtijeva povišena i visoka otpornost na trošenje. Međutim, za aplikacije kod kojih se zahtijeva vrlo visoka otpornost na trošenje koriste se austenitni manganski čelici.

Proizvodnja odljevka od čeličnih ljevova praćena je nizom specifičnih problema, uglavnom zbog visoke temperature lijevanja i visokog volumnog stezanja tijekom skrućivanja

(6 do 10 vol. %) [13]. Visoke temperature lijevanja zahtijevaju i kvalitetnije kalupe, dok visoko volumno stezanje tijekom skrućivanja zahtijeva primjenu većih pojila.

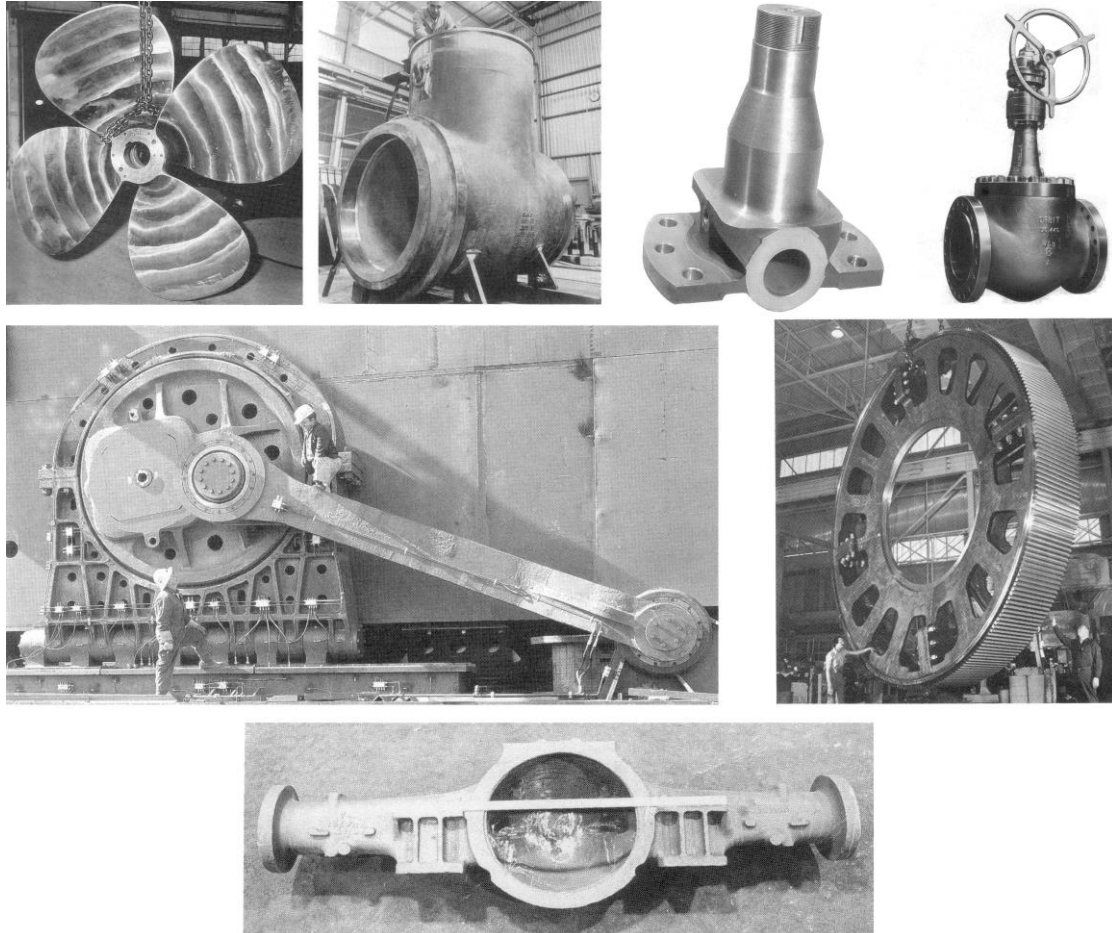


Slika 4.1. Klasifikacija čeličnih ljevova [14]

Odljevci od čeličnih ljevova proizvode se lijevanjem u odgovarajuće kalupe [15]. U kalupe od svježe kalupne mješavine lijeva se ~ 32 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova. U kalupe od kemijski vezanih mješavina lijeva se ~ 30 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova. Značajna količina odljevaka od čeličnih ljevova proizvodi se lijevanjem u višekratne (trajne) kalupe (~ 32 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova). To se odnosi na lijevanje kotača (bandaža) za željeznička vozila u grafitne kalupe. Manje količine čeličnih odljevaka proizvode se postupkom točnog (preciznog) lijeva (~ 3 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova), centrifugalnim lijevanjem (~ 3 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova) i postupkom lijevanja sa isparljivim modelima (~ 0,4 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka od čeličnih ljevova).

Masa odljevaka od čeličnih ljevova varira od nekoliko grama do nekoliko stotina tona [16]. Obično se primjenjuju za zahtjevne aplikacije gdje su od velike važnosti optimalna mehanička svojstva. Najčešća područja primjene čeličnih odljevaka su: ventili, pumpe,

kompresori, razne konstrukcije, strojevi za građevinarstvo (buldožeri, bageri itd.), drobilice, oprema i strojevi za kamenolome i rudnike, oprema za eksploataciju nafte i plina, industrija motornih vozila, vojna industrija, željeznički transport, brodogradnja, oprema za željezare, oprema za elektrane i transport električne energije, industrija poljoprivrednih strojeva itd. (slika 4.2.).



Slika 4.2. Odljevci od čeličnih ljevova [16]

4.1.1.1 Ugljični (nelegirani) čelični ljevovi

Ugljični ili nelegirani čelični ljevovi upotrebljavaju se kada se zahtijeva da čelični odljevci imaju trajnost i čvrstoću, odnosno povoljna mehanička svojstva, dok specijalna svojstva, kao što je otpornost na toplinu, koroziju i trošenje nisu od primarne važnosti. To su čelični ljevovi kod kojih je ugljik glavni legirni element. Ostali elementi su prisutni u malim količinama. Udio silicija u ugljičnim čeličnim ljevovima obično se kreće od 0,25 do 0,8 %, a udio mangana od 0,5 do 1 % [17, 18]. Udio fosfora i sumpora održava se što je moguće nižim.

Odljevci od ugljičnih čeličnih ljevova imaju široku primjenu. Tipična područja primjene su: komponente za brodogradnju, željeznička vozila, automobile i poljoprivredne strojeve, oprema za valjaonice, razni valjci, strojevi i alati, oprema za građevinarstvo, rudarstvo i naftnu industriju itd. Često se podvrgavaju toplinskoj obradi u cilju postizanja određenih svojstava.

Prema udjelu ugljika ugljični čelični ljevovi mogu se klasificirati u tri skupine [17 - 19]:

- niskougljični čelični ljevovi: $C < 0,2 \%$,
- srednjeugljični čelični ljevovi: $C = 0,2$ do $0,5 \%$,
- visokougljični čelični ljevovi: $C \geq 0,5 \%$.

Niskougljični čelični ljevovi sadrže $< 0,2 \%$ C. Osim ugljika, sadrže od $0,5$ do 1% Mn, $0,35$ do $0,7 \%$ Si, $< 0,025 \%$ P i $< 0,025 \%$ S. Reziidualni elementi, kao što je nikal, krom, bakar i molibden mogu biti prisutni, ali u malim količinama. Odljevci od niskougljičnih čeličnih ljevova mogu biti površinski otvrdnuti, čime se dobiva tvrd i otporan na trošenje površinski sloj i žilava, duktilna jezgra. Ljevarska svojstva tih čeličnih ljevova nisu pogodna zbog visoke temperature taljenja, loše livljivosti, povećane sklonosti ka oksidaciji i stvaranju pukotina u toplom stanju [20].

Srednjeugljični čelični ljevovi sadrže od $0,2$ do $0,5 \%$ C i najčešće se upotrebljavaju za proizvodnju čeličnih odljevaka. Osim ugljika, sadrže od $0,5$ do $1,5 \%$ Mn, $0,35$ do $0,8 \%$ Si, $< 0,025 \%$ P i $< 0,025 \%$ S. Najveći dio odljevaka od srednjeugljičnih čeličnih ljevova toplinski se obrađuje da bi se poboljšala ljevačka struktura i duktilnost. Odljevci od srednjeugljičnih čeličnih ljevova imaju široku primjenu: komponente za brodogradnju, željeznička vozila, automobile i poljoprivredne strojeve, razni strojevi i alati, oprema za valjaonice i rudarstvo, konstrukcije itd. Ljevarska svojstva srednjeugljičnih čeličnih ljevova bolja su od ljevarskih svojstava niskougljičnih čeličnih ljevova (niža temperatura taljenja, bolja livljivost, manja sklonost ka stvaranju pukotina u toplom stanju itd.).

Visokougljični čelični ljevovi sadrže $> 0,5 \%$ C. Osim ugljika, sadrže od $0,5$ do $1,5 \%$ Mn, $0,35$ do $0,7 \%$ Si, $< 0,025 \%$ P i $< 0,025 \%$ S. Zbog visokog udjela ugljika imaju znatno veću mogućnost otvrdnjavanja u odnosu na niskougljične i srednjeugljične čelične ljevove. Radi poboljšanja svojstava primjenjuje se toplinska obrada. Najčešće se upotrebljavaju za komponente kod kojih se zahtijeva relativno visoka čvrstoća. Visokougljični čelični ljevovi imaju superiornija ljevarska svojstva od niskougljičnih i srednjeugljičnih čeličnih ljevova.

4.1.1.2 Niskolegirani čelični ljevovi

Niskolegirani čelični ljevovi upotrebljavaju se kada se od čeličnih odljevaka zahtijevaju svojstva koja se ne mogu ostvariti primjenom ugljičnih čeličnih ljevova. Novi trendovi u gradnji i konstruiranju komponenti idu u smjeru smanjenja mase komponente primjenom materijala visoke čvrstoće i značajno su utjecali na razvoj niskolegiranih čeličnih ljevova.

Udio ugljika u niskolegiranim čeličnim ljevovima uglavnom se kreće do $0,45 \%$ [17, 21]. Pored ugljika sadrže i legirne elemente da bi se ostvarila određena svojstva. Ukupan udio legirnih elemenata iznosi do 8% . Čelični ljevovi smatraju se niskolegiranim ako je udio barem jednog legirnog elementa viši od navedenih koncentracija:

Mangan $> 1 \%$,
Silicij $> 0,8 \%$,
Nikal $> 0,5 \%$,
Bakar $> 0,5 \%$,

Krom > 0,25 %,
Molibden > 0,1 %,
Vanadij > 0,05 %,
Volfram > 0,05 %.

Brojne kvalitete niskolegiranih čeličnih ljevova razvijene su da bi se udovoljilo specifičnim zahtjevima koji se ne mogu postići primjenom ugljičnih čeličnih ljevova, kao što je npr. povišena čvrstoća na sobnoj i povišenim temperaturama, povećana otpornost na trošenje, toplinu i udarno opterećenje, poboljšana otpornost na oksidaciju i koroziju itd. [19]. Osim toga, niskolegirani čelični ljevovi imaju superiorniju žilavost pri sobnoj i niskim temperaturama od ugljičnih čeličnih ljevova. Npr. perlitni manganski čelični ljevovi (sa 1,5 %Mn) upotrebljavaju se za aplikacije kod kojih se zahtijeva nešto viša čvrstoća nego što je to moguće ostvariti kod ugljičnih čeličnih ljevova uz zadržavanje povoljne žilavosti (npr. za opremu za iskapanje tla, kotači, zupčanici, komponente za pneumatske alate itd.) [13]. Čelični ljevovi povišene čvrstoće, kao što je npr. čelični lijev koji sadrži maks. 0,2 %C, 0,5 do 1 %Mn, maks. 0,25 %Cr, 0,45 do 0,65 %Mo i maks. 0,4 %Ni i čelični lijev koji sadrži maks. 0,25 %C, 0,3 do 0,7 %Mn, 2,5 do 3,5 %Cr, 0,35 do 0,6 %Mo i maks. 0,4 %Ni upotrebljavaju se za izradu zupčanika, valjaka, komponenti za drobilice, oplata za mlinove, koljenastih osovina, komponenti za cementare, opreme za naftnu industriju itd. Osim toga, niskolegirani čelični ljevovi primjenjuju se za izradu ventila, komponenti za parne turbine, komponenti za automobile, željeznička vozila i brodove itd. [19]. Npr. niskolegirani čelični ljevovi koji sadrže krom, molibden, vanadij i volfram pogodan su materijal za izradu ventila te komponenti za turbine i rafinerije koje su podvrgnute djelovanju pare do temperature od 650 °C [19]. Niskolegirani čelični ljevovi koji sadrže nikal ili nikal i vanadij primjenjuju se za gradnju komponenti koje moraju zadržati odgovarajuću žilavost pri niskim temperaturama.

Primarni cilj dodatka kroma, nikla, molibdena, mangana te eventualno vanadija i bora je povećanje prokaljivosti čeličnih ljevova da bi se mogla ostvariti zahtijevana svojstva u različitim debljinama stjenke. Prokaljivost direktno utječe na dubinu otvrdnutog sloja stjenke odljevka tijekom gašenja, a time i na njegova mehanička svojstva (čvrstoću, žilavost itd.). Osnovna ideja je da se odgovarajućim legiranjem izbjegne pretvorba austenita u perlit ili bainit tijekom hlađenja. Na taj način tijekom hlađenja nastaje martenzit što rezultira značajnim porastom tvrdoće.

Niskolegirani čelični ljevovi mogu se klasificirati u dvije skupine prema njihovoj primjeni [19]:

- niskolegirani čelični ljevovi za strukturne komponente povišene čvrstoće, prokaljivosti i žilavosti,
- niskolegirani čelični ljevovi za komponente od kojih se zahtijeva otpornost na trošenje, abraziju ili koroziju tijekom primjene pri niskim ili visokim temperaturama.

Ne postoji oštra granica između ove dvije skupine jer se mnogi čelični ljevovi iz prve skupine mogu upotrijebiti za aplikacije u kojima se primjenjuju čelični ljevovi iz druge skupine i obrnuto. Zbog toga se u nastavku navode neke od najčešćih vrsta niskolegiranih čeličnih ljevova [17, 21].

C-Mn-niskolegirani čelični ljevovi sadrže 0,2 do 0,5 %C i 1 do 1,75 %Mn. Značajni su konstrukcijski materijali zbog odličnih svojstava koja su ostvarena dodatkom samo jednog relativno jeftinog legirnog elementa (mangana) uz primjenu toplinske obrade. Poznati su kao srednjemanganski čelični ljevovi.

Mn-Mo-niskolegirani čelični ljevovi sadrže 0,2 do 0,35 %C, 1 do 1,75 %Mn i 0,1 do 0,55 % Mo. Vrlo su slični srednjemanganskim čeličnim ljevovima s razlikom što imaju visoku granicu razvlačenja na povišenim temperaturama, višu vrijednost omjera granice razvlačenja i vlačne čvrstoće pri sobnoj temperaturi, visoku prokaljivost i nisu skloni krhkosti popuštanja. Prema tome, ovi čelični ljevovi zamjenjuju srednjemanganske čelične ljeveve u određenim aplikacijama.

Mn-Ni-Cr-Mo-niskolegirani čelični ljevovi obično sadrže 1,3 do 1,6 %Mn, 0,4 do 0,7 %Ni, 0,55 do 0,75 %Cr i 0,3 do 0,4 %Mo. Takvi niskolegirani čelični ljevovi imaju visoku prokaljivost, što omogućuje da se i u debelim stjenkama nakon toplinske obrade (gašenja i popuštanja) dobije struktura koja se u potpunosti sastoji od popuštenog martenzita.

Ni-niskolegirani čelični ljevovi obično sadrže 2 do 4 %Ni i jedni su od najstarijih niskolegiranih čeličnih ljevova. Imaju visoku vlačnu čvrstoću i granicu elastičnosti, povoljnu duktilnost, izvrsnu otpornost na udarno opterećenje i žilavost pri niskim temperaturama. Čelični ljev sa 3 do 5 %Ni ima visoku otpornost na koroziju u morskoj vodi i visoku žilavost pri vrlo niskim temperaturama.

Ni-Cr-Mo-niskolegirani čelični ljevovi posebno su pogodni za proizvodnju velikih masivnih odljevaka zbog velike prokaljivosti. Osim toga, ti čelični ljevovi zadržavaju čvrstoću i na povišenim temperaturama što im proširuje područje primjene. Dodatkom molibdena Ni-Cr-niskolegiranim čeličnim ljevovima značajno se poboljšava prokaljivost.

Cr-Mo-niskolegirani čelični ljevovi pogodni su za primjenu na povišenim temperaturama. Krom i molibden stvaraju karbide (Mo_2C i Cr_7C_3) čime se usporava proces puzanja i poboljšavaju mehanička svojstva na povišenim temperaturama. Osim toga, krom i molibden povisuju prokaljivost. Dodatkom kroma poboljšava se otpornost čeličnog lijeva na oksidaciju pri povišenim temperaturama, posebno pri udjelima ≥ 1 %. U većini slučajeva provodi se toplinska obrada odljevaka od Cr-Mo-niskolegiranih čeličnih ljevova u cilju postizanja superiornijih svojstava. Udio ugljika kod tih kvaliteta čeličnih ljevova održava se niskim ($< 0,25$ %) radi poboljšanja zavarljivosti. Najčešće se upotrebljavaju za odljevke koji su istovremeno izloženi povišenim temperaturama i povišenim tlakovima (npr. razni ventili za elektrane).

Cu-niskolegirani čelični ljevovi imaju povišenu otpornost na atmosfersku koroziju, a karakterizira ih sposobnost otvrdnjavanja starenjem.

Visokočvrsti niskolegirani čelični ljevovi mogu imati vlačnu čvrstoću od 1200 do 2100 N/mm^2 . Takva superiorna svojstva mogu se postići toplinskom obradom (gašenjem i popuštanjem) čeličnog lijeva sa 0,27 %C, 1 %Mn, 1,85 %Ni, 0,9 %Cr i 0,4 %Mo. Čelični ljevovi s visokim vrijednostima vlačne čvrstoće, visokom žilavosti i zavarljivosti razvijeni su prvenstveno za vojnu industriju.

4.1.1.3 Visokolegirani čelični ljevovi

Kod visokolegiranih čeličnih ljevova ukupni udio legirnih elemenata je veći od 8 % [17, 22]. Glavni legirni elementi su krom i nikal. Ti čelični ljevovi razvijeni su i intenzivno se upotrebljavaju radi dobivanja specijalnih svojstava koja se ne mogu postići ugljičnim i niskolegiranim čeličnim ljevovima. Primjenjuju se za aplikacije kod kojih se pored mehaničkih svojstava zahtijevaju i određena specijalna svojstva, kao što je korozijska postojanost, otpornost na visoke temperature, otpornost na trošenje itd. Najčešća područja primjene su: oprema za parne turbine, oprema za kemijsku industriju i medicinu, oprema za rukovanje vrućim kiselinama, komponente za agregate za zagrijavanje, pumpe, ventili, oprema za nuklearne elektrane, oprema za mornaricu, gorionici, ispušne grane automobilskih motora, oprema za prehrambenu industriju itd.

Visokolegirani čelični ljevovi mogu se klasificirati u tri skupine prema njihovim svojstvima i primjeni [22, 23]:

- visokolegirani čelični ljevovi otporni na koroziju,
- visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature,
- visokolegirani čelični ljevovi otporni na trošenje.

Visokolegirani čelični ljevovi otporni na koroziju najčešće su poznati kao nehrđajući čelični ljevovi. Legirani su odgovarajućim elementima da bi se spriječila korozija tijekom primjene odljevaka u vodenim otopinama ili pari pri temperaturama do 315 °C [17, 22]. Najviše se upotrebljavaju za komponente koje se rabe u kemijskoj industriji i proizvodnji energije, a izložene su korozivskom djelovanju.

Da bi čelični ljev bio potpuno korozivski postojan mora sadržavati najmanje 12 %Cr [17, 22, 23]. Današnji korozivski postojani čelični ljevovi sadrže i do 30 %Cr. Nehrđajući čelični ljevovi, pored kroma, sadrže i ostale legirne elemente, prije svega nikal (do 30 %) te molibden, bakar, niobij i dušik da bi se ostvarila specifična mikrostruktura, otpornost na koroziju ili mehanička svojstva za određene aplikacije.

Korozivski postojani čelični ljevovi grupirani su prema kemijskom sastavu kao Cr-čelični ljevovi, Cr-Ni-čelični ljevovi kod kojih je krom dominantan legirni element i Ni-Cr-čelični ljevovi kod kojih je nikal dominantan legirni element.

Za korozivsku postojanost važno je osim odgovarajućeg udjela kroma ostvariti homogenu jednofaznu mikrostrukturu. Korozivski postojani čelični ljevovi trebaju imati, teorijski gledano, potpuno feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih faza.

Udio ugljika također utječe na korozivsku postojanost čeličnih ljevova. Nehrđajući čelični ljevovi moraju imati što niži udio ugljika jer u protivnom dolazi do vezanja kroma u karbide čime se snižava korozivska postojanost. Prema tome, korozivski postojani čelični ljevovi uglavnom sadrže < 0,08 %C [17, 22].

Visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature primjenjuju se za odljevke koji se rabe na temperaturama od 650 do 1300 °C [17]. Za odljevke koji su izloženi povišenim temperaturama (do 650 °C) mogu se primijeniti niskolegirani čelični ljevovi (npr. Cr-Mo-čelični ljevovi). Primjena na povišenim temperaturama znači primjenu odljevka na temperaturama $0,25T_t < T_p < 0,4T_t$ (T_p – temperatura kojoj je odljevak izložen, T_t – temperatura taljenja). Ako je $T_p > 0,4T_t$ govori se o primjeni na visokim temperaturama [19].

Pri povišenim i visokim temperaturama mijenjaju se svojstva čeličnih odljevaka. Granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti smanjuju se, a istežanje i suženje

poprečnog presjeka povećavaju se s povećanjem temperature primjene. Osim toga na povišenim i visokim temperaturama javlja se puzanje materijala.

Ako se odljevci primjenjuju na povišenim i visokim temperatura, čvrstoća je samo jedan od kriterija pri izboru kvalitete čeličnog lijeva, jer je često osim visoke temperature prisutan i agresivan okoliš na koji čelični lijev također mora biti otporan (npr. oksidacijska atmosfera, redukcijska atmosfera, H₂S itd.)

Ugljični i niskolegirani čelični ljevovi rijetko kad imaju adekvatnu čvrstoću i otpornost na koroziju pri visokim temperaturama u okolišu gdje se inače primjenjuju visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature. Samo visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature imaju zahtijevana mehanička svojstva i otpornost na koroziju tijekom dugotrajnog izlaganja visokim temperaturama i agresivnom okolišu bez prekomjerne ili nepredvidive degradacije. Osim adekvatne čvrstoće i otpornosti na koroziju, neki visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature pokazuju specijalnu otpornost na djelovanje naizmjeničnog zagrijavanja i hlađenja.

Kod čeličnih ljevova koji se primjenjuju na visokim temperaturama ne smiju se odvijati mikrostrukturne pretvorbe koje rezultiraju promjenom volumena. Zbog toga moraju imati feritnu ili austenitnu mikrostrukturu. Feritne kvalitete imaju nižu otpornost na puzanje i veću sklonost ka krhkosti i pogrubljenju zrna tijekom dugotrajnog izlaganja visokim temperaturama [23]. Međutim imaju višu otpornost na plinove koji sadrže sumpor [23].

Razvijen je velik broj različitih kvaliteta visokolegiranih čeličnih ljevova otpornih na visoke temperature da bi se udovoljilo različitim zahtjevima. Prema kemijskom sastavu razlikuju se tri kategorije [17, 22]:

- Fe-Cr-visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature,
- Fe-Cr-Ni-visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature,
- Fe-Ni-Cr-visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature.

Navedeni čelični ljevovi slične visokolegiranim korozijski postojanim čeličnim ljevovima, osim po visokom udjelu ugljika što doprinosi višoj čvrstoći na visokim temperaturama.

Fe-Cr-visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature sadrže od 8 do 30 %Cr i do 7 %Ni. Općenito promatrano, imaju feritnu mikrostrukturu, nisku duktilnost pri sobnim temperaturama i relativno nisku čvrstoću na visokim temperaturama.

Fe-Cr-Ni -visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature sadrže više od 18 %Cr i više od 8 %Ni, pri čemu je udio kroma uvijek viši od udjela nikla. Imaju austenitnu mikrostrukturu. Na visokim temperaturama imaju veću čvrstoću i duktilnost u odnosu na Fe-Cr-visokolegirane čelične ljevove. Osim toga, pokazuju dobru otpornost na umjerene temperaturne cikluse, odnosno naizmjenično zagrijavanje i hlađenje.

Fe-Ni-Cr -visokolegirani čelični ljevovi otporni na visoke temperature sadrže više od 10 %Cr i više od 23 %Ni, pri čemu je udio nikla uvijek viši od udjela kroma. Imaju potpuno austenitnu mikrostrukturu i visoku čvrstoću na visokim temperaturama. Otporni su na značajne temperaturne cikluse, odnosno naizmjenično zagrijavanje i hlađenje, oštre temperaturne gradijente te mnoge reduktivne i oksidativne sredine. Općenito promatrano, pogodni su za komponente koje su izložene temperaturama do 1150 °C. Nedostatak tih čeličnih ljevova je nedovoljna otpornost na okoliš s visokim udjelom sumpora.

Visokolegirani čelični ljevovi otporni na trošenje su visokolegirani manganom. Obično sadrže od 1 do 1,4 %C i 10 do 14 %Mn da bi se ostvarila austenitna mikrostruktura (Hadfieldov čelik). Da bi se ostvarila optimalna svojstva neophodno je da je omjer %Mn/%C > 10. Povećanjem omjera %Mn/%C poboljšava se otpornost na trošenje, žilavost, postojanost

pri niskim temperaturama i sposobnost otvrdnjavanja. Mogu se dolegirati sa određenim količinama kroma, molibdena i nikla u cilju dodatnog poboljšanja svojstava. Najznačajnije svojstvo austenitnih manganskih čeličnih ljevova je vrlo velika sposobnost otvrdnjavanja (očvršćivanja) površinskih slojeva hladnom deformacijom, tj. tijekom primjene. Tijekom hladne plastične deformacije, odnosno tijekom primjene odljevka, pod djelovanjem naprezanja dolazi do fazne pretvorbe austenita u martenzit i otvrdnjavanja (očvršćivanja). Veliki utjecaj na svojstva austenitnog manganskog čeličnog lijeva ima odnos udjela mangana i ugljika.

4.1.2 Željezni ljevovi

Željezni ljevovi su željezne slitine namijenjene oblikovanju metalnih proizvoda isključivo lijevanjem. Talište im je razmjerno nisko, vrlo dobro se lijevaju i daju kvalitetne odljevke. Željezni ljevovi lijevaju se u jednokratne ili u višekratne kalupe. Svojstva odljevaka ovise o njihovoj mikrostrukturi, a ona je određena kemijskim sastavom lijeva, uvjetima tijekom hlađenja i skrućivanja odljevka u kalupu te primijenjenom toplinskom obradom.

Klasifikacija željeznih ljevova može se provesti prema mikrostrukturi, području primjene itd. Na slici 4.3 prikazana je klasifikacija željeznih ljevova prema komercijalnom nazivu ili primjeni te prema njihovoj strukturi.

Općenito gledajući razlikuju se dvije osnovne skupine željeznih ljevova:

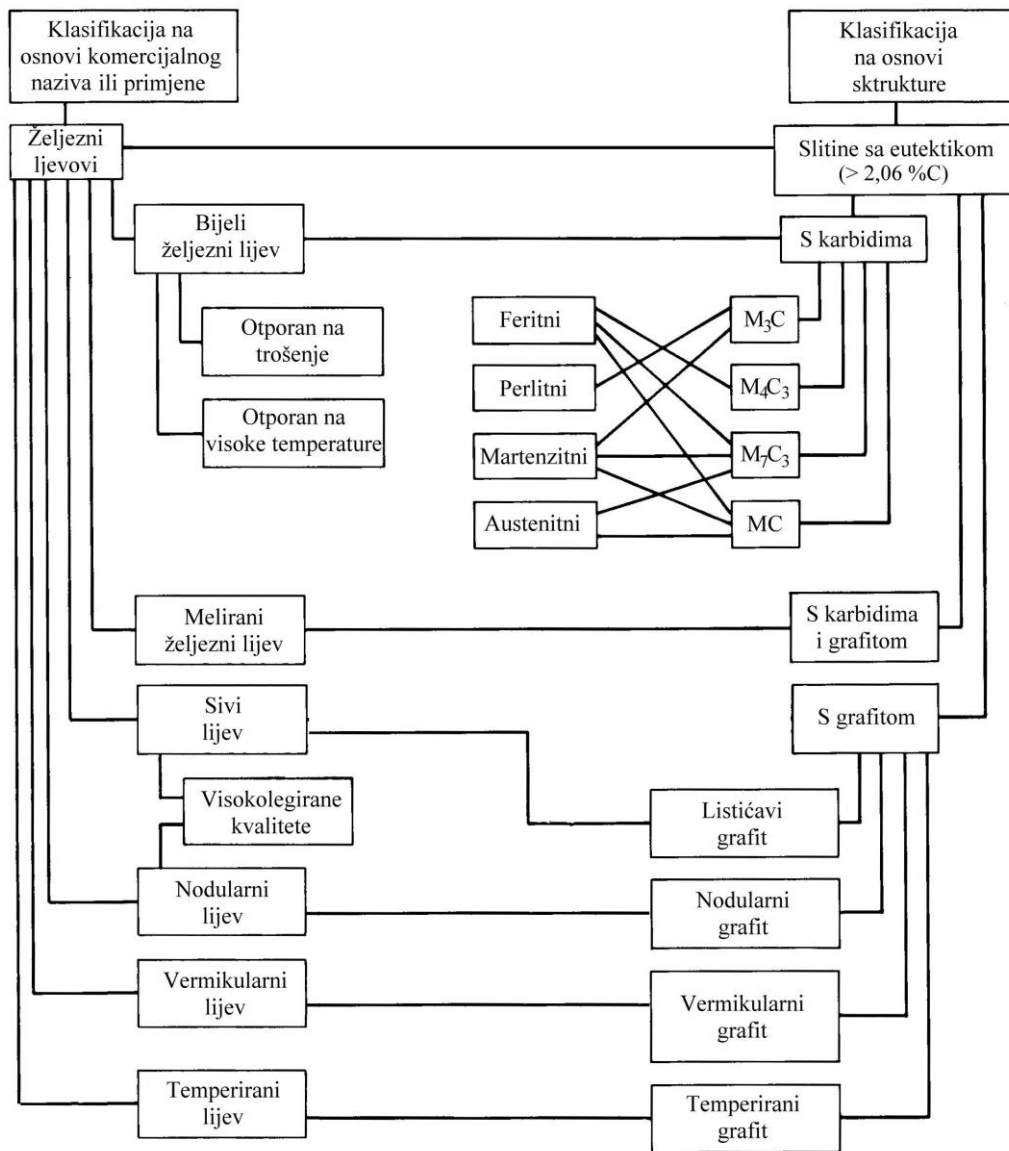
- **željezni ljevovi s grafitom i**
- **željezni ljevovi bez grafita.**

Kod željeznih ljevova s grafitom ugljik je izlučen u obliku slobodnog grafita. Još se nazivaju i **sivi željezni ljevovi**, jer prijelomna površina odljevka ima sivu boju zbog ugljika izlučenog u obliku grafita.

U željeznim ljevovima bez grafita ugljik je izlučen u obliku slobodnih karbida – cementita (Fe_3C) ili nekog drugog miješanog karbida ovisno o kemijskom sastavu lijeva. Još se nazivaju i **bijeli željezni ljevovi** zbog karakteristične bjelkaste boje na prijelomnoj površini odljevaka koja potječe od karbida.

Prema metalnoj osnovi željezni ljevovi mogu se klasificirati na feritne, perlitne, austenitne, martenzitne, bainitne i tzv. „ausferitne“ (izotermički poboljšane) željezne ljevove. U praksi često se željezni ljevovi razvrstavaju na obične, nelegirane ljevove opće namjene i na specijalne ljevove. Najčešće su to visokolegirani ljevovi sa ili bez izlučenog grafita namijenjeni primjeni pri periodičkim opterećenjima i povišenim temperaturama, otporni na oksidaciju, koroziju i trošenje itd.

Svjetska proizvodnja odljevaka od željeznih ljevova u 2012. godini iznosila je ~ 72,5 mil. t [1]. Gledano na ukupnu proizvodnju odljevaka od ljevova na osnovi željeza u 2012. godini, može se zaključiti da je ~ 86,5 % odljevaka odliveno od željeznih ljevova. Značaj željeznih ljevova za proizvodnju metalnih odljevaka proizlazi i iz činjenice da je od ukupne svjetske proizvodnje odljevaka u 2012. godini, ~ 72 % odliveno od željeznih ljevova.



Slika 4.3. Klasifikacija željeznih ljevova [14]

4.1.2.1 Željezni ljevovi s grafitom

U željeznim ljevovima s grafitom grafitne čestice mogu imati različit oblik. Prema obliku izlučenog grafita razlikuju se sljedeće vrste željeznih ljevova s grafitom:

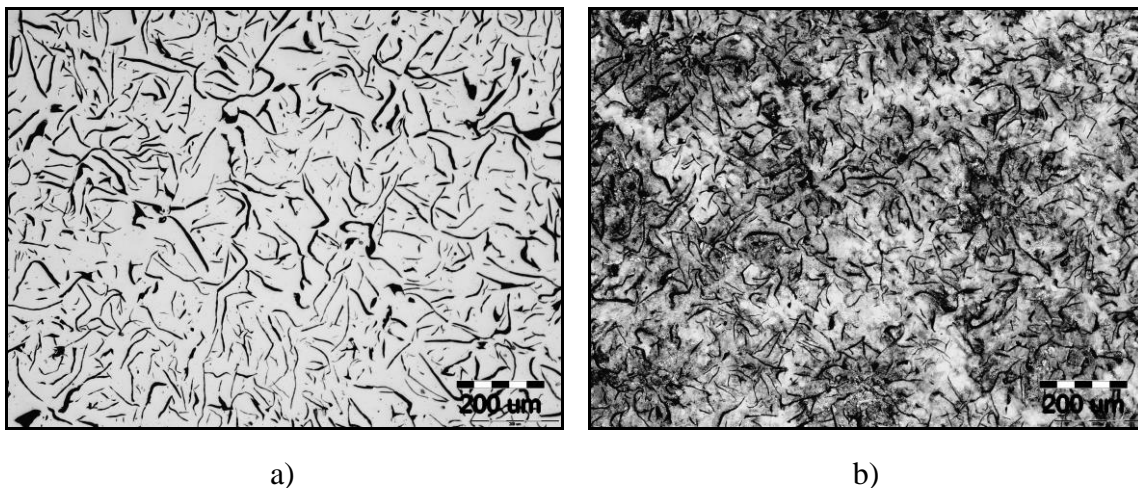
- **sivi ljev**, u kojem je grafit izlučen u obliku listića (lamela),
- **nodularni ljev**, u kojem je grafit izlučen u obliku nodula (kuglica),
- **vermikularni ljev**, u kojem je grafit izlučen u obliku vermikula (crvića) i
- **temperirani ljev**, u kojem grafitne čestice imaju oblik koji podsjeća na nepravilne nodule (kuglice), a naziva se temperirani grafit.

Većina željeznih ljevova s grafitom obično sadrži 3 do 3,5 %C i 2 do 3 %Si, jer silicij promovira izlučivanje ugljika u obliku grafita. Najčešće se ljevaju u jednokratne kalupe i to one izrađene od svježe kalupne mješavine.

4.1.2.1.1 Sivi lijev

Sivi lijev (engl. *Gray Iron*) pripada skupini željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Jedan je od najstarijih materijala iz skupine željeznih ljevova koji se i danas, unatoč brojnim nedostacima, uspješno primjenjuje za proizvodnju odljevaka za mnoga područja primjene. U prilog tome govori i činjenica da je sivi lijev već dugi niz godina materijal broj 1 u skupini ljevova na osnovi željeza po proizvedenoj količini. U 2012. godini svjetska proizvodnja odljevaka od sivog lijeva iznosila je 45,96 mil. t [1]. Od ukupne svjetske proizvodnje odljevaka od ljevova na osnovi željeza u 2012. godini, 54,9 % odnosi se na odljevke od sivog lijeva [1]. Gledano na ukupnu svjetsku proizvodnju odljevaka od željeznih i neželjeznih ljevova u 2012. godini, 45,6 % odnosi se na odljevke od sivog lijeva.

Zbog listićavog oblika izlučenog grafita sivi lijev ima nisku vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, tvrdoću, žilavost, istežanje i modul elastičnosti, ali vrlo dobru strojnu obradivost, sposobnost prigušenja vibracija, toplinsku vodljivost, livljivost, tlačnu čvrstoću, tribološka svojstva, otpornost na koroziju i niske troškove proizvodnje. Na slici 4.4 prikazana je tipična mikrostruktura sivog lijeva u nenagrizenom i nagrizenom stanju.



Slika 4.4. Metalografske snimke tipične mikrostrukture sivog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeni stanje, nital

Mehanička i fizikalna svojstva sivog lijeva direktno ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Tipična mikrostruktura sivog lijeva na sobnoj temperaturi sastoji se od perlitno-feritne metalne osnove i grafitnih listića (slika 4.4). Legiranjem i toplinskom obradom mogu se postići različite strukture metalne osnove, a time i svojstva. 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 raspodjeli grafitnih listića.

Kemijski sastav te brzina hlađenja tijekom i nakon skrućivanja značajno utječu na mikrostrukturu, a time i svojstva odljevaka od sivog lijeva. Uobičajeni sivi lijev sadrži 3 do 3,5 %C, 2 do 2,5 %Si, 0,06 do 0,15 %S, 0,4 do 0,8 %Mn te do 0,2 %P.

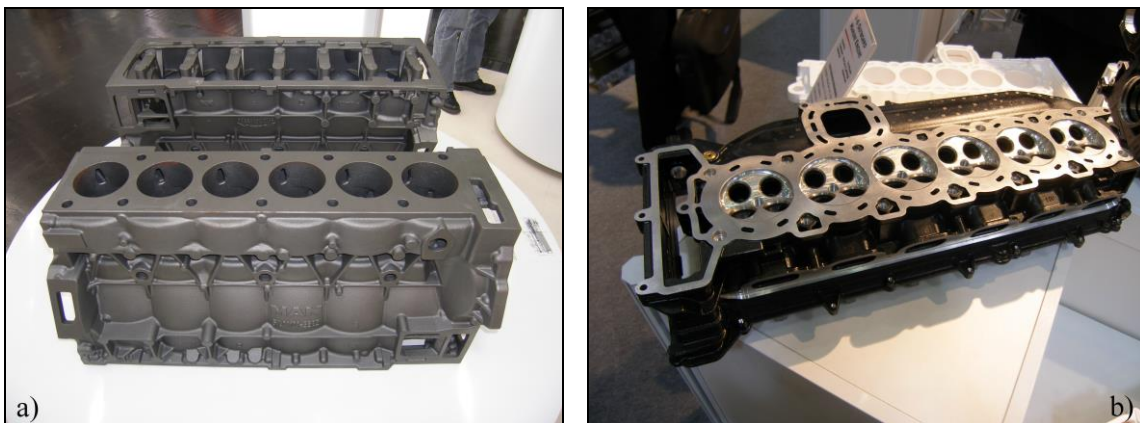
Elementi kao što su npr. silicij, bakar i nikal potpomažu izlučivanje ugljika u obliku grafita tijekom skrućivanja. S druge strane, krom, vanadij, molibden i mangan potpomažu izlučivanje ugljika u obliku karbida tijekom skrućivanja, zbog čega se njihov udio mora strogo kontrolirati. S povećanjem brzine hlađenja tijekom skrućivanja pospješuje se izlučivanje karbida.

Nakon završetka skrućivanja, mikrostruktura uobičajenog sivog lijeva sastoji se od austenita i grafitnih listića. Daljnjim hlađenjem do sobne temperature dolazi do pretvorbe austenita, najčešće u ferit i perlit. Silicij pospješuje stvaranje ferita, dok bakar, kositar i antimon pospješuju stvaranje perlita. Bržim hlađenjem odljevka nakon skrućivanja pospješuje se stvaranje perlita, dok jako brzo hlađenje može dovesti do stvaranja bainita i martenzita. Sporo hlađenje i odsutnost elemenata koji pospješuju stvaranje perlita rezultira stvaranjem ferita. S povećanjem udjela perlita u metalnoj osnovi povećava se granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i tvrdoća sivog lijeva.

Mangan ima specifičnu ulogu u sivom lijevu. Mangan u sivom lijevu neutralizira sumpora pri čemu nastaju stabilni MnS uključci. Time se sprječava formiranje nepoželjnog željeznog sulfida FeS koji se izlučuje po granicama eutektičnih zrna i uzrokuje krhkost. Da bi se sav sumpor vezano sa manganom u MnS, potreban udio mangana u sivom lijevu određuje se prema sljedećoj formuli: $\%Mn = 1,7 \times \%S + 0,3$.

MnS uključci mogu se modificirati tako da djeluju kao mjesta na kojima se izlučuje grafit tijekom skrućivanja. To se postiže postupkom koji se zove cijepjenje taline. Pri tome se u talinu tijekom ispusta iz peći ili tijekom lijevanja u kalup dodaje mala količina FeSi koji sadrži kalcij, aluminijski, barij i/ili stroncij. Time se MnS transformira u kompleksni (Mn, X)S sulfid pri čemu je X = aluminijski, kisik, kalcij, stroncij itd. Takav sulfid je pogodan za nukleaciju, odnosno izlučivanje grafitnih čestica.

Od sivog lijeva izrađuju se razni odljevci za strojogradnju (postolja i dijelovi strojeva, razna kućišta itd.), odljevci za peći i štednjake, konstrukcije, armature za vodovodne sustave, procesnu industriju i energetiku, centrifugalno lijevane cijevi, razni dijelovi za automobilsku industriju (cilindri, klipni prstenovi, kućišta i glave motora (slika 4.5), kočioni diskovi itd.), dekorativni odljevci (ukrasni stupovi i sl.) itd. Niski troškovi proizvodnje i specifična kombinacija svojstava koja udovoljava za mnoga područja primjene zasigurno su glavni razlozi široke primjene ovog materijala.



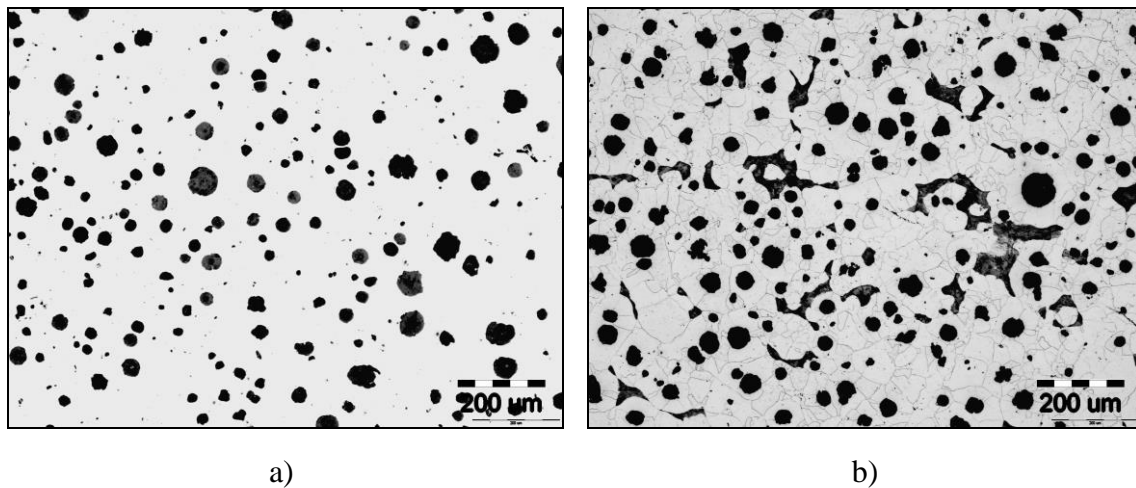
Slika 4.5. Odljevci od sivog lijeva: a) kućište motora, b) glava motora

4.1.2.1.2 Nodularni lijev

Nodularni lijev (engl. *Ductile Iron*) pripada skupini željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Grafit u nodularnom lijevu ima kuglast, odnosno nodularni oblik. Grafitne nodule nisu međusobno povezane, kao što je to slučaj kod grafitnih listića u sivom lijevu. Zbog kuglastog oblika i međusobne nepovezanosti, grafitne nodule u manjoj mjeri slabe metalnu osnovu od listićavog ili vermikularnog oblika grafita. To u konačnici

rezultira povoljnom kombinacijom svojstava – relativno visokom vlačnom čvrstoćom uz zadržavanje povoljne žilavosti. Ta kombinacija svojstava nije prisutna kod ostalih željeznih ljevova.

U odnosu na sivi i vermikularni lijev, nodularni lijev je superiorniji u pogledu vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, tvrdoće, istežanja, žilavosti, modula elastičnosti i otpornosti na trošenje, dok su sivi i vermikularni lijev superiorniji u pogledu toplinske vodljivosti, sposobnosti prigušenja vibracija, livljivosti, strojne obradivosti i troškova proizvodnje. U odnosu na ugljični čelični lijev, nodularni lijev ima bolju livljivost, otpornost na koroziju, strojnu obradivost, sposobnost prigušenja vibracija i niže troškove proizvodnje, a ugljični čelični lijev superiorniji je u pogledu istežanja, žilavosti i modula elastičnosti. Vlačna čvrstoća i granica razvlačenja nodularnog lijeva na nivou su vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja ugljičnog čeličnog lijeva. Vrijednosti vlačne čvrstoće nodularnog lijeva kreću se od 350 do $> 1500 \text{ N/mm}^2$ ovisno o legiranju i primijenjenoj toplinskoj obradi, što u osnovi rezultira različitim strukturama metalne osnove (feritna, perlitna, feritno-perlitna, martenzitna, bainitna, austenitna, ausferitna). Zbog povoljne kombinacije svojstava nodularni lijev zamijenio je u mnogim aplikacijama sivi, čelični i temperirani lijev. Na slici 4.6 prikazana je tipična mikrostruktura nodularnog lijeva u nenagrizenom i nagrizenom stanju.



Slika 4.6. Mikrostruktura feritno-perlitnog nodularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital

Danas postoji više postupaka za proizvodnju nodularnog lijeva. Karakteristika svih postupaka je da se nodularni lijev proizvodi modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne tj. polazne ili bazne taline modifikatorima (tj. predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični kuglasti oblik grafita. Najčešće primjenjivani modifikatori su slitine koje sadrže magnezij. Da bi se dobio nodularni oblik grafita, optimalni udio magnezija u nodularnom lijevu kreće se od 0,035 do 0,05 % [24]. Cerij i lantan također djeluju kao nodulatori, tako da se u manjim količinama dodaju u predlegure koje sadrže magnezij.

Kemijski sastav i brzina hlađenja tijekom i nakon skrućivanja značajno utječu na mikrostrukturu, a time i svojstva odljevaka od nodularnog lijeva. Uobičajeni nodularni lijev sadrži 3 do 3,5 %C, 2 do 3 %Si, 0,008 do 0,015 %S, $< 0,3$ %Mn, 0,035 do 0,05 %Mg te $< 0,1$ %P.

Utjecaj elemenata kemijskog sastava i brzine hlađenja tijekom i nakon skrućivanja je isti kao kod sivog lijeva. Razlika u odnosu na sivi lijev je znatno niži udio sumpora i mangana te dodatak magnezija. U nodularnom lijevu sumpor mora biti znatno niži jer magnezij ima visok afinitet prema sumporu, zbog čega se dodatak magnezija mora povećavati s porastom

udjela sumpora. Pored toga, sumpor u nodularnom lijevu nema tako značajnu ulogu u stvaranju mjesta za nukleaciju, tj. izlučivanje grafita tijekom skrućivanja kao u sivom lijevu. Udio mangana u nodularnom lijevu mora biti što niži jer je udio sumpora nizak i zbog toga što pospješuje stvaranje karbida. Udio magnezija trebao bi biti u navedenom području. Prenizak udio magnezija dovodi do stvaranja nepravilnih oblika grafita, što u konačnici rezultira padom mehaničkih svojstava.

S porastom udjela ferita u metalnoj osnovi nodularnog lijeva povećava se njegova žilavost i istezljivost, a opada granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i tvrdoća. Povećanje udjela perlita u metalnoj osnovi djeluju suprotno.

Više od 1/3 svjetske proizvodnje nodularnog lijeva odnosi se na proizvodnju cijevi, ventila i elemenata cjevovoda (slika 4.7), ~ 1/3 primjenjuje se za odljevke u industriji motornih vozila (slika 4.8) i 1/3 za razne konstrukcijske odljevke (slika 4.9) [24]. Potrebno je naglasiti da je nodularni lijev postigao najveći uspjeh u industriji automobila i kamiona, gdje postoji snažna konkurencija materijala obzirom na performanse i troškove. Jedno od novijih područja primjene nodularnog lijeva je proizvodnja komponenti za vjetroagregate.



Slika 4.7. Cijevi, ventili i razni elementi cjevovoda odliveni od nodularnog lijeva



Slika 4.8. Primjeri tipičnih odljevaka od nodularnog lijeva za automobilsku industriju



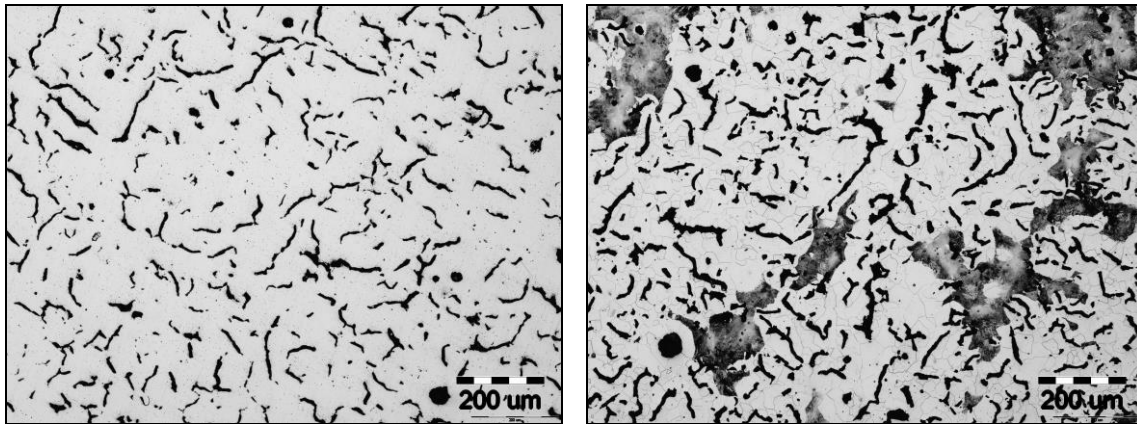
Slika 4.9. Razni konstrukcijski odljevci od nodularnog lijeva

Tijekom 2012. godine u svijetu je proizvedeno 25,17 mil. t odljevaka od nodularnog lijeva, što predstavlja 30,05 % u ukupnoj svjetskoj proizvodnji odljevaka od ljevova na osnovi željeza [1]. Gledano na ukupnu svjetsku proizvodnju odljevaka od željeznih i neželjeznih ljevova u 2012. godini, odljevci od nodularnog lijeva zauzimaju 24,9 % [4].

4.1.2.1.3 Vermikularni lijev

Vermikularni lijev (engl. *Compacted Graphite Iron*) pripada skupini željeznih ljevova kod kojih je ugljik izlučen u obliku grafita. Naziv ovog lijeva potječe od karakterističnog vermikularnog (kompaktnog) oblika grafita koji izgleda poput “crvića” (engl. *worms*) (slika 4.10). Obzirom na svoja karakteristična svojstva, vermikularni lijev ima stanovitu prednost u određenim područjima primjene u odnosu na ostale vrste željeznih ljevova. Premda je ova vrsta lijeva poznata više od 50 godina, njegoa primjena je bila ograničena otežanim postupkom dobivanja, jer se zahtijeva striktna kontrola proizvodnog procesa.

Vermikularni lijev odlikuje se povoljnom kombinacijom svojstava u rasponu između svojstava sivog i nodularnog lijeva, što je prvenstveno povezano s karakterističnim vermikularnim oblikom izlučenog grafita. U odnosu na sivi lijev, vermikularni lijev ima višu vlačnu i dinamičku čvrstoću, granicu razvlačenja, žilavost i modul elastičnosti, ali nešto nižu toplinsku vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija. U odnosu na nodularni lijev, vermikularni lijev ima nižu vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, žilavost, istezanje i modul elastičnosti, ali višu toplinsku vodljivost, otpornost na toplinski umor, dimenzijsku stabilnost pri povišenim temperaturama, sposobnost prigušenja vibracija i bolju livljivost.



a)

b)

Slika 4.10. Mikrostruktura feritno-perlitnog vermikularnog lijeva: a) nenagrizeno stanje, b) nagrizeno stanje, nital

U prošlosti vermikularni lijev je bio rezultat nedovoljne obrade taline magnezijem pri proizvodnji nodularnog lijeva i nije imao praktičnu primjenu. Nakon što su prepoznate pozitivne strane vermikularnog lijeva, značajnija primjena bila je ograničena nepostojanjem pouzdanog postupka proizvodnje. Tijekom 60-tih godina prošlog stoljeća razvijen je dovoljno pouzdan postupak proizvodnje vermikularnog lijeva obradom primarne taline slitinom koja sadrži cerij. Od tada počinje primjena vermikularnog lijeva u industriji motornih vozila, ali još uvijek ne u značajnijem opsegu.

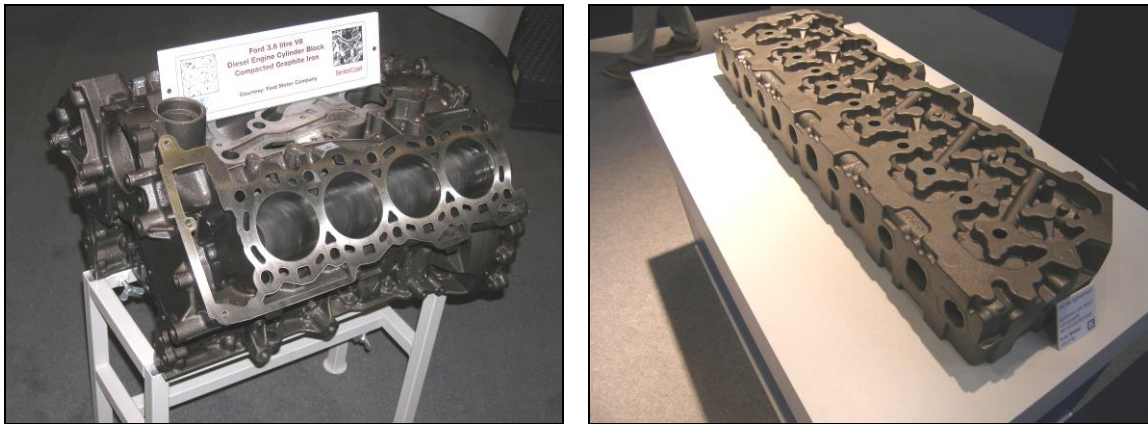
Danas postoji više pouzdanih postupaka proizvodnje vermikularnog lijeva. Prema tim postupcima vermikularni lijev proizvodi se modifikacijom oblika izlučenog grafita primarne (polazne, bazne) taline modifikatorima (predlegurama), pri čemu se dobiva karakteristični vermikularni oblik grafita. Najčešće se primjenjuje postupak obrade taline predlegurom koja sadrži magnezij uz dodatak elemenata koji otežavaju stvaranje nodularnog oblika grafita, tzv. antinodularizatora (npr. titana) i postupak obrade taline samo sa predlegurom koja sadrži magnezij, a zasniva se na postizanja točnog udjela magnezija koji se mora nalaziti unutar vrlo uskih granica (0,008 do 0,012 %Mg).

Kemijski sastav i brzina hlađenja tijekom i nakon skrućivanja značajno utječu na mikrostrukturu, a time i svojstva odljevaka od vermikularnog lijeva. Kemijski sastav vermikularnog lijeva je kao kod nodularnog lijeva, s razlikom da udio magnezija mora biti znatno niži, te se eventualno dodaje titan koji otežava stvaranje nodularnog grafita.

Utjecaj elemenata kemijskog sastava i brzine hlađenja tijekom i nakon skrućivanja je isti kao kod nodularnog lijeva. Posebnu pažnju treba obratiti na udio magnezija. Prenizak udio magnezija rezultira stvaranjem nepravilnih oblika grafita, a moguće je i stvaranje listićavog grafita. Previsok udio magnezija dovodi do stvaranja nodularnog grafita.

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 diesel motorima. Da bi se ostvarila povećana efikasnost motora zahtijevaju se viši tlakovi u cilindrima, više temperature izgaranja goriva te novi sustavi injektiranja i izgaranja goriva. Obzirom na postavljene zahtjeve (viša toplinska stabilnost i čvrstoća) očito je da aluminij i sivi lijev nisu pogodni materijali za izgradnju ovakvih motora. Te činjenice promovirale su vermikularni lijev, koji zbog specifičnog oblika grafita ima povoljniju kombinaciju svojstava u usporedbi sa sivim, odnosno nodularnim lijevom, kao materijal koji se sve više upotrebljava u automobilskoj industriji.

Najčešće se primjenjuje za proizvodnju kućišta (slika 4.11a) i glava (slika 4.11b) motora, ispušnih grana, diskova za kočnice, kućišta turbopuhala, potisnih ploča, cilindara, klipnih prstena itd. Upotreba vermikularnog lijeva omogućuje kompaktniju konstrukciju motora, bolje performanse u pogledu buke i vibracija te bolji odnos snage i mase motora



a)

b)

Slika 4.11. Odljevci od vermikularnog lijeva za automobilsku industriju:
a) kućište motora, b) glava motora

4.1.2.1.4 Temperirani lijev

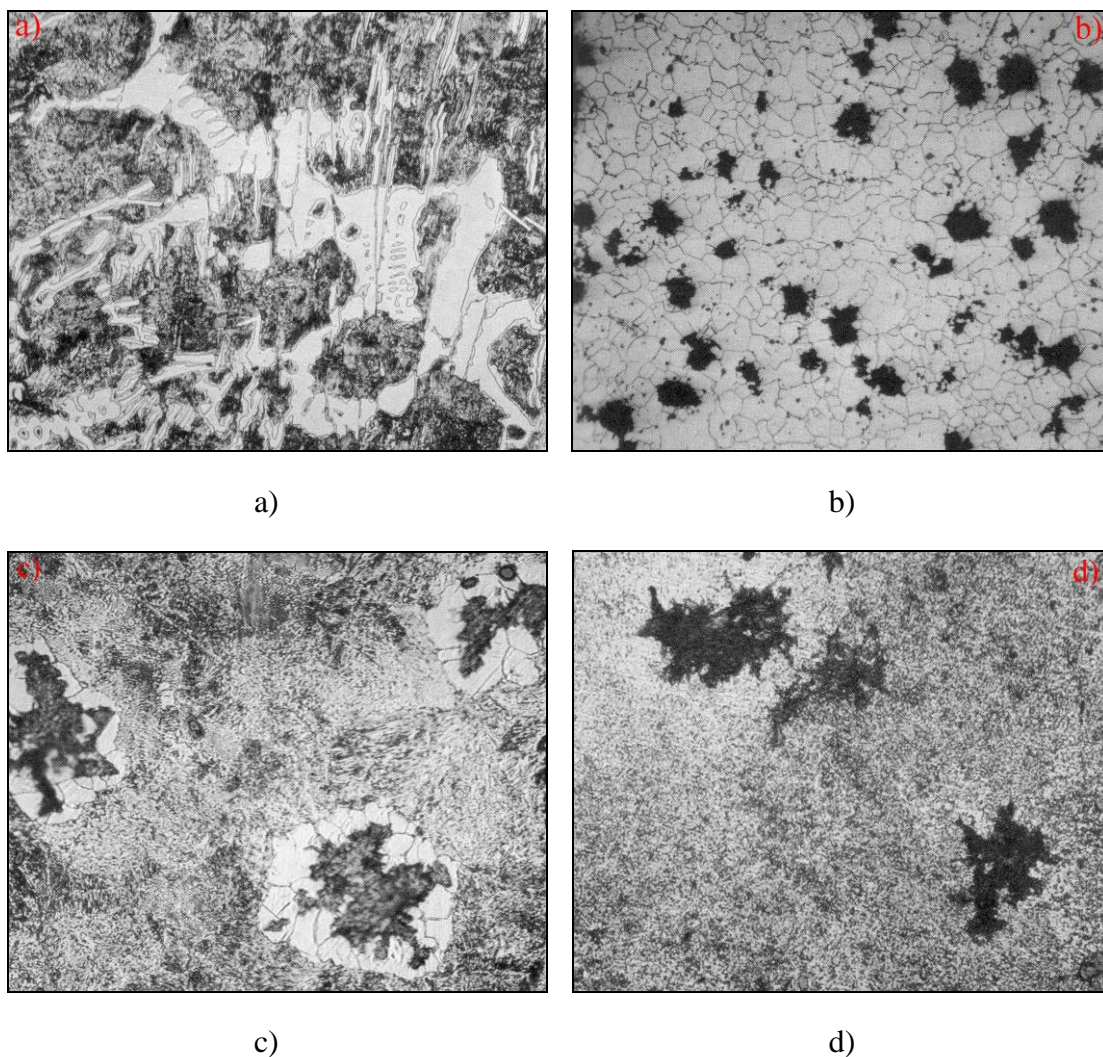
Temperirani lijev (engl. *Malleable Iron*) je vrsta željeznog lijeva koju karakterizira prisustvo tzv. temperiranog ili čvorastog grafita u metalnoj osnovi. Taj oblik grafita u velikoj mjeri podsjeća na nepravilni nodularni grafit.

Temperirani lijev ne dobiva se u lijevanom stanju. Proizvodi se dugotrajnom toplinskom obradom (temperiranjem) odljevaka odlivenih od bijelog željeznog lijeva odgovarajućeg kemijskog sastava [20, 25 - 27].

Mikrostruktura odljevka u lijevanom stanju sastoji se od eutektičnih karbida (cementita) i perlita (slika 4.12a). Naknadnom toplinskom obradom odljevka (temperiranjem) razlaže se cementit pri čemu nastaje slobodni ugljik koji se izlučuje u obliku kompaktnih nakupina (poznatih pod nazivom temperirani ili čvorasti grafit) koje su relativno ravnomjerno raspoređene u feritnoj (slika 4.12b), perlitnoj (slika 4.12c) ili martenzitnoj (slika 4.12d) metalnoj osnovi. Struktura metalne osnove ovisi o udjelu legiranih elemenata i uvjetima pri toplinskoj obradi.

Razlikuju se dvije vrste temperiranih ljevova: bijeli i crni. Bijeli temperirani ljevovi proizvode se toplinskom obradom u kontroliranoj oksidativnoj atmosferi (prisutno određeno razugljčenje), a crni temperirani ljevovi toplinskom obradom u kontroliranoj neutralnoj atmosferi.

Svojstva temperiranog lijeva u velikoj su mjeri slična svojstvima nodularnog lijeva. Zbog nižih troškova proizvodnje, nodularni lijev je u velikoj mjeri potisnuo proizvodnju temperiranog lijeva. Tijekom 2012. godine u svijetu je proizvedeno 1,27 mil. t odljevaka od temperiranog lijeva, što predstavlja 1,5 % od svjetske proizvodnje odljevaka od ljevova na osnovi željeza, odnosno 1,26 % od ukupne svjetske proizvodnje odljevaka od željeznih i neželjeznih ljevova [1].



Slika 4.12. Metalografske snimke mikrostrukture temperiranog lijeva: a) polazna bijeli željezni lijev (eutektični Fe_3C karbid i perlit), 400x; b) feritni temperirani lijev (temperirani grafit i ferit), 100x; c) perlitni temperirani lijev (temperirani grafit i perlit), 400x; d) martenzitni temperirani lijev (temperirani grafit i martenzit), 500x [25]

U većini slučajeva izbor između temperiranog ili nodularnog lijeva zasniva se na ekonomskim razlozima i dostupnosti, prije nego na svojstvima. Međutim, u određenim područjima primjene temperirani lijev ima prednost pred nodularnim lijevom [25]. Temperirani 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 temperirani lijev). Debljine stijenki odljevaka kreću se od 1,5 do 100 mm [25].

Odljevci o temperiranog lijeva imaju široku primjenu u gotovo svim granama industrije: automobilskoj industriji, industriji kamiona, poljoprivrednih i građevinskih strojeva (kućišta diferencijala, ojnice, brijegaste osovine, nosači motora, potisne ploče, poklopci ležajeva, kućišta upravljača, dijelovi automatskih mjenjača, kočione čeljusti itd. (slika 4.13), građevinarstvu (armature za vodovode, plinovode i parovode), elektroindustriji (kućišta i spojnice izolatora itd.), industriji vagona (dijelovi kočnica, spojke, poluge) itd.



Slika 4.13. Primjeri odljevaka od temperiranog lijeva za automobilsku industriju [25]

4.1.2.2 Željezni ljevovi bez grafita

Željezni ljevovi bez grafita, odnosno bijeli željezni ljevovi (engl. *White Irons*) su ljevovi kod kojih se tijekom skrućivanja ugljik izlučuje u obliku karbida, zbog čega imaju bijelu boju na prijelomnoj površini. Veliki volumni udio primarnih i/ili eutektičnih karbida u mikrostrukturi rezultira visokom tvrdoćom. Tvrdoća niskolegiranih bijelih željeznih ljevova kod kojih je udio legiranih elemenata $< 4\%$ obično se kreće od 350 do 550 HB, a tvrdoća visokolegiranih bijelih željeznih ljevova od 450 do 800 HB [28, 29].

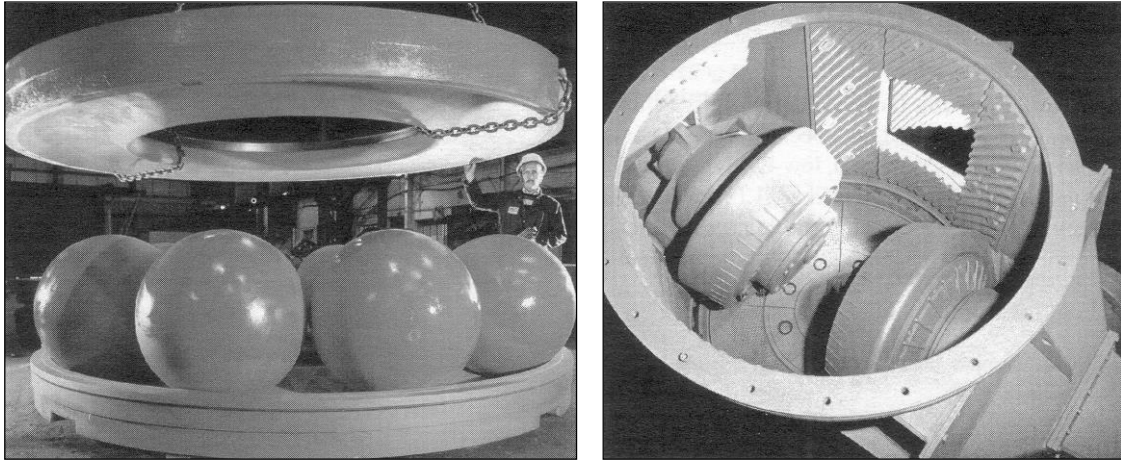
Zbog visoke tvrdoće prvenstveno se upotrebljavaju za odljevke od kojih se zahtijeva otpornost na abraziju (habanje), kao što su komponente u npr. drobilicama i mlinovima te uređajima koji su u kontaktu s abrazivnim materijalima, razni valjci itd. (slika 4.14). Obzirom na područje primjene, često se nazivaju željezni ljevovi otporni na abraziju (engl. *Abrasion - Resistant Cast Iron*).

Struktura metalne osnove kontrolira se dodatkom legiranih elemenata i toplinskom obradom da bi se ostvarila odgovarajuća ravnoteža između otpornosti na abraziju i žilavosti. Žilavost je neophodna pri naizmjeničnim udarnim opterećenjima da bi se izbjegao lom komponente. Svi bijeli željezni ljevovi sadrže krom koji sprječava nastajanje grafita tijekom skrućivanja i osigurava stabilnost karbida.

Povišen ili visok udio kroma poboljšava otpornost na koroziju, oksidaciju i visoke temperature. To omogućuje da se bijeli željezni ljevovi primjenjuju i za druge aplikacije, a ne samo kao materijali otporni na abraziju.

Bijeli željezni ljevovi mogu se klasificirati u 5 skupina, ovisno o legiranju i mikrostrukturi [30]:

- željezni ljevovi s gradijentnom strukturom i perlitni bijeli željezni ljevovi,
- Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi koji sadrže M_3C karbide (poznati pod nazivom Ni-Hard 1, 2 i 3),
- Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi koji sadrže M_7C_3 karbide (poznati pod nazivom Ni-Hard 4),
- visokokromni bijeli željezni ljevovi (sadrže M_7C_3 karbide).



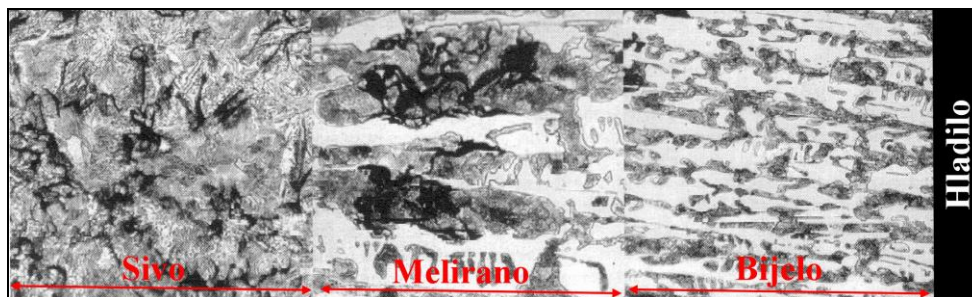
a)

b)

Slika 4.14. a) komponente drobilice za ugljen izrađene od bijelog željeznog lijeva visokolegiranog kromom, b) valjci i oplate u drobilici za usitnjavanje ugljena izrađeni od bijelog željeznog lijeva legiranog kromom i niklom [30]

4.1.2.2.1 Željezni ljevovi s gradijentnom strukturom i perlitni bijeli željezni ljevovi

Kod željeznih ljevova s gradijentnom strukturom, koji se često nazivaju i željezni ljevovi s nedefiniranim udjelom cementita (engl. *Indefinite Chill Irons*) ili melirani željezni ljevovi (engl. *Mottled Cast Irons*), prisutan je postepen prijelaz od bijele ka sivoj strukturi gledajući od površine ka unutrašnjosti odljevka. Prema tome, razlikuje se površinski sloj koji ima potpuno bijelu strukturu i visoku otpornost na abraziju koja potječe od prisutnih karbida, prijelazno područje koje se nalazi ispod prethodno navedenog područja i ima meliranu strukturu (karbidi + grafit), nakon čega slijedi područje u kojem je ugljik u potpunosti izlučen u obliku grafita (slika 4.15). To je najstarija skupina željeznih ljevova otpornih na abraziju, a zbog melirane strukture ne mogu se smatrati istinskim bijelim željeznim ljevovima. Tvrdća željeznih ljevova s gradijentnom strukturom obično se kreće u intervalu od 350 do 500 HB [30].



Slika 4.15. Mikrostruktura željeznog lijeva s gradijentnom strukturom [30]

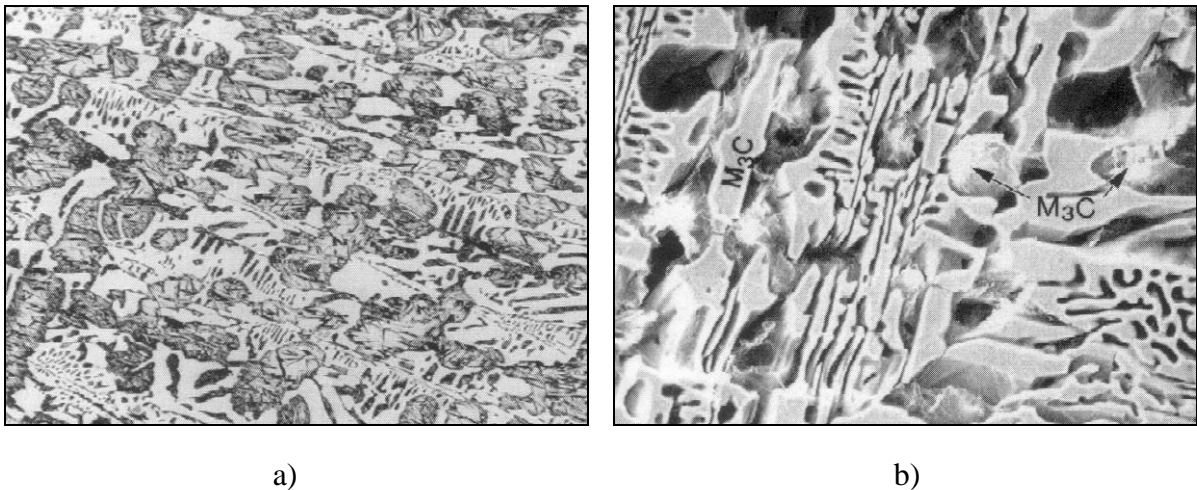
Ako se mikrostruktura odljevka preko čitavog presjeka sastoji od perlita i eutektičnih karbida željeza (cementita), takav ljev naziva se perlitni bijeli željezni ljev jer u mikrostrukturi nije prisutan grafit. Obično sadrži 2,4 do 3,9 %C, 0,4 do 1,5 %Si, 0,2 do 1 %Mn i 2 %Cr.

4.1.2.2 Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi sa M_3C karbidima (Ni-Hard 1, 2 i 3)

Bijeli željezni ljevovi otporni na abraziju legirani niklom i kromom poznati su pod nazivom Ni-Hard i razvijeni su od strane *International Nickel Company (INCO)*. U osnovi radi se o skupini željeznih ljevova kod kojih se nikel upotrebljava kao primarni legirni element za povećanje prokaljivosti. Nikal u koncentracijama od 3 do 5 % efikasno sprječava pretvorbu austenita u perlit, odnosno povećava prokaljivost. Dodatkom kroma od 1 do 4 % promovira se izlučivanje ugljika u obliku karbida, a ne grafita, bez obzira na brzinu hlađenja i sprječava grafitizirajuće djelovanja nikla. Udio ugljika u tim željeznim ljevovima obično se kreće od 2,5 do 3,5 %, udio mangana do 2 %, a udio silicija do 0,8 %.

Kad se krom (ili u određenom opsegu mangan i molibden) upotrebljava za stabiliziranje karbida, karbid se označava kao M_3C , što ukazuje na mješovitu prirodu te faze. M_3C karbidi nastaju eutektičnom reakcijom kao i Fe_3C karbidi.

Visoka tvrdoća je najznačajnije svojstvo Ni-Cr-bijelih željeznih ljevova, a rezultat je stvaranja martenzita u lijevanom stanju umjesto perlita zbog visokih udjela nikla. U većini slučajeva ne dolazi do stvaranja perlita i mikrostruktura Ni-Cr-bijelih željeznih ljevova u lijevanom stanju sastoji se od smjese austenita i martenzita. Tvrdoća Ni-Cr-bijelih željeznih ljevova je kombinacija tvrdoće karbida i metalne osnove. Tipična mikrostruktura Ni-Cr-bijelog željeznog lijeva prikazana je na slici 4.16.

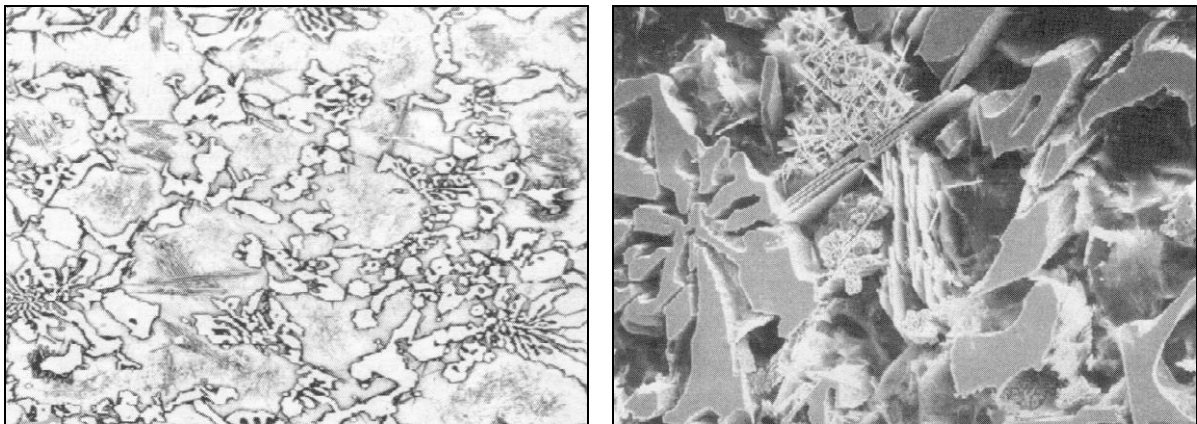


Slika 4.16. Mikrostruktura tipičnog Ni-Cr-bijelog željeznog lijeva: a) metalografska snimka, nagrizeno stanje, povećanje 500x, b) snimka pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizeno stanje, povećanje 1000x [30]

4.1.2.3 Ni-Cr-bijeli željezni ljevovi sa M_7C_3 karbidima (Ni-Hard 4)

Jedan od glavnih nedostataka prethodno razmatrane skupine Ni-Cr-bijelih željeznih ljevova je njihova niska žilavost. Kontinuitet karbidne mreže (M_3C) u mikrostrukturi Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova je glavni razlog za to. Zbog toga je razvijen novi materijal u ovoj skupini željeznih ljevova otpornih na trošenje – Ni-Hard 4. 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 imaju znatno manju kontinuiranost, zbog čega su povoljniji obzirom na žilavost. Tvrdoća ovih materijala varira ovisno o toplinskoj obradi. Mogu se ostvariti tvrdoće kao kod Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova ili više.

Obzirom na drugačiju žilavost i otpornost na abraziju, očito je da se i mikrostruktura Ni-Hard 4 bijelih željeznih ljevova (slika 4.17) razlikuje od mikrostrukture Ni-Hard 1, 2 i 3 bijelih željeznih ljevova.



a)

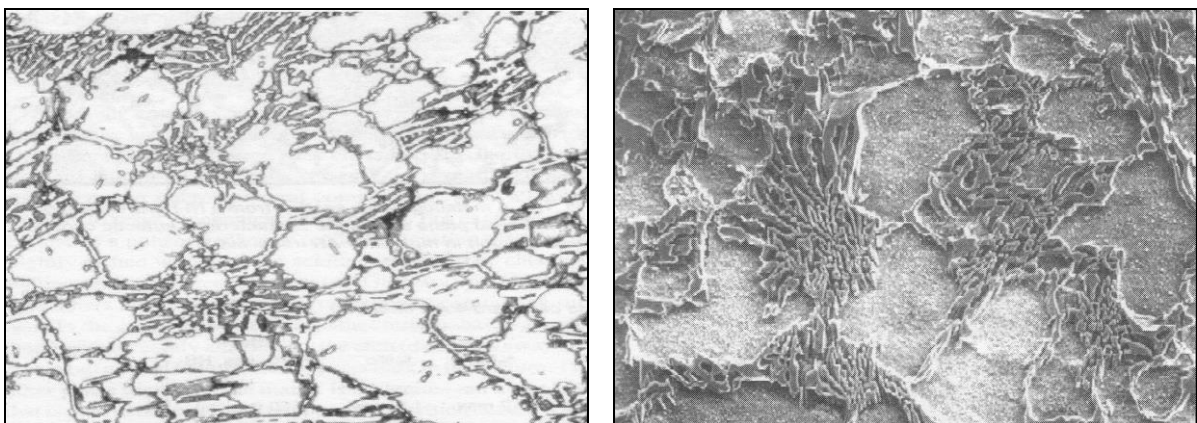
b)

Slika 4.17. Mikrostruktura Ni-Hard 4 bijelog željeznog lijeva: a) metalografska snimka, nagrizeno stanje, povećanje 500x, b) snimka pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizeno stanje, povećanje 1200x [30]

Ni-Hard 4 bijeli željezni ljevovi sadrže 2,5 do 3,6 %C, do 2 %Mn, do 2 %Si, 4,5 do 7 %Ni i 7 do 11 %Cr. Pažljivom kontrolom proizvodnog procesa moguće je u lijevanom stanju ostvariti tvrdoće koje prelaze 600 HB, a toplinskom obradom tvrdoće > 700 HB [30].

4.1.2.2.4 Visokokromni bijeli željezni ljevovi

Visokokromni bijeli željezni ljevovi (slika 4.18) imaju izvrsnu otpornost na abraziju i predstavljaju najbolji izbor za aplikacije u kojima se zahtijeva visoka otpornost na trošenje i žilavost.



a)

b)

Slika 4.18. Mikrostruktura visokokromnog bijelog željeznog lijeva: a) metalografska snimka, nagrizeno stanje, 2 % nital, povećanje 500x, b) snimka pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), nagrizeno stanje, povećanje 320x [30]

Pored visoke otpornosti na abraziju, zbog visokog udjela kroma visokokromni bijeli željezni ljevovi pokazuju dobru otpornost na koroziju u određenim okolišima. Obično sadrže 2 do 3,3 %C, do 2 %Mn, do 1,5 %Si, do 2,5 %Ni, 11 do 30 %Cr te do 3 %Mo.

Mehanička svojstva i otpornost na trošenje kod ove skupine željeznih ljevova prvenstveno su povezana s mikrostrukturom, odnosno finom raspodjelom M_7C_3 karbida. Pravilnim legiranjem može se i u vrlo debelim stjenkama odljevaka postići gotovo jednolična tvrdoća po čitavom presjeku. Tako visoka prokaljivost potječe od kombinacije legiranih elemenata (krom, molibden, nikal i bakar). Prema tome, cilj je, kao i kod ostalih bijelih željeznih ljevova, postići martenzitnu metalnu osnovu u kojoj su prisutni karbidi visoke tvrdoće.

4.2 Ljevarske slitine na osnovi obojenih metala

Među ljevarskim slitinama na osnovi obojenih metala, odnosno neželjeznim ljevovima daleko najveću primjenu imaju ljevarske slitine na osnovi aluminija. Potom slijede ljevarske slitine na osnovi bakra, zatim ljevarske slitine na osnovi magnezija te ljevarske slitine na osnovi cinka. Tijekom 2012. godine u svijetu je proizvedeno 14,05 mil. t odljevaka od ljevarskih slitina na osnovi aluminija, 1,74 mil. t odljevaka od ljevarskih slitina na osnovi bakra, 588 t odljevaka od ljevarskih slitina na osnovi cinka, 227 t odljevaka od ljevarskih slitina na osnovi magnezija te ukupno 487 t odljevaka od ostalih ljevarskih slitina na osnovi obojenih metala [1].

4.2.1 Ljevovi na osnovi aluminija

Aluminij je relativno nov materijal, čija je povijest tek nešto duža od jednog stoljeća. Od svih tehnički upotrebljivanih metala, u Zemljinoj kori najviše je zastupljen aluminij i to sa ~ 8 %. Aluminij se u prirodi ne nalazi kao metal, već kao oksid pomiješan sa željezom, silicijem itd. Proces odvajanja aluminija od navedenih spojeva provodi se elektrolizom.

Osnovne karakteristike aluminija i njegovih slitina su:

- temperatura taljenja čistog aluminija iznosi 660 °C,
- gustoća aluminija čistoće 99,996 % iznosi 2699 kg/m³ na 20 °C,
- aluminij i slitine aluminija su ~ 2,9 puta lakše od čelika,
- mehanička svojstva većine aluminijskih slitina ne mijenjaju se pri niskim temperaturama,
- toplinska vodljivost aluminija, ovisno o čistoći, je ~ 13 puta veća od toplinske vodljivosti nehrđajućeg čelika, a 4 puta veća od toplinske vodljivosti valjanog ugljičnog čelika,
- pri istoj masi, električna vodljivost aluminija je ~ 2 puta veća od električne vodljivosti bakra. Pri tome treba imati u vidu i nemagnetičnost aluminija,
- aluminij je neutrovan i nema negativnih utjecaja na okoliš,
- aluminij se lako lijeva i prerađuje plastičnom deformacijom te obrađuje odvajanjem čestica,
- prirodno se zaštićuje slojem oksida, čime postiže samozaštitu u normalnoj atmosferi,
- aluminij i aluminijske slitine mogu se u potpunosti reciklirati. Pri tome treba ~ 20 puta manje energije nego pri primarnoj proizvodnji aluminija elektrolizom.

Prema kemijskom sastavu razlikuje se:

- nelegirani aluminij, tj. osnovni metal u koji nisu dodani drugi elementi u cilju promjene njegovih svojstava,
- slitine aluminija – slitine u čijem sastavu prevladava aluminij, ali su dodani i drugi elementi u cilju promjene njegovih svojstava.

Nelegirani aluminij dijeli se dalje na:

- primarni aluminij, tj. aluminij dobiven elektrolizom glinice,
- aluminij posebne čistoće - primarni aluminij koji sadrži > 99,995 % Al,
- aluminij visoke čistoće – primarni aluminij koji sadrži od 99,9 do 99,995 % Al,
- sekundarni aluminij – otpadni aluminij nastao u procesu prerade i potrošnje,
- aluminij tehničke čistoće – primarni i sekundarni aluminij koji sadrži min. 99,9 % Al.

Legiranjem primarnog aluminija sa bakrom, silicijem, magnezijem, cinkom ili kositrom, kao glavnim legirnim elementima, dobivaju se osnovne skupine aluminijskih slitina za lijevanje. Unutar tih skupina dodavanjem drugih elemenata mogu se dobiti slitine različitog kemijskog sastava, a time i svojstava. Budući da nelegirani aluminij ima vrlo slaba mehanička svojstva, za proizvodnju odljevaka upotrebljavaju se aluminijske slitine.

Potrebno je istaći da se osim za proizvodnju odljevaka, aluminijske slitine upotrebljavaju i za polukontinuirano lijevanje ingota i gredica, tj. lijevanih poluproizvoda pravokutnog i kružnog poprečnog presjeka koji se potom prerađuju plastičnom deformacijom u limove, ploče, foliju, razne profile itd. Aluminijske slitine za tu namjenu razlikuju se od aluminijskih slitina za proizvodnju odljevaka.

Ljevovi na osnovi aluminija, tj. slitine aluminija namijenjene za proizvodnju odljevaka imaju dobru livljivost, tj. dobro popunjavanju kalupnu šuplinu te nisu sklone stvaranju pukotina. Lijevanje može biti gravitacijsko, niskotlačno ili visokotlačno. U praksi je najviše zastupljeno visokotlačno lijevanje. Mogu se lijevati u jednokratne ili višekratne kalupe.

Udjeli legirnih elemenata u aluminijskim slitinama za proizvodnju odljevaka znatno su viši nego u aluminijskim slitinama od kojih se lijevaju poluproizvodi za daljnju plastičnu preradu. Ovisno o legirnim elementima, razlikuje se pet skupina aluminijskih ljevova za proizvodnju odljevaka [31]:



Al-Cu slitine imaju relativno slabu livljivost u usporedbi s Al-Si slitinama. Međutim, te slitine imaju visoku vlačnu čvrstoću i primjenjuju se kao materijal za kvalitetne odljevke, npr. za zrakoplovstvo. Udio bakra kreće se od 4 do 10 % [31]. Bakar smanjuje otpornost na koroziju tih slitina [32].

Al-Si slitine najviše su upotrebljavane aluminijske slitine u ljevarstvu. Imaju dobru livljivost, visoku otpornost na koroziju te nisku specifičnu težinu [31 - 33]. Tijekom skrućivanja Al-Si slitine odvija se eutektična reakcija na 577 °C pri udjelu silicija od 12,6 % kojom dolazi do pretvorbe taline u dvije krute faze: $\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$.

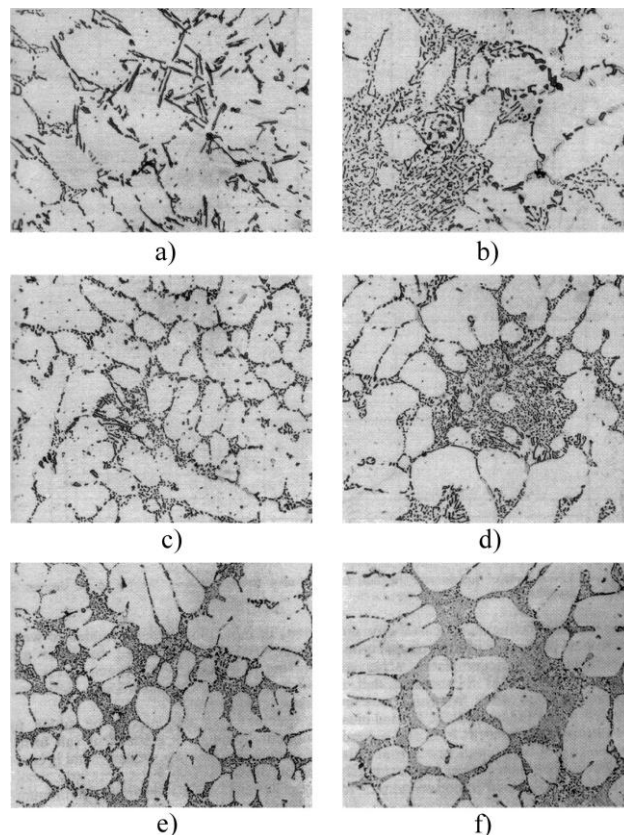
Silicij poboljšava livljivost aluminija, karakteristike napajanja i otpornost na stvaranje toplih pukotina. Udio silicija može iznositi i do 25 % i ovisi o postupku lijevanja. Za lijevanje u jednokratne pješčane kalupe optimalne su slitine koje sadrže 5 do 7 % Si, za gravitacijsko

lijevanje u višekratne kalupe slitine koje sadrže 7 do 9 %Si, a za visokotlačno lijevanje slitine sadrže 8 do 12 %Si [31]. Tvrdoća odljevaka povećava se sa porastom udjela silicija, ali se smanjuje duktilnost i strojna obradivost.

Osim silicija, Al-Si slitine mogu sadržavati i ostale legirne elemente. Bakar poboljšava čvrstoću, tvrdoću, strojnu obradivost i toplinsku vodljivost, ali pogoršava livljivost, otpornost na stvaranje toplih pukotina i otpornost na koroziju. Dodatak magnezija od 0,25 do 0,5 % omogućuje da se Al-Si slitina očvrstne toplinskom obradom, što rezultira poboljšanjem mehaničkih svojstava. Udio željeza od 0,9 do 1 % upotrebljava se u slitinama koje se visokotlačno lijevaju da se spriječi naljepljivanje slitine na kalup. Visoki udjeli željeza rezultiraju padom livljivosti, duktilnosti i strojne obradivosti, zbog čega se kod ostalih načina lijevanja ograničava na 0,8 %. Mangan kontrolira intermetalne faze željeza, što rezultira povećanjem duktilnosti. Osim toga, može se upotrijebiti kao zamjena za željezo u aluminijskoj slitini koja se lijeva visokotlačno da bi se spriječilo naljepljivanje slitine na kalup. Nikal se obično dodaje zajedno sa bakrom da bi se povećala čvrstoća i tvrdoća na povišenim temperaturama.

Poseban značaj kod Al-Si slitina ima usitnjavanje zrna, tj. postizanje sitnozrnate strukture tijekom skrućivanja, te modifikacija oblika silicijske faze izlučene tijekom skrućivanja u cilju poboljšanja mehaničkih svojstava i duktilnosti. Dodatkom predlegure Al-Ti-B povećava se broj mjesta za nukleaciju zrna, što u konačnici rezultira usitnjavanjem, odnosno sitnijim zrnima.

U podeutektnim slitinama tj. slitinama koje sadrže < 12 %Si, modifikacijom se mijenja gruba igličasta morfologija eutektnične silicijske faze u finu vlaknastu (slika 4.19). U nadeutektnim slitinama, tj. slitinama koje sadrže > 12 %Si, modifikacijom se usitnjavaju grube pločaste čestice primarne silicijske faze.



Slika 4.19. Mikrostruktura podeutektnične Al-Si slitine od nemodificirane (a) do potpuno modificirane (b) [31]

Poduteklične slitine modificiraju se dodatkom malih količina natrija, kalcija, stroncija ili antimona. Osim toga, silicijska faza može se modificirati brzim hlađenjem. Nadeuteklične slitine modificiraju se dodatkom fosfora.

Al-Si slitine imaju veliku primjenu u automobilskoj industriji za izradu kućišta i glava motora, kućišta mjenjača, korita za ulje, dijelova ovjesa i karoserije, naplataka itd. (slika 4.20).



Slika 4.20. Dijelovi automobila odliveni od Al-Si slitina [34 - 40]

Al-Mg slitine imaju visoku otpornost na koroziju, osobito u morskoj vodi i dobru obradivost [32]. Dodatkom magnezija povećava se čvrstoća. Zbog smanjene livljivosti zahtijevaju odgovarajući sustav napajanja i ulijevanja. Primjenjuju se za mehanički i toplinski opterećene elemente, npr. glave motora sa unutarnjim sagorijevanjem itd. Udio magnezija kreće se od 4 do 10 % [31].

Al-Zn slitine (uz dodatak bakra, magnezija, kroma ili mangana) imaju dobru strojnu obradivost i karakteristične su po precipitacijskom otvrdnjavanju kod sobne temperature (tzv. proces starenja). Na taj način mogu se postići vrlo visoke čvrstoće bez naknadne obrade. Sam dodatak cinka nema značajniji učinak na svojstva aluminija. Zbog toga se uz cink, kao glavni

legirni element, dodaje bakar, magnezij, krom ili mangan, ili kombinacije navedenih elemenata [31].

Al-Sn slitine upotrebljavaju se za izradu ležajeva. Odljevci mogu sadržavati i do 25 %Sn [31]. Dodatkom kositra ujedno se poboljšava strojna obradivost odljevaka.

4.2.2 Ljevovi na osnovi bakra

Čisti bakar je vrlo teško lijevati zbog sklonosti ka stvaranju pukotina, plinskoj poroznosti i usahlinama [41]. Ljevarska svojstva i čvrstoća bakra poboljšavaju se dodatkom legirnih elemenata, kao što u cink, kositar, aluminij, krom, srebro, berilij, silicij i nikal.

Ljevarske slitine bakra mogu se svrstati u nekoliko skupina [41]:

- bakrene slitine sa min. 99,3 %Cu,
- bakrene slitine sa min. 94 %Cu,
- mjedi,
- bronce,
- slitine bakra i nikla,
- slitine bakra, nikla i cinka i
- slitine bakra i olova.

Odljevci koji moraju imati visoku električnu i toplinsku vodljivost, kao što su električni konektori, lijevaju se od **bakrenih slitina koje sadrže min. 99,3 %Cu**, te srebro i fosfor u tragovima. U tom slučaju ne provodi se legiranje.

Bakrene slitine koje sadrže min. 94 %Cu te srebro i druge legirne elemente, kao što berilij, silicij, nikal, kositar, cink ili krom razvijene su da bi se ostvarila svojstva koja se ne mogu postići primjenom čistog bakra. Radi se o jedinstvenim slitinama jer imaju visoku čvrstoću i toplinsku te električnu vodljivost. Takva svojstva rijetko koji materijal ima.

Mjedi su slitine bakra i cinka. Osim cinka kao glavnog legirnog elemenata, mogu sadržavati manje udjele kositra, olova, željeza, aluminija, nikla i silicija. Mjedi se mogu svrstati u tri skupine:

- Cu-Sn-Zn slitine (crvene, djelomično crvene i žute mjedi),
- žute mjedi visoke čvrstoće (poznate još pod nazivom manganske bronce) i
- Cu-Zn-Si slitine (silicijske mjedi i bronce).

Crvene mjedi sadrže do 8 %Zn, a mogu sadržavati i različite udjele kositra. Boja crvenih mjedi može se povezati s relativno niskim udjelom cinka u njima. Najpoznatija slitina iz ove skupine, komercijalnog naziva 85-5-5-5 (tj. 85 %Cu, 5 %Sn, 5 %Pb, 5 %Zn) upotrebljava se već nekoliko stotina godina.

Djelomično crvene mjedi sadrže više od 8 %Zn. Osim cinka, sadrže kositar i olovo kao legirne elemente.

Žute mjedi sadrže 20 do 39 %Zn. Osim cinka, sadrže nizak udio kositra, olova i aluminija. Imaju ugodnu žutu boju koja se može polirati do visokog sjaja. Visokotlačno lijevanje je najpogodniji postupak za lijevanje tih slitina.

Žute mjedi visoke čvrstoće, poznate još kao manganske bronce, sadrže visok udio cinka te značajne udjele mangana, aluminijske i željeza. Prisutnost željeza u tim slitinama rezultira finim zrnima u strukturi, što u konačnici poboljšava svojstva. Kositar i olovo također mogu biti prisutni u tim slitinama. Od tih slitina lijevaju se brodski propeleri. Najpogodnije je da se te slitine gravitacijski lijevaju u višekratne kalupe.

Silicijske mjedi i silicijske bronce sadrže do 20 %Zn i do 5 %Si. Imaju nisku temperaturu taljenja i visoku livljivost, što je poželjno kod umjetničkog lijeva, lijevanja u višekratne kalupe i visokotlačnog lijevanja.

Bronce su slitine koje osim visokog udjela bakra sadrže jedan ili više legiranih elemenata, s tim da glavni legirani element nije cink niti nikal. Mogu se svrstati u četiri skupine:

- Cu-Sn slitine (kositrene bronce),
- Cu-Sn-Pb slitine (olovno-kositrene bronce),
- Cu-Sn-Ni slitine (nikal-kositrene bronce) i
- Cu-Al slitine (aluminijske bronce).

Kositrene bronce obično sadrže do 20 %Sn. Imaju dobru otpornost na koroziju u vodenim otopinama. Pored toga, imaju umjereno visoku čvrstoću, dobru otpornost na trošenje i niži koeficijent trenja u usporedbi sa čelikom. Pogodne su za lijevanje kliznih ležajeva, klipnih prstena i zupčanika. Gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe je najpogodniji postupak lijevanja za te slitine.

Olovno-kositrene bronce sadrže više od 7 %Sn i 7 %Pb. Otporne su na koroziju i imaju dobra klizna svojstva, zbog čega se upotrebljavaju za izradu kliznih ležajeva.

Aluminijske bronce sadrže do 11 %Al te različite udjele mangana, željeza, i u nekim verzijama, nikla. Aluminijske bronce poboljšavaju čvrstoću i otpornost na oksidaciju. Te slitine imaju visoku otpornost na trošenje, dobru livljivost i zavarljivost. Otporne su na koroziju u mnogim okolišima, kao što su morska voda, kloridi i razrijeđene kiseline. Primjenjuju se za propelere, ventile itd. Ljevaju se u jednokratne pješčane kalupe te gravitacijski u višekratne kalupe.

Slitine bakra i nikla sadrže 9 do 33 %Ni te manje količine mangana (0,05 do 1,5 %) i željeza (0,4 do 1,8 %). Imaju izvrsnu otpornost na koroziju u morskoj vodi i visoku čvrstoću. Primjenjuju se za cijevi, toplinske izmjenjivače, ventile, te razne brodske komponente.

Slitine bakra, nikla i cinka, poznate su pod nazivom niklena ili nova srebra, sadrže 11 do 27 %Ni i 1 do 25 %Zn. Zbog prisutnosti nikla imaju ugodan srebrni sjaj. Karakterizira ih dobra otpornost na koroziju i dobra livljivost te lagana strojna obrada. Primjenjuju se za lijevanje komponenti u industriji hrane, ventile na muzičkim instrumentima, ključeve za vrata itd.

Slitine bakra i olova sadrže 20 % Pb ili više te manji udio srebra. Ne sadrže kositar ili cink.

4.2.3 Ljevovi na osnovi cinka

Slitine cinka uglavnom se lijevaju visokotlačno [42]. Pored toga, mogu se lijevati u jednokratne pješčane kalupe i gravitacijski u višekratne kalupe.

Osnovi legirni element u slitinama cinka je aluminij. Najčešće se udio aluminijske kreće do 3,5 do 4,3 %, premda postoje i slitine koje sadrže 28 %Al. Od ostalih legirnih elemenata upotrebljava se magnezij (do 0,08 %) i bakar (do 5,5 %).

Dodatkom aluminijske povećava se čvrstoća cinka, smanjuje veličina zrna, poboljšava livljivost i minimalizira otapajuće djelovanje tekućeg cinka na ljevarsku opremu od željeza i čelika. Malim dodatkom magnezija minimalizira se osjetljivost na koroziju po granicama zrna koju uzrokuju prisutne nečistoće (olovo, kadmij i kositar). Bakar, kao i magnezij, minimalizira nepoželjni učinak nečistoća te u manjoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću odljevaka.

Automobilska industrija je najveći korisnik visokotlačno lijevanih odljevaka od cinkovih slitina. Kućišta rasplinjača, kućišta pumpi za gorivo, komponente brisača, sirene, komponente hidrauličkih kočnica samo su neki od primjera visokotlačno lijevanih odljevaka od cinkovih slitina za automobilsku industriju.

Osim u automobilskoj industriji, odljevci od cinkovih slitina primjenjuju se u elektroničkim komponentama, za igračke, kućanske aparate itd.

4.2.4 Ljevovi na osnovi magnezija

Gustoća magnezija iznosi samo $1,8 \text{ g/cm}^3$ i manja je od gustoće aluminijske. Upravo niska gustoća je glavni razlog za primjenu magnezijevih ljevova.

Magnezijeve slitine mogu se lijevati visokotlačno, zatim u jednokratne pješčane kalupe te gravitacijski u višekratne kalupe. Pojedine slitine pogodne su i za lijevanje u djelomično rastaljenom stanju te ta polukontinuirano lijevanje.

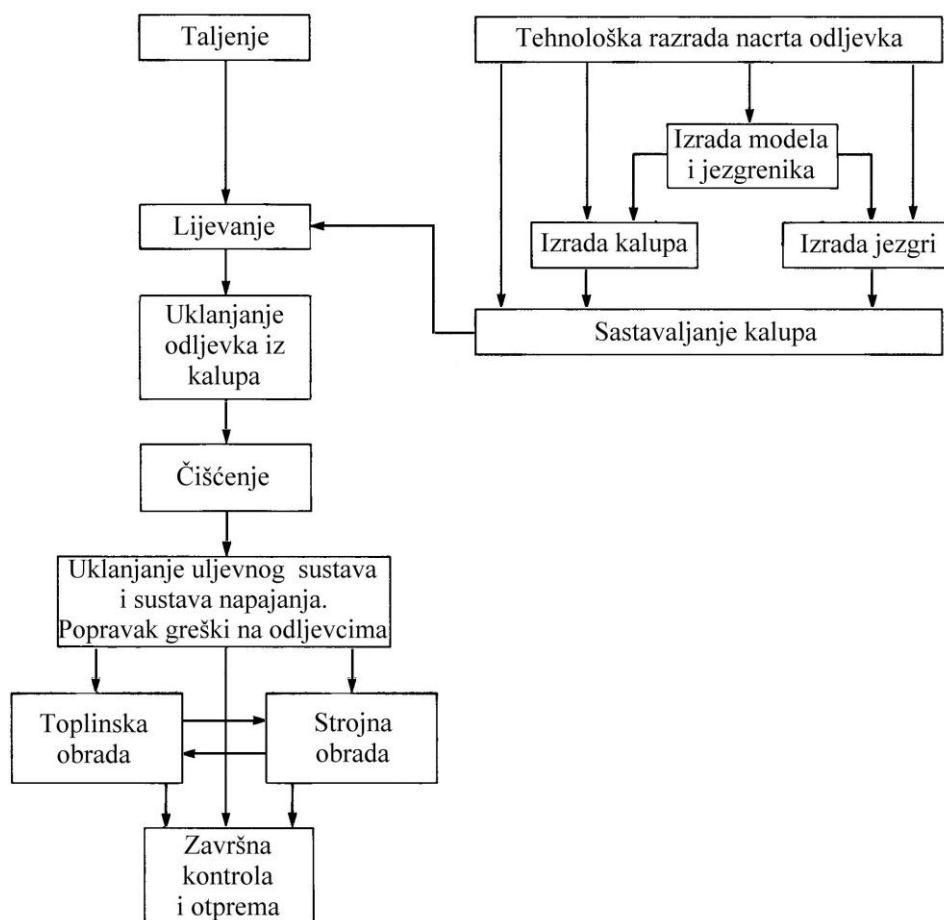
Glavni legirni elementi u magnezijevim slitinama su aluminij, cink, mangan i cirkonij [32, 43]. Dodatkom aluminijske poboljšavaju se mehanička svojstva slitina. Cink i mangan poboljšavaju mehanička svojstva i otpornost na koroziju, ali negativno utječu na livljivost slitina. U slitinama koje se lijevaju u jednokratne pješčane kalupe i gravitacijski u trajne kalupe udio aluminijske obično se kreće od 6 do 10 %, udio cinka od 0,7 do 6 %, udio mangana od 0,1 do 0,15 %, a udio cirkonija od 0,5 do 0,7 %. Pojedine kvalitete sadrže do 3 % elemenata rijetkih zemalja, te niže udjele gadolinija i itrija. U slitinama za visokotlačno lijevanje udio aluminijske kreće se od 2,25 do 9 %, udio mangana kreće se od 0,1 do 0,5 %, dok se udio cinka održava na 0,7 %. Za razliku od slitina za lijevanje u jednokratne pješčane kalupe i gravitacijski u trajne kalupe, pojedine slitine za visokotlačno lijevanje sadrže do 1 %Si ili do 2,4 % Sr ili do 4 % elemenata rijetkih zemalja.

Odljevci od magnezijevih slitina imaju široku primjenu, posebno u slučajevima gdje su njihova mala masa i krutost glavne prednosti. Jedno od velikih područja primjene je zrakoplovna industrija. Drugo veliko područje primjene je automobilska industrija zbog sve većih zahtjeva za energetski učinkovitijim vozilima, što za sobom povlači smanjenje njihove mase. Osim toga, upotrebljavaju se za kućišta motornih pila, kompjutorske komponente, kućišta kamera, komponente u mobilima itd.

5. PROCES PROIZVODNJE ODLJEVAKA I ODJELI U LJEVAONICI

Proizvodnja odljevaka je vrlo složen proces. Ljevaonice sadrže različite odjele, odnosno radne jedinice koje se direktno ili indirektno bave proizvodnjom odljevaka. Da bi zajednički rad pojedinih odjela djelotvorno funkcionirao potrebna je dobra organizacija. Organiziranje i razvoj optimalnog postupka proizvodnje odljevaka zahtjeva teorijska i praktična znanja, kako iz područja lijevanja metala, tako iz srodnih područja.

Na slici 5.1 prikazane su osnovne faze u procesu proizvodnje odljevaka lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe, koji su ujedno i najčešće primjenjivani kalupi u praksi.



Slika 5.1. Osnovne faze u procesu proizvodnje odljevaka lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe

Organiziranje poslova u ljevaonici uglavnom se odvija preko pripreme rada (tj. tehnološke pripreme), koja uz pomoć nacrtu i na osnovi postojeće opremljenosti, zauzetosti kapaciteta, raspoloživog materijala itd. utvrđuje cijenu proizvoda i rok isporuke. Ako se s kupcem postigne dogovor otvara se radni nalog i pristupa proizvodnji odljevaka.

Prva faza u procesu proizvodnje odljevaka je **tehnološka analiza i razrada nacrtu odljevka** dostavljenog od strane kupca, odnosno definiranje elementa neophodnih za proizvodnju odljevaka. Najprije se analizira konstrukcija odljevka s gledišta tehnologije proizvodnje komponenti lijevanjem, a potom definiraju elementi neophodni za tehnološki proces izrade modela, jezgri i kalupa. U okviru tehnološke razrade nacrtu odljevka treba

odrediti položaj odljevka (odljevaka) u kalupu pri izradi kalupa i lijevanju, diobenu ravninu kalupa i modela, dodatak radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka, dodatak za strojnu obradu, ljevarska skošenja, broj jezgri i veličinu jezgrenih oslonaca, sustav ulijevanja i napajanja i njihov položaj u kalupu, sustav odzračivanja kalupa te vrstu i količinu potrebne taline.

Na osnovi razrađenog nacrtu odljevka provodi se **izrada modela odljevka i jezgrenika**. Model odljevka izrađuje se od drveta, metala, plastike, voska, ekspaniranog polistirena itd. ovisno o primijenjenom postupku proizvodnje odljevaka. U jezgrena se izrađuju jezgre pomoću kojih se formiraju otvori, odnosno šupljine u odljevku. Jezgrena se najčešće izrađuju od drveta ili metala.

Pomoću izrađenog modela i jezgrenika **izrađuje se kalup i jezgre**. Odljevci od ljevova na osnovi željeza najčešće se proizvode lijevanjem u jednokratne kalupe. Pri tome se primjenjuju kalupi izrađeni od svježe kalupne mješavine (ljevaonički pijesak + glina kao vezivo + dodatci), kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina (ljevaonički pijesak + anorganska ili organska veziva + dodatci), školjkasti kalupi, keramički kalupi i kalupi izrađeni od ljevaoničkog pijeska bez primjene veziva.

U jednokratnim kalupima pomoću modela formira se kalupna šupljina koja predstavlja negativ odljevka. Odgovarajućim postupcima kalupna mješavina nanosi se na model oko kojeg je postavljen kalupnik. Potrebna čvrstoća kalupa postiže se sabijanjem ako se radi o svježoj kalupnoj mješavini ili kemijskim reakcijama ako se radi o kemijski vezanim mješavinama. Izvlačenjem modela iz kalupa ili podizanjem kalupa sa modela, u kalupu nastaje kalupna šupljina odgovarajućeg oblika definirana konturama modela.

Kalup se obično sastoji od gornje i donje polovice da bi se nakon izrade mogao ukloniti model i postaviti jezgre. Ako se upotrebljavaju jednokratni modeli izrađeni od voska ili ekspaniranog polistirena, kalup može biti izrađen u jednom komadu.

Jezgre se najčešće izrađuju od kemijski vezanih mješavina (ljevaonički pijesak + anorganska ili organska veziva + katalizator) koje očvršćuju pri sobnoj ili pri povišenim temperaturama. Gotove jezgre postavljaju se na odgovarajuća mjesta u kalupu.

Nakon što su izrađene obje polovice kalupa i postavljene jezgre pristupa se **sklapanju kalupa**. Potom se u kalupnu šupljinu ulijeva talina.

Trajni kalupi mogu se upotrijebiti veći broj puta, za razliku od jednokratnih kalupa koji se mogu upotrijebiti samo jedanput. Kod izrade trajnih kalupa nije potreban model za formiranje kalupne šupljine. Kalupna šupljina izrađuje se strojnom obradom odvajanjem čestica. Kad se završi skrućivanje odljevka, kalup se otvara i vadi se odljevak. Nakon toga kalup se ponovo sklapa (zatvara) i spreman je za slijedeće lijevanje.

Za lijevanje metalnih predmeta potreban je tekući metal koji se dobije u talionici **taljenjem uložnih materijala**. Taline željeznih ljevova najčešće se proizvode u kupolnim i indukcijskim pećima. Taline čeličnih ljevova najčešće se proizvode u elektrolučnim pećima te u određenom opsegu u indukcijskim pećima. Za taljenje aluminija najčešće se upotrebljavaju plamene, šahtne i lončaste peći.

Talina se iz peći izliva u lonac i potom prenosi do mjesta na kojem se nalaze kalupi. Nakon toga slijedi **lijevanje taline** iz lonca **u kalupe**. Brzinu lijevanja treba podesiti da se kalup napuni u što kraćem roku uz zaštitu taline od reoksidacije i rasprskavanja te sprječavanje turbulencija u kritičnim presjecima kalupa. Zbog toga se posebna pažnja mora posvetiti projektiranju uljevnog sustava i načinu lijevanja, jer o tome ovisi ne samo kvaliteta proizvoda već i iskorištenje metala, tj. ekonomičnost rada u ljevaonici.

Kod automatskih kaluparskih linija lijevanje se često provodi iz mrežno-frekventne indukcijske peći za održavanje temperature tekućeg metala. Talina je u toj peći zaštićena inertnim plinom koji djeluje određenim tlakom na njenu površinu, što omogućuje točno doziranje i brzo lijevanje.

Nakon skrućivanja i hlađenja **odljevak se vadi iz kalupa**. Jednokratni kalupi moraju se potpuno razrušiti da bi se mogao izvaditi odljevak. Ranije se taj proces odvijao ručno, a danas najčešće na vibracijskim rešetkama. Pri tome kalupni materijal propada kroz rešetku i potom se transportira do **postrojenja za pripremu kalupne mješavine**, a odljevak se otprema u čistionicu. Kalupnici se vraćaju u kaluparnicu.

U čistionici se **odvaja uljevni sustav i sustav napajanja od odljevka**. Najprije se provodi pjeskarenje ili sačmanje, odnosno **čišćenje odljevka**. Kod tih operacija pijesak ili sačma velikom brzinom udara o površinu odljevka čisteći ga od zaostale kalupne mješavine.

Kod čeličnog lijeva priljevni dijelovi (pojila i uljevni sustav) odvajaju se autogenim rezanjem, a kod željeznih ljevova odbijanjem ili mehaničkim rezanjem. Osim toga, u čistionici se provode i popravci odljevaka (reparacijsko zavarivanje).

Nakon čišćenja, odvajanja uljevnog sustava i sustava napajanja, uklanjanja i popravaka eventualno prisutnih grešaka te vizualne inspekcije, odljevci se po potrebi podvrgavaju odgovarajućoj **toplinskoj obradi**. Vrsta toplinske obrade ovisi o efektima koji se žele postići, odnosno o željenoj mikrostrukturi i svojstvima.

Odljevci se prema potrebi mogu podvrgnuti **strojnoj obradi** (obrada pojedinih površina, urezivanje navoja itd.). Da bi se olakšala strojna obrada odljevaka visoke tvrdoće može se prije toga provesti odgovarajuća toplinska obrada. U takvim slučajevima nakon strojne obrade provodi se završna toplinska obrada.

Nakon strojne obrade slijedi **završna kontrola odljevaka**. Kontrola odljevaka često je ograničena samo na vizualnu i dimenzijsku kontrolu. Međutim, odljevci za posebne primjene, kao što su npr. komponente aviona, moraju se dodatno kontrolirati metodama bez razaranja da bi se utvrdila njihova kvaliteta.

6. PROIZVODNJA TALINE

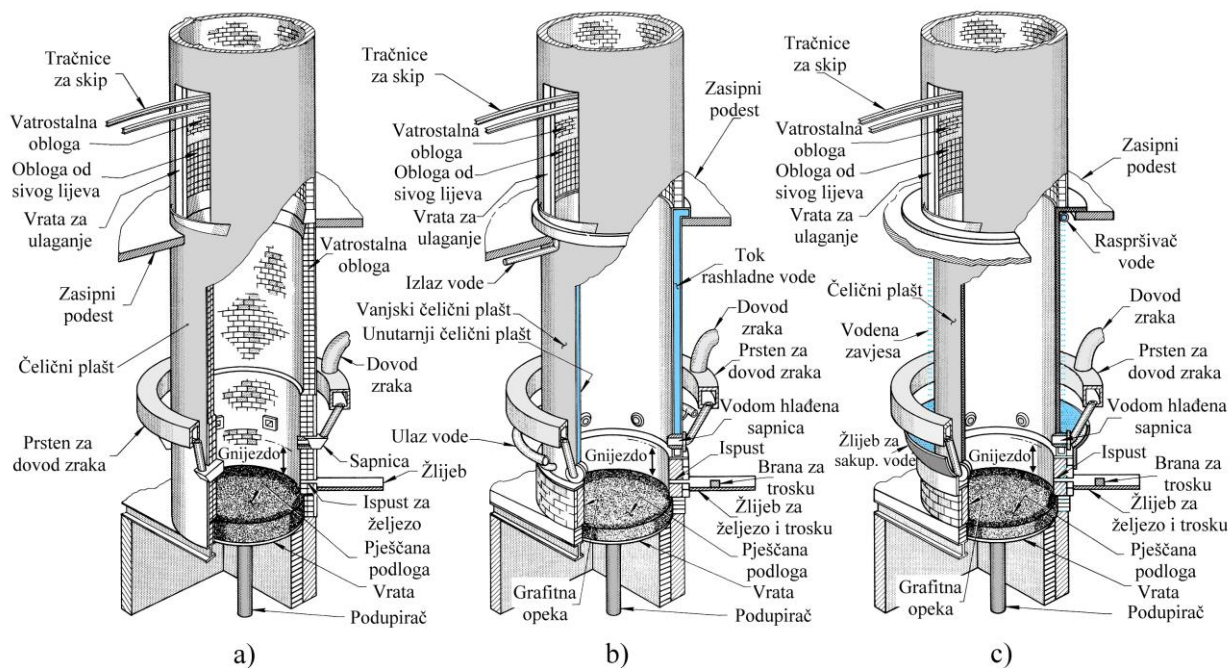
Osim kalupa, za proizvodnju odljevaka potreban je tekući metal, odnosno talina odgovarajućeg kemijskog sastava. U ljevarstvu se za proizvodnju tekućeg metala i održavanje temperature taline najčešće upotrebljavaju sljedeće peći:

- **kupolne peći,**
- **indukcijske peći,**
- **elektrolučne peći,**
- **plamene i šahtne peći te**
- **lončaste peći.**

Željezni ljevovi najčešće se proizvode u kupolnim i indukcijskim pećima. Za proizvodnju talina čeličnih ljevova najčešće se upotrebljava elektrolučna i indukcijska peć. Aluminijske i bakrene slitine tale se u plamenim, indukcijskim i lončastim pećima. Šahtne peći energijski su povoljna opcija taljenje aluminijskih slitina. Lončaste i indukcijske peći pogodne su za taljenje magnezijevih slitina.

6.1 Kupolne peći

Kupolna peć (engl. *Cupola Furnace*) namijenjena je za taljenje krutih uložnih materijala (tj. uložka) za proizvodnju željeznih ljevova [32, 44 – 46]. Sastoji se od vertikalno postavljenog cilindričnog plašta od čelika koji je s unutarnje strane obložen kiselim ili bazičnim vatrostalnim materijalom ili se hladi vodom (slika 6.1).



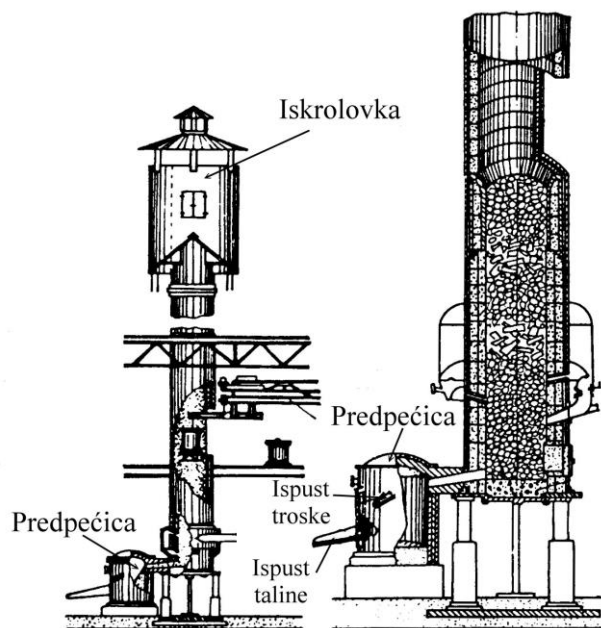
Slika 6.1. a) konvencionalna kupolna peć (s vatrostalnim obzidom), b) vodom hlađena kupolna peć (hladenje strujanjem vode između vanjske i unutarnje stjenke plašta peći), c) vodom hlađena kupolna peć (hladenje špricanjem vode po vanjskom dijelu plašta peći) [44]

Plášť peći postavljen je na postolje peći, odnosno nosivu ploču. Postolje peći postavljeno je na noge peći koje su pričvršćene za temelj peći.

Cilindrični dio peći, odnosno plášť je osnovni dio kupolne peći u kojem se provodi **izgaranje koksa (tj. goriva)** čime se dobiva energija potrebna za taljenje krutih uložnih materijala. U donjem dijelu plášta 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 plášta 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 taline na ispustu iz kupolne peći kreću se oko 1500 °C.

U gornjem dijelu plášta peći nalazi se otvor za ulaganje uloška u peć. Iznad otvora za ulaganje, cilindrični plášť peći prelazi u dimnjak koji odvodi produkte izgaranja. Dimnjak je s unutarnje strane obzidan vatrostalnim materijalom. Gornji dio dimnjaka ulazi u iskrolovku (slika 6.2) čiji je zadatak da zadrži užarene čestice koksa i prašine koje s dimnim plinovima dolaze do dimnjaka.



Slika 6.2. Kupolna peć s predpećicom [32]

Zrak potreban za izgaranje koksa uvodi se kroz sapnice koje su ravnomjerno raspoređene po obodu plášta peći u donjem dijelu. Sve sapnice priključene su na prstenasti cjevovod preko kojeg se zrak dovodi od ventilatora do sapnica.

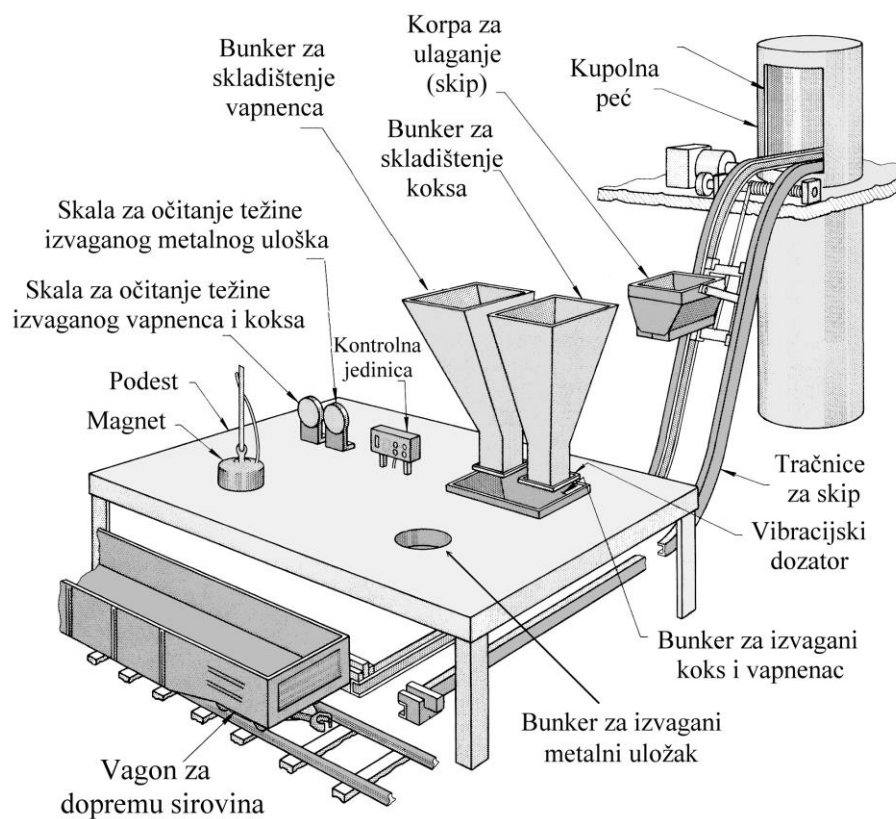
Predpećica je dodatni dio kupolne peći, a postavlja se odmah iza žlijeba za ispuštanje tekućeg metala (slika 6.2). Ona ima višestruku ulogu: služi kao rezervoar taline održavajući temperaturu potrebnu za lijevanje, ujednačava sastav veće količine taline, omogućuje naknadnu doradu taline (legiranje, odsumporavanje) te omogućuje pročišćavanje taline od troske i plinova. Po konstrukciji mogu biti stabilne, nagibne i pokretne. Zagrijevaju se plinom ili tekućim gorivom. Ispust taline i troske iz predpećice provodi se kroz zasebne otvore.

Kod kupolnih peći bez predpećice prikuplja se veća količina taline u gnijezdu peći, odnosno u dijelu od poda do ravnine donjeg reda sapnica. Pri tome je talina duže vrijeme u

kontakta sa koksom, zbog čega se povećava udio ugljika i sumpora u talini, odnosno smanjuje njena kvaliteta. Previsoki udjeli sumpora u talini zahtijevaju dodatno odsumporavanje nakon ispusta iz kupolne peći.

Uložni materijali za kupolnu peć dijele se na metalne i nemetalne. Kao metalni uložni materijal za proizvodnju željeznih ljevova koristi se sirovo željezo, čelični otpad i povratni materijal unutar ljevaonice. Po potrebi se još mogu dodati i ferolegure, ako talinu treba legirati nekim elementom ili treba nadoknaditi gubitke pojedinih elemenata tijekom taljenja. Obično je metalni uložak sastavljen od nekoliko prethodno navedenim materijala. Poznavanje kemijskog sastava komponenti metalnog uložka i pravilni udjeli u uložku od velike su važnosti za dobivanje adekvatnog kemijskog sastava taline. Nemetalni uložni materijal čini koks, koji služi kao gorivo, i talitelj (vapnenac) da bi se formirala troska. Prema potrebi mogu se dodati i sredstva za naugljčenje.

Uložak se u kupolnu peć unosi (tj. šaržira) ručno ili mehaniziranim zasipnim postrojenjima. Ručno unošenje primjenjuje se kod malih kupolnih peći, dok su suvremene kupolne peći opremljene postrojenjima za mehanizirani način unosa komponenti uložka (slika 6.3).



Slika 6.3. Primjer mehaniziranog sustava za ulaganje kupolne peći [44]

Formiranje troske određenog kemijskog sastava i viskoziteta postiže se dodatkom talitelja (tj. vapnenca) u kupolnu peć. Talitelj prevodi u trosku razne nečistoće, kao što je pepeo koksa, razni oksidi nastali izgaranjem (npr. oksidi silicija, mangana, željeza), čestice vatrostalnog materijala i pijeska, nečistoće koje dolaze sa otpadnim sirovim željezom, čeličnim otpadom te povratnim materijalom iz ljevaonice, što rezultira manjim udjelom štetnih primjesa, odnosno većom čistoćom taline. Uz vapnenac može se dodati i fluorit (CaF_2) za poboljšanje viskoznosti troske te kalcijev karbid (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 uložak koji se nalazi iznad nje. To je omogućeno visokom temperaturom taljenja koksne podloge, koja iznosi ~ 2000 °C. Visina koksa iznad sapnica pažljivo se određuje jer od nje ovisi učinak taljenja i temperatura taline. Ta visina treba iznositi 2/3 do 3/4 svjetlog promjera peći. Ugljik iz tog koksa izgara s kisikom iz zraka upuhanog u peć pri čemu nastaje CO₂,
- iznad koksne podloge nalaze se naizmjenični slojevi vapnenca, koksa i metalnog uložka koji čine zasip peći. Uložak se ubacuje u peć da bi se napunila 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 u kratkom vremenskom periodu prve kapljice taline padaju na dno peći. Taljenje u kupolnoj peći odvija se neprekidno tj. peć je uvijek puna. Uložni materijali dodaju se kako se materijal u peći spušta prema dolje.

Sagorijevanjem koksa oslobađa se toplina potrebna za zagrijavanje i taljenje uložka, zagrijavanje tekućeg metala do potrebne temperature te troske. Udio pepela u koksu mora biti < 10 % jer on predstavlja balast koji smanjuje energijsku moć goriva i povećava potrošnju talitelja za formiranje troske. Kemijski sastav koksa mora biti takav da se osigura optimalno naugljičenje taline i efikasnost izgaranja. Posebnu pažnju treba posvetiti udjelu sumpora, jer visok udio sumpora u koksu rezultira visokim udjelom sumpora u talini, što zahtijeva odsumporavanje taline izvan peći pomoću CaC₂, Na₂CO₃ ili CaO + CaF₂. U toku taljenja 30 do 50 % sumpora iz koksa prelazi u tekući metal. Udio isparljivih tvari treba biti < 1 %, a udio ugljika > 90 %.

Pri taljenju uložak se spušta prema dolje i zagrijava nadolazećim plinovima, a plinovi koji nastaju u peći kreću se prema gore predajući svoju toplinu ulošku pri čemu se hlade.

Razlikuju se 4 zone u kupolnoj peći:

- zona predgrijavanja – proteže se od vrha kupolne peći do ~ 700 mm iznad nivoa sapnica. U toj zoni metalni uložak se predgrijava vrućim plinovima koji se dižu prema gore. Vapnenac se u toj zoni razlaže na CaO i CO₂. Na kraju prve zone temperaturu taljenja dostižu samo površinski slojevi metalnog uložka,
- zona taljenja – u toj zoni vrući plinovi tale metalni uložak. Pri tome opada njihova temperatura. Kapljice metala postepeno rastu, odvajaju se od krutog ostatka metalnog uložka i slijevaju prema dolje (prema gnijezdu peći) preko užarenog koksa. Nasumporavanje u ovoj zoni je intenzivnije nego u prvoj zoni. CO₂ koji dolazi iz zone izgaranja može se reducirati sa ugljikom iz koksa u CO, što je vrlo endotermna reakcija.
- zona izgaranja – ta zona je izrazito oksidativna i nalazi se u nivou sapnica. U njoj dolazi do reakcije $C_{(koks)} + O_2 \rightarrow CO_2$ 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 uložka zamjenjuje koks koji je sagorio u zoni izgaranja. Pored toga, u ovoj zoni djelomično izgaraju silicij, mangan i željezo te dolazi do formiranja tekuće troske,

- zona taline i troske – nalazi se ispod sapnica, odnosno u gnijezdu kupolne peći. U toj zoni je talina duže vrijeme u kontaktu s koksom, što rezultira porastom udjela ugljika i sumpora.

Neki elementi iz uložnih materijala, kao što su npr. silicij i mangan izgaraju u kupolnoj peći tijekom taljenja. Te gubitke tijekom taljenja treba uzeti u obzir pri proračunu uloška i nadoknaditi ih dodatkom odgovarajućih ferolegura.

S druge strane, tijekom taljenja u kupolnoj peći raste udio ugljika i sumpora. Stoga se talina s nižim udjelom ugljika može proizvesti ako je prisutan povećan udio čeličnog otpada u ulošku.

Uklanjanje fosfora iz taline u kupolnim pećima s kiselim oblogom nije moguće. Jedino se može provesti u kupolnim pećima sa bazičnom vatrostalnom oblogom. Iskorištenje bakra i nikla u kupolnoj peći iznosi ~ 100 %, kroma ~ 90 %, a molibdena ~ 95 %. Vanadij i kositar obično se dodaju u lonac.

Da bi se poboljšala učinkovitost konstruirane su kupolne peći u kojima se koristi vrući (predgrijani) zrak za izgaranje koksa. Kod tih peći dimni se plinovi pri vrhu peći odvede u posebnu komoru u kojoj potpuno sagorijeva ugljični monoksid i ugljikovodici iz plinova. Zbog dodatno razvijene topline povećava se temperatura dimnih plinova na 750 do 850 °C koji se potom uvode u cjevasti rekuperator. Cijevi se s vanjske strane zagrijevaju dimnim plinovima, a kroz cijevi prolazi zrak koji se zagrijava na ≥ 500 °C i potom dovodi na sapnice. 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 taline na ispustu.

Efikasnost kupolne peći može se poboljšati obogaćivanjem zraka koji se upuhuje u peć sa kisikom. 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 za lijevanje 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.

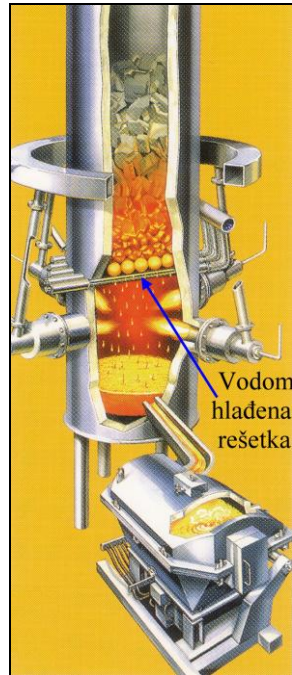
Injektiranje finog koksa kroz sapnice predstavlja efikasan način za povećanje udjela ugljika te zamjenu za primarni koks.

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

Talina s niskim udjelom sumpora može se dobiti primjenom tzv. bezkoksne kupolne peći (engl. *Cokeless Cupola*), odnosno kupolne peći u kojoj se ne koristi koks kao gorivo. U takvoj peći koksna podloga zamijenjena je vodom hlađenom rešetkom na kojoj se nalazi podnica od vatrostalnog materijala (slika 6.4). Ta konstrukcija nosi težinu cijelog zasipa. Ispod vodom hlađene rešetke, po opsegu peći, umjesto sapnica, postavljeni su gorionici koji upotrebljavaju plinovito ili tekuće gorivo. Gorionici mogu raditi s toplim ili hladnim zrakom. Za predgrijavanje zraka primjenjuju se rekuperatori. Nedostaci takvog procesa su: zahtijeva se primjena skupih goriva i potrebno je dodati ugljik u uložak da bi se ostvario željeni udio u talini. Izvjesna korekcija ugljika može se provesti injektiranjem sredstava za naugličenje (petrol koks ili grafit).

Postoji nekoliko izrazitih **prednosti kupolnih peći** pred ostalim agregatima za taljenje u proizvodnji željeznih ljevova. Kupolna peć nudi najniže radne troškove pri velikoj

produkciji. Pored toga, u kupolnoj peći se mogu taliti komadi uložnog materijala velikih dimenzija i mase. Adekvatno predgrijavanje uložnog materijala pri spuštanju od otvora za ulaganje do zone taljenja izostavlja potrebu za potpuno suhim uložnim materijalima. Neki nepoželjni elementi u ulošku oksidiraju se i uklanjaju troskom, naročito aluminij. Važno je napomenuti da talina izrađena u kupolnoj peći ima izvrsnu metaluršku kvalitetu, tj. ima povoljan nukleacijski potencijal za izlučivanje čestica ugljika u obliku grafita tijekom skrućivanja.



Slika 6.4. Shematski prikaz kupolne peći u kojoj se ne primjenjuje koks [47]

Glavni **nedostatak kupolne peći** je nemogućnost trenutnih važnijih promjena kemijskog sastava. Promjene načinjene u metalnom ulošku (promjena udjela ugljika ili ostalih elemenata) ne mogu se uočiti u talini koja je ispuštena sve dok taj novo sastavljeni uložak ne dospije u zonu taljenja. Drugi, vrlo važan nedostatak kupolnih peći, osim kupolne peći u kojoj se ne upotrebljava koks i kupolne peći s bazičnom oblogom, je **visok udio sumpora u talini**. U tim slučajevima talina se mora odsumporiti izvan peći.

6.2 Indukcijske peći

Indukcijske peći (engl. *Induction Furnaces*) su suvremeni agregati za taljenje i imaju **niz prednosti**. To je prije svega brže zagrijavanje i taljenje uloška, mali gubitak elemenata tijekom taljenja kao i ukupnog materijala (< 1 %), relativno jednostavna kontrola kemijskog sastava i primjena te mogućnost postizanja viših temperatura [32, 48, 49]. Indukcijske peći omogućuju znatno lakšu proizvodnju taline željeznog lijeva s nižim udjelom sumpora i pratećih elemenata u odnosu na kupolne peći, jer tijekom taljenja ne dolazi do povećanja udjela sumpora u talini. Talina iz indukcijskih peći zahtijeva vrlo male korekcije kemijskog sastava nakon taljenja uložnih materijala, a čest je slučaj da korekcije gotovo i nisu potrebne. U indukcijskoj peći znatno se lakše korigira kemijski sastav, a legiranje se provodi sigurnije. Indukcijske peći također omogućuju mnogo više pravovremenih promjena kemijskog sastava

taline, kvalitete ili udjela legirnih elemenata. Pored toga, moguća je precizna kontrola temperature prije ispusta taline iz peći.

Osim prednosti postoje i određeni **nedostatci** u odnosu na kupolne peći. To su: veći investicijski troškovi, veći troškovi taljenja zbog visoke cijene električne energije i niska reaktivnost troske zbog niske temperature. Treba istaknuti da taline željeznih ljevova proizvedene u indukcijskim pećima imaju lošiju metaluršku kvalitetu od talina iz kupolnih peći, tj. manje pogodnih nukleacijskih mjesta za izlučivanje ugljika u obliku grafita tijekom skrućivanja. Osim toga, dužim vremenima zadržavanja na povišenim temperaturama u indukcijskim pećima smanjuje se nukleacijski potencijal talina željeznih ljevova.

U indukcijskim pećima ne primjenjuje se koks, što znači da ne postoji kontakt između taline i koksa. Pored toga, u indukcijske peći ne dodaje se vapnenac, što znači da nije moguće uklanjanje fosfora i sumpora iz taline. Zbog toga treba obratiti pažnju na uložni materijal kod proizvodnje željeznih i čeličnih ljevova.

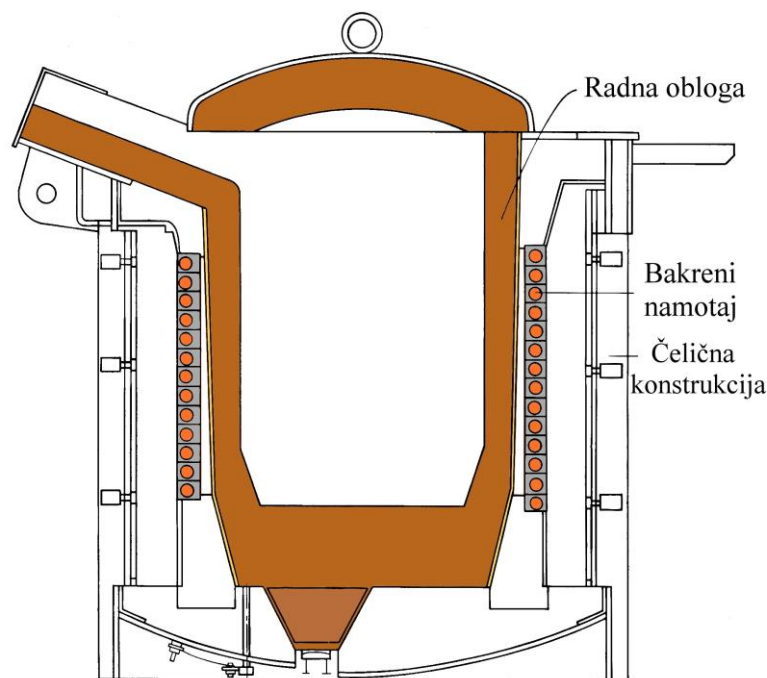
Razlikuju se dvije vrste indukcijskih peći:

- **indukcijske peći s loncem i**
- **kanalne indukcijske peći.**

Premda su obje vrste indukcijskih peći zasnovane na sličnim električnim principima, one se prilično razlikuju u mogućnostima i operacijama. Indukcijske peći s loncem znatno se više upotrebljavaju za taljenje i grijanje taline, dok su kanalne indukcijske peći pogodne za održavanje temperature taline, grijanje i dupleks postupak sa kuponom peći (u proizvodnji željeznih ljevova).

6.2.1 Indukcijske peći s loncem

Indukcijska peć s loncem (engl. *Coreless Induction Furnace*) prikazana je na slici 6.5.

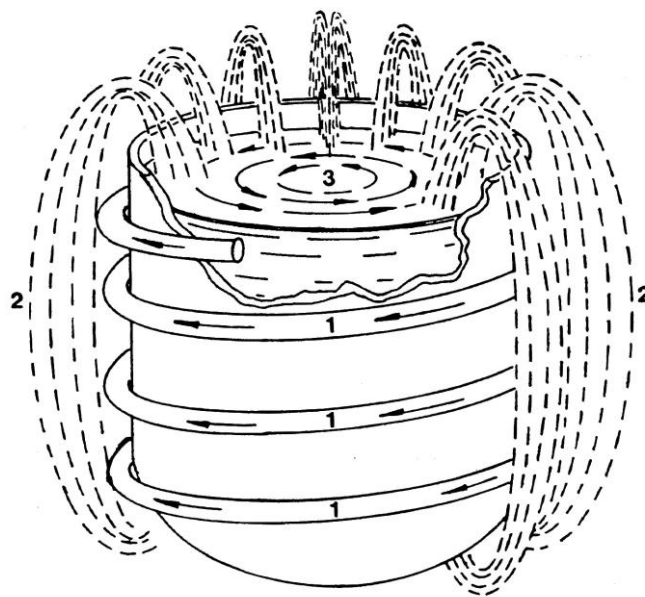


Slika 6.5. Poprečni presjek indukcijske peći s loncem [48]

Glavni elementi peći su lonac obložen vatrostalnim materijalom i vodom hlađeni bakreni vodič koji je u obliku spirale namotan oko lonca. Na vrhu lonca nalazi se žlijeb za izlivanje taline iz peći. Peć je postavljena na masivnu čeličnu konstrukciju koja se nagiba tijekom ispuštanja taline iz peći.

Bitna karakteristika indukcijskih peći je način zagrijavanja uložka, odnosno uložnih materijala. Zagrijavanje uložka provodi se na principu pretvorbe električne energije u toplinu.

Metalni uložak u indukcijskoj peći je okružen namotajem bakrenog vodiča kroz koji prolazi struja. Ta struja stvara magnetsko polje koje prolazi kroz metalni uložak (slika 6.6). Nastalo magnetsko polje rezultira tokom struje u metalnom ulošku. Točnije rečeno, magnetsko polje prolazeći kroz metalni uložak inducira napon u njemu, nakon čega slijedi tok struje u metalnom ulošku. Kad struja teče u metalnom ulošku elektroni se sudaraju s atomima metala koji zbog toga počinju vibrirati, a energija tih vibracija očituje se kao toplina. Prema tome, metal se zagrijava jer pruža otpor toku struje.



Slika 6.6. Princip taljenja uložnih materijala i zagrijavanja taline u indukcijskoj peći (1 – tok struje kroz namotaj vodiča oko lonca peći, 2 – magnetsko polje koje je nastalo zbog toka struje kroz namotaj vodiča oko lonca peći, 3 – tok struje u uložnom materijalu) [50]

Intenzitet napona induciranog u metalnom ulošku direktno ovisi o jakosti magnetskog polja. Jakost magnetskog polja je definirana pomoću gustoće magnetskog polja. Što je veća gustoća magnetskog polja veća je i njegova jakost, a time i veći tok struje.

Zbog toka struje u metalnom ulošku stvara se magnetsko polje koje je suprotnog smjera u odnosu na magnetsko polje koje prolazi kroz metalni uložak, a koje je nastalo zbog toka struje kroz namotaj bakrenog vodiča oko lonca peći. Magnetsko polje u metalnom ulošku nastoji spriječiti dublje prodiranje magnetskog polja koje je nastalo zbog toka struje kroz namotaj bakrenog vodiča oko lonca peći u metalni uložak. To se naziva „skin“ efekt. Ako se tok struje kroz namotaj vodiča oko lonca peći odvija u smjeru kazaljke na satu, tok struje u metalnom ulošku odvija se u suprotnom smjeru. Zbog „skin“ efekta jakost magnetskog polja je veća (a time i tok struje) uz stijenke lonca peći.

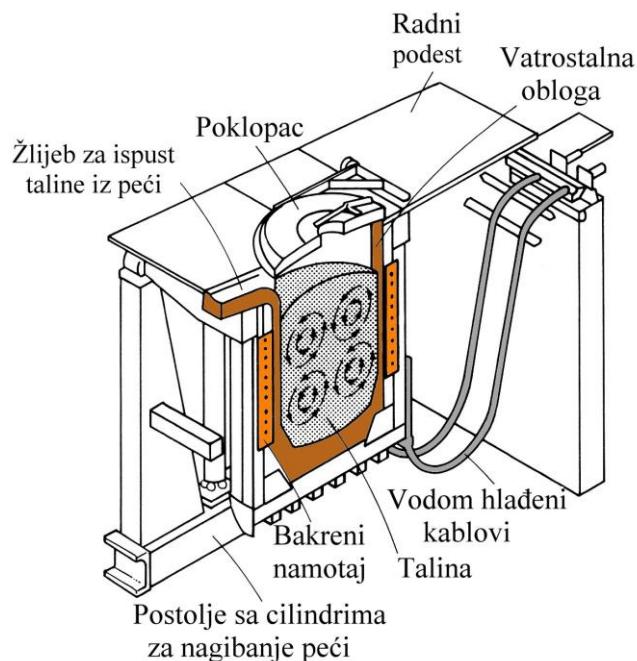
Brzina taljenja u indukcijskoj peći direktno ovisi o intenzitetu toka struje kroz uložni materijal. Električna struja prodire u dubinu komada prema slijedećoj jednadžbi:

$$a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (6.1)$$

gdje je: a – dubina prodiranja struje u metalni uložak, ρ – specifični električni otpor metala, μ – magnetska permeabilnost, a f – frekvencija struje.

Kruti uložak počat će se taliti ako je intenzitet toka struje dovoljno velik. Ako su komadi uložnog materijala mali, a nije ostvaren vrlo dobar kontakt između njih, značajno se povećava duljina električnog kruga, odnosno puta toka struje kroz uložni materijal. Dulji put toka struje, odnosno duži električni krug rezultira smanjenjem intenziteta toka struje, a time i brzine taljenja. Dovoljan intenzitet toka struje može se postići ako je dubina prodiranja „ a “ (jednadžba 6.1) mala. Budući da su ρ i μ konstante, treba povećati frekvenciju. S povećanjem frekvencije „skin“ efekt je jače izražen i povećava se brzina taljenja. 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.

Osim što inducira napon i tok struje u metalnom ulošku, magnetsko polje djeluje određenom silom na tekući metal u loncu peći što rezultira gibanjem, odnosno miješanjem taline (slika 6.7). Na taj se način postiže intenzifikacija taljenja te bolja kemijska i toplinska homogenost taline.



Slika 6.7. Poprečni presjek indukcijske peći s loncem. Može se vidjeti miješanje čime se poboljšava homogenost taline [48]

Miješanje je direktno određeno induciranom snagom, a obrnuto proporcionalno korijenu frekvencije. Prema tome, višom snagom i nižom frekvencijom postiže se intenzivnije miješanje. Zbog miješanja u indukcijskoj peći s loncem, uložni materijal odmah je uronjen u talinu, što rezultira minimalnim gubitcima zbog oksidacije. Taj efekt je posebno izražen kod taljenja uložka malih dimenzija (manje mase).

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

- **niskofrekventne ili mrežnofrekventne indukcijske peći s loncem,**
- **srednjefrekventne indukcijske peći s loncem.**

Niskofrekventne ili mrežnofrekventne indukcijske peći s loncem rade na frekvenciji mreže kojom se doprema električna energije (50 Hz u Europi i 60 Hz u Americi). Karakteristika tih peći je da za efikasan rad zahtijevaju da je u loncu peći uvijek prisutna određena količina taline jer je „skin“ efekt slabiji pri niskim frekvencijama. U praksi to znači da se nakon ispuštanja 20 do 35 % taline iz peći provodi ulaganje krutog uloška u topli ostatak, odnosno ostatak taline. Takvim načinom rada (naizmjenično ispuštanje i ulaganje) osigurava se adekvatan unos energije i miješanje taline, smanjuju varijacije u kemijskom sastavu i postiže bolja konzistentnost kvalitete taline, jer se novi uložni materijal postepeno dodaje. Ako se lonac peći u potpunosti isprazni, vrijeme taljenja počevši od hladnog krutog uloška je produženo. Stoga u praznu peć treba uliti određenu količinu taline ili upotrijebiti kruti uložak iz jednog komada čija veličina mora iznositi barem 20 % ukupnog kapaciteta peći. Taj veliki komad uloška treba staviti na dno peći, nakon čeg slijedi ulaganje ostalih komponenti uloška. Glavni nedostatak niskofrekventnih ili mrežnofrekventnih indukcijskih peći s loncem povezan je s pražnjenjem lonca, odnosno produženim taljenjem ako u peći nije prisutna talina (topli ostatak).

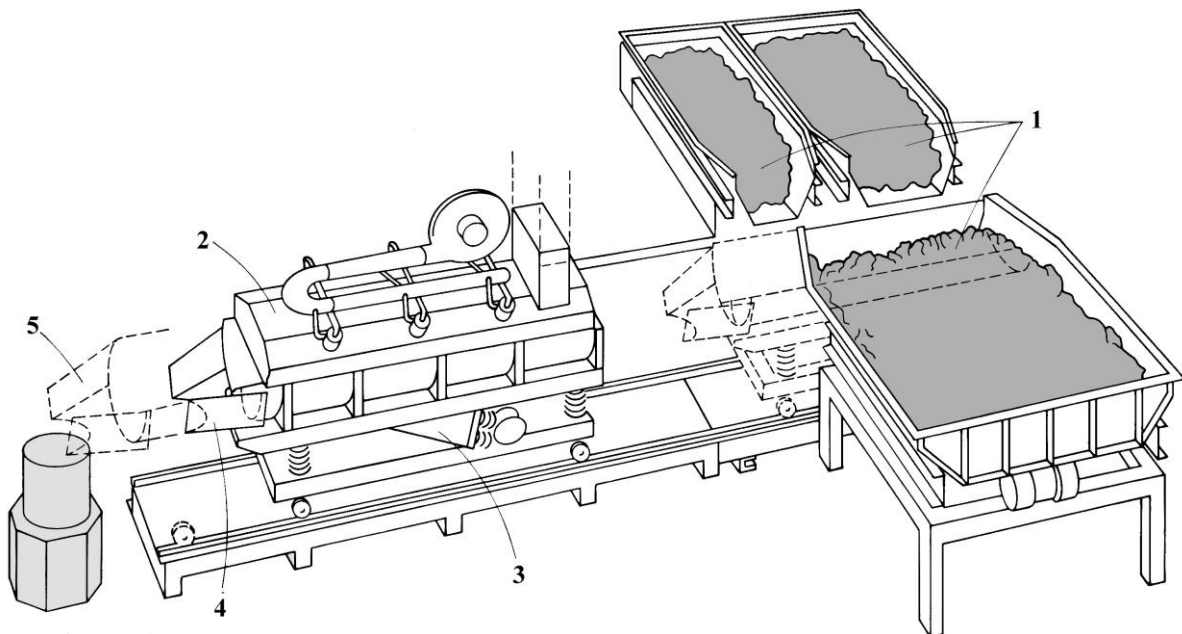
Kod srednjefrekventnih indukcijskih peći s loncem mrežna frekvencija se elektroničkim putem konvertira u više frekvencije. Srednjefrekventne peći mogu raditi na frekvencijama do 10000 Hz. Prednosti srednjefrekventnih indukcijskih peći s loncem u odnosu na mrežnofrekventne je mogućnost povećanja snage bez potrebe za povećanjem njihove veličine. Mogu se primijeniti znatno više snage uz održavanje miješanja taline na željenom nivou. Toplinski gubici, koji su funkcija veličine peći, smanjeni su i ukupna efikasnost peći je povećana. Pored toga, te 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. Toplinski učinak srednjefrekventnih peći iznosi 55 do 65 % i danas su više zastupljene u praksi od mrežnofrekventnih indukcijskih peći s loncem.

Smanjenje potrošnje električne energije i povećanje produktivnosti indukcijskih peći s loncem može se postići predgrijavanjem uloška plinom. Pored toga, na taj način postiže se veća sigurnost rada jer se uz predgrijavanje provodi i sušenje uloška. Na taj način uklanja se vlaga sa uloška koja može rezultirati nastajanjem para i eksplozijama u peći. Tipičan primjer mehaniziranog sustava za sušenje i predgrijavanje uloška za indukcijske peći s loncem prikazan je na slici 6.8.

Uložni materijal se nakon vaganja uvodi u komoru za sušenje i predgrijavanje koja je obložena vatrostalnim materijalom i opremljena gorionicima na plin. Direktni udari plamena na uložak moraju se izbjeći, posebno ako je uložni materijal male debljine, jer se mogu pojaviti gubici uslijed oksidacije. Tipične temperature koje se primjenjuju za sušenje kreću se oko 315 °C, a za predgrijavanje oko 540 °C. Predgrijavanjem se može postići ušteda električne energije od 100 do 150 kWh/t i povećanje brzine taljenja za 10 do 15 %. U cilju postizanja maksimalnog učinka predgrijavanja na potrošnju električne energije za taljenje i povećanje produktivnosti, važno je predgrijani uložni materijal što brže uložiti u indukcijsku peć.

Ako se u indukcijsku peć s loncem ulaže nečist uložni materijal, formira se troska koja potječe od raznih nečistoća i hrđe s otpadnog metalnog uloška 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 eroziju vatrostalne obloge peći, zbog čega se mora često uklanjati iz peći.



Slika 6.8. Shematski prikaz mehaniziranog sustava za sušenje i predgrijavanje uložka za indukcijske peći s loncem (1- bunker za vaganje uložnog materijala, 2 - komora za sušenje i predgrijavanje, 3 – mehanizam za prijenos materijala, 4 i 5 – aparatura za ulaganje peći) [48]

Srednjefrekventne indukcijske peći posebno su pogodne za proizvodnju niskougličnih nehrđajućih čelika ($C < 0,03 \%$) jer se ne primjenjuju grafitne elektrode kao kod elektrolučnih peći, zbog čega ne dolazi do naugličjenja taline. Međutim, posebnu pažnju treba obratiti na uložni materijal jer se u indukcijskoj peći ne može provesti rafinacija, tj. uklanjanje elemenata (prije svega fosfora i sumpora) kao elektrolučnoj peći.

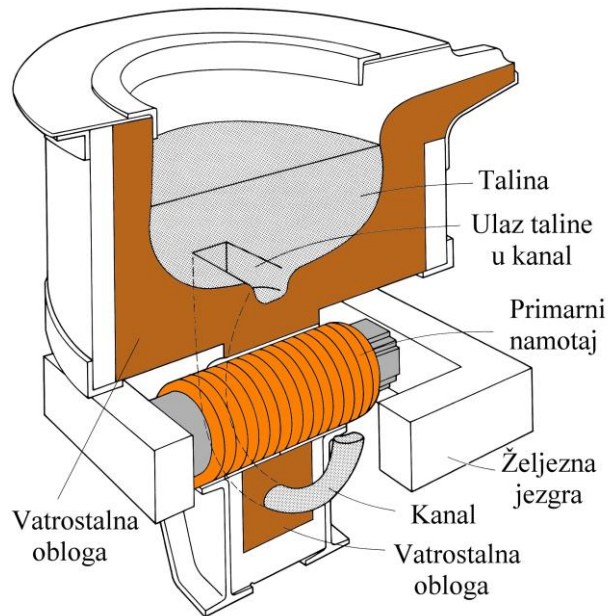
Kod izbora indukcijskih peći s loncem treba voditi računa o metalnom ulošku. Ako se predviđa upotreba sitnijeg uložka ili ako se kemijski sastav često mora mijenjati treba instalirati srednjefrekventnu indukcijsku peć s loncem. Ako je na raspolaganju krupniji uložak može se upotrijebiti mrežnofrekventna indukcijska peć s loncem.

6.2.2 Kanalne indukcijske peći

Kanalna indukcijska peć (engl. *Channel Induction Furnace*) u osnovi predstavlja transformator koji se sastoji od željezne jezgre s primarnim namotajem (slika 6.9). Kao sekundarni namotaj služi talina u kanalu peći koji prolazi oko primarnog namotaja. Te peći uglavnom se izvode kao niskofrekventne.

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 zatvoren krug unutar kojeg se nalazi vodom hlađeni primarni namotaj s jezgrom od transformatorskog lima. Kad 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 taline zbog elektromagnetskih sila toplina se prenosi i na metal u koritu peći putem konvekcije. Takav 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 talina u kanalu (kanalima).



Slika 6.9. Poprečni presjek kanalne indukcijske peći [48]

Zbog navedenih karakteristika kanalnih indukcijskih peći, prije ulaganja krutog uložka treba uliti rastaljeni metal u peć zbog ispunjenja kanala. To pretpostavlja dobavu rastaljenog metala iz neke druge peći. Da bi se to izbjeglo, u slučaju prekida taljenja drži se stalno manja količina taline u peći. Odgor materijala u tim pećima je nizak.

Kanalne indukcijske peći mogu biti stabilne ili nagibne. Nagibne peći omogućuju lakši rad jer imaju hidraulički mehanizam za nagibanje.

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

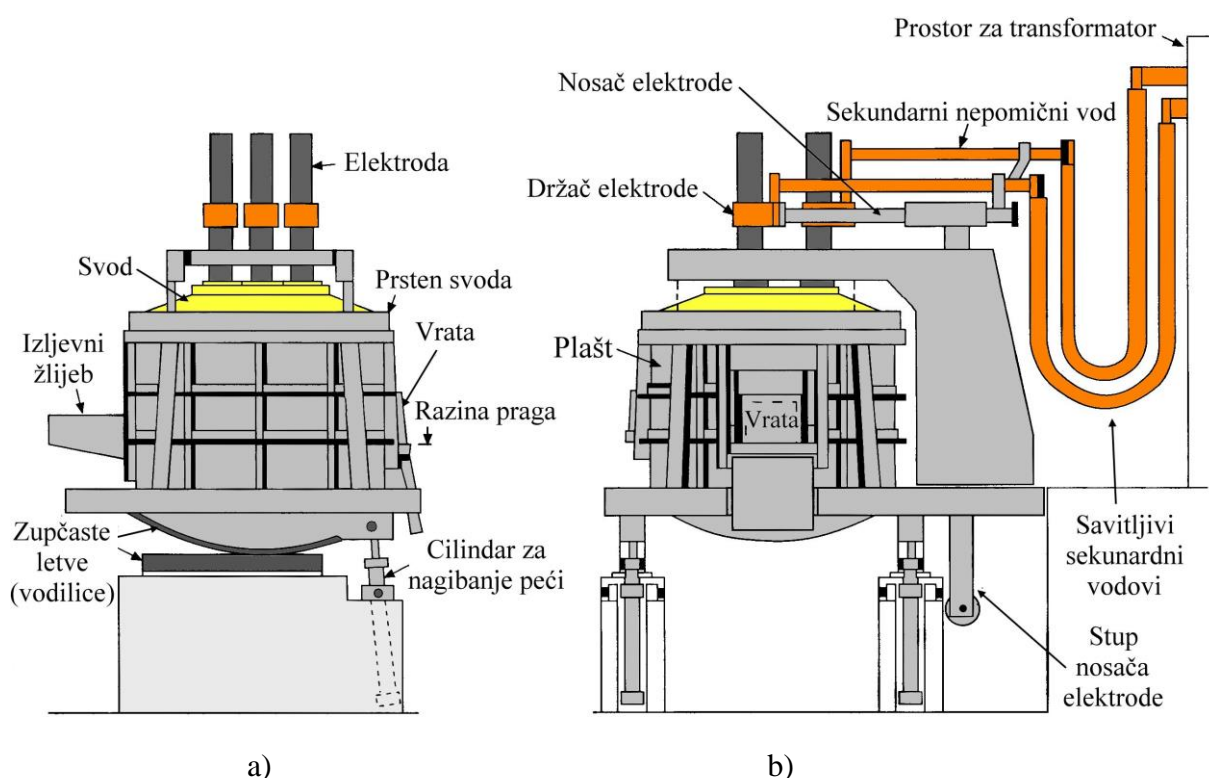
6.3 Elektrolučne peći

Početkom 20. stoljeća počela je primjena elektrolučnih peći kao agregata za taljenje u čeličanama i ljevaonicama [51 - 54]. Od tada kontinuirano raste broj instaliranih elektrolučnih peći, kako u čeličanama tako i u ljevaonicama čeličnih ljevova. Fleksibilnije su po pitanju uložnog materijala jer se može provesti rafinacija, odnosno uklanjanje pojedinih elemenata iz taline.

U osnovi razlikuju se dvije vrste elektrolučnih peći: elektrolučne peći na izmjeničnu struju i elektrolučne peći na istosmjernu struju. U ljevaonicama su više zastupljene

elektrolučne peći na izmjeničnu struju o kojima će se govoriti u nastavku. Kapacitet tih peći u ljevaonicama obično iznosi nekoliko tona, dok se u čeličanicama upotrebljavaju peći puno većeg kapaciteta.

Osnovne komponente elektrolučne peći. Elektrolučna peć na izmjeničnu struju (slika 6.10) sastoji se od kupke, odnosno „posude“ u kojoj se odvija taljenje, svoda kojim se peć zatvara odozgo, izljevni žlijeb, grafitnih elektroda preko kojih se dovodi energija potrebna za taljenje, nosača elektroda, transformatora, električnih vodova, elektrohidrauličkih ili elektro-mehaničkih uređaja za regulaciju rada elektroda, nagibanje peći i zakretanje svoda, upravljačkog ormara te ostale prateće opreme (rashladni sustav, sustav za sakupljanje i pročišćavanje otpadnih plinova itd.).



Slika 6.10. Shematski prikaz elektrolučne peći: a) pogled s boka, b) pogled sa zadnje strane [53]

Kupka se sastoji od plašta i podnice. Plašt peći cilindričnog je oblika, tj. ima kružni oblik u horizontalnom presjeku i izrađen je od čeličnog lima. Iznutra je obložen vatrostalnim materijalom. Određeni dijelovi plašta peći koji su izrazito toplinski opterećeni hlade se vodom u zatvorenom kružnom toku. Podnica peći ima sferičan (konkavan) oblik, izrađena je od čeličnog lima, a iznutra je obložena vatrostalnim materijalom. Podnica i plašt peći čine jednu cjelinu. Najčešće se primjenjuje bazična (magnezitna) vatrostalna obloga jer bazični proces proizvodnje omogućuje uklanjanje fosfora i sumpora iz tekućeg čelika. Kod elektrolučnih peći novije konstrukcije dio plašta koji se nalazi iznad zone (nivoa) troske obložen je vodom hlađenim panelima umjesto vatrostalnim materijalom. Kod tih peći postoji mogućnost odvajanja plašta od podnice peći. Na kupci, točnije rečeno na plaštu nalazi se radi otvor, odnosno vrata kroz koja se u peć u fazi oksidacije uvodi kisik, odnosno u fazi rafinacije ubacuju npr. troskotvorne komponente te ispušta troska iz peći. Izljevni otvor i žlijeb za ispušt tekućeg čelika (eventualno i troske) iz peći u lijevni lonac također se nalaze na kupci, ali na

suprotnoj strani od radnog otvora (vrata). Kod novijih elektrolučnih peći ispuštanje čelika provodi se kroz otvor u podnici pri čemu izostaje potreba za izljevnom žlijebom.

Svod peći konveksnog je oblika, odnosno izveden je u obliku kupole. Kod peći starije konstrukcije sastoji se od vodom hlađenog čeličnog prstena koji je ispunjen vatrostalnim materijalom (opekama). Najčešće se primjenjuje vatrostalni materijal s visokim udjelom Al_2O_3 . Kod peći novije konstrukcije vatrostalni materijal je zamijenjen vodom hlađenim panelima. U svodu se nalaze tri otvora za elektrode koje prolaze kroz njega i otvor za odvođenje dimnih plinova. Elektrode su raspoređene na kutovima istostraničnog trokuta.

Proces pretvorbe električne u toplinsku energiju odvija se u električnom luku nastalom između grafitnih elektroda i uložnog materijala koji se tali. Elektrolučne peći na izmjeničnu struju izvode se kao trofazne sa električnim lukom – elektrodom u svakoj fazi [55]. Elektrode su postavljene okomito i prolaze kroz otvore u svodu. Imaju kružni poprečni presjek i izvedene su u obliku valjkastih segmenata koji se međusobno spajaju navrtanjem.

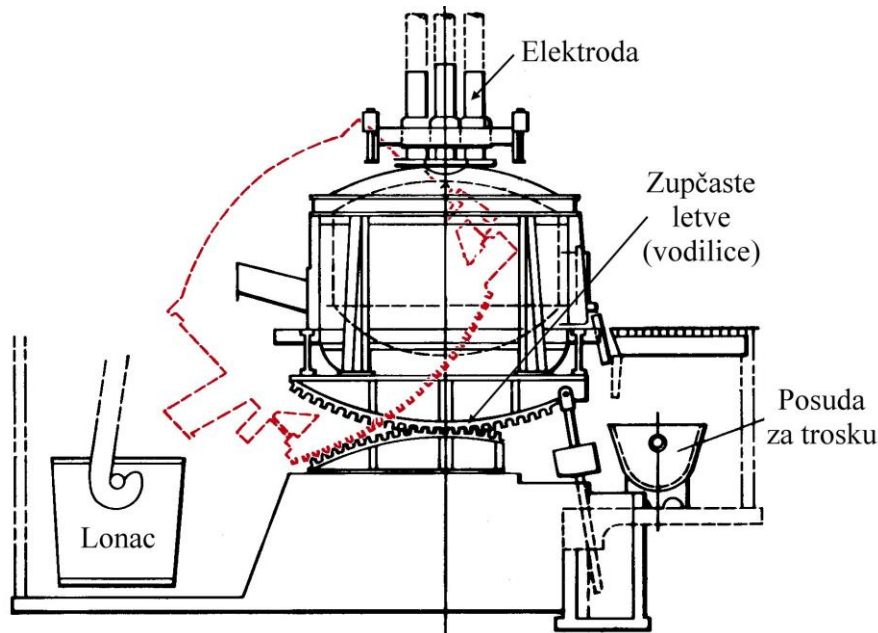
Za efikasnu primjenu elektrolučnih peći od velikog je značaja mogućnost pokretanja elektroda. Pomoću odgovarajućih sustava regulacije omogućeno je da se svaka elektroda može samostalno kretati prema gore i prema dolje. Zadatak regulacije rada elektroda je stalno održavanje snage koja je podešena na upravljačkoj ploči. Dizanje i spuštanje elektroda mora biti u direktnoj vezi s zahtjevima za tu operaciju. Npr. elektrode se moraju lagano kretati kada propaljuju prolaz kroz uložni materijal ka dnu peći gdje se skuplja rastaljeni metal, a vrlo brzo se moraju kretati kad treba eliminirati nastale poremećaje (kratki spoj, prekid luka itd.). Kad nastane električni luk dolazi do taljenja i propadanja uložnog materijala ispod elektroda, zbog čega se povećava razmak između elektroda i uložnog materijala. Ako bi napon ostao nepromijenjen, a elektrode nepokretne, na određenoj udaljenosti električni luk bi se ugasio i proces taljenja prestao. Zbog toga je nužno da elektrode, pri stalnom naponu napajanja, prate propadanje uložnog materijala da bi se razmak i struja održali stalnim. Regulacija rada elektroda, tj. regulacija razmaka između elektroda i uložnog materijala često se izvodi održavanjem konstantne impedancije – snage luka [55]. Takav regulacijski sustav radi na osnovi promjene primarnog napona pećnog transformatora, napona i struje elektrode i usklađujući te veličine održava impedanciju konstantnom.

Peć se napaja električnom energijom preko transformatora koji je postavljen u blizini peći. Na primarnu stranu transformatora dovodi se električna energija visokog napona, a na sekundarnoj strani moguće je odabrati različite napone i tim različite jakosti struje, odnosno električnog luka, što ovisi o pojedinim fazama rada peći. Zbog specifičnih radnih uvjeta pećni transformator razlikuje se od običnih energetskih transformatora po većoj nominalnoj struji na sekundarnoj strani, povišenom naponu kratkog spoja, poboljšanim mehaničkim svojstvima namotaja i odvoda zbog čestih strujnih udara i kratkih spojeva te mogućnosti regulacije napona u širokim granicama [55]. Pećni transformatori moraju izdržati znatna preopterećenja povezana sa strujnim udarima i kratkim spojevima u fazi taljenja.

Svaka elektroda ima svoj zasebni nosač. Držač elektrode na nosaču izveden u obliku bakrene čeljusti ravno i ravnomjerno obuhvaća elektrodu. Električna energija dovodi se sa sekundarne strane pećnog transformatora na držač elektroda putem vodom hlađenih sekundarnih vodova. Sekundarni vodovi na nosaču elektroda su fiksni, dok je segment voda od nosača elektrode do transformatora savitljiv zbog pomicanja nosača i elektroda prema gore, odnosno dolje. Gibanjem nosača elektrode prema gore elektroda se također pomiče prema gore i obrnuto.

Ulaganje uložnih materijala u peć provodi se odozgo pri čemu se svod podiže neznatno iznad kupke i potom zakreće u stranu. Podizanje i zakretanje svoda provodi se elektro-hidrauličkim sustavom. Prije podizanja i zakretanja svoda nosači se zajedno s elektrodama podižu u krajnji gornji položaj (maksimalno podignuti).

Ispuštanje tekućeg čelika (i troske) kroz otvor za ispuštanje provodi se nagibanjem peći prema tom otvoru (slika 6.11). Nagibanje peći provodi se elektro-hidrauličkim sustavom pri čemu se na peći i postolju peći nalaze vodilice izvedene u obliku zupčastih letvi. Navedeni sustav omogućuje nagibanje peći i u suprotnom smjeru, tj. prema radnom otvoru (vratima). Na taj način moguće je provesti uklanjanje troske iz peći u fazi oksidacije i rafinacije. Pri tome troska istječe kroz vrata preko praga u posudu koja se nalazi ispod peći.



Slika 6.11. Ispust tekućeg čelika (i troske) u lonac [54]

Elektrolučne peći novije konstrukcije opremljene su gorionicima (kisik/plin) koji se postavljaju u otvore na plaštu. Primjenom gorionika povećava se produktivnost peći, skraćuje vrijeme taljenja i ostvaruje ušteda električne energije. Nepravilna uporaba gorionika može rezultirati prekomjernom oksidacijom materijala u peći i skraćenim vijekom trajanja vatrostalne obloge.

Sustav za sakupljanje i pročišćavanje otpadnih plinova neizostavni je dio opreme elektrolučne peći.

Proizvodni proces. Elektrolučne peći su agregati s diskontinuiranim procesom proizvodnje. Proces proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći sastoji se od sljedećih faza: ulaganje, taljenje, oksidacija i rafinacija, legiranje i dezoksidacija. Prema tome, može se reći da se sve operacije odvijaju u peći, što je različito u odnosu na proizvodnju čelika u čeličanama gdje se elektrolučne peći primjenjuju samo kao agregati za taljenje uložnih materijala, a sve ostale metalurške operacije provode se u loncu (sekundarna metalurgija).

Proizvodnja taline čeličnog lijeva započinje ulaganjem osnovnih sirovina (uložnih materijala) u peć. Prije samog ulaganja, dok je peć prazna, potrebno je prekontrolirati vatrostalnu oblogu peći i popraviti eventualna oštećenja. Nakon toga, zbog trošenja elektroda tijekom procesa proizvodnje čelika treba podesiti udaljenost od vrha elektrode do dna peći kada se elektroda nalazi u donjem krajnjem položaju.

Pripremljeni metalni uložak ubacuje se u uložne košare koje se dopremaju do elektrolučne peći. Broj uložnih košara ovisi o kapacitetu peći te strukturi, odnosno nasipnoj gustoći uložnih materijala. Cilj je da se potrebna količina metalnog uložka unese u peć sa što manjim brojem uložnih košara (optimalno dvije). Povećanjem broja uložnih košara produžuje

se ukupno vrijeme izrade taline i povećavaju toplinski gubitci jer se svaki put svod mora maknuti s peći. Na dno uložne košare obično se stavlja što sitniji čelični otpad (npr. strugotina) da bi se ublažio udar uložnog materijala o dno peći. Nakon toga ubacuje se kompaktniji čelični otpad većih dimenzija, a potom bijelo sirovo željezo (ako je na raspolaganju) i ostali čelični otpad manjih dimenzija. Čelični otpad mora biti što kompaktniji i pravilno složen u uložnoj košari da se ne bi tijekom taljenja u peći obrušio i eventualno polomio elektrodu(e) i ošteti vatrostalnu oblogu peći. Ako bijelo sirovo željezo nije na raspolaganju, na dno peći prije ulaganja metalnog uložka ubacuje se sredstvo za naugljičenje, tako da prva talina koja nastaje odmah veže ugljik. Nakon završetka taljenja udio ugljika u talini trebao bi biti za 0,2 do 0,45 %C viši nego krajnji propisani udio tog elementa u čeliku.

Ulaganje u peć započinje tako da se nosači zajedno sa elektrodama podižu u krajnji gornji položaj, a potom podiže svod i zajedno s nosačima i elektrodama zakreće u stranu. Mosnom dizalicom napunjena uložna košara spušta se u peć na određenu udaljenost od dna peći, odnosno taline ako se radi o drugoj ili trećoj uložnoj košari. Dno košare može biti načinjeno od dva segmenta (dijela) ili većeg broja lamela koje su na jednom kraju međusobno povezane konopcem, a na drugom kraju pričvršćene na obod uložne košare. Segmenti na dnu košare mehanički se razmiču i uložna košara se otvara, nakon čega metalni uložni materijal iz uložne košare pada u peć. Isto vrijedi i za uložne košare kod kojih je dno izvedeno u obliku lamela, s tim da se u tom slučaju uložna košara otvara kada izgori konopac koji povezuje lamele pod djelovanjem topline u peći. Nakon što je metalni uložni materijal iz uložne košare ubačen u peć, uložna košara se odnosi od peći i priprema za ponovno punjenje, a svod zajedno s nosačima i elektroda zakreće prema peći i postavlja na peć. Potom se peć uključuje čime započinje taljenje.

Na početku taljenja nivo uložnog materijala u peći je najviši i elektrode moraju biti maksimalno podignute. Kad nastane električni luk dolazi do taljenja uložnog materijala. Prilikom taljenja potrebno je voditi računa o dužini električnog luka. S jedne strane luk mora biti što duži i veće snage da bi se efikasnije provelo taljenje, a s druge strane zbog isijavanja na okolnu vatrostalnu oblogu mora biti što kraći. Zbog toga se na samom početku ne primjenjuju maksimalni naponi i maksimalne struje, već kada elektrode uđu u uložni materijal. Kad započne taljenje elektrode postepeno ulaze u uložni materijal (elektrode se zašuše u uložni materijal) i napreduju prema dnu peći. U stvari, ukupno gledajući proces taljenja, elektrode na svom putu kroz radni prostor peći od svoda prema dnu ne tale uložni materijal odozgo prema dolje već odozdo prema gore. Taljenje uložka odozgo prema dolje odvija se samo u kratkom periodu kada elektrode prodiru u uložak. Na svom putu prema dnu peći elektrode naprave uske kratere u uložnom materijalu koji su neznatno većeg promjera od njih samih. Tekući metal koji pri tome nastaje sakuplja se na dnu peći. Elektrode se zaustavljaju kada dođu do tekućeg metala na dnu peći. Kako napreduje proces taljenja sve više i više uložnog materijala propada i dolazi ispod elektroda pri čemu regulacija rada elektroda konstantno održava snagu (dužinu luka) koja je postavljena na upravljačkoj ploči peći. Zbog toga se elektrode stalno pomiču prema gore, odnosno dolje i prate propadanje uložnog materijala. Nakon što je uložni materijal koji je unesen u peć prvom uložnom košarom gotovo u potpunosti rastaljen pristupa se ponovnom ulaganju (druga uložna košara) prema istoj proceduri koja je prethodno opisana. Prije toga u peć se ulaže određena količina vapna (CaO) i sredstava za smanjenje viskoziteta troske (fluorit – CaF_2). Tijekom taljenja korozijski produkti na metalnom uložku, nastali oksidacijski produkti i erodirani vatrostalni materijal reagiraju s vapnom pri čemu nastaje tekuća troska. Kad je sav uložni materijal rastaljen smanjuje se snaga peći. Tada je u peći prisutan rastaljeni metal na kojem pliva rastaljena troska. Električni luk ostvaren je između rastaljenog metala i elektroda koje se nalaze iznad tekuće troske. Mjerenje temperature taline u peći provodi se uranjanjućim pirometrom, najčešće kroz radni otvor (tj. vrata) peći.

Nakon završetka taljenja započinje period oksidacije i rafinacije. U periodu oksidacije u rastaljeni metal uvodi se tehnički kisik i dolazi do oksidacije pojedinih elemenata. Oksidacija ugljika je egzoterman proces i odvija se prema sljedećim reakcijama:

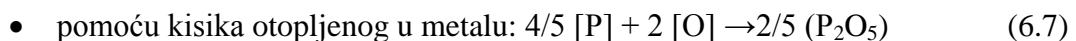


Reakcija kojom nastaje CO je dominantna, a stvaranje CO₂ ima praktičan značaj samo pri niskim udjelima ugljika u talini. Oznaka [] znači da se ta komponenta nalazi u metalu, () znači da se ta komponenta nalazi u troski, a { } označava da se ta komponenta nalazi u plinu.

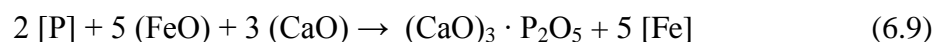
Volumen nastalog CO (CO₂) znatno je veći od volumena rastaljenog metala. Tijekom oksidacije 1 kg C pri 1500 °C nastaje više od 10 m³ CO [56]. Izdvajanje tako velike količine plina rezultira karakterističnim „kuhanjem“ taline, odnosno intenzivnim miješanjem rastaljenog metala i troske, olakšava prijenos mase i topline te omogućuje ubrzanje procesa u cjelini. Snažnim miješanjem rastaljenog metala i troske povećava se kontaktna površina između rastaljenog metala i troske te pospješuje uklanjanje plinova (prvenstveno vodika i dušika) i nemetalnih uključaka. Nastali mjehurići CO zahvaćaju otopljeni vodik i dušik u rastaljenom metalu i zajedno se izdvajaju, odnosno odlaze u atmosferu. Povećanje kontaktne površine između rastaljenog metala i troske doprinosi uklanjanju fosfora i sumpora iz taline. Osim toga, oksidacijom ugljika oslobađa se određena količina topline jer se radi o egzotermnom procesu, što rezultira zagrijavanjem rastaljenog metala i troske.

Zbog „kuhanja“, odnosno intenzivnog miješanja oksidacijska troska istječe kroz radni otvor (tj. vrata) peći preko praga u posudu za trosku. Istjecanje troske iz peći može se pospješiti istovremenim nagibanjem peći prema radnom otvoru, odnosno posudi za trosku (nagibanje u suprotnom smjeru u odnosu na ispuštanje tekućeg čelika u ljevni lonac).

Fosfor se iz rastaljenog metala uklanja oksidacijom i to na niskim temperaturama (1540 do 1560 °C), pri čemu nastaje P₂O₅ koji prelazi u trosku. Oksidacija fosfora otopljenog u čeliku je egzoterman proces i odvija se prema sljedećim reakcijama:



Radi uklanjanja fosfora iz rastaljenog metala i njegovog zadržavanja u troski koncentracija P₂O₅ u troski mora se sniziti. To se postiže formiranjem bazične troske dodavanjem vapna pri čemu nastaje stabilni kalcijev fosfat:

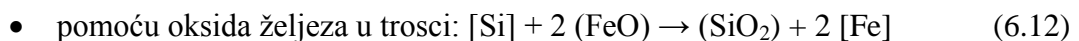
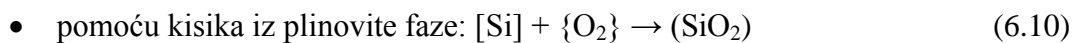


Da bi uklanjanje fosfora bilo uspješno, vrlo je važno da se iz peći pri navedenim relativno niskim temperaturama ispusti veći dio prve (oksidacijske) troske. Ponovno vraćanje fosfora u rastaljeni metal može se dogoditi pri povišenim temperaturama ako prva (oksidativna) troska bogata fosforom nije ispuštena u dovoljnoj količini. Prema tome, za

uspješno uklanjanje fosfora iz rastaljenog metala (tj. odfosforavanje) potrebno je pored niske temperature ostvariti oksidacijsku atmosferu, tj. visok udio FeO u troski, visok bazicitet troske (što znači visok udio CaO i nizak udio SiO₂ u troski), nisku koncentraciju P₂O₅ u troski (što se postiže ispuštanjem troske i dodavanjem nove količine vapna (CaO)) i dobro miješanje čelika i troske.

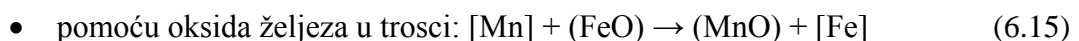
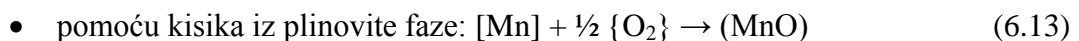
Uzimanjem uzorka rastaljenog metala iz peći i analizom njegovog kemijskog sastava može se utvrditi uspješnost uklanjanja fosfora. Proces odfosforavanja treba ponoviti ako udio fosfora u rastaljenom metalu nije sveden u propisane granice. U osnovi, udio fosfora mora biti što je moguće niži, odnosno ispod maksimalno dozvoljenog, jer je tijekom daljnjeg odvijanja procesa vrlo često prisutan određeni manji povrat (tj. redukcija) fosfora iz troske u rastaljeni metal pri višim temperaturama.

Silicij ima vrlo visok afinitet prema kisiku. Zbog toga se gotovo u potpunosti oksidira već u početku procesa i ne reducira iz troske ponovo u značajnijim količinama u rastaljeni metal. Oksidacija silicija otopljenog u čeliku odvija se prema sljedećim reakcijama:



Na početku procesa oksidacija silicija pospješena je relativno niskom temperaturom taline i visokim udjelom FeO u troski. Porast temperature tijekom odvijanja procesa ne pogoduje oksidaciji silicija jer je oksidacija silicija egzotermna reakcija. Međutim, istovremeno se povećava bazicitet troske što povoljno utječe na vezanje silicija i stvaranje stabilnog spoja 2CaO·SiO₂ u troski. Kao rezultat svega navedenog, na kraju oksidacije udio silicija u čeliku obično se kreće u granicama od 0,01 do 0,02 %Si. Tako nizak udio silicija ne utječe na odvijanje procesa, pa se može smatrati da se u bazičnom procesu silicij u potpunosti odstranjuje.

Kod većine čelika mangan je sastavni dio kemijskog sastava, odnosno smatra se korisnim elementom. Međutim, tijekom oksidacije, posebno kod niskih temperatura, mangan se zbog svog povišenog afiniteta prema kisiku brzo oksidira i u obliku oksida prelazi u trosku. Oksidacija mangana otopljenog u čeliku odvija se prema sljedećim reakcijama:



Udio mangana u rastaljenom metalu nakon perioda oksidacije tehničkim kisikom obično se kreće u granicama od 0,03 do 0,2 %. Gubitak mangana mora se nadoknaditi dodavanjem odgovarajućih ferolegura nakon oksidacije i rafinacije.

Pri kraju procesa proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći, kod visokih temperatura (> 1600 °C), dovoljno visokog baziciteta troske i niskog udjela FeO u troski može doći do redukcije manganovih oksida iz troske i povećanja udjela mangana u rastaljenom čeliku. To se događa kod udjela ugljika u talini iznad 0,2 % [56]. Ako je udio ugljika u talini vrlo nizak (< 0,07 %), tada se zbog značajnog povećanja udjela FeO u troski koncentracija mangana snižava u talini bez obzira na porast temperature [56].

Silicij i mangan imaju viši afinitet prema kisiku od ugljika. Zbog toga se prije oksidacije ugljika odvija gotovo potpuna oksidacija silicija i značajna oksidacija mangana.

Krom je vrlo koristan legirni element i obično se mora dodavati u obliku raznih ferolegura da bi se ostvario propisani udio u čeliku. Međutim, ponekad se može dogoditi da je udio kroma u rastaljenom metalu previsok, zbog čega se mora ukloniti. Razlog previsokog udjela kroma može biti prekomjerna količina čeličnog otpada legiranog kromom u uložnom materijalu. Uklanjanje kroma provodi se oksidacijom pri relativno niskim temperaturama uz visok bazicitet troske (omjer CaO/SiO_2 u troski).

Nakon dovoljnog uklanjanja fosfora iz rastaljenog metala te dovoljnog uklanjanja prve (oksidativne) troske treba u peć dodati nove količine vapna i sredstava za povećanje fluidnosti troske, odnosno smanjenje njene viskoznosti te povećanje njene reaktivnosti (fluorit). Cilj je stvoriti reduktivnu fluidu reaktivnu trosku koja treba sadržavati visok udio CaO , nizak udio FeO i MnO te nizak udio SiO_2 da bi se moglo provesti uklanjanje sumpora iz rastaljenog metala, odnosno odsumporavanje. Ta troska trebala bi sadržavati određeni udio Al_2O_3 i CaF_2 . Ako troska ima dovoljno visok bazicitet i nizak udio nestabilnih oksida (FeO , MnO), sumpor koji je uklonjen iz rastaljenog metala i prešao u trosku ne može se vratiti natrag u rastaljeni metal.

Sumpor je površinski aktivan element i zato je njegova koncentracija na granicama faza uvijek veća nego u unutrašnjosti. Reakcija odsumporavanja odvija se difuzijom na granici faza metal/troska:



Budući da je difuzija proces koji zahtijeva određeno vrijeme da se provede, stupanj odsumporavanja bit će veći što je vrijeme odsumporavanja duže. S tim u vezi, najbolje metode odsumporavanja su one bazirane na povećanju kontaktne površine između rastaljenog metala i troske. To se postiže snažnim miješanjem rastaljenog metala i troske zbog izdavanja mjehurića CO tijekom oksidacije ugljika. Zbog toga udio ugljika tijekom rafinacije mora biti dovoljno visok, odnosno viši od propisanog da bi se njegovom oksidacijom ostvarilo miješanje rastaljenog metala i troske i time pospješilo odsumporavanje. Pogodnija opcija je da se miješanje tekućeg čelika i troske ostvari inertnim plinom. Takav način primjenjuje se ako se odsumporavanje čelika provodi u loncu (metalurgija lonca), što je slučaj u čeličanama.

Odsumporavanje se pospješuje s povišenjem temperature je se čestice vapna brže otapaju. Na taj se način povećava udio CaO u troski i ubrzava difuzija sumpora iz unutrašnjosti rastaljenog metala do granice metal/troska. Dakle, proces odsumporavanja se efikasnije odvija na visokim temperaturama (1590 do 1610 °C).

Osim povećanja udjela CaO u troski i smanjenja udjela FeO i MnO u troski, bitno je smanjiti udio sumpora, odnosno nastalog CaS u troski. To se postiže povećanjem baziciteta troske i njezinim obnavljanjem, odnosno uklanjanjem dijela troske s visokim udjelom sumpora i dodavanjem vapna. Prevelik dodatak vapna uzrokuje previsok bazicitet i viskoznu (gustu) trosku koja ima slabu sposobnost vezanja sumpora. Takvoj troski treba povećati fluidnost, odnosno smanjiti njenu viskoznost te povećati reaktivnosti, što se postiže dodatkom odgovarajućih sredstava (fluorit).

Iz navedenog proizlazi da su za uspješno odsumporavanje potrebni reduktivni uvjeti, dok su za uspješno odfosforavanje potrebni oksidativni uvjeti.

Postoje elementi koji se ne mogu ukloniti iz taline prilikom proizvodnje čelika, kao što su npr. bakar, kositar, nikal i molibden jer su plemenitiji od željeza. Bakar i kositar izrazito negativno utječu na svojstva čelika. To ukazuje da se velika pažnja mora posvetiti metalnom ulošku koji se ulaže u peć.

Skupi i poželjni elementi mogu se tijekom taljenja i oksidacije neizbježno oksidirati i u obliku oksida prijeći u trosku. Međutim, te elemente moguće je ponovno vratiti, odnosno reducirati u rastaljeni metal ako se troska dezoksidira dodatkom jednog ili više reducirajućih elemenata, kao što je ugljik, silicij i/ili aluminij. Dobar primjer za to je iskorištenje kroma iz troske, odnosno njegovo vraćanje u rastaljeni metal, jer se tijekom taljenja i oksidacije ugljika veći dio kroma prisutnog u rastaljenom metalu oksidira i prelazi u trosku u obliku oksida.

Legiranje rastaljenog metala ne smije se započeti sve dok se fosfor i sumpor ne svedu u granice smjerne analize za propisanu kvalitetu čelika, iz razloga što je dodatkom ferolegura odsumporavanje i odfosforavanje svedeno na minimum. Isto tako, udio ugljika mora biti u propisanim granicama.

Najčešći legirni element je mangan. U peć se dodaje u obliku različitih ferolegura (FeMn, SiMn). U osnovi najprije se provodi predlegiranje i preddezoksidacija dodatkom FeMn ili SiMn u peć, a potom se, nakon otapanja ferolegura i homogenizacije sastava ovisno o rezultatima kemijske analize provodi završno legiranje dodavanjem navedenih ferolegura u peć. Isto vrijedi i za dodavanje FeCr ako čelik mora biti legiran kromom. FeMo dodaje se u peć, a FeV u lijevni lonac. Pri dodatku SiMn u peć treba dodati i vapno da bi se neutralizirao nastali SiO₂ i održao željeni bazicitet troske.

Nakon legiranja i postizanja propisane temperature otvara se ispusni otvor na peći. Peć se brzo nagiba prema ispusnom otvoru (slika 6.11) da bi se izbjeglo miješanje tekućeg čelika i troske, a rastaljeni čelik kroz izljevni žlijeb istječe u predgrijani lonac. U lijevaonicama čeličnog lijeva primjenjuju se više ispusne temperature tekućeg čelika nego u čeličanama da bi se ostvarila veća fluidnost i bolje popunjavanje kalupne šupljine.

Završna dezoksidacija čelika provodi se dodatkom sredstava za dezoksidaciju (dezoksidanata) u mlaz tekućeg čelika pri ispustu iz peći u lonac ili dodatkom u lonac prije ispusta čelika. Primarna uloga dezoksidacije je uklanjanje kisika iz taline čelika i sprječavanje nastajanja plinskih mjehura, odnosno plinske poroznosti (šupljina) u odljevcima zbog stvaranja CO tijekom skrućivanja odljevka u kalupu. Količina otopljenog kisika u tekućem čeliku ovisi udjelu ugljika u njemu. Što je udio ugljika u tekućem čeliku niži, to je viši udio otopljenog kisika. Najčešće upotrebljavani dezoksidanti su aluminij i FeSi. Pri tome je aluminij znatno snažniji dezoksidant od FeSi. Dezoksidacija tekućeg čelika aluminijem i silicijem odvija se prema sljedećim reakcijama:



Produkti dezoksidacije aluminijem su kruti kristalični Al₂O₃ uključci koji se sporo izdvajaju iz tekućeg čelika. Time se smanjuje fluidnost čelika i pospješuje tendencija začepljivanja ispusnog otvora na dnu lonca zbog nagomilavanja aluminatnih uključaka.

6.4 Plamene i šahtne peći

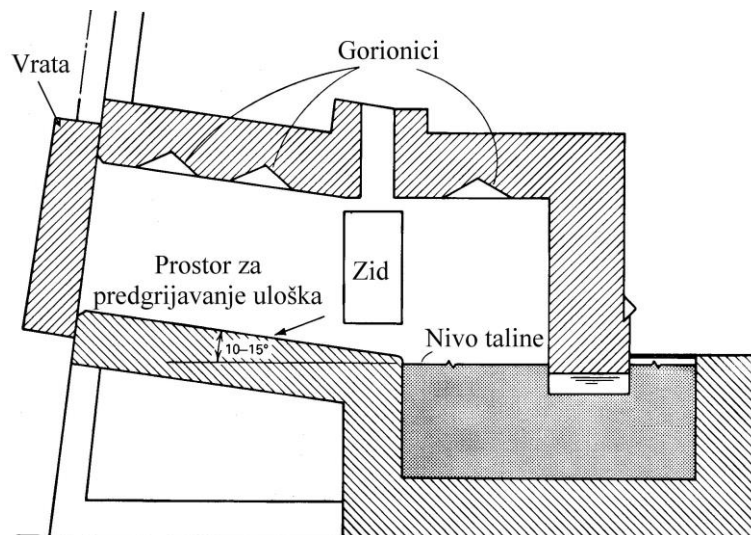
Plamene ili koritaste (tj. ognjišne) peći (engl. *Reverberatory Furnaces*) najčešće su upotrebljavani agregat za taljenje u lijevaonicama u kojima se proizvode odljevci od aluminijskih slitina [33, 57, 58]. Te lijevaonice kao metalni uložak za izradu taline obično upotrebljavaju ingote od aluminijskih slitina garantiranog kemijskog sastava prema odgovarajućim normama, a nabavljaju ih na tržištu od raznih dobavljača. Masa takvih ingota obično iznosi oko 5 kg. Uz aluminijske ingote dodaje se i povratni materijal iz lijevaonice.

Prema starijem konceptu, taljenje metalnog uložka i zagrijavanje tekućeg metala u koritu plamene peći odvijalo isijavanjem topline sa bočnih stranica peći koje su se grijale plamenom iz gorionika. Na suvremenim pećima plinski gorionici postavljeni su na svod ili bočne stranice peći i usmjereni su ka površini taline. Prema tome, za razliku od starijeg koncepta, prema novom konceptu cilj je zagrijati metal a ne peć, da bi se povećala djelotvornost taljenja i zagrijavanja.

Postoje dvije vrste plamenih peći:

- **plamene peći s predgrijavanjem uložka i**
- **plamene bez predgrijavanja uložka.**

U plamenim pećima s predgrijavanjem uložka (engl. *Dry Hearth Reverberatory Furnace*) uložak se predgrijava na povišenom kosom dijelu peći koji se nalazi između vrata za ulaganje materijala i korita sa tekućim metalom (slika 6.12). Kruti uložak brzo apsorbira toplinu, tali se i postepeno sa kosog dijela peći otječe u korito peći gdje se nalazi tekući metal.



Slika 6.12. Shematski prikaz plamene peći s predgrijavanjem uložka [57]

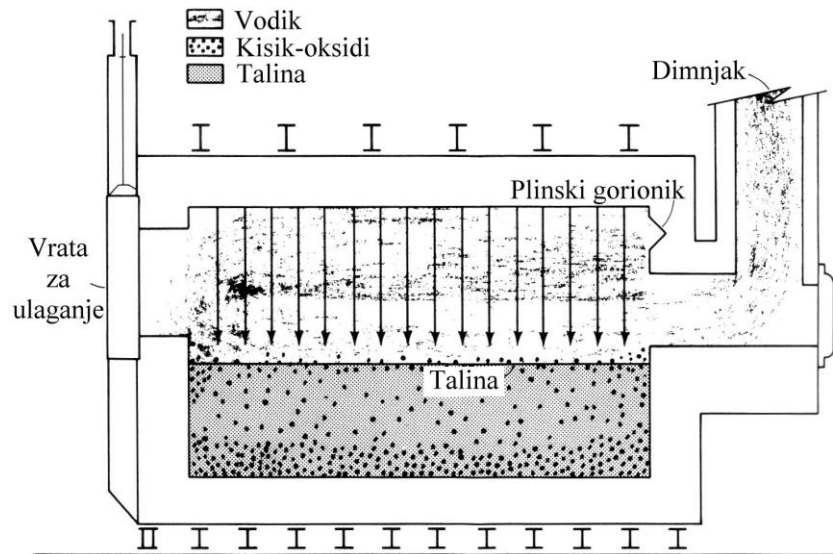
Kod plamenih peći bez predgrijavanja uložka (engl. *Wet Hearth Reverberatory Furnace*) uložni materijal direktno se ubacuje u talinu u peći (slika 6.13). Te peći pogodne su za taljenje uložnih materijala koji imaju velik omjer površine i volumena, jer se mogu prekomjerno oksidirati ako se brzo ne rastale.

Za taljenje aluminijskih i njihovih slitina značajnu ulogu ima prisilni konvekcijski prijenos topline u talini koji se postiže njenom cirkulacijom. Bez prisilne cirkulacije taline temperatura na površini taline bit će visoka, što će rezultirati značajnom oksidacijom i stvaranjem troske. Cirkulacija taline može se postići ručnim miješanjem, mehaničkim pumpama, elektromagnetskim pumpama, indukcijskim mješačima, itd. Ručno miješanje može se primijeniti samo na malim pećima. Na većim pećima cirkulacija taline postiže se primjenom odgovarajućih pumpi.

Cirkulacija taline u peći donosi pozitivne učinke i kod taljenja magnezijevih i bakrenih slitina, te slitina na osnovi cinka. U tim slučajevima za cirkuliranje taline obično se ne primjenjuju pumpe, jer se zadovoljavajući rezultati postižu mehaničkim miješanjem.

Toplinska efikasnost plamenih peći pri taljenju aluminijskih slitina iznosi 30 do 45 %. Energija se uglavnom gubi putem vrućih dimnih plinova. Pored toga, kad metal dođe u kontakt s plinovima u peći, dolazi do formiranja troske. Zbog toga gubitak metala pri taljenju

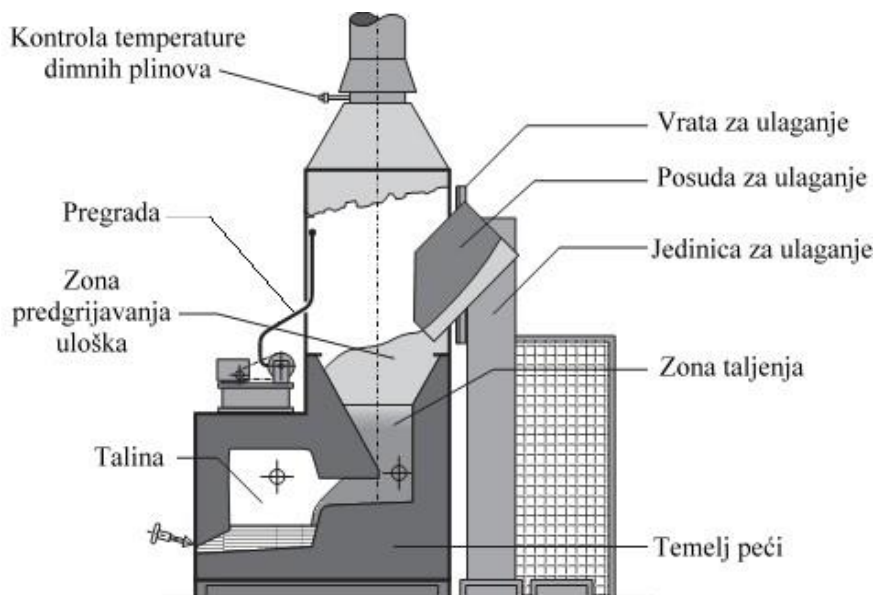
alumijskih slitina iznosi od 3 do 5 %. Efikasnost plamenih peći može se povećati primjenom učinkovitijih gorionika, boljom kontrolom omjera zraka i plina, primjenom izolacijskog vatrostalnog materija, pažljivom kontrolom temperature i predgrijavanjem uložnog materijala.



Slika 6.13. Shematski prikaz plamene peći bez predgrijavanja uložka [57]

Prednosti plamenih peći su visoka produktivnost i niski troškovi održavanja. Mnoge ljevaonice u kojima se provodi visokotlačno lijevanje alumijskih slitina upotrebljavaju plamene peći kao centralni agregat za taljenje iz kog se talina prenosi u peći za održavanje temperature koje se nalaze uz uređaje za lijevanje.

Poboljšanje energijske učinkovitosti u proizvodnji alumijskih odljevaka može se postići primjenom **šahtnih (tj. jamskih) peći** (engl. *Stack Furnaces*) (slika 6.14).



Slika 6.14. Shematski prikaz šahodne peći [33]

Te se peći mogu smatrati modificiranim plamenim pećima čija je efikasnost poboljšana boljim brtvljenjem peći i predgrijavanjem uložka otpadnim dimnim plinovima. U

usporedbi sa šahtnim pećima, plamene peći imaju manju energijsku efikasnost, ali niže kapitalne troškove te jednostavniju upotrebu i održavanje.

Uložni materijal spušta se niz šaht i dolazi u zonu taljenja, gdje se tali pomoću gorionika. Tekući metal odlazi u komoru u donjem dijelu peći (slika 6.14.). Vrući plinovi iz zone taljenja prolaze kroz šaht i predgrijavaju uložak. Na taj način poboljšava se energijska učinkovitost za 40 do 50 %.

Prilikom taljenja i manipulacije talinama neželjeznih slitina treba poduzeti određene mjere da se spriječe neki negativni učinci koji se mogu pojaviti. Zbog toga se u ljevaonicama aluminijskih odljevaka dodaju različita **sredstva, npr. za zaštitu rastaljenog aluminijskog oksida od oksidacije, za izdvajanje aluminijskog oksida iz Al_2O_3 , za rafinaciju taline, za uklanjanje oksida aluminijskog oksida te za uklanjanje nakupina aluminijskih oksida s obloge peći.** Pored toga, taline neželjeznih ljevova obično zahtijevaju dodatnu obradu prije lijevanja u kalupe da bi se povećala njihova kvaliteta, a time i kvaliteta odljevaka. Npr. u ljevaonicama aluminijskih odljevaka provodi se otplinjavanje taline, te su u talinu dodaju određena sredstva da bi tijekom skrućivanja nastala sitnozrnata struktura i da bi se modificirao oblik silicijske faze izlučene tijekom skrućivanja.

Rastaljeni aluminij ima visok afinitet prema kisiku, pri čemu nastaje Al_2O_3 . Oksidni sloj na površini taline štiti talinu od daljnje oksidacije. Međutim, oksidi mogu dospjeti u odljevak gdje djeluju kao nemetalni uključci, što negativno utječe na njegova svojstva. Da bi se spriječila oksidacija, na površinu taline aluminijskog oksida dodaju se različita sredstva (npr. mješavina NaCl i KCl uz mali dodatak fluorida Na_3AlF_6) koja se tale i na taj način sprječavaju kontakt rastaljenog aluminijskog oksida sa kisikom.

Određena sredstva koja se sastoje od različitih klorida i oksidativnih komponenti dodaju se radi izdvajanja aluminijskog oksida iz Al_2O_3 . Slična sredstva dodaju da bi se uklonili oksidi aluminijskog oksida iz taline. Razvijena su i rafinacijska sredstva koja omogućuju uklanjanje pojedinih metalnih elemenata iz rastaljenog aluminijskog oksida. Ta sredstva reagiraju s određenim elementima u talini pri čemu nastaju spojevi koji odlaze u trosku. Za uklanjanje naslaga aluminijskih oksida sa stijenci peći za taljenje također se upotrebljavaju određena sredstva.

Rastaljeni aluminij lako veže vodik. Izvori vodika mogu biti različiti, npr. atmosfera, metalni uložak, vatrostalni materijali itd. Vodik je jedini plin koji se u značajnoj količini otapa u rastaljenom aluminijskom oksidu. Budući da je topljivost vodika u krutom aluminijskom oksidu vrlo niska, tijekom skrućivanja dolazi do izdvajanja plinovitog vodika. To u konačnici rezultira poroznim odljercima. Zbog toga se rastaljene aluminijske slitine moraju otpliniti prije lijevanja u kalupe ako se proizvode odljevci koji moraju imati visoku kompaktnost. **Otplinjavanje** se obično provodi u prijenosnim loncima propuhivanjem taline sa inertnim plinom koji nije topljiv u rastaljenom aluminijskom oksidu (tj. dušikom ili argonom). Vodik difundira u mjehure inertnog plina koji se dižu kroz talinu do površine i potom odlaze u atmosferu. Inertni plin uvodi se u talinu pomoću koplja. Bolji rezultati postižu se ako se inertni plin uvede u talinu kroz šuplju osovinu i rasprši pomoću rotora na dnu osovine koji rotira brzinom od 400 do 500 o/min. Na taj način nastaju manji mjehuri inertnog plina, što znači da se sporije dižu kroz talinu, što povećava mogućnost vezanja vodika.

Mikrostruktura, a prema tome i mehanička svojstva Al-Si slitina mogu se poboljšati odgovarajućom obradom taline. Zbog toga se prije lijevanja u talinu dodaju odgovarajuća sredstva za usitnjavanje zrna i modifikacija oblika eutektičnog ili primarnog silicija. **Usitnjavanje zrna** postiže se dodatkom predlegure Al-Ti-B u talinu. **Modifikacija oblika silicijske faze** u podeutektičkim Al-Si slitinama, tj. slitinama koje sadrže < 12 %Si postiže se dodatkom natrija, kalcija, stroncija ili antimona. Nadeutektične Al-Si slitine, tj. slitine koje sadrže > 12 %Si modificiraju se dodatkom fosfora.

6.5 Lončaste peći

Lončaste ili tiganjske peći (engl. *Crucible Furnaces*) upotrebljavaju se za taljenje, držanje i/ili prijenos neželjeznih slitina, uglavnom aluminijskih i bakrenih te slitina na osnovi cinka [57, 59]. Sastoje se od lonca koji se izvana jednolično zagrijava pomoću plina, nafte ili električne energije. Na taj način tale se materijali uloženi u lonac i/ili se održava temperatura taline u loncu. Taljenje u lončastim pećima je jednostavan i fleksibilan proces. Ekonomski su najpovoljnija opcija za izradu manje količine taline od neželjeznih slitina.

Lonci se izrađuju od mješavine grafita, silicijevog karbida, praškastog silicija, stakla i aluminosilikata. Uklanjanje istrošenog ili oštećenog lonca iz peći i instaliranje novog lonca je jednostavno i brzo se provodi. Te radnje tehnički su manje zahtjevne od uklanjanja i zamjene vatrostralne obloge u raznim drugim pećima.

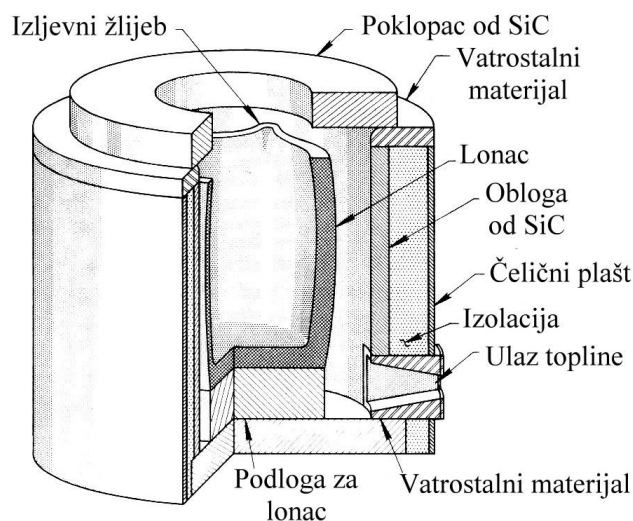
Lončaste peći ložene plinom imaju određene prednosti u odnosu na plamene peći. Plamen nije u kontaktu s uložnim materijalima koji se tale, kao što je to slučaj kod plamenih peći. Zagrijavanje i taljenje uložka provodi se indirektno provođenjem topline kroz lonac. Takvim načinom zagrijavanja značajno se smanjuju gubici i oksidacija metala tijekom taljenja.

Taljenje u lončastim pećima može se ubrzati ako se peć ne prazni potpuno prije ulaganja novog materijala, već se u peći ostavlja određena količina taline (~ 25 % kapaciteta peći). Ako se u loncu nalazi samo kruti uložak, ne ostvaruje se potpuni kontakt lonca sa uloškom. Zbog toga će proći dosta vremena dok ne počne taljenje, jer se toplina prenosi kroz stjenku lonca na uložak.

U ljevaonica se upotrebljavaju tri vrste lončastih peći:

- **stacionarne lončaste peći,**
- **nagibne lončaste peći i**
- **pokretne lončaste peći.**

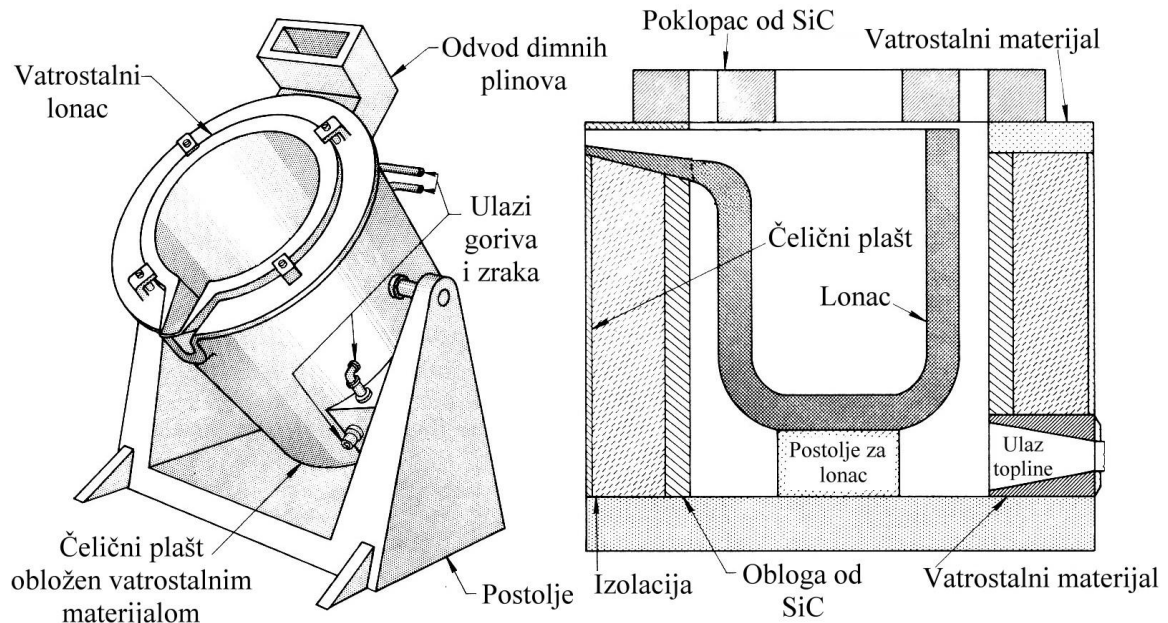
U **stacionarnim lončastim pećima** oko lonca je postavljen plašt od vatrostralnog materijala na koji je postavljena oprema za zagrijavanje lonca (slika 6.15). Ako se zagrijavanje provodi električnom energijom, ta oprema je bakreni namotaj oko lonca kroz koji prolazi električna energija. Tekući metal grabi se iz lonca ručno pomoću kašike ili se lonac zajedno sa tekućim metalom vadi iz peći i iz njega provodi lijevanje.



Slika 6.15. Shematski prikaz stacionarne lončaste peći [59]

U stacionarnim lončastim pećima mogu se upotrijebiti i metalni lonci. Lonci od čelika ili nodularnog lijeva upotrebljavaju se za taljenje magnezijevih slitina i slitina na osnovi cinka jer te slitine ne reagiraju sa navedenim materijalima. Aluminij reagira sa čelikom i modularnim lijevom, zbog čega za taljenje aluminijskih slitina nisu pogodni lonci od tih materijala. Upotreba takvih lonaca u ljevaonicama aluminija moguća je ako se na lonac nanese odgovarajuća prevlaka da se fizički odvoji o tekućeg aluminija.

Nagibne lončaste peći po konstrukciji je vrlo slične stacionarnim lončastim pećima. Razlika je u tome što se cijela peć može nakrenuti, što omogućuje izlivanje taline u lijevni lonac ili u kalup (slika 6.16).



Slika 6.16. Shematski prikaz nagibne lončaste peći [59]

Pokretne lončaste peći upotrebljavaju se zajedno sa automatskim uređajima za lijevanje. Takav sustav uključuje više lončastih peći postavljenih na okretno postolje. Jedna peć se nalazi u poziciji za lijevanje u kalupe, dok se u ostale peći u fazi ulaganja, taljenja ili obrade taline.

7. ULJEVNI SUSTAVI

Uljevni sustav je mreža kanala u kalupu preko kojih se talina uvodi u kalup i ispunjava kalupnu šupljinu. Pravilno konstruiran uljevni sustav mora zadovoljiti niz kriterija [60]:

- brzo popunjavanje kalupne šupljine,
- minimalizacija turbulencije,
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgri,
- uklanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije ulaza u kalupnu šupljinu,
- spriječiti zahvaćanje zraka i ukloniti plinove iz kalupne šupljine,
- izbjegavanje deformacije odljevaka,
- stvaranje pogodnih temperaturnih gradijenata,
- omogućiti proizvodnju odljevaka uz korištenje minimalne količine metala (maksimalni izvadak),
- ekonomičnost uklanjanja uljavnog sustava,
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupljenja i lijevanja.

Brzo popunjavanje kalupa važno je iz nekoliko razloga. Gubitak topline tekućeg metala tijekom punjenja kalupa (posebno kod tankostjenih odljevka) može rezultirati prijevremenim skrućivanjem, nastajanjem površinskih greški (npr. hladni zavari) ili nepotpunim popunjavanjem dijelova kalupne šupljine. Pregrijavanjem taline povećava se njena livljivost, tj. sposobnost tečenja i sprječava prijevremeno skrućivanje. Međutim, prekomjerno pregrijavanje povećava opasnost od naplinjenja taline i povećava toplinsko opterećenje kalupa. Vrijeme punjenja kalupa treba održavati kraćim od vremena izrade kalupa na automatskim linijama za izradu kalupa da bi se povećala produktivnost.

Minimalizacija turbulencije. Turbulentno punjenje i tečenje u uljevnom sustavu i kalupnoj šupljini može povećati mehaničko i toplinsko opterećenje kalupa. Još veću opasnost predstavlja nastajanje greški na odljercima. Turbulentnim strujanjem taline povećava se opasnost od zahvaćanja uključaka i plinova. Plinovi zahvaćeni tekućim metalom u konačnici mogu rezultirati greškama na odljercima (plinska poroznost ili mjehuravost). Osim toga, plinovi mogu reagirati s tekućim metalom, što može dovesti do stvaranja troske i uključaka u odljercima.

Turbulentno tečenje povećava površinu tekućeg metala koji je izložen zraku unutar uljavnog sustava. Osjetljivost različitih ljevarskih slitina na oksidaciju značajno varira. Najvišu osjetljivost na oksidaciju pokazuju aluminijske i magnezijske slitine. Kod tih slitina turbulencije mogu dovesti do stvaranja značajnog oksidnog filma koji može biti zahvaćen tekućim metalom, što često uzrokuje neprihvatljive greške i rezultira odbacivanjem (škartiranjem) odljevka. Prema tome, tijekom punjenja kalupa, stacionarni tok taline u uljevnom sustavu mora se uspostaviti što je moguće prije.

Izbjegavanje erozije kalupa i jezgri. Velika brzina toka taline ili nepravilno usmjeren tok naspram površine kalupa (ili jezgre) može rezultirati erozijom površine kalupa i jezgre. Odvojene čestice kalupnog ili jezgrenog materijala zahvaća talina, zbog čega nastaju greške u i na odljercima (nemetalni uključci).

Uklanjanje troske, metalnih oksida i uključaka. Uljevni sustav mora omogućiti uklanjanje troske, metalnih oksida i uključaka prije no što uđu u kalupnu šupljinu i završe u odljevku. Osim uključaka koji mogu nastati unutar kalupne šupljine, treba ukloniti i uključke

koji potječu od vanjskih izvora (npr. pećna troska, čestice vatrostalne obloge ljevskog lonca itd.). Zbog toga uljevni sustav mora biti tako konstruiran i dimenzioniran da omogućiti dovoljno vremena za isplivavanje (tj. izdvajanje) uključaka iz taline prije nego što uđu u kalupnu šupljinu. Uklanjanje uključaka može se efikasno provesti ugradnjom adekvatnih filtara u uljevni sustav.

Izbjegavanje deformacije odljevaka posebno je važno kod proizvodnje tankostjenih odljevaka, kod kojih nejednolična raspodjela topline nakon popunjavanja kalupne šupljine može rezultirati nepovoljnim slijedom skrućivanja i deformacijom odljevka. Osim toga, stezanje metala u uljevnom sustavu tijekom njegovog skrućivanja može rezultirati povlačenjem dijelova odljevka tijekom skrućivanja, što može dovesti do nastanka toplih pukotina i deformacije.

Stvaranje pogodnih temperaturnih gradijenata. Budući da je posljednja talina koja ulazi u kalupnu šupljinu najtoplija, obično je pogodno uvesti tu talinu u onaj dio odljevka za koji se očekuje da će posljednji skrutnuti. Jedan od načina da se to ostvari je da se talina iz uljevskog sustava usmjeri u pojilo, iz kojeg potom talina ulazi u kalupnu šupljinu. Općenito gledano, pojilo je tako dimenzionirano da posljednje skrućuje u kalupu. Zbog toga prethodno navedeni tok taline (uljevni sustav – pojilo – odljevak) promovira usmjereno skrućivanje od odljevka prema pojilu.

Ako se uljevni sustav ne može konstruirati tako da osigura pogodne temperaturne gradijente, mora se obratiti pažnja da se konstruira tako da ne uzrokuje nepovoljne temperaturne gradijente. To često uključuje uvođenje taline u kalupnu šupljinu na više mjesta (tj. kroz više ušća) tako da ni jedno mjesto ne predstavlja toplinski čvor.

Maksimalni izvadak. Nakon hlađenja do sobne temperature, uljevni sustav i pojila uklanjaju se sa odljevka i vraćaju ponovo u proces kao povratni materijal koji se ponovno tali. Proizvodni troškovi mogu se značajno smanjiti ako se minimalizira količina metala u uljevnom sustavu i pojilima. Na taj način postiže se maksimalni izvadak, tj. iskorištenje taline i povećava produktivnost ljevaonice. Može se zaključiti da se uljevni sustav mora tako konstruirati i dimenzionirati da omogućiti proizvodnju ispravnih odljevka uz što je moguće manju količinu metala u uljevnom sustavu.

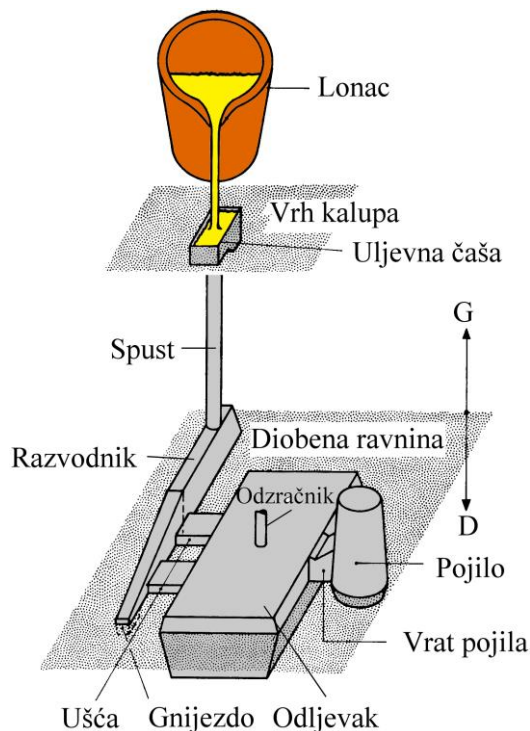
Ekonomičnost uklanjanja uljevskog sustava. Troškovi čišćenja i završne obrade odljevaka mogu se smanjiti ako se minimalizira broj i veličina ušća te vratova pojila povezanih sa odljevkom. Zbog toga, pogodno je uvesti talinu u kalupnu šupljinu kroz pojilo, jer vrat pojila može preuzeti ulogu ušća.

Kompatibilnost s postojećim načinom kalupljenja i lijevanja. Moderni visokoučinski strojevi za izradu kalupa i automatizirani sustavi za lijevanje često značajno ograničavaju fleksibilnost u pogledu mjesta postavljanja i oblika uljevne čaše te spusta preko kojih se talina uvodi u kalup. Često takvi sustavi postavljaju određena ograničenja na brzinu lijevanja.

7.1 Osnovne komponente uljavnog sustava

Osnovne komponente uljavnog sustava su (slika 7.1) [60 – 63]:

- uljevna čaša,
- spust,
- podnožje spusta,
- razvodnik,
- ušće i
- odzračnik.



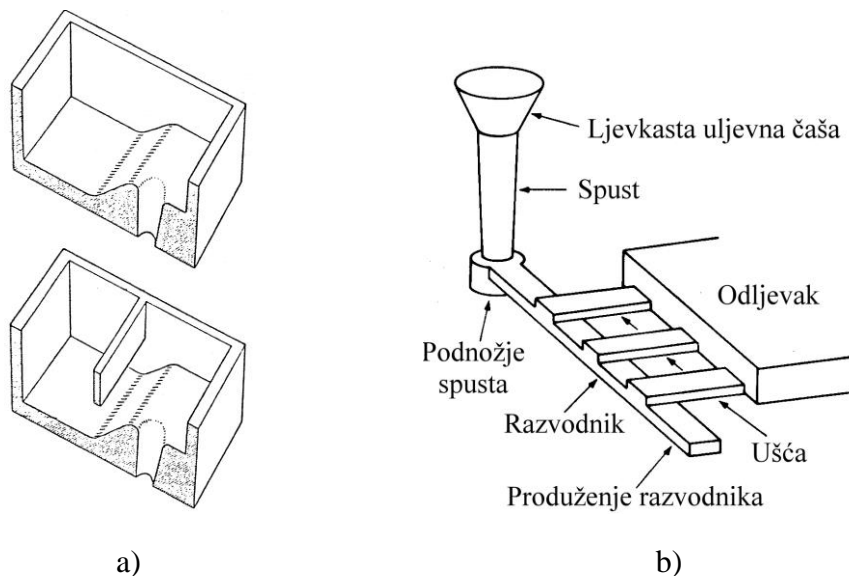
Slika 7.1. Osnovne komponente uljavnog sustava u kalupu s horizontalnom diobenom ravninom). G – gornja polovica kalupa, D – donja polovica kalupa [61]

Sve navedene komponente uljavnog sustava međusobno su povezane primjenom specifičnih pravila i proračunatih omjera.

Uljevni sustav može sadržavati i elemente koji osiguravaju napajanje odljevka (tj. pojila) za vrijeme njegovog skrućivanja da bi se izbjegle greške zbog volumnog stezanja metala. Radi poboljšanja čistoće taline prije ulaska u kalupnu šupljinu, odnosno uklanjanja nečistoća, u uljevni sustav mogu se inkorporirati **filtri**.

Uljevna čaša je prvi dio uljavnog sustava preko kojeg se talina uvodi u ostale dijelove sustava. Ona predstavlja rezervoar taline tijekom lijevanja, održavajući uljevni sustav tijekom cijelog lijevanja punim, sprječava rasprskavanje taline pri izlivanju iz lonca te sprječava nasisavanje zraka i plinova, kao i ulaz troske u spust i ostale dijelove uljavnog sustava. Dubina uljevne čaše mora biti 3 do 4 puta veća od promjera spusta kako se iznad spusta ne bi pojavio vrtlog koji uvlači zrak i trosku s površine taline.

Prema obliku, uljevna čaša može biti koritasta i ljevka (slika 7.2).



Slika 7.2. a) koritasta uljevna čaša [62], b) uljevni sustav s ljevkastom uljevnom čašom [60]

Koritasta uljevna čaša omogućuje izdvajanje metalnih oksida, troske i ostalih nemetalnih uključaka iz taline prije ulaza u ostale dijelove uljavnog sustava zbog njihove manje specifične težine u odnosu na talinu. Prilikom lijevanja talina se ulijeva u dio uljevne čaše koji ima veću dubinu (slike 7.1 i 7.2a), odnosno na suprotnoj strani od otvora spusta, a greben (tj. prijelaz s dubljeg na plići dio uljevne čaše) koji se nalazi na dnu čaše olakšava izdvajanje nemetalnih uključaka iz taline. Koritastu uljevnu čašu treba uvijek držati punom. Obzirom da je površina uljevne čaše veća od površine poprečnog presjeka spusta, brzina kretanja taline u čaši je relativno niska, što pomaže izdvajanje uključaka i troske. Kad se lijevaju slitine koje su sklone stvaranju oksida, primjenjuje se pregrada u koritastoj uljevnoj čaši, što doprinosi zadržavanju troske (slika 7.2a, dolje).

Ljevkaasta uljevna čaša ne ispunjava funkcije koje ima koritasta čaša i služi jedino da operateru olakša direktno lijevanje taline.

Volumen uljevne čaše može se odrediti pomoću slijedećeg izraza:

$$V_{\xi} = k \frac{m}{t\rho} \quad (7.1)$$

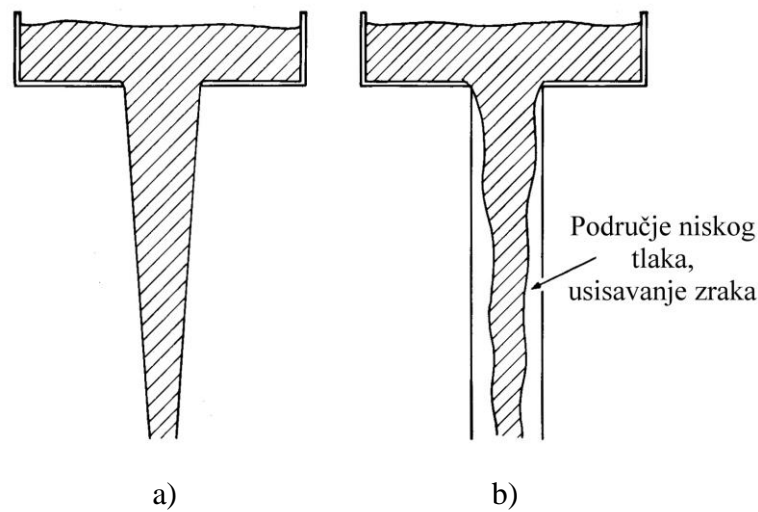
gdje je: V_{ξ} – volumen čaše (dm^3), k - koeficijent koji ovisi o masi taline u kalupu ($k = 1,5$ do 2 za ljevkastu uljevnu čašu, odnosno $k = 3$ do 8 za koritastu uljevnu čašu (tablica 7.1), m – masa taline u kalupu (kg), t – vrijeme lijevanja (s), ρ – gustoća taline (kg/dm^3).

Tablica 7.1. Vrijednost koeficijenta k ovisno o masi taline u kalupu (za koritastu uljevnu čašu) [62]

Masa taline, kg	do 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	5000 - 10000
k	3	4	6	7,5	8

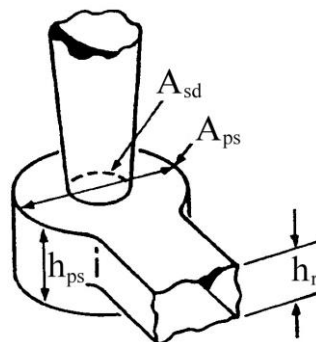
Spust je vertikalni kanal kružnog poprečnog presjeka putem kojeg se talina iz uljevne čaše transportira prema razvodniku i potom prema ušćima. Pravilno konstruiran spust sužava se prema dolje, slično obliku mlaza tekućine pri slobodnom padu (slika 7.3a). Takvim oblikom spusta smanjuju se turbulencije i mogućnost usisavanja zraka.

Ako se presjek spusta ne sužava prema dolje, talina usisava plinove zbog stvaranja područja niskog tlaka (slika 7.3b). Osim toga, tok taline je neujednačen i turbulentan, pogotovo kad mlaz taline dostigne osnovu, tj. podnožje spusta.



Slika 7.3. Shematski prikaz toka taline u spustu koji se sužava prema dolje (a) i ravnom spustu (b) [60]

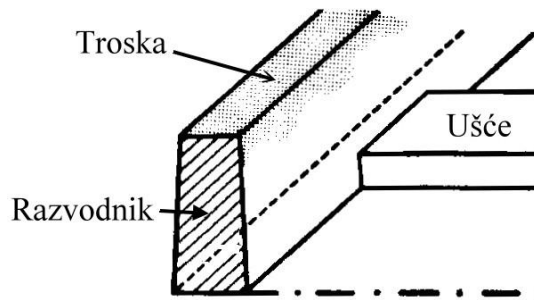
Na dnu spusta obično se nalazi podnožje spusta (slika 7.4) čija je uloga smanjenje turbulencije i tendencije ka usisavanju zraka.



Slika 7.4. Shematski prikaz podnožja spusta i karakteristične dimenzije [63]

Podnožje spusta najčešće je kružnog poprečnog presjeka. Površina poprečnog presjeka podnožja spusta (A_{ps} , slika 7.4) treba biti ~ 5 puta veća od površine poprečnog presjeka spusta na njegovom dnu (A_{sd}). Visina podnožja spusta (h_{ps} , slika 7.4) treba biti ~ 2 puta veća od visine razvodnika (h_r).

Razvodnik prihvaća i umiruje talinu iz spusta, omogućuje izdvajanje uključaka i metalnih oksida (isplivavaju na površinu taline i zadržavaju se u gornjem dijelu razvodnika) te usmjerava talinu u ušća. Razvodnik i uljevna čaša jedine su komponente u uljevnom sustavu, osim filtra, koje mogu spriječiti ulazak uključaka i metalnih oksida u kalupnu šupljinu. Najviše se upotrebljavaju razvodnici trapeznog poprečnog presjeka kod kojih je visina veća od širine, jer se time omogućuje izdvajanje troske i nečistoća iz taline (slika 7.5). Kod lijevanja odljevaka od čeličnih ljevova često se upotrebljavaju razvodnici kružnog poprečnog presjeka.



Slika 7.5. Shematski prikaz izdvajanja troske u trapeznom razvodniku [64]

Kod lijevanja u kalupe s horizontalnom diobenom ravninom, razvodnik se postavlja vodoravno u donju ili gornju polovicu kalupa, što ovisi o vrsti uljevnog sustava.

Uljevni sustav može imati jedan ili više razvodnika, što ovisi o veličini, obliku i broju odljevaka u kalupu. Razvodnici moraju biti tako konstruirani da se izbjegnu nagle promjene smjera toka taline jer uzrokuju stvaranje zona niskog tlaka i usisavanje zraka.

Ušće predstavlja završni element uljevog sustava i povezuje razvodnik s kalupnom šupljinom. Obično se radi ravnomjernijeg i bržeg punjenja kalupne šupljine upotrebljava više ušća. Dimenzije i oblik ušća treba prilagoditi debljini stijenke odljevka. Ukoliko se uljevni sustav odstranjuje odlamanjem, debljina ušća ne smije preći 60 do 70 % debljine stijenke odljevka, kako se odljevak ne bi zalomio pri odstranjivanju uljevnog sustava. Ako se uljevni sustav odstranjuje rezanjem, debljina ušća može biti ista ili čak veća od debljine stijenke odljevka. Najčešće se upotrebljavaju ušća pravokutnog poprečnog presjeka kod kojih je visina manja pod širine (slika 7.5). U ljevaonicama odljevaka od čeličnih ljevova često se upotrebljavaju ušća kružnog poprečnog presjeka. Erozijska kalupa je najmanja u slučaju primjene ušća kružnog poprečnog presjeka. Međutim, negativna strana takvih ušća je pojava turbulencija.

Kod lijevanja taline kroz dno lonca s čepnom motkom u kalup, kao što je to slučaj kod lijevanja čelika, zbog djelovanja mase taline u loncu stvara se visok metalostatički tlak. To rezultira visokom kinetičkom energijom, odnosno brzinom istjecanja taline iz lonca. Velike brzine taline mogu rezultirati erozijom i oštećenjem kalupa. Iz tog razloga često se u ljevaonicama čelika uljevni sustavi formiraju pomoću već gotovih odgovarajućih vatrostalnih (šamotnih) opeka u obliku kanalice, odnosno cijevi kružnog poprečnog presjeka koje imaju superiorniju otpornost na eroziju od svježe kalupne mješavine. Vatrostalne opeke (kanalice) postavljaju se u kalup prilikom njegove izrade i formiraju uljevni sustav.

Primjena vatrostalnih opeka (kanalica) za formiranje uljevnog sustava uglavnom je ograničena na velike čelične odljevke. Kod lijevanja takvih odljevaka velika količina i brzina rastaljenog metala koji prolazi kroz uljevni sustav može rezultirati značajnom erozijom kalupa od svježe kalupne mješavine. Kod izrade manjih kalupa na automatskim uređajima primjena vatrostalnih opeka (kanalica) značajno otežava proces. Zbog toga se uljevni sustavi kod proizvodnje manjih čeličnih odljevaka često izvode na klasični način, odnosno pomoću modela formiraju se u kalupnoj mješavini.

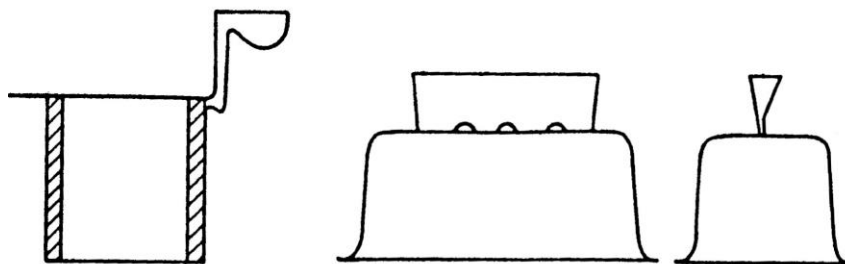
7.2 Vrste uljernih sustava

Obzirom na tehniku izrade kalupa, odnosno diobenu ravninu, uljevni sustavi mogu se podijeliti na **horizontalne i vertikalne** [60 – 63]. Horizontalni uljevni sustavi češći su u praksi. Vertikalni uljevni sustavi primjenjuju se kod automatskih uređaja za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom (npr. Disamatic® linije).

Prema položaju ušća, uljevni sustavi mogu se klasificirati u tri osnovne grupe:

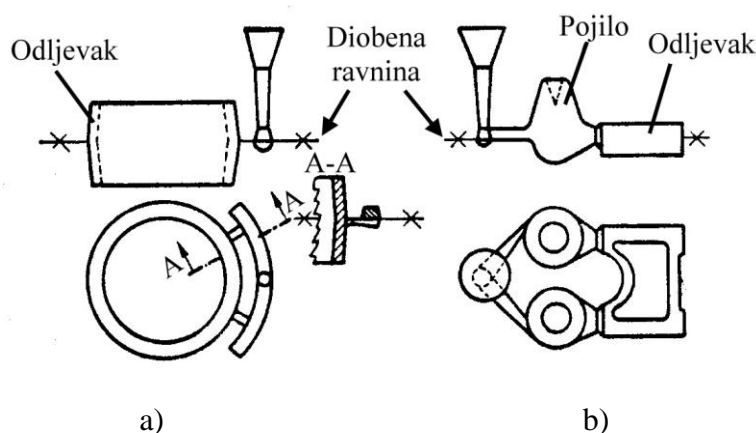
- **direktni uljevni sustavi sa ušćem odozgo,**
- **indirektni uljevni sustavi sa ušćem na diobenoj ravnini (ulijevanje sa strane) i**
- **uljevni sustavi sa ušćem odozdo.**

Direktni uljevni sustav (slika 7.6) omogućuje brzo lijevanje, pravilno skrućivanje odljevka, kao i postepeno hlađenje (pozitivan temperaturni gradijent). Takav način lijevanja teško se primjenjuje kod velikih odljevaka. Zbog velike brzine taline dolazi do udara taline i snažnog erozivnog djelovanja u kalupu, raspršivanja mlaza i stvaranja grešaka u obliku hladnih kapi. Direktni uljevni sustav s klinastim ušćem primjenjuje se za lijevanje odljevaka s vrlo tankim stijenkama, gdje se zahtijeva velika brzina lijevanja (slika 7.6, desno).



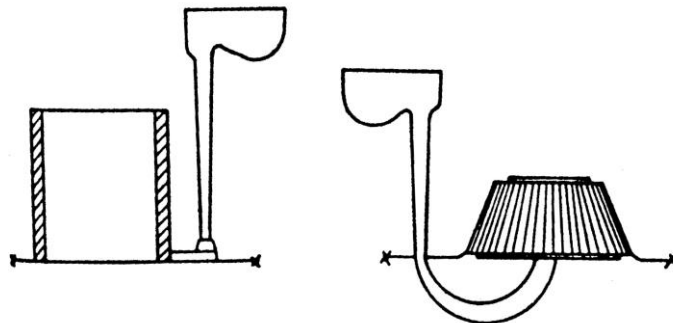
Slika 7.6. Direktni uljevni sustav sa ušćem odozgo [62]

Indirektni uljevni sustav često se primjenjuje jer to najčešće uvjetuje konfiguracija odljevka i jednostavnost izrade kalupa (slika 7.7). U pogledu slijeda skrućivanja uvjeti su nešto složeniji i ovise o obliku odljevka i razmještanju pojila. Često se primjenjuje više ušća da bi se postigla povoljnija raspodjela temperature.



Slika 7.7. Indirektni uljevni sustavi: a) ulijevanje kroz razvodnik i ušća, b) ulijevanje kroz pojilo [62]

Uljevni sustav sa ušćem odozdo rjeđe se primjenjuje jer to zahtijeva kompleksniji način izrade kalupa (slika 7.8). Taj sustav odlikuje se mirnijim načinom punjenja kalupne šupljine, ali i neprirodnim slijedom skrućivanja jer je donji dio odljevka najtopliji, što zahtijeva veća pojila. Zbog mirnog ulaza taline u kalupnu šupljinu, takav uljevni sustav je pogodan za lijevanje metala koji su osjetljivi na oksidaciju.

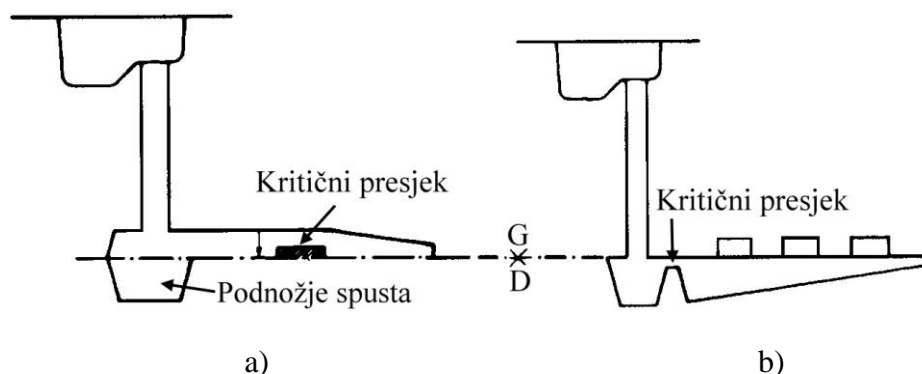


Slika 7.8. Uljevni sustav sa ušćem odozdo [62]

Pri konstrukciji uljernih sustava, prije no što se izračunaju dimenzije pojedinih komponenti uljernih sustava, mora se donijeti nekoliko odluka koje se odnose na izbor uljernih sustava, odnosno određivanje položaja kritičnog dijela (tj. presjeka) uljernih sustava. Zbog toga, mnogo je važnija podjela obzirom na položaj kritičnog presjeka. Dio uljernih sustava koji ima najmanji poprečni presjek određuje brzinu strujanja taline u sustavu, odnosno vrijeme punjenja kalupa i naziva se **kritični presjek** ili prigušenje.

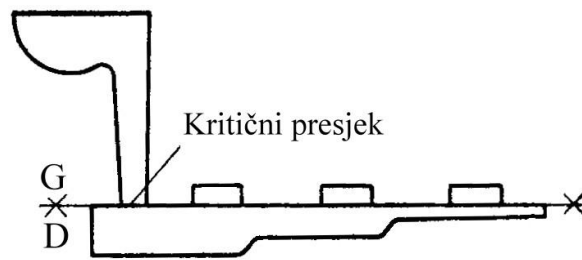
Prema položaju kritičnog presjeka uljevni sustavi klasificiraju se u dvije osnovne skupine [60 - 65]:

- **tlačni uljevni sustavi** ili 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 7.9a),
- **semitlačni uljevni sustavi** ili uljevni sustavi bez prigušenja. Po obliku su divergentni jer se u smjeru toka taline šire, pa za njih vrijedi odnos: $A_s < A_r < A_u$ (slika 7.9b).



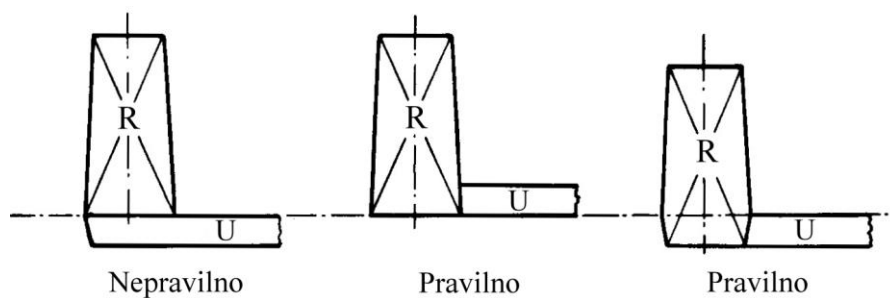
Slika 7.9. Vrste uljernih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravnom: a) tlačni uljevni sustav, b) semitlačni uljevni sustav (G – gornja polovica kalupa, D – donja polovica kalupa) [64]

Kod tlačnih uljernih sustava kritični presjek je presjek ušća (slika 7.9a), dok kod semitlačnih uljernih sustava to može biti presjek razvodnika u blizini spusta (tj. spoj razvodnika sa podnožjem spusta (slika 7.9b) ili presjek na izlazu iz spusta (slika 7.10).

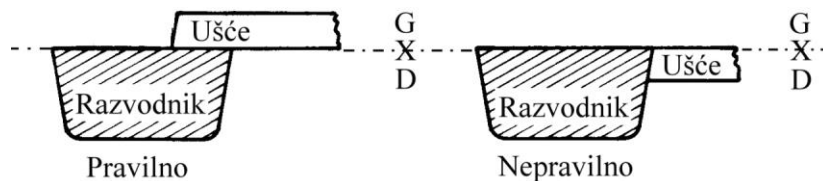


Slika 7.10. Semitlačni uljevni sustav kod kojeg presjek spusta na dnu predstavlja kritični presjek [62]

Kod tlačnih uljernih sustava razvodnik se smješta u gornju polovicu kalupa, a ušća u donju ili gornju polovicu kalupa (tj. ispod ili iznad diobene ravnine kalupa), s tim da donja stranica ušća i razvodnika moraju biti u istoj horizontalnoj ravnini (slika 7.11). Kod semitlačnih uljernih sustava razvodnik je smješten u donjoj polovici kalupa ispod diobene ravnine, a ušća u gornjoj polovici kalupa na diobenoj ravnini (slika 7.12). Time se smanjuje mogućnost ulaska troske i nečistoća u ušća.



Slika 7.11. Nepravilan i pravilni načini povezivanja razvodnika i ušća u tlačnom uljevnom sustavu (R – razvodnik, U – ušće) [65]



Slika 7.12. Pravilan i nepravilan spoj razvodnika i ušća u semitlačnom uljevnom sustavu [65]

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 taline (pod uvjetom da imaju jednake površine presjeka),
- masa taline u uljevnom sustavu je manja u usporedbi s uljervim sustavom bez prigušenja, tj. postiže se veće iskorištenje taline,

- zbog velike brzine strujanja taline u ušću može se dogoditi rasprskavanje i stvaranje vrtloga oko ušća,
- uklanjanje uljavnog sustava sa odljevka zahtijeva manje rada i kraće brušenje na mjestu dodira ušća i odljevka u odnosu na semitlačni uljevni sustav.

Najvažnije karakteristike semitlačnih uljavnih sustava su:

- zbog velike površine poprečnog presjeka ušća talina ulazi u kalupnu šupljinu s malom brzinom, pa je manja vjerojatnost rasprskavanja, oksidacije taline i stvaranja vrtloga oko ušća,
- kroz svako ušće ne prolazi jednaka količina taline. Taj nedostatak može se ukloniti prikladnom konstrukcijom razvodnika: presjek razvodnika sužava se u smjeru toka taline poslije svakog ušća za površinu poprečnog presjeka ušća (slika 7.10),
- uljevni sustav nije uvijek pun. Da bi svi dijelovi sustava bili uvijek puni razvodnik treba postaviti u donji dio kalupa (slike 7.9b i 7.10),
- masa taline je veća nego u tlačnom uljevnom sustavu, zbog čega je manje iskorištenje taline.

Za lijevanje odljevaka od sivog i temperiranog lijeva obično se primjenjuje tlačni uljevni sustav. Odljevci od lakih neželjeznih slitina obično se lijevaju kroz semitlačni uljevni sustav jer su te slitine osjetljive na veliku brzinu strujanja taline u ušću, stvaranje oksida i vrtloga (tj. turbulencija). Kod čeličnog i nodularnog lijeva, te kod teških neželjeznih slitina upotrebljava se i jedan i drugi sustav, prema konkretnim uvjetima.

Semitlačni uljevni sustav primjenjuje se u slučaju lijevanja većeg broja malih odljevaka u jednom kalupu, kada je nepraktična primjena prigušenja (tj. kritičnog presjeka) na svakom pojedinačnom odljevku i kada su dimenzije kritičnog presjeka vrlo male, odnosno vrlo zahtjevne obzirom na tehniku izrade kalupa i temperaturu lijevanja.

U tlačnim uljavnim sustavima obično se primjenjuju slijedeći omjeri površine poprečnog presjeka spusta A_s , razvodnika A_r i ušća A_u :

$$\begin{aligned}
 A_s : A_r : A_u &= 2 : 1,5 : 1 \\
 A_s : A_r : A_u &= 1,4 : 1,2 : 1 \\
 A_s : A_r : A_u &= 1,2 : 1,1 : 1
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

Kritični presjek je presjek ušća koji se mora prvo odrediti, a onda se u skladu s danim razmjerima određuju presjeci spusta i razvodnika.

U semitlačnim uljavnim sustavima obično se primjenjuju slijedeći omjeri:

$$\begin{aligned}
 A_s : A_r : A_u &= 1 : 2 : 2 \\
 A_s : A_r : A_u &= 1 : 3 : 3 \\
 A_s : A_r : A_u &= 1 : 4 : 4 \\
 A_s : A_r : A_u &= 1 : 6 : 6
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Kritični presjek je dno spusta koji se mora prvo odrediti, a onda se u skladu s danim razmjerima određuju površine poprečnog presjeka razvodnika i ušća. Uljevni sustav sa omjerom $A_s : A_r : A_u = 1 : 2 : 2$ često se susreće u lijevaonicama čelika.

7.3 Dimenzioniranje uljavnog sustava

Prije no što se izračunaju dimenzije pojedinih komponenti uljavnog sustava, treba odabrati tip uljavnog sustava (tlačni ili semitlačni). Uljevni sustav se dimenzionira počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek, tzv. kritični presjek, koji određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu. Vrijeme punjenja kalupne šupljine također ovisi o kritičnom presjeku. Za pravilno dimenzioniranje uljavnog sustava treba poznavati nekoliko temeljnih principa dinamike fluida [60, 65].

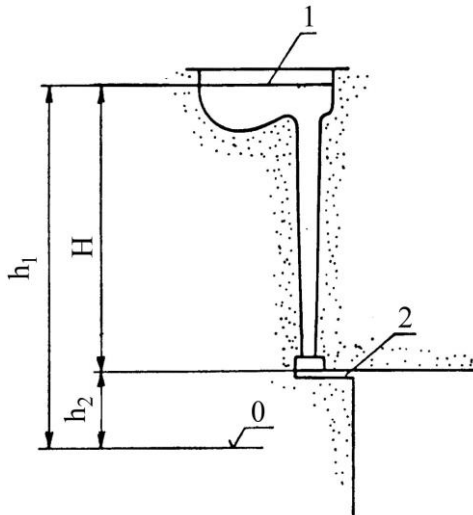
7.3.1 Primjena Bernoullijeve jednadžbe

Uljevni sustav možemo promatrati kao posudu iz koje istječe talina. Brzina istjecanja tekućine može se odrediti primjenom Bernoullijeve jednadžbe koja je u biti poseban oblik zakona o očuvanju energije. Prema Bernoullijevoj jednadžbi u svakoj točki punog sustava ukupna energija je konstantna, odnosno zbroj potencijalne energije, kinetičke energije i energije tlaka u svim presjecima je konstantan:

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho} = \text{konst.} \quad (7.4)$$

gdje je: h – visina, v – brzina, g – gravitacijsko ubrzanje, p – tlak i ρ – gustoća.

Primjenom Bernoullijevog teorema na presjek 1, tj. nivo taline u čaši (slika 7.13) i na presjek 2, odnosno nivo ušća u tlačnom uljevnom sustavu može se napisati slijedeća jednadžba:



Slika 7.13. Primjena Bernoullijeve jednadžbe na uljevni sustav [64]

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} \quad (7.5)$$

gdje je: h_1 – visina taline u uljevnoj čaši u odnosu na referentni nivo, v_1 – brzina taline u uljevnoj čaši, g – gravitacijsko ubrzanje, p_1 – tlak na površini taline u uljevnoj čaši, ρ – gustoća taline, h_2 – visina ušća u odnosu na referentni nivo, v_2 – brzina taline u ušću, p_2 – tlak taline u ušću.

Na površini taline u čaši i u ušću djeluje atmosferski tlak, zbog čega je $p_1 = p_2$. Površina poprečnog presjeka čaše je daleko veća od površine presjeka ušća, zbog čega je brzina strujanja u čaši (v_1) vrlo mala u odnosu na brzinu strujanja u ušću, tako da se može zanemariti ($v_1 = 0$). Uzevši to u obzir, jednačba (7.5) može se napisati u slijedećem obliku:

$$h_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (7.6)$$

Daljnijm sređivanjem jednačbe (7.6) i uvrštavanjem $H = h_1 - h_2$ dobiva se poznata Torricelijeva formula za brzinu istjecanja idealnih fluida:

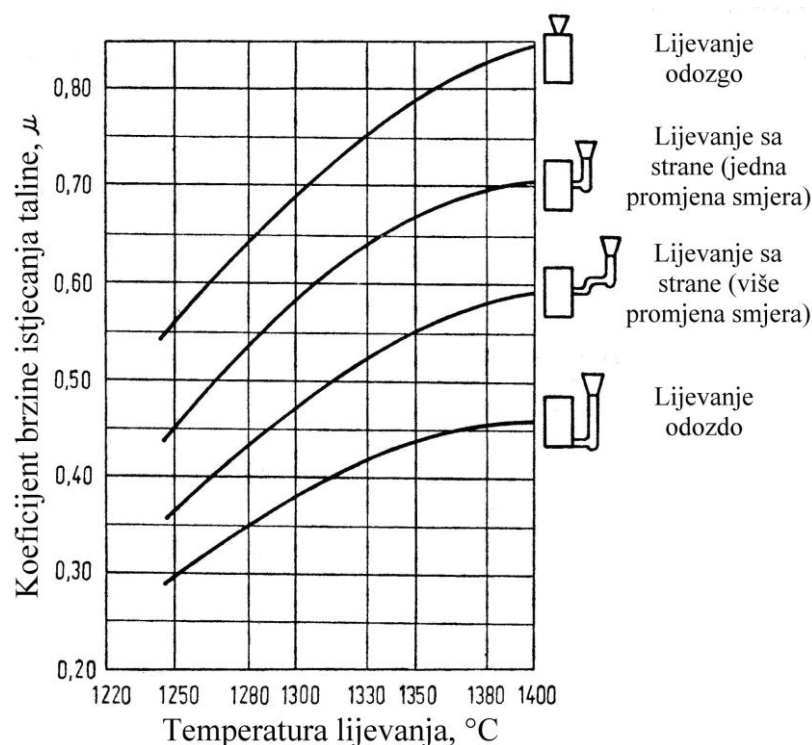
$$v_2 = \sqrt{2gH} \quad (7.7)$$

gdje je: v_2 – brzina istjecanja, odnosno brzina taline u ušću (cm/s), a H – vertikalna udaljenost između nivoa taline u uljevnoj čaši i nivoa ušća.

Stvarna brzina istjecanja taline u ušću uvijek je manja od vrijednosti određene jednačbom (7.7) zbog energetskih gubitaka koji nastaju uslijed unutarnjeg trenja u uljevnom sustavu. Iz tog razloga uvodi se koeficijent brzine istjecanja μ :

$$v_2 = \mu \sqrt{2gH} \quad (7.8)$$

Vrijednost koeficijenta μ ovisi o vrsti lijeva, odnosno koeficijentu viskoznosti taline, temperaturi taline, te obliku i konstrukciji uljevnog sustava (tj. broju promjena pravca kretanja taline). Vrijednost tog koeficijenta određuje se iz dijagrama konstruiranih za danu vrstu lijeva u zavisnosti od gore navedenih faktora. Vrijednosti koeficijenta brzine istjecanja μ za sivi lijev za razne načine ulijevanja i temperature taline mogu se odrediti sa slike 7.14.



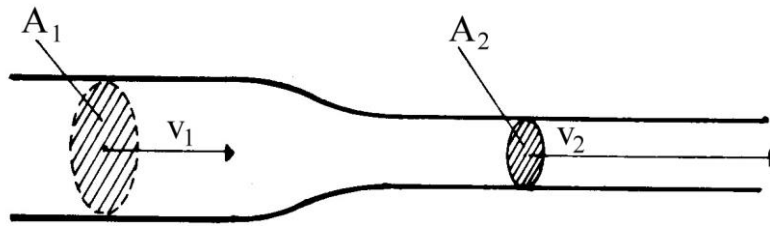
Slika 7.14. Ovisnost koeficijenta brzine istjecanja (μ) taline sivog lijeva o temperaturi taline i načinu lijevanja [62]

7.3.2 Primjena zakona o kontinuitetu strujanja

Prema zakonu o kontinuitetu strujanja, u sustavu s nepropusnim stijenkama koji je ispunjen nestlačivom tekućinom, intenzitet strujanja (Q) je konstantan u svim točkama sustava [65]:

$$Q = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{konst.} \quad (7.9)$$

U jednadžbi (7.9) Q predstavlja protok, odnosno intenzitet strujanja taline (m^3/s), A_1 i A_2 su površine poprečnog presjeka kanala u točki 1, odnosno točki 2 (m^2) (slika 7.15), a v_1 i v_2 su brzine strujanja taline u točki 1, odnosno točki 2 (m/s).



Slika 7.15. Brzina toka taline kroz kanal s različitim površinama poprečnog presjeka (zakon o kontinuitetu strujanja) [65]

Volumen tekućine koji protječe u jedinici vremena kroz bilo koji presjek u sustavu je konstantan. To znači da brzina tekućine raste sa smanjenjem površine poprečnog presjeka i obrnuto.

Zakon o kontinuitetu strujanja primjenjuje se pri dimenzioniranju spusta koji se sužava prema dolje, tj. u smjeru toka taline (slika 7.3a). Pri određivanju površine poprečnog presjeka spusta na gornjem kraju (A_{sg}) (tj. spoju sa dnom uljevne čaše) polazi se od toga da za isto vrijeme treba ista količina taline proteći na gornjem i na donjem kraju spusta. Primjenom jednadžbe kontinuiteta za presjeke na vrhu (A_{sg}) i dnu spusta (A_{sd}) dobiva se:

$$Q_{sg} = A_{sg} \cdot v_{sg} ; Q_{sd} = A_{sd} \cdot v_{sd} \quad (7.10)$$

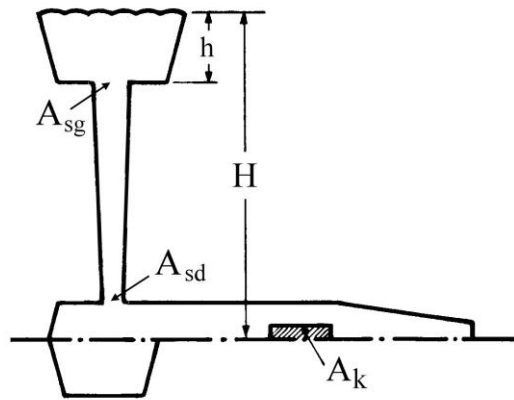
$$Q_{sg} = Q_{sd}$$

gdje je: Q_{sg} - protok taline kroz spust na vrhu, v_{sg} - brzina protjecanja taline kroz spust na vrhu, A_{sg} - površina poprečnog presjeka spusta na vrhu (tj. na spoju sa dnom čaše), Q_{sd} - protok taline kroz spust na dnu, v_{sd} - brzina protjecanja kroz spust na dnu, A_{sd} - površina poprečnog presjeka spusta na dnu.

Ako se brzine taline u jednadžbi (7.10) izraze pomoću jednadžbe (7.8), visina taline u uljevnoj čaši označi sa h , a vertikalna udaljenost između nivoa taline u čaši i nivoa kritičnog presjeka sa H (slika 7.16), može se doći do izraza za određivanje površine poprečnog presjeka spusta na gornjem kraju (A_{sg}):

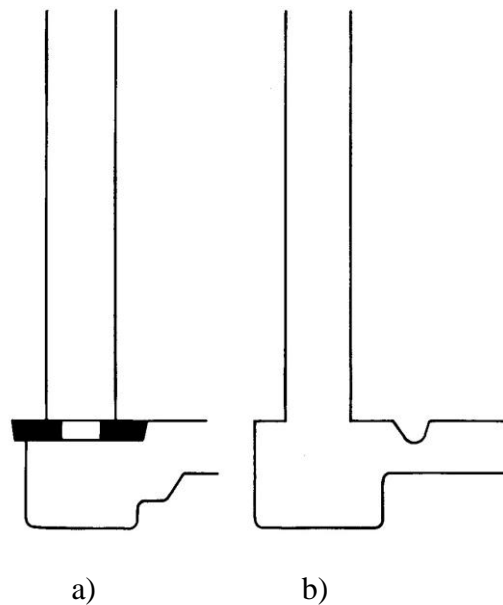
$$A_{sg} \sqrt{2gh} = A_{sd} \sqrt{2gH}$$

$$A_{sg} = A_{sd} \sqrt{\frac{H}{h}} \quad (7.11)$$



Slika 7.16. Shematski prikaz tlačnog uljavnog sustava [65]

Spust koji se sužava prema dolje (u pravcu toka taline) sprječava usisavanje zraka u talinu i nastanak turbulentnog strujanja taline. Međutim, takav tip spusta nije prihvatljiv kod mnogih tipova visokoučinskih strojeva za izradu kalupa jer onemogućuje izvlačenje modela iz kalupa (spust bi se trebao proširivati u smjeru diobene ravnine kalupa da bi se mogao sa modelom odljevka izvući iz kalupa). Zbog toga se često primjenjuje ravni spust, s tim da se na dnu spusta ili u razvodniku u blizini spusta načini odgovarajuće prigušenje (slika 7.17) kojim se osigurava da padajući mlaz taline ispuni spust po čitavom presjeku.

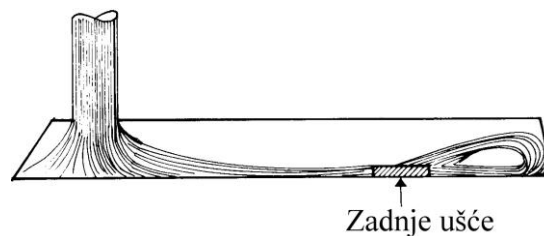


Slika 7.17. Formiranje prigušenja u ravnom spustu radi aproksimacije toka taline u spustu koji se sužava prema dolje, tj. prema diobenoj ravnini kalupa: a) prigušenje na dnu spusta, b) prigušenje u razvodniku [60]

7.3.3 Učinci momenta

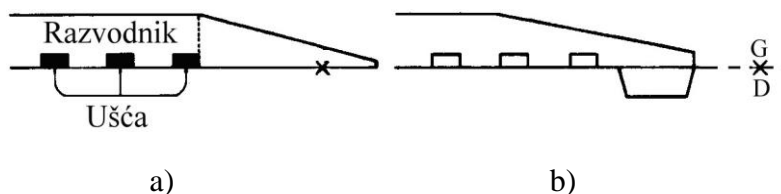
Prema prvom Newtonovom zakonu suma sila koje djeluju na neko tijelo koje se nalazi u stanju mirovanja ili gibanja konstantnom brzinom je nula. Drugim riječima, tijelo koje se nalazi u stanju mirovanja ili se giba konstantnom brzinom ostat će u tom stanju sve dok vanjska sila ne djeluje na njega. To znači da će npr. talina u razvodniku koja teče konstantnom brzinom nastaviti s tim tokom u danom smjeru sve dok vanjska sila ne djeluje na nju i promjeni joj smjer ili brzinu ili oboje.

Prema drugom Newtonovom zakonu masa je svojstvo materijala. Taj zakon ne nalazi direktnu primjenu u dimenzioniranju uljavnog sustava, već u njegovom funkcioniranju. Npr. na početku lijevanja u tlačnom uljevnom sustavu talina u razvodniku gibat će se konstantnom brzinom sve dok ne dosegne završetak razvodnika. U toj točki dolazi do nagle deceleracije, što rezultira smanjenjem brzine na nulu. Prema tome, nastala sila uzrokuje tok taline u suprotnom smjeru (slika 7.18), što u konačnici rezultira visokom turbulencijom i mogućim unošenjem troske i nečistoća u ušća, jer je prva talina značajnije oksidirana te sadrži čestice troske i razne nečistoće.



Slika 7.18. Povratni tok taline i stvaranje turbulencija na početku lijevanja u tlačnom uljevnom sustavu zbog nepravilne konstrukcije razvodnika [65]

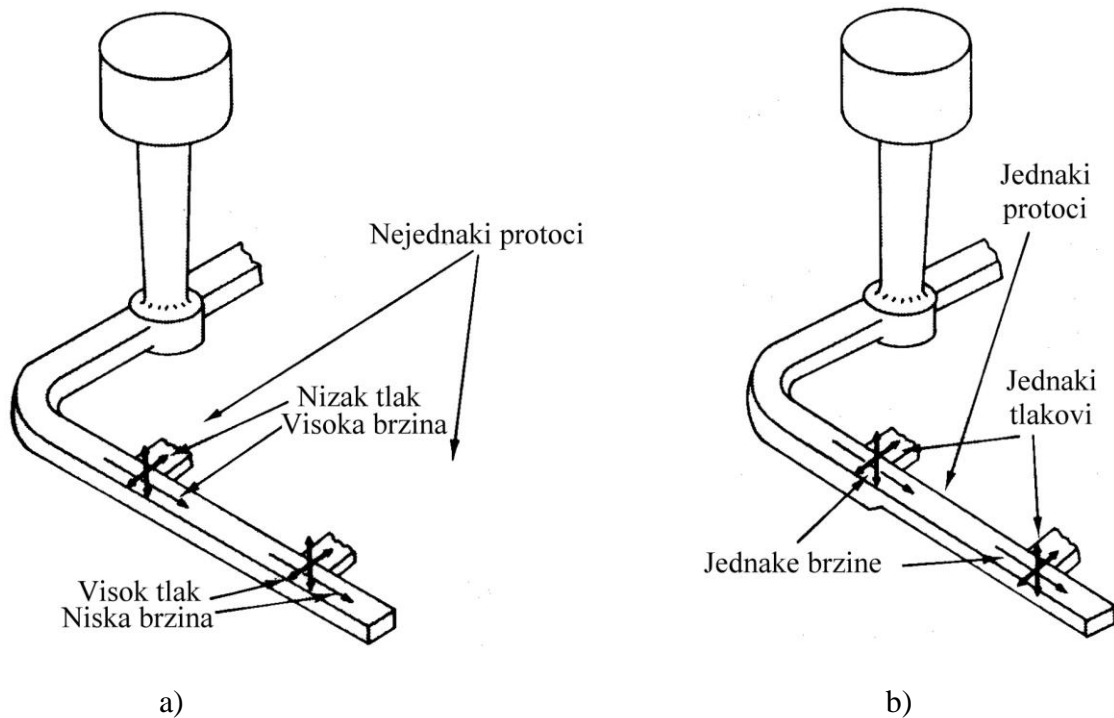
Prethodno opisani problem može se riješiti pravilnom konstrukcijom razvodnika [6]. Ako razvodnik ima dovoljnu dužinu nakon zadnjeg ušća (slike 7.2b i 7.19), zbog djelovanja momenta prva talina prolazi mimo ušća i završava u produžetku razvodnika. Isti princip primjenjuje se i kod semitlačnih uljavnih sustava. U tom slučaju ušća će se puniti čistom talinom koja slijedi iza početnog mlaza.



Slika 7.19. Pravilno konstruiran završetak razvodnika u tlačnom uljevnom sustavu: a) klinasti oblik razvodnika od zadnjeg ušća do završetka razvodnika, b) dodatak tzv. „gnijezda“ na kraju klinastog dijela razvodnika [65]

Kod tlačnih uljavnih sustava završetak razvodnika, odnosno produžetak od zadnjeg ušća do kraja razvodnika, mora se stanjivati prema kraju tako da poprimi oblik klina (slika 7.19a). Time se minimalizira turbulencija i mogućnost unošenja troske i nečistoća u ušća. U slučaju ograničenog prostora u kalupu (nedostatan produžetak razvodnika nakon zadnjeg ušća) može se dodati tzv. „gnijezdo“, odnosno podnožje ispod razvodnika na njegovom kraju (slika 7.19b).

Da bi brzina strujanja ostala konstantna duž čitave dužine razvodnika u semitlačnom uljevnom sustavu, treba održavati jednake tlakove na ušćima (slika 7.20).



Slika 7.20. Nepravilna (a) i pravilna (b) konstrukcija razvodnika u semitlačnom uljevnom sustavu [60]

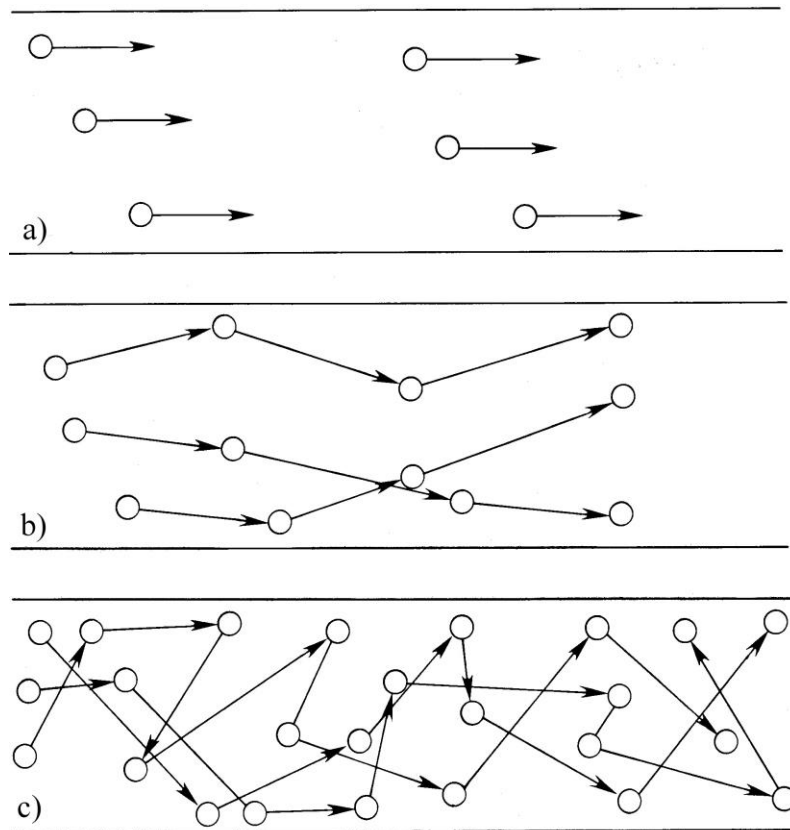
Zbog djelovanja momenta brzina taline kod prvog ušća je veća u odnosu na drugo ušće. Kod drugog ušća, brzina u razvodniku smanjuje se kad se dostigne njegov kraj, što rezultira višim tlakom i višim protokom taline kroz drugo ušće. Taj nedostatak može se ukloniti prikladnom konstrukcijom razvodnika. Presjek razvodnika treba se sužavati u smjeru toka taline poslije svakog ušća za površinu poprečnog presjeka ušća [65]. U analiziranom primjeru na slici 7.20, postavljanjem stepenice na razvodniku nakon prvog ušća (slika 7.20b) izjednačavaju se brzine taline i tlakovi kod oba ušća. Isti efekt može se postići i postepenim suženjem poprečnog presjeka razvodnika u smjeru toka taline (slika 7.9b).

Ispitujući strujanje različitih tekućina u cijevima, Reynolds je došao do zaključka da priroda strujanja viskoznih tekućina ovisi o brzini strujanja, viskozitetu, gustoći i promjeru cijevi [60]. Strujanje tekućine može se karakterizirati izračunavanjem tzv. Reynoldsovog broja:

$$Re = \frac{vd\rho}{\eta} \quad (7.12)$$

gdje je: Re – Reynoldsov broj, v – brzina tekućine, d – promjer kanala kroz koji se giba tekućina, ρ – gustoća tekućine, η – dinamički viskozitet tekućine.

Ako je $Re < 2000$ (slika 7.21a) strujanje je laminarno. Molekule tekućine nastoje se ravno gibati u smjeru toka.



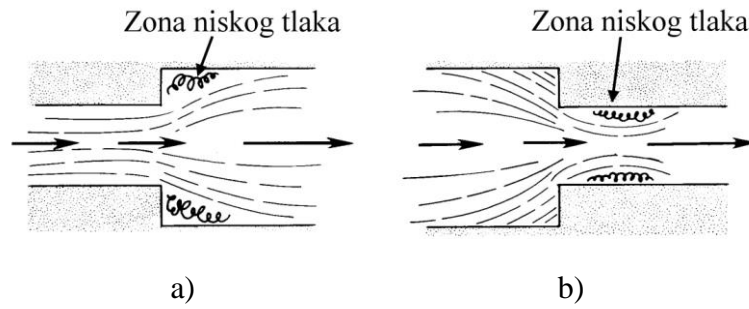
Slika 7.21. Reynoldsov broj i njegova povezanost s karakterizacijom strujanja: a) $Re < 2000$ (laminarno strujanje), b) $2000 \leq Re < 20000$ (turbulentno strujanje), c) $Re \geq 20000$ (izrazito turbulentno strujanje) [60]

U sustavima u kojima je Reynoldsov broj između 2000 i 20000, u unutrašnjosti u određenom opsegu pojavit će se miješanje i turbulencije (slika 7.21b), s tim da će se na površini mlaza održavati relativno neometan tj. miran granični sloj. Ta vrsta turbulentnog toka, koja je uobičajena za mnoge uljevne sustave u ljevaonicama, može se smatrati relativno bezopasnom sve dok ne dođe do kidanja površinskog sloja mlaza taline, što bi rezultiralo zahvaćanjem zraka.

Ako je $Re \geq 20000$, strujanje će biti izrazito turbulentno (slika 7.21c). U tom slučaju doći će do kidanja površinskog sloja mlaza taline s velikom vjerojatnošću uvlačenja zraka i stvaranja metalnih oksida (troske).

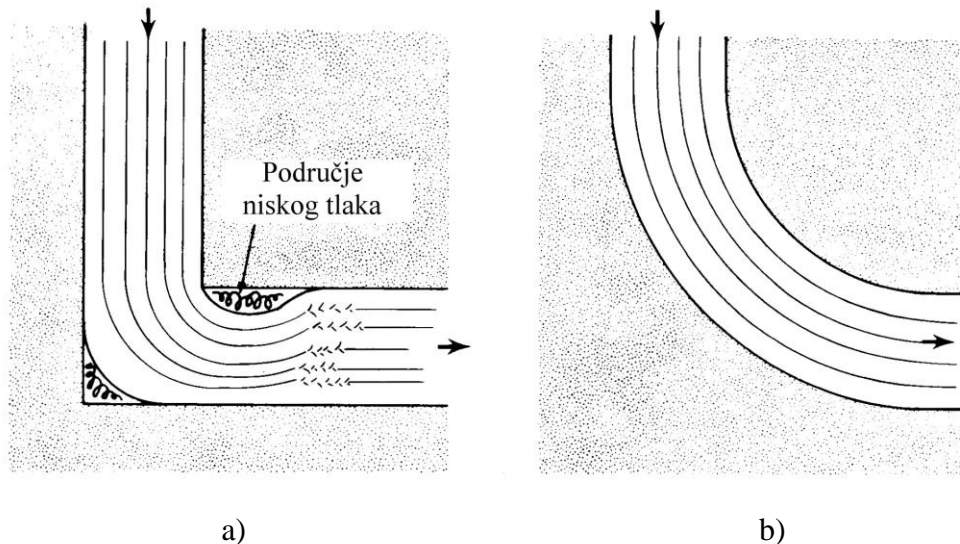
U uljevnim sustavima u praksi ne ostvaruje se idealno laminarno strujanje, jer bi u tom slučaju brzina taline bila vrlo niska i ne bi se mogao ispuniti kalup prije nego što dođe do skrućivanja taline. U većini slučajeva strujanje je miješano, s tim da ne smije doći do kidanja površinskog sloja mlaza taline. Treba težiti da laminarna komponenta bude što je moguće više izražena.

Pri konstruiranju uljavnog sustava treba izbjeći nagle promjene poprečnog presjeka kanala kroz koje protječe talina, jer može doći do stvaranja zona niskog tlaka, usisavanja zraka i pojave turbulencija (slika 7.22). Problem prikazan na slici 7.22 može se minimalizirati postepenim promjenama poprečnih presjeka kanala.



Slika 7.22. Shematski prikaz stvaranja zona niskog tlaka zbog nagle promjene poprečnog presjeka kanala kroz koje protječe talina: a) naglo povećanje poprečnog presjeka kanala, b) naglo smanjenje poprečnog presjeka kanala [60]

U uljevnim sustavima treba izbjeći nagle promjene smjera toka taline jer mogu rezultirati stvaranjem zona niskog tlaka, usisavanjem zraka i pojavom turbulencija (slika 7.23a). Navedeni problemi mogu se minimalizirati postepenom promjenom smjera toka taline (slika 7.23b).



Slika 7.23. Shematski prikaz toka taline u slučaju nagle promjene smjera toka (a) i postepene promjene smjera toka (b) [60]

Nagle promjene smjera toka taline rezultiraju i povećanjem gubitaka zbog trenja. Sustav s visokim gubicima zbog trenja zahtijeva viši tlak da bi se održala potrebna brzina strujanja.

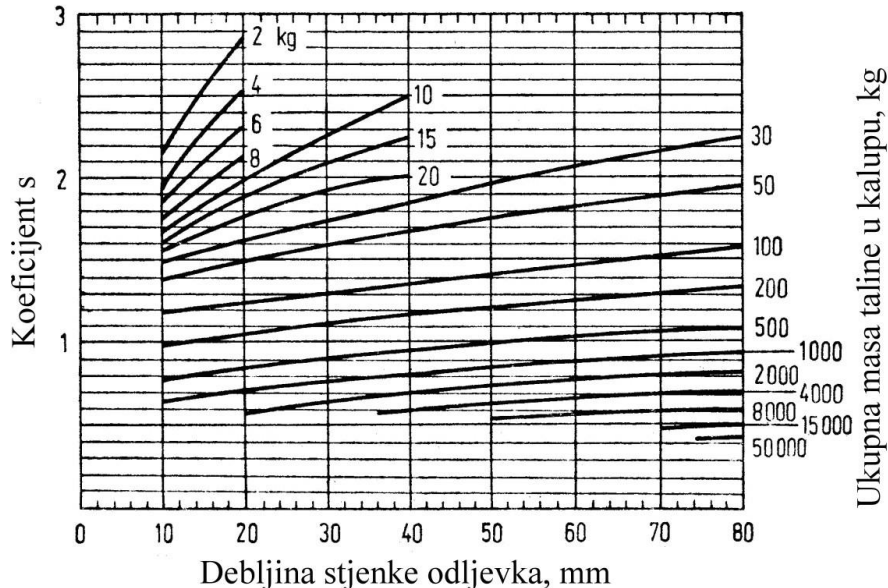
7.3.4 Vrijeme lijevanja odljevaka

Vrijeme lijevanja ovisi o debljini stijenke odljevka, masi odljevka, vrsti slitine, vrsti kalupa itd. [62, 63]. Dva odljevka jednakih masa, ali različitih oblika, hlade se posve različito. Poznato je da se tankostijeni odljevci brže hlade od debelostjenih, zbog čega se moraju brže lijevati. Za određivanje optimalnog vremena lijevanja postoji više empirijskih izraza. Navedeni su izrazi koji se obično primjenjuju.

Prema H. W. Dietertu, vrijeme lijevanja može se odrediti pomoću slijedeće formule:

$$t = s\sqrt{m} \quad (7.13)$$

gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), s – koeficijent ovisan o debljini stijenke i masi odljevka, m – ukupna masa taline u kalupu (odljevak + uljevni sustav + sustav napajanja) (kg). Vrijednost koeficijenta s može se odrediti iz dijagrama na slici 7.24.



Slika 7.24. Vrijednost koeficijenta s ovisno o debljini stijenke odljevka i ukupnoj masi taline u kalupu (m) [62]

U praksi se često primjenjuje i korigirana Dietertova formula koja u većoj mjeri uzima u obzir utjecaj debljine stijenke odljevka:

$$t = 1,4m^{0,5} + 0,7\delta m^{0,5} \quad (7.14)$$

gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), m – ukupna masa taline u kalupu (kg), a δ – debljina stijenke odljevka (cm).

Prema M. G. Hènonu vrijeme lijevanja može se odrediti na osnovi slijedeće formule:

$$t = \frac{C}{v_p} \quad (7.15)$$

gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), C – ukupna visina kalupne šupljine (mm), a v_p – najpovoljnija brzina podizanja nivoa taline u kalupu (mm/s) (tablica 7.2).

Za odljevke od čeličnog lijeva mase do 15 t preporučuje se slijedeća formula:

$$t = s_1 \sqrt[3]{\delta m} \quad (7.16)$$

gdje je: s_1 – koeficijent čija se vrijednost kreće od 0,9 do 1,45 ovisno o masi odljevka i debljini stijenke, δ – debljina stijenke koja dominira (mm), a m – ukupna masa taline u kalupu (kg).

Tablica 7.2. Najpovoljnija brzina podizanja nivoa taline u kalupu za sivi, čelični i aluminijski lijev [62]

Debljina stijenke, mm	Najpovoljnija brzina podizanja nivoa taline, mm/s		
	Sivi lijev	Čelični lijev	Aluminijski lijev
< 4	30 – 100	-	-
4 - 10	20 – 30	20 – 30	5 – 20
10 - 30	10 – 20	10 – 20	1 – 5
> 40	8 - 10	8 - 10	-

Za odljevke od čeličnog lijeva mase preko 15 t vrijeme lijevanja se određuje prema izrazu Dieterta s tim da se vrijednost koeficijenta s kreće od 0,9 do 2.

Prema F. Nielsenu vrijeme lijevanja određuje se prema slijedećim izrazima:

$$\text{za sivi lijev: } t = 0,32\delta m^{0,4} \quad (7.17)$$

$$\text{za aluminijske slitine: } t = 1,6\delta m^{0,4} \quad (7.18)$$

gdje je: t – vrijeme lijevanja (s), m – ukupna masa taline u kalupu (kg), a δ – debljina stijenke odljevka (mm).

U cilju bržeg određivanja vremena lijevanja mogu se na osnovi prethodno navedenih formula konstruirati dijagrami.

7.3.5 Dimenzioniranje kritičnog presjeka

Uljevni sustav se dimenzionira počevši od dijela koji ima najmanji poprečni presjek, tj. od kritičnog presjeka, koji određuje brzinu strujanja u uljevnom sustavu [62, 63]. Za dimenzioniranje kritičnog presjeka upotrebljava se jednadžba kontinuiteta (jednadžba 7.9):

$$Q_k = A_k \cdot v_k \quad (7.19)$$

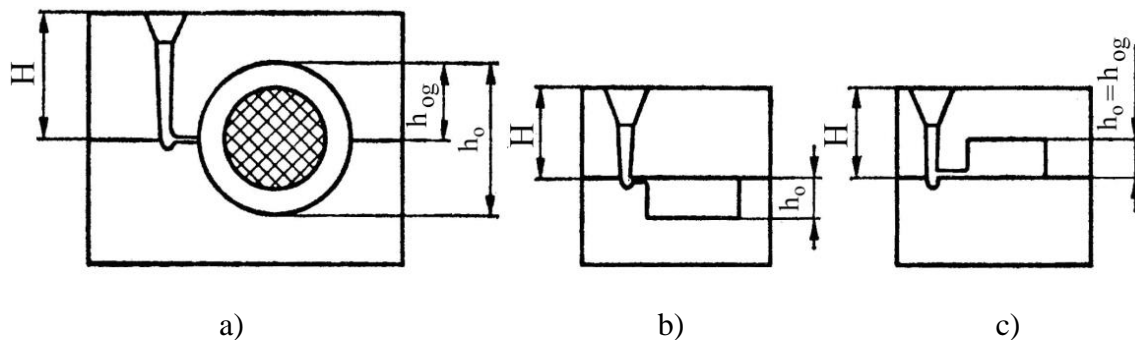
gdje je: Q_k – intenzitet strujanja, odnosno protok taline kroz kritični presjek (cm^3/s), A_k – površina kritičnog presjeka (cm^2), a v_k – brzina taline kroz kritični presjek (cm/s).

Intenzitet strujanja kroz kritični presjek (Q_k) može se definirati kao omjer volumena taline i vremena potrebnog za istjecanje kroz dani presjek (t), a volumen taline kao omjer njene mase (m) i gustoće (ρ). Na osnovi toga dobiva se slijedeći izraz za određivanje površine kritičnog presjeka:

$$A_k = \frac{m}{t\rho v} \quad (7.20)$$

U prethodnom izrazu brzina strujanja taline može se odrediti prema Torricellijevoj formuli (jednadžba 7.8) koja uzima u obzir energetske gubitke i računsku (metalostatsku) visinu (H_R) koja proizlazi iz činjenice da se tijekom punjenja kalupne šupljine mijenja visina taline u njoj.

Ako se kalupna šupljina nalazi djelomično u gornjem dijelu, a djelomično u donjem dijelu kalupa (slika 7.25), onda ne djeluje jednaka visina taline tijekom cijelog vremena lijevanja.



Slika 7.25. Određivanje računске visine taline (H_R) ovisno o načinu lijevanja: a) lijevanje sa strane, b) lijevanje odozgo, c) lijevanje odozdo [62]

Za vrijeme punjenja kalupne šupljine u donjem dijelu kalupa djeluje visina H , a za vrijeme punjenja kalupne šupljine u gornjem dijelu kalupa visina se smanjuje i na kraju lijevanja djeluje visina $H - h_{og}$ (slika 7.25). Zbog toga se u formulu unosi prosječna, tzv. računska vrijednost visine H_R . Računska vrijednost visine može se izračunati prema formuli B. Osanna:

$$H_R = H - \frac{h_{og}^2}{2h_o} \quad (7.21)$$

gdje je: H_R – računska visina, H – vertikalna udaljenost od vrha uljivne čaše do razine ušća, h_{og} – visina odljevka u gornjoj polovici kalupa, a h_o – ukupna visina odljevka.

Navedeni izraz može se dodatno pojednostaviti ovisno o načinu lijevanja. Pri lijevanju odozgo (slika 7.25b) tijekom cijelog vremena lijevanja djeluje visina H . Budući da je $h_{og} = 0$ dobiva se:

$$H_R = H \quad (7.22)$$

Ako se lijevanje provodi odozdo (slika 7.25c) na početku lijevanja djeluje visina H , a na kraju lijevanja $H - h_{og}$. Za ukupno vrijeme lijevanja može se računati s nekom srednjom visinom, tj. za $h_{og} = h_o$ dobiva se:

$$H_R = H - \frac{h_o}{2} \quad (7.23)$$

Pri lijevanju sa strane (slika 7.25a), ako je model podijeljen po sredini, jedna se polovica kalupne šupljine nalazi u gornjem dijelu kalupa, a druga u donjem dijelu kalupa. U tom će slučaju biti $h_{og} = h_o/2$, pa se dobiva:

$$H_R = H - \frac{h_o}{8} \quad (7.24)$$

Za određivanje računске visine upotrebljava se i sljedeća formula:

$$\sqrt{H_R} = \frac{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}{2} \quad (7.25)$$

gdje je: h_1 – visina taline na početku lijevanja (cm), a h_2 – visina taline na kraju lijevanja (cm).

Uzevši u obzir sve navedeno, na osnovi izraza (7.20) može se izvesti **formula za izračunavanje površine kritičnog presjeka:**

$$A_k = \frac{m}{qt\mu\sqrt{2gH_R}} \quad (7.26)$$

gdje je: A_k – površina kritičnog presjeka (cm^2), m – ukupna masa taline u kalupu (kg), ρ – gustoća taline na temperaturi lijevanja (kg/cm^3), t – vrijeme lijevanja (s), μ – koeficijent brzine istjecanja, g – gravitacijsko ubrzanje (cm/s^2), H_R – računaska visina (cm).

Ako se površina kritičnog presjeka (A_k) odnosi na poprečni presjek ušća, što znači da se radi o tlačnom uljevnom sustavu, dobivenu površinu kritičnog presjeka ušća treba podijeliti s brojem ušća povezanih s odljevkom:

$$A_u = \frac{A_k}{n} \quad (7.27)$$

gdje je A_u – površina poprečnog presjeka jednog ušća, a n broj ušća.

Odabrani broj ušća kontrolira se pomoću izraza koji je postavio R. Wlodawer:

$$n \cdot A_u = (2 - 3) \cdot f \quad (7.28)$$

gdje je f površina poprečnog presjeka otvora kroz koji istječe talina na dnu lonca:

$$f = \frac{d^2\pi}{4} \quad (7.29)$$

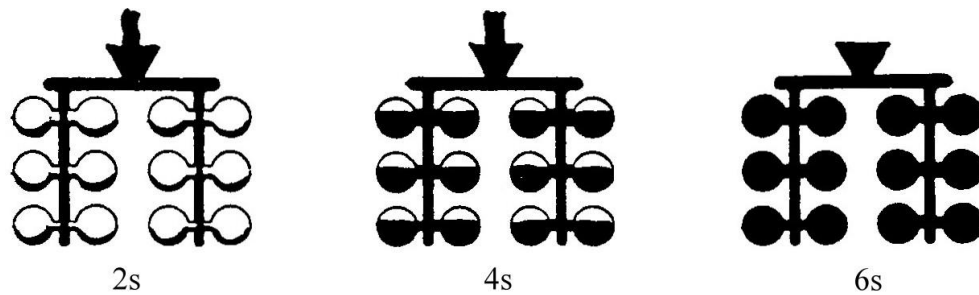
Na osnovi površine kritičnog presjeka određuje se površina poprečnog presjeka ostalih komponenti uljevnog sustava prema odabranom omjeru (jednadžbe 7.2 i 7.3).

7.4 Uljevni sustavi u kalupima s vertikalnom diobenom ravninom

Kalupi s vertikalnom diobenom ravninom bili su prava rijetkost prije ~ 60 godina. Međutim, napredak tehnologije i želja za sve većom produktivnošću rezultirali su razvojem uređaja za automatsku izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom. Danas se ti kalupi široko primjenjuju u ljevaonicama željeznih i neželjeznih ljevova, posebno za lijevanje većeg broja manjih odljevaka u jednom kalupu.

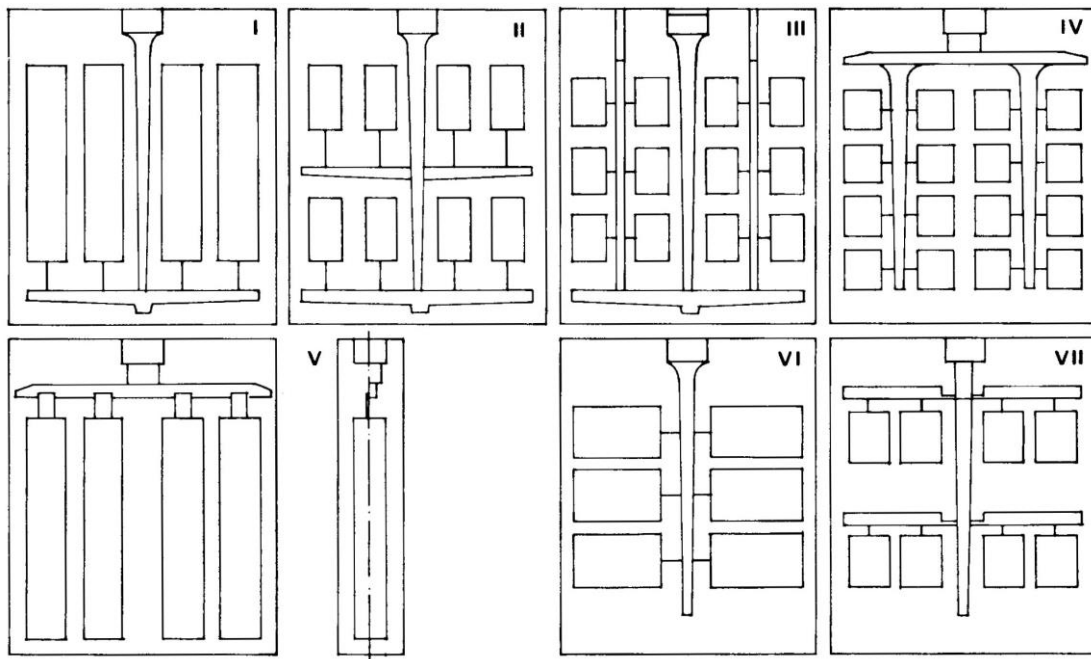
Principi koji se primjenjuju za konstruiranje tlačnih i semitlačnih uljevnih sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom mogu se primijeniti i za konstruiranje uljevnog sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom. Međutim, konstruiranje uljevnog sustava i sustava napajanja kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom zahtjevnije je nego kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom [65, 66]. Kod vertikalno podijeljenog kalupa, kalupne šupljine smještene su na nekoliko različitih nivoa, zbog čega se pri dimenzioniranju uljevnog 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 (slika 7.26).



Slika 7.26. Pravilan tijek punjenja kalupa s vertikalnom diobenom ravninom. Svi odljevci odliveni su u istom vremenu [66]

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 7.27 prikazano je nekoliko najčešće upotrebljivanih konfiguracija uljevnih sustava, odnosno rasporeda odljevka u kalupima s vertikalnom diobenom ravninom.

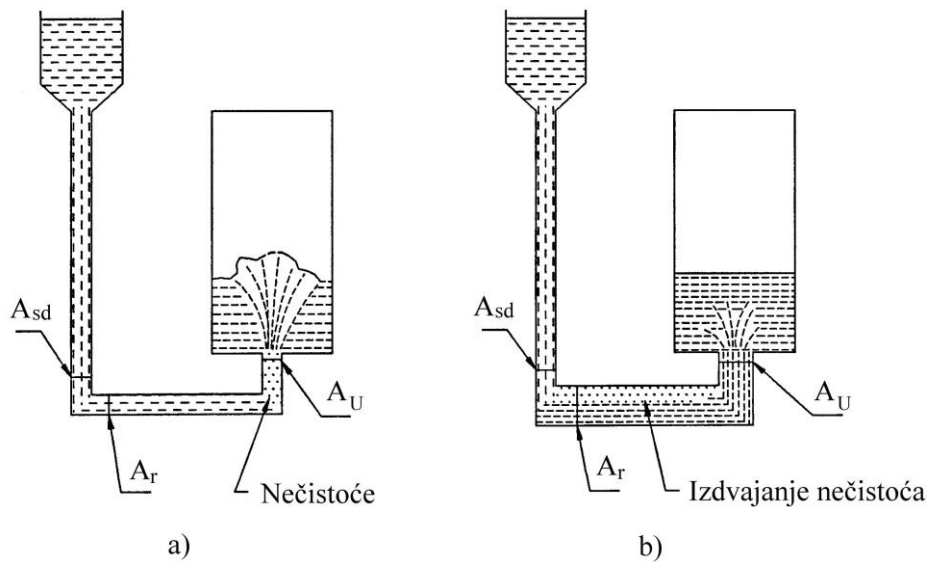


Slika 7.27. Shematski prikaz najčešće upotrebljivanih konfiguracija uljevnih sustava u kalupima s vertikalnom diobenom ravninom [65]

Konstruiranje uljevnih sustava broj I i II u potpunosti odgovara zahtjevima pri dizajniranju semitlačnih uljevnih sustava. Ti uljevni sustavi trebali bi se primijeniti kad god je to moguće. Uljevni sustav broj I pogodan je za lijevanje relativno širokih i visokih odljevaka. Primjenom vršnih pojila (tj. pojila postavljenih odozgo na odljevak) smanjuje se raspoloživa visina za odljevak u kalupu.

Da bi se kod uljevnog sustava broj I izbjegle turbulencije tijekom punjenja kalupa (slika 7.28a), odnosno osiguralo mirno punjenje kalupa i spriječio ulaz nečistoća (slika 7.28b) površina poprečnog presjeka razvodnika (A_r) treba biti 2 puta veća od površine poprečnog

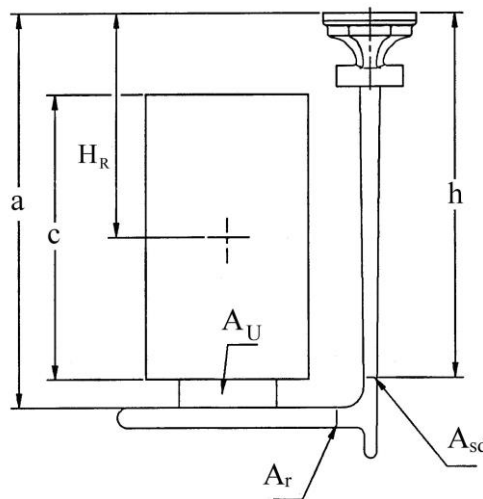
presjeka spusta u donjem dijelu (A_{sd}) [67]. Površina poprečnog presjeka ušća (A_u) mora također biti 2 puta veća od površine poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu (A_{sd}) [67].



Slika 7.28. a) turbulencije tijekom punjenja kalupne šupljine ($A_{sd} = A_r = A_u$) i ulaz nečistoća u kalupnu šupljinu, b) mirno punjenje kalupne šupljine ($A_r = 2A_{sd}$, $A_u = 2A_{sd}$) [67]

Kada se odljevak lijeva odozdo (slika 7.29), prije određivanja površine poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu (A_{sd}) treba odrediti računsku (metalostatsku) visinu H_R :

$$H_R = a - \frac{c}{2} \quad (7.30)$$



Slika 7.29. Određivanje računske visine (H_R) u slučaju vertikalnog uljavnog sustava kod kojeg je razvodnik smješten u donji dio kalupa, a odljevak se lijeva odozdo [67]

Na osnovi brzine punjenja kalupne šupljine, odnosno protoka (q), odabrane vrijednosti faktora gubitaka zbog trenja (μ), gustoće lijeva (ρ) i računske (metalostatske) visine (H_R) može se odrediti potrebna površina kritičnog presjeka, odnosno u ovom slučaju površina poprečnog presjeka spusta u donjem dijelu (A_{sd}):

$$A_{sd} = \frac{q}{\mu \sqrt{2gH_R \rho}} \quad (7.31)$$

U mnogim slučajevima, kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom moguće je napajanje odljevaka pomoću uljevnog sustava.

Uljevni sustav broj III pogodan je za lijevanje većeg broja manjih odljevaka. Često je kod te konfiguracije moguće primijeniti napajanje odljevaka pomoću uljevnog sustava. U tom slučaju ušća moraju biti kratka. Površine poprečnih presjeka vertikalnih kanala na koje su spojena ušća moraju biti jednake površini poprečnog presjeka na dnu spusta. Ako se odljevci napajaju iz uljevnog sustava, modul (tj. omjer volumena i površine) vertikalnog kanala koji je povezan s ušćima mora biti jednak ili veći od modula ušća.

Kod uljevnog sustava broj IV moguć je ulaz troske u spustove jer se razvodnik nalazi na vrhu iznad spustova. Međutim, ako se nivo taline u spustovima brzo podiže, vrijeme potrebno da talina prođe kraj bočno postavljena ušća je vrlo kratko, zbog čega je i mogućnost ulaska troske u kalupne šupljine vrlo mala.

Uljevni sustav broj V predstavlja adaptaciju tlačnog uljevnog sustava kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom na kalupe s vertikalnom diobenom ravninom. U usporedbi s uljevnim sustavom broj I, taj uljevni sustav pruža veće iskorištenje taline. Pogodan je za lijevanje velikih, posebno visokih odljevaka. Zbog male metalostatske visine, ušća imaju veliku površinu poprečnog presjeka. Ako je primijenjena odgovarajuća udaljenost do prvog ušća te odgovarajuće produženje razvodnika nakon zadnjeg ušća, površina poprečnog presjeka razvodnika je dva puta veća od površine poprečnog presjeka svih ušća vezanih na razvodnik. Poprečni presjek razvodnika mora se sužavati prema kraju.

Uljevni sustav broj VI je povoljan obzirom na iskorištenje taline, premda postoji opasnost od ulaska troske tijekom prvog perioda lijevanja. Da bi se sve kalupne šupljine na različitim nivoima punile jednakom brzinom zahtijevaju se različite površine poprečnih presjeka ušća na različitim nivoima.

Uljevni sustav broj VII narušava osnovno pravilo konstrukcije semitlačnog uljevnog sustava jer je spoj ušća i razvodnika na dnu razvodnika. Prednost tog sustava je mogućnost brzog lijevanja. Primjena takvog uljevnog sustava nije opravdana niti preporučljiva.

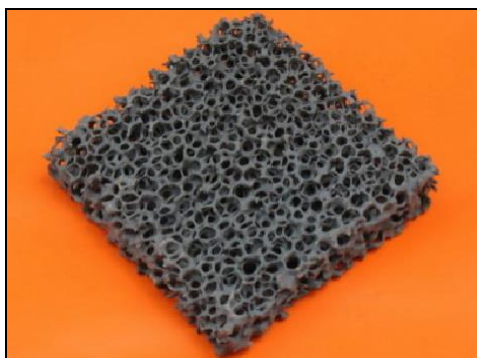
Da bi se olakšala izrada modela i dimenzioniranje uljevnih sustava kod kalupa s vertikalnom diobenom ravninom razvijene su standardizirane komponente uljevnih sustava. Na osnovi izračunatih površina poprečnih presjeka pojedinih komponenti uljevnog sustava odabiru se standardizirane komponente uljevnog sustava.

7.5 Primjena keramičkih filtara u uljevnim sustavima

Keramički filtri (slika 7.30) primjenjuju se u ljevarstvu u cilju poboljšanja čistoće taline, a time i poboljšanja kvalitete odljevka [60]. Inkorporirani unutar uljevnog sustava keramički filtri uklanjaju trosku, odnosno razne uključke iz taline prije nego što talina uđe u kalupnu šupljinu.

Uključci u talini, kao što su oksidi nastali tijekom taljenja, prijenosa taline i lijevanja, čestice vatrostalnog materijala koje potječu od obloge peći i lonca, čestice vatrostalnog materijala prisutne u uljevnom sustavu ili izdvojene iz kalupnog ili jezgrenog materijala tijekom lijevanja, neotopljene metalne ili nemetalne čestice koje potječu od dodataka sredstava za metaluršku modifikaciju taline itd. djeluju kao diskontinuiteti u metalnoj osnovi odljevka i mogu imati različite štetne utjecaje:

- veliki uključci mogu smanjiti mehanička svojstva (npr. vlačnu čvrstoću i istežljivost),
- smanjenje izdržljivosti pod (dinamičkim) opterećenjem,
- otežana strojna obradivost i jače izraženo trošenje alata za obradu,
- lošiji izgled površine odljevka,
- nepropusnost pod tlakom, itd.



Slika 7.30. Keramički filter [68]

Sve taline obično sadrže određenu količinu uključaka. Tijekom procesa proizvodnje odljevaka nije moguće u potpunosti izbjeći formiranje svih navedenih produkata. Uvijek treba primjenjivati čiste uložne materijale čime se smanjuje količina troske tijekom procesa taljenja. Premda se većina troske uklanja prije ispuštanja taline u lonac za obradu ili lijevanje, tijekom nastavka procesa proizvodnje odljevaka formira se nova troska. Ako tijekom lijevanja taline u kalup postoji turbulencija, troska može završiti u kalupnoj šupljini, odnosno odljevku.

Uljevni sustav treba tako konstruirati da se pospješi izdvajanje uključaka iz taline zbog razlike u gustoćama između metala i uključaka (tablice 7.3 i 7.4).

Tablica 7.3. Gustoće metala i metalnih oksida [60]

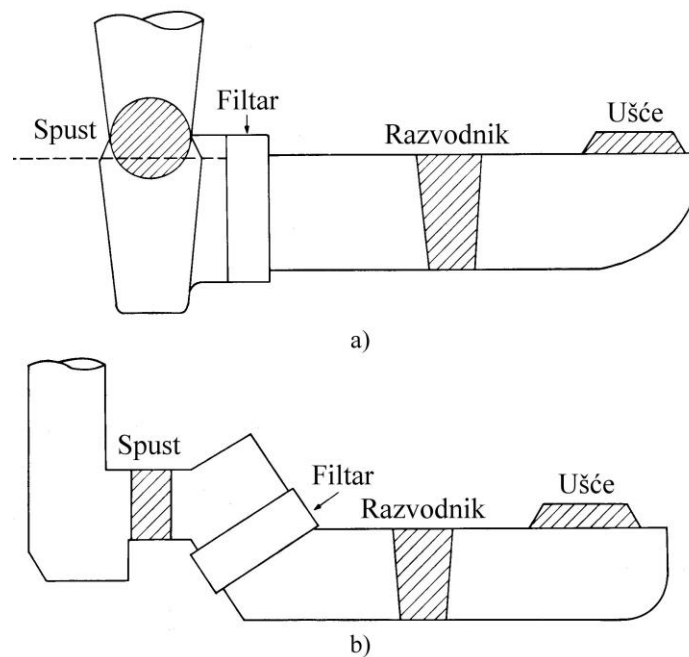
Ljevarska slitina	Gustoća, g/cm ³
Aluminijske slitine	
Al	2,41
Al ₂ O ₃	3,96
3Al ₂ O ₃ · SiO ₂	3,15
Magnezijske slitine	
Mg	1,57
MgO	3,58
Bakrene slitine	
Cu	8
CuO	6
ZnO	5,61
SnO	6,45
BeO	3,01

Međutim, takav pristup ne osigurava uvijek odljevke zadovoljavajuće kvalitete. Osim toga, iskorištenje taline često je smanjeno posebno kod primjene semitlačnih uljernih sustava. Kad se zahtijeva visoka čistoća odljevaka i kada uljevni sustav ne može ispuniti taj uvjet, talinu treba filtrirati u uljevnom sustavu, odnosno u uljevni sustav ugraditi filter.

Tablica 7.4. Gustoće metala i metalnih oksida [60]

Ljevarska slitina	Gustoća, g/cm ³
Željezne slitine	
Željezni ljevovi s grafitom	6,97
Niskougljični čelik	7,81
Čelik s 2,0 %C	6,93
FeO	5,7
Fe ₂ O ₃	5,24
Fe ₃ O ₄	5,18
FeSiO ₄	4,34
MnO	5,45
Cr ₂ O ₃	5,21
SiO ₂	2,65

Keramički filtri ispravno primijenjeni mogu spriječiti ulazak uključaka u kalupnu šupljinu. Upotrebom keramičkog filtra u uljevnom sustavu konvencionalne konstrukcije može se smanjiti udio grešaka povezanih sa uključcima. Specijalnom konstrukcijom uljavnog sustava za umetanje keramičkog filtra postiže se veća efikasnost filtriranja taline. Na slici 7.31 prikazani su tipični uljevni sustavi za kalupe s horizontalnom diobenom ravninom konstruirani za postavljanje keramičkog filtra.



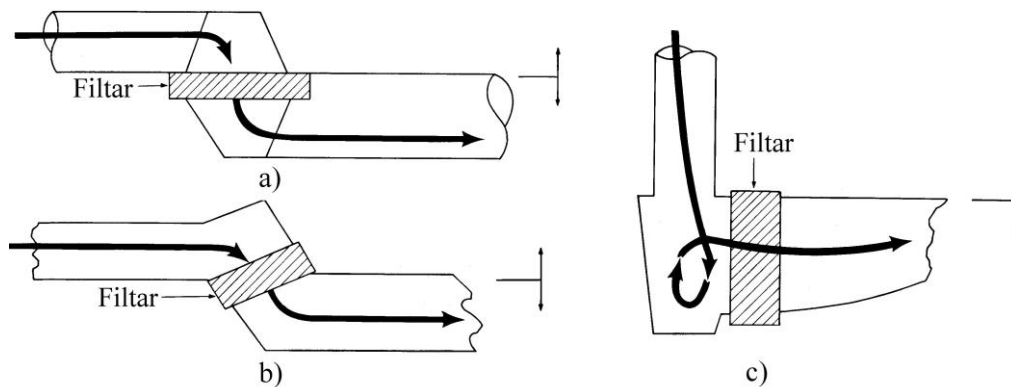
Slika 7.31. Specijalno konstruirani uljevni sustavi u kalupu s horizontalnom diobenom ravninom u cilju optimizacije djelovanja keramičkog filtra: a) $A_s : A_f : A_r : A_u = 1 : 3 - 6 : 1,1 : 1,2$, b) $A_s : A_f : A_r : A_u = 1,2 : 3 - 6 : 1 : 1,1$ (A_f – površina poprečnog presjeka filtra) [60]

Najčešće upotrebljavani materijali za izradu keramičkih filtara su: mulit, korund, kvarc, cirkonijev dioksid i silicijev karbid. Djelovanje filtra zasniva se na dva mehanizma: fizičkom (prosijavanje) i kemijskom (privlačenje). Kada su pravilno postavljeni u uljevni sustav, filtri ne predstavljaju značajno ograničenje toka taline. Omjer površine raspoložive za prolaz taline i ukupne površine poprečnog presjeka filtra kreće se od 60 do 85 %.

Pri konstrukciji uljavnog sustava u kojem se nalazi filter treba obratiti pažnju na sljedeće:

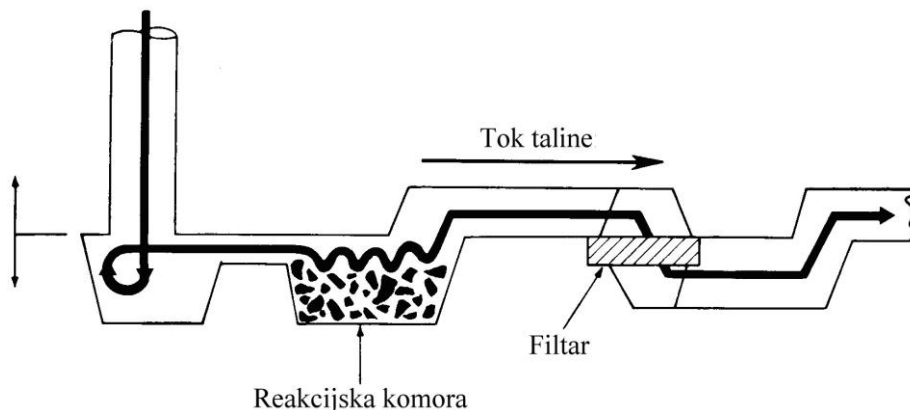
- smještanje filtra ne smije biti otežano,
- filter ne smije utjecati na vrijeme punjenje kalupa,
- vrsta filtra mora biti odgovarajuća primjeni,
- uljavni sustav treba tako konstruirati da se minimaliziraju turbulencije iza filtra i u kalupnoj šupljini,
- veličina uljavnog sustava mora se održavati na minimumu.

Položaj filtra u uljavnom sustavu ovisi o metodi izrade kalupa, rasporedu modela i metalurškim operacijama koje se provode unutar kalupa (npr. nodulacija kod proizvodnje nodularnog lijeva, cijepljenje kod proizvodnje željeznih ljevova s grafitom). Na slici 7.32 prikazani su uobičajeni načini smještanja filtra u uljevne sustave kod kalupa s horizontalnom diobenom ravninom. Filtri se ne smiju smjestiti na dno spusta jer u tom slučaju postoji povećana opasnost od loma filtra i smanjenja njegove efikasnosti.



Slika 7.32. Uobičajeni položaji filtra u uljavnom sustavu u kalupu s horizontalnom diobenom ravninom: a) paralelno s diobenom ravninom kalupa, b) pod određenim kutom u odnosu na diobenu ravninu kalupa, c) pod kutom od 90° u odnosu na diobenu ravninu kalupa [60]

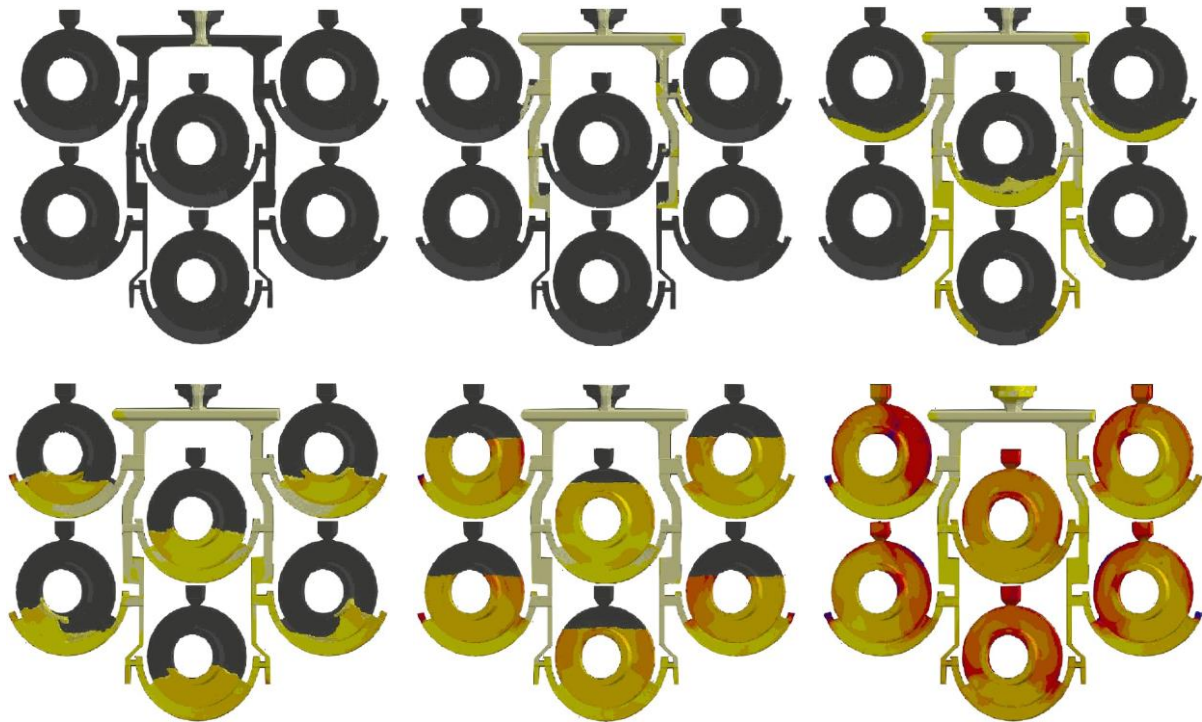
Ako se u kalupu nalazi reakcijska komora (npr. kod proizvodnje nodularnog lijeva In-Mould postupkom), filter se mora smjestiti iza nje (slika 7.33).



Slika 7.33. Položaj filtra u slučaju kada se metalurške operacije provode u kalupu (npr. obrada taline predleguom koja sadrži magnezij kod izrade nodularnog lijeva ili cijepljenje) [60]

7.6 Primjena programskih paketa za simulaciju punjenja kalupa

Danas se sve više upotrebljavaju specijalizirani programski paketi za simulaciju procesa punjenja kalupa talinom i njenog skrućivanja u kalupu. Simulacijom punjenja kalupa može se ustanoviti da li je uljevni sustav pravilno konstruiran i dimenzioniran. Efekti koji se postižu promjenom uljevnog sustava mogu se vrlo točno simulirati. Takav koncept virtualne proizvodnje odljevaka omogućuje definiranje i optimiranje parametara proizvodnog procesa čime se eliminira primjena metode pokušaja i pogreške. Na slici 7.34 prikazani su primjeri simulacije punjenja kalupa s vertikalnom diobenom ravninom.



Slika 7.34. Simulacija tijekom punjenja kalupa s vertikalnom diobenom ravninom [69]

Na slici 7.34 može se vidjeti da je uljevni sustav pravilno konstruiran i dimenzioniran jer omogućuje ravnomjerno punjenje kalupa. Svi odljevci su odliveni u istom vremenu.

8. NAPAJANJE ODLJEVAKA

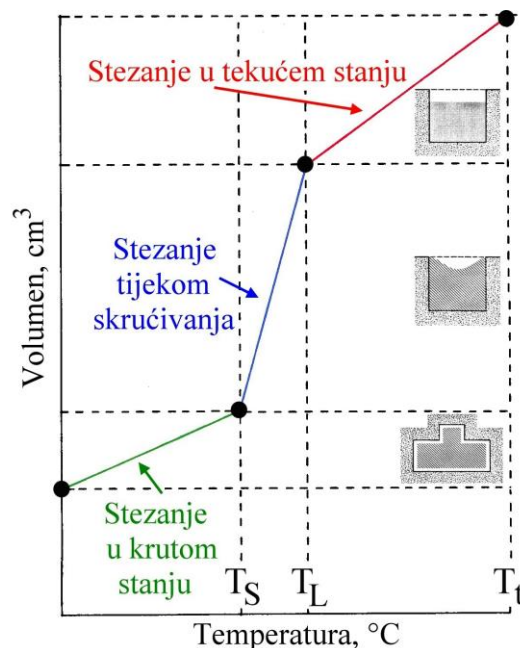
Tijekom skrućivanja odljevaka, odnosno ljevarske slitine u kalupu, odvija se pretvorba iz tekućeg u kruto stanje. Ta pretvorba praćena je smanjenjem volumena, odnosno volumnim stezanjem lijeva zbog razlike u gustoći između tekućeg i krutog stanja. Sustav napajanja mora kompenzirati volumno stezanje lijeva tijekom skrućivanja. Proizvodnja kvalitetnih odljevaka zahtijeva pravilno konstruiranje i dimenzioniranje sustava napajanja jer su često greške na odljencima rezultat nekompenziranog volumnog stezanja lijeva tijekom skrućivanja.

8.1 Volumne promjene tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka

Jedan od vrlo važnih čimbenika u proizvodnji kvalitetnih odljevaka je razumijevanje i kontrola volumnih promjena koje se odvijaju tijekom hlađenja i skrućivanja odljevaka. Poznavanje tih promjena omogućuje pravilnu konstrukciju sustava napajanja.

Kod većine ljevarskih slitina razlikuju se tri područja volumnih promjena koje se odvijaju tijekom hlađenja od temperature koju talina ima nakon završetka ulijevanja u kalupnu šupljinu do sobne temperature (slika 8.1):

- **stezanje u tekućem stanju**, odnosno smanjenje volumena taline tijekom hlađenja od temperature koju talina ima u kalupu nakon završetka ulijevanja do likvidus temperature tj. početka skrućivanja,
- **stezanje tijekom skrućivanja**, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja od likvidus (T_L) do solidus temperature (T_S),
- **stezanje u krutom stanju**, odnosno smanjenje volumena tijekom hlađenja odljevka od solidus temperature do sobne temperature.



Slika 8.1. Shematski prikaz volumnih promjena većine ljevarskih slitina tijekom hlađenja i skrućivanja (osim željeznih ljevova s grafitom). T_t – temperatura taline u kalupu nakon završetka ulijevanja, T_L – likvidus temperatura, T_S – solidus temperatura [70, 71]

Smanjenje volumena, odnosno **stezanje lijeva u tekućem stanju** ovisi o vrsti slitine i visini pregrijanja taline [72]. Kod čeličnog lijeva stezanje u tekućem stanju obično iznosi 1,6 do 1,8 vol. % za svakih 100 °C pregrijanja taline. Kod sivih željeznih lijeva s grafitom (tj. sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva) stezanje u tekućem stanju iznosi 0,68 do 1,8 vol. % za svakih 100 °C pregrijanja taline.

Tijekom skrućivanja dolazi do fazne pretvorbe tekuće → kruto, odnosno prijelaza iz stanja manje gustoće (talina) u stanje veće gustoće (krutina), što u konačnici rezultira daljnjim smanjenjem volumena (tj. stezanjem). Kod čistih metala **stezanje tijekom skrućivanja**, tj. smanjenje volumena pojavljuje se kod određene temperature, dok se kod slitina odvija u temperaturnom intervalu ili intervalu skrućivanja (od likvidus do solidus temperature). To stezanje je najznačajnije i ako se ne kompenzira rezultira greškama u odljevcima.

Zbog smanjenja volumena, odnosno stezanja u tekućem stanju i stezanja tijekom skrućivanja na mjestu koje zadnje skrućuje u odljevku nastaje **usahlina** ili lunker (šupljina). Da bi se izbjegla prisutnost te greške u odljevku očito je da se tijekom skrućivanja odljevka manjak taline mora kompenzirati dotokom taline iz vanjskog priljevnog dijela koji služi kao rezervoar taline, a naziva se **pojilo** ili hranitelj. Prema tome, volumne promjene, odnosno stezanje u tekućem stanju i stezanje tijekom skrućivanja treba kompenzirati napajanjem odljevka iz pojila.

U tablici 8.1 prikazane su vrijednosti volumnog stezanja tijekom skrućivanja za različite ljevarske slitine.

Tablica 8.1. Volumno stezanje ljevarskih slitina tijekom skrućivanja [13, 62]

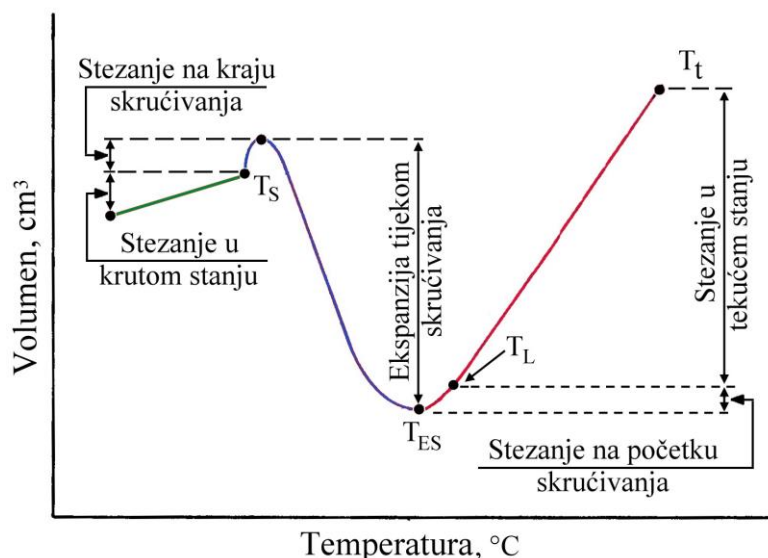
Materijal	Volumno stezanje tijekom skrućivanja, vol. %
Ugljični čelik	6
Legirani čelik	9
Visokolegirani čelik	10
Sivi lijev	Od 1,6 stezanja do 2,5 ekspanzije
Nodularni lijev	Od 2,7 stezanja do 4,5 ekspanzije
Cu	4
Kositrena bronca	4,5
Aluminijska bronca	4
Al	8
Al-Si12	3,5
Al-Si9Mg	3,4
Al-Si10	5
Mg	4,2
Zn	6,5

Iz tablice 8.1 može se vidjeti da stezanje tijekom skrućivanja značajno varira ovisno o metalu ili slitini koja se lijeva. Osim toga, može se vidjeti da je tijekom skrućivanja sivog i nodularnog lijeva, tj. željeznih lijeva s grafitom prisutna ekspanzija, odnosno porast volumena.

Željezni lijevi s grafitom pokazuju znatno kompleksnije ponašanje po pitanju volumnih promjena tijekom hlađenja i skrućivanja u odnosu na ostale ljevove. Tijekom skrućivanja odvija se eutektna reakcija koja rezultira pretvorbom taline (T) u dvije krute faze: austenit (γ) i grafit ($T \rightarrow \gamma + \text{grafit}$).

Kod podeutektnih željeznih lijeva s grafitom (ugljični ekvivalent $CE < 4,3$; $CE = \%C + \%Si/3 + \%P/3$) prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja je austenit, zbog čega na početku skrućivanja dolazi do volumnog stezanja (slika 8.2). Kad se tijekom daljnjeg hlađenja

dostigne temperatura početka odvijanja eutektične reakcije, odnosno eutektičnog skrućivanja (T_{ES}) dolazi do izlučivanja grafita. Grafit ima znatno manju gustoću ($2,2 \text{ g/cm}^3$) u odnosu na talinu ($\sim 7 \text{ g/cm}^3$). Zbog te razlike u gustoćama, tijekom izlučivanja grafita dolazi do porasta volumena, odnosno **ekspanzije** (slika 8.2). Ako je sivi, vermikularni ili nodularni lijev (tj. željezni lijev s grafitom) eutektičnog sastava ($CE = 4,3$) tada je $T_L = T_{ES}$ i odmah na početku skrućivanja započinje eutektična reakcija i izlučivanje grafita te dolazi do porasta volumena.



Slika 8.2. Shematski prikaz volumnih promjena u podeutektičnim ($CE < 4,3$) sivim željeznim ljevovima od temperature koju talina ima u kalupnoj šupljini nakon završetka ulijevanja (T_t) do sobne temperature. T_L – likvidus temperatura T_{ES} – temperatura početka eutektičnog skrućivanja, T_S – solidus temperatura

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

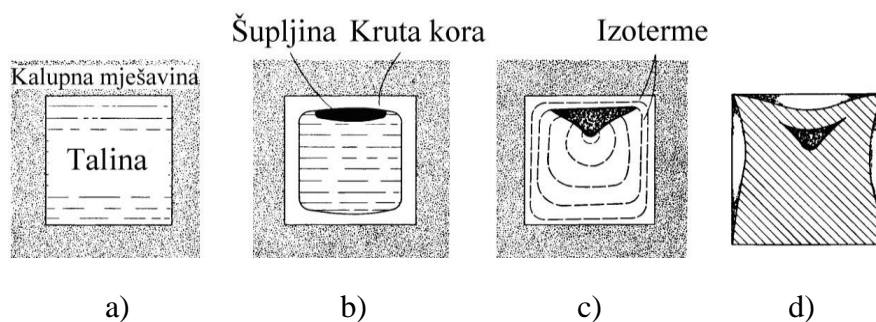
Stežanje na kraju skrućivanja javlja se zbog nedovoljne količine izlučenog grafita na kraju skrućivanja, odnosno nedovoljne ekspanzije da bi se kompenziralo stežanje zbog izlučivanja austenita tijekom skrućivanja.

Praktični rezultati pokazuju da se pravilnom kontrolom metalurških i kaluparskih uvjeta ekspanzija može upotrijebiti za smanjenje veličine pojila, pa čak i za eliminaciju pojila (stežanje u tekućem stanju kompenzira se dotokom taline iz uljevnog sustava).

Pored poznavanja volumnih promjena koje se događaju od temperature taline u kalupnoj šupljini nakon završetka ulijevanja (T_t) do solidus temperature (T_S), važno je i poznavanje volumnih promjena koje se dešavaju nakon završetka skrućivanja, tj. tijekom hlađenja od solidus temperature do sobne temperature (**stežanje u krutom stanju**, slike 8.1 i 8.2). Te volumne promjene utječu na konačne dimenzije odljevaka i ne mogu se kompenzirati talinom iz pojila obzirom da se radi o krutom stanju. Stežanje u krutom stanju često se naziva linearno ili modelarsko stežanje i mora se uzeti u obzir pri izradi modela. Dimenzije modela treba povećati za iznos linearnog stežanja ljevarske slitine, zbog kojeg je kalupna šupljina nešto uvećana u odnosu na konačne dimenzije odljevka.

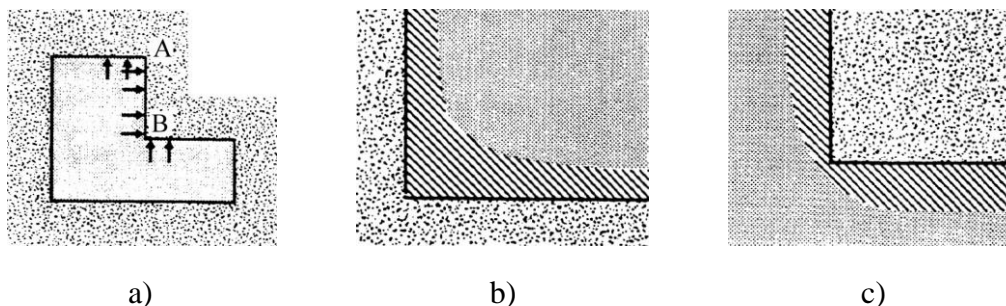
8.2 Utjecaj načina skrućivanja odljevka na mogućnost napajanja

Općenito promatrano, skrućivanje odljevka započinje na stijenci kalupa stvaranjem krute kore čija se debljina kontinuirano povećava prema unutrašnjosti odljevka sa odvođenjem topline od odljevka prema kalupu. Prema tome, fronta skrućivanja pomiče se od stijenci kalupa prema unutrašnjosti odljevka, što znači u smjeru koji je suprotan smjeru odvođenja topline. Volumno promjene, odnosno volumno stezanje koje se pojavljuje u segmentu koji skrućuje treba kompenzirati dotokom taline iz susjednih debljih segmenata koji kasnije skrućuju ili talinom iz pojila koje služi kao rezervoar taline i smješteno je uz ili na vrhu najdebljih segmenata odljevka. Na mjestima koja zadnja skrućuju u odljevku nastat će usahlina ako se volumno stezanje ne kompenzira dotokom taline iz pojila. Prema tome, skrućivanje ne smije završiti u odljevku, već u njegovom priljevnom dijelu, tj. pojilu. U odsutnosti pojila, odljevak bi skrutnuo kao što prikazuje slika 8.3.



Slika 8.3. Shematski prikaz slijeda stezanja pri skrućivanju kocke od željeza: a) polazna talina, b) kruta kora i stvaranje usahlina, c) unutarnje stezanje, d) unutarnja usahlina i uvlake na vanjskim površinama [72]

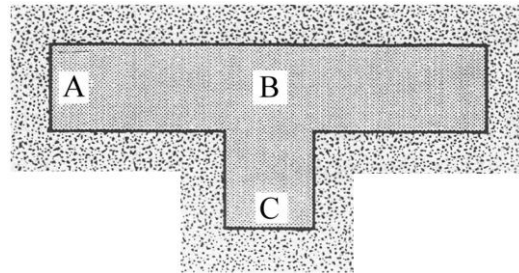
Odvođenje topline, a samim tim i skrućivanje na kutovima i bridovima odljevka brže je od onoga na ravnim ploham. Odvođenje topline od taline u vanjskom kutu odljevka prema kalupu odvija se u dva smjera (slika 8.4a, točka A).



Slika 8.4. a) odvođenje topline od vanjskih i unutarnjih kutova odljevka prema kalupu, b) način skrućivanja u vanjskom kutu odljevka, c) način skrućivanja u unutarnjem kutu odljevka [71]

Međutim, kod unutarnjih kutova odljevka kalup prima toplinu od dviju stranica odljevka (slika 8.4a, točka B). Zbog toga je temperatura kalupa viša u točki B nego u točki A, iako je temperatura taline jednaka u obje točke. Prema tome, temperaturni gradijent ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) je strmiji u točki A (tj. vanjskom kutu) nego u točki B (tj. unutarnjem kutu), što znači da se skrućivanje odvija brže u točki A. Na slici 8.4b shematski je prikazan način skrućivanja u vanjskom kutu, a na slici 8.4c način skrućivanja u unutarnjem kutu odljevka.

Poseban problem pri napajanju odljevaka predstavljaju toplinski čvorovi, tj. dijelovi odljevka koji ostaju najduže u tekućem stanju, zbog čega zadnji skrućuju. Svi toplinski čvorovi u odljevku moraju biti adekvatno napojeni. Neadekvatno napajanje rezultira nastankom grešaka u tim područjima odljevka zbog nekompenziranog volumnog stezanja. U većini slučajeva odgovarajućom analizom konfiguracije odljevka mogu se odrediti položaji toplinskih čvorova u odljevku. Npr. na slici 8.5 može se vidjeti da se u odljevku u obliku slova T toplinski čvor nalazi u točki B.



Slika 8.5. Odljevak u obliku slova T. Toplinski čvor nalazi se u točki B [71]

Toplinski čvor nalazi se u točki B (slika 8.5) jer se u tom području nalazi velika količina (masa) taline, a unutarnji kutovi ograničavaju odvođenje topline iz tog područja.

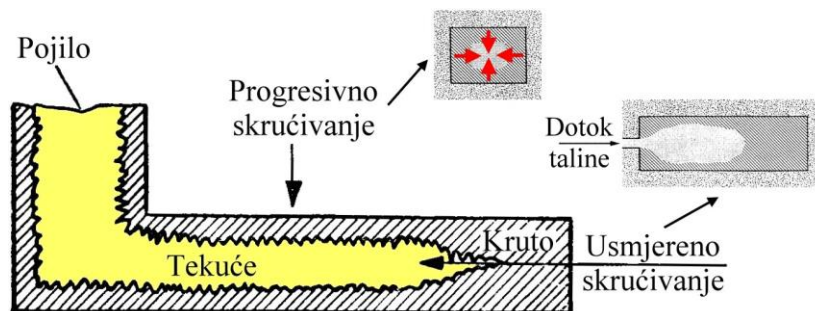
Za pravilno određivanje položaja pojila treba primijeniti koncept **usmjerenog skrućivanja**. Usahline u odljevku mogu se izbjeći ako se skrućivanje odvija usmjerenom od točki koje su najudaljenije od pojila ka pojilu. Usmjerenim skrućivanjem postiže se skrućivanje od tanjih prema debljim presjecima odljevka i na kraju prema pojilu koje mora posljednje skrutnuti. Navedeni uvjet predstavlja garanciju da je kanal napajanja uvijek otvoren i da postoji pravilni temperaturni gradijent u smjeru pojila. U tom se slučaju stezanje u tekućem stanju i stezanje tijekom skrućivanja odljevka kompenzira dotokom taline iz pojila.

Mogućnost da se postigne usmjerenom skrućivanje ovisi o:

- slitini i njenom načinu skrućivanja,
- kalupnom materijalu,
- konstrukciji odljevka.

8.2.1 Progresivno i usmjerenom skrućivanje

Na slici 8.6 shematski je prikazano međusobno djelovanje progresivnog (tj. postupnog) i usmjerenog skrućivanja u odljevku u obliku ploče. Nakon popunjavanja kalupne šupljine, općenito promatrano, skrućivanje započinje od stijenki kalupa, gdje se formira kora skrutnutog metala. Toplina se odvodi kroz stijenke kalupa i nastala kora progresivno raste prema unutrašnjosti kalupne šupljine. Brzina skrućivanja najveća je na rubovima odljevka (ploče) jer je zbog veće površine moguć znatno brži prijenos topline na kalup (veći intenzitet odvođenja topline). Prema tome, skrućivanje započinje na rubovima ploče. Ubrzo nakon toga skrutnu se krajevi ploče i fronta skrućivanja pomiče se ka pojilu, tako da se još neskrutnuti, srednji dio ploče sužava i poprima oblik klina.



Slika 8.6. Shematski prikaz usmjerenog i progresivnog skrućivanja u ploči [71, 73]

Brzina stvaranja krute kore kod pojila je smanjena jer masa pojila osigurava veću količinu topline, a prijenos topline na kalup je smanjen na unutarnjem kutu spoja odljevka/pojilo. Ta kombinacija djelovanja ruba ili kraja odljevka i djelovanja pojila osigurava usmjereno skrućivanje. Tijekom daljnjeg skrućivanja smanjuje se širina tekućeg klina koji se postepeno kreće prema pojilu. Sve dok se fronta skrućivanja u obliku klina pomiče ka pojilu postoji usmjereno skrućivanje i moguć je dotok taline iz pojila. Međutim, ako paralelno napredujuće stijenke progresivno skrućuju i u središnjem dijelu odljevka počinju se susretati, kretanje tekućeg metala biti će spriječeno, što rezultira centralnom usahlinom.

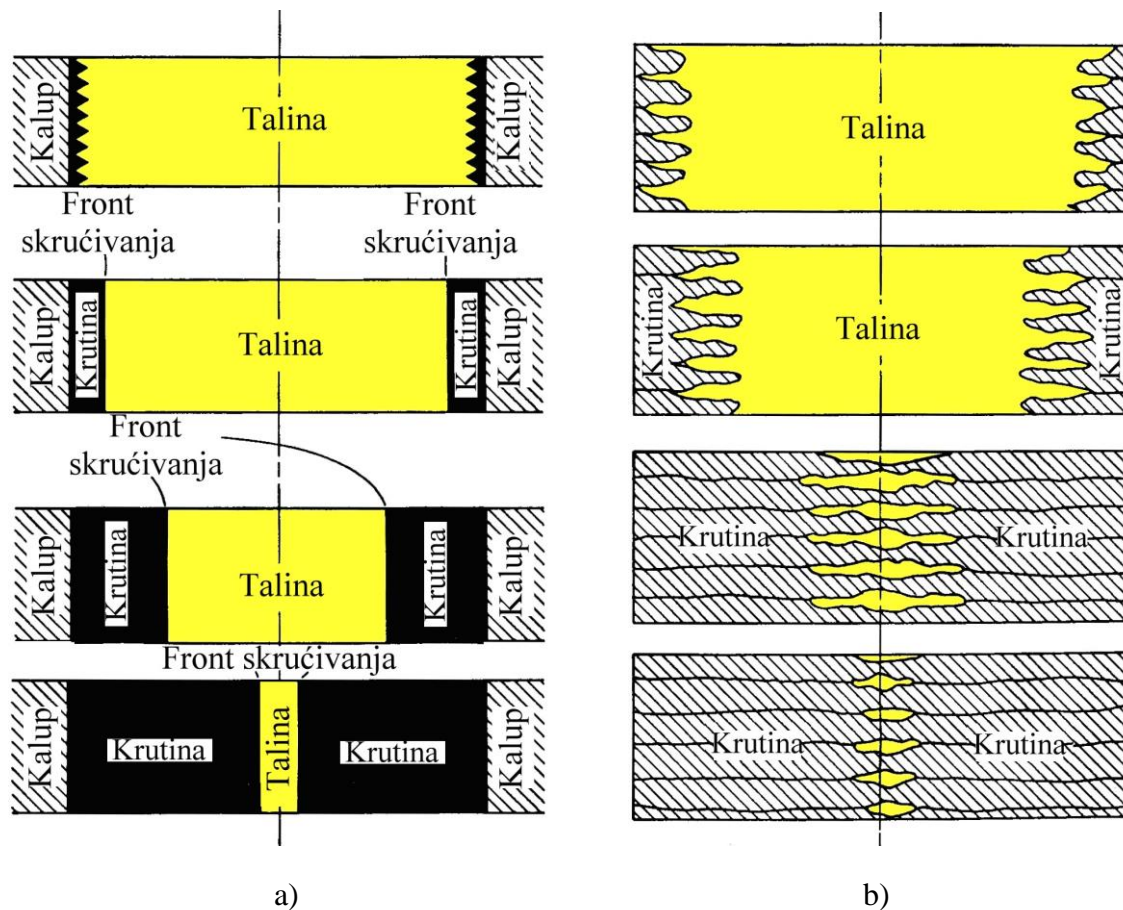
8.2.2 Način skrućivanja slitine

Mogućnost postizanja i održavanja usmjerenog skrućivanja ovisi u velikoj mjeri o načinu skrućivanja slitine. Obzirom na interval skrućivanja, slitine se mogu klasificirati u tri skupine [72]:

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

Kod čistih metala interval skrućivanja približava se nuli (slika 8.7a). Skrućujuće stijenke odljevka napreduju ka unutrašnjosti odljevka kao ravna, glatka fronta.

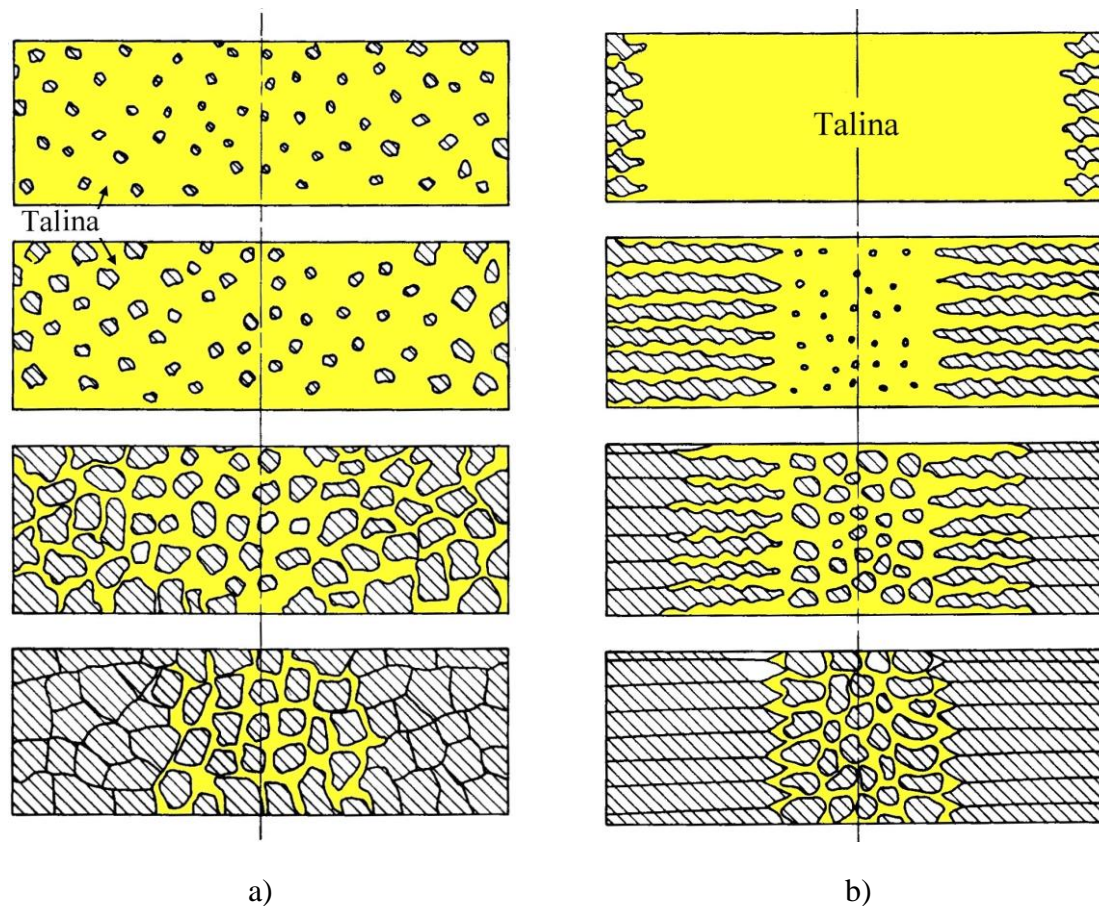
Slitine sa uskim intervalom skrućivanja (slika 8.7b) pokazuju snažnu tendenciju ka stvaranju kore uz rub kalupne šupljine. Kristali skrućuju od ruba prema unutrašnjosti odljevka, s tim da vrhovi kristala ne napreduju znatno brže od baza kristala. Pri tome front skrućivanja neće biti gladak kao kod čistih metala, već hrapav i nepravilan. Takav relativno kratak rast kristala potpomaže održavanje kontakta taline sa svim površinama koje skrućuju, što omogućuje lako napajanje. Takvo snažno progresivno skrućivanje u slitinama sa uskim intervalom skrućivanja potpomaže nastanak usmjerenog skrućivanja pri bilo kojim temperaturnim gradijentima u skrućujućem odljevku. Npr. u ugljičnom čeliku temperaturni gradijenti od samo $0,022$ do $0,045\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ u pločama i $0,135$ do $0,269\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ u šipkama dovoljni su da se dobiju odljevci bez usahlina tijekom usmjerenog skrućivanja. Potrebno je istaći da Al-Si12 i Al-Si11Cu slitine imaju uzak interval skrućivanja, što znači da se lako mogu napajati tijekom skrućivanja.



Slika 8.7. a) shematski prikaz načina skrućivanja čistih metala. Skrućivanje započinje na stjenkama kalupne šupljine i napreduje u unutrašnjost odljevka, s tim da je fronta skrućivanja ravna, odnosno glatka, b) shematski prikaz načina skrućivanja slitina sa uskim intervalom skrućivanja [72]

Kod slitina sa širokim intervalom skrućivanja (slika 8.8a) otežan je razvoj usmjerenog skrućivanja. Iako na početku skrućivanja može nastati tanka kora na stjenkama kalupa, skrućivanje se ne odvija progresivno ka unutrašnjosti odljevka već nasumično preko cijelog volumena odljevka. Takav kašasti način skrućivanja rezultira nastankom velikog broja malih kanala tekućeg metala u kasnijim fazama skrućivanja. Napajanje kroz te kanale je ograničeno, zbog čega se uslijed volumnog stezanja taline u kanalima preko cijelog odljevka javlja raspršena poroznost. Takav način skrućivanja tipičan je za mnoge komercijalne bakrene slitina, s tim da je napajanje dodatno otežano zbog visoke toplinske vodljivosti tih slitina. To potpomaže održavanju gotovo jednolične temperature kroz cijeli odljevak koji skrućuje. Da bi se promoviralo usmjerenog skrućivanje u tim slitinama treba ostvariti temperaturni gradijent od $1,46 \text{ }^\circ\text{C/mm}$. Takav temperaturni gradijent obično se može postići samo ostrim hlađenjem jednog dijela odljevka tijekom skrućivanja. Obično kod napajanja takvih slitina cilj nije potpuno eliminirati greške zbog volumnog stezanja već ostvariti njihovu finu raspršenost, odnosno disperziranost (mikroporoznost).

Kod slitina sa srednjim intervalom skrućivanja (slika 8.8b) prisutna je kombinacija načina skrućivanja slitina sa uskim i širokim intervalom skrućivanja (stvaranje kore uz stijenke kalupa i kašasto skrućivanje u središnjem dijelu odljevka). Takav način skrućivanja zapažen je kod čeličnih odljevaka.



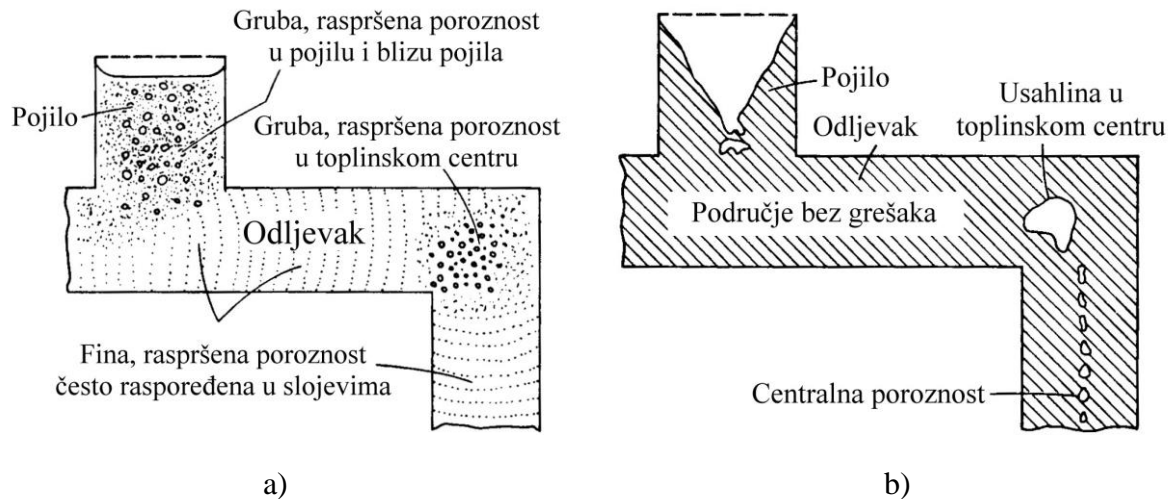
Slika 8.8. a) shematski prikaz načina skrućivanja slitina sa širokim intervalom skrućivanja, b) shematski prikaz načina skrućivanja slitina sa srednjim intervalom skrućivanja [72]

U debelim stijenkama odljevka skrućivanje slitina sa uskim intervalom skrućivanja može poprimiti u većoj mjeri elemente skrućivanja slitina sa srednjim intervalom skrućivanja jer je odvođenje topline s površine odljevka usporeno zagrijavanjem kalupnog materijala. Budući da se temperaturni gradijenti od centra ka rubu odljevka smanjuju, dolazi do promjene načina rasta kristala od štapićastog, koji se odvija uz stijenke kalupa, ka istoosnom koji se odvija nasumično preko cijelog volumena još tekućeg centra odljevka.

Različiti načini skrućivanja slitina rezultiraju znatno različitom raspodjelom nastalih grešaka zbog nekompenziranog volumnog stezanja u odljevku i pojilu (slika 8.9) i predstavljaju različite probleme koje tehnolog treba prevladati dizajniranjem i napajanjem odljevka. Odabir pogodnih metoda ovisi u velikoj mjeri o mogućnosti ostvarivanja usmjerenog skrućivanja.

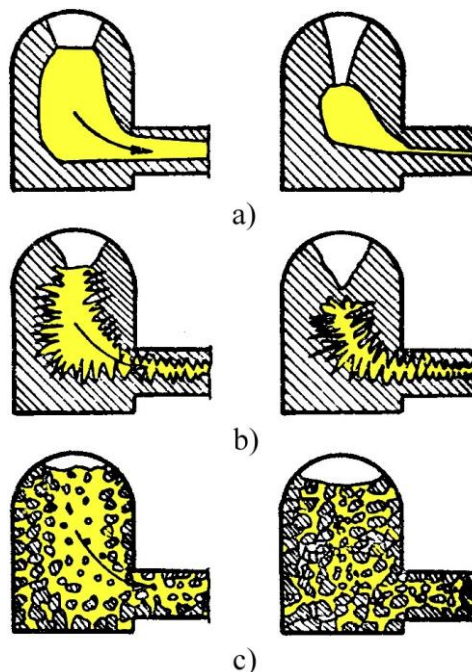
Kod odljevaka odlivenih od slitina sa širokim intervalom skrućivanja (slika 8.9a) javit će se gruba raspršena poroznost u pojilu i toplinskom centru odljevka (spoj dvaju presjeka) te fina raspršena poroznost koja se u odljevku pojavljuje u odgovarajućim slojevima.

Kod odljevaka odlivenih od slitina sa uskim intervalom skrućivanja (slika 8.9b) pojaviti će se velika usahlina u pojilu te usahlina u toplinskom centru odljevka. Budući da nije ostvareno usmjerenost skrućivanje, javiti će se centralna poroznost karakteristična za progresivno skrućivanje.



Slika 8.9. a) nastanak poroznosti zbog volumnog stezanja u odljercima koji su lijevani od slitina koje skrućuju na kašast način (tj. slitina sa širokim intervalom skrućivanja) u kalupe od svježe kalupne mješavine, b) usahlina u odljercima koji su lijevani od slitina koje su sklone stvaranju kore (slitine sa uskim intervalom skrućivanja) [72]

Da li će tijekom usmjerenog skrućivanja napajanje odljevka biti neometano, otežano ili onemogućeno ovisi prije svega o morfologiji skrućivanja slitine, mogućnosti transporta taline iz pojila u odljevnik te mogućnosti transporta taline u samom odljevku (slika 8.10). Napajanje će biti otežano ako iz bilo kojeg razloga morfologija skrućivanja slitine sprječava transport taline.



Slika 8.10. Utjecaj morfologije skrućivanja slitine na mogućnost napajanja: a) glatka fronta skrućivanja – napajanje nije ometano, b) hrapava fronta skrućivanja – otežano napajanje, c) kašasto ili tjestasto skrućivanje – vrlo otežano napajanje [73]

Na slici 8.10a može se vidjeti da je kod skrućivanja s glatkom ili neznatno hrapavom frontom skrućivanja put napajanja gotovo neometan. Pri skrućivanju s hrapavom frontom (slika 8.10b) u početnoj fazi napajanja talina relativno dobro teče. Napajanje postaje sve teže i teže kako se približava završetak skrućivanja, jer dolazi do međusobnog kontakta kristala u centru odljevka. Pojedini segmenti taline postaju odvojeni od ostatka taline i u unutrašnjosti odljevka nastaju mikrousahline.

Kašasto skrućivanje (slika 8.10c) u odljevku poseban je primjer kada se odljevak ne napaja samo talinom, već smjesom taline i krutine, tj. kašastom fazom. Napajanje odljevaka značajno se otežava kada kristali toliko narastu da se međusobno počnu dodirivati. Kada više nije moguće gibanje kašaste, odnosno tjestaste faze, napajanje odljevka zaustavlja se u potpunosti. Takav način napajanja smjesom taline i kristala tipičan je za odljevke od bronce.

Za optimalno napajanje odljevka treba osigurati neometan tok taline ili kašaste faze u unutrašnjost odljevka te usmjereno skrućivanje. Da bi se ostvarilo usmjereno skrućivanje i dobili kompaktni odljevci treba primijeniti sve tehnološke mogućnosti. Često se u cilju postizanja usmjerenog skrućivanja kombinira napajanje sa istovremenim hlađenjem pojedinih dijelova odljevka, način i mjesto ulijevanja taline te konstrukcijski zahvati na odljevku. Izrazito efikasan način za ostvarivanje usmjerenog skrućivanja je primjena rashladnih tijela (**hladila**) u kalupu. Osim što omogućuju usmjereno skrućivanje, hladila mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka i na taj način potpomažu njegovo napajanje.

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

8.3 Dimenzioniranje pojila

Zadatak pojila je da što duže zadrži talinu u rastaljenom stanju koja je potrebna za napajanje odljevka ili njegovih pojedinačnih dijelova [70 - 73]. Premalo pojilo skrutne prije odljevka, što znači da ne može ispuniti svoju funkciju. Pojilo koje skrutne puno kasnije od odljevka ili dijela odljevka kojeg napaja nije ekonomično zbog nepotrebno velikog volumena. Iz ovoga se može zaključiti da pojila treba racionalno dimenzionirati.

Pri dimenzioniranju pojila polazi se od zahtjeva da vrijeme skrućivanja pojila mora biti malo duže od vremena skrućivanja odljevka ili djela odljevka što ga pojilo napaja. Danas najčešća metoda za dimenzioniranje pojila zasniva se na izračunavanju modula. Pored te metode, u praksi se još primjenjuje metoda faktora oblika i različite grafičke metode (metoda Heuversovih kružnica), ali u znatno manjem opsegu.

8.3.1 Dimenzioniranje pojila na osnovi modula odljevka

Metoda modula zasniva se na konceptu da se vrijeme skrućivanja odljevka ili dijela odljevka može odrediti pomoću Chvorinovog pravila:

$$t = kM_o^2 \quad (8.1)$$

gdje je: t – vrijeme skrućivanja odljevka (s), k – koeficijent proporcionalnosti koji ovisi o toplinskoj vodljivosti kalupne mješavine, temperaturi taline i vrsti lijeva (s/cm^2), a M_o – modul odljevka (cm).

Modul odljevka, kako ga je definirao N. J. Chvorinov, predstavlja omjer volumena odljevka (V_o) i njegove površine (A_o):

$$M_o = \frac{V_o}{A_o} \quad (8.2)$$

gdje je: M_o – modul odljevka (cm), V_o – volumen odljevka (cm³), A_o – površina odljevka preko koje se odvodi toplina (cm²). Potrebno je naglasiti da se pri računanju modula ne uzimaju u obzir one površine odljevka preko kojih se ne odvodi toplina od odljevka tijekom njegovog skrućivanja.

Jednadžba (8.2) vrijedi i za pojilo i za njemu pripadajući odljevak, odnosno za dio odljevka kojeg pojilo napaja. Zbog toga je za usporedbu vremena skrućivanja pojila i odljevka, odnosno dijela odljevaka kojeg pojilo napaja, dovoljno usporediti vrijednosti njihovih modula (M). Prema tome, **pojilo treba dimenzionirati tako da je njegov modul nešto veći od modula odljevka ili dijela odljevka što ga pojilo napaja**. U tom slučaju (prema jednadžbi 8.1) pojilo će skrutnuti kasnije od odljevka ili dijela odljevka što ga pojilo napaja, jer je vrijednost koeficijenta k u jednadžbi (8.1) jednaka i za odljevak i njemu pripadajuća pojila.

Osim dimenzioniranja pojila treba odrediti i njihov broj i mjesta postavljanja na odljevku. Veće odljevke treba podijeliti u **zone napajanja** (zone djelovanja pojila) i za svaku zonu napajanja izračunati dimenzije pojila. Pojila se postavljaju na one dijelove odljevka koji predstavljaju masivna čvorišta u kojima talina najkasnije skrućuje. Iznimno, kod napajanja željeznih ljevova s grafitom, pojila se mogu postaviti i na druge segmente odljevka ovisno o primijenjenoj metodi napajanja.

Pri idealnom skrućivanju odljevka i pojila usahlina u pojilu imala bi paraboličan oblik, a vrh usahline dopirao bi do odljevka. Međutim, iz sigurnosnih razloga, pojilo se dimenzionira toliko veće da dubina usahline u pojilu ne bude veća od 4/5 visine pojila.

Tijekom skrućivanja odljevka dio taline prelazi iz pojila u odljevak, zbog čega se uslijed stvaranja usahline u pojilu povećava površina pojila, odnosno površina preko koje se odvodi toplina. Zbog toga je nakon završetka skrućivanja modul pojila za ~ 17 % manji od početnog modula pojila. Upravo je to razlog zašto modul pojila (M_p) mora biti 1,2 puta veći od modula odljevka (M_o) ili dijela odljevka što ga pojilo napaja:

$$M_p = 1,2M_o \quad (8.3)$$

gdje je: M_p – modul pojila (cm), a M_o – modul odljevka (cm). Uvjet definiran jednadžbom (8.3) mora se ispuniti jer u tom slučaju pojilo neće skrutnuti prije odljevka. To znači da pojilo može uspješno napajati odljevak.

Potrebno je napomenuti da izraz 8.3 vrijedi za veliki broj ljevarskih slitina (npr. čelike, aluminijske slitine, bakrene slitine itd.). Međutim, kod napajanja željeznih ljevova s grafitom zbog karakterističnog mehanizma skrućivanja pogodniji je slijedeći izraz za određivanje modula pojila:

$$M_p = (0,8-1,2)M_o \quad (8.4)$$

Tijekom skrućivanja željeznih ljevova s grafitom postoji period kada dolazi do povećanja volumena, zbog čega se od pojila ne zahtijeva da napaja odljevak tijekom cijelog perioda skrućivanja odljevka. To omogućuje primjenu pojila s nešto manjim modulom. O ovome će se detaljnije govoriti nešto kasnije.

Iz poznatog volumnog deficita pojila i poznatog volumnog stezanja ljevarske slitine u tekućem stanju i tijekom skrućivanja može se izračunati volumen pojila dovoljan za napajanje odljevka (ili dijela odljevka):

$$V_p = k_1 V_o \quad (8.5)$$

gdje je: V_p – volumen pojila (cm^3), a V_o – volumen odljevka (cm^3). Vrijednost koeficijenta proporcionalnosti k_1 u jednadžbi (8.5) ovisi o volumnom stezanju lijeva u tekućem i tjestastom stanju. U tablici 8.2 prikazane su vrijednosti koeficijenta k_1 za nekoliko vrsta ljevova.

Tablica 8.2. Vrijednosti koeficijenta proporcionalnosti k_1 [73]

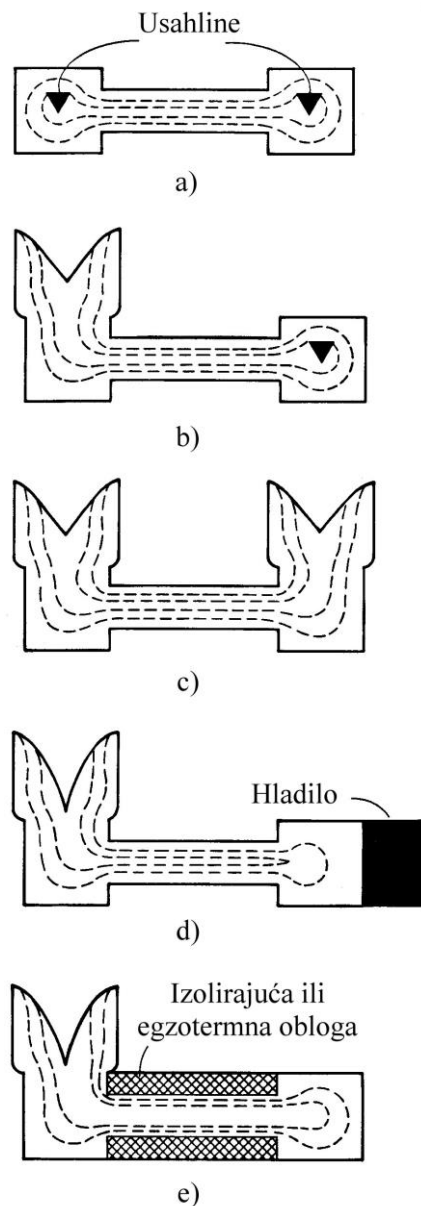
Ljevarska slitina	k_1
Čelični lijev, nelegiran	0,3
Čelični lijev, legiran	0,4
Temperirani lijev	0,3
Uobičajeni sivi lijev	0,12
Sivi lijev više kvalitete	0,2
Mjed	0,25
Bronca	0,3

Svaki odljevak ili svaki njegov dio obzirom na napajanje određen je s dva parametra, a to su volumen i modul. Ako je modul pojila 1,2 puta veći od modula odljevka, time je ostvaren prvi potreban uvjet za pravilno dimenzioniranje pojila. Kad je odljevak sastavljen od pojedinačnih dijelova koji imaju različite module, pojilo se dimenzionira za dio s najvećim modulom.

Rijetko se u praksi susreću odljevci kod kojih se moduli pojedinačnih dijelova odljevka ravnomjerno (tj. postepeno) povećavaju. Većina komercijalnih odljevaka sastoji se od segmenata koji imaju različitu debljinu i konfiguraciju. Deblji segmenti odljevka sporije skrućuju i često su odvojeni tanjim segmentima koji brže skrućuju. U tom slučaju deblji segmenti odljevka djeluju kao pojila za tanje segmente. Iz navedenih razloga za jedan odljevak obično nije dovoljno samo jedno pojilo. U takvim se slučajevima odljevak fiktivno podijeli u više samostalnih dijelova s njihovim pretpostavljenim smjerovima usmjerenog skrućivanja, te se za svaki pojedinačni dio odljevka upotrijebi odgovarajuće pojilo. Pravilnom upotrebom hladila ili izolirajućih materijala može se utjecati na putove napajanja, odnosno usmjerenost skrućivanja i na taj način smanjiti potreba za napajanjem (slika 8.11).

Na slici 8.11a može se vidjeti da u debljim presjecima (tj. toplinskim centrima) odljevka nastaju usahline zbog volumnog stezanja slitine ako se ne primjenjuju pojila. Ako se odgovarajuće pojilo postavi samo na jedan deblji segment odljevka (slika 8.11b), usahlina je i dalje prisutna u drugom debljem segmentu jer tanji segment odljevka prije skrućuje, što onemogućuje napajanje drugog debljeg segmenta. Prema tome, može se zaključiti da nije ostvareno usmjerenost skrućivanje. Odljevak prikazan na slici 8.11a najlakše se može napajati tako da se na oba deblja segmenta postave pojila (slika 8.11c). Međutim, takav slučaj nije povoljan jer je manje iskorištenje taline. Potrebno je razmotriti druge alternativne metode napajanja koje omogućuju proizvodnju ispravnog odljevka uz veće iskorištenje taline. Postavljanjem pojila na jedan deblji segment odljevka i odgovarajućeg hladila u kalup na drugi deblji segment (slika 8.11d) skraćuje se vrijeme skrućivanja debljeg segmenta na kojeg je postavljeno hladilo u odnosu na tanji segment odljevka, što omogućuje usmjerenost skrućivanje i adekvatno napajanje (odljevak ne sadrži usahline). Postavljanjem odgovarajućeg

izolirajućeg ili egzotermnog materijala na tanji segment odljevka (slika 8.11e) produlje se njegovo vrijeme skrućivanja, što omogućuje da pojilo postavljeno na jedan deblji segment odljevka adekvatno napoji i drugi deblji segment odljevka.



Slika 8.11. Napajanje odljevka čija su dva deblja segmenta odvojena jednim tanjim segmentom: a) situacija bez pojava, b) pojilo postavljeno samo na jedan deblji segment, c) pojava postavljena na oba deblja kraja, d) pojilo postavljeno na jedan deblji segment a hladilo na drugi, e) pojilo smješteno na jedan deblji segment, a izolirajući ili egzotermni materijal na tanji segment [72]

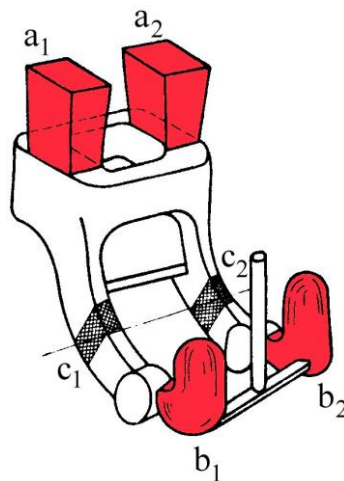
Pojilo dimenzionirano na osnovi modula u većini slučajeva sadrži dovoljno taline da napoji pripadajući dio odljevka. Međutim, masivni odljevci trebaju znatno manju količinu taline za napajanje od pločastih odljevaka jednakog modula. Npr. velika ploča čija debljina iznosi 10 cm ima jednak modul ($M = 5 \text{ cm}$) kao kugla promjera 30 cm. Međutim, volumen takve ploče može biti i nekoliko puta veći od volumena kugle. Zbog toga je i potreba za napajanjem te ploče razmjerno veća. Svako pojilo se zbog toga mora kontrolirati i prema

jednadžbi (8.5) da bi se ustanovilo je li pojilo sa stanovišta volumnog stezanja pravilno dimenzionirano. Pri tome su gotovo uvijek prisutna dva slučaja:

- ako pojilo dimenzionirano pomoću modula ima veći volumen od stvarno potrebnog, tj. od onog što se dobije pomoću volumnog stezanja prema izrazu (8.5), može se za tu razliku smanjiti volumen pojila izračunat pomoću modula, ali na taj način da se pri tom ne smanji vrijednost ekvivalentna ranije izračunatom modulu. To se u praksi obično postiže upotrebom egzotermnih ili izolacijskih obloga oko pojila. Na taj način može se smanjiti volumen pojila bez da se smanji njegov modul,
- ako je volumen pojila koji je dimenzioniran pomoću modula premalen obzirom na uvjet definiran jednadžbom (8.5), treba upotrijebiti pojilo većeg volumena, što ujedno znači i pojilo većeg modula od onog koji je prvotno izračunat.

Sustav napajanja mora još ispuniti i tzv. uvjet zasićenja, što znači da se svaka točka u odljevku mora nalaziti u zoni učinkovitog djelovanja jednog pojila. Odljevci kod kojih nije prisutno smanjenje modula (npr. ploče i palice) započinju sa skrućivanjem na mjestima koja su sa svih strana okružena pijeskom. Uslijed brzog odvođenja topline na tim mjestima (rubovi ploča i krajevi palica), talina se brzo skrutne i nastane tzv. krajnja zona odljevka (KZ) koja se napaja iz ostalih dijelova odljevka, zbog čega u tom dijelu odljevka nije prisutna usahlina. Ostali dijelovi takvih odljevaka moraju se napajati pojilima koja imaju ograničeno djelovanje po horizontali i vertikali.

Na slici 8.12 shematski je prikazan odljevak sa pravilno postavljenim otvorenim i zatvorenim pojilima uz istovremenu upotrebu hladila. Kod otvorenih pojila gornja površina pojila vidljiva je na gornjoj površini kalupa i u kontaktu je s vanjskom atmosferom. Zatvorena pojila nalaze se u kalupu i sa svih strana su okružena kalupnim materijalom.



Slika 8.12. Shematski prikaz uravnoteženog skrućivanja odljevka: a_1 i a_2 – otvorena pojila, b_1 i b_2 – zatvorena pojila, c_1 i c_2 – mjesta za hladila [73]

Uravnoteženo skrućivanje u primjeru sa slike 8.12 može se objasniti na slijedeći način. Nakon što je završeno ulijevanje taline u kalup, najprije se skrutnu tanka rebra odljevka koja povezuju njegove masivnije dijelove. Učinak napajanja je povećan ugradnjom hladila c_1 i c_2 u kalup (šrafirana mjesta na odljevku, slika 8.12), čime se intenzivira hlađenje rebara i time ubrza njihovo skrućivanje. Na taj način je odljevak podijeljen u dva odvojena sustava napajanja. Jedan dio odljevka napaja se otvorenim pojilima a_1 i a_2 , a drugi dio zatvorenim pojilima b_1 i b_2 . U slučaju da se gornja površina na pojilima a_1 i a_2 prerano skrutne,

atmosferski tlak koji djeluje u zatvorenim pojilima b_1 i b_2 neće utjecati na djelovanje pojila a_1 i a_2 , jer su rebra već skrutnuta i sustav napajanja ostaje uravnotežen.

U slučaju da tanka rebra odljevka nisu učinkovito hlađena, sustav napajanja bio bi neuravnotežen i pojedina pojila lako bi napajala susjedna područja napajanja za što nisu dimenzionirana. U konačnici bi to rezultiralo nastankom usahline u odljevku.

Iz ove kratke analize može se zaključiti da nije dovoljno samo nadomjestiti volumno stezanje odljevka tijekom skrućivanja, već je potrebno ostvariti i **uravnotežen sustav napajanja** odljevka. Uravnotežen sustav napajanja znači da svako pojilo napaja svoj dio odljevka. Drugim riječima, svako pojilo mora biti izolirano (u smislu napajanja) u svojem djelovanju, tj. ne smije biti povezano talinom s nekim drugim pojilom na odljevku.

8.3.1.1 Izračunavanje modula

Budući da je modul nekog tijela po definiciji omjer volumena i površine, pojila moraju biti tako konstruirana da imaju što veći volumen uz što manju površinu. Na taj način postiže se veći modul i sporije skrućivanje pojila.

Geometrijsko tijelo s najvećim modulom, tj. s najvećim omjerom između volumena i površine je kugla. Modul kugle promjera d može se odrediti pomoću slijedećeg izraza:

$$M = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi d^3}{6}}{\pi d^2} = \frac{d}{6} \quad (8.6)$$

Modul kocke sa stranicom a je:

$$M = \frac{V}{A} = \frac{a^3}{6a^2} = \frac{a}{6} \quad (8.7)$$

Modul valjka promjera d i visine $h = d$ je:

$$M = \frac{V}{A} = \frac{\frac{d^2 \pi}{4} d}{d^2 \pi + \frac{2d^2 \pi}{4}} = \frac{d}{6} \quad (8.8)$$

Iz prethodnih jednadžbi može se vidjeti da kugla promjera d i valjak kod kojeg je promjer jednak visini ($h = d$) imaju jednake module. Upravo zbog toga **pojila obično imaju valjkast oblik ili čak oblik kugle**, jer takva pojila imaju najveći modul, odnosno najveću ekonomičnost. Ta činjenica važna je za praksu, jer se modul uglatih tijela može izračunati ako se u njih ucrtta kugla, što bitno pojednostavljuje računanje modula. Tako je npr. modul kugle promjera d upisane u kocku s duljinom stranice d jednak modulu kocke i iznose $d/6$. Prema tome, u praksi se u mnogim slučajevima mogu pojedini segmenti odljevka prikazati jednostavnim geometrijskim oblicima čiji se modul može lako izračunati bez potrebe za izračunavanjem stvarnih površina i volumena.

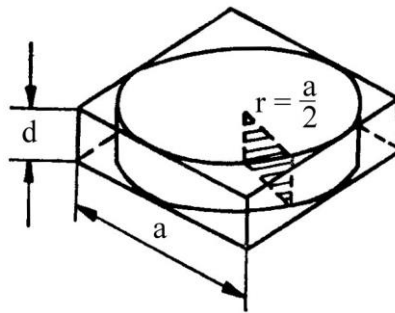
Modul kvadra sa osnovicama a i b te visinom c je:

$$M = \frac{V}{A} = \frac{abc}{2(ab)+2(ac)+2(bc)} = \frac{abc}{2ab+2(a+b)c} \quad (8.9)$$

Ako se čone površine kvadra (tj. površine $a \cdot b$) mogu zanemariti, tj. ako su vrlo male prema bočnim plohama kvadra ili su pak u kontaktu sa susjednim stjenkama odljevka zbog čega se kroz njih ne odvodi toplina, modul kvadra može se izračunati prema slijedećoj formuli:

$$M = \frac{abc}{2(ac)+2(bc)} = \frac{abc}{2c(a+b)} = \frac{ab}{2(a+b)} \quad (8.10)$$

Modul kocke jednak je modulu u kocku ucrtane kugle ili valjka (jednadžbe 8.6 do 8.8). Kocka i u kocku ucrtana kugla ili valjak imaju ista vremena skrućivanja. Može se pretpostaviti da se kutovi kocke skrutnu vrlo brzo zbog čega ostaje samo tekuća jezgra kuglastog oblika. Ta postavka može se upotrijebiti za izračunavanje modula ploče s kvadratnom osnovicom ($a \cdot a$) i debljinom d (slika 8.13).



Slika 8.13. Ploča kvadratnog oblika sa ucrtanim valjkom [73]

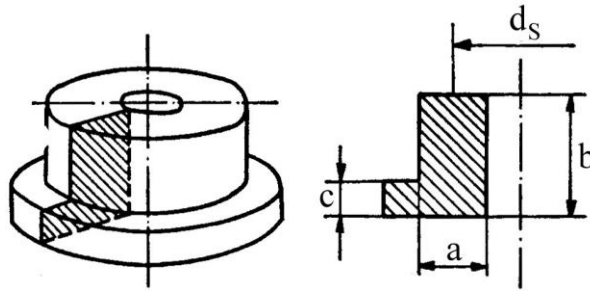
Modul ploče prikazane na slici 8.13 može se izračunati pomoću slijedeće jednadžbe:

$$M = \frac{V}{A} = \frac{r^2 \pi d}{2r^2 \pi + 2r \pi d} \quad (8.11)$$

gdje je: r – radijus osnovice valjka ucrtanog u ploču, a d – debljina ploče. Ako je $a \geq 5d$ mogu se zanemariti bočne plohe ploče. Premda se na taj način čini mala pogreška, to pojednostavljenje primjenjuje se u praksi, pa se modul ploče prikazane na slici 8.13 računa prema slijedećem izrazu:

$$M = \frac{r^2 \pi d}{2r^2 \pi} = \frac{d}{2} \quad (8.12)$$

U nastavku ćemo razmotriti određivanje modula odljevka cilindričnog oblika sa dodatnim prstenom većeg promjera u donjem dijelu prikazanog na slici 8.14.



Slika 8.14. Odljevak cilindričnog oblika s proširenjem u donjem dijelu, odnosno dodatnim prstenom debljine c [73]

Na slici 8.14 može se vidjeti da postoji kontakt između plašta cilindra i prstena, što znači da se toplina ne odvodi preko cjelokupne površine plašta cilindra. To treba uzeti u obzir pri izračunavanju modula odljevka. Budući da odljevak na presjeku ima oblik kvadra sa osnovicom a i visinom b uz dodatak segmenta visine c na bočnoj stranici kvadra, uzimajući u obzir jednadžbu 8.10 modul odljevka može se izračunati pomoću sljedećeg izraza:

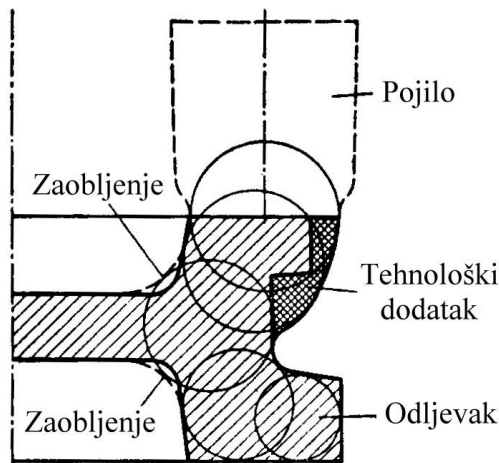
$$M = \frac{ab}{2(a+b)-c} \quad (8.13)$$

U praksi se prilikom izračunavanja modula odljevaka cilindričnog oblika mora uzeti u obzir djelovanje jezgre kao izolatora. U svim slučajevima u kojima je unutarnji otvor u odljevku cilindričnog oblika jako mali (kod čeličnog lijeva, npr. manji od 1/4 vanjskog promjera), takav odljevak treba smatrati punim valjkom pri izračunavanju modula.

8.3.2 Dimenzioniranje pojila Heuversovom metodom upisanih kružnica

Heuversova metoda upisanih kružnica zasniva se na principu modula odljevka. Metoda je relativno jednostavna i često se primjenjuje za dimenzioniranje pojila za napajanje odljevaka od čeličnog lijeva [74, 75]. Prema toj metodi moduli poprečnih presjeka odljevka moraju se kontinuirano povećavati u smjeru prema pojilu da bi se osiguralo usmjereno skrućivanje. A. Heuvers prvi je razvio praktičnu metodu prema kojoj se na poprečnom presjeku odljevka upisuje serija kružnica jedna do druge tako da se njihova površina kontinuirano povećava u smjeru prema pojilu za određeni faktor, koji se zove Heuversov faktor i označava se sa k_H (slika 8.15). Ako se lijevanje provodi u kalupe od svježe kalupne mješavine, primjenjuju se sljedeće vrijednosti Heuversovog faktora: za odljevke od sivog lijeva $k_H = 1$ do 1,1, za odljevke od vermikularnog i nodularnog lijeva $k_H = 1,1$ do 1,2, za odljevke od temperiranog lijeva $k_H = 1,2$ do 1,3, a za odljevke od čeličnog lijeva $k_H = 1,3$ do 1,5 [75]. Pretpostavlja se da je za potpuno skrućivanje dijela odljevka potrebno duže vrijeme što je veća površina upisane kružnice.

Na slici 8.15 može se vidjeti da ova metoda često zahtjeva primjenu tehnoloških dodataka, odnosno povećanje debljine stijenke u smjeru prema pojilu da bi se ostvarilo usmjereno skrućivanje. Često tehnološki dodatak može biti značajan, što zahtjeva dodatne troškove za njegovo uklanjanje i obradu odljevka. Osim toga, tehnološki dodaci negativno utječu na izvadak, odnosno iskorištenje taline.



Slika 8.15. Heuversova metoda upisanih kružnica [76]

U smjeru prema pojilu površina svake slijedeće kružnice je veća od površine prethodne kružnice. Na taj način se i moduli pojedinih dijelova odljevka u koje su upisane kružnice povećavaju za isti faktor u smjeru prema pojilu.

8.4 Zona djelovanja napajanja

Dva osnovna kriterija koji određuju da li je pojilo adekvatno za napajanje odljevka su [13, 72, 73] :

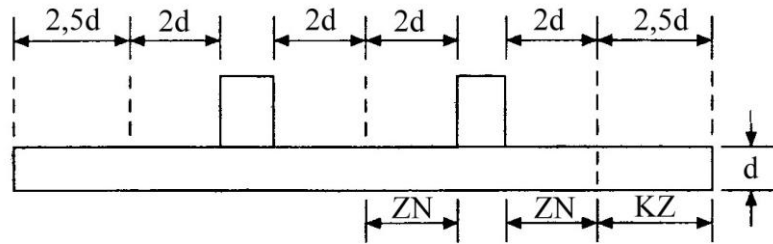
- vrijeme skrućivanja pojila u odnosu na skrućivanje odljevka i
- zona djelovanja napajanja.

Kod mnogih kompleksnih odljevaka zona djelovanja napajanja je faktor koji ograničava djelovanje svakog pojila, zbog čega se mora odrediti udaljenost koja se može efikasno napajati pojilom. To znači i da pravilno dimenzionirano pojilo može biti nedostatno u slučajevima kada se zbog konfiguracije odljevka ne može osigurati dotok taline iz pojila u sve segmente koje treba napajati.

Ploče i palice predstavljaju geometrijski najjednostavniju konfiguraciju odljevka jer imaju jednaku debljinu po čitavom presjeku. Zbog toga su na pločama i palicama najviše istraživane zone djelovanja napajanja, tj. područja odljevka koja se mogu efikasno napojiti talinom iz pojila bez nastanka grešaka zbog volumnog stezanja u tekućem stanju i tijekom skrućivanja. Odljevak se smatra palicom ako omjer stranica poprečnog presjeka iznosi $\sim 1:1$ (kvadrat, krug). Ako navedeni omjer iznosi $5:1$ ili više, takav se odljevak smatra pločom. Međutim, ploče i palice imaju jednoličnu debljinu zbog čega sa stanovišta napajanja predstavljaju nepovoljan oblik odljevka.

Rubovi, odnosno bridovi odljevka u obliku ploče ili palice te dijelovi odljevka koji su na krajevima sa svih strana okruženi pijeskom brzo se skrućuju zbog intenzivnijeg odvođenja topline u tim područjima. Pri tome se ti krajnji dijelovi odljevka napajaju iz ostalih dijelova odljevka i skrućuju kao kompaktna krajnja zona odljevka (KZ). Zbog toga ta područja odljevka nije potrebno napajati. Ploča od nelegiranog čeličnog lijeva koja se napaja jednim pojilom prema slici 8.16 skrućuje kompaktno, tj. bez grešaka zbog volumnog stezanja slitine ako udaljenost od pojila do kraja ploče ne prelazi $4,5d$, pri čemu je d debljina ploče. Može se vidjeti da se kompaktno skrutnuto područje odljevka sastoji od **krajnje kompaktne zone**

(KZ), što je rezultat utjecaja krajeva odljevka i **zone napajanja (ZN)**, odnosno zone koju napaja pojila (zona djelotvornosti pojila). Pri tome je utjecaj kraja odljevka veći od utjecaja pojila ($KZ > ZN$).



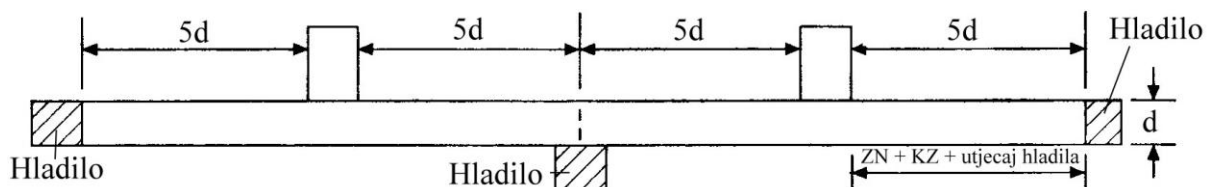
Slika 8.16. Zona djelovanja napajanja u čeličnoj ploči debljine d [13]

Ako je udaljenost od pojila do kraja ploče veća od $4,5d$ duljina krajnje kompaktne zone odljevka (KZ) i duljina zone napajanja odnosno djelovanja pojila (ZN) iste su kao u prethodnom slučaju ($2,5d$, odnosno $2d$). To znači da će se u području između navedenih zona pojaviti greške zbog volumnog stezanja slitine, jer to područje nije u domeni djelovanja niti pojila niti ruba odljevka.

Odljevak u obliku ploče je kompaktan u području između dva pojila ako razmak između pojila nije veći od $4d$ (slika 8.16). Područje od kraja ploče do pojila biti će kompaktno ako nije duže od $4,5d$.

Ako je udaljenost između dva pojila na čeličnoj ploči veća od $4d$, u dijelu ploče koji je izvan zone napajanja pojila, odnosno zone djelovanja pojila, pojavit će se greške zbog volumnog stezanja slitine. Područje od kraja ploče do pojila biti će kompaktno ako nije duže od $4,5d$.

Upotrijebi li se osim pojila i **hladilo** na kraju odljevka, povećava se duljina kompaktne zone od pojila do kraja ploče i u tom slučaju iznosi $5d$ (slika 8.17). Hladilo brzo odvodi toplinu čime pospješuje umjereno skrućivanje od kraja ploče prema pojilu.

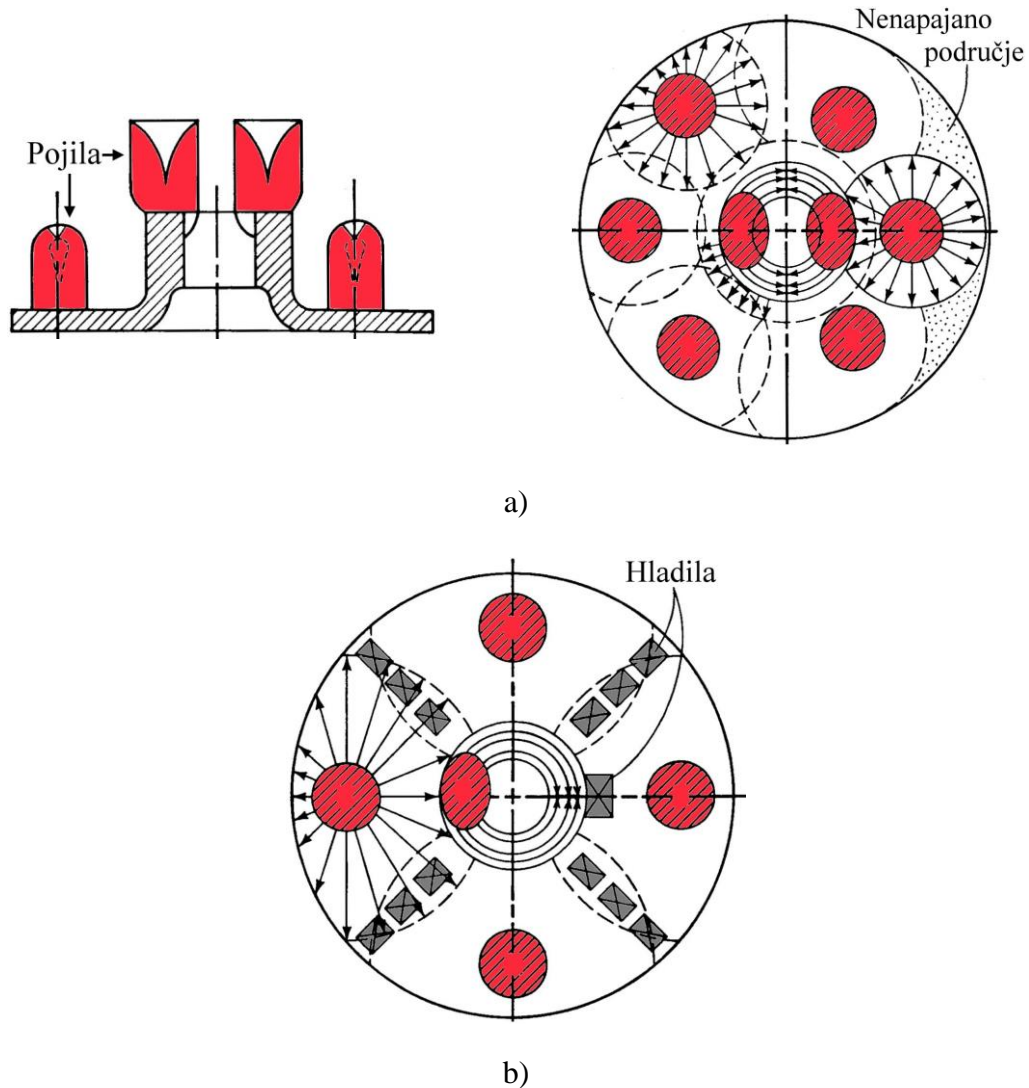


Slika 8.17. Utjecaj hladila na zonu djelovanja napajanja u čeličnoj ploči debljine d [13]

Hladila su posebno djelotvorna ako se postave na odljevak (ploču) između dva pojila (slika 8.17). Na taj način se na mjestu gdje je postavljeno hladilo formira umjetni kraj odljevka i njegov učinak, tj. simulira se djelovanje kraja odljevka. To omogućuje da se povećá udaljenost između pojila, odnosno smanji broj pojila potreban da se dobije ispravan odljevak, povećá iskorištenje taline tj. izvadak te smanje troškovi uklanjanja pojila. U tom slučaju kompaktna zona između pojila može doseći dužinu od $10d$, što je znatno više nego u slučaju kada se ne primjenjuje hladilo između pojila ($4d$, vidi sliku 8.16).

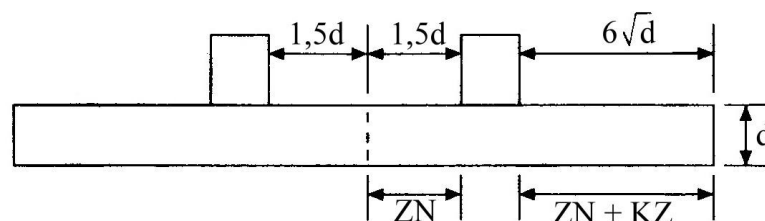
Prednosti koje se postižu primjenom hladila jasno se mogu vidjeti iz slijedećeg primjera koji opisuje napajanje čelične prirubnice bez primjene i s primjenom hladila (slika 8.18). Na slici 8.18a može se vidjeti da se čak i sa 8 pojila ne može osigurati potpuno napajanje odljevka, odnosno postoje područja koja su izvan djelovanja pojila, što zahtijeva dodavanje barem još jednog pojila. Primjenom hladila (slika 8.18b) stvaraju se umjetni

krajevi odljevka i njihovi učinci, što omogućuje da se s manjim brojem pojila (5) dobije potpuno ispravan odljevak.



Slika 8.18. Upotreba hladila radi smanjenja broja pojila potrebnih za napajanje čelične prirubnice: a) slučaj bez primjene hladila – 8 pojila, b) slučaj nakon postavljanja 5 hladila [72]

Kod čeličnih palica s kvadratnim poprečnim presjekom ostvaruju se drugačije duljine kompaktnih područja nego kod čeličnih ploča (slika 8.19). Područje od kraja palice do pojila bit će kompaktno ako nije duže od $6\sqrt{d}$ (d – debljina, odnosno širina palice), što je kraće nego kod ploča.

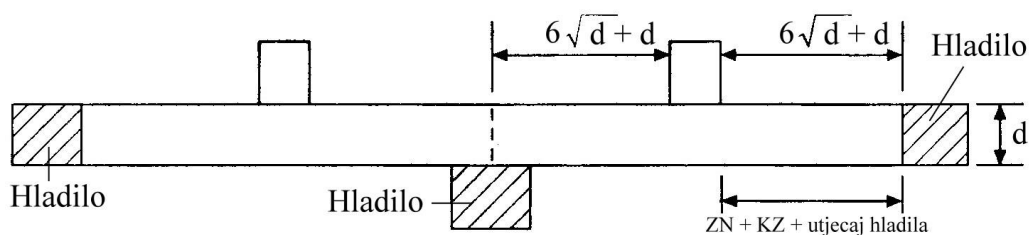


Slika 8.19. Zona djelovanja napajanja u čeličnoj palici debljine d [13]

Ako je udaljenost od pojila do kraja palice veća od $6\sqrt{d}$, duljina krajnje kompaktne zone odljevka (KZ) i duljina zone napajanja, odnosno djelovanja pojila (ZN) iste su kao u prethodnom slučaju. To znači da će se u području između navedenih zona pojaviti greške zbog volumnog stezanja slitine, jer to područje nije u domeni djelovanja niti pojila niti kraja odljevka.

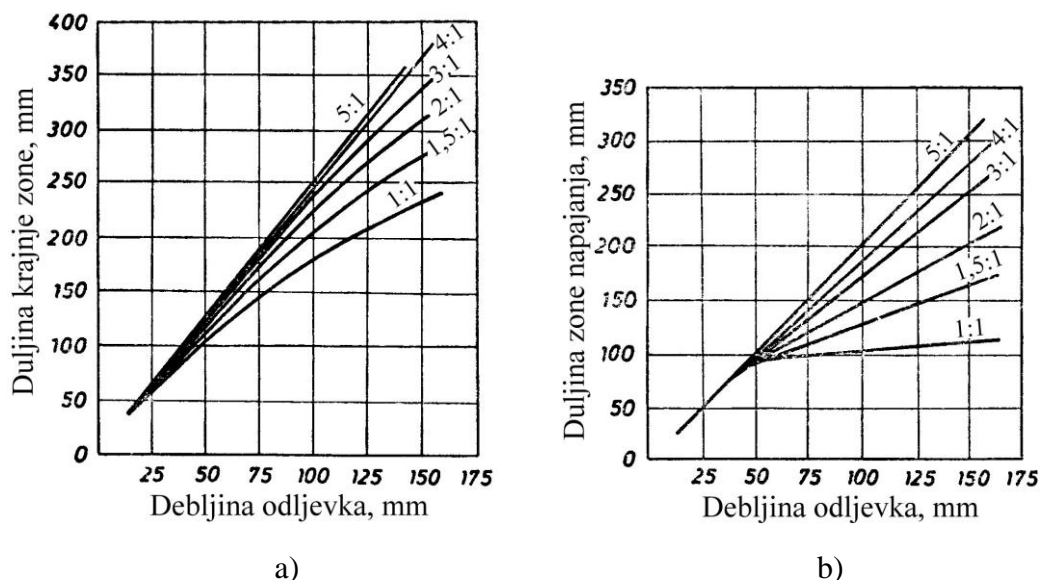
Odljevak u obliku palice je kompaktan u području između dva pojila ako razmak između pojila nije veći od $3d$ (slika 8.19). Ako je udaljenost između dva pojila na čeličnoj palici veća od $3d$, u području koje je izvan zona napajanja pojila, odnosno zona djelovanja pojila, pojavit će se greške zbog volumnog stezanja slitine.

Ako se pored pojila upotrijebe i hladila, povećava se duljina kompaktne zone od pojila do kraja palice i u tom slučaju iznosi $6\sqrt{d} + d$, a kompaktna zona između pojila povećava se na $12\sqrt{d} + 2d$ (slika 8.20).

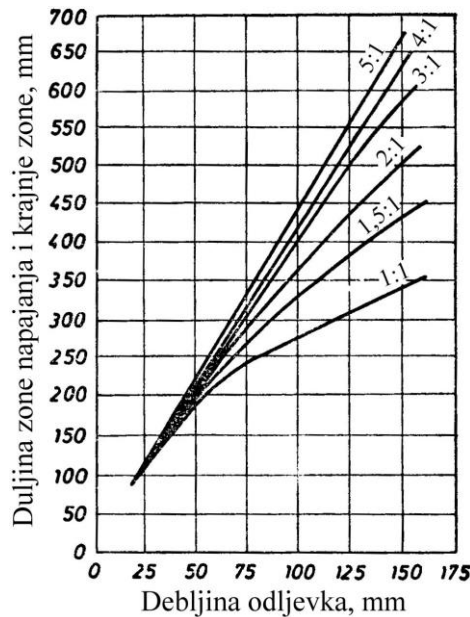


Slika 8.20. Utjecaj hladila na zonu djelovanja napajanja u čeličnoj palici debljine d [13]

Velika količina podataka o zoni napajanja dostupna je za nelegirane čelične ljevove. Različiti dijagrami i tablice u širokom opsegu primjenjuju se već desetljećima. Dijagrami na slikama 8.21 i 8.22 prikazuju duljinu kompaktnih područja ovisno o debljini stijenke odljevka od nelegiranog čeličnog lijeva.



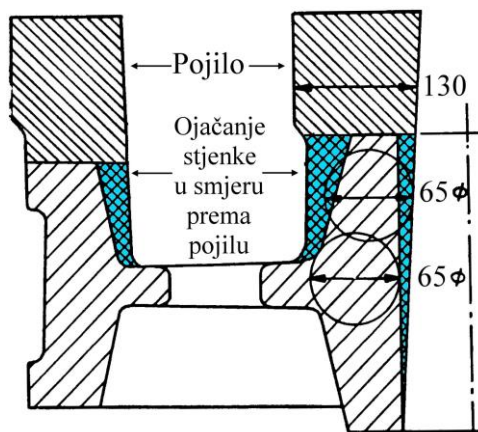
Slika 8.21. Duljina krajnje kompaktne zone (KZ) (a) i zone napajanja (ZN) (b) ovisno o debljini stijenke i omjeru stranica na poprečnom presjeku odljevka od nelegiranog čeličnog lijeva [73]



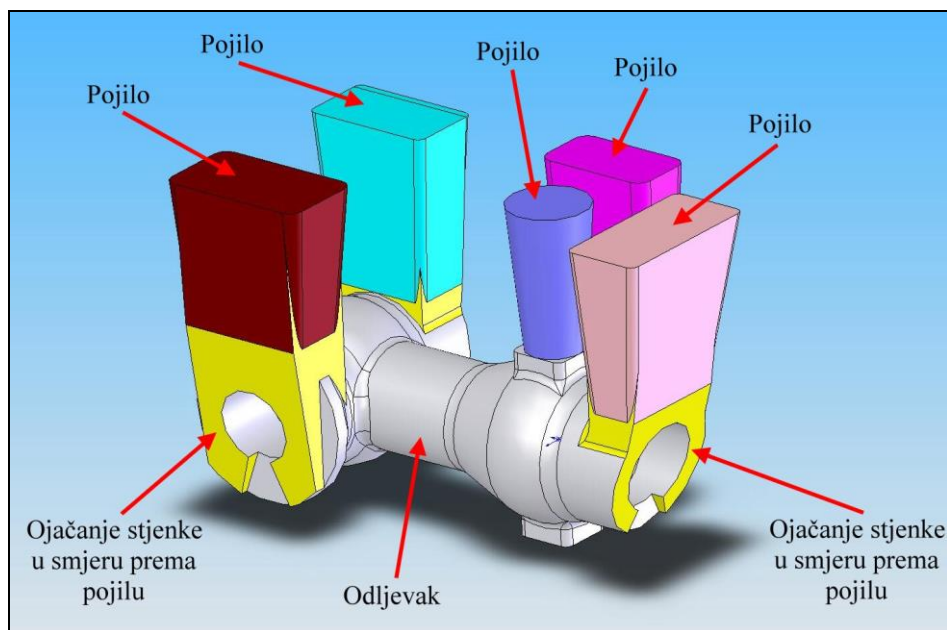
Slika 8.22. Duljina krajnje kompaktne zone (KZ) i zone napajanja (ZN) ovisno o debljini stijenke i omjeru stranica na poprečnom presjeku odljevka od nelegiranog čeličnog lijeva [73]

Kod sivog i nodularnog lijeva duljine kompaktnih područja odljevka ovise u velikoj mjeri o čvrstoći kalupa i količini izlučenog grafitu tijekom skrućivanja. Ako kalup nema dovoljnu čvrstoću, porast volumena odljevka tijekom izlučivanja grafitu u obliku listića, nodula ili vermikula za vrijeme skrućivanja ima za posljedicu „napuhivanje“ odljevka i nastanak poroznosti. Međutim, ako se lijevanje provodi u dovoljno čvrste kalupe neće doći do porasta volumena odljevka već do porasta tlaka u kalupnoj šupljini. Ta činjenica može se iskoristiti za napajanje odljevka tijekom skrućivanja i na taj način smanjiti broj i volumen pojila. S velikom se sigurnošću može pretpostaviti da se odljevci od sivog, vermikularnog i nodularnog lijeva koji su lijevani u dovoljno čvrste jednokratne (pješčane) kalupe mogu uz pravilnu metaluršku kvalitetu taline napajati do proizvoljno dugih kompaktnih zona.

Pri lijevanju ploča i palica u vertikalnom položaju mora se uzeti u obzir da je napajanje po vertikali također ograničeno. Obično se problem rješava tehnološkim dodatkom, odnosno ojačanjem (tj. povećanjem debljine) stijenke odljevka u smjeru prema pojilu (slike 8.23 i 8.24). Na taj način postiže se odgovarajući temperaturni gradijent, odnosno usmjereno skrućivanje prema pojilu.

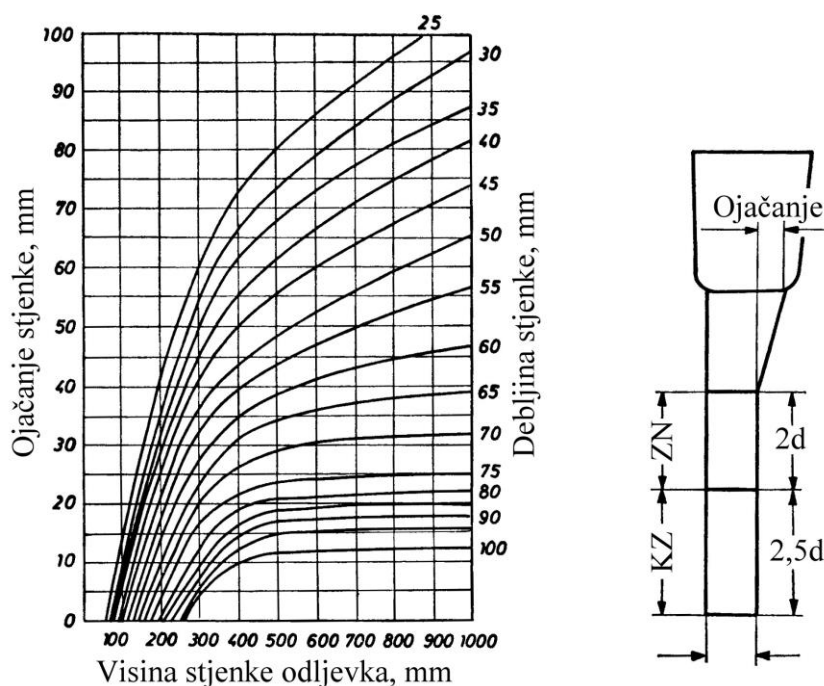


Slika 8.23. Postizanje odgovarajućeg temperaturnog gradijenta, odnosno usmjerenog skrućivanja povećanjem debljine stijenke odljevka u smjeru prema pojilu [74]



Slika 8.24. Povećanje debljine stjenke odljevka od čeličnog lijeva u smjeru prema pojilu u cilju postizanja usmjerenog skrućivanja

Preporučena povećanja debljine stjenke odljevka prema H. Steinu prikazana su u obliku dijagrama na slici 8.25.



Slika 8.25. Povećanje debljine stjenke odljevka ovisno o njezinoj visini i debljini [73]

Na slici 8.25 može se vidjeti da je duljina krajnje kompaktne zone (KZ) i zone napajanja (ZN) kod vertikalno lijevanih ploča jednaka kao i kod horizontalno lijevanih ploča (slika 8.16). Za uspješno napajanje vertikalne stjenke visine h (visina od kraja stjenke do pojila) potrebno je segment, odnosno dio stjenke koji se nalazi iznad krajnje zone (KZ) i zone napajanja (ZN) podebljati za iznos prema dijagramu na slici 8.25.

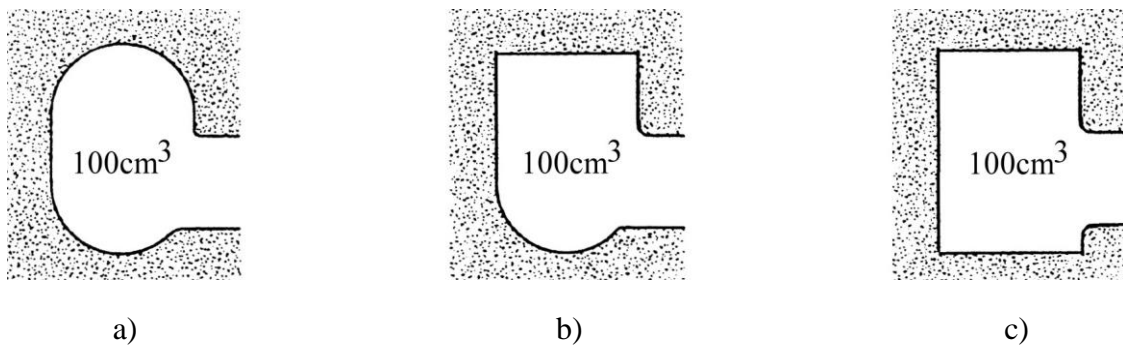
8.5 Pojila i vrat pojila

Prema konstrukciji pojila se dijele na:

- **otvorena pojila i**
- **zatvorena pojila.**

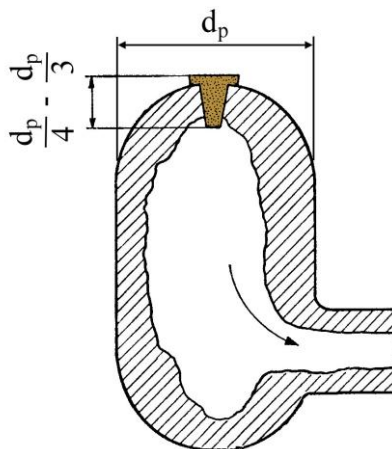
Otvorena pojila smještena su tako da je završetak, odnosno gornja površina pojila vidljiva na gornjoj površini kalupa. Prema djelovanju otvorena pojila mogu biti: klasična gravitacijska, izolacijska i egzotermna.

Zatvorena pojila gotovo uvijek imaju oblik valjka s vrhom i dnom u obliku polukugle (kupole), jer se na taj način postiže optimalni modul (slika 8.26). Zatvoreno pojilo prikazano na slici 8.26a ostati će duže u tekućem stanju od zatvorenih pojila prikazanih na slikama 8.26b i 8.26c.



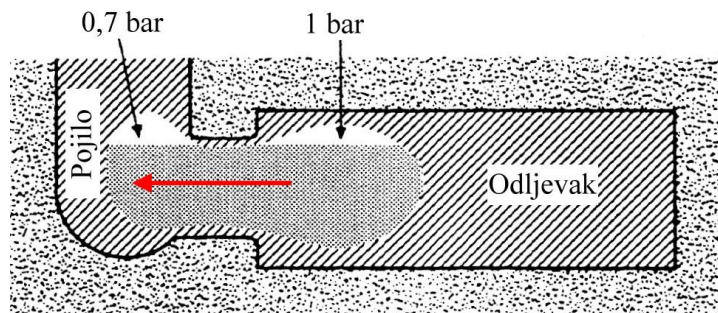
Slika 8.26. Pravilno (a) i nepravilno (b i c) oblikovano zatvoreno pojilo [71]

Zatvorena pojila postavljaju se na niže dijelove odljevka (tj. masivna čvorišta) gdje i nije moguće upotrijebiti otvorena pojila i potpuno su okružena pijeskom. Na vrh zatvorenog pojila često se stavlja porozna pješčana jezgra (Williamsova jezgra) koja omogućuje da vanjska atmosfera (oko pojila) tijekom skrućivanja ima stalan kontakt s talinom u unutar pojila tlačeći je iz pojila u odljevak, zbog čega se i naziva atmosfersko pojilo (slika 8.27). Osim primjenom pješčane jezgre, stvaranje krute kore na vrhu pojila može se odgoditi tako da se na vrhu pojila načini utor.



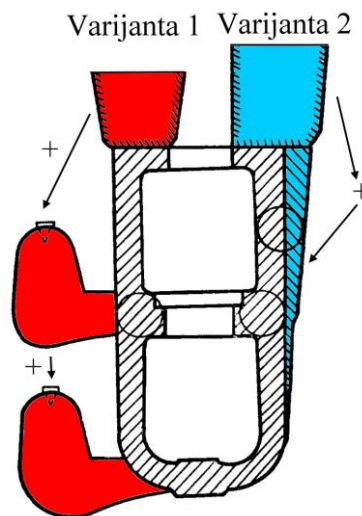
Slika 8.27. Zatvoreno atmosfersko pojilo s jezgrom na vrhu. d_p – promjer pojila [73]

Ako se na vrh pojila ne postavi porozna pješčana jezgra, nastala kruta kora na vrhu pojila onemogućuje djelovanje atmosferskog tlaka na talinu u pojilu, zbog čega nastaje potlak u pojilu (tlak u pojilu niži od atmosferskog tlaka). U tom slučaju može doći čak do toga da odljevak napaja pojilo, a ne obrnuto (slika 8.28).



Slika 8.28. Primjer slučaja u kojem odljevak napaja pojilo zbog potlaka u pojilu [71]

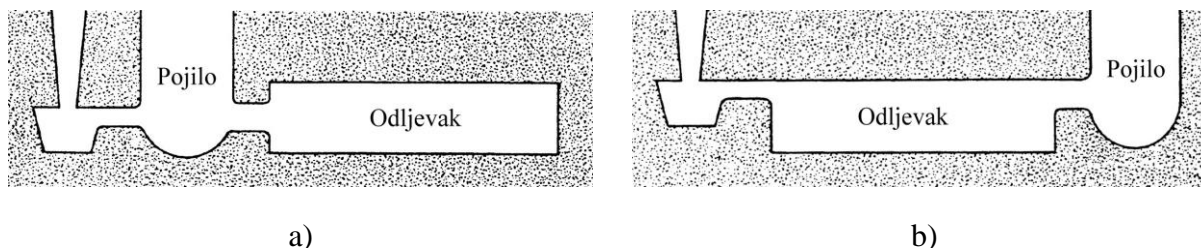
Primjenom zatvorenih atmosferskih pojila izostaje potreba za neophodnim ojačanjem vertikalnih stjenki odljevka jer ta pojila napajaju niže segmente odljevka na koje su postavljena, pa nije potrebno ostvariti usmjereno skrućivanje prema otvorenim pojilima postavljenim na vrhu odljevka (slika 8.29).



Slika 8.29. Primjer upotrebe zatvorenih atmosferskih pojila (varijanta napajanja 1) da bi se izbjeglo povećanje debljine stijenke odljevka (varijanta napajanja 2) [73]

Posebno je važno da je područje koje napaja zatvoreno atmosfersko pojilo samostalno (vidi sliku 8.12), tj. odvojeno od ostalih područja odljevka, što se može postići primjenom hladila. U suprotnom slučaju zatvoreno atmosfersko pojilo napajat će i susjedna područja odljevka za što nije dimenzionirano. To naravno nije povoljno i rezultira nastankom grešaka zbog volumnog stezanja slitine.

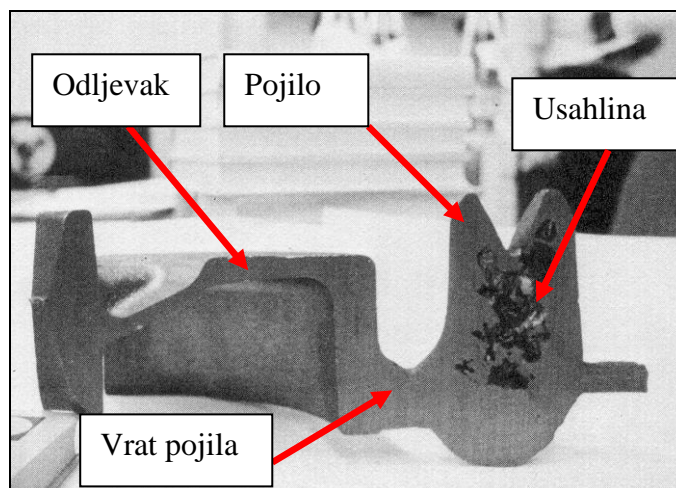
Obzirom na uljevni sustav razlikujemo **hladno i toplo pojilo**. Kod toplog pojila talina na putu prema kalupnoj šupljini najprije prolazi kroz pojilo tako da toplo pojilo ostaje popunjeno najtoplijom talinom (slika 8.30a), što povoljno utječe na napajanje. U hladno pojilo talina dolazi tek kada je popunila kalupnu šupljinu, zbog čega se pojilo ispuni hladnijom talinom nego odljevak (slika 8.30b).



Slika 8.30. Toplo (a) i hladno (b) pojilo [71]

Kad se izračuna potrebni modul pojila, tip pojila odabere se na osnovi iskustva obzirom na geometriju odljevka i geometriju mjesta na koje se pojilo postavlja. Na prirubicama će se, npr. upotrijebiti ovalna pojila umjesto cilindričnih. Visina pojila, odnosno omjer visine i promjera pojila, bira se u pravilu obzirom na očekivani nivo taline u kalupu.

Bočno postavljena pojila spojena su sa odljevkom pomoću **vrata pojila** (slika 8.31) koji je obično kružnog ili pravokutnog poprečnog presjeka. Kod primjene vršnih pojila, tj. pojila koja su postavljena odozgo na odljevak ne zahtijeva se primjena vrata pojila.



Slika 8.31. Presjek odljevka, pojila i vrata pojila [65]

Za vrat pojila također vrijede uvjeti usmjerenog skrućivanja, što znači da **modul vrata pojila mora biti nešto veći od modula odljevka** ili dijela odljevka što ga pojilo napaja, **a nešto manji od modula pojila**. U praksi obično se primjenjuje slijedeći omjer između modula odljevka (ili dijela odljevka što ga pojilo napaja), vrata pojila i pojila:

$$M_o : M_{vp} : M_p = 1 : 1,1 : 1,2 \quad (8.14)$$

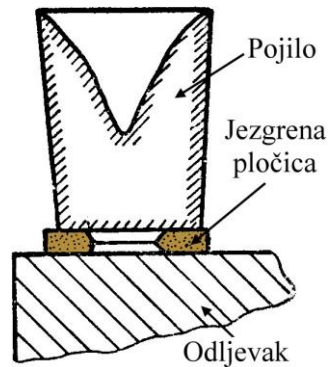
gdje je: M_o – modul odljevka, M_{vp} – modula vrata pojila, a M_p – modul pojila.

Izraz (8.14) za određivanje modula vrata pojila vrijedi za veliki broj ljevarskih slitina (npr. čelične ljevove, aluminijske slitine, bakrene slitine itd.). Međutim, treba napomenuti da željezni ljevovi s grafitom i u ovom slučaju (kao i kod određivanja modula pojila) predstavljaju izuzetak. Zbog izlučivanja grafita dolazi do porasta volumena tijekom jednog perioda skrućivanja, pa vrat pojila ne mora biti propustan za transport taline iz pojila u odljevak tijekom cijelog perioda skrućivanja. Modul vrata pojila u tom slučaju može iznositi:

$$M_{vp} = (0,67-1,1)M_o \quad (8.15)$$

što i u ovom slučaju (kao i kod određivanja modula pojila) ovisi o nizu faktora.

Na spoju pojila i odljevka te na vratu pojila mogu se postaviti jezgri pješćani ovratnici, odnosno tzv. odlomne jezgre (slika 8.32) koje mehanički slabe spoj pojila i odljevka čime se olakšava uklanjanje pojila sa odljevka.



Slika 8.32. Pješćana odlomna jezgra [73]

Ako je masa odlomne jezgre mala ona brzo dostiže temperaturu taline, zbog čega nema značajniji utjecaj na skrućivanje pojila.

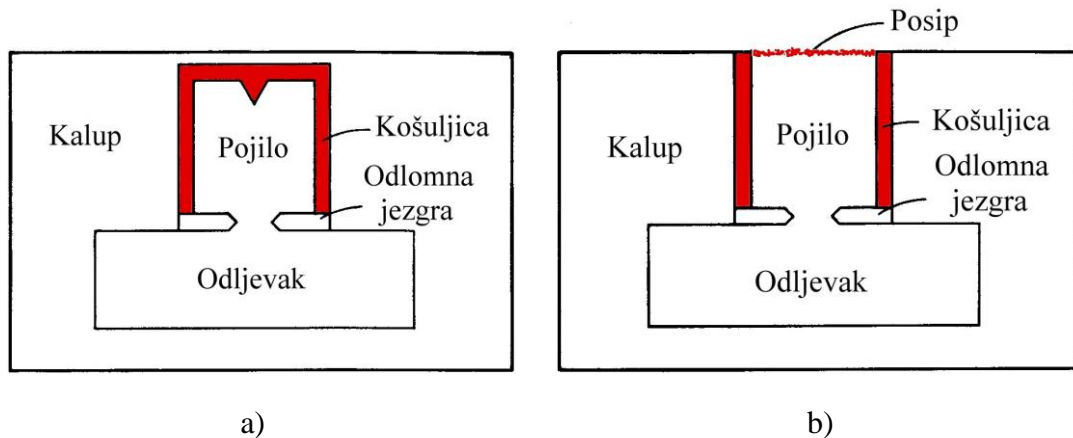
8.6 Povećanje efikasnosti pojila egzotermnim i izolirajućim sredstvima

Odljevak će biti kompaktan tj. bez grešaka zbog volumnog stezanja slitine ako su svi njegovi masivni dijelovi napojeni, tj. ako je ostvareno usmjereno skrućivanje. **Pojila moraju skrutnuti posljednja.** To se može postići na slijedeći način:

- modul otvorenog pojila mora biti 1,2 puta veći od modula odljevka ili dijela odljevka što ga pojilo napaja. Ako se primjenjuju zatvorena pojila, često se radi povećanja sigurnosti dodatno povećava modul pojila, odnosno modul zatvorenog pojila je 1,3 puta veći od modula odljevka ili dijela odljevka što ga pojilo napaja,
- volumen pojila izračunat pomoću modula mora se prilagoditi uvjetu volumnog stezanja dotičnog lijeva prema izrazu (8.5) tako da volumen pojila bude veći ili što je najbolje jednak onome iz izraza (8.5), ali ni u kom slučaju manji,
- moduli pojedinih dijelova odljevka moraju se povećavati u smjeru skrućivanja, tj. prema pojilu da bi se ostvarilo usmjereno skrućivanje,
- ako moduli pojedinih dijelova odljevka u određenom smjeru ne ispunjavaju uvjet usmjerenog skrućivanja, ti se dijelovi odljevka moraju intenzivnije hladiti hladilima tijekom skrućivanja ako su prevelikog modula ili se sustav napajanja na svakom takvom mjestu mora podijeliti u dva zasebna sustava napajanja ako dotično mjesto ima mali modul. U suprotnom potrebno je rekonstruirati odljevak.

Osim hlađenja pojedinih dijelova odljevka hladilima, u praksi se primjenjuje i dodatno grijanje i izoliranje pojila da bi talina u njima ostala što duže tekuća. Hlađenje pojedinih dijelova odljevka i grijanje pojila temelji se na istom principu, tj. na principu bilance topline između dijela odljevka i hladila koje iz odljevka apsorbira toplinu, odnosno bilance topline između egzotermne obloge pojila i taline u pojilu koja prima toplinu.

Primjenom **egzotermnih i izolacijskih košuljica** oko bočnih stranica i vrha zatvorenog pojila (slika 8.33a) ili dodatkom pokrovnih egzotermnih i izolirajućih sredstava odmah nakon završetka lijevanja na vrh otvorenih pojila (slika 8.33b) smanjuje se brzina prijenosa topline od pojila ka kalupnom materijalu i atmosferi.



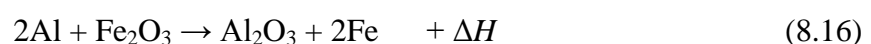
Slika 8.33. a) shematski prikaz primjene egzotermnih (ili izolacijskih) košuljica oko bočnih stranica i vrha zatvorenog pojila, b) primjena egzotermnih (ili izolacijskih) košuljica oko bočnih stranica otvorenog pojila te egzotermnih (ili izolacijskih) pokrova (posipa) na vrhu pojila [72]

Očito je da se primjenom navedenih sredstava odgađa (tj. produlje) skrućivanje i stvaranje krute kore u pojilima. Ako se na vrhu pojila ne stvori kruta kora, atmosferski tlak djeluje na talinu u pojilu i potiskuje ju u odljevak, odnosno poboljšava se djelotvornost pojila. Primjena egzotermnih i izolacijskih sredstava pri napajanju posebno je korisna kod slitina sa širokim intervalom skrućivanja.

Iz tablice 8.3 jasno se može vidjeti utjecaj izolacijskih sredstava na vrijeme skrućivanja pojila. Za tri različita lijeva prikazana su vremena skrućivanja valjkastog pojila (promjer pojila 102 mm, visina pojila 102 mm) s različitim kombinacijama izolacije stranica i vrha pojila.

Egzotermna i izolacijska sredstva povećavaju temperaturni gradijent između pojila i odljevka čime se promovira usmjereno skrućivanja od odljevka prema pojilu, odnosno povećava zona napajanja. Obzirom da smanjuju brzinu odvođenja topline od pojila ka kalupnom materijalu, **egzotermna i izolacijska sredstva povećavaju efektivni modul pojila u odnosu na geometrijski modul tog pojila.**

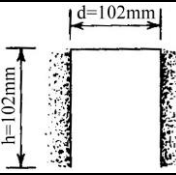
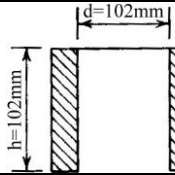
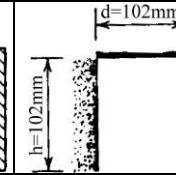
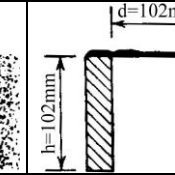
Egzotermna sredstva su mješavine različitih metalnih oksida sa aluminijem koji pri oksidaciji oslobađa toplinu prema slijedećoj (egzotermnoj) reakciji:



Oslobodena toplina zbog prethodno prikazane egzotermne reakcije rezultira povećanjem temperature taline u pojilu. Kod pravilno dimenzioniranih pojila sa egzotermnom oblogom talina u pojilu ravnomjerno se spušta, zbog čega je gornja površina takvih pojila nakon završetka skrućivanja obično ravnija, za razliku od klasičnog negrijanog pojila u kojem

je nakon skrućivanja prisutna šupljina (usahlina) stožastog oblika. Zbog toga je volumno iskorištenje pojila sa egzotermnom oblogom znatno veće od volumnog iskorištenja pojila bez egzotermne obloge. Pri upotrebi egzotermnih pojila obično sa računa sa 30 %-tnim iskorištenjem volumena pojila, dok je to iskorištenje samo 14 % kod klasičnih negrijanih pojila. Debljina egzotermne obloge pojila iznosi najviše 1/5 promjera pojila jer su veće debljine neekonomične.

Tablica 8.3. Utjecaj izolacijskih sredstava na vrijeme skrućivanja pojila [72]

Materijal	Gubici zbog zračenja kroz vrh pojila, %	Vrijeme skrućivanja pojila, min.			
		Bez izolacije	Izolacijska košuljica po opsegu pojila, otvoren vrh pojila	Izolacijsko sredstvo na vrhu pojila, bez izolacijske košuljice po opsegu pojila	Izolacijska košuljica po opsegu pojila, izolacijsko sredstvo na vrhu pojila
					
Čelik	42	5	7,5	13,4	43
Bakar	26	8,2	15,1	14	45
Aluminij	8	12,3	31,1	14,3	45,6

Vrijeme skrućivanja egzotermnih pojila ($t_{\text{egz. poj.}}$) obično je 2 puta duže od vremena skrućivanja klasičnih negrijanih pojila ($t_{\text{klas. poj.}}$):

$$t_{\text{egz. poj.}} = 2 t_{\text{klas. poj.}} \quad (8.17)$$

Prema jednadžbi (8.1) vrijeme skrućivanja pojila proporcionalno je kvadratu njegovog modula, zbog čega se jednadžba (8.17) može napisati u slijedećem obliku:

$$kM_{\text{egz.poj.}}^2 = 2kM_{\text{klas.poj.}}^2 \quad (8.18)$$

odnosno:

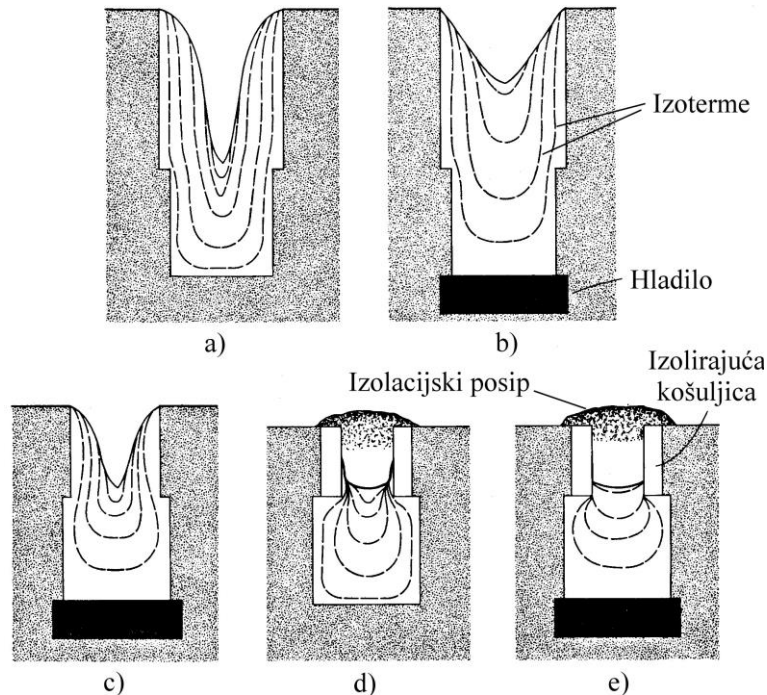
$$M_{\text{egz.poj.}} = \sqrt{2}M_{\text{klas.poj.}} \quad (8.19)$$

Iz jednadžbe 8.19 može se vidjeti da egzotermno pojilo ima ~ 1,4 puta veći modul od klasičnog negrijanog pojila jednakih dimenzija. To omogućuje primjenu razmjerno manjeg egzotermnog pojila uz zadržavanje istog modula i učinka kao kod klasičnog pojila. Potrebno je imati na umu da egzotermni materijali mogu negativno utjecati na čistoću taline.

Egzotermna sredstva primjenjuju se kod pojila male i srednje veličine, ali ne i kod velikih pojila koja imaju dugo vrijeme skrućivanja. Budući da je vrijeme izgaranja egzotermnih obloga ograničeno, tj. vrijeme zagrijavanja taline u velikom pojilu kraće je od vremena potrebnog za napajanje odljevka, tako zagrijavana pojila prerano gube svoju funkciju. U takvim se slučajevima preporučuje upotreba izolacijskih obloga (tj. košuljica)

pomoću kojih se kod pojila s promjerom većim od ~ 300 mm (modul veći od 6 cm) postižu zadovoljavajući rezultati. Ako se primjenjuje izolacijska obloga, prema jednadžbi 8.19 može računati s faktorom smanjenja modula pojila za ~ 1,4 puta (jednako kao i kod egzotermnih obloga).

Adekvatnom primjenom izolacijskih, odnosno egzotermnih sredstava i hladila mogu se proizvesti odljevci bez grešaka zbog volumnog stezanja slitine uz primjenu značajno manjih pojila (slika 8.34).



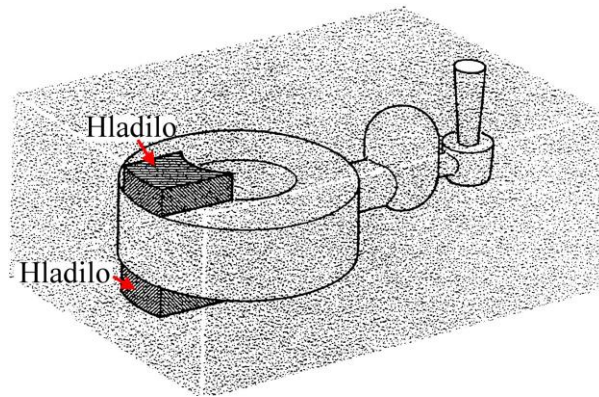
Slika 8.34. Metode za smanjenje veličine pojila: a) otvoreno pojilo, b) otvoreno pojilo i primjena hladila, c) otvoreno pojilo manjih dimenzija i primjena hladila, d) primjena izolacijske obloge oko pojila i izolacijskog pokrova na vrhu pojila, e) primjena izolacijske obloge oko pojila, izolacijskog pokrova na vrhu pojila i hladila [72]

8.7 Primjena hladila

Često radi postizanja usmjerenog skrućivanja treba smanjiti modul jednog dijela odljevka s vrijednosti M_0 na manju vrijednost M_r . Zbog toga se na takvim mjestima u kalup ugrađuju hladila koja oduzimaju dio topline od taline u kalupnoj šupljini [13, 73]. Hladila time lokalno mijenjaju morfologiju skrućivanja odljevka, zbog čega se na tom mjestu formira “umjetna“ krajnja zona odljevka. Tako se s velikom sigurnošću može postići usmjereni skrućivanje odljevka u smjeru prema pojilima. Prema tome, osnovni zadatak hladila je da omogući povoljan temperaturni gradijent i na taj način omogući napajanje kritičnog mjesta. Prema načinu djelovanja hladila se dijele na unutarnja i vanjska, a prema položaju u kalupu na gornja, bočna i donja.

Vanjska hladila ugrađuju se u kalup i sa odljevkom samo izmjenjuju toplinu (slika 8.35). Postavljaju se na površinu odljevka na mjestima gdje se zbog gomilanja mase može očekivati pojava usahline. Treba obratiti pažnju da se hladilo postavi na ispravno mjesto i u tu svrhu treba na modelu predvidjeti posebne oznake. Budući da se dio odljevka na kojem se nalazi hladilo naglo skrutne, posebnu pažnju treba obratiti na opasnost od stvaranja vrućih

pukotina. Osim što se zahtjeva prikladan oblik hladila, pažnju treba obratiti i na stanje površine hladila. Površina hladila mora biti potpuno čista. Najbolje je hladilo ispjeskariti i njegovu površinu zaštititi premazom koji ne smije razvijati plinove tijekom zagrijavanja pri ulijevanju taline.



Slika 8.35. Primjer upotrebe vanjskih hladila [71]

Jednadžba toplinske bilance u slučaju primjene vanjskog hladila ima slijedeći oblik:

$$m_{\text{vh}} c_p \Delta T = V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \rho L \quad (8.20)$$

gdje je: m_{vh} – masa vanjskog hladila (kg), c_p – specifični toplinski kapacitet hladila (J/kgK), ΔT – temperaturna razlika između hladnog (0 °C) i zagrijanog hladila (400 °C) (°C), V_0 – volumen dijela odljevka koji se hladi hladilom (cm³), M_0 – stvarni (geometrijski) modul odljevka (cm), M_r – reducirani modul odljevka (cm), L – toplina taljenja lijeva (J/kg), ρ – gustoća lijeva (kg/m³).

Sređivanjem jednadžbe (8.20) dobiva se slijedeći izraz za određivanje mase vanjskog hladila:

$$m_{\text{vh}} = \frac{\rho L}{c_p \Delta T} V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \quad (8.21)$$

Učinak hladila ovisi o njegovoj debljini, veličini površine nalijeganja i položaju u kalupu. Ako hladilo hladi donje površine odljevka (**donja hladila**) smatra se da ne postoji tanki sloj zraka između hladila i odljevka (nastao zbog stezanja slitine) kao kod bočnih ili gornjih hladila. Površina nalijeganja donjeg hladila na odljevak (A_{nh}) računa se po slijedećoj formuli:

$$A_{\text{nh}} = V_0 \frac{M_0 - M_r}{2M_0 M_r} \quad (8.22)$$

Površina nalijeganja **bočnih i gornjih hladila** (hladila s zračnim slojem) uzima se dva puta veća od površine izračunate jednadžbom (8.22).

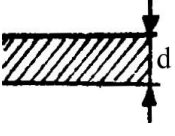

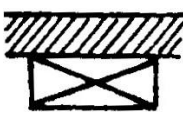
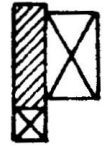

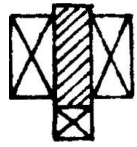
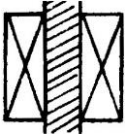
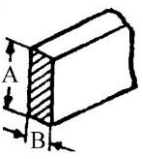
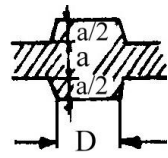

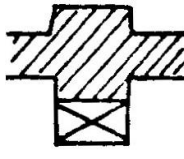
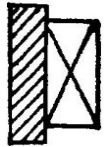


U praksi je utvrđeno da debljina hladila kod lijevanja odljevaka od čeličnog lijeva zadovoljava ako iznosi 2/3 debljine stijenke, odnosno modula toplinskog čvorišta odljevka što ga hladi:

$$d_{hl} = \frac{2}{3}d \quad (8.23)$$

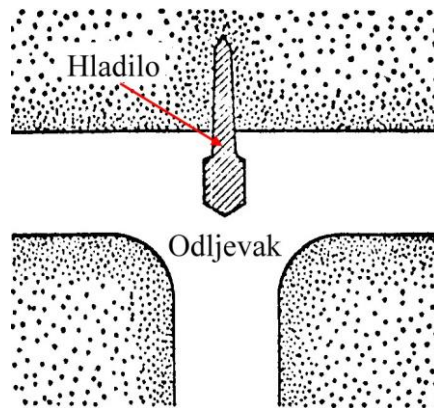
gdje je: d_{hl} debljina hladila, a d – debljina stijenke odljevka na koju je postavljeno hladilo.

U tablici 8.4 prikazano je koliko se primjenom vanjskih hladila može reducirati modul stijenke, odnosno čvorišta odljevka različitih oblika.

Tablica 8.4. Utjecaj vanjskih hladila na modul odljevka (M_0 – stvarni modul odljevka, M_r – reducirani modul odljevka) [73]

	Skica	Modul		Skica	Modul
Odljevci pločastog oblika		Bez hladila $M_0 = \frac{d}{2}$	Odljevci u obliku palica		$M_{rmax.} = \frac{A \cdot B}{2(2A + B)}$
		$M_{rmax.} = \frac{M_0}{2}$ $M_{rmax.} = \frac{d}{4}$			$M_{rmax.} = \frac{A \cdot B}{3A + 4B}$
		$M_{rmax.} = \frac{2}{3}M_0$ $M_{rmax.} = \frac{d}{3}$			$M_{rmax.} = \frac{A \cdot B}{4(A + B)}$
		$M_{rmax.} = \frac{1}{3}M_0$ $M_{rmax.} = \frac{d}{6}$			
Odljevci u obliku palica		Bez hladila $M_0 = \frac{A \cdot B}{2(A + B)}$	Toplinska čvorišta		Bez hladila $M_0 = \frac{D(a + d)}{2(D + 2a)}$
		$M_{rmax.} = \frac{A \cdot B}{2(A + 2B)}$			$M_{rmax.} = \frac{D(a + d)}{4(D + a)}$ $a \leq \frac{0,45 \cdot D \cdot d}{1,05 \cdot D - 2 \cdot d}$
		$M_{rmax.} = \frac{A \cdot B}{3A + 2B}$			$M_{rmax.} = \frac{D(a + d)}{3 \cdot D + 4 \cdot a}$ $a \leq \frac{0,45 \cdot D \cdot d}{1,05 \cdot D - 2 \cdot d}$
					$M_{rmax.} = \frac{D(a + d)}{4(D + a)}$ $a \leq \frac{0,95 \cdot D \cdot d}{1,05 \cdot D - 2 \cdot d}$

Unutarnja hladila stavljaju se u kalupnu šupljinu i ostaju utaljena u odljevku (slika 8.36). Budući da se unutarnje hladilo tali i postaje sastavni dio odljevka, vezanje hladila sa odljevkom mora biti potpuno. Zbog toga se unutarnja hladila izrađuju od istog materijala kao i odljevak te u svezi s tim imaju i pogodan oblik. Na unutarnje hladilo lako se može vezati troska, plinovi ili dijelovi pijeska, pa zbog toga posebnu pažnju treba posvetiti čistoći površine hladila. Prisutni korozijski produkti, različiti oksidi i vlaga na unutarnjim hladilima mogu uzrokovati poroznost u odljevku.



Slika 8.36. Primjer upotrebe unutarnjeg hladila [71]

Dimenzije unutarnjeg hladila moraju biti takve da toplina taline u toplinskom čvorištu izazove potpuno taljenje hladila. Ukoliko se sa unutarnjim hladilom ne postupa pravilno ili ako je nepravilno dimenzionirano, može biti uzrokom značajnih grešaka u odljevku. Iz navedenih razloga ne preporučuje se upotreba unutarnjih hladila, osim u iznimnim slučajevima.

Pri unutarnjem hlađenju odljevka uvjeti su nešto drugačiji nego pri vanjskom hlađenju, jer volumen kalupa u tom slučaju ostaje nepromijenjen. Da bi se jednadžba toplinske bilance mogla riješiti, pretpostavit će se da je volumen hladila zanemarivo malen u usporedbi s volumenom odljevka. Za proračun mase, odnosno volumena unutarnjih hladila polazi se od jednadžbe toplinske bilance za unutarnje hlađenje:

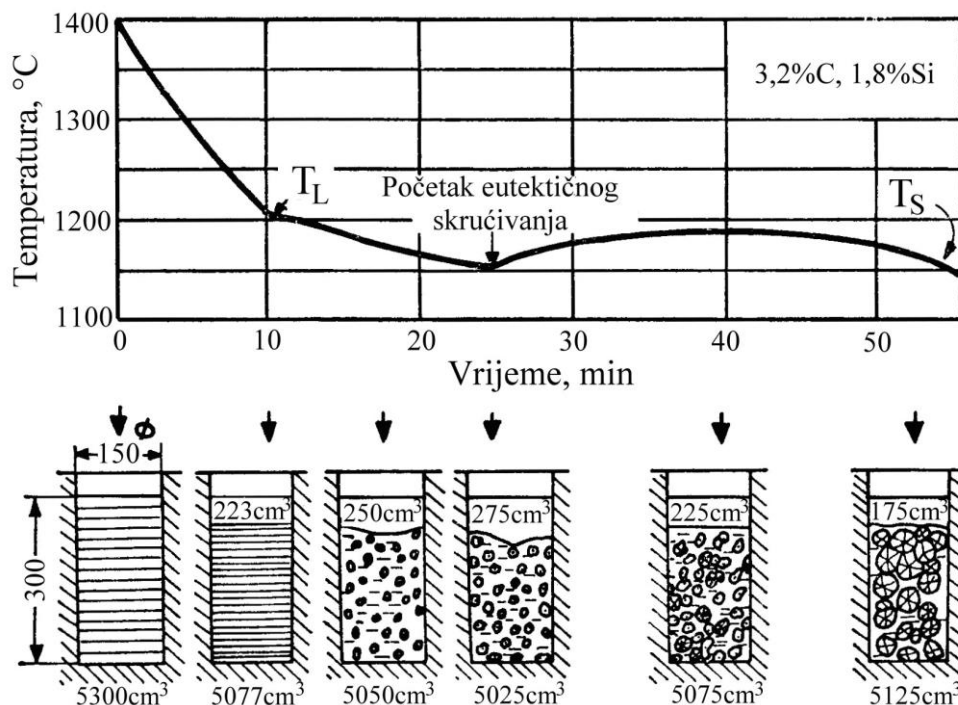
$$m_{uh} \left(c_p \cdot T_s + \frac{I}{2} L \right) = V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \rho \left[\frac{I}{3} L + c_p (T_L - T_s) \right] \quad (8.24)$$

gdje je: m_{uh} - masa unutarnjih hladila (kg), c_p –specifični toplinski kapacitet lijeva (J/kgK), T_L – temperatura lijevanja (°C), T_s – temperatura taljenja (°C), V_0 - volumen dijela odljevka koji se hladi hladilom (cm³), M_0 - stvarni (geometrijski) modul odljevka (cm), M_r - reducirani modul odljevka (cm), L - toplina taljenja lijeva (J/kg), ρ - gustoća lijeva (kg/m³).

8.8 Napajanje odljevaka od željeznih ljevova s grafitom

Sivi, nodularni i vermikularni lijev, tj. željezni ljevovi s grafitom tijekom skrućivanja pokazuju određene specifičnosti [13, 73]. Zbog izlučivanja grafita tijekom skrućivanja dolazi do ekspanzije, što znači da se volumno stezanje slitine ne odvija cijelo vrijeme dok postoji talina. Vrijeme u kojem se odvija volumno stezanje samo je dio ukupnog vremena skrućivanja.

Skrućivanje sivog lijeva shematski je prikazano na slici 8.37. Tijekom skrućivanja odvija se eutektična reakcija kojom dolazi do pretvorbe taline u dvije krute faze, tj. u austenit i grafit. Nastali grafit kao kruta faza ima manju gustoću od taline. Zbog toga se tijekom odvijanja eutektične reakcije povećava specifični volumen dotičnog odljevka, i to tim više što je veća količina izlučenog grafita. Povećanje volumena može biti tako veliko da se kompenzira volumno stezanje koje nastaje zbog izlučivanja austenita, pa čak i veće. Sa stajališta napajanja to je gotovo idealan slučaj kojem treba uvijek težiti jer se tako postiže tzv. samonapajanje odljevka, odnosno napajanje bez upotrebe pojila. Zbog toga se u procesu proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova s grafitom provodi **cijepljene taline** odgovarajućim cjepivima (mali dodatak FeSi koji sadrži manje količine Al, Ca, Sr i/ili Ba itd.). Na taj način povećava se broj nukleacijskih mjesta u talini na kojima se mogu izlučiti čestice grafita tijekom skrućivanja, što u konačnici rezultira većom količinom izlučenog grafita tijekom skrućivanja, a time i ekspanzijom.



Slika 8.37. Shematski prikaz skrućivanja sivog lijeva. T_L – likvidus temperatura, T_S – solidus temperatura [73]

Zbog izlučenog grafita tijekom eutektične reakcije dolazi do porasta tlaka taline u kalupu. Osim količine izlučenog grafita, na visinu tlaka utječe i čvrstoća kalupa. U dovoljno čvrstom kalupu tlak taline može biti znatno veći od atmosferskog tlaka. U nedovoljno čvrstom kalupu može doći do pomicanja stijenke kalupne šupljine, što rezultira padom tlaka, gubitkom pozitivnog učinka ekspanzije na napajanje i odstupanjem oblika odljevka od ciljanog.

Utjecaj udjela ugljika, silicija i fosfora na skrućivanje može se promatrati zajedno kao vrijednost ugljičnog ekvivalenta (CE) ili stupanj zasićenja (S_c). Ti faktori koristan su pokazatelj ljevarskih svojstava. Ugljični ekvivalent (ili stupanj zasićenja) određuje se zbog utjecaja elemenata kemijskog sastava na udio ugljika u eutektiku. Svi elementi utječu na udio ugljika u eutektiku i shodno tome bi trebali biti uključeni u formulu za izračunavanje ugljičnog ekvivalenta. Međutim, utjecaj silicija i fosfora je znatno izraženiji od ostalih elemenata, zbog čega su udjeli samo tih elemenata uključeni u formulu za izračunavanje ugljičnog ekvivalenta.

Najčešće primjenjivana formula za izračunavanje ugljičnog ekvivalenta dana je slijedećom jednačinom:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (8.25)$$

Kad je ugljični ekvivalent (CE) jednak 4,3, radi se o eutektičnom sastavu slitine. Ako je $CE < 4,3$ radi se o podeutektičnom sastavu. U tom slučaju prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja je austenit. Ukoliko je vrijednost $CE > 4,3$ radi se o nadeutektičnom sastavu. Prva faza koja se izlučuje tijekom skrućivanja nadeutektičnih željeznih ljevova je primarni grafit.

Stupanj zasićenja određuje se prema slijedećoj formuli:

$$S_c = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (8.26)$$

Kada je $S_c = 1$, željezni lijev je eutektičnog sastava. Ukoliko je $S_c < 1$ radi se o podeutektičnom sastavu, a u slučaju $S_c > 1$ o nadeutektičnom sastavu.

Osim kemijskog sastava i vrijednosti ugljičnog ekvivalenta, odnosno stupnja zasićenja, količina grafita izlučenog eutektičnom reakcijom ovisi i o brzini hlađenja (a samim tim i o modulu odljevka). U tankim stijenkama odljevka prisutna je visoka brzina skrućivanja. Zbog toga može doći do metastabilnog skrućivanja, tj. izlučivanja cementita (Fe_3C) umjesto grafita, što je nepoželjno. Kod debelostjenih odljevaka skrućivanje se odvija sporije, što potpomaže odvijanje stabilnog skrućivanja, odnosno izlučivanje grafita.

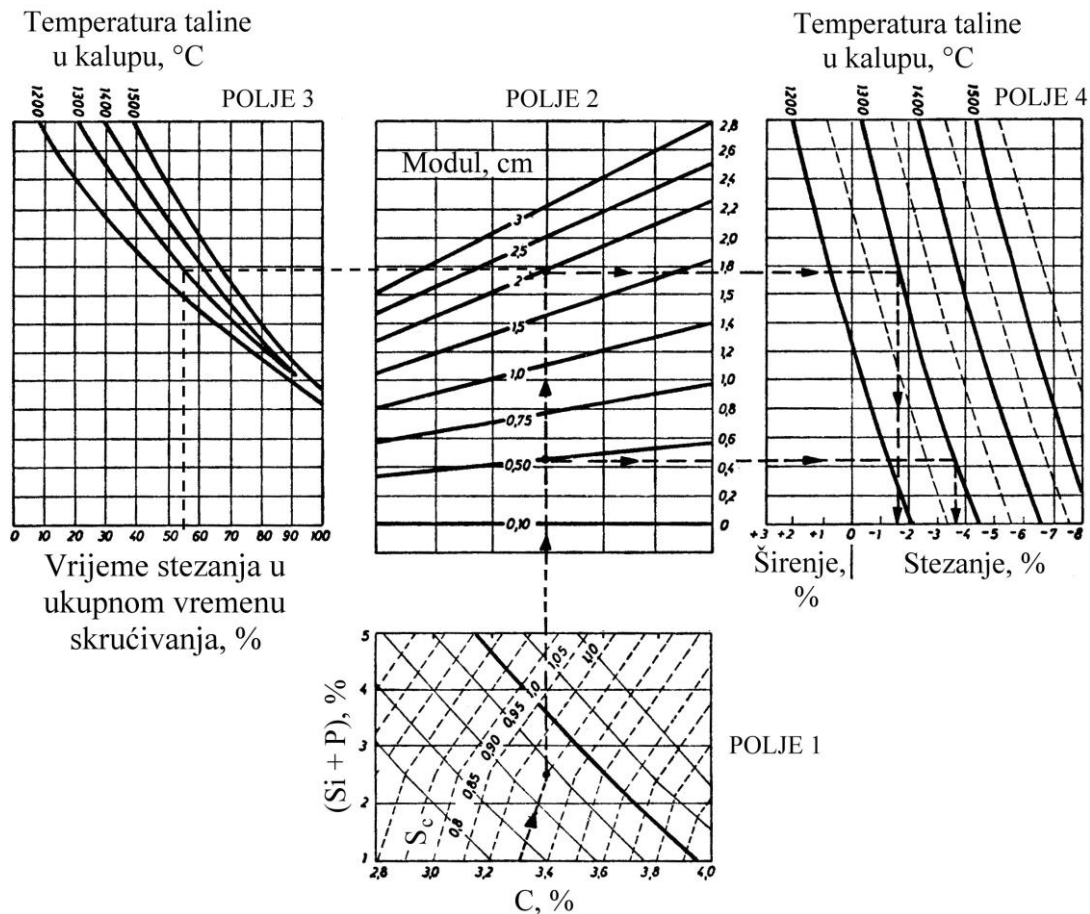
Pomoću dijagrama na slici 8.38 može se odrediti volumno stezanje lijeva (s) i vrijeme volumnog stezanja (t_s) u ukupnom vremenu skrućivanja izraženo u %. Kreće se od donjeg dijagrama i udjela ugljika te sumarnog udjela silicija i fosfora u slitini. Ako je npr. $C = 3,3 \%$, $(Si + P) = 2,4 \%$, modul odljevka 2 cm, i temperatura lijevanja $1300 \text{ }^\circ\text{C}$, iz dijagrama proizlazi da se tijekom 55 % vremena skrućivanja odvija volumno stezanje. Volumno stezanje lijeva iznosi 1,6 %.

Pomoću vremena u kojem se odvija volumno stezanje tijekom skrućivanja (t_s) određuje se modul pojila:

$$M_p = M_o \cdot 1,2 \cdot \sqrt{\frac{t_s}{100}} \quad (8.27)$$

Dimenzije, a time i volumen pojila mogu se odrediti iz njegovog modula i oblika. Međutim, može se dogoditi da takvo pojilo ne može zadovoljiti stvarne potrebe za napajanjem odljevka ili dijela odljevka koje to pojilo napaja, što treba provjeriti. Ako je količina taline iz pojila koja može napajati odljevak nedovoljna, moraju se povećati dimenzije pojila. Preferira se zadržavanje promjera pojila koji proizlazi iz njegovog modula i povećanje njegove visine.

Ako je to pogodnije, može se povećati promjer pojila. Međutim, promjer pojila ne smije se smanjiti ispod veličine koja proizlazi iz njegovog modula.



Slika 8.38. Dijagram za određivanje volumnog stezanja lijeva i vremena stezanja u ukupnom vremenu skrućivanja na osnovi kemijskog sastava, modula odljevka i temperature taline u kalupu [73]

Pomoću vremena u kojem se odvija volumno stezanje tijekom skrućivanja (t_s) određuje se modul vrata bočnih pojila:

$$M_{vp} = M_0 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{\frac{t_s}{100}} \quad (8.28)$$

Dimenzije vrata pojila mogu se odrediti iz njegovog modula i oblika.

Danas se često kao pomoć pri konstruiranju i dimenzioniranju sustava napajanja za odljevke od željeznih i neželjeznih ljevova primjenjuju specijalizirani programski paketi pomoću kojih se simulira tijek skrućivanja te procjenjuju mjesta nastanka grešaka. Na taj način moguće je procijeniti efikasnost sustava napajanja te provesti korekcije u cilju dobivanja ispravnih odljevaka. Osim toga, moguće je provesti optimizaciju sustava napajanja i time povećati izvadak. Prema tome, takvom virtualnom proizvodnjom odljevaka moguće je smanjiti udio neispravnih odljevaka i povećati iskorištenje taline.

9. ANALIZA I RAZRADA NACRTA ODLJEVKA

Prije izrade kalupa za lijevanje odljevaka treba analizirati i razraditi nacrt odljevka [15, 16, 62]. Najprije treba razmotriti zahtjeve naručioca koje odljevak mora zadovoljiti (mehanička svojstva, točnost dimenzija, kvaliteta površine itd.), a nakon toga treba sistematski analizirati konstrukciju odljevka i utvrditi da li je pogodna s gledišta tehnologije lijevanja. Kad se odredi adekvatna konstrukcija odljevka, na nacrtu odljevka treba definirati odgovarajuće elemente neophodne za izradu modela odljevka, u slučaju da se radi o jednokratnim kalupima, odnosno kalupne šupljine u metalnom kalupu, ako se radi o trajnom kalupu. Na nacrtu odljevka treba definirati i odgovarajuće elemente neophodne za izradu jezgri pomoću kojih se formiraju šupljine u odljevku.

9.1 Analiza konstrukcije odljevka s gledišta tehnologije lijevanja

Lijevanje nudi vrlo veliku slobodu po pitanju oblika, odnosno konstrukcije odljevka. Međutim, funkcionalnost odljevka u velikoj mjeri ovisi o njegovoj konstrukciji. Zbog toga prije lijevanja treba razmotriti namjenu odljevka i faktore koji utječu na njega neovisno o prvotno definiranoj konstrukciji. Debljina stijenki odljevka koje su podvrgnute značajnim naprezanjima mora se povećati, a debljina stjenki koje nisu izložene povišenim naprezanjima može se smanjiti. Na taj se način optimiraju performanse odljevka i smanjuje masa.

Pažljivom analizom konstrukcije odljevka treba utvrditi da li je ona pogodna obzirom na tehnologiju izrade komponenti lijevanjem, odnosno da li omogućuje proizvodnju ispravnih odljevaka bez grešaka. Konstrukcija odljevka tehnološki pogodnog za lijevanje mora ispuniti slijedeće zahtjeve:

- mogućnost pristupa mjestima na odljevku koja se moraju napajati,
- pravilan smjer skrućivanja odljevka (usmjereno skrućivanje),
- izbjegavanje oštih prijelaza na odljevku (prijelaz od debelih na tanke stjenke treba biti postepen, rubovi na odljevku moraju biti zaobljeni),
- mogućnost skrućivanja bez nastanka pukotina koje potječu od napetosti u odljevku, odnosno ometanog stezanja tijekom skrućivanja i oštih rubova na odljevku,
- minimalni broj masivnih (toplinskih) čvorišta,
- izbjeci toplinska čvorišta tipa X, Y i Z zbog značajnog povećanja (gomilanja) mase na tim mjestima (sa stanovišta tehnologije lijevanja pogodnija su toplinska čvorišta tipa T i L).

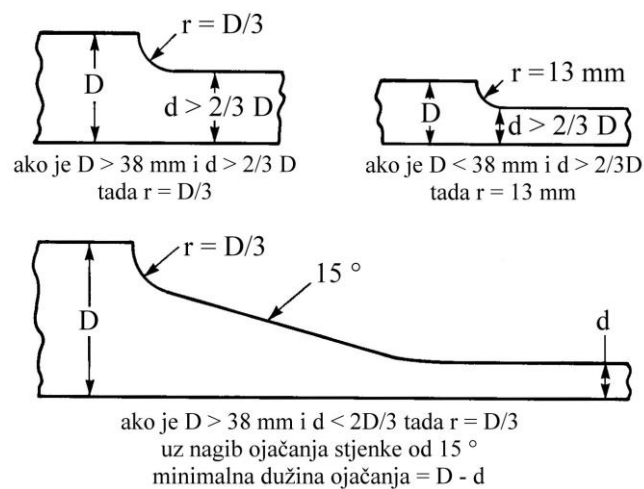
Ukoliko se analizom utvrdi da konstrukcija odljevka nije pogodna sa aspekta tehnologije lijevanja (tj. ne omogućuje proizvodnju ispravnih odljevaka) naručiocu odljevka treba predložiti konstruktivne izmjene, s tim da predložene izmjene i dalje omogućuju ispunjenje zahtjeva naručioca i ne mijenjaju funkciju odljevka.

Sva mjesta na kojima postoji mogućnost nastanka grešaka zbog volumnog stezanja lijeva tijekom skrućivanja moraju biti dostupna za napajanje. To znači da se konstrukcija odljevka mora prilagoditi da bi se izbjeglo postojanje izoliranih toplinskih čvorišta.

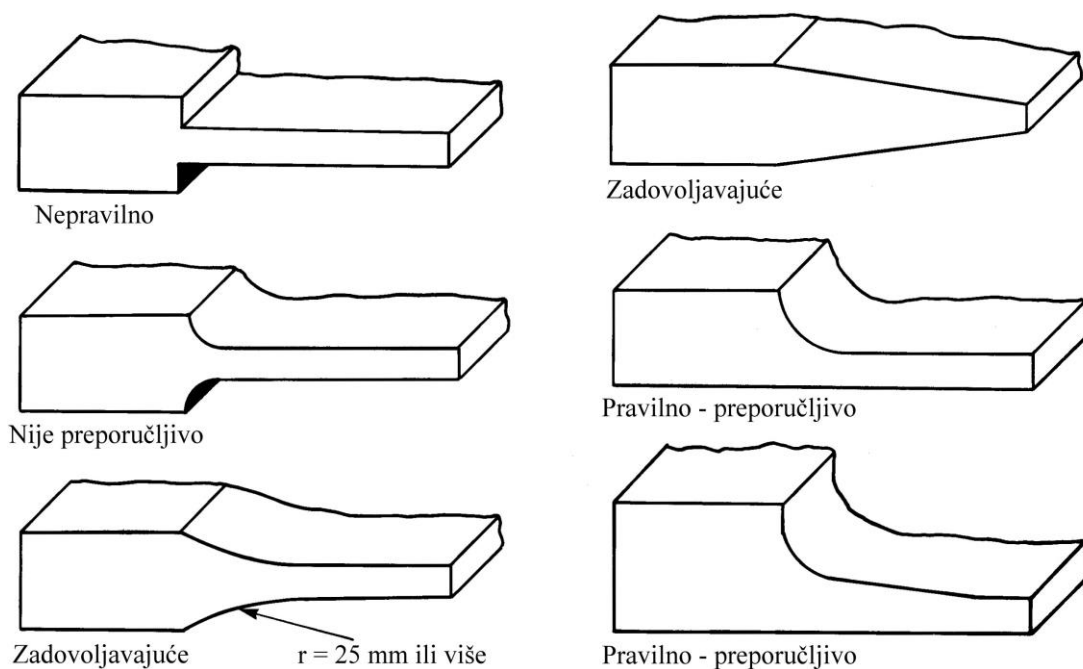
Jedan od osnovnih preduvjeta za efikasnost napajanja je postizanje usmjerenog skrućivanja, što je posebno izraženo kod odljevaka od neželjeznih slitina te bijelih željeznih ljevova i čeličnih ljevova. Ako nije moguće ostvariti usmjereno skrućivanje, odnosno ako je

postizanje usmjerenog skrućivanja dodatkom odgovarajućih ojačanja na stjenke odljevka (tj. ljevarskih podebljanja) ili rekonstrukcijom sustava napajanja ekonomski neprihvatljivo, treba promijeniti konstrukciju odljevka.

Nagle (oštre) promjene debljine stijenke rezultiraju naprezanjima zbog različitih brzina hlađenja i stezanja. Zbog toga na tim mjestima može doći do nastanka pukotina. Budući da sve stijenke odljevka u većini slučajeva nemaju istu debljinu, treba izbjeći oštre promjene debljine stijenke odljevka. Osim toga, pri prijelazu s jedne na drugu debljinu stijenke treba izbjeći oštre rubove i vrlo male radijuse jer povećavaju naprezanje i mogu uzrokovati nastanak pukotina. Preporučljivo je da se prijelaz s tanje na deblju stijenku izvodi postepenim ojačanjem stijenke (tj. ljevarskim podebljanjem) pod određenim kutom ili određenim radijusom na spoju između tanje i deblje stijenke (slika 9.1). Pri promjeni debljine stijenke odljevka najbolja izvedba je ona kod koje se promjena u potpunosti odvija samo s jedne strane tanje stijenke. Na slici 9.2 prikazano je nekoliko nepravilno i pravilno izvedenih prijelaza između stijenki različitih debljina.



Slika 9.1. Pravilna promjena debljine stijenke čeličnog odljevka [16]

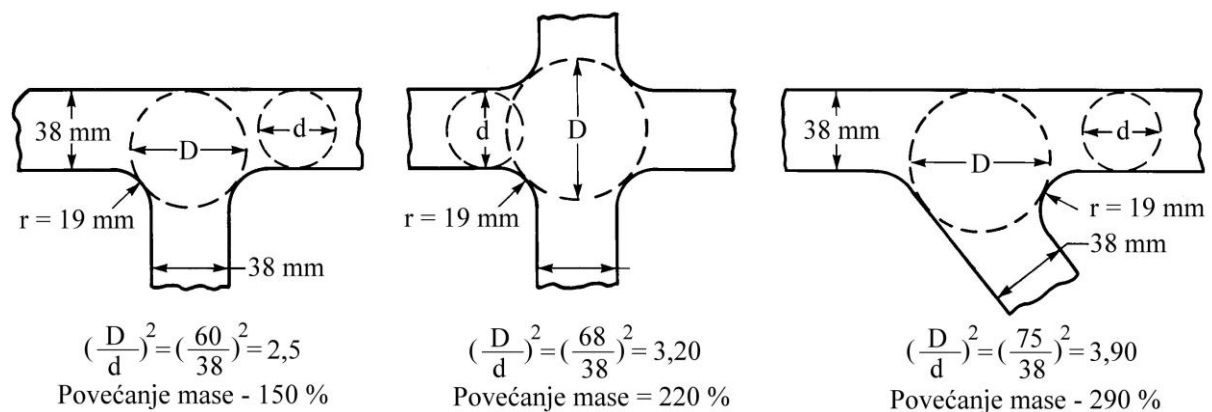


Slika 9.2. Nepravilni i pravilni prijelazi između stijenki različitih debljina [16]

Stezanja odljevka tijekom skrućivanja ne ovisi samo o vrsti lijeva već i o obliku odljevka, debljini stijenke te čvrstoći i krutosti kalupa. Zbog različitih debljina stijenke i nagomilavanja materijala na određenim mjestima, nije osiguran ravnomjeran tijek skrućivanja odljevka. Otuda proizlaze naprezanja i deformacije, a ponekad i pukotine na odljevku. Pravilna konstrukcija odljevka s gledišta tehnologije lijevanja mora težiti ravnomjernom skrućivanju odljevka. Stezanje odljevka mogu ometati vrlo tvrdo sabijeni kalupi i kalupi s vrlo čvrstim jezgrama.

Pravilnom konstrukcijom odljevka treba minimalizirati broj masivnih (tj. toplinskih) čvorišta. Toplinska čvorišta su mjesta koja zadnja skrućuju u odljevku i moraju se adekvatno napajati. U protivnom u tim područjima odljevka nastaju greške zbog nekompenziranog volumnog stezanja lijeva tijekom skrućivanja. Manji broj toplinskih čvorišta omogućuje primjenu jednostavnijeg sustava napajanja, odnosno manjeg broja pojila i na taj način bolje iskorištenje taline (veći izvadak).

Masivni segmenti odljevka koji nastaju zbog promjena debljine stijenke odljevka te na spojevima stijenki jednakih ili različitih debljina mogu se analizirati metodom upisanih kružnica. Pretpostavlja se da je povećanje mase na spoju stijenki proporcionalno kvadratu omjera radijusa kružnice upisane u spoj stijenki i radijusa kružnice upisane u stijenku odljevka (slika 9.3).

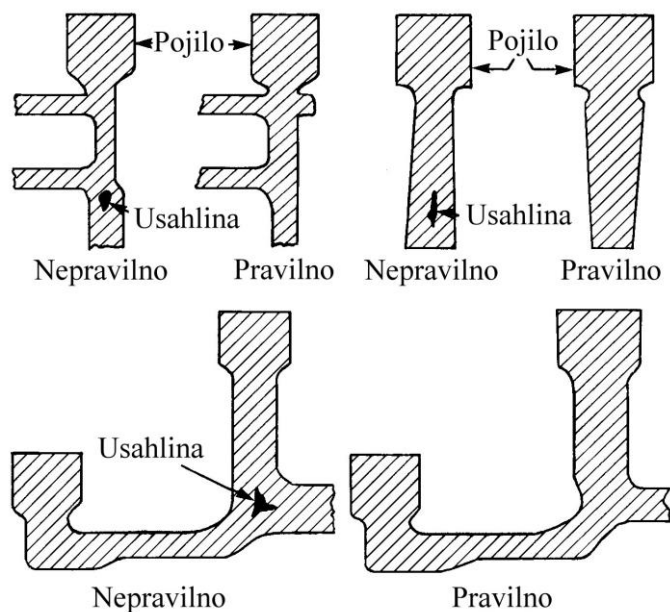


Slika 9.3. Primjena metode upisanih kružnica za određivanje povećanja mase na spojevima stijenki [16]

Sa slike 9.3 može se vidjeti da su toplinska čvorišta tipa X i Y znatno nepovoljnija od toplinskog čvorišta tipa T zbog znatno većeg nagomilavanja mase, a samim tim i znatno dužeg vremena skrućivanja. Metoda upisanih kružnica nije sasvim točna, ali omogućuje aproksimaciju koja je više no dovoljna i koja može biti od velike pomoći konstruktorima.

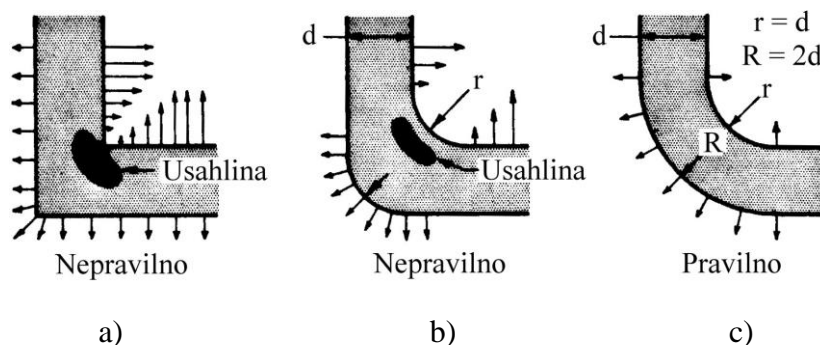
U nastavku je prikazano nekoliko primjera prilagodbe konstrukcije odljevka s gledišta tehnologije lijevanja.

Na slici 9.4 prikazana su tri odljevka od čeličnog lijeva čija se konstrukcija prije lijevanja mora promijeniti jer ne omogućuje postizanje usmjerenog skrućivanja. Kod prvotnih (tj. nepogodnih) konstrukcija, greške zbog volumnog stezanja materijala tijekom skrućivanja prisutne su u izoliranim toplinskim čvorištima gdje nije moguće napajanje talinom iz pojila. Prilagodbom konstrukcije odljevka ostvareno je usmjereno skrućivanje i izbjegnuto nastajanje grešaka zbog volumnog stezanja tijekom skrućivanja.



Slika 9.4. Promjene konstrukcije čeličnog odljevka u cilju postizanja adekvatnog napajanja [16]

Na slici 9.5 prikazani su nepravilni i pravilan način spoja vertikalno i horizontalno postavljene stijenke iste debljine.

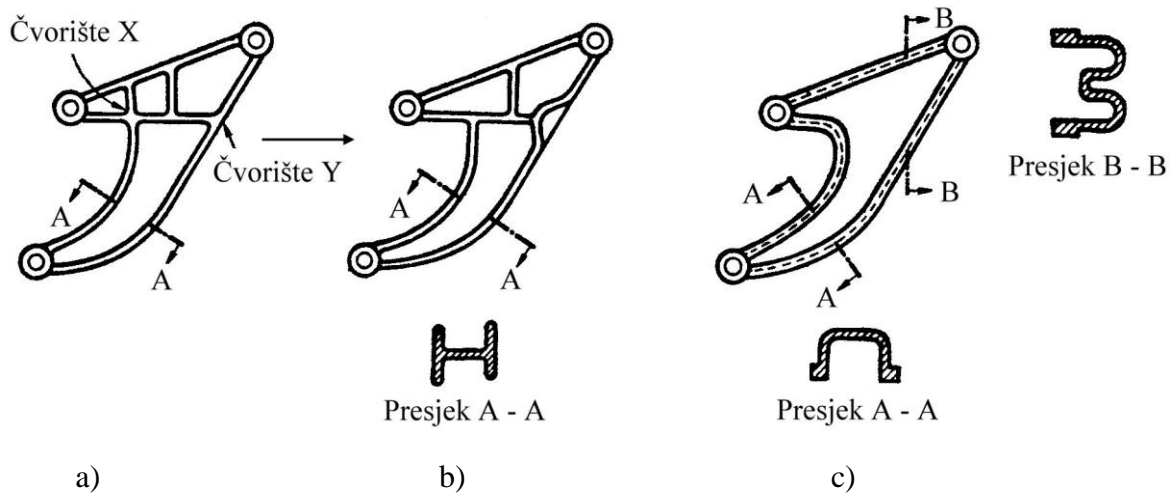


Slika 9.5. Nepravilni i pravilan način spoja vertikalno i horizontalno postavljene stijenke iste debljine (L spoj) [15]

Ako se spoj stijenki izvede pod kutom od 90° dolazi do nastanka usahlina, a često i pukotina kod unutarnjeg kuta (slika 9.5a) jer je na tom mjestu prisutno toplinsko čvorište zbog sporijeg odvođenja topline nego u vanjskom kutu. S povećanjem radijusa na spoju dviju stijenki, odnosno s približavanjem omjera površina upisanih kružnica ka jedinici, smanjuje se veličina usahlina (slike 9.5b i 9.5c).

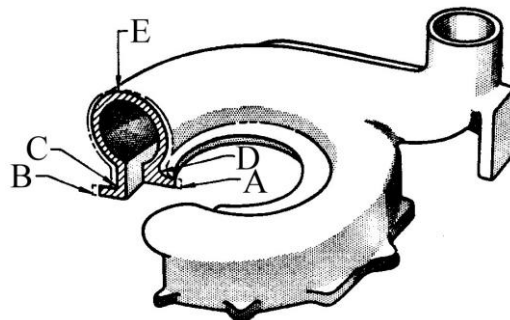
Na slici 9.6 prikazana je promjena konstrukcije čeličnog odljevka u cilju izbjegavanja nepovoljnih toplinskih čvorišta tipa X i Y. U toplinskim čvorištima tipa X i Y dolazi do značajnog povećanja, odnosno gomilanja mase (slika 9.6a). Zbog toga takva mjesta dugo ostaju u tekućem stanju, odnosno zadnja skrućuju u odljevku i moraju se adekvatno napajati. Rekonstrukcijom odljevka prema slici 9.6b umjesto toplinskih čvorišta tipa X i Y formirana su povoljnija toplinska čvorišta tipa T, odnosno ostvareno je manje gomilanje mase. To omogućuje primjenu manjih pojila nego u slučaju toplinskih čvorišta tipa X i Y. Promjenom oblika poprečnog presjeka odljevka (slika 9.6c) dodatno je smanjen broj toplinskih čvorišta, a

time i broj pojila. Manji broj pojila rezultira većim iskorištenjem taline, odnosno većim izvatom.



Slika 9.6. Rekonstrukcija odljevka od čeličnog lijeva da bi se izbjegla nepovoljna toplinska čvorišta tipa X i Y [62]

Na slici 9.7 prikazan je odljevak od čeličnog lijeva čije je lijevanje otežano zbog nemogućnosti punjenja kalupne šupljine, a potječe od neadekvatne konstrukcije odljevka.



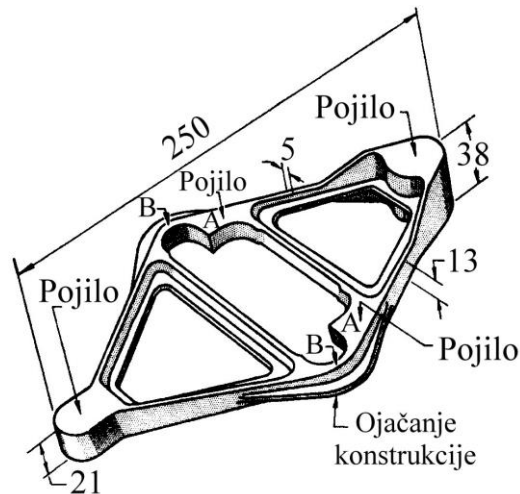
Slika 9.7. Promjena konstrukcije odljevka od čeličnog lijeva da bi se osiguralo potpuno punjenje kalupne šupljine [15]

Ulijevanje odljevka na slici 9.7 može se provesti na tri načina. Prvi (najčešći) način je da se ušća postave po unutrašnjem obodu (tj. prirubnici) odljevka (A). Drugi način je da se ušća postave po vanjskom obodu (tj. prirubnici) odljevka (B). Treći način uključuje postavljanje ušća po vanjskom i unutarnjem obodu odljevka (A i B).

Ako se odljevak ulijeva kroz unutarnji obod, trebat će relativno dug vremenski period da se ispuni tanka stijenka koja povezuje unutarnji i vanjski obod prije punjenja vanjskog oboda. Ako je debljina stijenke između vanjskog i unutarnjeg oboda manja od ~ 4,76 mm vjerojatno će doći do skrućivanja taline prije no što se ispuni vanjski obod. Isti problem je prisutan ako se odljevak lijeva kroz vanjski obod, s tim da postoji dodatna opasnost da dođe do efekta vodoskoka u točki C, što može rezultirati greškama na odljevku tipa hladnog zavara. Ukoliko se odljevak ulijeva istovremeno kroz unutarnji (A) i vanjski (B) obod zarobljeni zrak i plinovi u tankoj stijenci koja spaja vanjski i unutarnji obod mogu rezultirati nastankom plinske poroznosti. Pored toga, ako je udaljenost od točke C do točke D veća od ~ 150 mm vrlo je teško izbjeći nastanak grešaka u tankoj stijenci.

Isprekidanom linijom na slici 9.7 naznačeno je kako se može poboljšati livljivost, odnosno punjenje kalupa. Treba povećati debljinu tanke stijenke koja spaja vanjski i unutarnji obod odljevka te dodatno ojačati stjenku (tj. dodati ljevarsko podebljanje) od sredine (točka E) prema vanjskim obodima.

Na slici 9.8 dat je još jedan primjer pravilno konstruiranog odljevka od čeličnog lijeva. Debljina stijenki odljevka iznosi 5 mm. Za uspješno napajanje odljevka treba postaviti 4 pojila prema slici. Uljevni sustav može se tako postaviti da se punjenje kalupne šupljine provodi od centra odljevka ili od krajeva. Toplinska čvorišta su T tipa i mogu se adekvatno napajati jer nisu duža od 100 mm, a nisu ni udaljena više od 50 mm od najbližeg pojila.



Slika 9.8. Pravilno konstruiran odljevak od čeličnog lijeva [15]

Odljevak odliven prema prvotnoj konstrukciji nije imao adekvatna svojstva u područjima koja su označena slovom B. Taj nedostatak eliminiran je dodatkom vanjskih ojačanja, odnosno tehnoloških rebara u tom području. Rekonstruirana konstrukcija ima potrebnu krutost i neće se deformirati tijekom proizvodnje i primjene.

9.2 Razrada nacрта odljevka

Razrada nacрта odljevka koji se proizvodi lijevanjem taline u jednokratni kalup predstavlja izradu nacрта odljevka na kojem su ucrtani elementi neophodni za tehnološki proces izrade modela i jezgri. Treba definirati slijedeće elemente:

- položaj odljevka (odljevaka) u kalupu pri izradi kalupa i lijevanju,
- diobenu ravninu kalupa i modela,
- dodatak radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka,
- dodatak radi strojne obrade odljevka,
- dodatak radi lakšeg uklanjanja modela iz kalupa (ljevarsko skošenje),
- broj jezgri i veličinu jezgrenih oslonaca,
- sustav ulijevanja i napajanja i njihov položaj u kalupu,
- sustav odzračivanja kalupa.

9.2.1 Određivanje položaja odljevka u kalupu pri izradi kalupa i lijevanju

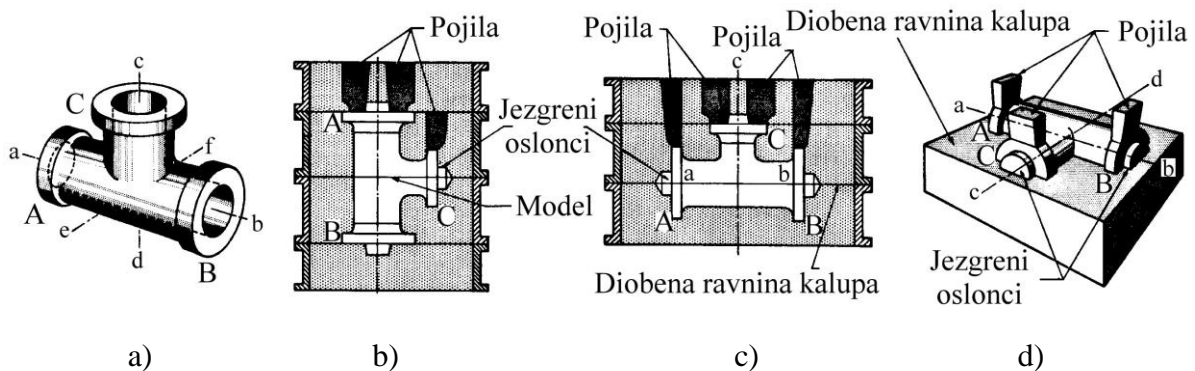
Kod određivanja položaja odljevka (odljevaka) u kalupu treba uzeti u obzir sljedeće:

- zahtjeve naručioca odljevka,
- stupanj kompliciranosti odljevka,
- što bolje iskorištenje prostora u kalupnicima i kapaciteta uređaja za izradu kalupa,
- uvjet da se najveća dimenzija odljevka stavlja po mogućnosti u ravninu dijeljenja kalupa,
- uvjet da se odljevci od sivog lijeva u većini slučajeva lijevu kroz najtanju stijenku odljevka, a odljevci od nodularnog i čeličnog lijeva kroz najdeblju stijenku ili kroz pojilo.

U većini je slučajeva položaj odljevka pri sklapanju kalupa isti kao i pri lijevanju. Kod bijelih željeznih ljevova, čeličnih ljevova i neželjeznih ljevova napajanje odljevka odvija se isključivo gravitacijski. Zbog toga je važno da se većina masivnih (tj. debelih) segmenta odljevka smjesti u najviše dijelove kalupa. Obzirom da se ti segmenti odljevka najsporije hlade i posljednji skrućuju, oni mogu djelovati kao pojila za niže postavljene dijelove odljevka. Na deblje segmente postavljaju se pojila i na taj način ostvareno je usmjereno skrućivanje odljevka.

Površine odljevka koje se moraju strojno obrađivati poželjno je da su postavljene okomito u kalupu ili na dnu kalupa. Gornji segmenti odljevka mogu sadržavati uključke jer oni tijekom lijevanja i skrućivanja isplivavaju zbog niže specifične težine u odnosu na tekući metal. Uključki ispod površine odljevka mogu se pojaviti na samoj površini odljevka tijekom strojne obrade. Zbog toga se npr. cilindri koji se nakon lijevanja strojno obrađuju obično lijevu u okomitom položaju.

Odljevak prikazan na slici 9.9a je spojni element T-tipa za cjevovode i ima tri prirubnice (tj. spojna mjesta). Izrađen je od čeličnog lijeva. Postoje tri moguća položaja odljevka u kalupu tijekom izrade kalupa i lijevanja ovisno o tome koja je os odljevka (*ab*, *cd*, *ef*) vertikalna.



Slika 9.9. Mogući položaji odljevka od čeličnog lijeva (spojni element T-tipa za cjevovode (a)) u kalupu tijekom izrade kalupa i lijevanja: b) nepravilan položaj, c) bolji položaj, d) pravilan položaj [15]

Ako je odljevak smješten u kalup tako da mu je os *ab* postavljena vertikalno (slika 9.9b), prirubnica označena slovom B neće se moći adekvatno napojiti, a površina koja se strojno obrađuje na prirubnici A nalazi se na vrhu kalupne šupljine. Osim toga, kod takvog položaja odljevka u kalupu model bi morao biti podijeljen na tri mjesta što je vrlo

kompleksno, a za kalupovanje bi trebao veći broj kalupnika. Zbog toga to nije pravilan položaj odljevka u kalupu.

Ako je odljevak smješten u kalup tako da mu je os *cd* postavljena vertikalno (slika 9.9c), moguće je ostvariti pravilno napajanje sve tri prirubnice. Međutim, površina koja se strojno obrađuje na prirubnici C smještena je na vrhu kalupne šupljine. Model bi u ovom slučaju morao biti podijeljen na dva mjesta što predstavlja kompleksnu konstrukciju. Osim toga, potreban je i veći broj kalupnika. Takav položaj odljevka u kalupu bolji je od prethodnog, ali ne zadovoljava u potpunosti.

Najbolji položaj odljevka u kalupu prikazan je na slici 9.9d. Os *ef* odljevka postavljena je vertikalno. Sve tri prirubnice mogu se adekvatno napojiti i sve tri površine koje se strojno obrađuju postavljene su vertikalno u kalupu. Osim toga, model se sastoji samo od dva dijela. Za kalupovanje je potreban manji broj kalupnika nego u prethodna dva slučaja.

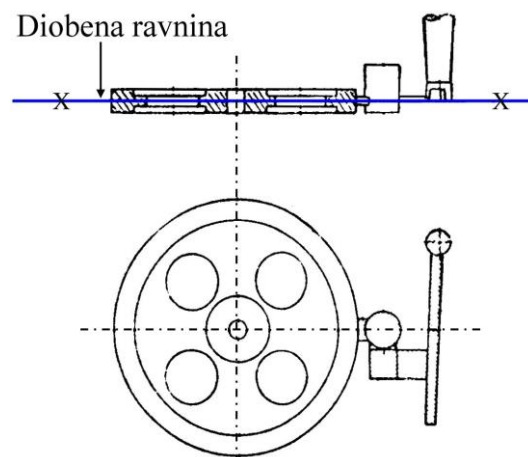
U prethodno prikazanom primjeru najbolji položaj odljevka u kalupu pri lijevanju je istovremeno i najbolji položaj odljevka u kalupu pri izradi kalupa. Međutim, postoje i slučajevi gdje to nije tako. Tada se mora pronaći kompromisno rješenje.

9.2.2 Određivanje diobene ravnine kalupa i modela

Pri određivanju diobene ravnine kalupa i modela treba ispuniti slijedeće uvjete:

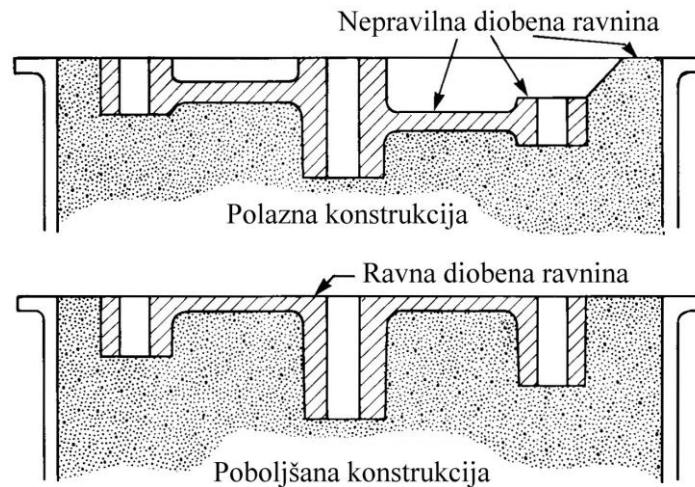
- izraditi što jednostavniji model, ali tako da u potpunosti budu ostvarene sve dimenzije odljevka. Taj uvjet bit će ispunjen ako se izbjegne više ravnina dijeljenja i ako su u istoj polovici kalupa (gornjoj ili donjoj) smješteni dijelovi odljevka koji međusobno moraju biti na točnim udaljenostima,
- položaj odljevka u kalupu treba biti takav da se osigura najbolja kvaliteta određenih (definiranih) površina odljevka,
- ostvariti najnižu cijenu i najkraći rok izrade kalupa i modela.

Diobenu ravninu je najlakše odrediti kod simetričnih odljevaka (npr. remenice, zupčanici itd.) jer se mogu podijeliti na dva jednaka dijela. Diobena ravnina prolazi najvećom dimenzijom odljevka. Pri izradi kalupa gornja polovica modela kalupuje se u gornju polovicu kalupa, a donja polovica modela u donju polovicu kalupa (slika 9.10).



Slika 9.10. Određivanje diobene ravnine i položaja modela u kalupu za slučaj simetričnog odljevka (remenica) [62]

Kod odljevaka kompleksnog oblika moguća je primjena zakrivljene diobene ravnine. Međutim, takav pristup povećava troškove izrade modela i zahtijeva znatno veću pažnju pri izradi kalupa. Zbog toga treba nastojati promijeniti konstrukciju odljevka da bi se ostvarila ravna diobena ravnina (slika 9.11).



Slika 9.11. Promjena konstrukcije odljevka u cilju postizanja ravne diobene ravnine [16]

Treba napomenuti da su često prisutni i slučajevi kad se odljevak zbog svoje konfiguracije ili posebnih zahtjeva na kvalitetu površine mora kalupovati samo u gornju ili donju polovicu kalupa.

9.2.3 Određivanje dodatka radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka

Volumna promjena, odnosno stezanje odljevka koje se dešava nakon završetka skrućivanja, tj. tijekom hlađenja od solidus temperature do sobne temperature utječe na njegove konačne dimenzije. To stezanje često se naziva linearnim, odnosno modelarskim stezanjem i ovisi o vrsti slitine koja se lijeva. Linearno stezanje odljevka mora se definirati i taj podatak upisati na nacrt odljevka radi adekvatnog povećanja dimenzija modela. Linearno stezanje odljevaka od čeličnog lijeva obično iznosi ~ 2 %, a linearno stezanje odljevaka od sivih željeznih ljevova ~ 1 %. Što se tiče neželjeznih ljevova, linearno stezanje uobičajenih aluminijskih ljevova obično se kreće oko 1,3 %. Isti iznos linearnog stezanja prisutan je i kod magnezijjskih ljevova. Dodatci modelu radi kompenzacije linearnog stezanja detaljnije će se razmatrati u 11. poglavlju.

9.2.4 Određivanje dodatka radi strojne obrade odljevka

Površine odljevka koje se moraju strojno obrađivati naznačene su u nacrtu. Zbog toga se na nacrt gotovog (tj. strojno obrađenog) odljevka ucrtavaju dodaci radi strojne obrade uzimajući pri tome u obzir:

- tehničke zahtjeve naručioca odljevka,
- klasu dimenzijske točnosti odljevka,

- postupak izrade kalupa (kalupljenje svježom kalupnom mješavinom zahtijeva veće dodatke za strojnu obradu. Postupci sa istaljivim i isparljivim modelima zahtijevaju manje dodatke radi strojne obrade u usporedbi s trajnim dvodijelnim modelima),
- materijal za izradu kalupa (ako se primjenjuju keramički kalupi ili kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina potreban je manji dodatak radi strojne obrade nego kod odljevaka koji se izrađuju u kalupima od svježe kalupne mješavine),
- vrstu lijeva (npr. kod odljevaka od čeličnih ljevova primjenjuje se veći dodatak radi strojne obrade nego kod odljevaka od željeznih ljevova),
- položaj površina koje se strojno obrađuju u kalupu (specifično lakša onečišćenja, kao npr. troska, oksidi, itd. nagomilavaju se na gornjoj površini odljevka, zbog čega se često kod gornjih površina modela primjenjuje veći dodatak radi strojne obrade),
- veličinu i oblik odljevka (što su veće dimenzije odljevka, to je veći dodatak radi strojne obrade).

Kod nedovoljnog dodatka radi linearnog stezanja može se dogoditi da zbog stezanja materijala i drugih površinskih grešaka ostane premalo materijala za strojnu obradu. Prevelik dodatak na strojnu obradu rezultira povećanjem troškova izrade odljevka.

Kad se u nacrt ucrtavaju dodaci za strojnu obradu odljevka, rubovi odljevka moraju se zaobliti. Radijus zaobljenja obično iznosi $2/3$ dodatka za strojnu obradu. Zaobljenja se ne izvode na rubovima odljevka koji se nalaze u diobenoj ravnini kalupa. Dodaci modelu radi strojne obrade odljevka detaljnije će se razmatrati u 11. poglavlju.

9.2.5 Određivanje dodatka radi lakšeg uklanjanja modela iz kalupa

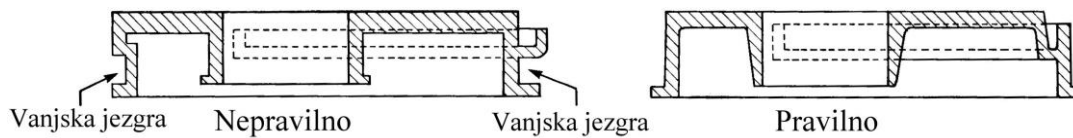
Površine modela koje su okomite na diobenu ravninu kalupa treba ukositi da bi se model mogao lakše izvući iz kalupa i smanjila opasnost od oštećenja kalupa. Pri određivanju dodatka radi lakšeg uklanjanja modela (tj. ljevarskog skošenja) treba uzeti u obzir sljedeće:

- oblik i veličinu odljevka,
- postupak proizvodnje kalupa i
- način izrade kalupa (ručno ili strojno).

Dodatci modelu da bi se lakše mogao ukloniti iz kalupa detaljnije će se razmatrati u 11. poglavlju.

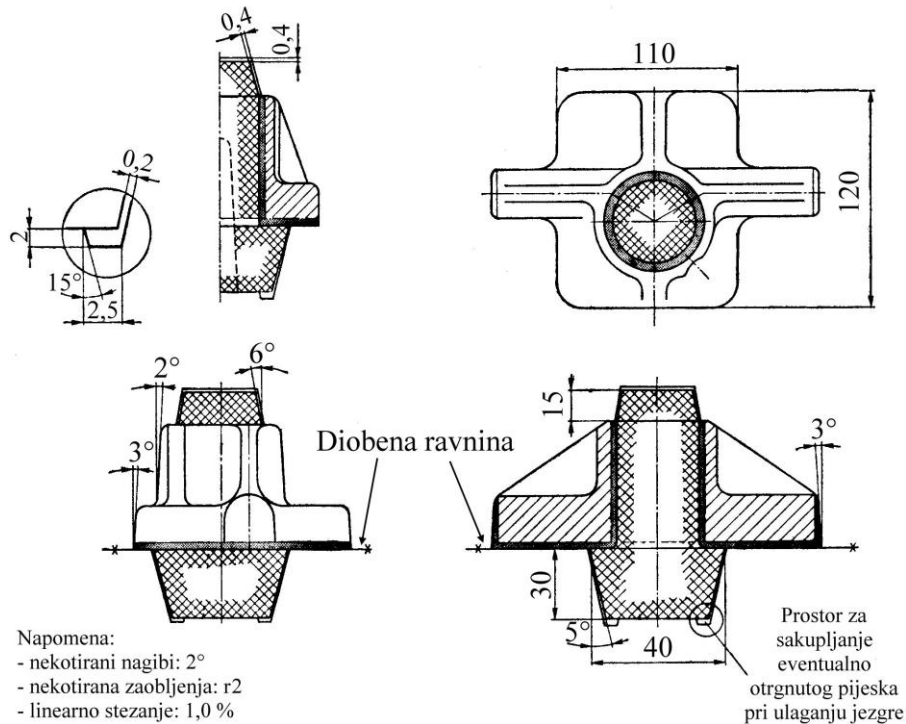
9.2.6 Određivanje broja jezgri i veličine jezgrenih oslonaca

Jezgre se primjenjuju za oblikovanje šupljina u odljevku. Modele treba nastojati tako izraditi da se broj jezgri svede na minimum ili da se, ako je moguće, izbjegne njihova primjena. Odljevak se lijeva bez jezgre, odnosno model se može sigurno zakalupiti ako je promjer otvora u njemu veći od njegove visine. Ako je prema dostavljenom nacrtu odljevka potrebna primjena većeg broja jezgri, u dogovoru s naručiocem može se eventualno provesti promjena konstrukcije odljevka da bi se smanjio broj jezgri, a time i troškovi proizvodnje (slika 9.12).



Slika 9.12. Izmjena konstrukcije odljevka u cilju smanjenja broja jezgri [16]

Veličine i skošenja oslonaca za vertikalno i horizontalno postavljene jezgre u kalupu također treba definirati prije izrade modelne opreme. Na slici 9.13 prikazan je primjer primjene okomito postavljene jezgre te oblik, dimenzije i skošenja jezgrenih oslonaca.

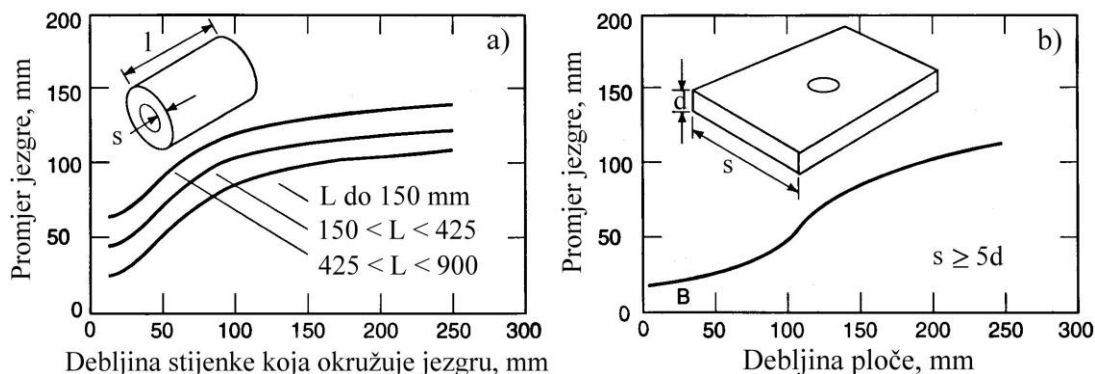


Slika 9.13. Primjer razrade nacrtu odljevka sa okomito postavljenom jezgrom [62]

Minimalni promjer jezgre koja se može uspješno primijeniti kod proizvodnje odljevaka ovisi o debljini segmenta odljevka koji okružuje jezgru i ispunjen je talinom te dužini jezgre. S povećanjem količine taline koja okružuje jezgru i smanjenjem promjera jezgre povećava se oštrina toplinskih uvjeta kojima je jezgra izložena. Ako je jezgra premala nema dovoljnu sposobnost raspršenja i odvođenja topline. To u konačnici može rezultirati raspadom jezgre i značajnim povećanjem troškova čišćenja i obrade odljevka.

Duge jezgre u debelim segmentima odljevka podvrgnute su značajnim silama uzgona. Te sile mogu uzrokovati savijanje, deformaciju i lom jezgre. Ako promjer jezgre to dopušta treba ju ojačati (armirati) odgovarajućim umetcima i time spriječiti deformaciju. Minimalni promjer jezgre kod određene debljine stijenke odljevka je vrlo važan faktor za konstruktore i inženjere u ljevaonicama.

Na slici 9.14 prikazan je preporučeni minimalni promjer jezgre kod cilindričnih i pločastih dijelova odljevaka od čeličnih ljevova ovisno o debljini stijenke, odnosno količini taline koja okružuje jezgru i dužini jezgre. Minimalni promjer jezgri određen na osnovi dijagrama na slici 9.14a može se smanjiti za 25 % ako je jezgra postavljena okomito u kalupu jer izostaje savijanje [62]. Za debelostijene odljevke često se primjenjuje opće pravilo prema kojem promjer jezgre ne smije biti manji od 1/3 debljine stijenke odljevka.



Slika 9.14. a) preporučeni minimalni promjer horizontalno postavljene jezgre koja se samo krajevima oslanja na kalup u cilindričnim segmentima ili segmentima kružnog poprečnog presjeka čeličnih odljevaka. Ako je jezgra postavljena vertikalno minimalni promjer može se smanjiti za 25 %, b) preporučeni minimalni promjer jezgre u pločastim segmentima čeličnog odljevka [16]

9.2.7 Definiranje sustava ulijevanja i napajanja i njihovog položaja u kalupu

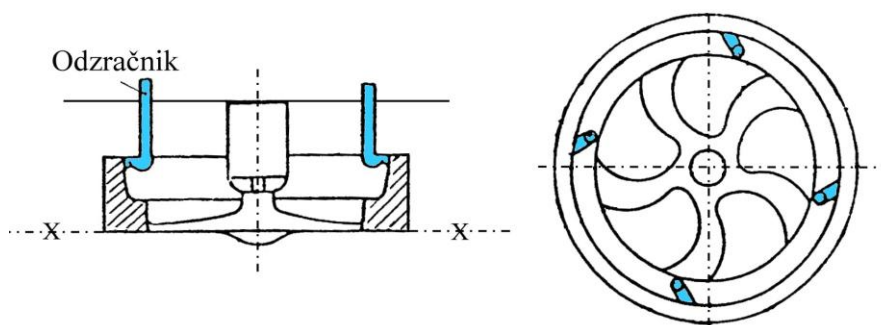
Uljevni sustav i pojila moraju biti tako dimenzionirani i postavljeni da se osigura ravnomjerno punjenje kalupne šupljine i usmjereno skrućivanje. Odljevci od sivog lijeva lijevaju se kroz tanke stijenke, dok se odljevci od nodularnog i čeličnog lijeva (tj. ljevova s većim volumnim stezanjem) lijevaju kroz najdeblje stijenke, odnosno kroz pojila.

Odljevke od čeličnog lijeva poželjno je lijevati kroz niže postavljene segmente u kalupu. Takvim načinom lijevanja mogu se izbjeći greške, kao što su npr. uključci pijeska i troske. Osim toga, takvim pristupom može se izbjeći turbulentno strujanje taline u kalupu.

Određivanje tipa i dimenzioniranje komponenti uljavnog sustava i pojila obrađeno je u prethodnim poglavljima.

9.2.8 Određivanje sustava odzračivanja kalupa

Kanali za odzračivanje omogućuju odvođenje plinova iz kalupne šupljine i ucrtavaju se u razrađeni nacrt sklopljenog kalupa te nacrt rasporeda modela u kalupu. Plinove iz kalupa treba odvoditi najkraćim putem do vanjske atmosfere (slika 9.15). Odzračivanje ljevarskog kalupa još se uvijek u velikoj mjeri određuje na temelju praktičnog iskustva.



Slika 9.15. Primjer sustava odzračivanja kalupa [62]

10. PREGLED POSTUPAKA PROIZVODNJE ODLJEVAKA

Za razliku od obrade odvajanjem čestica ili deformacijom, za oblikovanje metala lijevanjem, odnosno proizvodnju odljevka, potrebna je promjena agregatnog stanja metala iz tekućeg i kruto. Zbog toga je za proizvodnju odljevka potreban odgovarajući kalup. Odljevak se dobiva skrućivanjem i hlađenjem prethodno rastaljenog metala u kalupu, odnosno preciznije rečeno u kalupnoj šupljini određenog oblika. Kalupna šupljina zapravo predstavlja negativ odljevka.

Kalupi se mogu podijeliti u dvije skupine:

- **jednokratni kalupi i**
- **višeokratni (trajni) kalupi.**

Lijevanje se u jednokratne kalupe može obaviti samo jedanput. Izrađuju se od odgovarajućih kalupnih mješavina. Glavni sastojci kalupne mješavine su zrnata osnova ili ljevaonički pijesak, vezivo i dodatci (aditivi) kojima se poboljšavaju određena tehnološka svojstva kaluparskog medija, kao što je istresljivost, propusnost itd. Razlikuju se kalupne mješavine koje svoju čvrstoću postižu sabijanjem, kao što je to slučaj kod kalupnih mješavina vezanih glinom, zatim kalupne mješavine koje očvršćuju, odnosno potrebnu čvrstoću postižu putem kemijske reakcije između sastojaka veziva i kalupne mješavine s fizikalnim načinom vezivanja. Nakon skrućivanja odljevka u kalupu, kalup se mora razrušiti i odljevak se vadi iz kalupa. Pojedine vrste kalupnih mješavina od kojih je bio izrađen kalup mogu se osvježiti i ponovo upotrijebiti za izradu kalupa.

Za razliku od jednokratnih kalupa, trajni kalupi omogućuju višeokratno lijevanje. Nakon skrućivanja odljevka u trajnom kalupu, kalup se otvara i vadi se odljevak. Potom se kalup sklapa i ponovo provodi lijevanje. Trajni kalupi uglavnom se izrađuju od specijalnih vrsta čelika.

U trajnim kalupima kalupna šupljina se izrađuje strojnom obradom odvajanjem čestica. Kod jednokratnih kalupa kalupna šupljina formira se pomoću trajnih ili jednokratnih **modela** odljevka i kalupne mješavine. Izvlačenjem trajnog modela iz kalupne šupljine ili podizanjem kalupa sa modela nastaje kalupna šupljina odgovarajućeg oblika. Jednokratni modeli ostaju u kalupi i tale se ili isparavaju kada dođu u kontakt s tekućim metalom.

Jednokratni i trajni kalupi moraju biti rastavljivi na dva ili više dijelova. To omogućuje da se iz jednokratnih kalupa ukloni trajni model i da se postave jezgre za formiranje otvora u odljevke. Kod trajnih kalupa to omogućuje da se odljevak izvadi iz kalupa. Izuzetak su jednokratni kalupi izrađeni pomoću jednokratnog modela. Takvi kalupi izrađuju se u jednom komadu.

Da bi se mogao izraditi jednokratni kalup, prije toga treba izraditi odgovarajući model odljevka i **jezgrenik(e)**. Pomoću modela u kalupu se formira kalupna šupljina u koju se ulijeva talina. Može se reći da je model alat za oblikovanje kalupne šupljine. U jezgrenicima se izrađuju jezgre odgovarajućeg oblika koje se potom postavljaju u kalup da bi se formirali otvori u odljevku. Model odljevka i jezgrenik izrađuju se na osnovi razrađenog nacrtu odljevka. Kvalitete modela i jezgrenika direktno utječu na kvalitetu odljevka. Zbog toga se posebna pažnja mora posvetiti njihovoj izradi, upotrebi i održavanju.

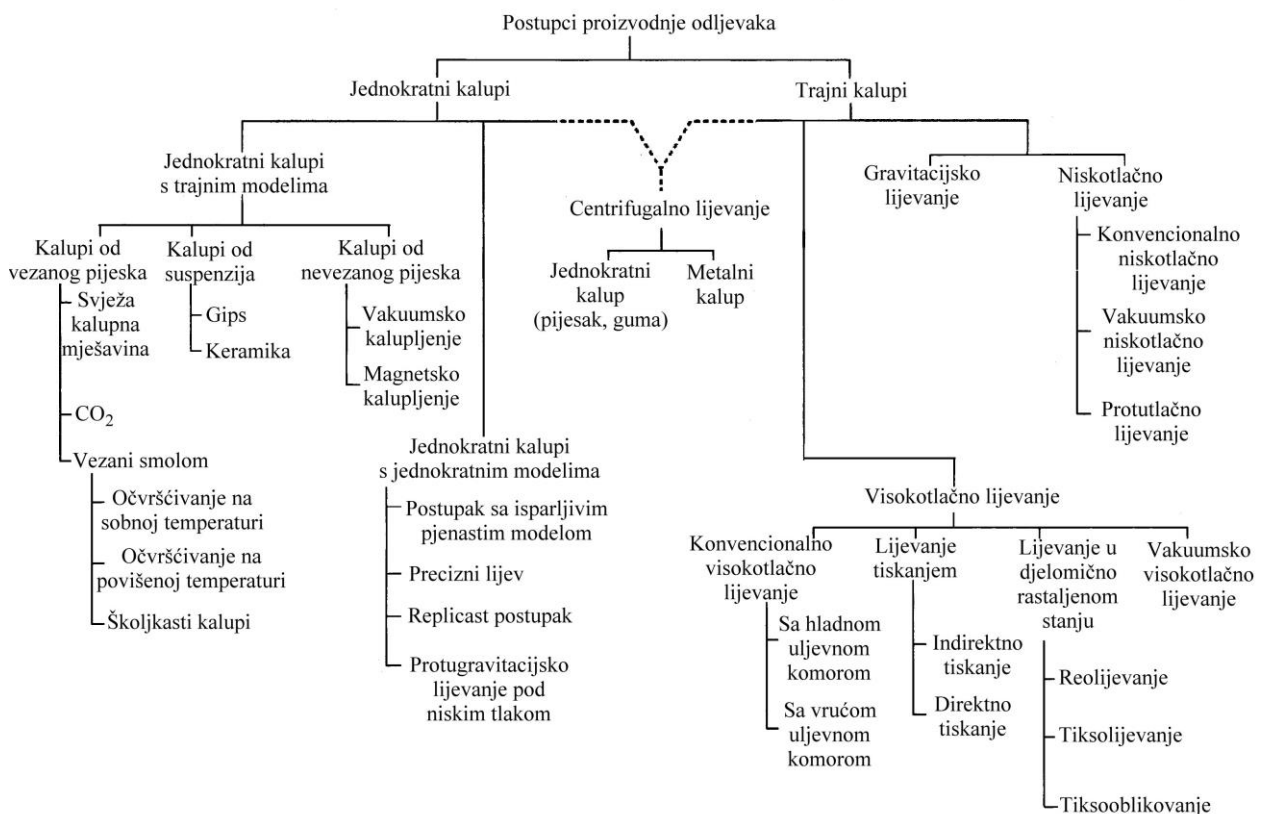
Za proizvodnju odljevaka od ljevova na osnovi željeza upotrebljavaju se obje vrste kalupa. Odabir kalupa ovisi o vrsti odljevka koji se proizvodi. Međutim, jednokratni kalupi znatno su više zastupljeni u proizvodnji odljevaka od željeznih i čeličnih ljevova od trajnih kalupa.

Odljevci od neželjeznih ljevova također se lijevaju u jednokratne i trajne kalupe. Međutim, u ovom slučaju znatno su više zastupljeni postupci koji upotrebljavaju trajne kalupe.

Sa stanovišta kalupa, postupci proizvodnje odljevaka mogu se klasificirati u dvije osnovne skupine:

- **postupci proizvodnje odljevaka lijevanjem u jednokratne kalupe i**
- **postupci proizvodnje lijevanjem u višekratne, odnosno trajne kalupe.**

Daljnja podjela postupaka proizvodnje odljevaka lijevanjem u jednokratne kalupe moguća je na osnovi vrste modela kojeg upotrebljavaju, a postupci proizvodnje odljevaka lijevanjem u trajne kalupe mogu se podijeliti prema načinu punjenja kalupa (slika 10.1).



Slika 10.1. Klasifikacija postupka proizvodnje odljevaka prema vrsti kalupa i modela [77]

Najviše upotrebljavan postupak za proizvodnju odljevka je postupak lijevanja u jednokratne pješčane kalupe od svježe kalupne mješavine, jer je to dominantan postupak za proizvodnju odljevaka od ljevova na osnovi željeza. Općenito gledano, svi postupci u kojima se upotrebljavaju jednokratni pješčani kalupi pogodni su za lijevanje odljevaka od ljevova na osnovi željeza i neželjeznih ljevova. Međutim, postupak lijevanja u jednokratne kalupe od svježe kalupne mješavine nadmašio je sve ostale postupke koji upotrebljavaju pješčane kalupe jer ima najveću produktivnost.

Za proizvodnju odljevaka od neželjeznih ljevova najviše se upotrebljava postupak lijevanja pod tlakom, tj. visokotlačno lijevanje. Taj postupak upotrebljava trajni kalup i omogućuje visoku automatizaciju i produktivnost.

Svaki dominantni postupak ima i svoje nedostatke. Lijevanjem u kalupe od svježe kalupne mješavine ne može se postići dimenzijska točnost i kvaliteta površine kao kod ostalih

postupaka koji također upotrebljavaju pješčane kalupe, ali drugačija veziva. Svojstva mnogih neželjelih slitina ovise o brzini skrućivanja. Kada je važna čvrstoća i duktilnost tih slitina, lijevanje u trajne kalupe ima prednost u odnosu na lijevanje u kalupe od svježih kalupne mješavine.

Tijekom visokotlačnog lijevanja tekući metal velikom brzinom ulazi u trajni kalup zbog čega se rasprskava u kalupu i nastaju turbulencije. Uslijed toga tekući metal zahvaća zrak i plinove u kalupu, zbog čega je skrutnuti odljevak porozan. Prema tome, takvi odljevci nisu pogodni za toplinsku obradu, zavarivanje ili ostale obrade na povišenim temperaturama (npr. emajliranje). Navedeni nedostaci konvencionalnog postupka visokotlačnog lijevanja mogu se eliminirati primjenom visokotlačnog lijevanja pod vakuumom, zatim primjenom lijevanja tiskanjem te lijevanjem u djelomično rastaljenom stanju u trajne kalupe. Međutim, ti postupci imaju visoke proizvodne troškove.

Odljevci lijevani u jednokratne kalupe od gipsa i jednokratne keramičke kalupe imaju izvrsnu dimenzijsku točnost i kvalitetu površine. Visokotlačno lijevanje i njegove varijacije također omogućuju lijevanje na gotovo konačnu dimenziju, ali zahtijevaju znatno skuplje trajne kalupe i pogodni su samo za velikoserijsku proizvodnju.

Kod lijevanja u svježih kalupnu mješavinu i gravitacijskog lijevanja u trajne kalupe lako se mogu upotrijebiti zasebne jezgre za formiranje unutarnjih otvora u odljevku. Te jezgre najčešće su izrađene od jezgrenih mješavina, a osnovi čini ljevaonički pijesak. S druge strane, kod visokotlačnog lijevanja ne mogu se primijeniti takve jezgre zbog velike brzine taline i visokog tlaka.

Postupak lijevanja s jednokratnim isparljivim modelom omogućuje lijevanje odljevaka vrlo kompleksnih oblika. Za taj proces nisu potrebne zasebne jezgre za formiranje otvora u odljevku za koje inače trebaju jezgre u ostalim postupcima.

11. PROIZVODNJA ODLJEVAKA U JEDNOKRATNIM KALUPIMA

Jednokratni kalupi su najčešće upotrebljavana vrsta kalupa za proizvodnju metalnih odljevaka, kako u nemehaniziranim tako i u mehaniziranim i automatiziranim ljevaonicama. Lijevanje u takve kalupe može se obaviti samo jedanput. Nakon skrućivanja odljevka u kalupu, kalup se mora razrušiti i odljevak se vadi iz kalupa. Izrađuju se od odgovarajućih kalupnih mješavina uz pomoć modela odljevka, a prikladni su za izradu odljevaka različite složenosti, dimenzija i mase. Upotreba takvih kalupa nije ograničena ni tipom proizvodnje ni vrstom lijeva. Šupljine u odljevku formiraju se pomoću jezgri koje se moraju napraviti u odgovarajućim jezgrenicima prije sklapanja kalupa.

11.1 Modeli

Model odljevka služi za oblikovanje kalupnog materijala (obično pripremljene kalupne mješavina) radi formiranja kalupne šupljine odgovarajućeg oblika u jednokratnom kalupu. Prema tome, model predstavlja pozitiv, a kalupna šupljina predstavlja negativ odljevka. Posebnu pažnju treba obratiti izradi modela jer direktno utječe na oblik, dimenzije i kvalitetu gotovih odljevaka.

11.1.1 Vrste modela

Ovisno o materijalu iz kojeg su napravljeni, modeli se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine [78]:

- **trajni modeli i**
- **jednokratni modeli.**

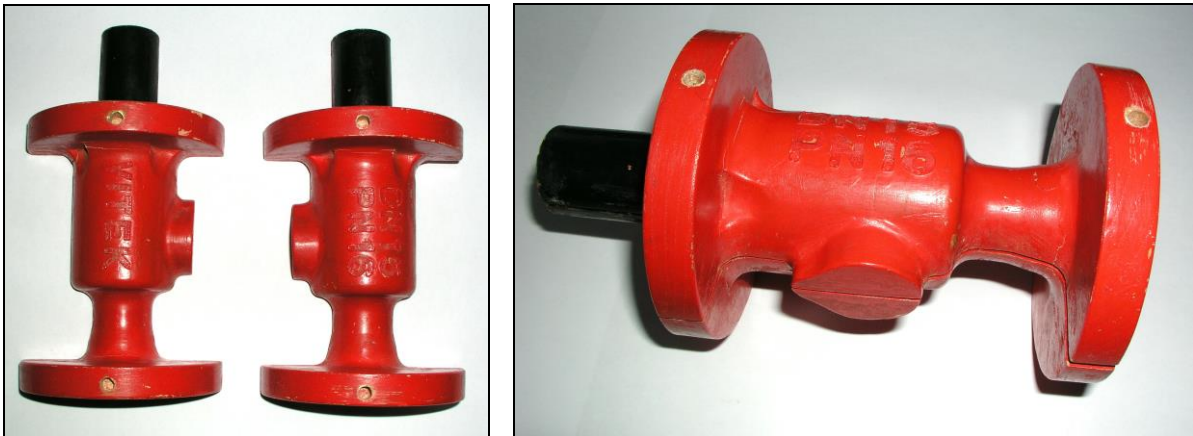
Modeli koji se mogu više puta upotrijebiti za formiranje kalupne šupljine i vade se iz kalupa prije ulijevanja taline nazivaju se trajni modeli. Izrađuju od drveta, metala, plastike i kompozitnih materijala. Mogu se upotrijebiti različite vrste mekog drveta (bor, jela, smreka, lipa, topola, joha itd.) i tvrdog drveta (bukva, javor, orah, mahagonij itd.). Metalni modeli izrađuju se lijevanjem ili strojnom obradom i to najčešće od aluminijske ili sive lijeva, a moguća je primjena i ostalih slitina, kao što je čelik i mjed. Trajni modeli često se izrađuju i od epoksidnih smola jer su u odnosu na drvene modele otporniji na habanje.

Jednokratni modeli mogu se samo jednom upotrijebiti za formiranje kalupne šupljine. Razlikuju se istaljivi i isparljivi jednokratni modeli. Istaljivi modeli izrađuju se od voska, a isparljivi od ekspaniranog polistirena.

Prema izvedbi i načinu upotrebe razlikuju se: [16, 78]:

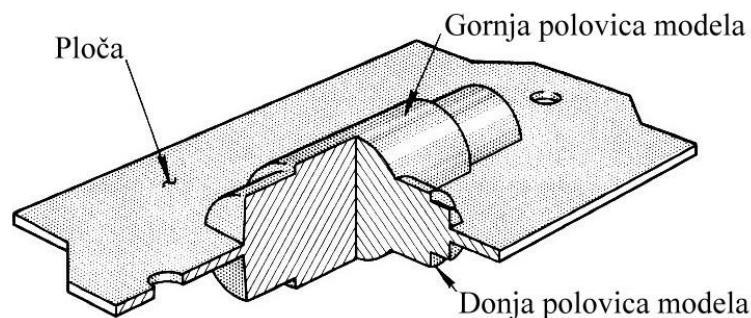
- **slobodni modeli,**
- **modeli montirani na ploče,**
- **specijalni modeli.**

Slobodni modeli (engl. *Loose Patterns*) su najjednostavnija i najjeftinija vrsta modela za višekratnu upotrebu (slika 11.1). Pogodni su samo za proizvodnju vrlo male količine odljevaka. Ta vrsta modela najpogodnija je za eksperimentalne ili prototipne odljevke i vrlo rijetko se upotrebljava za maloserijsku proizvodnju odljevaka. Nisu montirani na ploču i sastoje se od jednog ili dva dijela. Kalupljenje s takvim modelom zahtijeva više ručnog rada i mnogo veći stupanj vještine kalupara nego u slučaju primjene ostalih vrsta modela. To povećava troškove po kalupu i rezultira varijacijama u kvaliteti odljevka od kalupa do kalupa u usporedbi sa izradom kalupa pomoću drugih vrsta modela. Izvlačenje modela također je ručno, zbog čega dimenzijska točnost odljevaka može varirati u širokim granicama. Kod primjene slobodnih modela sustav ulijevanja i napajanja može se izraditi ručno usijecanjem u kalupnoj mješavini u kalupu ili se može izraditi kao slobodne komponente i potom kalupovati zajedno sa modelom.



Slika 11.1. Slobodni trajni model izrađen od drveta

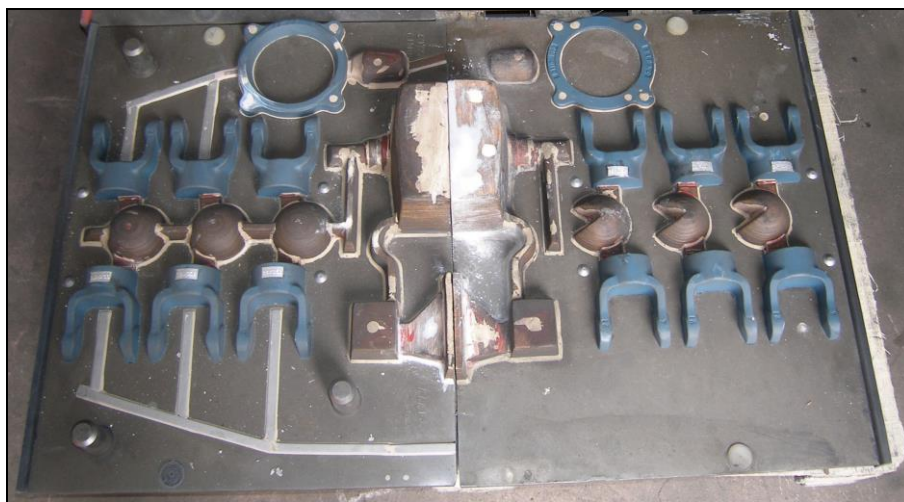
Modeli montirani na ploče imaju znatno duži vijek trajanja i omogućuju proizvodnju odljevaka više kvalitete te smanjuju količinu završne obrade. Model se sastoji od dva dijela, tj. gornjeg i donjeg dijela. Gornji dio služi za izradu gornje, a donji dio za izradu donje polovice kalupa. Gornja i donja polovica modela mogu biti montirane na suprotne strane jedne ploče. U tom slučaju radi se o **dvostranoj modelnoj ploči** (engl. *Matchplate*) (slika 11.2). Ako je samo jedna polovica modela montirana na ploču govorimo o **jednostranoj modelnoj ploči**. U tom slučaju za izradu kalupa potrebne su dvije jednostrane modelne ploče, i to jedna za izradu donje polovice kalupa i druga za izradu gornje polovice kalupa (engl. *Cope and Drag Boards*) (slike 11.3 i 11.4). Modelne ploče daleko su više upotrebljavaju za izradu kalupa od pojedinačnih modela. Povećana produktivnost uz povećanu dimenzijsku točnost odljevka kompenzira troškove izrade modelne ploče.



Slika 11.2. Dvostrana modelna ploča [79]



Slika 11.3. Jednostrane modelne ploče izrađene od drveta, tj. donja i gonja modelna ploča za izradu kalupa s horizontalnom diobenom ravninom



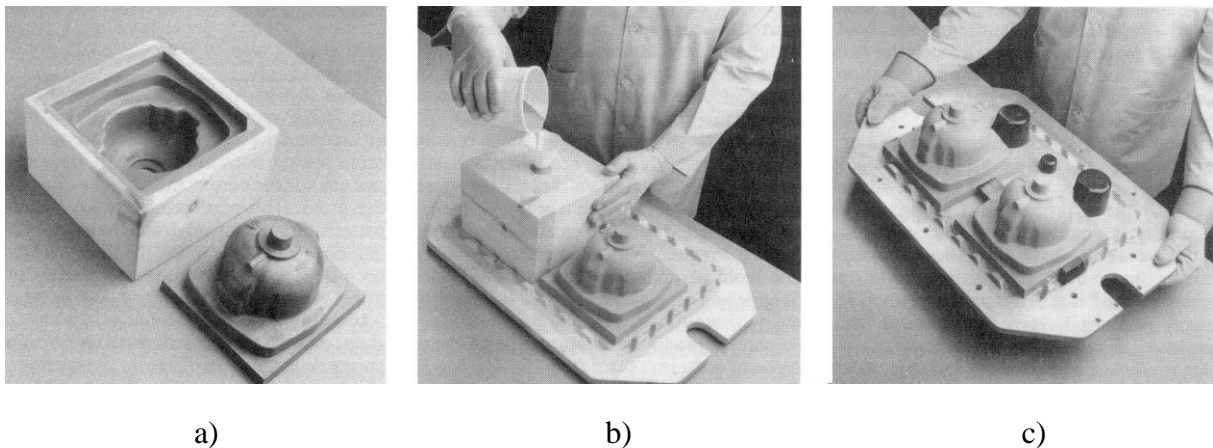
Slika 11.4. Jednostrane modelne ploče za izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom

Kod dvostranih modelnih ploča model te pripadajući sustav ulijevanja i napajanja često se izrađuju odvojeno i potom montiraju na ploču, ali mogu se odliti ili izraditi strojnom obradom zajedno s pločom. Veličina dvostrane modelne ploče odgovara veličini kalupnika koji se upotrebljavaju za izradu kalupa. Za točno centriranje dvostrane modelne ploče u kalupniku i lakše uklanjanje iz kalupa upotrebljavaju se vodilice. Više manjih modela može biti montirano na jednu dvostranu modelnu ploču. U tom slučaju modeli su spojeni na jedan zajednički uljevni sustav.

Dvostrane modelne ploče upotrebljavaju se za maloserijsku i velikoserijsku proizvodnju odljevaka malih do srednjih dimenzija uz dobru dimenzijsku točnost. Izrada kalupa, odnosno kalupljenje značajno je pojednostavljeno upotrebom dvostranih modelnih ploča. Smanjenje troškova kalupljenja i povećanje kvalitete kalupa kompenzira veće troškove izrade ploča. Veći modeli obično se ne montiraju na dvostranu modelnu ploču zbog ograničenja na veličinu kalupnika i poteškoća pri manipulaciji tijekom kalupljenja. Budući da se tijekom velikoserijske proizvodnje može pojaviti značajno habanje modela, izbor adekvatnog materijala za izradu modela od velike je važnosti. Osim toga, modeli za dvostranu modelnu ploču moraju biti dovoljno kruti da izdrže visoke tlakove pritiskanja tijekom automatskog kalupljenja. Iz toga razloga obično se upotrebljavaju metalne dvostrane modelne ploče.

Jednostrane modelne ploče preferiraju se za velikoserijsku proizvodnju odljevaka ili za proizvodnju većih odljevaka. Troškovi izrade modela su viši nego za dvostranu modelnu ploču, ali ukupni troškovi kalupljenja po odljevku mogu biti niži jer se gornja i donja polovica kalupa mogu istovremeno izrađivati. Za automatske kalupilice s vertikalnom diobom kalupa na kojima se proizvode kalupi bez primjene kalupnika potrebne su isključivo jednostrane modelne ploče, jer se lijeva i desna polovica kalupa istovremeno izrađuju na suprotnim stranicama istog bloka kalupne mješavine. Blokovi od kalupne mješavine postavljaju se jedan do drugog i na taj način dobivaju se kompletne kalupne šupljine.

Čitav niz **specijalnih vrsta modela** i posebnih tehnika izrade modela može imati specifičnu primjenu u ljevaonici. Tradicionalni predmodeli još uvijek se ponekad koriste za lijevanje metalnih modela i za izradu plastičnih modela. Više modela može se odliti pomoću predmodela da bi se izradile dvostrane ili jednostrane modelne ploče. Široka paleta tehnika i materijala može se koristiti za izradu predmodela te za izradu konačnih proizvodnih modela pomoću predmodela. Reverzni predmodeli (tj. negativni modeli) također se koriste s za izradu proizvodnih modela. Osnovni koraci za izradu proizvodnih modela pomoću predmodela prikazani su slici 11.5. Izrada modelnih ploča na računalom upravljanim strojevima većim dijelom je zamijenila tradicionalni način izrade proizvodnih modela pomoću predmodela.



Slika 11.5. Koraci u proizvodnji modela za dvostranu modelnu ploču pomoću predmodela: a) predmodel od drveta i reverzni predmodel, b) lijevanje proizvodnog modela na aluminijsku dvostranu modelnu ploču pomoću reverznog predmodela, c) uklanjanje reverznog predmodela i postavljanje uljavnog sustava [78]

Modeli ne trebaju uvijek biti potpune replike konačnog odljevka. Kalupi za vrlo velike odljevke, ali i za manje vrlo kompleksne odljevke, često se izrađuju sastavljanjem od kemijski vezanih pješćanih segmenata (jezgri) izrađenih u brojnim jezgrenicama. To je poznato kao **kalupljenje pomoću jezgri**. U tom slučaju nije potreban jedan model, već je potreban veći broj jezgrenika da bi se mogao izraditi svaki dio kalupa. Veći kalupni sklopovi izrađuju se na podu ljevaonice ili većim jamama izgrađenim u podu ljevaonice.

Odljevci manjih dimenzija od kojih se zahtijeva visoka kvaliteta i dimenzijska točnost proizvode se postupkom lijevanja sa istaljivim modelom (engl. *Investment Casting*) [80]. Taj postupak lijevanja naziva se još točni ili precizni lijev. Kod tog postupka proizvodnje odljevaka upotrebljavaju se **jednokratni istaljivi modeli** oko kojih se potom formira keramički školjkasti kalup.

Prvi korak kod navedenog postupka je stvaranje točne replike predmeta, odnosno modela koji se treba proizvesti od voska ili plastike (slika 11.6). Pri tome se voskovi daleko

više upotrebljavaju od plastika. Modeli od voska proizvode se injektiranjem voska pri relativno niskim temperaturama i tlakovima u odgovarajući alat za izradu modela. Temperature injektiranja obično iznose od 43 do 77 °C, a tlakovi se kreću od 275 do 10,3 N/mm². Prema tome, vosak se može injektirati u tekućem, kašastom ili krutom stanju. U osnovi alat za izradu modela je trajni kalup načinjen od aluminijske slitine u kojem je formirana šupljina koja odgovara obliku modela koji se proizvodi.



Slika 11.6. Modeli odljevaka izrađeni od voska

Obični voskovi nisu pogodni za izradu modela jer ne osiguravaju dovoljnu čvrstoću i žilavost modela te dimenzijsku točnost. Osim toga, tijekom skrućivanja takvih voskova dolazi do stezanja i stvaranja uvlaka na površini. Čvrstoća i žilavost voska poboljšava se dodatkom odgovarajućih plastika, kao što je polietilen. Stezanje voska tijekom skrućivanja koje uzrokuje nastanak uvlaka na površini eliminira se dodatkom odgovarajućih smola i punila. Često se nekoliko modela od voska spaja se na zajednički spust koji je također izrađen od voska stvarajući na taj način livni grozd.

Najviše upotrebljavani voskovi za izradu modela su parafinski i mikrokristalični voskovi. Često se kombiniraju zajedno zbog boljih konačnih svojstava. Parafinski voskovi koji je najviše upotrebljavaju tale se na temperaturama od 52 do 68 °C. Niska cijena, laka dostupnost i niska temperatura taljenja samo su neki od razloga njihove primjene. Međutim, primjena im je ponešto ograničena zbog krhkosti i visokog stezanja. Mikrokristalični voskovi imaju višu plastičnost i žilavost. Imaju višu temperaturu taljenja od parafinskih voskova i često se kombiniraju sa njima.

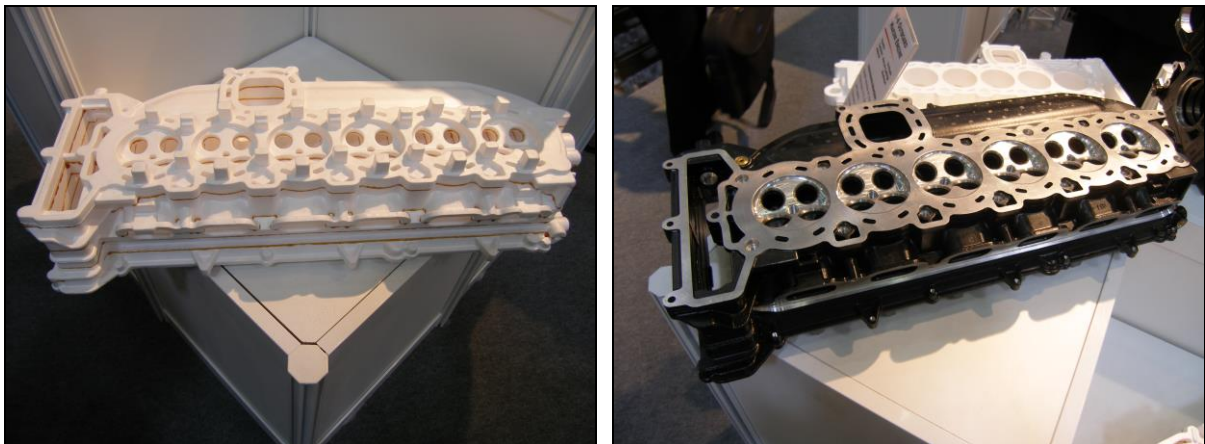
Dio odljevaka proizvodi se postupkom lijevanja s isparljivim pjenastim modelom (engl. *Lost Foam Casting*). Kod tog postupka proizvodnje odljevaka rastaljeni metal lijeva se na jednokratni isparljivi pjenasti model koji je zakalupovan u nevezani ljevaonički pijesak. Pri tome pjenasti model ispari, a talina zauzme njegovo mjesto.

Osnovne sirovine za izradu **jednokratnih isparljivih modela** su: ekspanzirani polistiren (EPS), ekspanzirani polimetil metakrilat (EPMMA), mješavina EPS i EPMMA i određeni kopolimeri [81, 82]. U fazi istraživanja je i primjena polialkilen karbonata (PAC). Izrada pjenastog modela odvija se u dva koraka. Pjene koje se danas najviše primjenjuju proizvode se ili od polistirenskih kuglica (granula) koje sadrže 6 do 8 % ekspanzirajućeg sredstva (pentan) ili od polimetil metakrilat (PMMA) granula koje sadrže ugljikovodično sredstvo za ekspanziranje. Gustoća polistirena u sirovom stanju iznosi ~ 640 kg/m³. Da bi se

mogao upotrijebiti za izradu pjenastih modela njegova gustoća mora se smanjiti na 16 do 27 kg/m³. To se postiže postupkom poznatim kao predekspanzija. Za lijevanje odljevaka od čeličnih ljevova upotrebljavaju se modeli čija gustoća mora iznositi $\geq 17,6$ kg/m³, a za lijevanje odljevaka od sivog lijeva pogodni su modeli gustoće ≥ 20 kg/m³. Odljevci od mjedi i bronce mogu se također lijevati tim postupkom uz primjenu modela sa gustoćom od 20 do 21,6 kg/m³. Za lijevanje odljevaka od aluminijskih ljevova potrebni su modeli gustoće 24 do 27 kg/m³.

Sirovi polistiren se uvodi u zagrijanu komoru i održava u stalnom gibanju radi ravnomjerne raspodjele topline kroz materijal. Plastična zrna (granule) pri tome omekšavaju, a plin unutar granula ekspandira čime se povećava promjer svakog pojedinog zrna i smanjuje ukupna gustoća. Gustoća pjenastog modela za dati lijevani proizvod je kritična veličina i vrlo je važno ostvariti ciljanu gustoću, što se postiže kontrolom vremena i temperature predekspanzije. Nakon postizanja željene gustoće, hlađenja i stabilizacije (6 do 12 sati) predekspanzirani stabilizirani materijal upuhuje se u odgovarajući alat za izradu modela uz pomoć zraka. U osnovi alat za izradu modela je trajni kalup načinjen od aluminijske slitine u kojem je formirana šupljina koja odgovara obliku modela koji se proizvodi. Kad je šupljina ispunjena materijalom za izradu modela kroz materijal se propušta para, zbog čega materijal ponovo ekspandira ispunjavajući zračne šupljine između pojedinih kuglica. Zrna se međusobno staljuju u krutu masu ispunjavajući šupljinu u alatu i stvarajući željeni oblik modela. Proces ekspanzije i staljivanja zaustavlja se hlađenjem alata špricanjem vode po njegovoj vanjskoj površini. Na taj način sprječava se i postekspanzija (širenje modela nakon izbacivanja iz alata). Kada se hlađenje završi otvara se alat i uklanja model.

Pjenasti modeli izrađeni od ekspanziranog polistirena i kopolimera manji su za ~ 0,35 % od dimenzije alata neposredno nakon uklanjanja iz alata. Vrlo brzo nakon izbacivanja iz alata pjenasti model ekspandira kako ekspandirajuća sredstva i para nastavljaju vršiti pritisak unutar zrna. Potom slijedi stezanje modela uslijed reapsorpcije rezidualnih ekspandirajućih sredstava, difuzije pare prema van i difuzije zraka u zrna. Većina stezanja pojavljuje se unutar 30 dana i linearna kontrakcija iznosi oko 0,65 % za modele izrađene od ekspanziranog polistirena i modele izrađene od kopolimera, te 0,25% za modele izrađene od ekspanziranog polimetil metakrilata. Modeli se mogu stabilizirati na sobnoj temperaturi u periodu do 30 dana ili se može provesti umjetno starenje na povišenim temperaturama (oko 50 °C) kroz nekoliko sati. Na slici 11.7 prikazan je model od ekspanziranog polistirena i rezultirajući odljevak od sivog lijeva.



Slika 11.7. Model od ekspanziranog polistirena i rezultirajući odljevak od sivog lijeva

Prema tome, na kvalitetu modela, kao i dimenzijsku točnost bitno utječe vrsta upotrijebljenog polimera, veličina i raspodjela granula, vrsta i količina ekspandirajućeg sredstva, gustoća polistirena, temperatura pare, vrijeme pod djelovanjem pare, ciklus hlađenja kalupa, vrijeme i temperatura izbacivanja modela te vrijeme i temperatura stabilizacije. Razumijevanje i kontrola dimenzijskih promjena modela je neophodno važna radi postizanja dimenzijske točnosti i konzistentnosti odljevaka. Danas su razvijeni i specijalni sustavi za dimenzijsku kontrolu modela.

Nakon stabilizacije dimenzije pjenasti modeli se sastavljaju. Dijelovi modela se obično sljepljuju na automatskim strojevima upotrebljavajući vruće ljepilo. Na isti način se pričvršćuje i uljevni sustav koji je izrađen od istog materijala kao model. Više modela može se sljepiti na jedan uljevni sistem stvarajući na taj način livni grozd.

Manja količina odljevaka lijeva se Replicast[®] postupkom [82, 83]. Taj postupak također upotrebljava jednokratni isparljivi model. Osnovna i vrlo bitna razlika u odnosu na prethodno navedeni postupak lijevanja s isparljivim pjenastim modelom je ta da se upotrebljava ekspandirani polistiren (EPS) visoke gustoće, što rezultira boljom kvalitetom površine odljevka. Gustoća modela za Replicast[®] postupak iznosi 40 do 48 kg/cm³ što mu osigurava glatku i čvrstu površinu.

Pri odabiru vrste modela treba uzeti u obzir broj odljevaka koje treba proizvesti, oblik, veličinu i konstrukciju odljevka, postupak izrade kalupa i lijevanja odljevaka, zahtijevanu dimenzijsku točnost odljevka i troškove izrade modela. Budući je modelna oprema samo dio procesa izrade kalupa, najjeftiniji model nije nužno i najekonomičniji. Dodatni troškovi modela i kvaliteta često vode sniženju ukupnih troškova proizvodnje odljevaka putem smanjenja troškova kalupljenja i troškova popravka modela kao i poboljšanja ukupne kvalitete odljevka.

Izrada modela započinje od dimenzija zahtijevanog odljevka. Međutim, za uspješnu proizvodnju odljevaka gotovi model odljevka mora sadržavati neke dodatne značajke koje ne sadrži gotovi odljevak. Prije svega treba odrediti **diobenu ravninu modela** da bi se lako mogao ukloniti iz kalupa. Zatim treba definirati različite **dodatke modelu** zbog koji su dimenzije modela nešto veće u odnosu na zahtijevane dimenzije gotovog odljevka [78]. Na model odljevka pričvršćuje se **model uljevnog sustava i modeli pojila** koji su najčešće napravljeni od istog materijala kao i model odljevka. Za odljevke za čiju su izradu potrebne jezgre model odljevka mora sadržavati dodatne dijelove nazvane **jezgreni oslonci** da bi se u kalupu formirala ležišta preko kojih se jezgra oslanja na kalup (slika 2.1).

11.1.2 Dodatci modelu

Premda se model upotrebljava za proizvodnju odljevka željenih dimenzija, njegove dimenzije nisu identične dimenzijama odljevka. Postoji nekoliko vrsta dodataka modelu (engl. *Pattern Allowances*) [13, 16, 78, 84]:

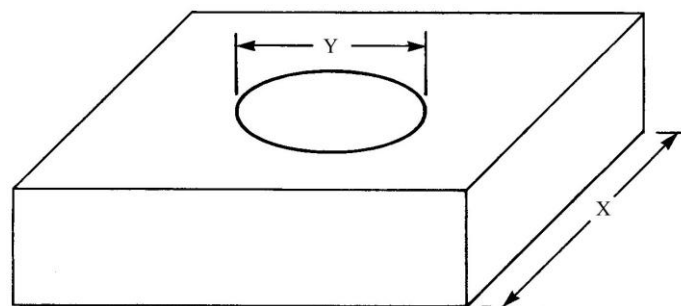
- **dodatci radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka,**
- **dodatci radi lakšeg uklanjanja modela iz kalupa,**
- **dodatci radi strojne obrade odljevka.**

Dodatci modelu radi kompenzacije linearnog stezanja odljevka. Gotovo sve ljevarske slitine stežu se tijekom hlađenja u kalupu, tj. smanjuje im se specifični volumen. Stezanje koje se pojavljuje tijekom skrućivanja kompenzira se napajanjem odljevka, tj. dotokom taline iz pojila. Međutim stezanje, odnosno skupljanje odljevka koje se pojavljuje nakon završetka skrućivanja tijekom hlađenja do sobne temperature ne može se kompenzirati napajanjem odljevka. To stezanje dovodi do smanjenja linearnih dimenzija odljevka u odnosu na dimenzije kalupne šupljine i često se naziva linearnim stezanjem. Zbog toga treba povećati dimenzije kalupne šupljine, a samim tim i modela za iznos linearnog stezanja ljevarske slitine. Prema tome, dimenzije modela namjerno su veće od zahtijevanih dimenzija odljevka. Obzirom da se stezanje kompenzira odgovarajućim dodatcima modelu, često se naziva i modelarskim stezanjem. Ako model nema dodatke radi kompenzacije stezanja odljevka nakon skrućivanja, dimenzije odljevka bit će manje od stvarno potrebnih dimenzija.

Povećanje linearnih dimenzija modela obično se daje u postotcima i prije svega ovisi o vrsti i kemijskom sastavu ljevarske slitine, zatim o veličini i obliku odljevka i čvrstoći kalupa, odnosno postupku izrade kalupa [13, 16, 32]. Linearno stezanje ugljičnih i niskolegiranih čeličnih ljevova iznosi 1,6 %, što znači dodatak od 16 mm na jedan metar dužine odljevka. Visokolegirani austenitni čelici imaju veće linearno stezanje i iznosi 2,6 % (26 mm/m). Linearno stezanje sivog lijeva obično iznosi 1 %, dok kod nodularnog lijeva iznosi 0,8 %. Što se tiče neželjeznih ljevova, linearno stezanje uobičajenih aluminijskih ljevova obično se kreće oko 1,3 %. Isti iznos linearnog stezanja prisutan je i kod magnezijjskih ljevova. Linearno stezanje bakra iznosi 1,6 %, dok kod aluminijskih bronci iznosi 2,32 %. Linearno stezanje slitina na osnovi cinka iznosi 1,18 %. Prema tome, ako bi se isti model upotrijebio za proizvodnju odljevaka od različitih ljevova, mogu se očekivati različite dimenzije odljevaka.

Pri izradi modela ne možemo se uvijek striktno držati prethodno navedenih iznosa linearnog stezanja. Ostali faktori, kao što je oblik odljevka, debljina stijenke odljevka i krutost kalupa značajno utječu na stvarne promjene dimenzija odljevka tijekom hlađenja od temperature završetka skrućivanja do sobne temperature. Otpor koji kalup pruža stezanju odljevka i upotreba različitih kalupnih materijala i metoda izrade kalupa može zahtijevati upotrebu različitih dodataka na različitim modelima. Kada bi se isti model upotrijebio za proizvodnju odljevaka u ručno i strojno izrađenim kalupima od svježe kalupne mješavine te kemijski vezanim kalupima visoke čvrstoće, mogu se očekivati različite dimenzije odljevaka jer postoji značajna razlika u širenju stijenki navedenih kalupa tijekom lijevanja i skrućivanja odljevka.

Nije rijedak slučaj da je na jednom modelu potrebno nekoliko različitih dodataka zbog stezanja, što ovisi o sprječavanju stezanja odljevka. Npr. na slici 11.8 može se vidjeti da postoje dva slučaja stezanja.

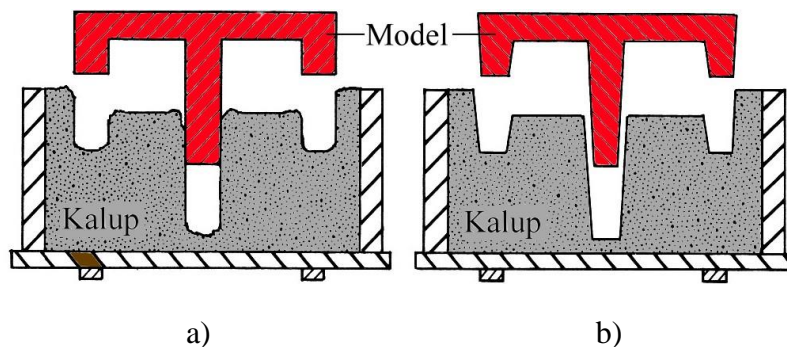


Slika 11.8. Odljevak koji zbog svoje konstrukcije zahtijeva različite dodatke na modelu radi kompenzacije linearnog stezanja. Duž dimenzije X moguće je slobodno stezanje odljevka, dok je duž dimenzije Y ograničeno stezanje zbog upotrebe jezgre za formiranje otvora u odljevku [16]

Duž X dimenzije praktički nema ograničenja na stezanje odljevka. Međutim, u području otvora na odljevku (Y dimenzija) ograničeno je stezanje odljevka jer jezgra pruža otpor stezanju. U tom slučaju potreban je mali dodatak na stezanje, ili čak neće ni biti potreban. Npr. ako se odljevak lijeva od ugljičnog čeličnog lijeva i X dimenzija odljevka iznosi 610 mm, X dimenzija modela mora iznositi 619 mm (neometano linearno stezanje ugljičnog čeličnog lijeva iznosi 1,6 %). Ako promjer otvora na odljevku iznosi 203 mm, može se napraviti jezgra istog promjera jer ograničava stezanje odljevka.

Očito je da je definiranje odgovarajućih dodataka na modelu zbog linearnog stezanja odljevka kompleksan problem. Zbog toga je za velikoserijsku proizvodnju odljevaka sa strogim zahtjevima na dimenzije pogodno najprije napraviti prototip modela i odliti probne odljevka te prekontrolirati njihove dimenzije i po potrebi doraditi model.

Dodatci modelu radi lakšeg uklanjanja modela iz kalupa. Tijekom uklanjanja, odnosno izvlačenja modela iz kalupa potrebna je određena sila da bi se svladalo trenje između modela i sabijene kalupne mješavine oko modela. Ta sila može se znatno smanjiti ako se ukose površine modela koje su okomite na diobenu ravninu kalupa (slika 11.9). Na taj način smanjuje se i mogućnost oštećenja kalupa tijekom izvlačenja modela. Prema tome, ako se odljevak proizvodi lijevanjem u kalupe s horizontalnom diobenom ravninom, ukošene su vertikalne površine modela. U slučaju kada se odljevak proizvodi lijevanjem u kalupe s vertikalnom diobenom ravninom, ukošene su horizontalne površine modela. Dodatci koji se dodaju modelu da bi se lakše uklonio iz kalupa u praksi se često nazivaju ljevarskim skošenjima ili konusima jer su zbog tih dodataka određene površine modela skošene, odnosno koničnog oblika.



Slika 11.9. Izvlačenje modela iz kalupa sa horizontalnom diobenom ravninom: a) model bez ukošenih vertikalnih površina, b) model sa ukošenim vertikalnim površinama [16]

Veličina skošenja, odnosno nagiba na modelu ovisi o obliku i veličini odljevka, postupku proizvodnje kalupa te da li je kalup izrađen ručno ili strojno. Ako se kalup izrađuje na odgovarajućim strojevima potrebna su manja skošenja na modelu. Ručna izrada kalupa zahtijeva modele s većim skošenjima. Više površine imaju manja skošenja od površina male visine. Unutarnje površine obično zahtijevaju nešto veće skošenje od vanjskih površina. Pod normalnim okolnostima preporučuje se da skošenje modela iznosi 16 mm/m, odnosno $\sim 1,5\%$ i treba ga unijeti u nacrt odljevka [16, 78].

U posebnim slučajevima, npr. ako je model gladak i oprema za izvlačenje modela pravilno poravnata, modeli mogu biti izvedeni bez skošenja. Jednokratni isparljivi i istaljivi modeli ne moraju imati skošenja jer se ne izvlače iz kalupa.

Dodatci modelu radi strojne obrade odljevka. Ako će se pojedine površine odljevka strojno obrađivati treba predvidjeti odgovarajuće dodatke, odnosno za odgovarajući iznos

uvećati dimenzije modela na tim mjestima u odnosu na dimenzije gotovog odljevka. Dodatak na strojnu obradu ovisi o vrsti ljevarske slitine od koje se lijeva odljevak, veličini i obliku odljevka, grubosti površine odljevka i očekivanim greškama na površini, postupku izrade kalupa i materijalu za izradu kalupa te distorziji i dimenzijskim tolerancijama odljevka. Uzimajući sve navedeno u obzir dodatak na strojnu obradu može varirati značajno, od nekoliko mm do > 10 mm [16, 78].

U procesu izrade modela danas se sve više upotrebljavaju programski paketi za 3D modeliranje. Na taj način brzo se dolazi do nacrtu modela koji se u digitalnom obliku prenosi na CNC strojeve na kojima se model izrađuje u kratkom vremenskom roku i s velikom točnošću. Osim toga, u programskim paketima za 3D modeliranje može se izraditi trodimenzionalni prikaz modela zajedno sa uljevnim sustavom i sustavom napajanja na osnovi kojeg se provodi simulacija ulijevanja i skrućivanja odljevka u kalupu. Rezultati simulacije omogućuju poduzimanje korektivnih mjera na modelu i sustavu ulijevanja i napajanja prije no što se model uopće izradi u cilju proizvodnje kvalitetnih odljevaka.

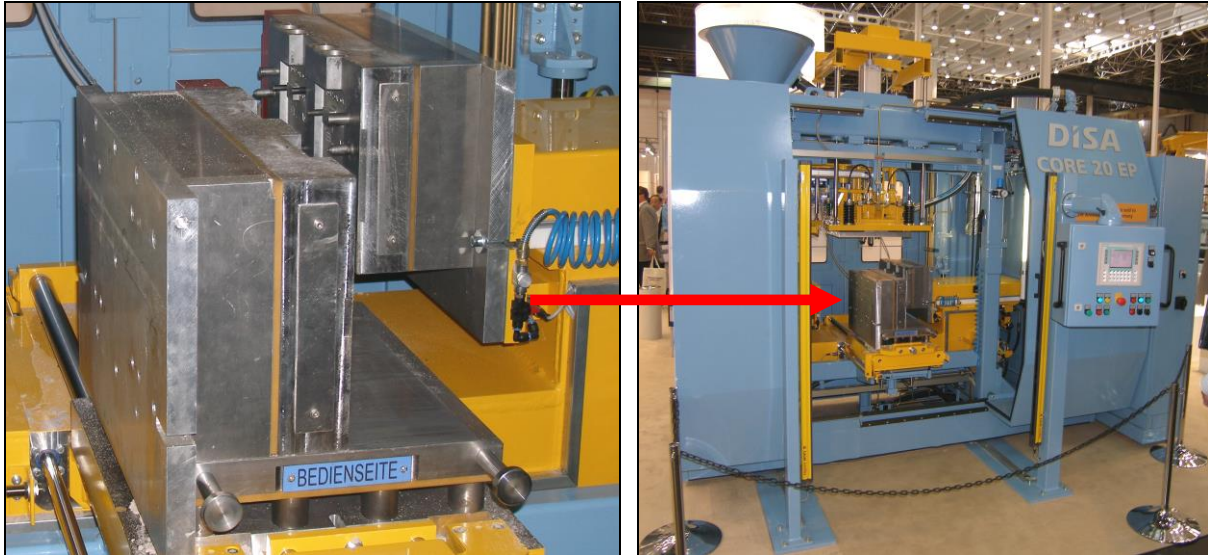
11.2 Jezgrenici

Jezgrenici se upotrebljavaju za izradu jezgri koje se smještaju unutar kalupne šupljine radi stvaranja šupljina unutar odljevka. Pored toga, jezgre se mogu upotrijebiti za izradu kompleksnih kalupa umjesto klasičnog načina izrade kalupa. Izrađuju se prema razrađenom nacrtu odljevka i zapravo su reverzni (obrnuti) modeli ili reverzni kalupi koji se upotrebljavaju za izradu pješčanih jezgri koje postaju dio konačnog kalupa. Jezgrenici se kao i kalupi sastoje od dva dijela da bi se gotova jezgra mogla izvaditi. Termin **modelna oprema** (engl. *Pattern Equipment*) obuhvaća model i sve jezgrenike potrebne da bi se mogao izraditi jednokratni kalup.

Materijal za izradu jezgrenika odabire se ovisno o postupku koji se primjenjuje za izradu jezgri i broju jezgri koje treba izraditi. Jezgrenici se izrađuju od drveta (slika 11.10), plastike ili metala (slika 11.11a). Za izradu jezgri od jezgrenih mješavina koje očvršćuju na sobnoj temperaturi upotrebljavaju se jezgrenici od drveta, plastike ili metala. Ako jezgrena mješavina očvršćuje pod djelovanjem topline, jezgrenici se izrađuju isključivo od metala. Metalni jezgrenici ugrađuju se u specijalne strojeve za izradu jezgri (slika 11.11b) čime se postiže automatizacija procesa. Na tim strojevima se jezgrena mješavina pod tlakom zraka upuhuje u jezgrenik. Zrak izlazi kroz ventilacijske otvore na jezgreniku.



Slika 11.10. Jezgrenik izrađen od drveta



a)

b)

Slika 11.11. a) metalni jezgrenik, b) stroj za izradu jezgri

11.3 Vrste jednokratnih kalupa

Jednokratni kalupi izrađuju se od kalupnih mješavina. Glavni sastojci kalupne mješavine su zrnata osnova ili ljevaonički pijesak, vezivo i dodaci tj. aditivi kojima se poboljšavaju određena tehnološka svojstva kalupne mješavine. Kod izrade jednokratnih kalupa upotrebljavaju se sljedeće kalupne mješavine:

- kalupne mješavine koje svoju čvrstoću postižu sabijanjem, kao što je to slučaj kod kalupnih mješavina vezanih glinom, tj. svježe kalupne mješavine,
- kalupne mješavine koje potrebnu čvrstoću postižu kemijskom reakcijom između sastojaka veziva i
- kalupne mješavine s fizikalnim načinom vezivanja.

Uzimajući u obzir prethodno navedene vrste kalupnih mješavina, razlikuju se sljedeće vrste jednokratnih kalupa:

- kalupi izrađeni od svježe kalupne mješavine (ljevaonički pijesak + glina kao vezivo + dodatci),
- kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina (ljevaonički pijesak + anorganska ili organska veziva + dodatci),
- školjkasti kalupi,
- kalupi izrađeni od suspenzije gipsa ili keramičkih suspenzija
- kalupi izrađeni od ljevaoničkog pijeska bez primjene veziva.

11.4 Jednokratni kalupi od svježe kalupne mješavine

Kalupljenje svježom kalupnom mješavinom (engl. *Green Sand Molding*) je najjeftiniji, najbrži i najčešće upotrebljavani način izrade jednokratnih kalupa. Kalupi od svježe kalupne mješavine pogodni su za gravitacijsko lijevanje odljevaka od svih ljevova. Neke od prednosti kalupljenja svježom kalupnom mješavinom su: niski troškovi kalupnog materijala, mogućnost automatizacije i visoke produktivnosti, upotreba modela izrađenih od drveta ili plastike itd. Nedostaci su: dimenzijska točnost i kvaliteta površine odljevka ovise o stupnju sabijenosti kalupne mješavine, visoki tlakovi sabijanja zahtijevaju primjenu metalnih modela (viši troškovi) itd.

Svježa kalupna mješavina sadrži **vezivo (glinu)**, **vodu** i kao osnovnu komponentu **ljevaonički pijesak** (najčešće se radi o kvarcnom pijesku). Te tri komponente osiguravaju osnovna svojstva svježe kalupne mješavine. Vezivo se dodaje da bi se povezale čestice pijeska. Voda se dodaje da bi se aktivirala vezivna svojstva gline. Radi poboljšanja svojstava dodaju se u mješavinu i specijalni **aditivi**. Sve navedene komponente izmiješaju se odgovarajućem mješaču čime se dobiva svježa kalupna mješavina koja je odmah spremna za izradu kalupa.

Da bi se proizveli ispravni odljevci neophodno je održavati konzistentnu kvalitetu kalupne mješavine. Odstupanja u svojstvima kalupne mješavine mogu rezultirati greškama na odljegovcima. Npr., prenizak udio vlage u kalupnoj mješavini rezultira niskom čvrstoćom kalupa, a previsok udio vlage može dovesti do smanjene propusnosti kalupne mješavine za plinove te plinske poroznosti u odljevku. Zbog toga se u ljevaonicama provodi stalna kontrola kako komponenti tako i same mješavine u cilju korekcije parametara i dobivanja kvalitetnih kalupa i odljevaka.

11.4.1 Ljevaonički pijesci

Osnovu svake kalupne mješavine čini ljevaonički pijesak. Pijesak kao materijal za izradu kalupa definira se kao fino granulirani materijal dobiven prirodnim ili umjetnim putem (drobljenjem stijena). Veličina tako izdrobljenih zrna kreće se od 0,05 do 2 mm. Ljevaonički pijesci moraju ispuniti sljedeće zahtjeve:

- dimenzijska i toplinska stabilnost na povišenim temperaturama,
- odgovarajuća veličina i oblik čestica,
- kemijska inertnost u odnosu na rastaljeni metal,
- nemogućnost kvašenja rastaljenim metalom,
- odsutnost volatila, tj. hlapljivih tvari koje proizvode plinove pri zagrijavanju,
- konzistentna čistoća i sastav,
- kompatibilnost sa sustavom vezivanja,
- ekonomičnost i raspoloživost.

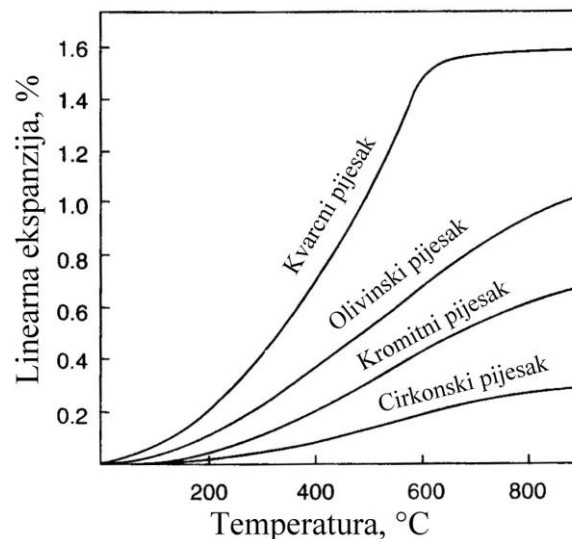
11.4.1.1 Vrste ljevaoničkih pijesaka prema udjelu osnovnog minerala

Za izradu kalupa i jezgri upotrebljavaju se sljedeće vrste ljevaoničkih pijesaka [3, 13, 85]:

- kvarcni pijesak,
- kromitni pijesak,
- olivinski pijesak,
- cirkonski pijesak

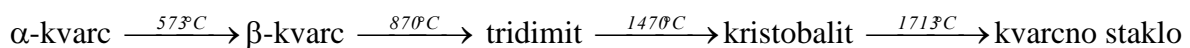
Kvarcni pijesak (SiO_2) najviše se upotrebljava za izradu kalupa, prvenstveno zbog dostupnosti i niske cijene u odnosu na ostale navedene pijeske. Osnovni sastojak kvarcnog pijeska je silicijev dioksid, SiO_2 u obliku kvarca. Kvalitetni kvarcni pijesci trebaju imati min. 97 % SiO_2 . Čisti kvarc je bezbojan, a spojevi željeza daju mu smeđe-crvenkastu boju. Prag sinteriranja je 1400 °C, a temperatura taljenja iznosi od 1600 do 1700 °C. Primjese značajno snižavaju vatrostalnost i temperaturu sinteriranja. To su prije svega alkalijski oksidi K_2O i Na_2O čiji se udio ograničava na maks. 0,5 %, te Fe_2O_3 čiji se udio ograničava na maks. 0,3 %. Udio alkalijskih minerala treba biti što niži jer će kvarcni pijesak u protivnom apsorbirati kisele katalizatore u postupcima izrade kalupa od kemijski vezanih mješavina.

Tijekom zagrijavanja kvarc podliježe nizu kristalografskih pretvorbi. Prva kod 573 °C povezana je s visokom toplinskom ekspanzijom (slika 11.12) koja može uzrokovati pucanje kalupa. Svakom zrnu pijeska mora se omogućiti ekspanzija ili će površina kalupa biti narušena s rezultirajućim gubitkom kvalitete odljevka. Zbog toga zrna kvarcnog pijeska ne smiju biti kompaktna ili sabijena tako gusto da bi im se omogućila ekspanzija bez narušavanja površine kalupa.



Slika 11.12. Toplinska ekspanzija kvarcnog, olivinskog, kromitnog i cirkonskog pijeska [13]

Iznad 870 °C kvarc se transformira u tridimit i pijesak se može stezati pri zagrijavanju. Kod još viših temperatura iznad 1470 °C transformira se tridimit u kristobalit. Kristobalit kod 1713 °C prelazi u tekuću fazu:



Uz to kvarc reagira s rastaljenim željezom stvarajući spoj koji može uzrokovati zapečenje ili stvaranje grubog sloja pijeska na površini odljevka. Međutim, problemi s kvarcom mogu se izbjeći primjenom pijeska raznih veličine zrna i dodatkom odgovarajućih aditiva u kalupnu mješavinu, kao što je ugljena prašina ili celuloza.

Kromitni pijesak (FeCr_2O_4) je crne boje, visoke vatrostalnosti i kemijski nereaktivan. Temperatura taljenja iznosi ~ 2200 °C, a prag sinteriranja od ~ 1350 do 1600 °C, ovisno o udjelu nečistoća [86]. Ima nisku toplinsku ekspanziju (iako je dvostruko veća od toplinske ekspanzije cirkonskog pijeska) (slika 11.12). Toplinska ekspanzija iznosi 0,6 % kod 900 °C u usporedbi s 1,56 % za kvarcni pijesak kod iste temperature. Zbog toga nije osjetljiv na ekspanzivne vrste grešaka [13]. Vrlo dobro odvodi toplinu zbog čega može djelovati kao hladilo u kalupu. Nedostatak tog pijeska je taj da on sadrži hidratizirane nečistoće koje mogu pri zagrijavanju izazvati pojavu plinske mjehuravosti u odljevku. Kod kromitnog pijeska nužno je specificirati udio CaO i SiO_2 jer utječu na smanjenje vatrostalnosti, odnosno da bi se izbjeglo sinteriranje i reakcija sa rastaljenim metalom koja uzrokuje zapečenje na odljevku. Kod iste zrnatosti pijeska, kromitni pijesak ima visoku otpornost na penetraciju metala. Zbog toga se može koristiti nešto grublje zrno, a on će još uvijek imati dobru otpornost na penetraciju i pružati zadovoljavajuću površinu odljevka. Zbog svoje visoke gustoće od približno $4,4 \text{ kg/dm}^3$ potreban je manji dodatak veziva u odnosu na kvarcni pijesak.

Olivinski pijesak sastoji se od dva minerala: forsterita (Mg_2SiO_4) i fajalita (Fe_2SiO_4) [86]. Nosilac vatrostalnih svojstava je forsterit. Čisti forsterit ima talište iznad 1890 °C, dok olivin koji sadrži 7 % fajalita ima talište na 1865 °C. Te temperature garantiraju zadovoljavanje svih zahtjeva u ljevaonicama, naročito u ljevaonicama željeznih ljevova. Svojstva tog pijeska variraju ovisno o sastavu. Premda ima sličan specifični toplinski kapacitet kao kvarcni pijesak, olivinski pijesak ima nižu toplinsku ekspanziju (slika 11.12). Toplinska ekspanzija kod 900 °C iznosi 1 %, zbog čega je otporniji na ekspanzivne vrste grešaka od kvarcnog pijeska (koristi se za odljevke od čeličnog lijeva radi kontrole dimenzije kalupa) [13]. Sadržaj plinova u tom pijesku može biti dosta visok u odnosu na kvarcni pijesak zbog prisutnosti minerala serpentina. Razvijanje plinova i para može dovesti do grešaka na odljercima. Uglavnom se upotrebljava u proizvodnji odljevaka od austenitnog manganskog čelika (koji reagiraju s kvarcom i ostalim pijescima što rezultira greškama na odljercima) [13].

Cirkonski pijesak (ZrSiO_4) ima visoku vatrostalnost. Temperatura taljenja iznosi 2450 °C, a prag sinteriranja 1500 °C [86]. Vatrostalnu osnovu čini mineral cirkon koji je po sastavu cirkonijev silikat (ZrSiO_4) sa ~ 66 % ZrO_2 i 33 % SiO_2 [86]. Mineral ima visoku gustoću koja iznosi $4,7 \text{ kg/dm}^3$, zbog čega je potreban manji dodatak veziva u odnosu na kvarcni pijesak. Pored vrlo niske linearne ekspanzije (slika 11.12), ima i najnižu toplinsku ekspanziju i to bez alotropskih modifikacija. Toplinska ekspanzija na 900 °C je svega 0,25 % u odnosu na 1,56 % za kvarcni pijesak kod iste temperature [13]. Cirkonski pijesak ima visoku toplinsku vodljivost (~ 4 puta veći intenzitet odvođenja topline od kvarcnog pijeska), zbog čega može djelovati kao hladilo u kalupu. Zahtijeva manje veziva od ostalih pijesaka jer su njegova zrna zaobljena. Kompatibilan je sa svim poznatim vezivima, organskim i anorganskim. Cirkonski se pijesak upotrebljava sa sitnijom veličinom zrna koja su visoko vatrostalna te zbog toga ima i visoku otpornost na penetraciju metala. Od 1950. godine cirkonski pijesak je našao povećanu primjenu u ljevaonicama čelika, ali se danas sve više zamjenjuje jeftinijim materijalima, posebno kromitnim pijeskom. Upotrebljava se samo u kalupima gdje postoje visoki metalostatički tlakovi i oštri temperaturni uvjeti, tj. kod većih debelostjenih odljevaka i visokih temperatura lijevanja.

11.4.1.2 Svojstva ljevaoničkih pijesaka

Broj finoće zrna prema AFS-u. Različiti pijesci mogu imati različiti oblik i veličinu zrna. U tablici 11.1 je prikazana klasifikacija ljevaoničkih pijesaka na osnovi veličine njihova zrna. Veći broj finoće zrna znači da je pijesak sitniji.

Tablica 11.1. Klasifikacija ljevaoničkih pijesaka prema veličini njihova zrna [24]

Klasifikacija	Veličina zrna, μm	GFN*
Grubi pijesak	700 – 350	20 – 40
Srednje grubi pijesak	350 – 230	40 – 60
Fini pijesak	230 - 125	60 - 120

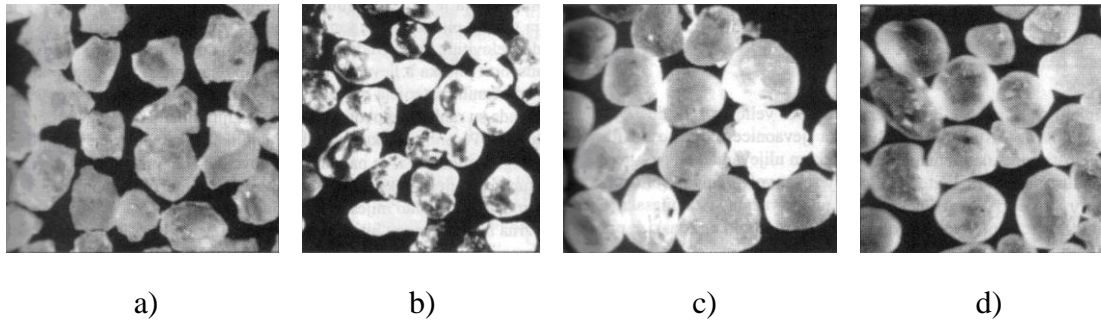
*GFN (engl. *Grain Fineness Number*) – broj finoće pješčanog zrna prema AFS-u (engl. *American Foundry Society*).

Broj finoće zrna pijeska određuje prosječnu veličinu čestica pijeska. Finiji pijesak općenito osigurava dobivanje glatkije površine odljevka, ali ako je suviše sitan sprječava prolazak plinova koji nastaju tijekom ulijevanja u kalup. Posljedice toga mogu biti razne ljevarske greške, npr. hladan zavar i poroznost. Ljevaonički pijesci kod kojih broj finoće zrna iznosi od 40 do 50 GFN upotrebljavaju se za izradu kalupa za lijevanje većih odljevaka ili u slučajevima gdje se zahtijeva visoka propusnost kalupne mješavine [24]. Za izradu kalupa za lijevanje malih odljevaka mogu se upotrijebiti ljevaonički pijesci kod kojih broj finoće zrna iznosi 65 GFN ili više [24].

Veličina zrna. Zrnatost pijeska ima naglašen utjecaj na kvalitetu odljevka. Sitnije zrno rezultira većom otpornošću na eroziju i penetraciju taline u kalup. Na taj način postiže se bolja površina odljevka. Veličina zrna ljevaoničkog pijeska također utječe na sposobnost oblikovanja kalupne mješavine i njenu postojanost na visokim temperaturama. Pijesak koji sadrži gruba zrna teže se oblikuje tijekom kalupljenja, ali je postojaniji na višim temperaturama. Veličina zrna pijeska ne smije prelaziti 0,75 mm [87].

Razdioba veličine čestica. Premda AFS definira prosječnu veličinu zrna, razdioba zrna po veličini znatno utječe na svojstva kalupa i odljevaka. Npr. mješavina zrna i prašine može obzirom na prosječnu veličinu zrna po AFS-u (GFN) biti prihvatljiva, ali bi taj udio prašine mogao biti štetan za kakvoću odljevaka. Najpogodnija je razdioba zrna kada se više od 70 % cjelokupne količine pijeska nalazi na tri uzastopno raspoređena sita po dimenzijama otvora [62]. Razdioba na više od tri sita može negativno utjecati na propusnost kalupne mješavine za plinove.

Oblik zrna. AFS klasificira strukturu pješčanih zrna u četiri oblika: uglata, blago uglata, miješana ili spojena i zaobljena (slika 11.13) [13, 88]. Svaki od tih oblika ima osobit utjecaj na svojstva kalupne mješavine, pa ljevači moraju poznavati njihove prednosti i nedostatke.



Slika 11.13. Oblici pješčanih zrna prema AFS-u: a) uglata, b) blago uglata, c) spojena, d) zaobljena [88]

Pijesak u kojem prevladava udio uglatih zrna ima veću površinu i teže je postići jednoličnu debljinu glinenog ovoja oko takvih zrna. Potreban je veći dodatak veziva, a za postizanje jednolične debljine glinenog sloja treba utrošiti više energije tijekom miješanja kalupne mješavine. Međusobno slaganje uglatih zrna tijekom sabijanja kalupa takvo je da kalupi imaju manju gustoću. To je povoljno obzirom na propusnost za plinove. Međutim, veće ometanje sabijanja kalupa može prouzročiti različite ljevarske pogreške, kao što su penetracija metala u kalup i pomicanje kalupne stijenke. Uglata zrna lakše se drobe, što dovodi do većeg udjela prašine u pijesku.

S pijeskom u kojem prevladavaju blago uglata zrna postižu se svojstva pješčane mješavine slična onima s uglatim zrnom. Višekratnom uporabom takvog pijeska oštrije se izbočine na zrnima smanjuju te zrna i šupljine među njima poprimaju sve više zaobljen oblik. S blago uglatim zrnima postiže se bolja sabijenost kalupa i potreban je manji dodatak veziva u odnosu na mješavine koje su izrađene od ljevaoničkog pijeska sa uglatim zrnima.

Spojena zrna predstavljaju slučaj kada je više zrna vezano u grudu. Zgrudani oblik pijeska je najnepoželjniji za uporabu u ljevaonicama. Dobavljač tijekom ispiranja takvog pijeska ispiru samo vanjski dio gruda, a ne uklanja vezivo koje održava grude cjelovitim. Te se grude često tijekom dopreme do ljevaonice ili pri pneumatskom transportu pijeska u ljevaonice drobe, pa ljevaonica rabi i neisprane dijelove gruda. Tako od veznih materijala tj. gruda nastaje znatan udio prašine, a prašine nastale drobljenjem su rahle i nepovoljne za adheziju gline.

Zaobljena zrna po obliku su kuglasta ili jajolika. Takav oblik pješčanih zrna ima u usporedbi s drugim oblicima zrna najmanju površinu i najmanji utrošak veziva, te pri istom stupnju sabijenosti kalup ima najveću gustoću. To ljevaonici omogućuje da u kraćem vremenskom periodu pravilno izmiješa vezivo sa pijeskom. Zaobljena zrna najdulje mogu biti u procesu proizvodnje i omogućuju visoko iskorištenje pijeska tijekom regeneracije.

Vatrostalnost pijeska predstavlja njegovu otpornost prema visokim temperaturama. Ovisi o sastavu pijeska i prisutnim nečistoćama. Nedovoljna vatrostalnost rezultira sinteriranjem ili taljenjem zrna pijeska u dodiru s tekućim metalom, što u konačnici vodi ka greškama na odljevcima (zapečenje kalupne mješavine na odljevku). U proizvodnji se smije primijeniti samo čisti i pripremljeni ljevaonički pijesak čija su sva svojstva unutar specificiranih granica jer kvaliteta pijeska utječe na kvalitetu odljevaka. Nečistoće snižavaju temperaturu taljenja i sinteriranja kaluparskog pijeska. Prema tome, udio nečistoća, kao što je natrij, kalij i kalcij, mora biti što manji kako u novom tako i kružnom (tj. povratnom) pijesku. Kružni (tj. povratni) pijesak je pijesak koji se izdvaja iz upotrijebljene kalupne mješavine postupkom regeneracije i ponovo vraća u proces izrade kalupa.

Koeficijent toplinskog širenja pijeska je usko povezan s pojavom pukotina na kalupima. Što je koeficijent širenja pijeska pod utjecajem temperature veći, to je i mogućnost pojave pukotina na kalupu veća. Kvarcni pijesak ima najveći koeficijent toplinskog širenja, zbog čega se mješavini moraju dodavati posebni aditivi.

Propusnost pijeska za plinove može se iskazati kao apsolutni broj (bez dimenzije) (uređaji starije konstrukcije) ili u $\text{cm}^3(\text{min})/\text{cm}^2$ te $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$. Minimalna propusnost suhog pijeska ne bi smjela biti manja od 100 [62].

11.4.2 Kaluparske gline

Čisti pijesak je sipak i kad bi se jednokratni kalupi oblikovali isključivo od njega ne bi mogli zadržati oblik. Da bi se dobila potrebna kohezivnost, odnosno čvrstoća kalupne mješavine potrebno je u pijesak umiješati odgovarajuće vezivo. Kao vezivo za izradu kalupnih mješavina koje se oblikuju sabijanjem služi uglavnom kaluparska glina. To je prirodni materijal koji veže pojedina zrna pijeska i daje mješavini čvrstoću i plastičnost.

Gline su hidratizirani aluminosilikati različitog mineraloškog sastava. One se u prirodi nalaze kao sitno disperzirane kristalne čestice veličine $< 0,02$ mm, odnosno $20 \mu\text{m}$ [87].

Po načinu raspodjele gline oko zrna ljevaoničkog pijeska razlikuje se vezana i slobodna glina. Vezana glina obavija pješčano zrno dok se slobodna glina smješta u grudama između zrna. Što je glina jednoličnije raspoređena oko zrna pijeska, to je veća propusnost kalupne mješavine za plinove. Čvrstoća mješavine se povećava s povećanjem udjela gline.

Da bi se dobila svježa kalupna mješavina adekvatne čvrstoće i propusnosti, količinu gline treba pravilno odrediti. Da bi se to moglo učiniti, treba poznavati osnovna svojstva kaluparskih gline. Za postizanje adekvatne čvrstoće i propusnosti za plinove kalupa uz što manji dodatak gline, treba koristiti specijalne vrste gline i poznavati njihova svojstva.

11.4.2.1 Minerali glina

Gline su mineralne mješavine sitnih kristaličnih čestica. Na osnovi strukture i sastava mogu se klasificirati na [86, 87]:

- **kaolinitne gline,**
- **ilitne gline,**
- **montmorilonitne gline,**
- **glaukonitne gline i**
- **atapulgitne gline.**

Sve gline, bez obzira na vrstu, kad se pomiješaju s vodom razvijaju adhezivna i kohezivna svojstva. Veličina adhezivnih i kohezivnih svojstava ovisi o količini vode. Kad je udio vode nizak pospješuju se kohezivna svojstva, a čestice gline nastoje se međusobno lijepiti prije nego prijanjati na zrna pijeska. Pri većim dodacima vode javlja se obrnuti proces.

Odnos glina-voda od ključne je važnosti za optimizaciju svojstava gline. U smjesi pijesak–glina apsorbira se voda u glini do nekog maksimalnog kapaciteta. Voda dodana preko te optimalne količine smatra se slobodnom vodom u sustavu i ona ne pridonosi vezivanju čestica mješavine. Zbog toga gline s previsokim udjelom vode daju nisku čvrstoću mješavine.

Kako se količina vode smanjuje prema optimalnom udjelu, pojavljuje se skokovito povećanje čvrstoće.

Različite gline, kao rezultat njihovih različitih fizikalnih i strukturnih karakteristika imaju različite sposobnosti vezivanja, trajnost i druga značajna svojstva.

Kaolinitne gline. Glavni sastojak tih glina je kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) i njegove modifikacije [86, 87, 89]. U pogledu kemijskog sastava glavni sastojci kaolinske gline su Al_2O_3 i SiO_2 . Nosilac vatrostalnosti je Al_2O_3 . Ako njegov udio iznosi od 35 do 38 %, ona se smatra kvalitetnom i naziva se vatrostalnom glinom. Sposobnost vezivanja je osrednja zbog čega se kaolinitne gline moraju dodati u većoj količini. To naravno smanjuje propusnost kalupne mješavine. Kaolinitne gline mogu se upotrijebiti kao vezivo za izradu kalupnih mješavina za lijevanje velikih čeličnih odljevaka zbog svoje visoke vatrostalnosti.

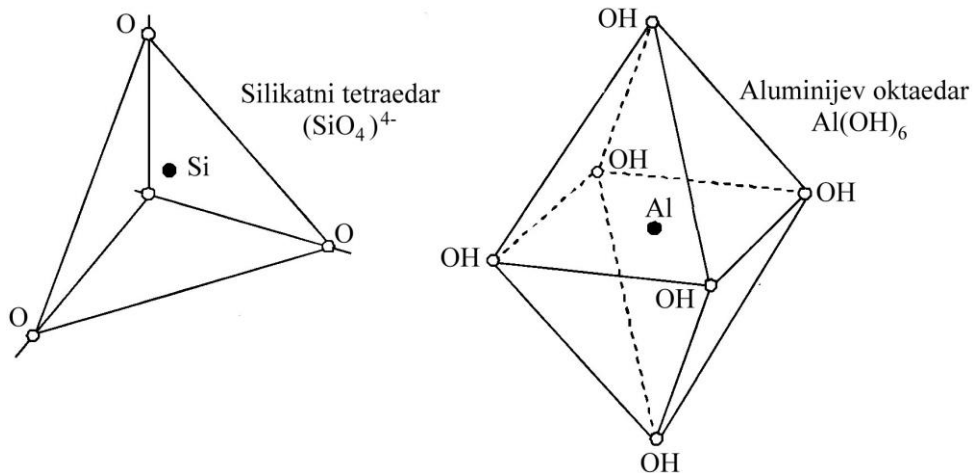
Ilitne gline smatraju se običnim glinama koje nastaju u alkalnim sredinama [86]. Iz tog razloga razlikuje se njihov sastav od kaolinitnih glina po većem udjelu alkalija (> 6 %), kao i većem udjelu Fe_2O_3 , CaO i MgO . Udio Al_2O_3 im je znatno manji nego kod vatrostalnih kaolinitnih glina te im je stoga i vatrostalnost niža. Ilitne gline ne upotrebljavaju se za izradu svježih kalupnih mješavina zbog svoje relativno slabe sposobnosti vezivanja.

Montmorilonitne gline. Mineral montmorilonit je dobio naziv 1847. godine po nalazištu te gline u blizini mjesta Montmorillon (Francuska). Sastav montmorilonita je $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot (1 + x)\text{H}_2\text{O})$ [86]. Vrsta gline koja se najčešće upotrebljava za vezivanje svježih kalupnih mješavina, a koja je uglavnom sastavljena od minerala montmorilonita naziva se **bentonit**. Naziv potječe od mjesta Fort Benton u SAD-u gdje je započeto sa eksploatacijom te vrste gline za potrebe ljevarske industrije. Tehnološka svojstva i način primjene bentonitnih glina zavisi prije svega od udjela montmorilonita u njima. Gline sa više od 75 % montmorilonita nazivaju se bentoniti, a gline koje imaju od 45 do 75 % montmorilonita nazivaju se bentonitnim glinama [86]. Gline s manje od 45 % bentonita su obične gline. Bentoniti imaju najveću sposobnost vezivanja, stoga je tlačna čvrstoća i propusnost mješavine u svježem stanju s bentonitom relativno visoka. To daje glavnu prednost bentonitu u usporedbi s drugim glinama. Zbog velike sposobnosti vezivanja postiže se potrebna čvrstoća s daleko manje gline. Time se omogućuje veća propusnost za plinove jer je volumen slobodnih kanala između pijeska veći. Manja količina gline zahtijeva i manji udio vode za postizanje optimalnih svojstava mješavine. Prednost bentonita kao veziva je tolika da se danas gotovo u svim slučajevima samo ta vrsta gline upotrebljava za izradu kalupa od svježih kalupnih mješavina. Potrebna čvrstoća mješavine, odnosno kalupa može se postići i drugim vrstama gline uz veći dodatak, ali se u tom slučaju propusnost za plinove smanjuje na granicu upotrebljivosti, čime je rad znatno otežan.

Glaukonitne gline po strukturi i svojstvima slične su ilitnim glinama, ali im je veći udio atoma aluminija zamijenjen sa atomima željeza (udio Fe_2O_3 kreće se od 15 do 20 %) [86]. Sposobnost vezivanja im je razmjerno visoka.

11.4.2.2 Struktura i svojstva glina

Istraživanja kemijskih, fizikalnih i tehnoloških svojstava gline pokazala su da sastav i struktura gline imaju najveći utjecaj na uporabna svojstva gline. Utvrđeno je da gline imaju pločasti oblik čestica i kristalnu strukturu lamela s točno određenim rasporedom atoma u jediničnoj rešetki [3]. Pločasti kristali gline imaju slojevitou strukturu koja se sastoji od paketa paralelnih jedinstvenih kristalnih ploha. Svaki jedinični kristalni paket je građen od silicijevih tetraedara (SiO_4)⁴⁻ i aluminijevih oktaedara $\text{Al}(\text{OH})_6$ ³⁻ (slika 11.14). Kisikovi i OH⁻ ioni imaju sličan promjer, što omogućuje da se lako međusobno povežu.

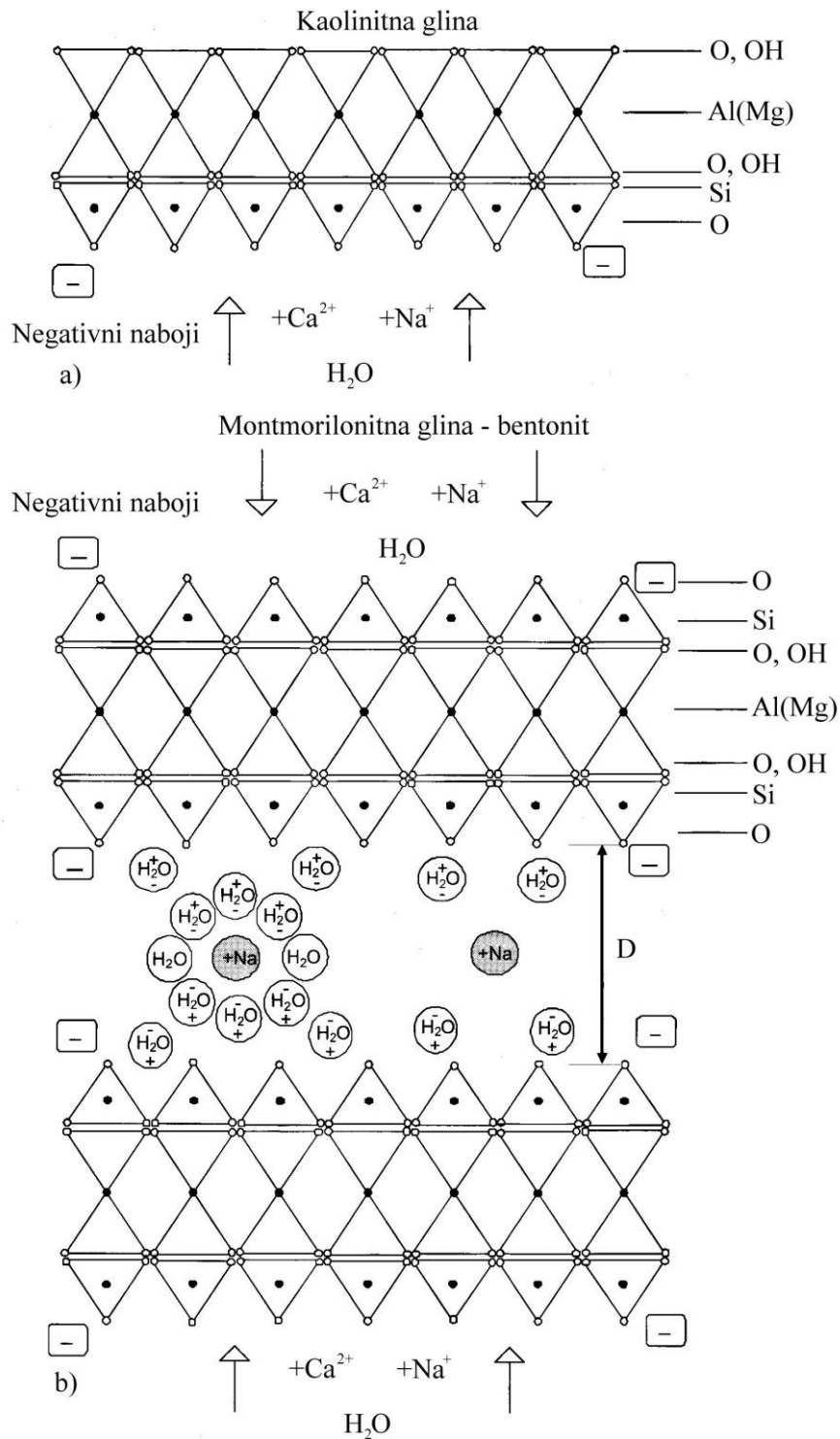


Slika 11.14. Osnovne strukturne jedinice gline [89]

Ako se radi jednostavnosti prikazivanja silicijev tetraedar označi simbolom Δ , a aluminijev oktaedar simbolom Σ , tada se jednostavnije može prikazati struktura kaolinitne i montmorilonitne gline (slika 11.15). Na slici 11.15 može se vidjeti da montmorilonitna glina pokazuje izrazitu simetričnost strukture. Molekule vode pomoću iona natrija i kalcija povezuju dvije lamele gline.

Slojevi čestica gline u kaolinitnoj glini imaju stalne međusobne razmake i ne dolazi do bubrenja. Za razliku od kaolinitne gline, montmorilonit ima sposobnost bubrenja vezanjem molekula vode između lamela gline.

Bentonit nije električki neutralan, odnosno na površini svake lamele gline postoji električni naboj. Zbog toga privlače molekule vode i katione natrija, kalcija i dr. Ioni natrija i kalcija upravljaju rasporedom molekula vode između lamela gline [89]. Količina adsorbirane vode određuje vezivnu sposobnost gline. Molekule vode ulaze između lamela gline, zbog čega dolazi do povećanja razmaka između lamela, odnosno bubrenja gline što rezultira povezivanjem zrna kaluparskog pijeska. Očito je da ostvarena čvrstoća kalupa ovisi o količini vode te da postoji određeni optimum. Ako je dodatak vode previsok, dio vode ostat će slobodan, odnosno neće se adsorbirati između lamela gline, zbog čega će se značajno smanjiti čvrstoća kalupa. Ako je nedovoljna količina vode, bubrenje gline će biti manje, a time i čvrstoća kalupa. Pored toga, u tom slučaju prevladavaju kohezivna svojstva gline, što znači da će se čestice gline nastojati međusobno povezivati, a ne sa zrnima pijeska. Obzirom da je tijekom lijevanja prisutna nehomogena raspodjela vlage unutar kalupa, kao vezivo je pogodnija ona glina koja pri različitim udjelima vode održava zadovoljavajuću čvrstoću, u odnosu na glinu koja ima vrlo visoku čvrstoću samo u uskim granicama udjela vode [89]. Zbog toga su povoljniji **Na-bentoniti** od **Ca-bentonita** (slika 11.16). Zbog dobre sposobnosti vezivanja, u svježju kalupnu mješavinu treba dodati svega 4 do 5 % Na-bentonita i 2,5 do 3,5 % vode da bi se postigla odgovarajuća svojstva mješavine [87].

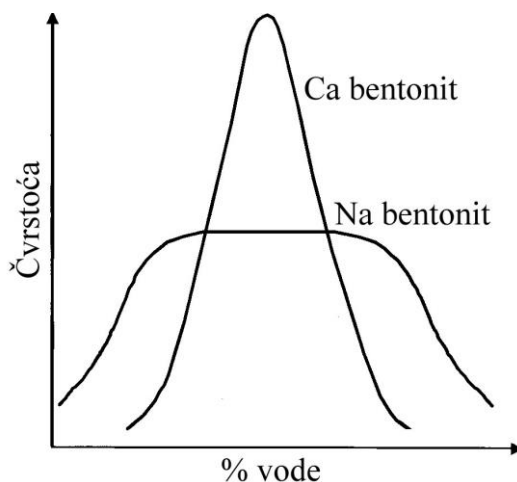


Slika 11.15. Shematski prikaz strukture kaolinitne (a) i montmorilonitne (b) gline (bentonita) [89]

Bentonit je u prirodnom stanju najčešće zasićen ionima kalcija i magnezija, a rjeđe ionima natrija [86]. Međutim, Ca-bentonit nema tako veliku moć bubrenja [88]. Aktivacijom bentonita zamjenjuju se Ca^{2+} i Mg^{2+} ioni sa Na^+ ionima [86, 87]. U tu svrhu dodaje se Ca-bentonitu natrijev karbonat (Na_2CO_3) za vrijeme pripreme sirovog bentonita, a ponekad i za vrijeme pripreme kalupne mješavine:



Aktivirani Na-bentonit ima veću sposobnost bubrenja od sirovog Ca-bentonita, zatim do viših temperatura zadržava plastična svojstva, a karakteriziraju ga i više sposobnosti vezivanja uz istovremeno manju osjetljivost na vlagu.



Slika 11.16. Ovisnost čvrstoće o udjelu vode u slučaju primjene Na- i Ca-bentonita [89]

Promjenjivost kationa može se odrediti jednostavnim ispitivanjem, a izražava se kao kapacitet kationske izmjene ili skraćeno CEC vrijednost. Određivanje kapaciteta kationske izmjene koristi se danas za određivanje vrste gline. Prema specifikacijama, da bi se glina klasificirala kao bentonit, mora imati CEC vrijednost veću od 70 meq/100 g gline.

Za određivanje kapaciteta kationske izmjene (CEC vrijednost) i aktivnog udjela bentonita koristi se danas ispitivanje ili test metilenskim modrilom. Što je veća adsorpcija metilenskog modrila to je veći kapacitet kationske izmjene, odnosno to je veći udio montmorilonita u glini, a time se ujedno postiže veća tlačna čvrstoća i propusnost mješavine.

Zbog simetrične strukture i vode adsorbirane između lamela, bentonitna glina dobro obavija zrna ljevaoničkog pijeska. Da bi se postigla određena čvrstoća kalupa treba dodati manje bentonita nego u slučaju primjene ostalih vrsta gline. To se povoljno odražava na propusnost kalupne mješavine.

Sve gline postaju plastične i razvijaju adhezivna svojstva (tj. sposobnost povezivanja) ako se pomiješaju sa pravilnom količinom vode. Sve se gline također mogu osušiti i ponovo učiniti plastičnima dodatkom vode, ako temperatura sušenja nije previsoka. Ako je temperatura previsoka, glina se ne može ponovo dovesti u plastično stanje dodatkom vode i u tom slučaju se naziva „**mrtvom glinom**“. Takva glina ne djeluje kao vezivo, što znači da se pri svakom lijevanju gubi dio veziva i da treba dodati novu glinu pri ponovnoj upotrebi svježe kalupne mješavine. Ca-bentonit počinje prelaziti u mrtvu glinu ako je izložen temperaturi od 315 do 480 °C [3]. Na-bentonit počinje prelaziti u mrtvu glinu ako je izložen temperaturi od 480 do 705 °C, što znači da je toplinski stabilniji i da je potreban manji dodatak nove gline pri ponovnoj upotrebi kalupne mješavine [3].

11.4.3 Aditivi

Ljevaonički pijesci miješaju se sa aditivima da bi im poboljšala svojstva [3]. Ako se pravilno dodaju, aditivi mogu umanjiti nedostatke kvarcnog pijeska, kao što je visoka toplinska ekspanzija. Pored toga, kvarcni pijesak reagira s tekućim željezom, a nastali spoj čvrsto se veže sa površinom odljevka, odnosno zapeče se na površinu odljevka. Osim toga, može doći do stvaranja grubog sloja sastavljenog od pijeska i metala na površini odljevka.

Kao aditivi upotrebljavaju se materijali na osnovi ugljika (npr. ugljena prašina), celuloze i žitarice. Aditivi pomažu u kontroli ekspanzije pijeska, poboljšavaju površinu odljevka, smanjuju osjetljivost na vlagu, te u određenim slučajevima stvaraju redukcijsku atmosferu u kalupu. U ljevaonicama željeznih ljevova obično se upotrebljava ugljena prašina, a u ljevaonicama čeličnih ljevova obično se upotrebljavaju razne žitarice. Ugljena prašina nije pogodna za ljevaonice čeličnih ljevova jer bi zbog vezanja ugljika iz ugljene prašine došlo do povećanja udjela ugljika u čeliku. U ljevaonicama neželjeznih ljevova obično se upotrebljavaju celuloze i žitarice.

Žitarice se dodaju da bi se regulirala ekspanzija zrna pijeska na povišenim temperaturama, povećala sposobnost deformacije mješavine u svježem stanju i smanjila rahlost mješavine [3, 13, 62, 90]. U tu svrhu najčešće se dodaje kukuruzno, pšenično ili raženo brašno. Na povišenim temperaturama izgore, zbog čega ostaju slobodna mjesta za ekspanziju zrna kvarcnog pijeska. Zajedno s vodom žitarice tvore tjestastu masu, odnosno djeluju kao vezivo, čime se osigurava plastičnost i povećava krutost mješavine. Dodatak u suvišku otežava sabijanje kalupa, povećava ljepljivost, otežava istresanje iz kalupa i povećava udio plinskih grešaka na odljercima (jer su hlapljive), a može doći i do stvaranja gruda kalupne mješavine tijekom miješanja u mješaču.

Celuloze, kao što su drveno brašno, zobene ljuske, rižine ljuske, ljuske od kikirikija ili ljuske od oraha dodaju se radi regulacije ekspanzije zrna pijeska na povišenim temperaturama, proširenja područja optimalnog dodatka vode, povećanja raspadljivosti kalupa, poboljšanja tečljivost kalupne mješavine tijekom kalupljenja te poboljšanja istresljivosti [3, 13, 62, 90]. Na povišenim temperaturama izgore, zbog čega ostaju slobodna mjesta za ekspanziju zrna kvarcnog pijeska. Na visokim temperaturama stvaraju amorfnu ugljik, tj. čađu koja se taloži na graničnoj površini kalup/tekući metal čime se sprječava kvašenje kalupa tekućim metalom ili troskom. Dodatak u suvišku čini kalup krhkijim (lomljivim), povećava eroziju i pucanje kalupa te olakšava ispiranje kalupa talinom i nastanak plinskih greški.

Materijali na osnovi ugljika kao što su ugljena prašina (fini bituminozni ugljen), asfalt ili naftni destilati, dodaju se radi lakšeg odvajanja odljevka od kalupne mješavine, reguliranja ekspanzije zrna pijeska na povišenim temperaturama, smanjenja hrapavosti površine odljevka i sprječavanja zapečenja kalupne mješavine na površini odljevka [3, 13, 62, 90]. Promjene u ugljenom prahu koje se odvijaju sa porastom temperature dovode do smanjenja volumena čime nastaje prostor potreban za ekspanziju zrna pijeska. Negativna strana primjene ugljene prašine je povećanje udjela ugljika u površinskom sloju odljevka. Zbog toga se uglavnom primjenjuje u ljevaonicama željeznih ljevova da bi se dobila bolja površina odljevka.

Na visokim temperaturama odvija se pretvorba ugljene prašine u koks, pri čemu dolazi do ekspanzije. Zbog toga dolazi do popunjavanja praznina u kalupnoj mješavini na graničnoj površini kalup/tekući metal, čime se smanjuje mogućnost prodiranja taline u kalupnu mješavinu.

Materijali na osnovi ugljika stvaraju redukcijsku atmosferu u kalupu čime se smanjuje mogućnost oksidacije metala tijekom lijevanja te zapečenje kalupne mješavine na odljevku. Budući da atmosfera u kalupu nije oksidacijska već redukcijska, ne dolazi do stvaranja željeznog oksida koji bi potom reagirao sa SiO_2 u kvarcnom pijesku pri čemu bi nastao niskotaljivi željezni silikat, glavni uzrok zapečenja kalupne mješavine na površini odljevka.

Dodatkom materijala na osnovi ugljika može se poboljšati površina odljevka. Najbolji rezultati ostvareni su dodatkom ugljene prašine i smole (katrana). Ti dodaci u kalupnom materijalu razvijaju pri zagrijavanju ugljikovodične plinove koji se u redukcijskoj atmosferi razgrađuju i pri tome nastaje tzv. sjajni ugljik koji obavija zrna kalupne mješavine. Sloj sjajnog ugljika na površini kalupne mješavine sprječava reakciju između taline i kalupne mješavine te prodiranje taline u kalupnu mješavinu.

Budući da materijali na osnovi ugljika izgaraju u dodiru s talinom, u kalupu nastaje znatna količina plinova. Zbog toga prevelik dodatak može rezultirati nastankom raznih plinskih greški, otežanim stvaranjem veze između pijeska i gline te smanjenjem propusnosti za plinove. Odljevci mogu poprimiti plavu boju, posebno na tanjim presjecima.

11.4.4 Priprema svježe kalupne mješavine

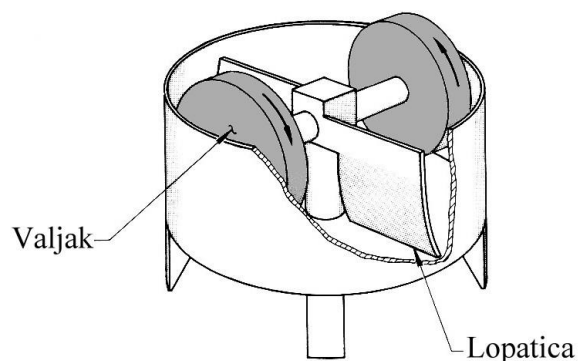
Prije izrade kalupa, ljevaonički pijesak, glina, voda i aditivi moraju se izmiješati u odgovarajućim mješačima. Miješanje je najvažnija operacija u pripremi svježe kalupne mješavine. Način i trajanje miješanja utječe na čvrstoću, propusnost i ostala svojstva kalupne mješavine. Miješanjem se zrna pijeska trebaju obaviti vezivom (glinom) te se treba dobiti homogena mješavina.

Obzirom da je površina zrna pijeska koju treba obložiti vezivom velika (npr. 400 kg srednje zrnatog pijeska ima površinu od $\sim 5000 \text{ m}^2$), potrebna je velika energija za miješanje. Ta se energija prenosi na kalupnu mješavinu preko lopatica ili valjaka u mješaču. Komponente kalupne mješavine miješaju se, gnječe i taru. Tijekom miješanja krute i tekuće komponente ravnomjerno se raspodjeljuju po čitavoj masi mješavine. Zbog tlačnih sila tijekom gnječenja ravnomjerno se raspodjeljuju gusti i viskozni materijali. Pijesak se tare, okrećući se i tlačeći u tankim slojevima. Pri tome se površina zrna pijeska prekriva tankim slojem veziva.

U ljevaonicama se danas uglavnom upotrebljavaju tri tipa mješača za pripremu svježe kalupne mješavine [32, 91]:

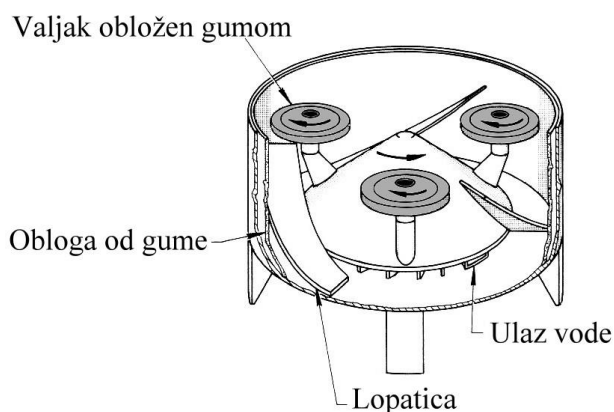
- **diskontinuirani mješači,**
- **kontinuirani mješači,**
- **intenzivni mješači.**

Diskontinuirani mješači (engl. *Batch-Type Muller*), premda po konstrukciji nisu novi, mogu proizvesti mješavinu visoke kvalitete (slika 11.17). Mješač se sastoji od posude u kojoj rotiraju dva vertikalno postavljena valjka s koljenastim osovinama. Zbog svoje mase, valjci tijekom rotacije miješaju, gnječe i taru pijesak i glinu. Mješač ima i lopatice pomoću kojih se pijesak miješa i usmjerava pod valjke. Taj tip mješača omogućuje konzistentnu proizvodnju mješavine, ali ne i kratko vrijeme miješanja.



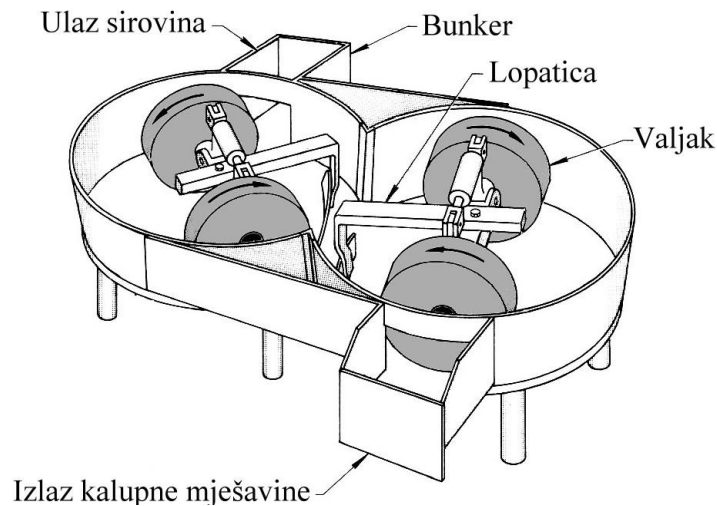
Slika 11.17. Osnovne komponente klasičnog diskontinuiranog mješača s vertikalno postavljenim valjcima [91]

Visokoproduktivne kalupilice zahtijevaju veliku količinu kalupne mješavine. Zbog toga su razvijeni brzi diskontinuirani mješači s horizontalno postavljenim valjcima (slika 11.18). Valjci su obloženi gumom i postavljeni su na koljenaste osovine. Komponente mješavine ubacuju se odozgo u mješač. Zbog djelovanja centrifugalne sile usmjeravaju se prema vertikalnoj stijenci mješača. Lopatice sakupljaju mješavinu sa dna mješača i dovode ju u položaj gdje je valjci obloženi gumom gnječe pritiskom na gumom obložene vertikalne stijenke mješača. Miješanje nije samo rezultat djelovanja valjaka. Količina mješavine u mješaču znatno utječe na učinak miješanja. Zbog toga u mješaču ne smije biti premalo mješavine, jer se u tom slučaju ne postiže maksimalna učinkovitost miješanja. Ta vrsta mješača pruža mogućnost hlađenja mješavine. Može se postaviti ventilator koji upuhuje zrak u donji dio mješača. Zrak tijekom cirkulacije kroz mješavinu odnosi sa sobom vlagu i izlazi na vrhu mješača. Dodatkom dovoljne količine vode pijesak se hladi, a nastalu vlagu odnosi zrak.



Slika 11.18. Osnovne komponente brzog diskontinuiranog mješača s horizontalno postavljenim valjcima [91]

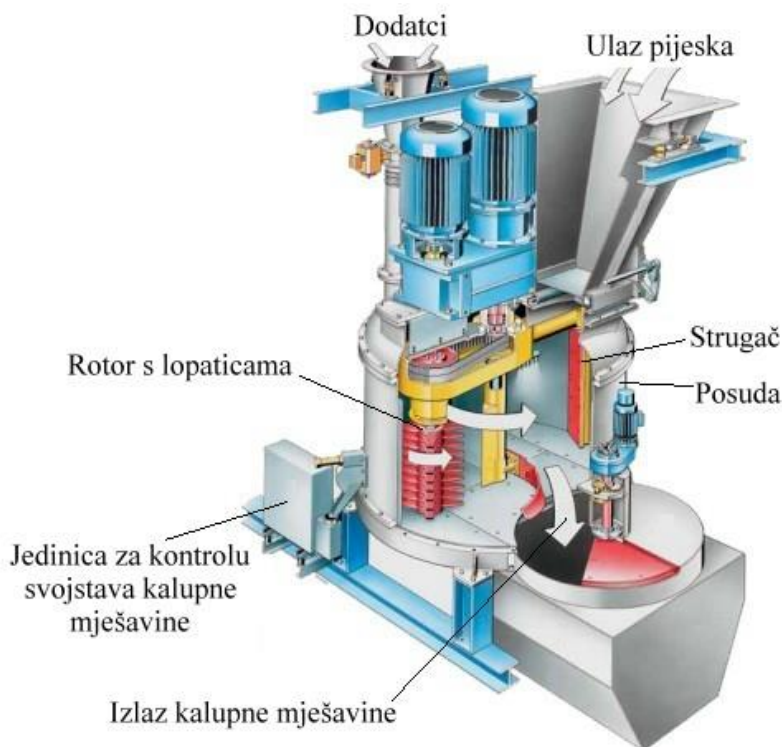
U **kontinuiranim mješačima** (engl. *Continuous Muller*) istovremeno i kontinuirano odvija se punjenje, miješanje i pražnjenje. Kontinuirani mješač sastoji se od dva međusobno povezana diskontinuirana mješača s vertikalno postavljenim valjcima (slika 11.19). Kretanje materijala u mješaču ima oblik položenog broja osam. Komponente kalupne mješavine ubacuju se u prvi mješač, a gotova kalupna mješavina izlazi van iz drugog mješača. Ovaj tip mješača razvijen je za kontinuiranu proizvodnju velike količine svježe kalupne mješavine.



Slika 11.19. Osnovne komponente kontinuiranog mješača [91]

Intenzivni mješači (engl. *Intensive Mixer*) novija su vrsta visokoučinskih mješača s kratkim vremenom miješanja. Poznati još pod nazivom turbinski i rotacijski mješači. Komponente potrebne za izradu svježe kalupne mješavine dodaju se u rotirajuću posudu u kojoj se nalazi rotor sa lopaticama. Rotor se kreće unutar posude i okreće oko svoje vertikalne osi. Može biti različite izvedbe, ovisno o zahtjevima. Da bi se izbjeglo nakupljanje mješavine na stranicama miksera postavljen je strugač koji usmjerava mješavinu od stranica prema centru miksera. Postoje i izvedbe sa stacionarnom posudom (slika 11.20). Pojedini mješači ovog tipa imaju dva rotora čime se ubrzava miješanje.

Intenzivni mješači mogu sadržavati opremu za uzimanje uzoraka mješavine iz miksera i ispitivanje njene sabitljivosti i čvrstoće. Rezultati ispitivanja sabitljivosti upotrebljavaju se za eventualni dodatak vode, dok se na osnovi rezultata mjerenja čvrstoće prema potrebi dodaje bentonit.



Slika 11.20. Intenzivni mješač DISA SAM [92]

11.4.5 Svojstva svježe kalupne mješavine

Svježa kalupna mješavina mora imati odgovarajuća svojstva da bi se mogli proizvoditi kvalitetni odljevci. Često zbog neadekvatnih svojstava kalupne mješavine nastaju različite greške na odljercima.

Tijekom ulijevanja taline u kalup, zrak i plinovi koji se razvijaju u kalupu moraju izaći iz kalupa. Ako zrak i plinovi ne mogu izaći iz kalupne šupljine dolazi do porasta tlaka i talina ne bi mogla ispuniti kalupnu šupljinu. Zbog toga je jedno od osnovnih svojstava kalupne mješavine propusnost, odnosno sposobnost propuštanja plinova iz kalupne šupljine u atmosferu.

Vrlo je važno da kalupna mješavina nakon sabijanja ima dovoljnu čvrstoću zbog djelovanja metalostatskog tlaka taline i erozije tijekom protjecanja taline kroz kalup. Nakon skrućivanja odljevka, prilikom vađenja iz kalupa potrebna je visoka istresljivost kalupne mješavine da bi se omogućilo lakše istresanje i čišćenje odljevka. Na povišenim i visokim temperaturama ne smije doći do taljenja zrna ljevaoničkog pijeska i povezivanja s talinom, što znači da kalupna mješavina mora imati odgovarajuću termostabilnost. Pored tih osnovnih svojstava, za izradu dobrih odljevaka značajan je i niz drugih svojstava, kao što su npr. što manje razvijanje plinova tijekom zagrijavanja kalupne mješavine, sposobnost kalupovanja itd.

Sva svojstva kalupne mješavine ne mogu biti na najvišoj razini, jer su neki zahtjevi u suprotnosti [89]. Npr. primjenom krupnijeg ljevaoničkog pijeska postiže se veća propusnost kalupne mješavine, dok sitniji pijesak omogućuje postizanje veće čvrstoće kalupa. Veći dodatak veziva rezultira većom čvrstoćom kalupa, ali negativno utječe na propusnost. Očito je da treba težiti ka optimalnim svojstvima kalupne mješavine.

Kohezivnost kalupne mješavine može se definirati kao sposobnost povezivanja zrna pijeska. Kao mjera kohezivnosti služi određivanje čvrstoće kalupne mješavine. Kalupi od svježe kalupne mješavine moraju biti otporni na eroziju koja potječe od udara i toka taline po površini kalupa tj. kalupne mješavine. Ako se pojedina zrna pijeska ne drže čvrsto tijekom toka taline, slobodna zrna biti će isprana u kalupnu šupljinu i uzrokovat će greške u odljevku. Zrna pijeska držat će se na mjestu kombinacijom dvaju mehanizama: djelovanjem uklinjavanja, pri čemu se zrna pijeska mehanički blokiraju susjednim zrnima i vezom glina-voda koja se uspostavlja između zrna. Kombinirano djelovanje tih dvaju mehanizama stvara osnovu za razvijanje čvrstoće mješavine.

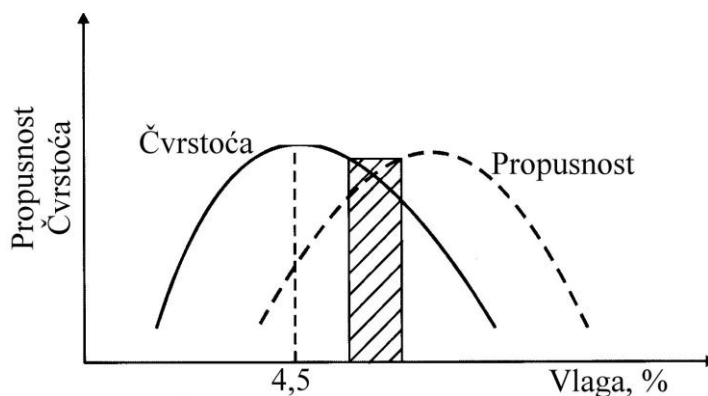
Čvrstoća je svojstvo kalupne mješavine da se odupre deformaciji uslijed statičkih i dinamičkih pritisaka taline pri ulijevanju i skrućivanju. Pri kvantificiranju čvrstoće mješavine može se razlikovati čvrstoća mješavine u vlažnom stanju i čvrstoća mješavine u suhom stanju. Svježa mješavina, nakon što se u nju doda odgovarajuća količina vode i aditiva mora imati adekvatnu čvrstoću i plastičnost za izradu i manipulaciju kalupa. Nakon ulijevanja taline u kalupnu mješavinu, dio mješavine u dodiru s rastaljenim metalom brzo gubi svoju vodu u obliku pare. Takva isušena mješavina mora imati adekvatnu čvrstoću da se odupre eroziji i metalostatskom tlaku taline, jer u protivnom može doći do pucanja i rušenja kalupa.

Na čvrstoću svježe kalupne mješavine utječe veličina i oblik zrna pijeska, količina gline, udio vlage, način pripreme mješavine, stupanj sabijenosti i temperatura.

Ispitivanja su pokazala da je čvrstoća svježih kalupnih mješavina veća kada je oblik zrna bliži kuglastom [89]. Uglata zrna rezultiraju manjom sabijenošću mješavine, a time i površinom dodira, što dovodi do smanjenja čvrstoće. Kalupna mješavina kod koje su zrna pijeska podjednaka veličine ima nižu čvrstoću od kalupne mješavine kod koje su zrna pijeska različite veličine.

Povećanjem količine gline povećava se čvrstoća svježe kalupne mješavine. Do porasta čvrstoće mješavine sa povećanjem količine veziva dolazi zbog povećanja površine dodira između zrna [89].

Čvrstoća svježe kalupne mješavine povećava se sa povećanjem njene sabijenosti [89]. S rastućim udjelom vlage povećava se čvrstoća do nekog maksimuma, a potom opada (slika 11.21). Optimalni udio vlage ovisi o udjelu gline u kalupnoj mješavini.

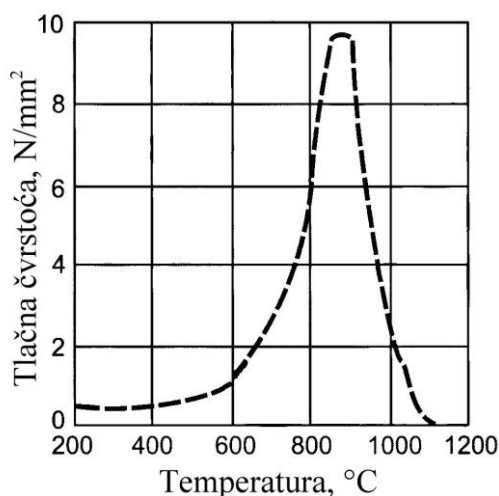


Slika 11.21. Utjecaj udjela vlage na čvrstoću i propusnost svježe kalupne mješavine koja sadrži 6 % bentonita [89]

Na slici 11.21 može se vidjeti da čvrstoća svježe kalupne mješavine u koju je dodano 6 % bentonita raste s povećanjem udjela vlage i maksimum doseže pri 4,5 % vlage. Daljnje povećanje udjela vlage rezultira smanjenjem čvrstoće. Isto vrijedi i za propusnost, s razlikom da se maksimalna propusnost postiže kod nešto višeg udjela vlage nego od prethodno navedenog. Šrafirano područje na slici 11.21 predstavlja optimalne udjele vlage koji u ovom slučaju rezultiraju dovoljno visokom čvrstoćom uz zadržavanje dovoljno visoke propusnosti.

Način pripreme, odnosno redoslijed dodavanja sastojaka ljevaoničkom pijesku i miješanje također utječu na čvrstoću svježe kalupne mješavine [89]. Važno je da se sastojci dodaju redoslijedom koji omogućuje da se što bolje rasporede po površini zrna pijeska. To rezultira optimalnom čvrstoćom kalupne mješavine kako u vlažnom, tako i u suhom stanju. Bolja izmiješanost mješavine rezultira ravnomjernijom raspodjelom čvrstoće.

Temperatura ima značajan utjecaj na čvrstoću svježe kalupne mješavine (slika 11.22).

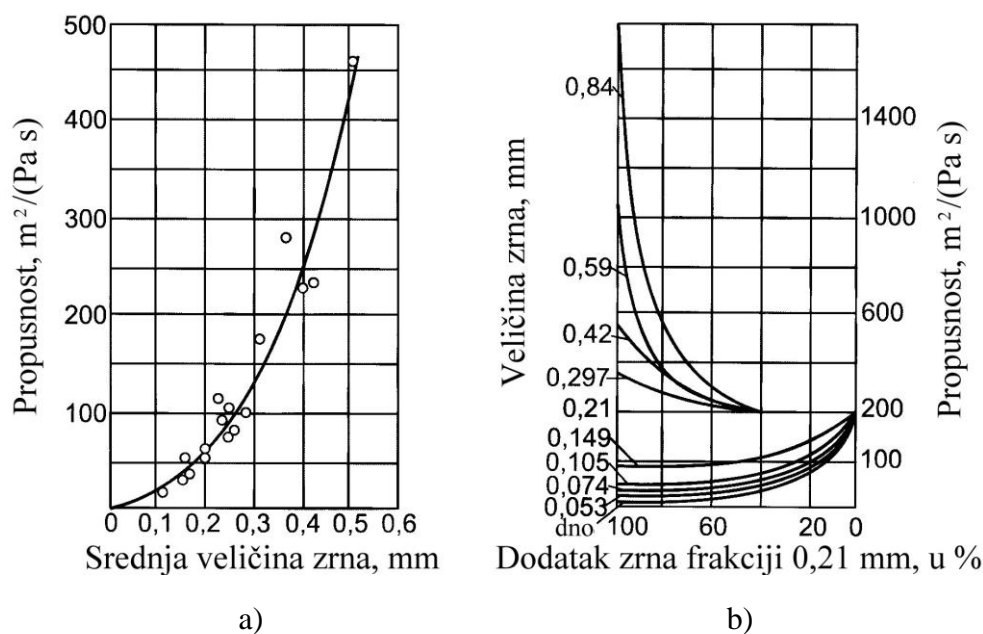


Slika 11.22. Utjecaj temperature na čvrstoću svježe kalupne mješavine s 9 % bentonita [89]

Na slici 11.22 može se vidjeti da čvrstoća blago raste do 600 °C, a nakon toga naglo se povećava i dostiže maksimum na ~ 900 °C. Daljnji porast temperature rezultira ostrim padom čvrstoće jer dolazi do promjena u vezivu.

Propusnost kalupne mješavine. Toplina taline uvjetuje da se kod svježe kalupne mješavine oslobađa velika količina vodene pare i drugih plinova. Također, kao rezultat toplinskog raspada veziva i drugih aditiva dolazi do stvaranja plinova i pare. Ako propusnost kalupne mješavine nije dovoljna da omogući izlaz nastalih plinova porast će tlak plina u kalupu i doći će ometanja toka taline ili čak do vezanja plina u talinu (tj. napljinjenosti). Iz toga razloga kalup mora biti propustan tj. porozan da omogući stvorenoj vodenoj pari i nastalim plinovima da kroz kalupnu mješavinu iziđu van u atmosferu.

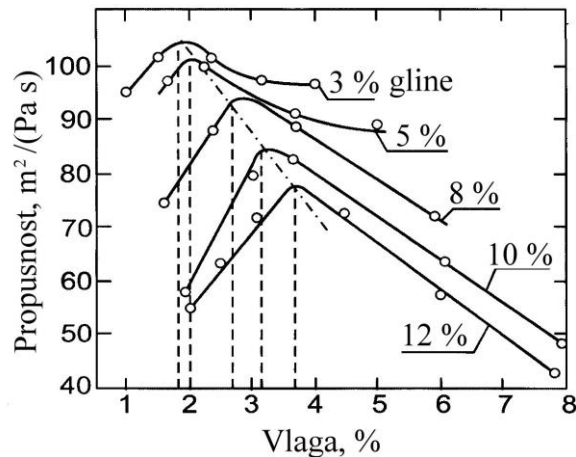
Veličina i oblik zrna pijeska te granulometrijski sastav pijeska značajno utječu na propusnost kalupne mješavine. Propusnost mješavine za plinove povećava se s povećanjem veličine zrna pijeska (slika 11.23a). Propusnost kalupne mješavine bit će veća ako sadrži zrna pijeska podjednaka veličine (slika 11.23b). Što je oblik zrna pijeska bliži kuglastom veća je i propusnost kalupne mješavine.



Slika 11.23. a) utjecaj veličine zrna pijeska na propusnost svježe kalupne mješavine koja sadrži 8 % bentonita (odnos vode i bentonita = 0,5), b) utjecaj dodatka zrna pijeska različitih veličina na propusnost pijeska sa veličinom zrna od 0,21 mm [89]

Vlažnost mješavine također utječe na propusnost. S porastom udjela vlage do određenog nivoa raste propusnost, a nakon toga daljnje povećanje udjela vlage rezultira padom propusnosti (slika 11.24). Zbog toga za svaku mješavinu treba odrediti optimalnu vlažnost u pogledu propusnosti i čvrstoće (slika 11.24).

Količina i kvaliteta dodanog veziva (gline) ima značajan utjecaj na propusnost mješavine. U slučaju primjene gline s niskim vezivnim svojstvima, porast njenog udjela u kalupnoj mješavini rezultira padom propusnosti. Ako se za izradu kalupa upotrijebi vezivo s boljim vezivnim svojstvima, kao što je bentonit, povećanjem udjela takvog veziva povećava se propusnost svježe kalupne mješavine kod optimalne vlažnosti, što je rezultat smanjenja gustoće mješavine [89].



Slika 11.24. Promjena propusnosti svježe kalupne mješavine ovisno o udjelu vlage [89]

Sabijanje utječe na gustoću kalupne mješavine, a samim tim i na njenu propusnost. Gustoća, odnosno sabijenost kalupne mješavine nije jednaka u svim dijelovima kalupa. Zbog toga se i propusnost kalupne mješavine razlikuje u pojedinim dijelovima kalupa. Osim toga, razlikuje se i od propusnosti koja je izmjerena laboratorijskim ispitivanjem. Jače sabijeni dijelovi kalupa imaju veću gustoću i manju propusnost i obrnuto.

Temperatura na kompleksan način utječe na propusnost kalupnih mješavina. Zbog povećanja temperature u kalupnoj šupljini tijekom ulijevanja taline u vlažni kalup dolazi do isparavanja vode, stvaranja zone visoke vlažnosti u dubini kalupa, te smanjenja propusnosti [89].

Smanjena propusnost kalupne mješavine može uzrokovati plinske greške na i u odljevcima. Velika propusnost može potjecati od suviše krupnog pijeska. U tom slučaju talina može ući u prostor između zrna pijeska.

Plastičnost kalupne mješavine je svojstvo mješavine da se može oblikovati. Plastičnost raste s povećanjem udjela gline i smanjenjem veličine zrna pijeska. To svojstvo je naročito važno pri ručnom kalupljenju, odnosno oblikovanju mješavine sabijanjem. Plastičnost se ocjenjuje stiskanjem uzorka mješavine u ruci, pri čemu uzorak treba zadržati konture oblika šake (potrebno je odgovarajuće iskustvo).

Toplinska stabilnost kalupne mješavine. Toplina odljevka uzrokuje širenje ili ekspanziju površinskog sloja kalupne mješavine. Ako mješavina pri naglom zagrijavanju nije toplinski stabilna, površina kalupa može popucati uzrokujući greške na odljevku.

Vatrostalnost kalupne mješavine. U kalupnim mješavinama vatrostalnost se manifestira pojavama omekšanja, taljenja i stapanja ili sinteriranja. Za ocjenu kaluparskog pijeska u pogledu otpornosti na djelovanje visokih temperatura primjenjuje se temperatura sinteriranja. To je najniža temperatura pri kojoj nastaje stapanje čestica ljevaoničkog pijeska. Približno se može uzeti da pijesak za izradu mješavine za lijevanje čeličnih ljevova mora imati temperaturu sinteriranja ≥ 1400 °C, za sivi lijev ta temperatura treba biti ≥ 1350 °C, a za slitine bakra ≥ 1250 °C.

Sabitljivost kalupne mješavine definira u kojoj mjeri je moguće sabijanje mješavine u kalupu, što utječe na kompaktnost kalupa i prilagođavanje obliku modela. Budući da značajno utječe na kvalitetu kalupa, konstantno se kontrolira i održava u propisanim granicama. Željeni stupanj sabitljivosti mješavine obično se kreće oko 40 % u slučaju

proizvodnje odljevaka od željeznih ljevova i ljevova na osnovi obojenih metala [91]. Ljevaonice čelika trebaju kalupne mješavine nešto veće sabitljivosti. Sabitljivost u velikoj mjeri ovisi o udjelu vlage u mješavini.

Istresljivost kalupne mješavine je sposobnost mješavine da se nakon skrućivanja i hlađenja odljevka lako istresa iz kalupa. Zagrijane mješavine ponekad postaju kompaktne i vrlo tvrde te se teško odvajaju od odljevka. Općenito se može reći da je istresljivost mješavine toliko bolja ukoliko je niža čvrstoća u trenutku istresanja.

Trajnost kalupne mješavine. Da bi se smanjili troškovi proizvodnje odljevaka, kalupna mješavina mora se moći više puta upotrijebiti. To svojstvo kalupne mješavine posebno je ovisno o upotrijebljenoj glini obzirom da ona diktira trajnost mješavine. Glina se može učiniti plastičnom i razviti adhezivna svojstva kad se miješa s odgovarajućom količinom vode. Glina se može osušiti i ponovno učiniti plastičnom dodatkom vode, osiguravajući da temperatura sušenja nije previsoka. Pečenjem gline gubi se to reverzibilno svojstvo.

Svojstva svježe kalupne mješavine ispituju se prije izrade kalupa na odgovarajućim uređajima prema propisanim procedurama. Ne ispituju se uvijek sva svojstva. Obično se svaki sat vremena ispituje temperatura mješavine, udio vlage, sabitljivost, propusnost i tlačna čvrstoća u vlažnom stanju.

11.4.6 Princip izrade jednokratnog kalupa od svježe kalupne mješavine

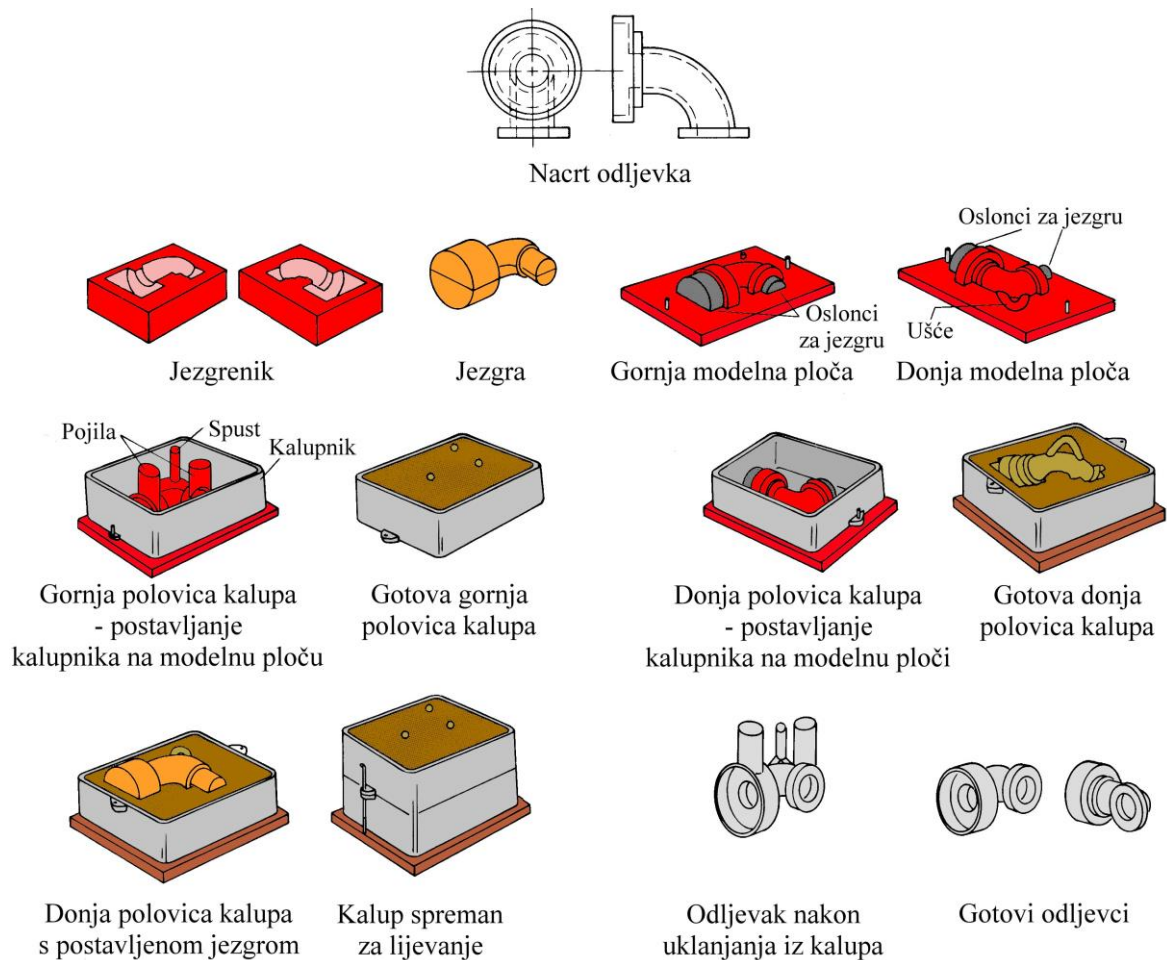
Na slici 11.25 prikazane su osnove faze u procesu izrade jednokratnog kalupa od svježe kalupne mješavine s horizontalnom diobenom ravninom uz primjenu trajnog modela.

Postupak započinje s tehnološkom razradom nacрта odljevka. Na osnovi razrađenog nacрта odljevka izrađuju se gornja i donja polovica modela i postavljaju na modelne ploče. Ako se za formiranje otvora u odljevku upotrebljavaju jezgre, obje polovice modela sadrže dodatne segmente koji tijekom kalupovanja formiraju šupljine u kalupu koje služe kao oslonci za jezgre. Modeli uljevnog sustava i pojila također se postavljaju na modelnu ploču zajedno s modelom. Na modelne ploče postavljaju se i vodilice koje omogućuju točno postavljanje kalupnika na modelnu ploču. Na osnovi razrađenog nacрта odljevka izrađuju se jezgrenici u kojima se proizvode jezgre.

Izrada kalupa započinje tako se modelna ploča postavi na ravnu plohu, a potom na nju postavi kalupnik. Prije nego se počne sabijati kalupna mješavina oko modela, odnosno u kalupniku, na modelnu ploču za izradu gornje polovice kalupa treba postaviti modele pojila i uljevnog sustava ako nisu sastavni dio gornje modelne ploče. Da bi se olakšalo izvlačenje modela, odnosno uklanjanje modela i modelne ploče nakon završetka sabijanja kalupne mješavine, model prije početka kalupljenja treba premazati ili posuti posebnim sredstvom koje olakšava razdvajanje.

Gornja i donja polovica kalupa izrađuju se sabijanjem svježe kalupne mješavine oko modela u kalupniku. Kad je kalupnik potpuno ispunjen sabijenom kalupnom mješavinom izrađuju se ventilacijski otvori koji omogućuju odvođenje plinova iz kalupa. Nakon toga se kalupnik ispunjen sabijenom kalupnom mješavinom zajedno s modelnom pločom okreće se za 180 ° da bi se mogao izvući model s modelnom pločom. U slijedećoj fazi u donju polovicu kalupa postavljaju se jezgre u jezgrene oslonce, a potom se na donju polovicu kalupa postavlja gornja polovica kalupa. Pravilno poravnanje kalupne šupljine u gornjoj i donjoj

polovici kalupa osigurano je upotrebom svornjaka koji se postavljaju kroz uške na gornjem i donjem kalupniku.



Slika 11.25. Osnove faze u procesu izrade jednokratnog kalupa od svježe kalupne mješavine s horizontalnom diobenom ravninom uz primjenu trajnog modela [91]

Ako se želi postići čista i glatka površina odljevka, kalupnu šupljinu i jezgre treba premazati odgovarajućim vatrostalnim premazima. Premaz sprječava penetraciju taline u kalupni materijal, odnosno jezgru jer se zatvaraju pore na površini. Sastoji se od vatrostalnog materijala, vezivnog sredstva, otapala i dodataka [32]. Kao vatrostalni materijal najviše se upotrebljava cirkonijev oksid ili grafit. Veziva mogu biti umjetne smole, dekstrin, ili bentonit. Ostala sredstva dodaju se radi regulacije viskoznosti otopine i njene površinske napetosti. Kao otapalo najviše se upotrebljava voda ili alkohol. Premaz se nanosi na površinu kalupa ili jezgre špricanjem, kistom ili uranjanjem (za jezgre). Obično se nanose 2 do 3 sloja i potom se provodi sušenje.

Posljednja faza u procesu izrade kalupa jest osiguravanje sklopljenog kalupa od prodora taline. Naime, kad se kalup napuni talinom pa do početka skrućivanja, na gornju polovicu kalupa talina djeluje silom uzgona. Ta sila može biti veća od mase gornje polovice kalupa, što može rezultirati podizanje gornje polovice kalupa. Da bi se to spriječilo potrebno je prije lijevanja čvrsto povezati gornju i donju polovicu kalupa ili sklopljeni kalup opteretiti utegom koji kompenzira djelovanje sile uzgona.

Na kvalitetu kalupa od svježe kalupne mješavine, osim kvalitete i količine pojedinih konstituenata mješavine (gline, vode, pijeska, dodataka itd.), značajno utječe i sam način izrade kalupa.

Kod **ručnog kalupljenja** treba utrošiti veliki rad za sabijanje kalupne mješavine, dok u ostalim fazama više do izražaja dolazi preciznost ili pažljivost djelatnika (sklapanje kalupa, izvlačenje modela, popravak kalupa itd.). Zbog potrebe za velikom količinom visokokvalificiranog rada i niske produktivnosti postupka, ručna izrada kalupa primjenjuje se samo za pojedinačnu proizvodnju odljevaka. Serijska proizvodnja odljevaka zahtijeva točne dimenzije, visoku ujednačenost kvalitete, niske troškove i visok stupanj iskorištenja materijala i energije, što iziskuje **strojno kalupljenje**.

11.4.7 Strojevi za izradu kalupa od svježe kalupne mješavine

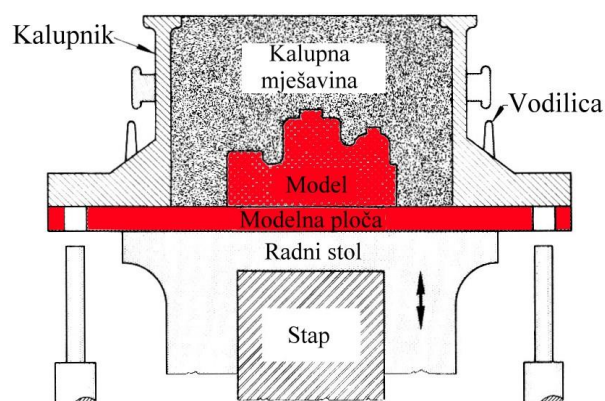
Stroj za kalupljenje naziva se **kalupilica**. Sabijanje kalupne mješavine ostvaruje se treskanjem, pritiskanjem, upuhivanjem, nabacivanjem ili kombinacijom tih postupaka. Ako se sabijanje provodi treskanjem, takva kalupilica naziva se treskalicom. U slučaju kad se sabijanje provodi pritiskanjem, takva kalupilica naziva se pritiskalicom. Kalupi se obično izrađuju uz primjenu kalupnika. Osim toga, razvijeni su i specijalizirani strojevi za strojno kalupljenje koji omogućuju izradu kalupa bez primjene kalupnika.

Strojno kalupljenje uz primjenu kalupnika provodi se tako da se na modelnu ploču postavi kalupnik i potom provodi strojno sabijanje svježe kalupne mješavine i izvlačenje modela.

Kod strojeva za strojno kalupljenje bez primjene kalupnika ulogu kalupnika preuzima kalupna komora koja je integralni dio stroja. Osim toga, taj postupak kalupljenja omogućuje izradu kalupa s vertikalnom diobenom ravninom (poznate Disamatic® linije).

11.4.7.1 Prva generacija kalupilica

Treskalice (engl. *Jolt-Type Molding Machine*) sabijaju kalupnu mješavinu treskanjem (slika 11.26).

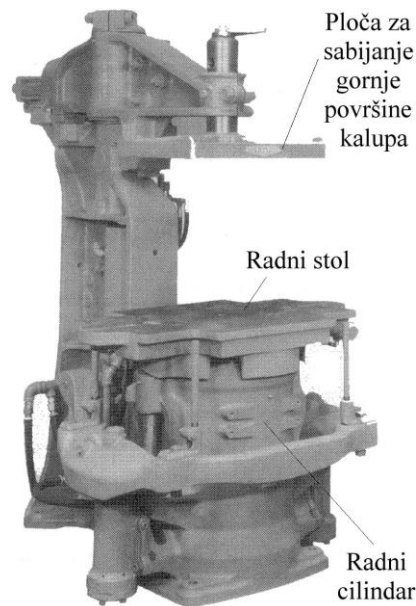


Slika 11.26. Glavne komponente treskalice [91]

Na radni stol treskalice pričvršćuje se modelna ploča i postavlja kalupnik. Radni stol povezan je sa stapom koji se podiže pod djelovanjem stlačenog zraka. Kalupnik se napuni

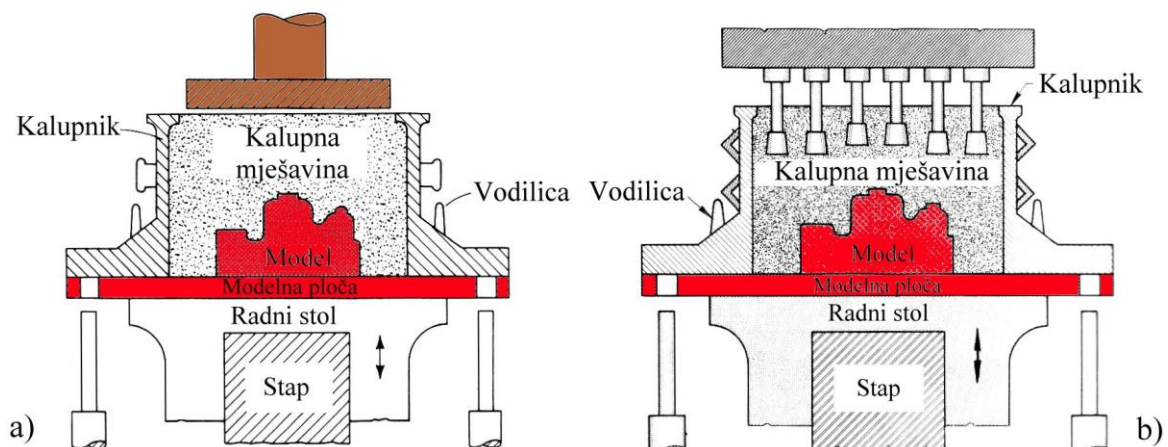
kalupnom mješavinom i potom počinje treskanje. Stlačeni zrak podiže stap sa radnim stolom na visinu 30 do 100 mm i zatim se pušta da slobodno pada, zbog čega je rad treskalice vrlo bučan. U jednoj minuti radni stol se 30 do 150 puta uzastopno diže i pada [32]. Treskanjem radnog stola iskorištava se kinetička energija padajuće kalupne mješavine za njeno sabijanje. Budući da se kalupna mješavina sabija pod djelovanjem vlastite težine, sabijenost mješavine nije jednolika po visini kalupa. Najveća je uz modelnu ploču, a najmanja na površini kalupa.

Treskalice sa naknadnim pritiskanjem (engl. *Jolt-Squeeze Molding Machine*) (slika 11.27) razvijene su da se eliminiira problem loše sabijenosti gornje površine kalupa koja je prisutna kod klasičnih treskalica.



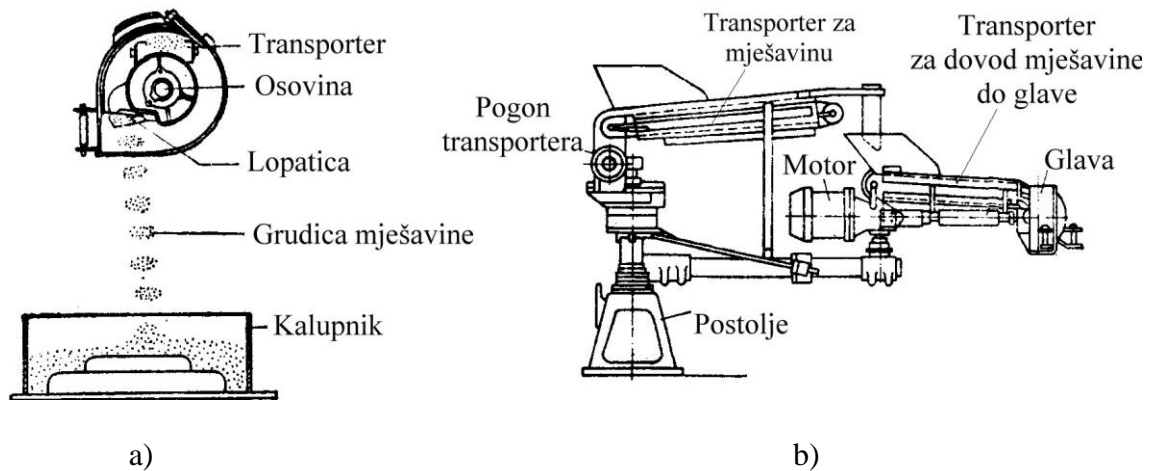
Slika 11.27. Treskalica sa naknadnim pritiskanjem [91]

Princip sabijanja mješavine treskanjem je isti, s tim da se nakon treskanja dodatno sabija gornja površina kalupa pritiskanjem. U jednoj izvedbi pritiskanje se provodi pločom (slike 11.27 i 11.28a). Druga izvedba koristi veći broj zasebnih cilindara, što omogućuje podešavanje sile pritiskanja po zonama kalupa (slika 11.28b).



Slika 11.28. a) treskalica kod koje se naknadno pritiskanje provodi pločom, b) treskalica kod koje se naknadno pritiskanje provodi pomoću niza zasebnih cilindara [91]

Pjeskomet (engl. *Sand Slinger Molding Machine*) sabija mješavinu oko modela nabacivanjem (slika 11.29) [32, 85].



Slika 11.29. a) shematski prikaz rada pjeskometa, b) stabilni pjeskomet [85]

Kalupna mješavina dovodi se kontinuirano u glavu pjeskometa pomoću gumenog transportera. Na osovini glave pjeskometa koja se okreće brzinom od 1000 do 1500 o/min. nalazi se jedna ili dvije lopatice koje zahvaćaju kalupnu mješavinu. Zbog centrifugalne sile kalupna mješavina sabija se na obodnom limu glave pjeskometa u grudice koje velikom brzinom izlaze van i ubacuju se u kalup. Budući da imaju veliku kinetičku energiju, grudice se sabijaju u kalupu. Za razliku od treskalica, sabijanje pomoću pjeskometa obavlja se sa malom masom, ali velikom brzinom te se postiže ravnomjerna sabijenost kalupa. Kalupljenje se obavlja tako da se glava pjeskometa pomiče iznad kalupa.

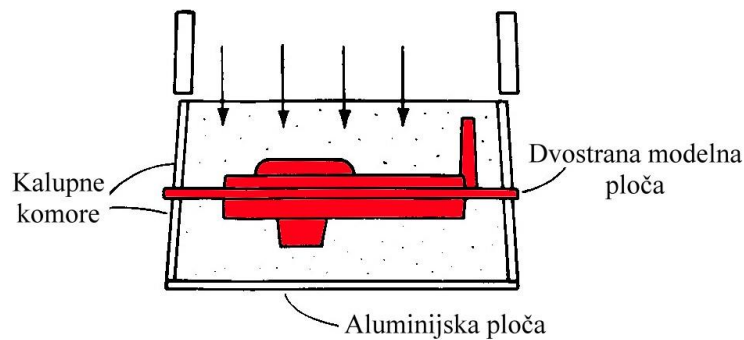
11.4.7.2 Druga generacija kalupilica

Treskalice s mogućnošću udarnog kalupljenja (engl. *Rap-Jolt Molding Machine*) spadaju među prve visokotlačne kalupilice [91]. U mnogim stvarima slične su treskalicama sa naknadnim pritiskanjem. Imaju mogućnost treskanja kalupa i/ili udarnog kalupljenja. Pod udarnim kalupljenjem smatra se nagli udarac sa donje strane modelne ploče. Primijenjena sila ne smije biti veća od 1 g, jer će u protivnom doći do odvajanja kalupnika od modelne ploče.

Visokotlačne pritiskalice na kojima se kalup izrađuje pomoću dvostrane modelne ploče (engl. *Match Plate Pattern Machines*) mogu biti izvedene tako da upotrebljavaju ili ne upotrebljavaju kalupnike [91]. Obzirom da modelna ploča nema dovoljnu čvrstoću da izdrži tlak koji se primjenjuje tijekom sabijanja i da se pri tome ne savije, istovremeno se mora izraditi gornja i donja polovica kalupa.

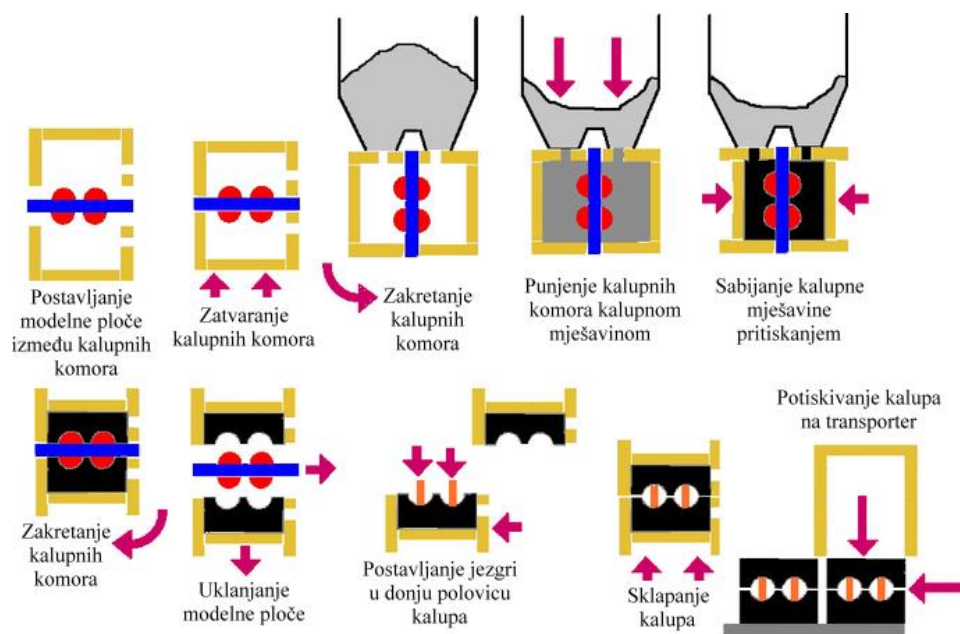
Na jednoj izvedbi pritiskalice ovog tipa (slika 11.30) odvojeno se popunjava gornji i donji dio kalupa gravitacijski. Kalupna komora u kojoj se nalazi modelna ploča okreće se za 180° da bi se donja polovica modela okrenula prema gore. To omogućuje da se donji dio kalupne komore popuni kalupnom mješavinom. Kada se donji dio kalupne komore popuni kalupnom mješavinom, na vrh se postavlja aluminijska ploča. Nakon toga, kalupna komora zajedno s modelnom pločom ponovo se okreće za 180° da bi se gornja polovica modela okrenula prema gore. Slijedi popunjavanje gornjeg dijela kalupne komore kalupnom

mješavinom. Kalup se potom sabije pritiskanjem, nakon čega se otvara da bi se uklonila modelna ploča i postavile jezgre. Kada se obave te radnje, kalup se zatvara i uklanja iz kalupnih komora.



Slika 11.30. Princip rada pritiskalice na kojoj se kalup izrađuje pomoću dvodijelne modelne ploče, a gornji i donji dio kalupne komore odvojeno se popunjavaju gravitacijski [91]

Na drugoj izvedbi kalupilica ovog tipa gornji i donji dio kalupne komore istovremeno se popunjavaju upuhivanjem kalupne mješavine (slika 11.31).



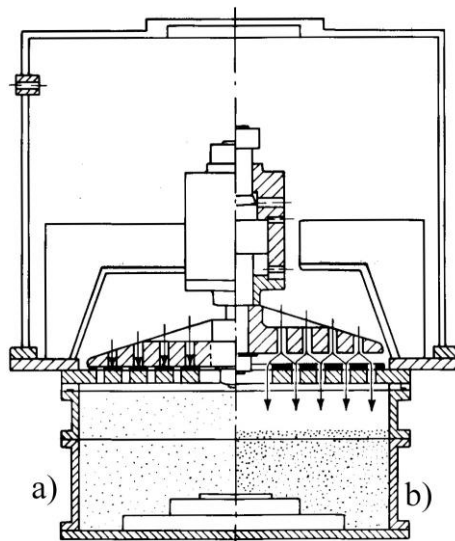
Slika 11.31. Princip rada pritiskalice na kojoj se kalup izrađuje pomoću dvodijelne modelne ploče, a gornji i donji dio kalupne komore istovremeno se popunjavaju upuhivanjem kalupne mješavine [93]

Nakon upuhivanja kalupne mješavine slijedi sabijanje pritiskanjem, a potom uklanjanje modelne ploče, postavljanje jezgri i na kraju zatvaranje kalupa.

Visokotlačne pritiskalice na kojima se kalup izrađuje pomoću jednodijelnih modelnih ploča (engl. *Cope and Drag Machines*) mogu biti izvedene tako da upotrebljavaju ili ne upotrebljavaju kalupnike [91]. Obzirom da modelne ploče nemaju dovoljnu čvrstoću da izdrže tlak koji se primjenjuje tijekom sabijanja i da se pri tome ne saviju, modelne ploče postavljaju se na dodatne ploče na kalupilici. U većini slučajeva gornja i donja polovica kalupa pune se i sabijaju tako da je model okrenut prema gore. Punjenje kalupa kalupnom

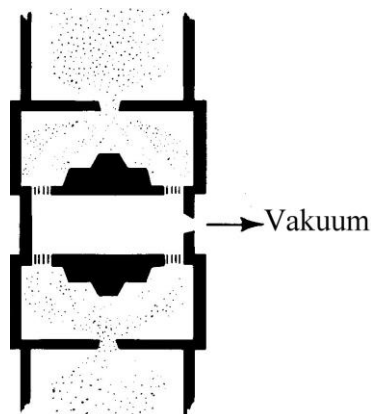
mješavinom provodi se gravitacijski ili upuhivanjem pod tlakom zraka. Donja polovica kalupa mora se okrenuti da bi se mogle postaviti jezgre i sklopiti kalup. Sabijanje se provodi pritiskanjem pomoću niza odvojenih cilindara.

Impulsne kalupilice (engl. *Pressure Wave Molding Machine*) sabijaju kalupnu mješavinu djelovanjem tlačnog vala [91]. Kalupnici se postavljaju na modelne ploče i gravitacijski pune kalupnom mješavinom. Iznad kalupnika nalazi se komora u kojoj se emitira tlačni val, i to naglim puštanjem stlačenog zraka ili eksplozivnim izgaranjem plinske smjese (slika 11.32). Tlačni val djeluje na kalupnu mješavinu u kalupniku proizvodeći njeno sabijanje u jednom ciklusu. Kalupi izrađeni na impulsnim kalupilicama imaju veliku gustoću u području oko modela, koja postepeno opada sa udaljavanjem od modela. Nije potrebno dodatno sabijanje pritiskanjem.



Slika 11.32. Impulsna kalupilica. Dio označen slovom a) prikazuje kalupnik koji je gravitacijski popunjen prije sabijanja, b) sabijanje kalupne mješavine tlačnim valom [91]

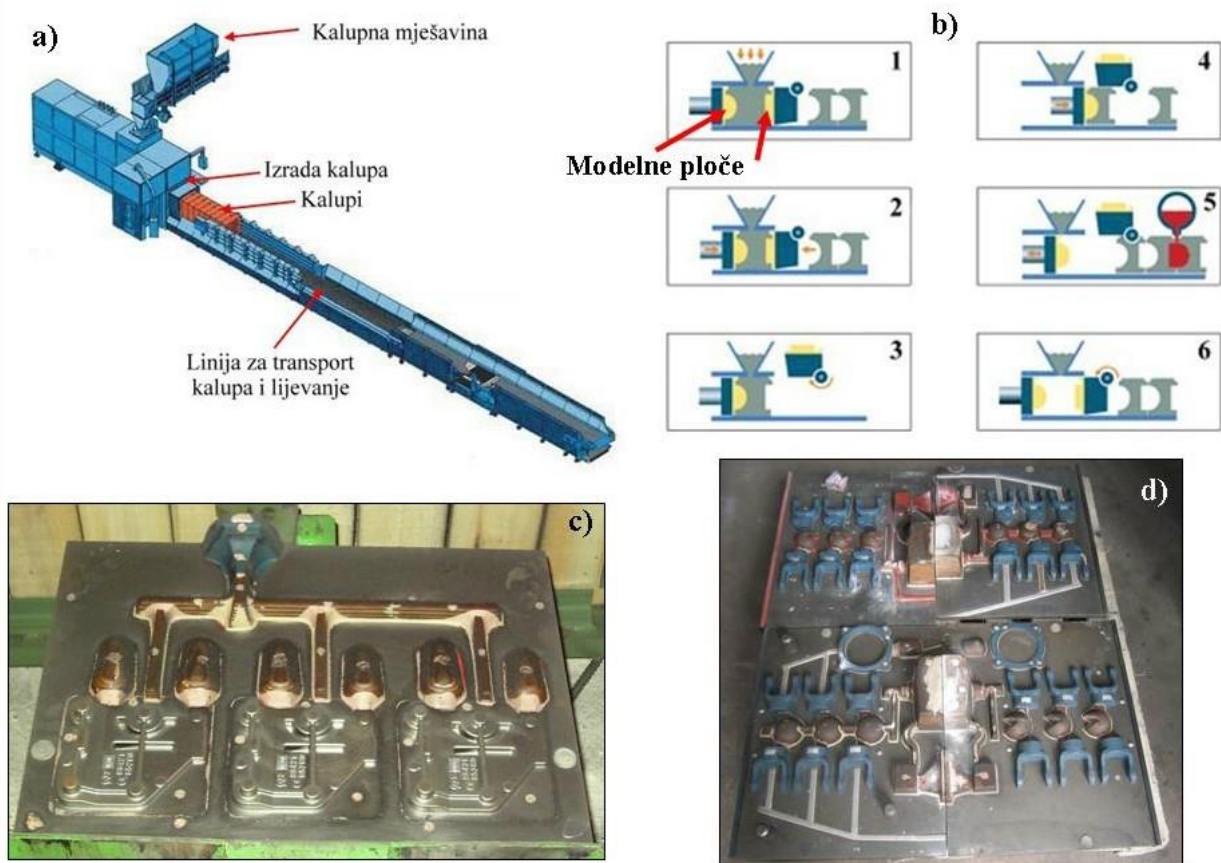
Vakuumske pritiskalice za izradu kalupa sa horizontalnom diobenom ravninom bez primjene kalupnika (engl. *Horizontal Flaskless Molding Machines*) su relativno novijeg datuma. Modelne ploče postavljaju se u nosač modelnih ploča na kalupilici čime se formiraju kalupne komore (slika 11.33).



Slika 11.33. Vakuumska pritiskalica za izradu kalupa sa horizontalnom diobenom ravninom pomoću modelnih ploča bez primjene kalupnika [91]

U kalupnim komorama uspostavlja se vakuum preko otvora u kalupnoj komori i modelnim pločama. Zbog djelovanja vakuuma kalupna mješavina uvlači se u kalupne komore i ispunjava ih. Kada završi punjenje provodi se sabijanje mješavine pritiskanjem i potom se uklanjaju modelne ploče i nosač modelnih ploča. Nije potrebno okretati gornju niti donju polovicu kalupa jer se izrađuju u istom položaju u kojem će se i upotrebljavati.

Pritiskalice za izradu kalupa sa vertikalnom diobenom ravninom bez primjene kalupnika (engl. *Vertically Parted Molding Machines*) su visokoautomatizirani i visokoproduktivni strojevi za izradu kalupa. Danas se široko primjenjuju, posebno za proizvodnju većeg broja manjih odljevaka u jednom kalupu. DISAMATIC® pritiskalice danske firme DISA najpoznatije su pritiskalice ovog tipa (slika 11.34).



Slika 11.34. DISAMATIC® pritiskalica: a) shematski prikaz [92], b) princip rada [92], c) i d) modelne ploče

Izrada kalupa provodi se u 6 faza (slika 11.34b). U prvoj fazi u zatvorenu kalupnu komoru odozgo se upuhuje potrebna količina svježe kalupne mješavine iz spremnika. Modelne ploče čine prednju i zadnju stranicu kalupne komore i postavljene su okomito tako da su polovice modela okrenute jedna prema drugoj, tj. prema unutrašnjosti komore. Desna (ili prednja) modelna ploča je montirana na uređaj koji omogućuje njeno izvlačenje iz kalupa i preklapanje u podignuti horizontalni položaj. Lijeva (ili stražnja) modelna ploča učvršćena je na hidraulički stap koji gura gotov kalup (točnije rečeno jednu polovicu kalupa) van iz kalupne komore.

U drugoj fazi provodi se sabijanje kalupne mješavine pritiskanjem. Da bi se to ostvarilo, modelne ploče pomiču se horizontalno jedna prema drugoj. Zbog toga se u prednjoj i zadnjoj stranici kalupa formira po jedna polovica kalupne šupljine. Na prednjoj stranici

kalupa formira se lijeva polovica kalupne šupljine, dok se na zadnjoj stranici kalupa formira desna polovica kalupne šupljine. Ako se tako formirani kalupi postave jedan do drugog dobivaju se kompletne kalupne šupljine. To predstavlja specifičnost ove kalupnice jer se dvije stranice kalupa (prednja i zadnja) upotrebljavaju za formiranje kalupnih šupljina, što nije slučaj kod kalupa sa horizontalnom diobenom ravninom. Na taj način povećava se iskorištenje kalupa.

U trećoj fazi izvlači se prednja (tj. desna) modelna ploča iz kalupa i preklapa u podignuti horizontalni položaj. To omogućuje da se gotov kalup izgura iz kalupne komore.

U četvrtoj fazi hidraulički stap pomiče se prema naprijed i gura kalup van iz kalupne komore sve do prethodno izrađenog kalupa. Novi kalup zajedno sa prethodnim stvara jednu kompletnu kalupnu šupljinu. Ako su za izradu kalupa potrebne jezgre, uređaj ih automatski postavlja u prethodno izrađen kalup prije nego se uz njega postavi novi kalup.

U petoj fazi hidraulički stap kreće se prema natrag i izvlači stražnju modelnu ploču iz kalupa. Nakon toga zajedno s stražnjom modelnom pločom vraća se u početni položaj.

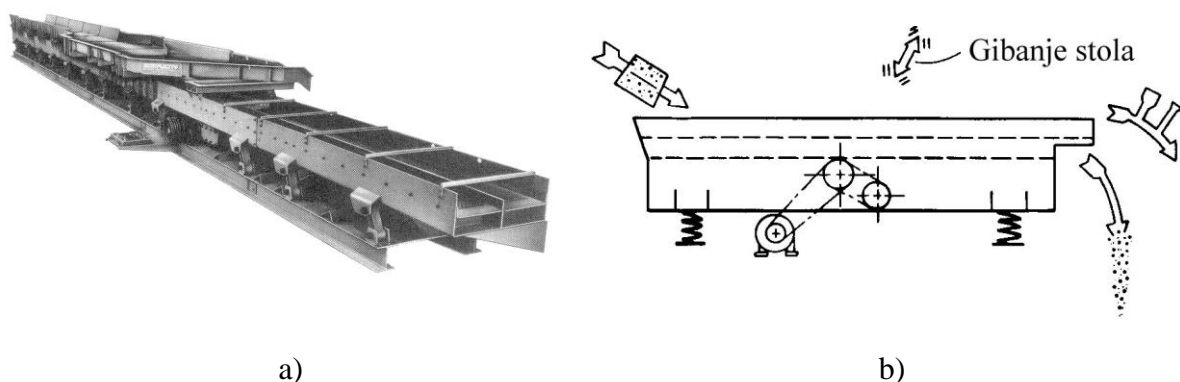
U šestoj fazi podignuta prednja modelna ploča spušta se i vraća u svoj početni položaj. Na taj način ponovo se formira kalupna komora i započinje izrada novog kalupa.

Tijekom izrade kalupa odmah se obavlja i lijevanje u gotove kalupe. Na taj način dobiva se linija za izradu kalupa i lijevanje visoke produktivnosti.

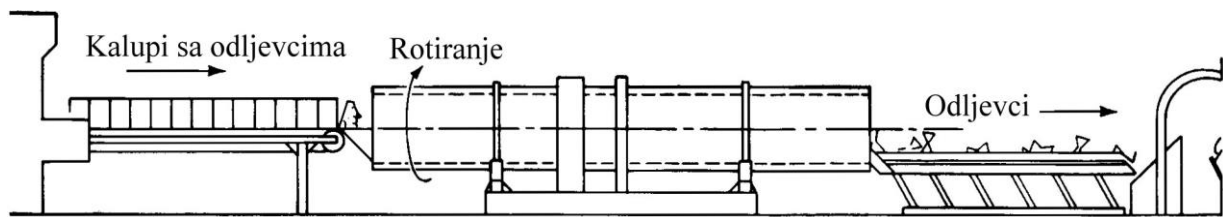
11.4.8 Istresanje odljevaka iz kalupa

Istresanje podrazumijeva uklanjanje odljevka iz kalupa nakon njegovog skrućivanja i hlađenja. Vezivo u kalupnom materijalu pod djelovanjem visoke temperature taline izgara u određenoj mjeri što omogućuje da se mehaničkim djelovanjem uređaja za istresanje gotovo sva kalupna mješavina odvaja od odljevka. Da bi se razrušio kalup i uklonio odljevak potrebna je značajna količina energije. Kalupna mješavina koja ostane na površini odljevka nakon istresanja uklanjanja se u čistionici.

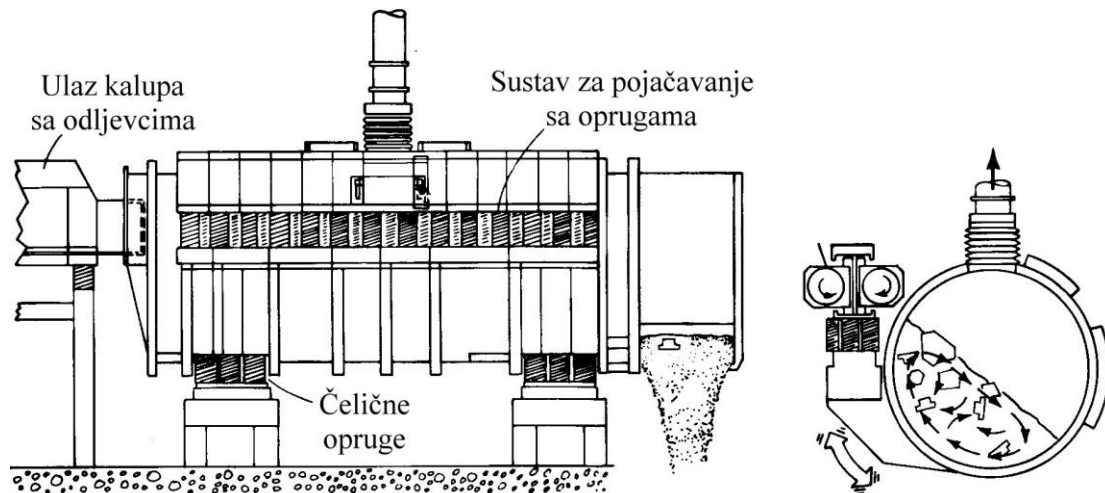
Istresanje odljevaka provodi se vibriranjem, osciliranjem ili rotiranjem kalupa pomoću specijalno konstruiranih uređaja za tu namjenu. Najčešće se primjenjuju vibracijski transporteri (slika 11.35a), visokofrekventni stolovi za istresanje (slika 11.35b), rotacijske istresilice (slika 11.36a) i vibracijski bubnjevi (slika 11.36b). Odljevci izdvojeni iz kalupa transportiraju se do čistionice. Kalupna mješavina može se ponovo upotrijebiti za izradu kalupa nakon odgovarajuće pripreme.



Slika 11.35. Uređaji za istresanje odljevaka iz kalupa: a) vibracijski transporter [94], b) visokofrekventni stolovi za istresanje [91]



a)



b)

Slika 11.36. Uređaji za istresanje odljevaka iz kalupa: a) rotacijske istresilice [91],
a) vibracijski bubnjevi [91]

Postupak istresanja odljevaka iz kalupa mora se pažljivo kontrolirati. Opremu treba prilagoditi vrsti odljevaka da ne bi došlo do deformacije, oštećenja i pojave pukotina.

Istresanje odljevaka iz kalupa može se provoditi nakon njihovog skrućivanja i hlađenja do određene temperature u kalupu ili nakon hlađenja do sobne temperature. To ovisi o vrsti lijeva, temperaturi lijevanja, veličini i konfiguraciji odljevka, upotrijebljenoj kalupnoj mješavini i svojstvima koja se žele postići. Npr. kod nekih odljevaka može doći do stvaranja pukotina i visokih rezidualnih naprezanja ako se prerano uklone iz kalupa.

11.4.9 Priprema korištene svježe kalupne mješavine za ponovnu upotrebu

Za izradu kalupa upotrebljava se velika količina svježe kalupne mješavine. Radi uštede kalupi se gotovo nikad ne izrađuju samo od potpuno nove svježe kalupne mješavine, već se u velikoj mjeri upotrebljava korištena svježa kalupna mješavina. Nakon istresanja iz kalupa korištena svježa kalupna mješavina se obnavlja i ponovo upotrebljava za izradu kalupa. Njena svojstva su značajno izmijenjena u odnosu na ona nakon pripreme jer je došlo do gubitka vlage i veziva tijekom hlađenja i skrućivanja odljevka u kalupu.

Kalup se može izraditi od **jedinstvene ili od dvojne mješavine** [32, 85]. Pri izradi kalupa sa jedinstvenom mješavinom upotrebljava se samo jedna mješavina. Često se radi o korištenoj svježoj kalupnoj mješavini kojoj se dodaje određena količina novog pijeska, veziva, vode i aditiva. U tom slučaju govorimo o **osvježenoj kružnoj mješavini**.

Pri izradi sa dvojnomo mješavinom kalup se izrađuje u dva sloja: uz model s **modelom mješavinom**, a ostatak kalupa puni se **dopunskom mješavinom**. Modelna mješavina nanosi se u sloju 3 do 5 cm na model i izrađuje se od potpuno novih komponenti, što znači da se radi o potpuno novoj svježoj kalupnoj mješavini. Kao dopunska mješavina upotrebljava se već korištena svježa kalupna mješavina.

Da bi se korištena svježa kalupna mješavina mogla ponovo upotrijebiti za izradu kalupa, prije miješanja i dodatka novih komponenti (pijeska, gline, veziva i vode, prema potrebi) treba provesti dodatne radnje koje uključuju hlađenje, uklanjanje metala i prosijavanje.

11.4.9.1 Hlađenje korištene svježe kalupne mješavine

Korištena svježa kalupna mješavina poslije istresanja mora se prije ponovne upotrebe ohladiti. Visoka temperatura mješavine uzrokuje probleme tijekom njene ponovne pripreme i kalupljenja te može dovesti do grešaka na odljevku zbog manje čvrstoće sabijenog kalupa [91]. Tijekom pripreme vruće mješavine neće se postići adekvatno vezivanje i teško se može održati potreban udio vode. Za vrijeme kalupljenja vruća mješavina može se naljepljivati na modele.

Bentonit neće adsorbirati vodu i postati plastičan ako je temperatura mješavine veća od 45 (50) °C. Prema tome, mješavina se mora ohladiti nakon istresanja iz kalupa prije ponovne pripreme, odnosno miješanja. Ako je temperatura mješavine > 70 °C neće se razviti vezivna svojstva bentonita. Ako se uzme u obzir da kalupna mješavina dosta brzo kruži u procesu proizvodnje odljevaka i da ljevaonički pijesak dugo zadržava toplinu, očito je da mješavinu nije lako ohladiti.

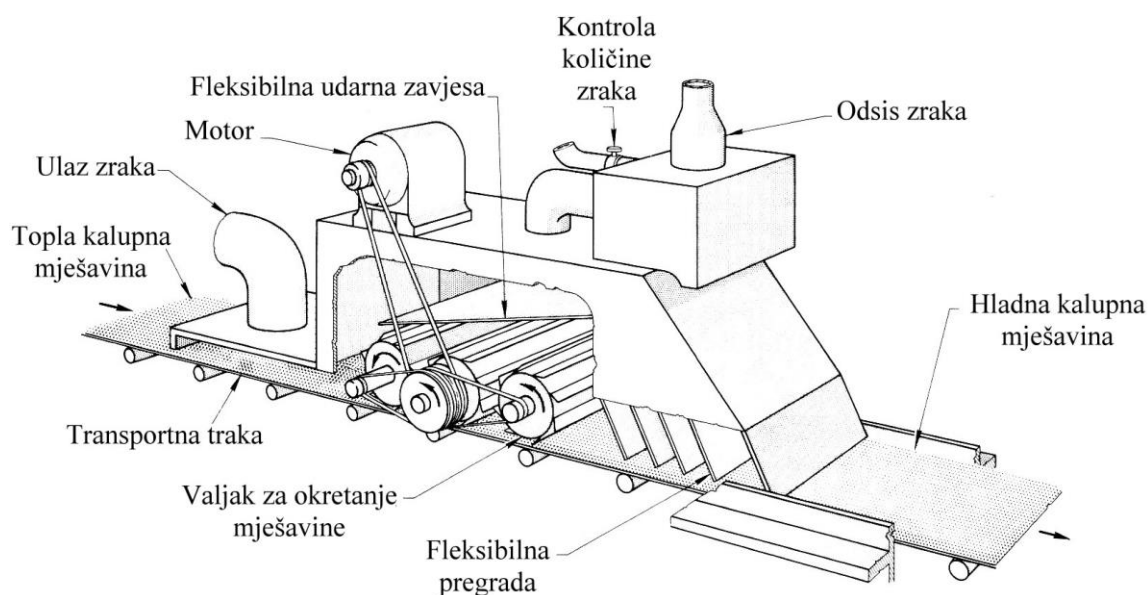
Hlađenje vodom je jedini pogodni način za hlađenje velike količine svježe kalupne mješavine. Takav sustav zahtjeva i veliku količinu zraka da bi se mogla ukloniti nastala vodena para.

Hlađenje svježe kalupne mješavine dodatkom vode može se promatrati kao proces u dvije faze, premda ne postoji oštra granica između tih faza. Ako je temperatura mješavine > 70 °C, dodana voda odmah će isparavati i hladiti mješavinu. Temperatura će nastaviti padati prilično brzo do ~ 60 °C, a nakon toga znatno sporije. Kada se temperatura mješavine približi temperaturi okoliša, daljnje hlađenje postaje znatno teže i vremenski duže traje. Visoka temperatura okoliša, posebno u kombinaciji sa visokom vlažnosti okoliša, može znatno smanjiti efikasnost uređaja za hlađenje mješavine.

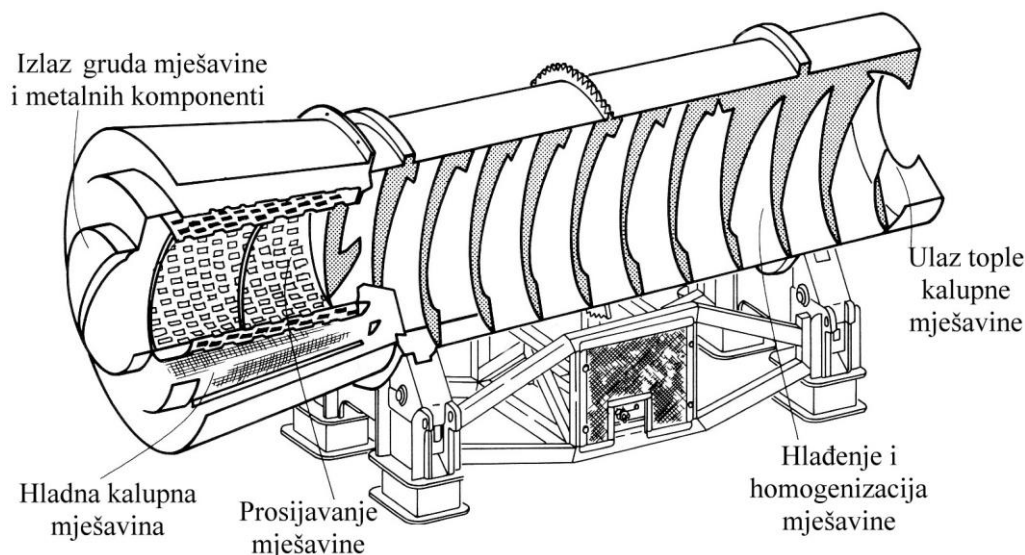
Pojedini mješači imaju mogućnost propuhivanja zraka kroz mješavinu, što rezultira vrlo efikasnim hlađenjem. Međutim, taj postupak ima i neke nedostatke. Treba uzeti u obzir da se oblaganje zrna pijeska bentonitom neće odvijati sve dok mješavina nije dovoljno hladna. To znači da se produžuje vrijeme pripreme kalupne mješavine.

Određeni učinak hlađenja može se postići ako se voda doda mješavini na transportnoj traci i potom se okreće na različitim mjestima duž transportne trake. Postoje mehanizirani uređaji (slika 11.37) koji obavljaju te funkcije i propuhuju zrak kroz mješavinu. Efikasnost te metode često je ograničena dužinom transportne trake za pijesak. Što je transportna traka kraća, metoda je manje efikasna.

Bubnjevi su efikasni uređaji za hlađenje svježe kalupne mješavine (slika 11.38). Poseban su dio opreme u ljevaonici kroz koje prolazi samo kalupna mješavina. Kao kod ostalih uređaja za hlađenje, kalupnoj mješavini dodaje se voda i potom se kroz mješavinu propuhuje zrak koji se kreće u suprotnom smjeru od mješavine.



Slika 11.37. Mehansirani uređaj za hlađenje kalupne mješavine [91]



Slika 11.38. Bubnjasti uređaj za hlađenje kalupne mješavine [91]

Na tržištu su dostupni i drugi uređaji za hlađenje kalupnih mješavina, kao što je npr. vibracijski transporter. Kod tog uređaja zrak se propuhuje odozdo kroz sloj navlažene kalupne mješavine koja se nalazi u fluidiziranom stanju.

Bez obzira koji se uređaj za hlađenje upotrijebi, pažljivo treba kontrolirati dodatak vode. Kalupna mješavina neće se moći dovoljno ohladiti ako je dodatak vode premali. Ako je dodatak vode prevelik mogu se pojaviti problemi tijekom pripreme kalupne mješavine.

Zrak tijekom prolaska kroz mješavinu odnosi dio sitnih frakcija. Što je veća brzina zraka bolje je hlađenje, ali je veći i gubitak sitnih frakcija. Taj gubitak može biti i koristan, ako se radi npr. mrtvoj i zapečenoj glini. Međutim, mogu se izgubiti i brojne korisne komponente, kao što su sitna zrna pijeska, ugljena prašina i bentonit. Zbog toga uređaji za hlađenje moraju sadržavati dodatne segmente koje omogućuju izdvajanje krutih čestica iz zraka koji je prošao kroz kalupnu mješavinu.

11.4.9.2 Uklanjanje metala i prosijavanje korištene svježe kalupne mješavine

Nakon istresanja iz kalupa, iz svježe kalupne mješavine treba ukloniti sve komade metala jer mogu uzrokovati greške na odljevcima i oštetiti opremu. U slučaju lijevanja odljevaka od ljevova koji su magnetski, primjenom magneta mogu se ukloniti komadi metala iz kalupne mješavine.

Nemagnetične ljevarske slitine predstavljaju drugačiji problem. U tu svrhu upotrebljavaju se uređaji koji izdvajaju komade metala na osnovi razlike u gustoći. Češće se upotrebljava set sita, a postupak kreće od krupnijeg prema finijem situ.

Grumene kalupne i jezgrene mješavine također treba ukloniti iz mješavine prije daljnje upotrebe. Nastaju u slučaju kada se dijelovi kalupa ili jezgre nisu dovoljno zagrijali tijekom hlađenja odljevka u kalupu da bi došlo do uništenja veziva. Za prosijavanje se upotrebljavaju različita sita. Najčešće se upotrebljavaju horizontalna vibracijska sita i rotacijska sita.

Na vibracijskom situ, pored prosijavanja, u određenoj mjeri dolazi i do raspadanja grumena kalupne i jezgrene mješavine zbog vibriranja. Rotacijsko sito ima oblik bubnja koji kontinuirano rotira oko svoje horizontalne osi. Na bubnju se nalaze otvori određene veličine da bi se postiglo prosijavanje. Zbog padanja mješavine tijekom okretanja sita postiže se sličan učinak po pitanju raspadanja kalupne i jezgrene mješavine.

Nakon što se svježa kalupna mješavina ohladi te se uklone komadi metala i grumeni kalupne i jezgrene mješavine, može se skladištiti u bunkere i uz dodatnu pripremu ponovo upotrijebiti.

11.5 Jednokratni kalupi od kemijski vezanih mješavina

Jednokratni kalupi od kemijski vezanih mješavina su hladno otvrdnuti, odnosno samoočvršćujući (engl. *No-Bake*) pješčani kalupi koji se temelje na očvršćivanju anorganskih i organskih veziva kao sastavnih komponenti kalupne mješavine pomoću plinovitog ili tekućeg katalizatora kod sobne temperature. Glavna komponenta kalupne mješavine i u ovom slučaju je ljevaonički pijesak, najčešće kvarcni. Takvi kalupi pogodni su za gravitacijsko lijevanje svih ljevarskih slitina.

11.5.1 Vrste kemijski vezanih mješavina za izradu jednokratnih kalupa

Kemijski vezane mješavine za izradu jednokratnih kalupa mogu se svrstati u dvije osnovne skupine ovisno o vrsti katalizatora kojeg upotrebljavaju za očvršćivanje veziva [95]:

- **kemijski vezane mješavine s plinovitim katalizatorom,**
- **kemijski vezane mješavine s tekućim katalizatorom.**

Za izradu jednokratnih kalupa upotrebljava se više vrsta kemijski vezanih mješavina s plinovitim katalizatorom [95]:

- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je CO₂,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je plinoviti amin,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo akrilno-epoksidna smola, a katalizator je SO₂.

Više vrsta kemijski vezanih mješavina s tekućim katalizatorom upotrebljava se za izradu jednokratnih kalupa [95]:

- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je dikalcijev silikat, FeSi, ili organski ester,
- kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo na osnovi furfuralnog alkohola, a katalizator je fosforna ili sulfonska kiselina,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolna smola, a katalizator je sulfonska kiselina,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkidni uljni uretan, a katalizator su metalna sušila,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je tekući amin.

Ljevaonički pijesci koji se upotrebljavaju za kemijski vezane mješavine moraju ispuniti i neke specifične zahtjeve, pored uobičajenih. Udio alkalijskih minerala u ljevaoničkom pijesku treba što niži, jer će pijesak u protivnom apsorbirati kisele katalizatore, što u konačnici zahtjeva veći dodatak katalizatora. Zbog toga se za pijeske specificira tzv. **ADV vrijednost** (engl. *Acid Demand Value*) koja predstavlja broj mililitara 0,1 M HCl potreban da se neutraliziraju alkalije u 50 g pijeska kod različitih pH [13]. Vrijednost tog parametra treba biti što niža.

Vlaga u ljevaoničkom pijesku može rezultirati nižom čvrstoćom proizvedenih kalupa ili može usporiti reakciju očvršćivanja jer vezivo reagira s vodom. Zbog filma vlage dolazi do smanjenja tečljivosti i degradacije veze između zrna pijeska. Udio vlage trebao bi biti < 0,25 %.

Gubitak žarenjem (engl. *Loss-on-Ignition (LOI)*), odnosno gubitak mase ljevaoničkog pijeska prije i nakon žarenja je vrlo značajan parametar za pripremu kemijski vezanih mješavina. Taj parametar pruža informaciju o količini tvari u pijesku koje izgaraju (ugljen, zaostala organska veziva nakon regeneracije ljevaoničkog pijeska iz neupotrebljivih kalupnih i jezgrenih mješavina (tzv. „mrtva“ veziva), celuloze, cerealije). Te tvari apsorbiraju kemijsko vezivo i smanjuju njegov učinak te negativno utječu na čvrstoću kalupa. Gubitci žarenjem iznad 2 % mogu dovesti i do plinskih grešaka na odljevcima. Određuje se tako da se uzorak mase 50 g zagrijava na ~ 982 °C do konstantne mase.

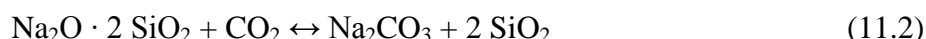
Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je CO₂. Kao vezivo upotrebljava se tekući natrijev silikat (vodeno staklo - Na₂SiO₃ (Na₂O · SiO₂)), a očvršćivanje se postiže propuhivanjem sa CO₂ plinom [3, 95]. Vezivo je bez mirisa, nije zapaljivo i pogodno su za sve tipove proizvodnje, npr. za velike kalupe. Svojstva veziva ovise o omjeru SiO₂ i Na₂O. Najčešće se primjenjuje natrijev silikat kod kojeg taj omjer iznosi 2 : 1 do 2,8 : 1.

Istresljivost i sposobnost raspadanja mješavine može se poboljšati dodatkom aditiva. Osim toga, dodatkom aditiva kontrolira se ekspanzija kvarcnog pijeska, sprječava zapećenje pijeska na površini odljevka i penetracija taline u kalupnu mješavinu, poboljšava tečljivost mješavine, sprječava lijepljenje mješavine na model itd. U tu svrhu najčešće se primjenjuju šećeri, koji se mogu pomiješati sa silikatnim vezivom ili zasebno dodati u mješavinu. Pored toga, kao aditiv primjenjuje se i kaolinska glina te Al₂O₃.

Kvarcni pijesak, natrijev silikat i aditivi miješaju se u kontinuiranom ili diskontinuiranom mješaču i dobivena mješavina uvodi se u kalup i lagano zbija oko modela. Nakon toga slijedi propuhivanje mješavine CO₂ plinom. Dodatak silikatnog veziva obično iznosi od 3 do 6 %, što ovisi o vrsti pijeska, finoći zrna pijeska, aditivima u silikatnom vezivu,

stupnju onečišćenja pijeska, vrsti lijeva, temperaturi lijevanja i potrebnoj otpornosti na eroziju. S povećanjem finoće zrna pijeska povećava se i potrebit dodatak veziva.

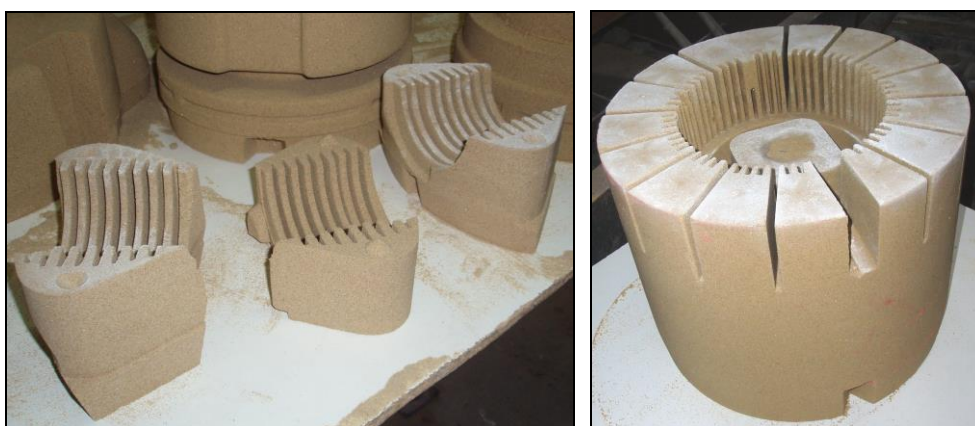
Proces očvršćivanja može se pojednostavljeno prikazati slijedećim reakcijama:



Može se vidjeti da kontinuirano propuhivanje rezultira dehidratacijom amorfnog silika gela i povećava čvrstoću kalupa.

Natrijev silikat/ CO_2 postupak često se upotrebljava za izradu velikih kalupa kod kojih se zahtijeva visoka tvrdoća i dimenzijska točnost. Na visokim temperaturama veza se lako kida, što olakšava istresanje odljevaka iz kalupa.

Vlačna čvrstoća kalupa nakon 24 sata je veća od početne jer dolazi do dehidratacije neizreagiranih silikata i kontinuiranog ugelavanja silikata. Pod normalnim uvjetima ne dolazi do oštećenja kalupa i mogu se skladištiti određeno vrijeme. Iznimka su periodi visoke vlažnosti kada mješavina ne može postići maksimalnu čvrstoću dehidratacijom tijekom skladištenja nakon propuhivanja plinom. Smanjenje čvrstoće u uvjetima visoke vlažnosti dodatno je izraženo kad vezivo ili mješavina sadrže organske aditive kao što je šećer. U tom slučaju potrebno je kratko zagrijavanje da bi se ostvarila željena čvrstoća. Kad je kalup očvrstnut pravilno provedenim propuhivanjem, a daljnje očvršćivanje postignuto dehidratacijom i polimerizacijom tijekom naredna 24 h, postignuta čvrstoća zadržava se tijekom dugog vremena skladištenja. Na slici 11.39 prikazano je nekoliko komponenti jednog kompleksnog kalupa koje su izrađene od ove kalupne mješavine.



Slika 11.39. Komponente kompleksnog kalupa izrađene od kemijski vezane mješavine kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je CO_2

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je plinoviti amin. Sustav veziva sastoji se od tri komponente [3, 95]. Prvi komponenta je fenolna smola otopljena u specijalnoj mješavini otapala. Druga komponenta je polimerni metilen difenil diizocijanat. Treća komponenta je plinski katalizator amin (trietilamin i dietilamin), koji uzrokuje reakciju između prve dvije komponente pri čemu nastaje uretanska veza koja brzo očvršćuje mješavinu. Pijesak se oblaže s prvom i drugom komponentom veziva i dobivena mješavina sabija se oko modela kod sobne temperature. Nakon toga uvodi se katalizator čime se postiže očvršćivanje (otvrdnjavanje) mješavine. Nakon uvođenja plinskog katalizatora slijedi ciklus pročišćavanja zrakom koji potiskuje i raspodjeljuje plinski katalizator (amin) kroz mješavinu i uklanja preostali amin iz očvrstnute mješavine.

Proces očvršćivanja može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom:

Fenolna smola + polimerni metilen difenil diizocijanat + pare aaminskog katalizatora → uretan

Reakcijom kojom nastaje uretan ne dolazi do stvaranja vode ili drugih sporednih produkta. Sustav sadrži 3 do 4 % dušika koji potječe od druge komponente veziva. Udio ugljika u ovom sustavu je visok zbog prisutnosti organskih smola i otapala. To doprinosi stvaranju sjajnog ugljika i reducirajuće atmosfere tijekom lijevanja.

Za izradu mješavine mogu se upotrebljavati svi ljevaonički pijesci koji se obično primjenjuju u ljevarstvu. Međutim, treba uzeti u obzir utjecaje temperature pijeska, kemijskog sastava i udjela vlage na performanse smole. Idealna temperatura pijeska je od 20 do 25 °C. Niže temperature mogu smanjiti učinkovitost miješanja i povećati vrijeme vezivanja. Više temperature pijeska smanjuju cikluse propuhivanja plinom i količinu potrebnog katalizatora, ali skraćuju vremenski period u kojem se mješavina može upotrijebiti.

Maksimalni udio vlage u pijesku od 0,2 % prihvatljiv je pri sobnoj temperaturi (~ 20 °C). Međutim, kad se temperatura pijeska poveća na 30 °C, udio vlage u pijesku mora biti < 0,1 % da bi se postupak pravilno odvijao.

Da bi se eliminirale specifične greške na odljevcima mogu se dodati određeni aditivi. Greške na odljevcima od željeznih ljevova povezane s visokom količinom sjajnog ugljika mogu se značajno reducirati dodatkom željeznog oksida u količinama od 1 do 2 %.

Prednosti fenol uretan/amin mješavina su: dobra tečljivost, mješavine se lako raspadaju pa je i vađenje odljevka lako, vrlo dobra dimenzijska točnost odljevaka, odlična površina odljevaka i mogućnost dugog skladištenja kalupa (jezgri).

Otapala koja se oslobađaju tijekom miješanja i sabijanja mješavine mogu izazvati određene probleme. Polimerni metilen difenil diizocijanat može uzrokovati određene probleme sa disanjem. Zbog toga se zahtijeva dobra ventilacija.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo akrilno-epoksidna smola, a katalizator je SO₂. Zasniva se na primjeni akrilno-epoksidnih smola kao veziva, a očvršćivanje veziva postiže se prolaskom SO₂ kroz mješavinu u prisutnosti oksidacijskog sredstva (organskog hidroperoksida) da bi se stvorila kiselina [3, 95]. Svojstva mješavine i odljevaka ovise o omjeru akrilnih i epoksidnih funkcionalnih komponenti u sustavu veziva.

Akrilno-epoksidna veziva su mješavina akrilnih i epoksidnih funkcionalnih komponenti. Vezivni sustav sastoji se od dvije komponente. Prva komponenta je epoksidna smola sa organskim hidroperoksidom. Druga komponenta je mješavina akrilne i epoksidne smole, aditiva i otapala. Miješanje komponenti veziva sa ljevaoničkim pijeskom provodi se u kontinuiranim ili diskontinuiranim mješačima. Kada se mješavina pijeska i veziva izloži SO₂ plinu dolazi do njenog očvršćivanja. Akrilna komponenta brzo očvršćuje, što sustavu daje početnu čvrstoću. Epoksidna smola sporo očvršćuje, što omogućuje lakše uklanjanje modela, te nakon 24 h dobru čvrstoću kalupa u vrućem stanju. Dodatak veziva kreće se od 0,5 do 1,5 %, ovisno o pijesku i primjeni. Budući da komponente veziva ne reagiraju dok ne dođu u kontakt s SO₂ plinom, pripremljena mješavina ima vrlo dug životni vijek.

Nakon uvođenja plinskog katalizatora slijedi ciklus pročišćavanja zrakom kojim se uklanja višak SO₂. Najbolji rezultati postižu se ako temperatura zraka iznosi 35 °C.

Varijacija sastava akrilno-epoksidnog veziva utječe na krutost kalupa, brzinu očvršćivanja, potrošnju SO₂ plina, otpornost na vlagu i sposobnost raspadanja mješavine. Osim toga, promjenom sastava akrilno-epoksidnog veziva utječe se i na svojstva odljevaka (otpornost na nastajanje „žila“, kvaliteta površine) te istresljivost.

Kalupna mješavina sa akrilno-epoksidnom smolom kao vezivom i SO₂ kao katalizatorom ima niz prednosti: odsutnost formaldehida ili izocijanata, odlična istresljivost,

odnosno sposobnost raspadanja mješavine, smanjenje pojave greški u obliku „žila“ i toplih pukotina, niži troškovi čišćenja odljevaka i konzistentna svojstva zbog dugog perioda upotrebljivosti.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je dikalcijev silikat, FeSi, ili organski ester. Kod ove kemijski vezane mješavine dikalcijev silikat i FeSi dodaju se u praškastom obliku [3, 95]. Postupak sa FeSi poznat je kao Nishiyama postupak. Za te sustave potreban je natrijev silikat kod kojeg omjer $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ iznosi 2. Budući da se praškasti katalizatori teško mogu uspješno dodati u mješać, često je prisutno nekonzistentno vrijeme očvršćivanja. Zbog toga se kao katalizator češće upotrebljavaju tekući organski esteri. Dodatak tekućine u pijesak u kontinuiranom mješaću lakše se može kontrolirati nego dodatak praha.

Dikalcijev silikat uspješno je sredstvo za prevođenje natrijevog silikata u stanje gela. Glavni je sastojak brojnih metalurških troski te određenih vrsta portland cementa. Najčešći izvor dikalcijevog silikata dobre kvalitete je visokobazična troska iz procesa proizvodnje FeCr.

FeSi koji se upotrebljava kao katalizator treba biti sitne granulacije i mora sadržavati 70 do 80 %Si. Reakcija između natrijevog silikata i FeSi je egzotermna. Pri tome se oslobađa vodik i zabilježene se snažne eksplozije. Zbog te opasnosti postupak se vrlo malo upotrebljava.

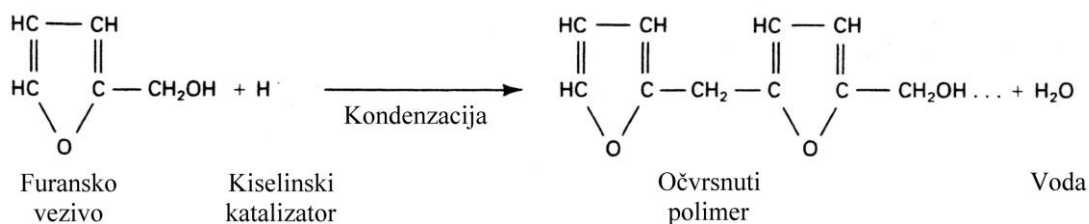
Za prevođenje natrijevog silikata u stanje gela upotrebljavaju se različiti organski esteri, kao što glicerol diacetat (brza reakcija), etilen glikol diacetat (srednje brza reakcija) i glicerol triacetat (spora reakcija). Za te sustave potreban je natrijev silikat kod kojeg omjer $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ iznosi 2,5:1 do 2,8:1. Dodatak estera obično iznosi 10 do 12,5 % u odnosu na količinu natrijevog silikata. Vrijeme skladištenja kalupa je značajno bolje nego u slučaju primjene CO_2 kao katalizatora. Obično iznosi 3 vikenda u normalnim atmosferskim uvjetima. U uvjetima visoke vlažnosti dolazi do oštećenja kalupa. Kalupi su srednje čvrstoće i otežano je istresanje odljevaka iz kalupa.

Kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo na osnovi furfural alkohola, a katalizator je fosforna ili sulfonska kiselina. Furfural alkohol je osnovna sirovina koja se upotrebljava u samočvršćujućim furanskim vezivima [3, 95]. Furanska veziva mogu se modificirati ureom, foramldehidom, fenolom i nizom drugih reaktivnih ili nereaktivnih aditiva.

Velika raznolikost dostupnih furanskih veziva omogućuje odabir veziva ovisno o aplikaciji. Kod smola modificiranih ureom udio vode može biti i do 15 % a udio dušika do 10 %. Visok udio dušika može uzrokovati greške na odljencima od čeličnih i željeznih ljevova. Međutim, dostupna su i furanska veziva koja ne sadrže dušik i vodu. Izbor veziva ovisi o vrsti lijeva i zahtijevanim svojstvima mješavine. Dodatak furanskog veziva obično se kreće od 0,8 do 1,4 % u odnosu na masu pijeska. Kiselinski katalizator (fosforna ili organska sulfonska kiselina) dodaje se u količinama od 15 do 45 % u odnosu na masu veziva. Temperatura pijeska ima značajan utjecaj na brzinu očvršćivanja mješavine i treba se održavati između 21 i 27 °C. Brzina reakcije očvršćivanja (vezivanja) može se podesiti promjenom vrste katalizatora ili dodatnom količinom katalizatora, podrazumijevajući da su vrsta pijeska i njegova temperatura konstantne. Mehanizam očvršćivanja furanskog veziva prikazan je na slici 11.40.

Furanska samoočvršćujuća veziva omogućuju visoku dimenzijsku točnost odljevaka i visok stupanj otpornosti na ljevarske greške na graničnoj površini kalupna mješavina/talina. Lako se raspadaju nakon skrućivanja metala i omogućuju lako istresanje odljevka iz kalupa. Furanska veziva omogućuju visoku vlačnu čvrstoću kalupa uz izvanrednu čvrstoću u vrućem

stanju koja je potrebna za proizvodnju kalupa bez primjene kalupnih okvira. Osim toga, kalupi (i jezgre) izrađeni ovim postupkom mogu se beskonačno dugo skladištiti. Kod primjene furanskih veziva odnos mješavina/metal obično iznosi 2:1.



Slika 11.40. Mehanizam očvršćivanja furanskog veziva primjenom kiselinskog katalizatora [3]

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolna smola, a katalizator je sulfonska kiselina. Fenolne smole su produkti reakcije kondenzacije fenola i aldehida [3, 95]. Fenolne samoočvršćujuće smole dobivaju se od fenol/formaldehida kod kojeg je molarni omjer fenol/formaldehid < 1. Fenolne smole mogu se, kao i furanske, modificirati reaktivnim i nereaktivnim aditivima. Za razliku od furana, fenolne smole sadrže vodu i to u količinama od 8 do 25 %. Prisutna voda smanjuje brzinu očvršćivanja i rezultira nižom čvrstoćom kalupa u odnosu na one proizvedene primjenom furanskog veziva. Dodatak fenolne smole obično iznosi ~ 1,5 %. Optimalna temperatura ljevaoničkog pijeska iznosi 27 °C.

Fenolne smole su tekućine svjetlo do tamno smeđe boje, a mogu biti srednje do visoke viskoznosti. Mješavine koje sadrže fenolne smole imaju odgovarajuću tečljivost za popunjavanje kalupa. Smole tog tipa sadrže slobodni fenol i slobodni formaldehid, pa se tijekom miješanja može očekivati razvijanje karakterističnih mirisa tih komponenti.

Jedan od nedostataka fenolne smole koja očvršćuje pod djelovanjem kiselinskog katalizatora je njena relativno slaba postojanost pri skladištenju. Fenolna veziva obično se ne mogu skladištiti duže od 6 mjeseci. Fenolne rezolne smole sadrže brojne reaktivne komponente koje učestvuju u reakcijama autopolimerizacije na sobnoj ili blago povišenim temperaturama. Period skladištenja može biti značajno duži u zimskim mjesecima ako se je temperatura skladišta ≤ 20 °C. Što je vezivo starije veća je njegova viskoznost.

Katalizator za očvršćivanje fenolne smole je mješavina sulfonskih kiselina (benzen sulfonska kiselina, toluen sulfonska kiselina itd.). Ponekad se mješavini sulfonskih kiselina dodaje i mala količina sumporne kiseline da bi se ubrzalo očvršćivanje. Dodatak katalizatora obično se kreće od 20 do 45 % u odnosu na masu dodane smole. Mehanizam očvršćivanja fenolne smole može se prikazati slijedećom reakcijom:



Katalizator inicira daljnju kondenzaciju smole i pospješuje odvijanje reakcije umrežavanja. Reakcijama kondenzacije nastaje voda, što rezultira razrjeđenjem kiselinskog katalizatora i smanjenjem intenziteta očvršćivanja. Zbog toga se mora upotrijebiti jak kiselinski katalizator da se osigura prihvatljiva brzina očvršćivanja i adekvatno očvršćivanje po dubini kalupa.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkidni uljni uretan, a katalizator su metalna sušila. Sustav vezivanja sastoji se od tri komponente [3, 95]. Prva komponenta je alkidna smola uljnog tipa, druga komponenta su metalna sušila koja djeluju kao katalizator, a treća komponenta je polimerni metilen difenil diizocijanat. Dodatak prve komponente obično

iznosi 1 do 2 % u odnosu na masu pijeska. Katalizator se dodaje u količini od 2 do 10 % u odnosu na masu prve komponente. Dodatak treće komponente uvijek iznosi 18 do 20 % u odnosu na masu prve komponente. Metalnim sušilima može se dodati do 2 % amina ako je potrebno brzo izvlačenje modela. Često prva i druga komponenta već dolaze zajedno pomiješane.

Premda se ovaj sustav vezivanja lako upotrebljava, mehanizam očvršćivanja je dosta kompleksan jer postoje dvije odvojene faze, odnosno reakcije očvršćivanja i dva mehanizma očvršćivanja. Kada se sve tri komponente pomiješaju sa pijeskom, polimerni metilen difenil diizocijanat brzo se počinje umrežavati sa alkidnom uljnom smolom, a brzinu te reakcije kontrolira katalizator. Tom reakcijom nastaje uretanska veza između zrna pijeska dovoljno velike čvrstoće da bi se mogao ukloniti model te rukovati s kalupom. Optimalna temperatura ljevaoničkog pijeska iznosi 27 do 32 °C.

Druga faza očvršćivanja je slična mehanizmu sušenja boje. Kisik se spaja sa alkidnom uljnom smolom koja gotovo u potpunosti polimerizira na sobnoj temperaturi pri čemu nastaje čvrsta uretanska veza. Katalizator, odnosno metalna sušila ubrzavaju spajanje sa kisikom, tj. sušenje, koje se sporo odvija na sobnoj temperaturi, a brzo na temperaturama 150 do 205 °C. Zbog toga, za maksimalno očvršćivanje kalupa i visoka svojstva odljevaka kalup treba grijati 2 do 24 h (ovisno o veličini) na 150 do 205 °C u struji zraka. Čvrstoća kalupa je visoka, ali je otežano istresanje odljevaka. Tijekom očvršćivanja ne razvijaju se toksični plinovi.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je tekući amin. Sustav vezivanja kod ove mješavine već je objašnjen na stranici 201. Jedina razlika je u tome što je u ovom slučaju katalizator u tekućem, a ne plinovitom stanju.

Od prethodno navedenih samoočvršćujućih kalupnih mješavina za izradu kalupa najviše se upotrebljavaju mješavine s tekućim katalizatorima. Međutim, svaka mješavina ima svoje prednosti i nedostatke. Mješavine s plinovitim katalizatorom pogodne su za velikoserijsku proizvodnju i automatizaciju. Mješavine s tekućim katalizatorom nisu pogodne za velikoserijsku proizvodnju. Razlog tome je vrijeme potrebno za potpuno očvršćivanje kalupa.

U usporedbi s kalupima od svježe kalupne mješavine, osnovna prednost kalupa od kemijski vezanih mješavina (s tekućim ili plinovitim katalizatorom) je poboljšana kontrola dimenzijske točnosti odljevaka. Kruta kemijski vezana kalupna mješavina očvršćuje (otvrdnjava) oko modela, a čvrstoća kalupa postignuta kemijskim vezivima sprječava deformaciju kalupne mješavine kad se talina ulije u kalup.

Kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina omogućuju istovrsne odljevke, odnosno znatno manja odstupanja između pojedinačnih odljevaka tijekom proizvodnog ciklusa. To se često očituje putem smanjenja mase odljevaka pri prijelazu sa kalupa izrađenih od svježe kalupne mješavine na kalupe izrađene od kemijskih vezanih mješavina. Smanjenje mase odljevka može iznositi i više od 5 % čime se ostvaruje ušteda koja može i više nego pokriti troškove veziva i odlaganja neupotreblijive kalupne mješavine te regeneracije ljevaoničkog pijeska.

Kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina nisu drobiti (lomljivi) i raspadaju se vrlo sporo. Ta karakteristika omogućuje gotovo neograničeno vrijeme za sastavljanje kalupa, odnosno pažljivo postavljanje jezgri i kontrolu njihovog položaja u kalupu, odzračivanje, pripremu i postavljanje hladila itd. prije sklapanja kalupa. Sve to može doprinijeti većoj dimenzijskoj točnosti odljevaka.

Kemijski vezane mješavine imaju dobru tečljivost, premda se u cilju proizvodnje kvalitetnijih i točnijih kalupa može pojaviti i potreba i za određenim sabijanjem ili vibriranjem. Međutim, stupanj potrebnog sabijanja je znatno manji nego kod kalupljenja

svježom kalupnom mješavinom. To omogućuje niže troškove izrade modela, odnosno modele od drveta ili i u nekim slučajevima od plastike umjesto metalnih modela koji su potrebni kod kalupljenja svježe kalupne mješavine visokim tlakovima.

Svaka od kemijski vezanih mješavina ima prednosti i nedostatke kod primjene za izradu kalupa (ili jezgri). Obzirom na istresanje i regeneraciju ljevaoničkog pijeska, smole (organska veziva) mogu imati prednost pred natrijevim silikatom (anorganskim vezivom). Većina kemijski vezanih mješavina sa organskim vezivima izvanredno se istresaju iz kalupa. Pod djelovanjem topline tekućeg metala dolazi do dovoljnog slabljenja veze između pojedinih zrna pijeska (izgaranje smole) da se mehaničkim djelovanjem uređaja za istresanje gotovo sva mješavina odvoji od odljevka. Izuzetak su slučajevi kada se lijevaju aluminijske ili magnezijeve slitine, tj. slitine sa niskom temperaturom taljenja. Regeneracija ljevaoničkog pijeska također je viša kod organskih sustava vezivanja. Međutim, natrijev silikat kao vezivo također ima neke prednosti, jer je dostupniji i omogućuje primjenu nekoliko različitih katalizatora.

11.5.2 Priprema kemijski vezanih mješavina

Za pripremu kemijski vezanih mješavina upotrebljavaju se odgovarajući mješači. Izbor mješača ovisi o upotrijebljenom vezivu i potrebnom volumenu mješavine. Diskontinuirani mješač upotrebljava se za miješanje pijeska i veziva koja imaju duga vremena upotrebljivosti ili sporo očvršćuju.

Kod vijčanog kontinuiranog mješača (engl. *Screw-Type Continuous Mixer*) (slika 11.41) katalizator i vezivo dodaju se u pijesak koji se spiralno giba u mješaču i provodi se miješanje. Međutim, tako pripremljena mješavina mora se odmah upotrijebiti, a mješavina koja nije upotrijebljena u predviđenom vremenskom periodu mora se odbaciti.



Slika 11.41. Primjena vijčanog kontinuiranog mješača pri izradi kalupa od kemijski vezane mješavine [96]

Brzohodni kontinuirani (engl. *High-Speed Continuous*) i/ili diskontinuirani mješači također se upotrebljavaju za pripremu kemijski vezanih mješavina. Obično imaju jednu ili više kratkih komora za miješanje uz vrlo visok protok mješavine i nizak nivo otpadne mješavine. Poboljšana lakoća održavanja je jedna od prednosti. Potrebna veličina mješača ovisi o veličini kalupa (ili jezgrenika) i vremenu koje stoji na raspolaganju za punjenje.

11.5.3 Izrada kalupa od kemijski vezanih mješavina

Proizvodnja kalupa od kemijski vezanih mješavina je relativno jednostavna jer su mješavine vrlo tečljive i ne zahtijeva se velika vještina pri njihovoj upotrebi. Međutim, jednolika gustoća kalupa ne postiže se samo jednostavnim ubacivanjem kalupne mješavine u kalupnike.

Pri rukovanju mješavinom pijesak-smola koja se upotrebljava za izradu kalupa potrebno je obratiti pažnju na slijedeće [95]:

- Samoočvršćujuće kemijski vezane mješavine moraju se upotrijebiti i sabiti odmah nakon miješanja prije nego što započne stvarno očvršćivanje. Očvršćivanje započinje čim vezivo dođe u kontakt s katalizatorom u kalupnoj mješavini. Viskoznost filma veziva postepeno raste i započinje očvršćivanje. Viskoznost i reakcija očvršćivanja u velikoj mjeri utječu na tečljivost kalupne mješavine.
- Reakcija očvršćivanja ovisi o temperaturi. Ako je temperatura pijesaka $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ubrzava se očvršćivanje i smanjuje tečljivost mješavine. Općenito vrijedi pravilo da se smanjenjem temperature pijeska za $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ udvostručuje vrijeme očvršćivanja mješavine. Temperatura pijeska treba iznositi od 25 do $35\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Pri izradi većih kalupa (ili jezgri) moraju se upotrijebiti mješači s velikim kapacitetom da bi se spriječilo očvršćivanje mješavine prije nego se završi izrada kalupa ili jezgre. Kod većih kalupa (i jezgri) bitno je da mješavina, posebno oko modela (ili u jezgreniku), bude sabita putem njenog uguravanja i nabijanja u odgovarajuće pozicije. Općenito, samo se sloj od 50 mm se može sabiti u nekom vremenu. Mješavina u blizini modela ne smije biti narušena tijekom daljnjeg dodavanja mješavine iznad nje kad se premaši vrijeme upotrebljivosti mješavine.
- Sabijanje vibriranjem je dobra metoda kompaktiranja mješavine i može se primijeniti pri izradi manjih kalupa i jezgri. Važno je da vrijeme vibriranja bude optimalno. Prekomjerno vibriranje ima negativan utjecaj. Mnogo povoljnija metoda je ručno raspoređivanje mješavine u kritična područja i oko modela i potom vibriranje tijekom punjenja kalupnika ili jezgrenika.
- Mješavine sa uljnim vrstama veziva (alkidne smole) i vezivima niskog viskoziteta imaju veću tečljivost od mješavina vezanih viskoznim vezivima, kao što su furanska veziva.
- Ispitivanjem tvrdoće ne može se utvrditi stupanj sabijenosti hladnoočvršćujućih mješavina. Jedina jednostavna metoda koja je na raspolaganju je određivanje propusnosti površine kalupa ili jezgre pomoću prenosivog uređaja za ispitivanje propusnosti. Sve sabijene mješavine pokazuju smanjenje propusnosti s povećanjem gustoće. Mnogi sustavi vezivanja razvijaju manje čvrstoće ako je gustoća manja od kritične vrijednosti.

11.5.4 Vatrostalni premazi u kalupima od kemijski vezanih mješavina

Da bi se poboljšala kvaliteta površine odljevka i spriječila reakcija između taline i kemijski vezane kalupne mješavine potrebno je ili poželjno da se stijenke kalupne šupljine (i jezgre) premažu odgovarajućim vatrostalnim premazom [95]. Treba pažljivo odabrati premaz da bude kompatibilan s pojedinim tipom kemijski vezane mješavine. U protivnom može doći do nastanka grešaka na odljercima.

Za kalupe i jezgre od mješavina sa silikatnim vezivima treba primijeniti premaz na bazi alkohola ili otapala da bi se spriječilo zapečenje kalupne mješavine na odljevku ili prodor taline u kalupnu mješavinu. U tu svrhu primjenjuju se specijalno pripremljene tjestaste mase bazirane na grafitu ili cirkoniju koje se razrjeđuju alkoholom ili otapalom. Osim što se postiže kvalitetnija površina odljevka, premazima se poboljšava istresanje i sprječava apsorpcija vlage tijekom perioda visoke vlažnosti. Premazi na bazi vode također se mogu upotrijebiti, ali se odmah nakon premazivanja mora provesti sušenje. Taj postupak mora se striktno kontrolirati jer je natrijev silikat topiv u vodi zbog čega dolazi do omekšavanja.

Za premazivanje stijenki kalupne šupljine i jezgri od mješavina sa furanskim ili fenolnim vezivima može se upotrijebiti većina komercijalnih premaza za jezgre. Premaz se smije primijeniti samo nakon potpunog očvršćivanja mješavine. U protivnom kalupi i jezgre postaju drobivi. Bez obzira na primijenjeni premaz, prije sklapanja kalupa treba provesti sušenje.

Kod kalupa i jezgri od mješavina kod kojih je kao vezivo upotrijebljen fenolni uretan mogu se upotrijebiti gotovo sve vrste premaza. Premazi na bazi vode primjenjuju se odmah nakon izrade kalupa, a nakon premazivanja potrebno je odmah provesti sušenje. Kod primjene ostalih premaza, prije sklapanja kalupa treba provesti sušenje.

11.6 Jednokratni školjkasti kalupi

Odljevci od željeznih i neželjeznih ljevova manjih do srednjih dimenzija mogu se proizvoditi lijevanjem u školjkaste kalupe (engl. *Shell Molding*) [97, 98]. Najpoznatiji školjkasti kalupi su oni načinjeni Croning postupkom. Osim toga, nekoliko postupaka proizvodnje odljevaka od željeznih i neželjeznih ljevova (precizni lijev, protugravitacijsko lijevanje pod niskim tlakom, Replicast postupak) upotrebljava školjkaste kalupe koji se dobivaju oblaganjem modela odgovarajućim sredstvima.

11.6.1 Izrada školjkastih kalupa Croning postupkom

Kao što se može zaključiti iz naziva postupka, proizvedeni kalupi imaju oblik školjki, odnosno samo vanjsku krutu koru, a u unutrašnjost se lijeva tekući metal. Za izradu školjki upotrebljava se obloženi ljevaonički pijesak, odnosno zrna pijeska obložena su fenol-formaldehydnom novolak smolom i heksametilentetraminom uz dodatak aditiva i maziva. Da bi došlo do očvršćivanja tako dobivene mješavine treba provesti zagrijavanje.

Fenol-formaldehidne novolak smole su primarne smole za oblaganje pijeska za izradu školjki. Dostupne su u obliku praška, granula ili kao otopine. Te smole ne umrežavaju, odnosno ne očvršćuju bez pomoći sredstva za umrežavanje. Može se očvršćivati upotrebom heksametilentetramina ili rezolne fenolne smole kao očvršćivača. Dodatak

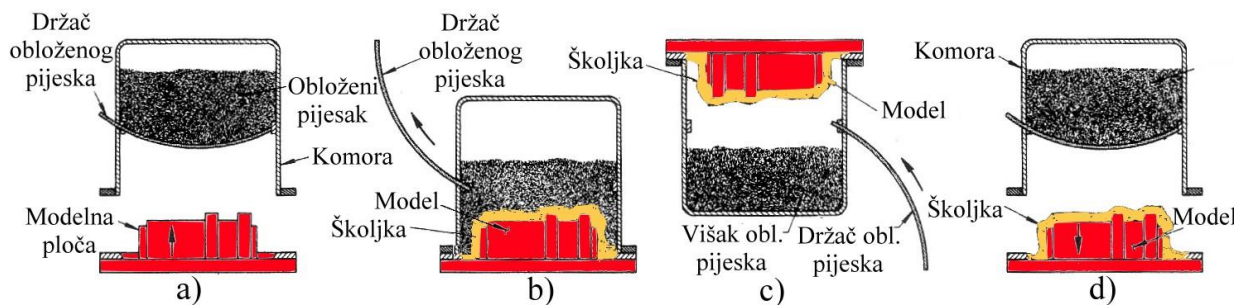
heksametilentetramina iznosi 14 do 16 % u odnosu masu smole. Proces očvršćivanja može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom:



Aditivi se dodaju da bi se eliminirali problemi povezani s ekspanzijom pijeska ili razvijanjem plina iz kalupa na temperaturama tekućeg metala. Kao aditiv dodaje se kaolinska glina ili željezni oksid.

Mazivo je obično kalcij-stearat i dodatak iznosi 2 do 5 % u odnosu na masu smole. Dodaje se da bi se poboljšala tečljivost pijeska, olakšalo odvajanje modela od školjke i ostvarila potrebna svojstva proizvedenih školjki, prvenstveno čvrstoća.

Izrada školjkastog kalupa s horizontalnom ili vertikalnom diobenom ravninom Croning postupkom provodi se na odgovarajućim strojevima koji omogućuju striktnu kontrolu temperature i vremena zagrijavanja (slika 11.42). Obloženi, suhi, slobodno tečljivi pijesak nanosi se na metalnu modelnu ploču zagrijanu na 205 do 345 °C i zadržava dovoljno dugo u kontaktu s da bi se dobila željena debljina školjke.



Slika 11.42. Proizvodnja školjkastih kalupa Croning postupkom: a) podizanje modelne ploče prema komori sa pijeskom, b) pričvršćivanje modelne ploče na komoru, uklanjanje držača pijeska koji potom pada na modelnu ploču i formiranje školjke, c) okretanje modelne ploče i komore za 180° da bi se uklonio višak pijeska i umetanje držača pijeska u komoru, d) odvajanje modelne ploče sa školjkom od komore sa pijeskom [97]

Nakon što je ostvarena dovoljna debljina školjke, modelna ploča se okreće čime se uklanja višak pijeska, odnosno dio koji nije očvrstnuo. Tako dobivena školjka dok je još uvijek na zagrijanoj modelnoj ploči smješta se u zagrijevnu komoru koja je sastavni dio uređaja za izradu kalupa da bi se završilo očvršćivanje. Vrijeme zagrijavanja iznosi 30 do 40 s. Nakon završetka očvršćivanja, školjka se uklanja s modelne ploče. Školjke koje su adekvatno očvrstnute obično imaju tamno žutu ili svjetlo smeđu boju. Tamno smeđa boja školjke ukazuje na prepečenost.

Druga polovica školjkastog kalupa izrađuje se po istom principu pomoću druge modelne ploče. Nakon toga slijedi postavljanje jezgri i sastavljanje školjkastog kalupa lijepljenjem ili mehaničkim putem. Tako dobiven kalup spreman je za lijevanje.

Debljina školjke, odnosno školjkastog kalupa ovisi o temperaturi modelne ploče i vremenu kontakta pijeska sa zagrijanom modelnom pločom. Niža temperatura modelne ploče i kraće vrijeme kontakta rezultiraju manjom debljinom školjke.

Potrebna debljina školjkastog kalupa ovisi o temperaturi lijevanja i obliku odljevka. S porastom temperature lijevanja raste i potrebna debljina školjke. U području debljih segmenata odljevka školjkasti kalup mora imati veću debljinu. Ako se školjkasti kalup okolo zasipa pijeskom, debljina školjki može biti manja.

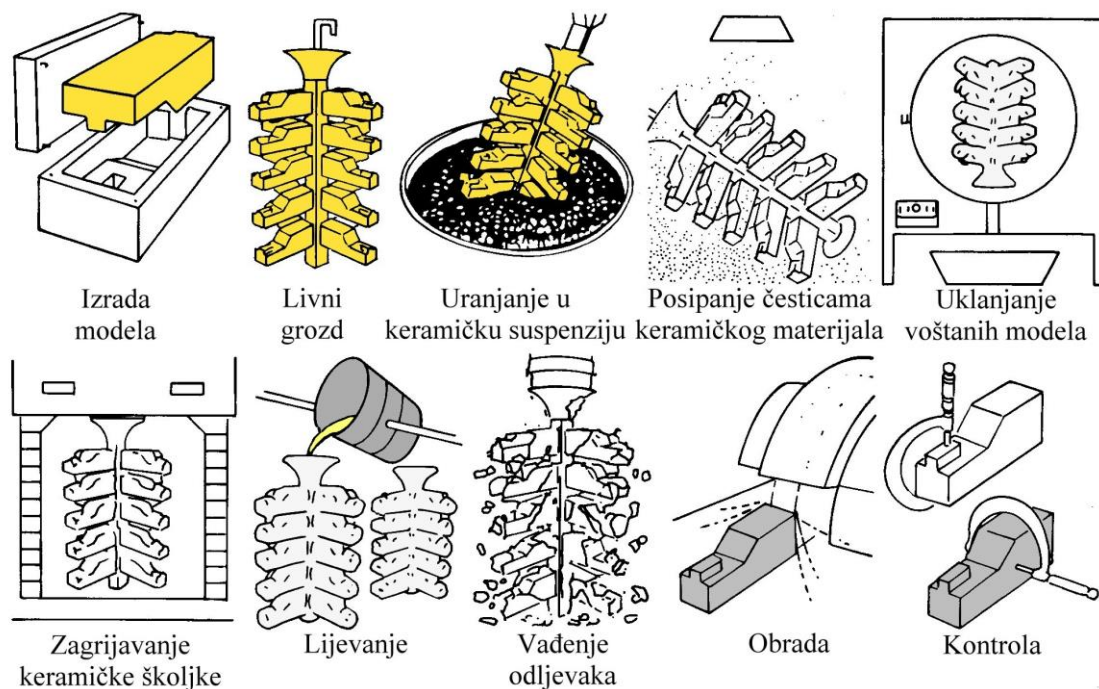
Modelne ploče najčešće se izrađuju od sivog lijeva. Zagrijavanje se provodi pomoću plina ili električne energije.

Proizvodnja odljevaka lijevanjem u školjkaste kalupe izrađene Croning postupkom ima svoje prednosti i nedostatke. Prednost tog postupka je svakako visoka dimenzijska točnost odljevaka što omogućuje proizvodnju odljevaka gotovo konačnog oblika. Tako proizvedeni odljevci zahtijevaju znatno manju količinu strojne obrade. Osim toga, odljevci imaju bolju kvalitetu površine. Nedostaci tog postupka proizvodnje odljevaka su: ograničenje na veličinu i masu odljevka (do 180 kg u serijskoj proizvodnji; pojedinačni odljevci do 450 kg), visoki troškovi modela, visoki troškovi veziva, relativna nefleksibilnost po pitanju uljevnog sustava i pojila, visoki troškovi opreme i niska produktivnost u odnosu na ostale konkurente postupke.

11.6.2 Izrada školjkastih kalupa za precizni lijev

Kod točnog ili preciznog lijeva (engl. *Investment Casting*), odnosno postupka lijevanja sa istaljivim modelom upotrebljavaju se modeli izrađeni od voska koji se oblažu odgovarajućom suspenzijom čime se dobiva keramički školjkasti kalup [80]. Postupak je pogodan za lijevanje odljevaka manje do srednje veličine od svih ljevova.

Na slici 11.43 prikazane su osnovne faze u procesu proizvodnje odljevaka točnim ili preciznim lijevom.



Slika 11.43. Shematski prikaz postupka proizvodnje odljevaka preciznim lijevom [80]

Najprije se izrađuju modeli od voska (slika 11.6). Obično se nekoliko modela od voska spaja na zajednički spust koji je također od voska, stvarajući na taj način livni grozd (klaster). Model ili livni grozd oblaže se vatrostalnim slojem sukcesivnim operacijama uranjanja u keramičku suspenziju, a potom posipa relativno grubim česticama keramičkog materijala po vanjskoj površini. Debljina keramičkog sloja oko modela (livnog grozda) ovisi o broju uranjanja i posipanja modela. Na unutarnjoj strani kalupa (do modela od voska)

formira se fini keramički sloj koji točno reproducira svaki detalj na modelu, uključujući i njegove glatke površine.

Keramičke suspenzije pripremaju se dodavanjem praškastog vatrostralnog materijala u tekuće vezivo i miješanjem. Praškasti vatrostralni materijali bazirani su na kvarcnu, cirkoniju, aluminijskim silikatima i aluminijskom oksidu. Čestice keramičkog materijala kojima se posipa keramički sloj nakon uklanjanja iz keramičke suspenzije također su bazirane na ovim materijalima. Kao vezivo najčešće se upotrebljava koloidna otopina kvarca koja se dobiva uklanjanjem iona natrija iz natrijskih silikata ionskom izmjenom. Osim koloidne otopine kvarca, kao vezivo se upotrebljava i etil silikat, razna hibridna veziva (kombinacija koloidnog kvarca i etil silikata) i tekući natrijev silikat.

Kad se uspostavi dovoljna debljina keramičkog sloja oko modela (livnog grozda), vosak se ukloni iz školjke zagrijavanjem u peći. Pri tome se vosak rastali i većina voska isteče iz školjke, a preostali dio ispari. Mehanička čvrstoća keramičkog sloja postiže se zagrijavanjem na odgovarajuću temperaturu (870 do 1095 °C) pri čemu dolazi do sinteriranja vatrostralnih zrna. Na taj način dobivena keramička školjka, odnosno keramički školjkasti kalup spreman je za ulijevanje rastaljenog metala. Lijevanje se može provoditi na zraku ili pod vakuumom. Nakon skrućivanja taline, keramička školjka mora se razbiti da se oslobodi odljevka, koji se naknadno odvaja od spusta i obrađuje. Na slici 11.44 prikazan je livni grozd, keramički školjkasti kalup i odliveni odljevci.



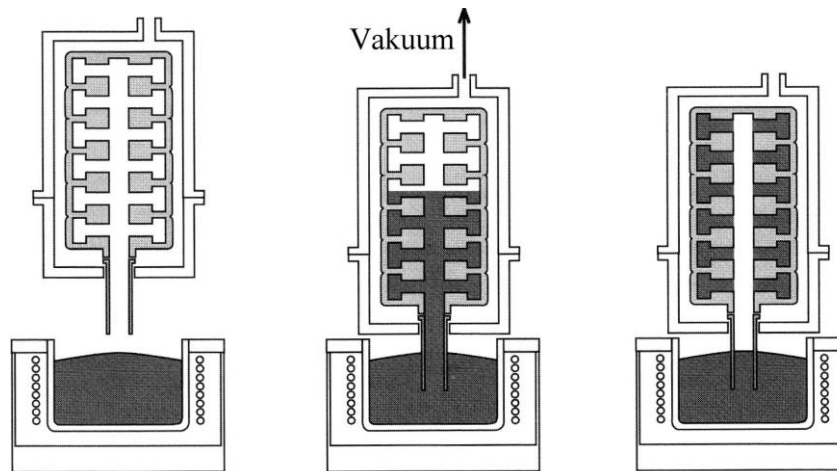
Slika 11.44. Livni grozd, keramički školjkasti kalup i odliveni odljevci

Glavna prednost točnog ili preciznog lijeva je mogućnost proizvodnje kompleksnih odljevka s vrlo tankim stjenkama koji imaju izvrsnu kvalitetu površine i dimenzijsku točnost.

11.6.3 Izrada školjkastih kalupa za protugravitacijsko lijevanje pod niskim tlakom

Za postupak proizvodnje odljevaka protugravitacijskim lijevanjem pod niskim tlakom (engl. *Low-Pressure Countergravity Casting - CLA*) najčešće se upotrebljavaju školjkasti kalupi kao kod preciznog lijeva propusni za plinove (slika 11.45). Školjkasti kalup predgrijava se i smješta u komoru tako da su uljevna čaša i spust okrenuti prema dolje. Komora sa školjkastim kalupom spušta se dolje prema peći da bi se spust uronio u talinu. Primjenom vakuuma na komoru talina se podiže kroz spust i popunjava kalup. Vakuum se

održava sve dok se ne skrutnu odljevci i ušća (kanali koji spajaju spust sa kalupnim šupljinama). Nakon toga uklanja se vakuum i talina iz spusta vraća se natrag u peć.



Slika 11.45. Shematski prikaz postupka proizvodnje odljevaka protugravitacijskim lijevanjem pod niskim tlakom [99]

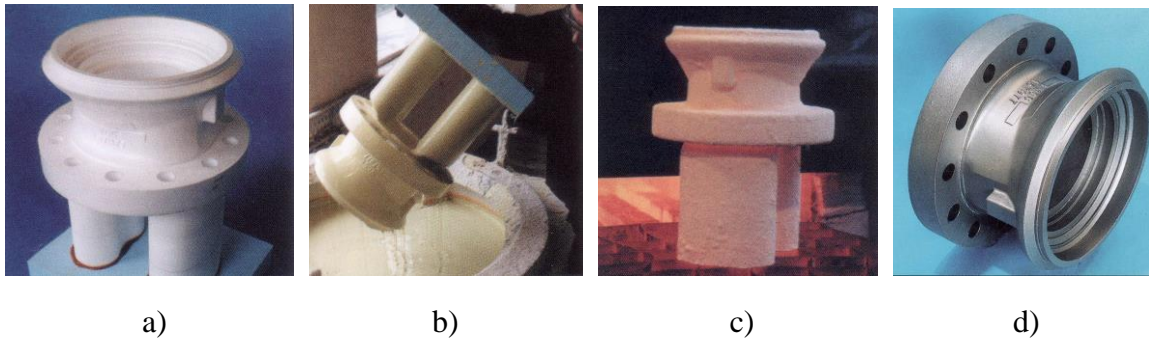
Tim postupkom mogu se lijevati odljevci sa debljinom stijenke < 1 mm koji imaju visoku dimenzijsku točnost [99]. Primjenjuje se u automobilskoj industriji za izradu raznih komponenti upravljačkog mehanizma, dijelove mjenjača itd. Pored toga, našao je primjenu i u avionskoj industriji te drugim granama industrije.

Potrebno je naglasiti da se za ovaj postupak proizvodnje odljevaka mogu upotrijebiti i klasični kalupi izrađeni od kemijski vezanih mješavina uz upotrebu metalnih modela (npr. kalupi od mješavine finog pijeska i uretanskog veziva uz primjenu plinovitog amina kao katalizatora). Važno je da kalup ima odgovarajuću propusnost za plinove da bi se pod djelovanjem vakuuma tekući metal mogao uvući iz peći u kalup.

11.6.4 Izrada školjkastih kalupa za Replicast postupak

Kod Replicast[®] CS (engl. *Ceramic Shell*) postupka upotrebljavaju se isparljivi modeli izrađeni od ekspaniranog polistirena koji se oblažu odgovarajućom keramičkom suspenzijom čime se dobiva keramički školjkasti kalup. Postupak je pogodan za lijevanje odljevaka manje do srednje veličine od svih ljevova. Prema načinu izrade kalupa vrlo je sličan preciznom lijevu [83]. Razvijen je s ciljem da se izbjegnu neki nedostaci postupka s isparljivim pjenastim modelima - prvenstveno stvaranje grešaka povezanih s nastajanjem sjajnog ugljika i povećanjem udjela ugljika u čeličnim odljercima. Na slici 11.46 prikazane su osnovne faze u procesu proizvodnje odljevaka Replicast postupkom.

Nakon izrade modela i pričvršćivanja sustava ulijevanja i napajanja slijedi formiranje tanke keramičke školjke oko modela. Debljina keramičke školjke obično iznosi 3,2 do 4,8 mm, a formira se primjenom lijevaoničkog pijeska i veziva etil silikata. Sastavljeni model uranja se u keramičku suspenziju, a potom se posipa granuliranim vatrostalnim materijalom u fluidiziranom sloju. Nakon toga provodi se sušenje na zraku. Taj proces ponavlja se sve dok se ne postigne željena debljina keramičkog sloja oko modela, koja ovisi o veličini, obliku i debljini stijenke odljevka. Kad se oko modela formira keramički sloj željene debljine, provodi se pečenje na temperaturama od 925 do 1000 °C kako bi se uklonio pjenasti model i očvrstnula keramička školjka.



Slika 11.46. Faze u procesu proizvodnje odljevaka Replicast® postupkom: a) model od ekspaniranog polistirena, b) uranjanje modela u keramičku suspenziju, c) keramički školjkasti kalupa, d) gotovi odljevak [82]

Tako dobiveni keramički školjkasti kalupi polažu se u kalupnike i zasipavaju čistim pijeskom uz vibriranje kalupnika u cilju postizanja maksimalne gustoće pijeska oko keramičkog školjkastog kalupa. Na taj se način sprječava pucanje keramičkog školjkastog kalupa te omogućuje primjena tanjih školjki nego kod preciznog lijeva.

Sam proces lijevanja obavlja se uobičajenom klasičnom tehnikom. Da bi se uklonio zrak iz školjki, neposredno prije lijevanja primjenjuje se vakuum.

Prednosti Replicast® postupka su sljedeće: moguće je lijevati odljevke sa tankim stjenkama, ne dolazi do povećanja udjela ugljika u tekućem metalu jer se pjenasti model uklanja isparavanjem prije ulijevanja taline, nema diobene ravnine, čišćenje i obrada odljevka je znatno smanjena, kvaliteta površine odljevka vrlo je visoka i usporediva s onom kod preciznog lijeva, eliminirane su greške povezane s ključcima pijeska, ne primjenjuju se jezgre za formiranje unutarnjih šupljina u odljevku što bitno utječe na troškove izrade odljevka, velika dimenzijska točnost te povećan izvadak.

11.7 Jednokratni kalupi izrađeni od suspenzije gipsa ili keramičkih suspenzija

Kalupi izrađeni od gipsa i keramički kalupi omogućuju proizvodnu odljevaka sa finim detaljima, glatkom površinom i dimenzijskom točnošću [79]. Keramički kalupi pogodni su za lijevanje svih ljevarskih slitina, dok su kalupi od gipsa pogodni samo za neželjezne slitine s niskom temperaturom taljenja (aluminijске slitine, bakrene slitine, magnezijeve slitine, cinkove slitine). Troškovi izrade kalupa dosta su visoki jer se kalupni materijali ne mogu potpuno regenerirati.

11.7.1 Kalupi od gipsa

Kada se gips (kalcijev sulfat – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) zagrije iznad 128°C , gubi $\frac{3}{4}$ svoje vode i nastaje $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ poznat kao bijeli gips. Zagrijavanjem bijelog gipsa iznad 163°C gubi se sva kristalna voda i nastaje bezvodni CaSO_4 . Ako se taj spoj izloži vlazi na temperaturi nižoj od 100°C , dolazi do apsorpcije vode i ponovo nastaje bijeli gips. Miješanjem bijelog gipsa sa vodom ponovo nastaje $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ koji za nekoliko minuta očvršćuje, odnosno prelazi u koherentnu krutu fazu.

U procesu proizvodnje kalupa bijeli gips se miješa sa više vode nego što je to potrebno za stvaranje $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ čime se dobiva suspenzija. Ta suspenzija odmah se lijeva u kalup po modelu, gdje brzo očvršćuje. Na taj način dobiva se kruti kalup koji u sebi sadrži višak vode. Sljedeća faza je uklanjanje modela i kalupnika. Potom se kalup od gipsa suši u peći na temperaturama 120 do 870 °C da bi se uklonio višak vode. Prije ulijevanja taline kalup od gipsa može se predgrijati da bi se pospješilo formiranje finih detalja na odljevku. Na isti način mogu se izraditi i jezgre od gipsa.

Kalupi od gipsa imaju nizak toplinski kapacitet. To znači da se odljevci sporo hlade u takvim kalupima. Zbog sporog hlađenja moguće je bolje napajanje odljevka te formiranje finih detalja na odljevku koji se teško mogu ostvariti tijekom brzog hlađenja odljevka. Međutim, sporo hlađenje produžuje vrijeme od ulijevanja taline do istresanja odljevka iz kalupa te kod većine ljevarskih slitina rezultira padom čvrstoće.

Modeli i jezgri za izradu kalupa i jezgri od gipsa obično se izrađuju od metala (aluminijske slitine, mjed, cinkove slitine). Mogu se upotrijebiti modeli od epoksidne smole. Za izradu kompleksnih kalupa često se upotrebljavaju fleksibilni gumeni modeli, jer se lakše mogu izvući iz kalupa.

Prednosti kalupa od gipsa su sljedeće: visoka kvaliteta površine, postizanje vrlo finih detalja na odljevku, dobra dimenzijska točnost odljevaka (približno kao kod preciznog lijeva), mogu se lijevati odljevci s tankim stjenkama (npr. 0,64 do 1,02 mm) zbog sporog hlađenja taline u kalupu, jednolična struktura odljevaka, nije prisutno krivljenje odljevaka itd.

11.7.2 Keramički kalupi

Keramički kalupi izrađuju se od finih cirkonskih suspenzija i/ili suspenzija baziranih na kalciniranom mulitu s visokim udjelom Al_2O_3 uz dodatak veziva i primjenu trajnih modela. Cirkonske suspenzije koje se primjenjuju kod ovog postupka izrade kalupa po sastavu su slične cirkonskim suspenzijama koje se upotrebljavaju pri izradi keramičkog školjkastog kalupa kod preciznog lijeva. Za razliku od monolitnih kalupa koji se primjenjuju kod preciznog lijeva, keramički kalupi sastoje se od gornje i donje polovice.

Dva su glavna područja primjene keramičkih kalupa. Jedno područje je proizvodnja preciznih odljevaka za koje trebaju modeli koji su preveliki i neprikladni za precizni lijev. Drugo područje je proizvodnja ograničene količine odljevaka za koje se su prikladni trajni modeli od drveta. Takvi modeli ekonomski su prihvatljiviji od metalnih alata potrebnih za izradu modela od voska.

Lijevanjem u keramičke kalupe mogu se proizvesti odljevci visoke kakvoće s glatkom površinom, visokom dimenzijskom točnošću, vrlo sitnim detaljima i bez nemetalnih uključaka. Keramički kalupi imaju visoku toplinsku stabilnost zbog čega se ne pojavljuju greške zbog penetracije taline u kalupnu mješavinu ili zapečenja kalupne mješavine na površini odljevka.

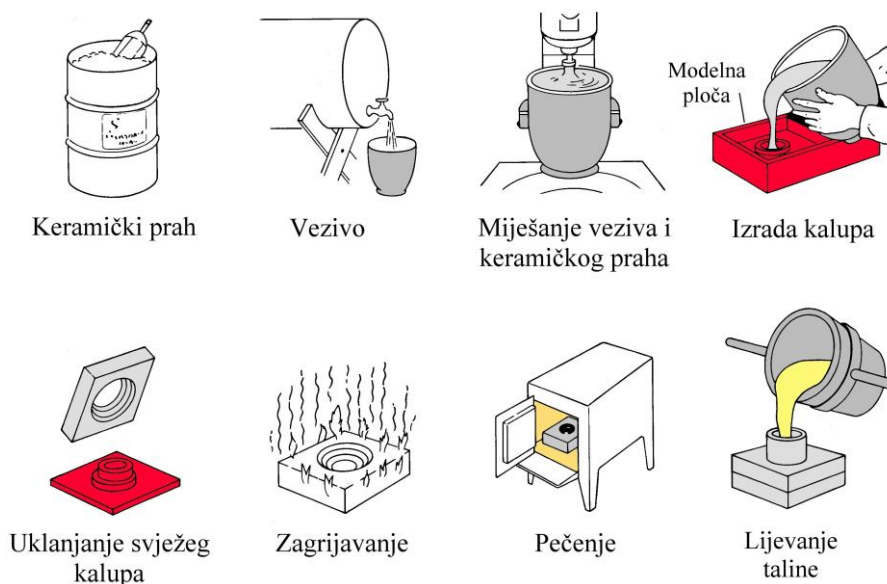
Nedostatak keramičkih kalupa su visoki troškovi kalupnog materijala i nemogućnost njegove regeneracije. Zbog toga se danas upotrebljavaju kompozitni keramički kalupi kod kojih se samo dio kalupa uz model izrađuje od keramičkog materijala, a ostatak kalupa izrađen je od jeftinijeg materijala koji se može regenerirati.

Dva najznačajnija postupka proizvodnje keramičkih kalupa su: Shawn postupak i Unicast postupak.

Shaw postupak omogućuje izradu potpuno keramičkih kalupa ili kompozitnih keramičkih kalupa. Tipična suspenzija sadrži 75 % cirkonija i 25 % kalciniranog mulita uz dodatak hidroliziranog etil silikata kao veziva i male količine sredstva koje potpomaže stvaranje gela da bi se za 3 do 4 min. postiglo očvršćivanje suspenzije.

Ako se izrađuje potpuno keramički kalup, keramička suspenzija prelijeva se preko modelne ploče na koju je postavljen kalupnik (slika 11.47). Nakon završetka kemijske reakcije (stvaranja gela) očvršnuti svježi kalup uklanja se s modelne ploče i potom se skida kalupnik.

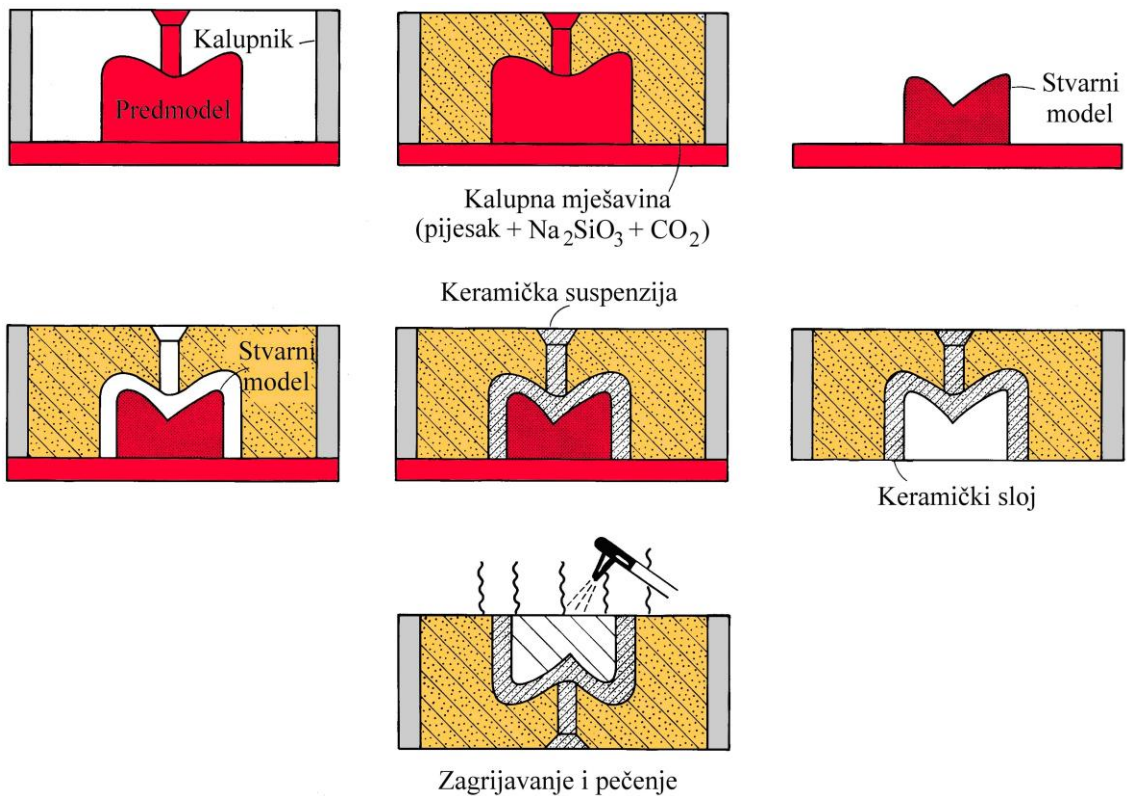
Slijedeća faza je zagrijavanje kalupa da bi se uklonile hlapive komponente. Tijekom zagrijavanja zbog brzog isparavanja alkohola iz suspenzije i reakcija u čvrstom stanju nastaje trodimenzionalna mreža mikropukotina u kalupu. Nastale mikropukotine su dovoljno male zbog čega talina ne može penetrirati u površinu kalupa. S druge strane, te pukotine su dovoljno velike da omoguće izlaženje zraka i ostalih plinova iz kalupa i kompenziraju ekspanziju keramičkih čestica kada dođu u kontakt s talinom, odnosno tekućim metalom. Završna faza je pečenje kalupa na temperaturama od 480 do 650 °C u trajanju od 4 do 6 h. Nakon hlađenja kalupa do određene temperature provodi se sastavljanje kalupa i lijevanje. Temperatura kalupa prije početka lijevanja taline obično iznosi od 40 do 540 °C.



Slika 11.47. Shematski prikaz proizvodnje potpuno keramičkih kalupa Shaw postupkom [79]

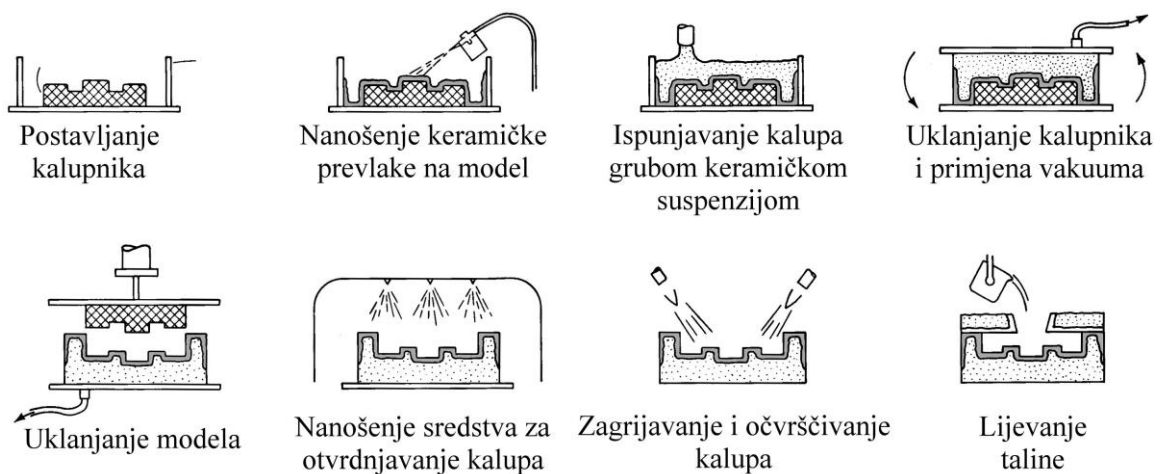
Kod proizvodnje kompozitnih keramičkih kalupa samo se dio kalupa uz model izrađuje kao keramički kalup, a ostatak čini ekonomski povoljniji kalupni materijal (slika 11.48). U tu svrhu upotrebljava se natrijev silikat kao vezivo, a očvršćivanje te mješavine postiže se primjenom CO₂ plina.

Kod izrade kompozitnih keramičkih kalupa upotrebljava se predmodel koji ima nešto veće dimenzije od stvarnog modela (za ~ 2,5 mm) čime se dobiva nešto uvećana kalupna šupljina. Oko predmodela postavlja se kalupnik i zbija mješavina sa natrijevim silikatom, a potom provodi očvršćivanje propuhivanjem s CO₂ plinom. Nakon toga vadi se predmodel i postavlja stvarni model. U zazor između stvarnog modela i očvršnute mješavine koja sadrži natrijev silikat, a koji je nastao jer je predmodel imao veće dimenzije od stvarnog modela, ulijeva se keramička suspenzija. Nakon nekoliko minuta keramička suspenzija prelazi u stanje gela, odnosno očvršćuje. Završna faza obuhvaća zagrijavanje da bi se uklonile hlapive tvari iz keramičkog materijala i pečenje. Pečenje kompozitnih keramičkih kalupa može se provesti na višoj temperaturi nego pečenje potpuno keramičkih kalupa.



Slika 11.48. Shematski prikaz proizvodnje kompozitnih keramičkih kalupa Shaw postupkom [79]

Unicast postupak razlikuje se od Shaw postupka po metodi stabilizacije kalupa te većem broju raspoloživih keramika i veziva. Za razliku od Shaw postupka, kod Unicast postupka kompozitni keramički kalup izrađuje se tako da se najprije formira tanki keramički sloj uz model, a potom provodi popunjavanje jeftinijim kalupnim materijalom i njegovo očvršćivanje. Kompozitni keramički kalupi izrađeni Unicast postupkom obično se upotrebljavaju za proizvodnju većih odljevaka. U tom slučaju debljina keramičkog sloja uz model iznosi od 6,4 do 13 mm. Na slici 11.49 shematski je prikazana proizvodnja kompozitnih keramičkih kalupa Unicast postupkom.



Slika 11.49. Shematski prikaz proizvodnje kompozitnih keramičkih kalupa Unicast postupkom [79]

Na modelnu ploču postavlja se kalupnik. Štrcanjem se na model nanosi tanka prevlaka (4,8 do 9,5 mm) od fine keramičke suspenzije. Prevlaka je ljepljiva i na nju se odmah nanosi jeftina gruba keramička suspenzija sve dok se ne ispuni kalupnik. Suspenzija prelazi u djelomično kruto stanje nakon 2 do 3 min. Potom se uklanja kalupnik, a na vrh kalupa postavlja se ploča i primjenjuje vakuum. Nakon toga kalup se okreće. Slijedeća faza obuhvaća uklanjanje modelne ploče i potom isključivanje vakuuma. Tako dobiveni kalup stavlja se u specijalnu komoru gdje se uranja ili šprica sredstvom za otvrdnjavanje u trajanju od 10 do 15 min. Kao sredstvo za otvrdnjavanje primjenjuje se etilni alkohol, aceton, kerozin, benzen itd. Nakon toga otvrdnuti kalup smješta se u peć gdje se provodi očvršćivanje zagrijavanjem i dovoljno dugim držanjem na 980 °C. Na isti način se izrađuje druga polovica kalupa, a potom se provodi sastavljanje kalupa i lijevanje.

11.8 Jednokratni kalupi izrađeni od ljevaoničkog pijeska bez primjene veziva

Odljevci se mogu proizvoditi lijevanjem u kalupe izrađene samo od ljevaoničkog pijeska bez primjene veziva. Tijekom lijevanja tekućeg metala zrna pijeska mogu se držati zajedno pomoću modela odljevka umjesto vezivom (postupak s isparljivim pjenastim modelom). Drugi način je primjena magnetskog polja (magnetsko kalupljenje) ili vakuuma (vakuumsko kalupljenje) [100].

11.8.1 Izrada kalupa za postupak lijevanja sa isparljivim pjenastim modelom

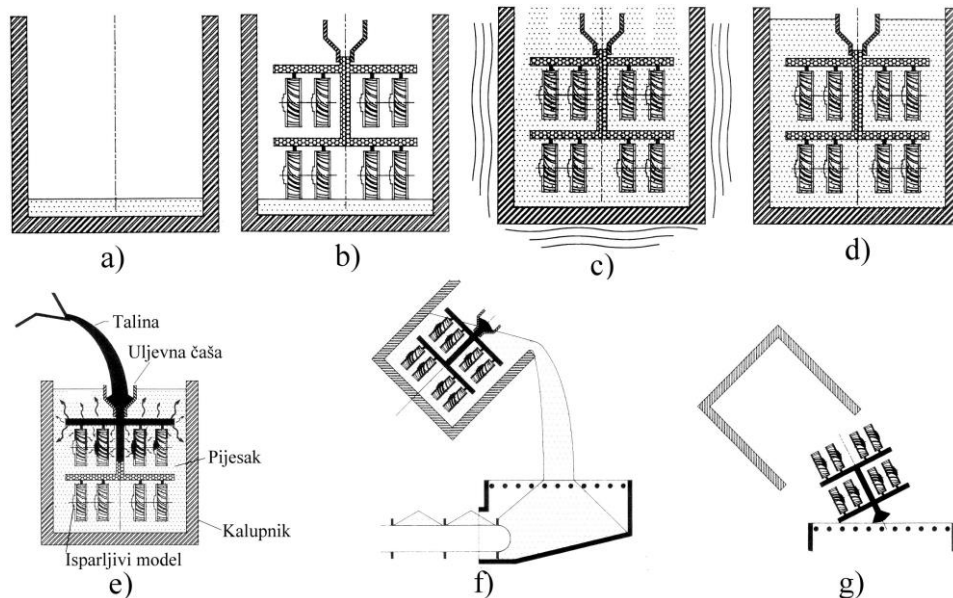
Kod postupka lijevanja sa isparljivim pjenastim modelom (engl. *Lost Foam Casting*) upotrebljavaju se modeli izrađeni od ekspaniranog polistirena koji se oblažu odgovarajućom vatrostalnom prevlakom i potom postavljaju u kalupnik nakon čega slijedi zasipavanje nevezanim pijeskom (slika 11.50) [81]. Taj postupak pogodan je za lijevanje kompleksnih odljevaka od aluminijskih slitina srednje do veće veličine.

Na jedan uljevni sustav obično se postavlja više modela čime se dobiva livni grozd. Nakon toga slijedi oblaganje livnog grozda vatrostalnom prevlakom. Prevlake su obično vatrostalne suspenzije na bazi vode (kvarc, cirkon, kromit, olivin), a nanose se špricanjem, potapanjem ili prelijevanjem preko modela. Ekspanzija kvarca za vrijeme lijevanja može uzrokovati greške na odljercima. Ekspanzija može pokidati prevlaku i na taj način omogućiti penetraciju metala u pijesak. Zamjena kvarcnog pijeska olivinskim bitno smanjuje opasnost od nastanka takvih grešaka.

Posebna pažnja mora se posvetiti kontroli viskoznosti prevlake, a na svakom modelu treba ostvariti jednoličan sloj prevlake. Debljina prevlake utječe na njenu propusnost, odnosno na sposobnost uklanjanja plinova nastalih tijekom isparavanja modela. Loša propusnost prevlake vodi ka stvaranju grešaka na odljevku. Ciljana debljina prevlake iznosi od 0,25 do 0,5 mm ovisno o metalostatskom tlaku metala i temperaturi lijevanja. Zbog postojanja prevlake tekući metal ne dolazi u kontakt s pijeskom. Prevlaka se može smatrati nekom vrstom školjkastog kalupa, s tim da ona nema odgovarajuću čvrstoću da bi se moglo provesti lijevanje bez primjene nevezanog pijeska koji služi kao potpora. Kod klasičnih školjkastih kalupa koji su prethodno razmatrani to je moguće.

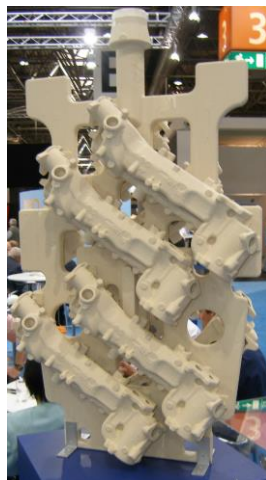
Vrlo je važno ostvariti ravnotežu između propusnosti i mehaničke čvrstoće vatrostalne prevlake. U praksi se to postiže primjenom dvaju veziva kao sastavnih dijelova prevlake.

Jedno vezivo osigurava adhezijska i kohezijska svojstva prije sušenja, a drugo vezivo osigurava čvrstoću nakon sušenja i za vrijeme lijevanja. Odabir prevlake ovisi o tipu metala koji se lijeva i debljini stjenke modela. Vatrostalna obloga ima u izvjesnom smislu i izolacijske sposobnosti te usporava prijenos topline od tekućeg metala na pijesak koji okružuje model. Budući da su prevlake bazirane na vodi, mora se poslije nanošenja provesti sušenje na temperaturama 50 do 65 °C u trajanju od nekoliko sati. Osnovna zadaća sušenja je potpuno odstranjivanje vlage iz prevlake.



Slika 11.50. Shematski prikaz postupka lijevanja sa isparljivim pjenastim modelom:
a) ubacivanje pijeska na dno kalupa, b) postavljanje modela u kalup, c) punjenje kalupa pijeskom i vibriranje radi bolje kompaktnosti kalupa, d) gotov kalup spreman za lijevanje,
e) lijevanje tekućeg metala u kalup, f) istresanje pijeska iz kalupa,
g) istresanje odljevka iz kalupa [81]

Suhi obloženi modeli (livni grozdovi) (slika 11.51) premještaju se u kalupnike i zasipavaju suhim nevezanim pijeskom, uz vibriranje kalupnika da bi pijesak u potpunosti popunio sve šupljine modela te da bi se osigurala potpora i krutost za vrijeme lijevanja.



Slika 11.51. Livni grozd nakon nanošenja prevlake spreman za postavljanje u kalup i zasipavanje nevezanim pijeskom

Tijekom zasipavanja nevezanim pijeskom osobitu pažnju treba posvetiti izbjegavanju deformacije modela do koje može doći zbog njegove male čvrstoće.

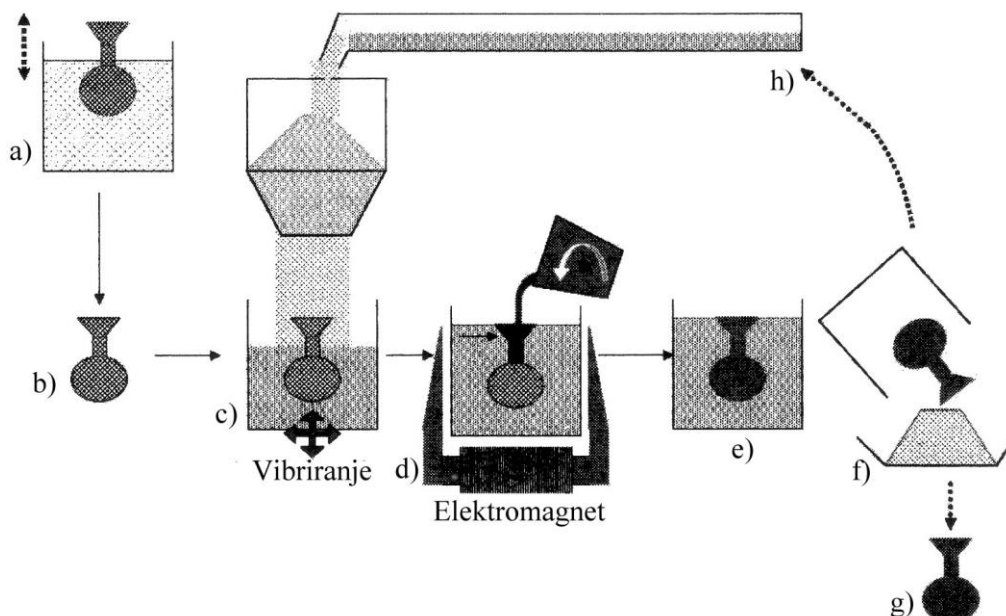
Talina se izravno lijeva na uljevni sustav i pjenasti model pri čemu dolazi do njihovog isparavanja. Iz same činjenice da se kod ovog postupka primjenjuje nevezani pijesak, proizlazi da je vađenje odljevka iz kalupa vrlo jednostavno.

Prednosti tog procesa su mnogobrojne: investicijski troškovi postupka su relativno niski, postupak je vrlo sličan preciznom lijevu (nema diobene ravnine, čišćenje i obrada je znatno smanjena) tako da je kvaliteta odljevaka vrlo visoka, upotrebljava se nevezani pijesak što bitno olakšava regeneraciju, ne primjenjuju se jezgre za formiranje unutarnjih šupljina u odljevku što bitno utječe na troškove izrade odljevka, visoko iskorištenje metala, smanjeno zagađivanje okoliša, može se ostvariti visoka produktivnost po zaposlenom radniku, postoji mogućnost potpune automatizacije te nove konstruktivne mogućnosti.

Postoji i nekoliko nedostataka tog postupka. Većina ljevaonica nema opremu za proizvodnju modela. Oni se moraju izraditi negdje drugdje i transportirati u ljevaonicu. Drugo, plinovi stvoreni raspadom polistirena moraju se skupiti i obraditi prije nego što se puste u atmosferu. Slobodni pijesak ima relativno nisku toplinsku vodljivost što uzrokuje sporo hlađenje odljevaka proizvedenih na taj način. Rezultirajuća gruba mikrostruktura nije često najbolja u pogledu konačnih svojstava odljevka. Osim toga, postupak nije pogodan za većinu čeličnih odljevaka jer tijekom taljenja i isparavanja pjenastog modela može doći do povećanja udjela ugljika.

11.8.2 Magnetsko kalupljenje

Za magnetsko kalupljenje upotrebljavaju se isparljivi modeli od ekspaniranog polistirena na koje je nanosena odgovarajuća vatrostalna prevlaka (slika 11.52).



Slika 11.52. Shematski prikaz magnetskog kalupljenja: a) nanošenje vatrostalne prevlake na model od ekspaniranog polistirena, b) sušenje vatrostalne prevlake na modelu, c) punjenje kalupnika čeličnom sačmom i zbijanje oko modela vibriranjem, d) primjena magnetskog polja i lijevanje, e) hlađenje odljevka, f) istresanje čelične sačme, g) gotov odljevak, h) ponovna upotreba čelične sačme [100]

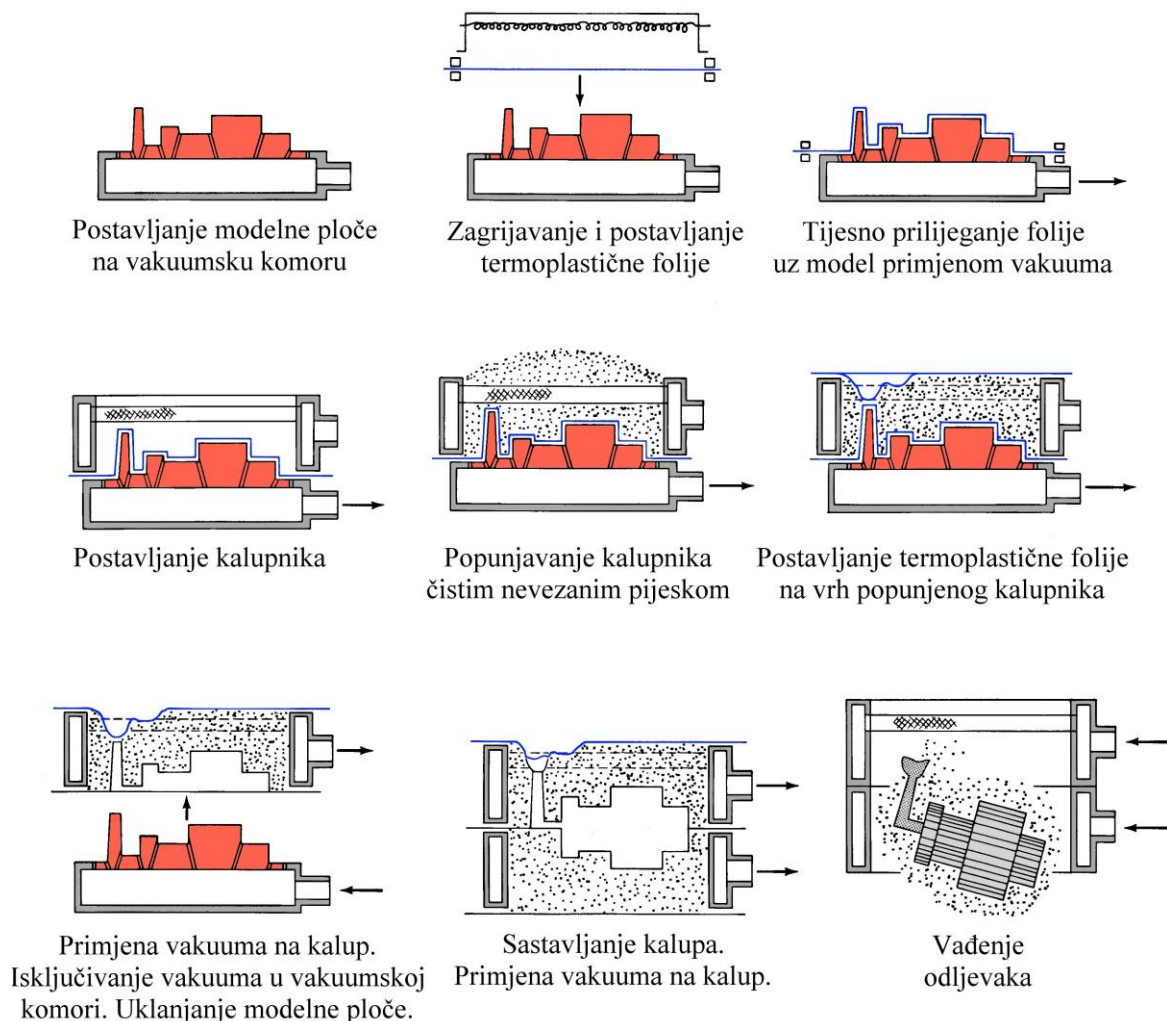
Obloženi model stavlja se u kalupnik i oko njega se zasipavaju kuglice čelične sačme promjera 0,1 do 1 mm [100]. Zbijanje sačme oko modela postiže se vibriranjem. Nakon toga primjenjuje se magnetsko polje da se dobije krut kalup i potom slijedi ulijevanje tekućeg metala. Kad završi skrućivanje i hlađenje odljevka isključuje se magnetsko polje i odljevak se lako uklanja iz kalupa.

Prednost magnetskog kalupljenja je odsutnost kemijskih veziva, smanjena emisija prašine i buke te potpuna automatizacija procesa. Povišena toplinska vodljivost čelične sačme rezultira finijom strukturom odljevaka.

11.8.3 Vakuumsko kalupljenje

Vakuumsko kalupljenje, koje je još poznato pod nazivom V-proces, ne zahtijeva primjenu veziva. Zrna pijeska drže se zajedno na odgovarajućim mjestima primjenom vakuuma na kalup [100]. Kalupi izrađeni tim postupkom pogodni su za lijevanje odljevaka svih veličina od svih ljevova koji se lijevaju u kalupe od svježe kalupne mješavine. Primarna namjena je za velike odljevke koji se proizvode u malim količinama.

Na slici 11.53 shematski su prikazane faze u procesu vakuumnog kalupljenja.



Slika 11.53. Shematski prikaz faza u procesu vakuumnog kalupljenja [100]

Na modelnoj ploči načinjen je veći broj manjih otvora. Modelna ploča potom se pričvršćuje na vakuumsku komoru. Nakon toga se preko modelne ploče postavlja zagrijana termoplastična folija debljine 0,05 do 0,1 mm. Najčešće upotrebljavani materijal za termoplastičnu foliju je etilen-vinilacetat kopolimer koji sadrži 14 do 17 % vinilacetata. Vakuumska komora stavlja se pod umjereni vakuum (27 do 53 kPa). Nastali vakuum preko otvora na modelnoj ploči povlači termoplastičnu foliju prema modelnoj ploči. Na taj način postiže se tijesno prilijeganje folije uz konture modela. Potom se štrcanjem na foliju nanosi odgovarajući premaz da bi se smanjila mogućnost prodiranja taline i nastajanja zapečenja. Sušenje premaza mora se pažljivo provesti da bi se spriječilo prianjanje folije na modelnu ploču.

Slijedeća faza je postavljanje specijalno konstruiranog kalupnika koji ima odgovarajuće priključke da bi se mogao spojiti na vakuum. Kalupnik se popunjava čistim nevezanim pijeskom i pri tome lagano vibrira. Kad je kalupnik popunjen uklanja se višak nevezanog pijeska i gornja površina kalupa (točnije rečeno polovica kalupa) prekriva se termoplastičnom folijom.

Nakon toga kalup se priključuje na vakuum. Vakuum čvrsto drži čestice pijeska zajedno i na taj način dobiva se kalup izuzetno visoke tvrdoće. Potom se isključuje vakuum u vakuumskoj komori na koju je pričvršćena modela ploča i podiže kalup koji je pod konstantnim vakuumom. Na taj način uklanja se modelna ploča. Na isti način izrađuje se i druga polovica kalupa.

Kad su izrađene obje polovice kalupa pristupa se sastavljanju kalupa. Pri sastavljanju kalupa, kao i pri lijevanju, obje polovice kalupa drže se pod vakuumom. Prije lijevanja uklanja se termoplastična folija iznad uljevne čaše, ventilacijskih otvora i otvorenih pojila. Na taj način osigurava se zadržavanje razlike tlaka između kalupa i kalupne šupljine. Nakon završetka lijevanja, vakuum se isključuje nakon 5 do 15 min. Kalupnici se uklanjaju nakon završetka hlađenja odljevka. Obzirom da se ne upotrebljava vezivo, odljevak se lako vadi iz kalupa, a pijesak treba samo ohladiti i ponovo vratiti u proces.

Očigledna prednost vakuumnog kalupljenja je primjena nevezanog pijeska. Zbog toga nije potrebna oprema za izradu kalupne mješavine, a zahtjevi na opremu za istresanje kalupa i regeneraciju pijeska daleko su manji. Osim toga, manji su zahtjevi i na opremu za kontrolu pijeska. Modeli imaju daleko veću trajnost jer pijesak ne dolazi u kontakt s modelom. Obzirom da nema vlage, kalupi se sporije hlade, a time i odljevci. Odljevci imaju visoku dimenzijsku točnost i izvrsnu kvalitetu površine čime se smanjuju troškovi čišćenja i naknadne obrade. Postupak je prihvatljiv i sa ekološkog aspekta jer nema buke, vibracija niti agresivnih plinova i tekućina.

11.9 Lijevanje taline u jednokratne kalupe

Velika većina odljevaka od željeznih i čeličnih ljevova te u manjoj mjeri odljevci od neželjeznih ljevova proizvode se lijevanjem taline određenog kemijskog sastava, kvalitete i temperature u prethodno pripremljene jednokratne kalupe. Temperatura, vrijeme i brzina lijevanja značajno utječu na kvalitetu odljevaka.

Preniska temperatura lijevanja može rezultirati nepotpuno odlivenim odljercima zbog prijevremenog skrućivanja taline te raznim greškama na odljercima (npr. hladni zavar). Previsoka temperatura lijevanja može negativno utjecati na kvalitetu taline i često rezultira greškama na odljercima (tople pukotine, zapečenje kalupne mješavine na površini odljevka itd.). Iz navedenog proizlazi da se mora odabrati optimalna temperatura lijevanja ovisno o debljini stjenke, masi i obliku odljevka, vrsti lijeva i jednokratnog kalupa te vremenu

lijevanja. Npr. temperatura lijevanja čeličnih ljevova obično je za 110 do 165 °C iznad likvidus temperature [15].

Lijevanje se ne smije odvijati presporo jer može doći do prijevremenog skrućivanja, što rezultira nepotpunim odljevcima ili nastankom grešaka na odljevcima (npr. hladni zavar). Prebrzo lijevanje rezultira nastankom turbulencija u uljevnom sustavu i kalupnoj šupljini, čime se pospješuje stvaranje oksida i erozija kalupa. Optimalno vrijeme lijevanja za pojedini odljevak određuje se na osnovi njegove mase i oblika, temperature taline i karakteristika njegovog skrućivanja, načina prijenosa topline i toplinske stabilnosti kalupa. Međutim, u mnogim ljevaonicama lijevaju se različiti odljevci od jedne taline ili čak iz jednog lonca. Prema tome, u tom slučaju ne nastoji se kontrolirati vrijeme lijevanja već brzina kojom talina ulazi u kalupnu šupljinu. To se postiže odgovarajućom konstrukcijom uljevnog sustava.

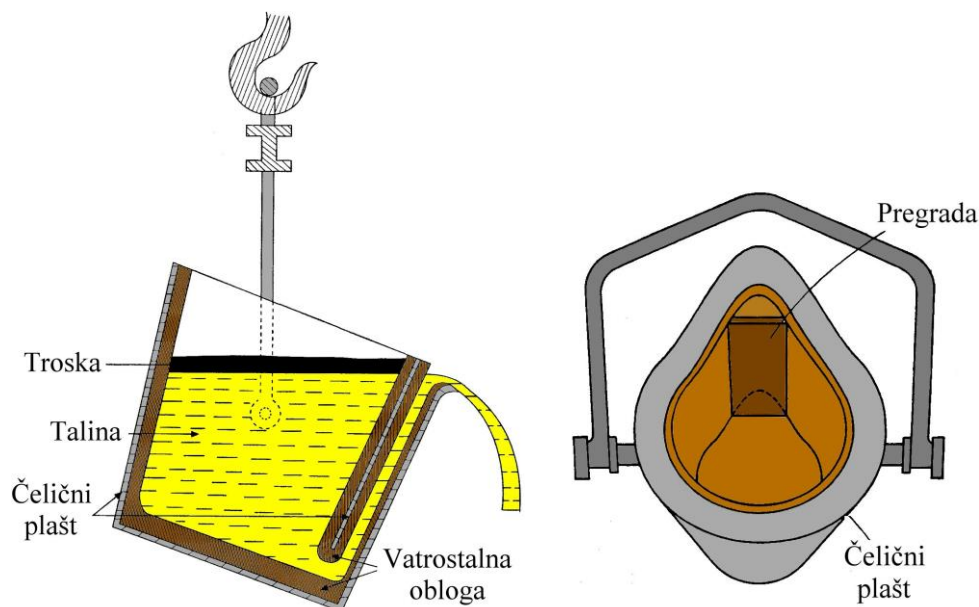
Talina određenog kemijskog sastava, kvalitete i temperature izlijeva se iz peći u lonac i prenosi do kalupa. Lijevanje taline u jednokratne kalupe može se provoditi iz:

- **ljevarskih lonaca ili**
- **automatskih uređaja za lijevanje.**

11.9.1 Ljevarski lonci

Za lijevanje odljevaka u jednokratne kalupe najčešće se primjenjuju tri tipa ljevarskih lonaca: sifonski lonac, lonac s izljevnim kljunom i lonac s čepnom motkom. Odljevci od željeznih ljevova obično se lijevaju iz sifonskih lonaca i lonaca s izljevnim kljunom. Sifonski lonci pogodni su i za lijevanje neželjeznih slitina u jednokratne kalupe, posebno aluminijevih slitina jer su sklone oksidaciji i stvaranju oksida na površini taline. Za lijevanje odljevaka od čeličnih ljevova i niklenih slitina najpogodniji su lonci s čepnom motkom, ali se mogu upotrijebiti i sifonski te lonci s izljevnim kljunom.

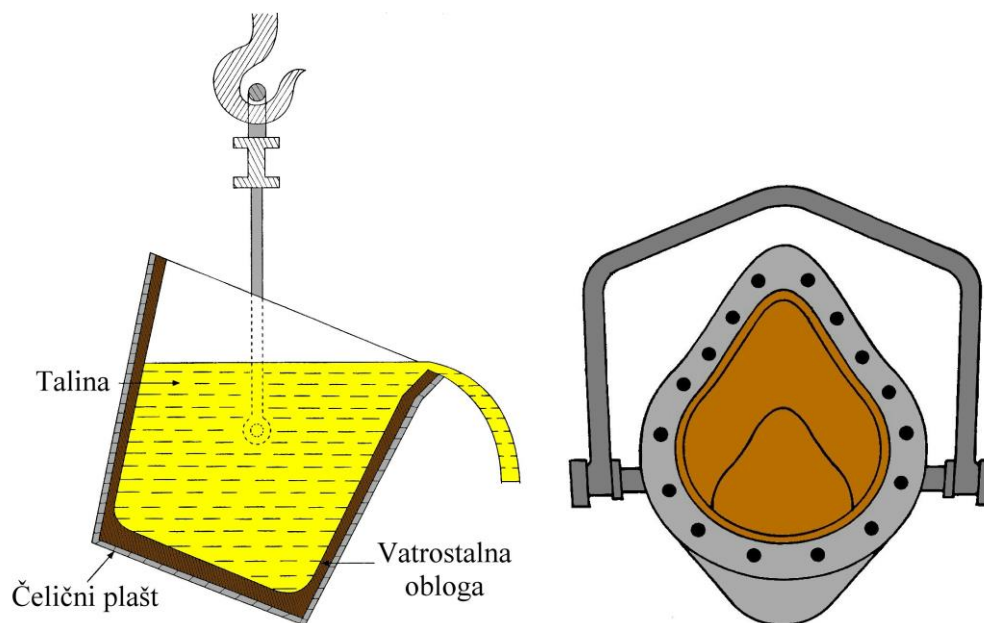
Kod **sifonskih lonaca** izljevni kljun je formiran na plaštu lonca i odvojen je od preostalog volumena lonca odgovarajućom pregradom (slika 11.54).



Slika 11.54. Sifonski lonac [13, 52]

Prilikom nagibanja lonca talina teče od dna lonca kroz stvoreni kanal između pregrade i izljevniog kljuna i preko ruba lonca u kalup. Na taj način sprječava se ulaz nemetalnih uključaka, čestica vatrostoalnog materijala i troske u kalup jer talina koja istječe iz lonca potječe sa njegovog dna, a ne s vrha. Osim toga, navedene nečistoće imaju više vremena na raspolaganju za isplivavanje iz taline. Treba imati na umu da ipak postoji određena mogućnost da talina tijekom kretanja kroz kanal između pregrade i kljuna lonca zahvati strane čestice (uključke). Pored toga, postoji opasnost od skrućivanja taline u kanalu ukoliko je ispuštena iz peći s preniskom temperaturom ili ako se predugo zadržava u loncu. Nagibanje sifonskog lonca provodi se pomoću ručno upravljano g mehanizma na samom loncu.

Lonac s izljevnim kljunom konstrukcijski je vrlo sličan sifonskom loncu, s tim da nema pregradu koja odvaja izljevni kljun od preostalog volumena lonca (slika 11.55). Taj tip lonca ne omogućuje sprječavanje ulaska nemetalnih uključaka, troske i ostalih nečistoća u kalup, zbog čega se ne preporučuje se za lijevanje kvalitetnih odljevaka.



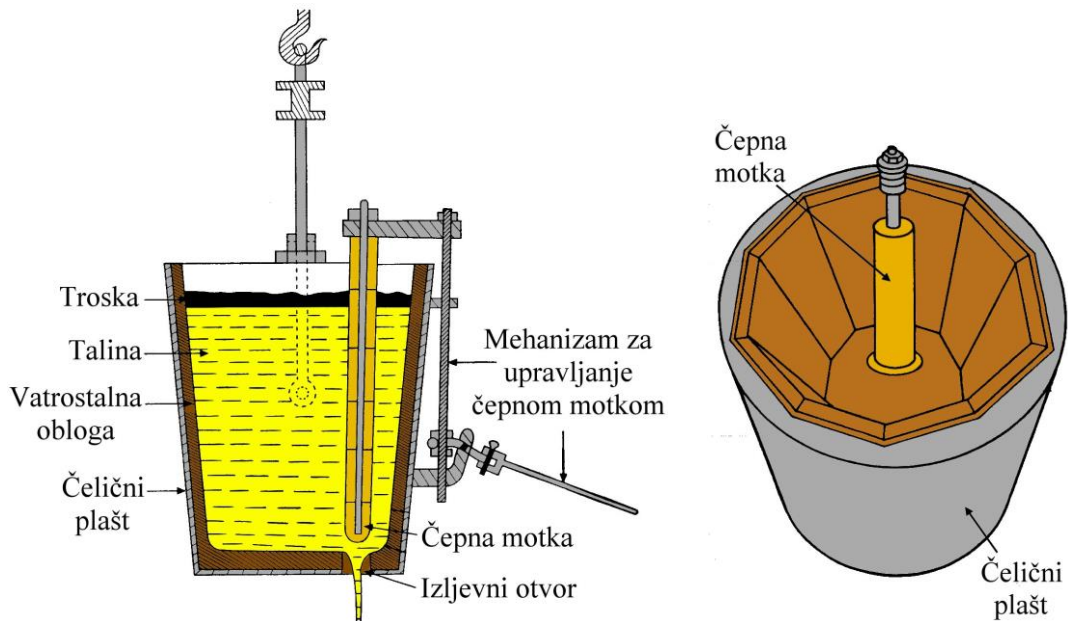
Slika 11.55. Lonac sa izljevnim kljunom [13, 52]

Ako se lonac sa izljevnim kljunom upotrebljava kao ljevarski lonac, svu trosku treba ukloniti s površine taline ili je zadržati u loncu, odnosno spriječiti njen ulazak u kalup. Taj tip lonca često se upotrebljava za prihvatanje taline iz peći i kao prijenosni lonac iz kojeg se talina izlijeva u manje sifonske lonce iz kojih se potom provodi lijevanje u kalupe. Nagibanje lonca s izljevnim kljunom provodi se pomoću ručno upravljano g mehanizma na samom loncu.

Kod **lonca s čepnom motkom** (slika 11.56) talina se ispušta kroz otvor na dnu lonca. Protok taline kontrolira se čepnom motkom koja je smještena unutar lonca. Podizanjem odnosno spuštanjem čepne motke pomoću ručno upravljano g mehanizma koji je postavljen na plašt lonca izvana kontrolira se istjecanje taline. Čepna motka je obložena vatrostoalnim materijalom.

Lijevanje kroz dno preferira se za lijevanje velikih odljevaka iz velikih lonca jer je velike lonce teško nagibati i pri tome još kontrolirati mlaz taline. Lijevanjem kroz dno sprječava se ulazak nemetalnih uključaka, čestica vatrostoalnog materijala i troske iz lonca u kalup te omogućuje njihovo isplivavanje iz taline, što je od velike važnosti za proizvodnju kvalitetnih čeličnih odljevaka. S druge strane, iz velikih lonca s čepnom motkom nepraktično je lijevati u male kalupe jer preostala talina u loncu stvara prevelik metalostatički tlak što

rezultira velikom brzinom istjecanja iz lonca. Pri takvom lijevanju, zbog velike brzine taline može doći i do oštećenja jednokratnog kalupa. Osim toga, pri lijevanju iz velikog lonca potrebno je vrlo malo vremena da se napuni mali kalup, što zahtijeva često otvaranje i zatvaranje lonca tijekom lijevanja. To može dovesti do problema s funkcioniranjem čepne motke, odnosno nemogućnosti zatvaranja otvora na dnu lonca. Zbog toga se za lijevanje manjih odljevaka moraju upotrijebiti manji lonci s čepnom motkom. Međutim, u tom se slučaju umjesto lonaca s čepnom motkom uglavnom primjenjuju sifonski lonci koji su gotovo jednako efikasni po pitanju sprječavanja ulaska nemetalnih uključaka, čestica vatrostalnog materijala i troske u kalup.



Slika 11.56. Lonac s čepnom motkom [13, 52]

Većina problema s ljevarskim loncima u ljevaonicama nastaje zbog neadekvatne pripreme i održavanja njihove vatrostalne obloge. Veliki lonci oblažu se vatrostalnom opekom na koju se nanosi tanki sloj vatrostalne mase (prevlake). Kod manjih lonaca primjenjuje se monolitna vatrostalna obloga koja se formira nabijanjem ili lijevanjem i vibriranjem vatrostalne mase između lonca i postavljene šablone u loncu. Vatrostalnu oblogu lonca treba stalno kontrolirati i popravljati nastala oštećenja, a prema potrebi i zamijeniti.

Lonac u koji se ispušta talina iz peći ili iz kojeg se provodi lijevanje treba prethodno predgrijati, po mogućnosti na što višu temperaturu. Time se sprječava veliki pad temperature taline u loncu, omogućuje ispuštanje iz peći s nižom temperaturom i produžuje vijek trajanja vatrostalne obloge lonca. Predgrijavanjem vatrostalne obloge lonca smanjuju se „toplinski šok“ do kojeg dolazi kad vatrostalna obloga dođe u kontakt s talinom. Nova vatrostalna obloga u loncu mora se osušiti prije predgrijavanja da bi se uklonila vlaga, a potom postepeno povećavati temperatura. Treba imati na umu da je gubitak temperature taline manji što je lonac veći, odnosno što se više taline nalazi u njemu. Toplinski gubitci mogu se smanjiti ako se talina u loncu pokrije slojem izolacijskog materijala.

Tijekom lijevanja pojedinih ljevova u određenoj mjeri prisutna je reoksidacija taline. To je posebno izraženo kod čeličnih ljevova, čime se povećava količina oksidnih uključaka u talini. Zbog toga je korisno ugraditi keramičke filtre u uljevni sustav i time spriječiti ulazak uključaka u kalupnu šuplinu.

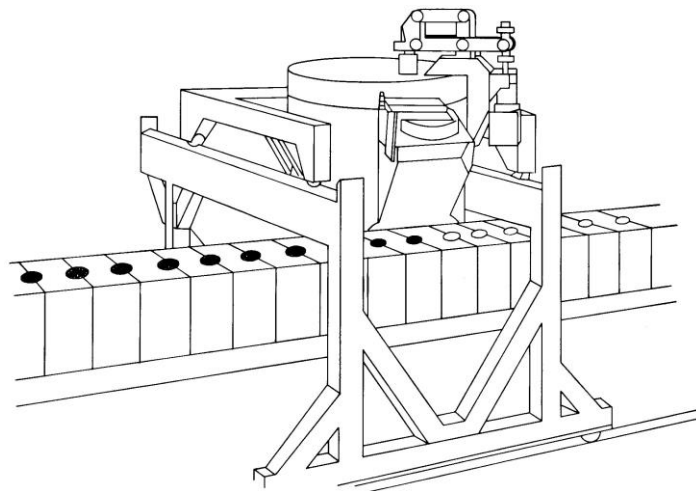
11.9.2 Automatski uređaji za lijevanje

Automatski uređaji za lijevanje, odnosno lijevalice sve se više upotrebljavaju u ljevaonicama jer pružaju niz prednosti u odnosu na klasično lijevanje iz ljevarskih lonaca. Prednosti automatiziranog lijevanja su [101]:

- povećanje produktivnosti, jer se povećava konzistentnost lijevanja kalupa,
- povećanje izvatka, odnosno iskorištenja taline, jer se sprječava prelijevanje i rasprskavanje taline. Osim toga, mogu se upotrijebiti manje uljevne čaše i jednostavniji uljevni sustavi i sustavi napajanja,
- smanjenje broja neispravnih odljevaka, jer se smanjuje mogućnost ulaska uključaka u kalupnu šupljinu, nedolivenost te greške zbog prekida u lijevanju i nepravilnih brzina lijevanja,
- poboljšanje kontrole kvalitete, jer se poboljšava kontrola temperature taline i dodatak cjepiva (kod lijevanja odljevaka od željeznih ljevova),
- poboljšanje kontrole procesa,
- poboljšanje radnih uvjeta u ljevaonici.

Za lijevanje odljevaka od ljevova na osnovi željeza i neželjeznih ljevova upotrebljavaju se različite izvedbe automatskih uređaja za lijevanje. U nastavku su prikazani neki od najčešće upotrebljavanih.

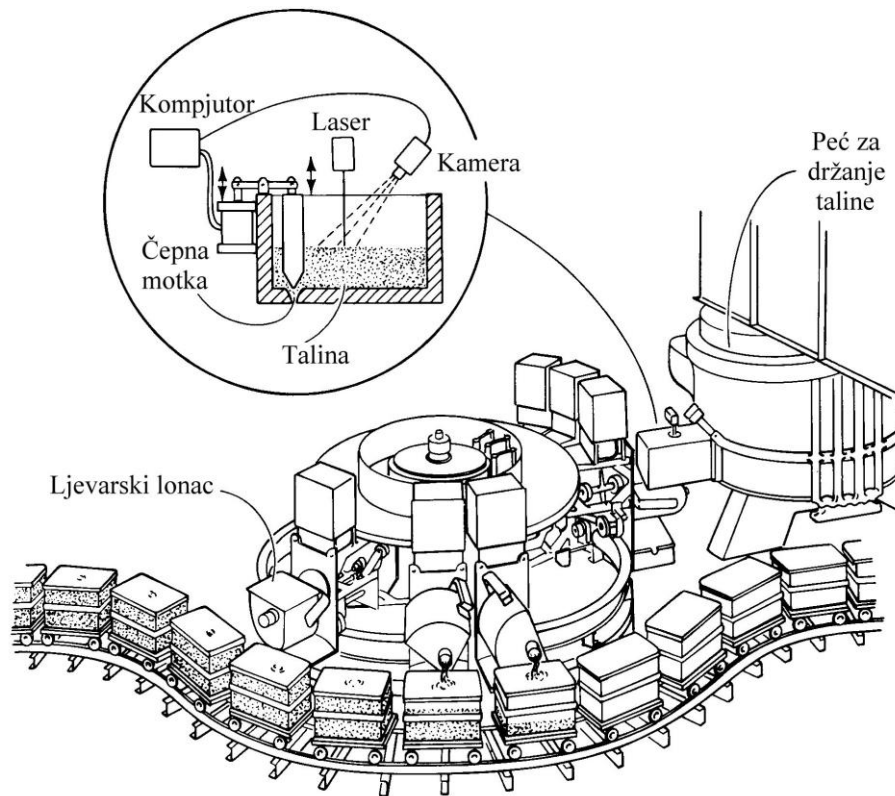
Poluautomatski uređaji za lijevanje sastoje se od lonca s čepnom motkom koji se nalazi iznad linije sa kalupima (slika 11.57). Talina se ispušta iz peći u lonac za prijenos taline i potom ulijeva u lonac s čepnom motkom iz kojeg se provodi lijevanje u kalupe.



Slika 11.57. Lijevanje taline u kalupe izrađene bez primjene kalupnika na kalupnoj liniji pomoću poluautomatskog uređaja za lijevanje [101]

Kod rotacijskog mehaničkog uređaja za lijevanje pomoću lasera i kamere kontrolira se doziranje taline u specijalne ljevarske lonce (slika 11.58). Sustav kontrole instaliran je na peć za držanje taline (tj. receptor) iz koje se točno određena količina taline dozira u specijalne ljevarske lonce koji su sastavni dio rotacijskog mehaničkog uređaja za lijevanje. Laserska zraka fokusira se na površinu taline. Kamera registrira reflektiranu lasersku zraku i prosljeđuje informaciju kontrolnoj jedinici koja regulira rad čepne motke, odnosno doziranje taline u specijalni ljevarski lonac. Čim se jedan ljevarski lonac napuni talinom, rotacijski

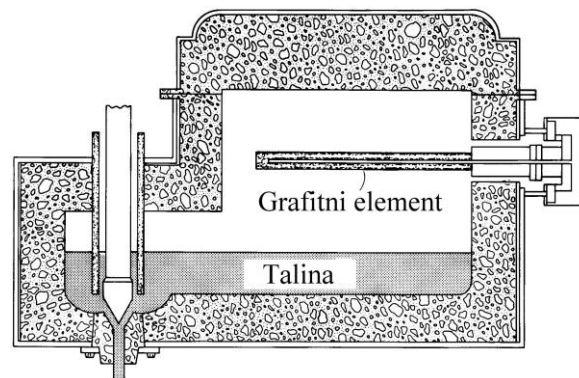
mehanički uređaj za lijevanje zakreće se i provodi se punjenje slijedećeg ljevarskog lonca. Istovremeno se provodi lijevanje iz ljevarskih lonaca koji se nalaze iznad linije s kalupima.



Slika 11.58. Rotacijski mehanički uređaj za lijevanje s jedinicom za automatsku kontrolu doziranja taline iz peći za držanje taline u specijalne ljevarske lonce [102]

Primjenom električnih uređaja za zagrijavanje, odnosno elektrootpornog i indukcijskog zagrijavanja, mogu se kontrolirati gubitci topline i temperatura taline prije i tijekom lijevanja. Osim toga, u takvim uređajima, koji se nazivaju ljevnim pećima, moguće je zadržavanje taline tijekom dužeg vremenskog perioda i poremećaja u procesu lijevanja.

Tijekom elektrootpornog zagrijavanja toplina nastaje pri prolasku električne energije kroz zagrijevni element. Zagrijavanje taline provodi se zračenjem. Za zagrijavanje neželjeznih ljevova upotrebljavaju se zagrijevni elementi napravljeni od metala ili silicijevog karbida. Za zagrijavanje željeznih ljevova upotrebljavaju se grafitni zagrijevni elementi jer treba postići više temperature (slika 11.59).



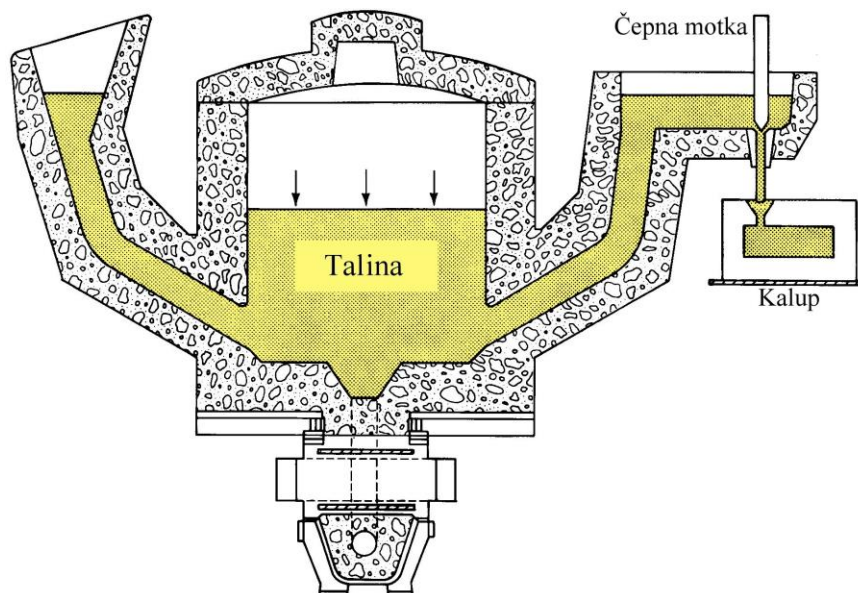
Slika 11.59. Elektrootporna ljevna peć [101]

Talina se izlijeva kroz dno ljevne peći koja se nalazi iznad kalupne linije, a protok i količina taline kontroliraju se čepnom motkom. Ljevna peć može se nagibati čime se omogućuje potpuno pražnjenje i održavanje nivoa taline ispod grafitnog zagrijevnog elemenata.

Pri indukcijskom zagrijavanju toplina nastaje stvaranjem vrtložnih električnih struja u talini. Zbog otpora metala dio električne energije predstavljen vrtložnim strujama transformira se u toplinsku energiju podižući temperaturu taline. U ljevaonicama neželjeznih ljevova u tu svrhu obično se upotrebljavaju lončaste peći i indukcijske peći bez jezgre.

Kanalne indukcijske ljevne peći su specijalno dizajnirane peći iz kojih se talina pod djelovanjem tlaka plina na njenu površinu potiskuje prema kalupu (slika 11.60). Na taj način moguće je ostvariti mirno punjenje kalupa. Osim toga, takvim načinom lijevanja značajno se smanjuje mogućnost ulaska nemetalnih uključaka, čestica vatrostalnog materijala i troske iz peći u kalup. Taj tip lijevanih peći često se upotrebljava u ljevaonicama željeznih ljevova.

Talina istječe iz peći preko izljevskog žlijeba ili kroz izljevnik sa ili bez čepne motke koji su smješteni u izljevnoj komori koja je postavljena na plašt ljevne peći.



Slika 11.60. Tlačna kanalna indukcijska ljevna peć [101]

Varijacijom tlaka u ljevnoj peći može se kontrolirati intenzitet lijevanja ili nivo taline iznad izljevniksa u izljevnoj komori. Kontrolom nivoa taline u izljevnoj komori uspostavlja se konstantni statički tlak iznad izljevniksa i osigurava konzistentna brzina lijevanja. Ako je lijev posebno osjetljiv na oksidaciju, kao tlačni medij upotrebljava se inertni plin.

11.10 Čišćenje odljevaka odlivenih u jednokratne kalupe

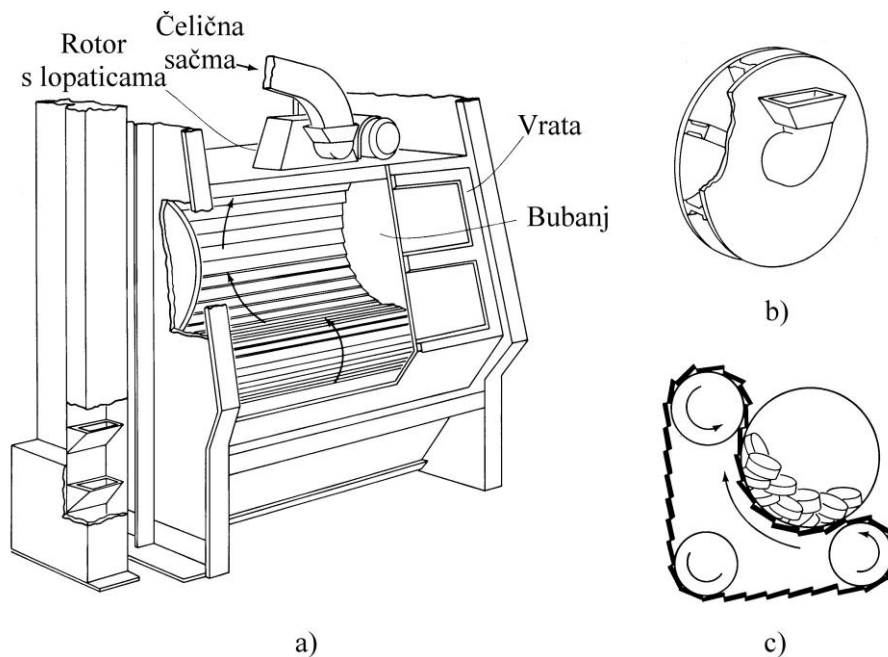
Odljevci se nakon skrućivanja i hlađenja uklanjaju iz kalupa. Jednokratni kalupi moraju se razrušiti da bi se odljevak mogao ukloniti. Nakon toga slijedi čišćenje odljevka da bi se sa njegove površine uklonila zaostala kalupna mješavina i ostale prisutne nečistoće.

Čišćenje odljevaka je proces u kojem se abrazivne čestice, najčešće čelična sačma ili pijesak, kreću velikom brzinom i udaraju o površinu odljevka te pri tome uklanjaju prisutna onečišćenja (kalupna mješavina, ogorina itd.). Današnji uređaji za čišćenje odljevaka

uglavnom upotrebljavaju čeličnu sačmu. Čelična sačma izrađuje se od visokougličnog čeličnog lijeva koji se toplinski obrađuje da bi se ostvarila mikrostruktura koja se sastoji od popuštenog martenzita. Obično se upotrebljava čelična sačma čija tvrdoća iznosi od 40 do 50 HRC [103].

Velika brzina abrazivnih čestica postiže se primjenom rotora s lopaticama ili sapnica i komprimiranog zraka koji nosi abrazivne čestice. Zbog veće efikasnosti u praksi su više zastupljene razne izvedbe uređaja s rotorom i lopaticama.

Ako veličina i oblik odljevka omogućuju njegovo kotrljanje (okretanje, prevrtanje), u ljevaonicama manjeg do srednjeg kapaciteta najčešće se upotrebljavaju diskontinuirane bubnjaste čistilice (slika 11.61). Kod velikoserijske proizvodnje upotrebljavaju se kontinuirane bubnjaste čistilice.



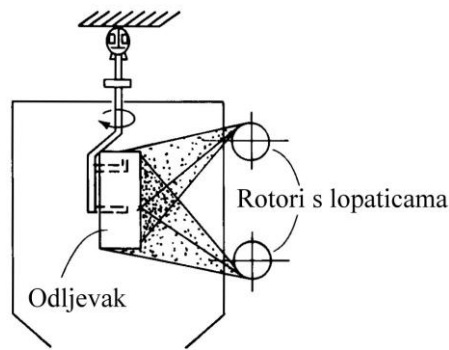
Slika 11.61. a) diskontinuirana bubnjasta čistilica, b) rotor s lopaticama, c) kontinuirani (tj. beskonačni) transporter izrađen od gume ili čeličnih segmenata [103]

Odljevci se ubacuju u korito formirano na kontinuiranom transporteru i potom se uređaj zatvara. Tijekom čišćenja čelična sačma nabacuje se na odljevke, a kontinuirani transporter stalno se kreće i kotrlja, odnosno prevrće odljevke čime ih sve i sa svih strana izlaže djelovanju mlaza čelične sačme. Kad se završi čišćenje odljevci se vade iz čistilice i ubacuju se neočišćeni odljevci.

Na slici 11.61b može se vidjeti da se lopatice rotora nalaze između dva diska i one nabacuju čeličnu sačmu na površinu odljevka. Čelična sačma se pomoću lijevka dovodi u središte rotora i pada na lopatice. Zbog velike brzine vrtnje rotora lopatice zahvaćaju čeličnu sačmu i velikom je brzinom nabacuju na odljevak.

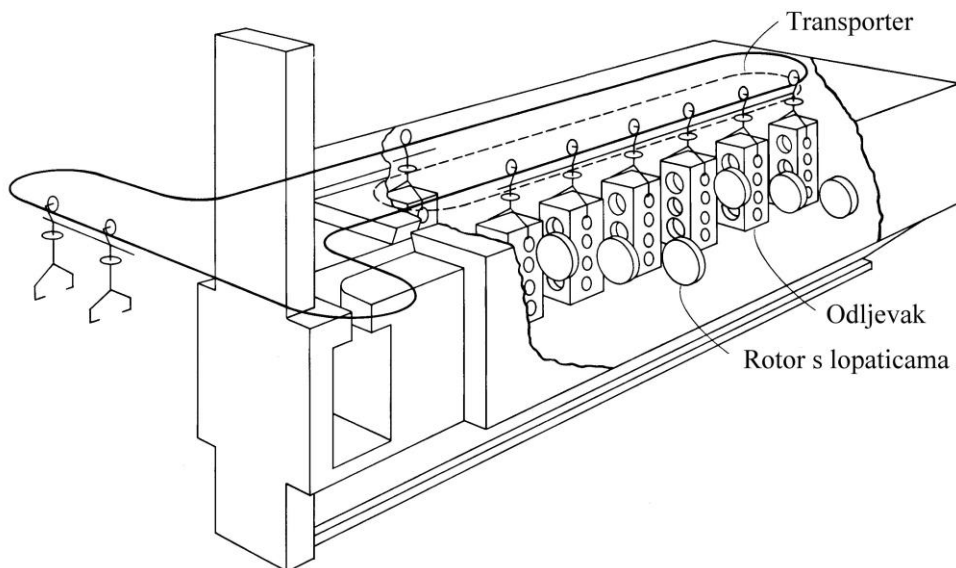
Ako veličina i oblik odljevka omogućuju njegovo kotrljanje (tj. okretanje ili prevrtanje), kod velikoserijske proizvodnje upotrebljavaju se kontinuirane bubnjaste čistilice. Kod kontinuiranih bubnjastih čistilica ostvaren je kontinuirani protok odljevaka kroz uređaj. Odljevci ulaze u čistilicu na jednom kraju, čiste se i na drugom kraju čistilice izlaze van.

Ako se odljevci tijekom čišćenja ne mogu ili ne smiju prevrtati (tj. okretati ili kotrljati), najčešće se upotrebljavaju čistilice kod kojih odljevci visi i rotira oko svoje vertikalne osi tijekom čišćenja (slika 11.62). Takvi uređaji obično imaju više rotora s lopaticama.



Slika 11.62. Uređaj za čišćenje kod kojeg odljevnik visi i rotira oko svoje vertikalne osi tijekom čišćenja [103]

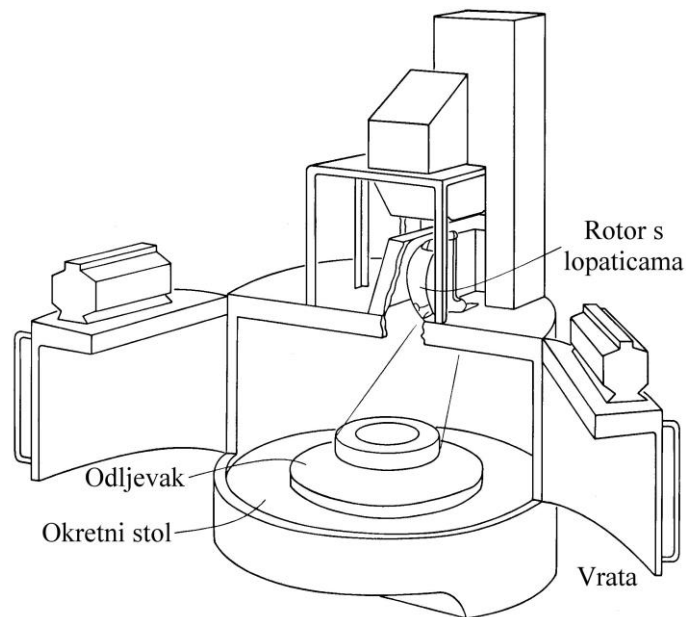
Kod velikoserijske proizvodnje odljevaka, kao što je slučaj u ljevaonicama za automobilsku industriju, upotrebljavaju se kontinuirane čistilice kod kojih odljevci vise tijekom čišćenja (slika 11.63).



Slika 11.63. Kontinuirana čistilica s ovješanim transporterom [103]

Odljevci se vješaju na specijalne kuke ovješnog transportera. Transporter uvodi odljevke u komoru gdje se čišćenje svakog odljevka provodi nabacivanjem mlaza čelične sačme s više strana (uređaji s više rotora s lopaticama). Transporter se može kretati jednakom brzinom ili brže u području između dva reda rotora, a potom sporije u području gdje su smješteni rotori, odnosno tijekom faze čišćenja.

Kod maloserijske proizvodnje i u slučajevima kada su odljevci preveliki da bi se mogli prevrtati (tj. okretati) ili vješati na kuke, čišćenje odljevaka najčešće se provodi pomoću čistilica sa okretnim stolom (slika 11.64). Ti uređaji za čišćenje posebno su pogodni za čišćenje lomljivih odljevaka, ploča, i odljevaka velike dužine i male debljine stjenke. Odljevnik ili odljevci postavljaju se na stol i potom se zatvaraju vrata na komori. Tijekom čišćenja stol i odljevnik rotiraju, a čišćenje se provodi mlazom čelične sačme primjenom jednog do tri rotora s lopaticama. Da bi se ostvarilo čišćenje svih površina odljevnik se mora okrenuti i čišćenje ponoviti.



Slika 11.64. Čistilica sa okretnim stolom [103]

Za čišćenje vrlo velikih odljevaka primjenjuje se nešto izmijenjena varijanta čistilice sa okretnim stolom. U tom slučaju gradi se velika komora, a odljevak se smješta na rotirajući stol koji se nalazi na transporteru (kolicima). U komoru se postavlja veći broj rotora s lopaticama. Tijekom čišćenje odljevak rotira, a transporter ili rotori pomiču se da bi se ostvarila veća efikasnost. Da bi se ostvarilo čišćenje svih površina odljevaka se mora okrenuti i čišćenje ponoviti.

11.11 Regeneracija ljevaoničkog pijeska

Ekonomičnost proizvodnje odljevaka zahtijeva da se ljevaonički pijesak regenerira iz neupotreblijive kalupne i jezgrene mješavine i kao takav ponovo upotrijebi za izradu nove mješavine. Na taj način smanjuju se troškovi za novi pijesak i troškovi odlaganja neupotreblijive kalupne i jezgrene mješavine. Posebno zahtjevno je odlaganje kemijski vezanih mješavina koje sadrže opasne tvari, kao što je npr. fenol i formaldehid.

Svježa kalupna mješavina upotrebljava više puta u procesu proizvodnje odljevaka, s tima da se između svakog ciklusa osvježava dodatkom novog pijeska, bentonita, aditiva i vode prema potrebi. Postepeno se smanjuje njena kvaliteta iako se osvježava dodatkom novog pijeska, veziva, aditiva i vode.

Nakon određenog broja ciklusa svježa kalupna mješavina postaje neupotreblijiva. Pod djelovanjem tekućeg metala i visokih temperatura pri ulijevanju taline glina gubi kristalnu vodu i smanjuje joj se sposobnost vezivanja. Pečena glina djelomično se raspada u prah, a djelomično tvori tvrdi ovoj oko kvarcnih zrna. Ta pojava naziva se oolitizacija kalupne mješavine. Površina oolitiziranih zrna najčešće je porozna sa pukotinama i neravninama i zahtijeva veću količinu vode kod pripreme mješavine. Praktički u svakom kružnom ciklusu mješavine stvara se novi sloj veziva oko zrna pijeska, što znači da se povećava debljina sloja veziva oko zrna pijeska. Na taj način zrno se povećava. Rast zrna je različit, te mješavine mogu biti s više ili manje oolitiziranog pijeska. Stvorena ovojnica oko zrna pijeska ljušti se tijekom miješanja i dodira s tekućim metalom. Visok stupanj oolitizacije pogoršava svojstva

mješavine. Istovremeno dolazi do raspucavanja i drobljenja zrna pijeska, zbog čega se stvara veća količina prašine i mijenja granulometrijski sastav kalupne mješavine. Više prašine zahtijeva veći dodatak veziva. Sa povećanjem broja ciklusa upotrebe smanjuje se propusnost i plastičnost svježe kalupne mješavine.

Za razliku od svježe kalupne mješavine, kemijski vezana mješavina ne može se upotrebljavati više puta u procesu proizvodnje odljevaka jer čvrstoću postiže putem kemijske reakcije koja je nepovratna. Na zrnima pijeska nalazi se prevlaka od kemijskog veziva koje je izreagiralo i ponaša se kao inertna tvar nakon što se jedanput upotrijebi. Ta inertna prevlaka naziva se „mrtvo“ vezivo i treba se ukloniti sa zrna pijeska jer je krhka i povećava udio sitnih čestica u pijesku. Ako se ne ukloni mijenja svojstva pijeska i čini ga potpuno nepogodnim za daljnju upotrebu jer se odgovarajuća čvrstoća mješavine neće moći postići čak ni sa većim dodatkom novog veziva.

Regeneracijom se ljevaonički pijesak vraća u prvobitno stanje i kao takav može se ponovo upotrijebiti za izradu kalupa ili jezgri. Glavne faze regeneracije su: drobljenje grumena i izdvajanje komada metala, uklanjanje veziva sa zrna pijeska, klasiranje pijeska i uklanjanje prašine. Uklanjanje veziva sa zrna pijeska može se provesti mokrim, suhim i toplinskim postupkom regeneracije. Odabir postupka ovisi o vrsti veziva koje treba ukloniti sa zrna pijeska.

11.11.1 Mokra regeneracija

Mokra regeneracija nekada se upotrebljava za obradu neupotrebljive svježe kalupne mješavine. Zbog relativno visoke potrošnje vode, danas se upotrebljava samo za neupotrebljive mješavine sa silikatnim vezivom, jer se te mješavine teško mogu regenerirati suhim postupkom i nije moguća regeneracija toplinskim postupkom [95]. Toplinska regeneracija nije moguća jer se silikat prije tali nego što izgara u peći.

Otpadnoj mješavini se nakon uklanjanja metalnih komponenti i drobljenja gruda dodaje voda. Nakon toga provodi se miješanje zbog čega dolazi do međusobnog trljanja zrna pijeska. Pod djelovanjem trljanja i vode vezivo se ispire sa zrna pijeska i otapa u vodi. Pijesak se izdvaja iz nastale suspenzije, nakon čega se smanjuje udio vode u pijesku i provodi sušenje. Nastala otpadna voda mora se obraditi prije nego što se ispusti u kanalizaciju.

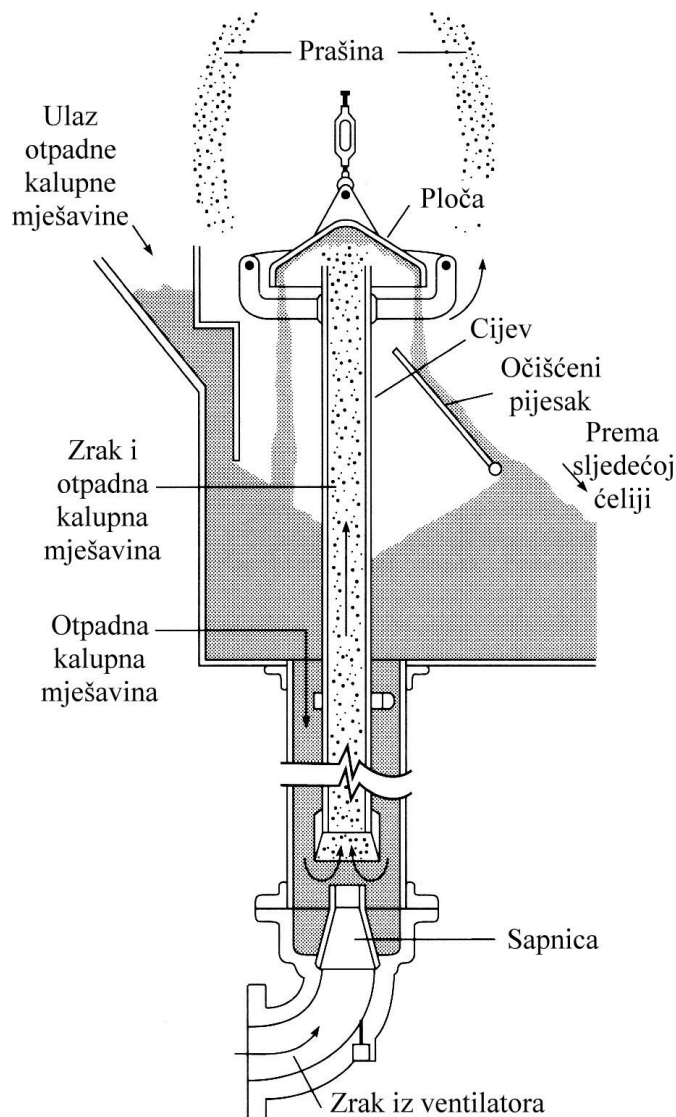
Kod mokre regeneracije otapajući učinak vode ima veliki značaj. Zbog toga je mokra regeneracija pogodna za obradu neupotrebljive svježe kalupne mješavine, ali nije pogodna za otpadne mješavine koje kao vezivo sadrže netopive organske smole.

Ljevaonički pijesak regeneriran mokrim postupkom ima jako dobru kvalitetu i može se upotrijebiti za izradu modelne mješavine.

11.11.2 Suha regeneracija

Suhi postupak regeneracije pogodan je za uklanjanje gline, ali i većine drugih veziva. Zasniva se na činjenici da je pod djelovanjem tekućeg metala u kalupu došlo do izgaranja veziva koje zbog toga postaje krhko i lomljivo. Ako se zrna pijeska sa takvim vezivom međusobno trljaju, vezivo će otpadati sa površine zrna. Razlikuju se pneumatski i mehanički uređaji za uklanjanje veziva sa zrna pijeska.

Pneumatski uređaji za uklanjanje veziva sa zrna ljevaoničkog pijeska. Na slici 11.65 prikazana je jedna ćelija pneumatskog uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska.

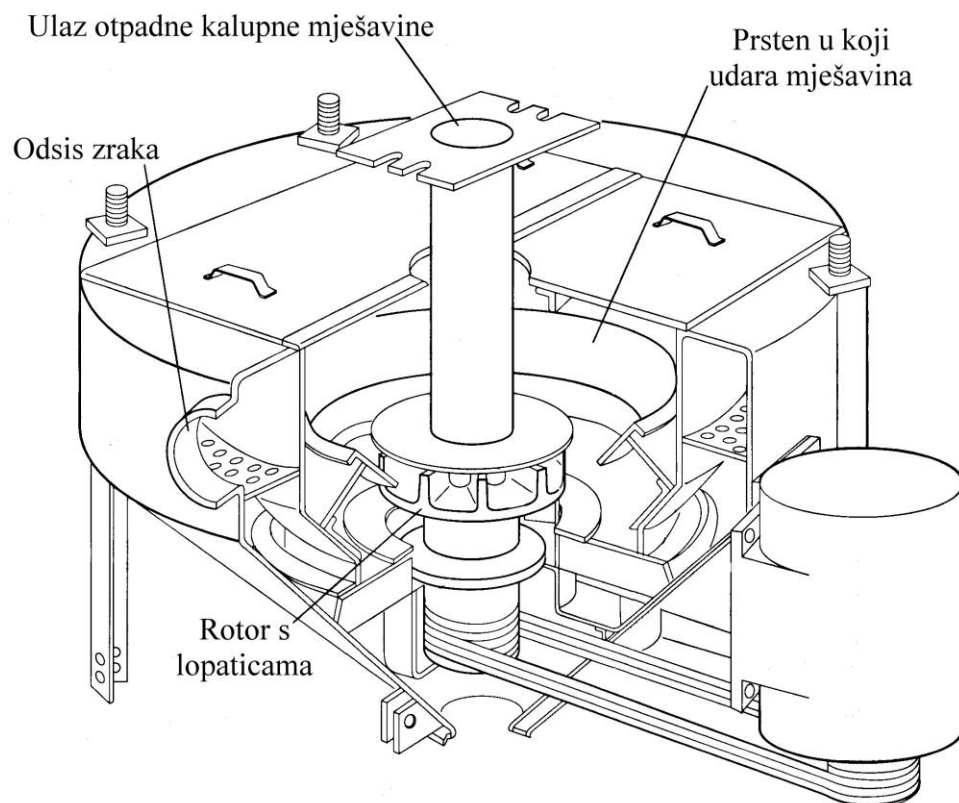


Slika 11.65. Shematski prikaz pneumatskog uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska [95]

Neupotrebljiva mješavina se nakon drobljenja gruda i izdvajanja metalnih komponenti gravitacijski uvodi na vrhu ćelije i kreće prema donjem dijelu ćelije gdje se nalazi sapnica. Pomoću ventilatora se kroz sapnicu upuhuje zrak koji podiže mješavinu u vertikalno postavljenu cijev iznad sapnice. Mješavina prolazi kroz vertikalnu cijev i kreće se prema ploči stožastog oblika koja se nalazi iznad cijevi. Zbog velike kinetičke energije mješavine koja prolazi kroz vertikalnu cijev na ploči stožastog oblika formira se i održava sloj mješavine. U vertikalno postavljenoj cijevi odvija se intenzivno međusobno trljanje zrna pijeska jer se međusobno sudaraju, zbog čega dolazi do uklanjanja veziva. Daljnje uklanjanje veziva pojavljuje se prilikom udara zrna pijeska o sloj pijeska koji je prisutan na stožastoj ploči. Prašina i čestice veziva odlaze u sustav za sakupljanje prašine. Očišćeni pijesak odvodi se u sljedeću ćeliju ili se zadržava u istoj ćeliji radi daljnjeg čišćenja. Stupanj uklanjanja veziva ovisi o vremenu zadržavanja pijeska u ćeliji i broju ćelija. Pijesak koji izlazi iz zadnje ćelije prosijava se radi uklanjanja svih stranih materijala.

Mehanički uređaji za uklanjanje veziva sa zrna ljevaoničkog pijeska. Postoje dva tipa mehaničkih uređaja za uklanjanje veziva sa zrna ljevaoničkog pijeska: horizontalni i vertikalni.

Na slici 11.66 shematski je prikazan horizontalni mehanički uređaj za uklanjanje veziva sa zrna ljevaoničkog pijeska. Neupotrebljiva mješavina se nakon drobljenja gruda i izdvajanja metalnih komponenti uvodi odozgo u centralni dio uređaja i potom se pomoću rotora sa lopaticama koji rotira oko svoje vertikalne osi razbacuje po metalnom prstenu koji okružuje rotor. Intenzivno uklanjanje veziva sa zrna pijeska odvija se kada mješavina udara o prsten. Prašina i čestice veziva odlaze u komoru koja se nalazi oko prstena i odvoje se van iz sustava.

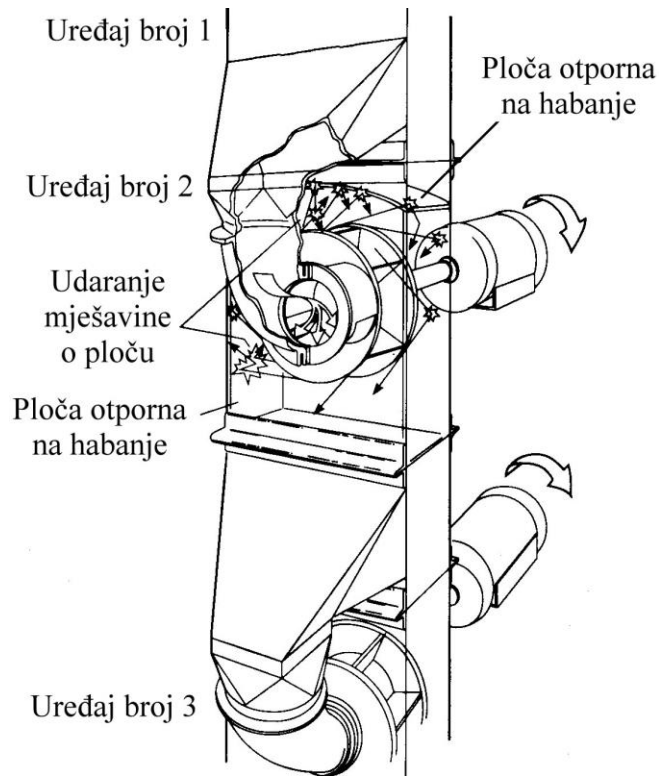


Slika 11.66. Shematski prikaz horizontalnog mehaničkog uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska [95]

Više horizontalnih mehaničkih uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska može se povezati u niz čime se povećava efikasnost uklanjanja veziva.

Na slici 11.67 shematski je prikazan vertikalni mehanički uređaj za uklanjanje veziva sa zrna ljevaoničkog pijeska. Neupotrebljiva mješavina uvodi se u središnji dio rotora sa lopaticama koji rotira oko svoje horizontalne osi. Rotor razbacuje mješavinu prema gore po ploči. Intenzivno uklanjanje veziva sa zrna pijeska odvija se kad mješavina udara o ploču. Nakon toga pijesak pada prema dolje i odlazi u uređaj gdje se pomoću zraka izdvaja prašina i odvojene čestice veziva.

Više vertikalnih mehaničkih uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska može se povezati u niz čime se povećava efikasnost uklanjanja veziva.



Slika 11.67. Shematski prikaz vertikalnog mehaničkog uređaja za uklanjanje veziva sa zrna pijeska [95]

Suhom regeneracijom ne uklanja se sve vezivo sa pješčanih zrna. Da bi se gubitak žarenjem održao u prihvatljivim granicama, odnosno ograničio negativni učinak zaostalog veziva, regenerirani pijesak miješa se sa novim pijeskom. Obično se miješa 80 % regeneriranog pijeska sa 20 % novog pijeska. Miješanjem se ujedno nadoknađuje gubitak pijeska nastao tijekom regeneracije.

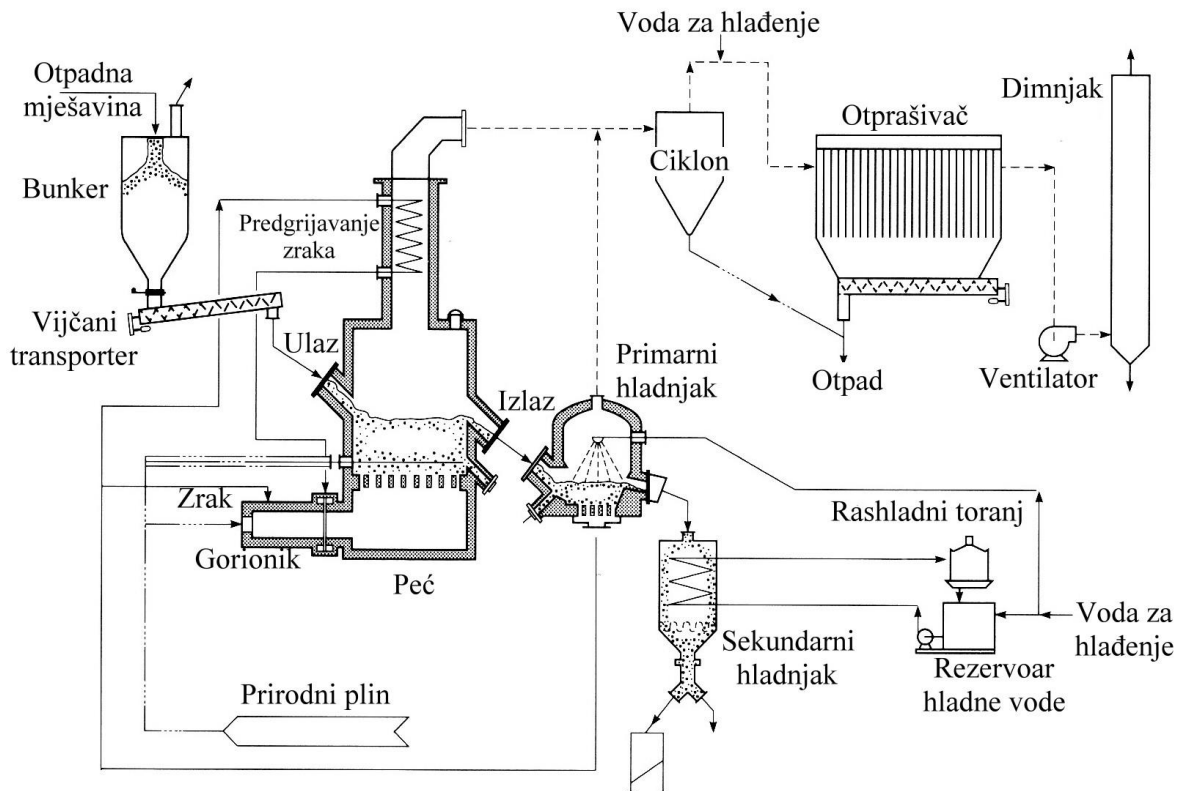
11.11.3 Toplinska regeneracija

Toplinskom regeneracijom postiže se najbolja regeneracija ljevaoničkog pijeska iz neupotrebljivih kemijski vezanih mješavina sa organskim vezivima i neupotrebljive svježe kalupne mješavine. Provodi se zagrijavanjem otpadne mješavine na dovoljno visoku temperaturu.

Iz neupotrebljive kemijski vezane mješavine sa organskim vezivima ljevaonički pijesak može se gotovo 100 % reciklirati zagrijavanjem mješavine na ~ 800 °C u oksidacijskoj atmosferi pri čemu dolazi do izgaranja organskih veziva. Zagrijavanje se obično provodi plinom u rotacijskoj peći ili u peći u kojoj se mješavina održava u fluidiziranom stanju (slika 11.68).

Neupotrebljiva mješavina se nakon drobljenja gruda i izdvajanja metalnih komponenti uvodi u peć. U donjem dijelu peći mješavina se pomoću zraka prevodi u fluidizirano stanje. Gorionik u donjem dijelu peći dovodi mješavinu na potrebnu temperaturu od ~ 800 °C. Nakon toga uključuju se gorionici raspoređeni po obodu peći koji su direktno umetnuti u mješavinu. Na taj način se temperatura mješavine održava u granicama ± 8 °C. Uslijed intenzivnog miješanja vrućih plinova i mješavine te oksidacijske atmosfere dolazi do izgaranja organskih veziva (smola) te ostalih gorivih tvari. Toplina otpadnih dimnih plinova

iz peći upotrebljava se za predgrijavanje mješavine prije ubacivanja u peć ili za predgrijavanje zraka potrebnog za izgaranje goriva. Nakon uklanjanja veziva pijesak se hladi, klasificira prema veličini zrna i dodaje se novi pijesak da bi se nadoknadili gubitci nastali tijekom regeneracije.



Slika 11.68. Shematski prikaz postupka toplinske regeneracije u peći u kojoj se mješavina održava u fluidiziranom stanju [95]

Toplinska regeneracija ljevaoničkog pijeska iz neupotrebne svježe kalupne mješavine u osnovi je ista kao u slučaju neupotrebne kemijskih vezanih mješavina sa organskim vezivima. Mješavina se u peći zagrijava na $\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ pri čemu dolazi do kalcinacije gline, odnosno gubitka vode. Radi bolje uspješnosti regeneracije, prije (a ponekad i nakon) toplinske regeneracije provodi se suha regeneracija.

Toplinska regeneracija je skup proces jer je potrebna velika količina energije i relativno skupa oprema. Međutim, rast troškova odlaganja neupotrebne kalupne mješavine doveo je povećanja njene upotrebe.

12. IZRADA JEDNOKRATNIH JEZGRI

Jezgre su zasebni segmenti koji se postavljaju u kalup da bi se ostvarile šupljine u odljevku i određene konture odljevka koje se ne mogu ili vrlo teško mogu ostvariti prilikom izrade kalupa. Jednokratne jezgre najčešće su izrađene od ljevaoničkih pijesaka i odgovarajućih veziva, odnosno jezgrenih mješavina.

Do sredine prošlog stoljeća većina odljevaka bila je izrađena u sirovim ili sušenim jednokratnim kalupima, a preko 90 % jezgri koje su se upotrebljavale u tim kalupima bile su pečene jezgre sa uljnim vezivom. Ti tradicionalni postupci naglo su se promijenili uvođenjem kemijski vezanih mješavina u industrijsku praksu. Jezgrena mješavina u tom se slučaju sastoji od ljevaoničkog pijeska i kemijskog veziva. Najčešće se primjenjuje kvarcni pijesak. Veziva mogu biti organska (npr. razne smole) ili anorganska (npr. razni silikati).

Novi sustavi s kemijskim vezivom omogućuju očvršćivanje jezgrene mješavine unutar jezgrenika što je rezultiralo nizom značajnih prednosti:

- povećana dimenzijska točnost jezgri i odljevaka,
- smanjena količina neispravnih odljevaka,
- povećana kvaliteta jezgri, a time i odljevaka,
- lakši uvjeti rad,
- smanjena potreba za energijom,
- smanjena kapitalna (investicijska) ulaganja,
- smanjeni ukupni troškovi proizvodnje.

U osnovi, principi koji se primjenjuju pri izradi jednokratnog pješčanog kalupa primjenjuju se pri izradi jednokratnih pješčanih jezgri. Najčešće se jezgre izrađuju u jezgrenicima od drveta (slika 11.10) ili metala (slika 11.11a) u kojima je načinjena šupljina čiji oblik odgovara željenom obliku jezgre. Šupljina u jezgreniku u potpunosti se ispunjava mješavinom pijeska i veziva. Nakon očvršćivanja mješavine pijeska i veziva, kompaktna jezgra se uklanja iz jezgrenika.

Ako se očvršćivanje, odnosno otvrdnjavanje jezgre odvija pod djelovanjem topline, odnosno zagrijavanjem jezgrenika, govori se o postupcima proizvodnje jezgri u toplim i vrućim jezgrenicima. Za te postupke upotrebljavaju se odgovarajuće kemijski vezane mješavine. Osim tih postupaka, jezgre se mogu proizvesti i u hladnim jezgrenicima primjenom kemijski vezanih mješavina koje očvršćuju na sobnoj temperaturi pomoću plinskog ili tekućeg katalizatora.

Pri odabiru kemijski vezane mješavine za izradu jezgri treba uzeti u obzir vrstu lijeva od koje se proizvodi odljevak. Npr. čelični ljevovi i određeni visokolegirani željezni ljevovi osjetljivi su na ureu, jer se zbog prisutnosti znatne količine dušika povećava sklonost ka stvaranju plinskih mjehura.

Pri odabiru pijeska za izradu jezgri i veziva treba uzeti u obzir i mogućnost regeneracije te kompatibilnost sa postojećim sustavom regeneracije kalupne mješavine. Pored toga, treba imati na umu da su mnoge komponente kemijski vezanih mješavina, kao što su furani, fenoli, formaldehid, izocijanati itd., negativno utječu na zdravlje ljudi. Zbog toga se posebna pažnja mora posveti radnim uvjetima u ljevaonici.

12.1 Jezgrene mješavine i postupci izrade jezgri

Jezgre se uglavnom izrađuju od kemijski vezanih mješavina. Kemijska veziva koja se upotrebljavaju za izradu jednokratnih (pješčanih) jezgri slična su kemijskim vezivima koja se upotrebljavaju za izradu jednokratnih kalupa.

Za proizvodnju jezgri najčešće se primjenjuju slijedeći postupci [104]:

- **postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima,**
- **postupci izrade jezgri u vrućim i toplim jezgrenicima,**
- **postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima uz naknadno pečenje jezgri.**

12.1.1 Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima

Za izradu jezgri u hladnim jezgrenicima od drveta, plastike ili metala primjenjuju se kemijski vezane mješavine koje očvršćuju na sobnoj temperaturi. Ovisno o tome da li mješavina očvršćuje primjenom plinovitog ili tekućeg katalizatora, postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima mogu se podijeliti u dvije skupine [3, 13, 104]:

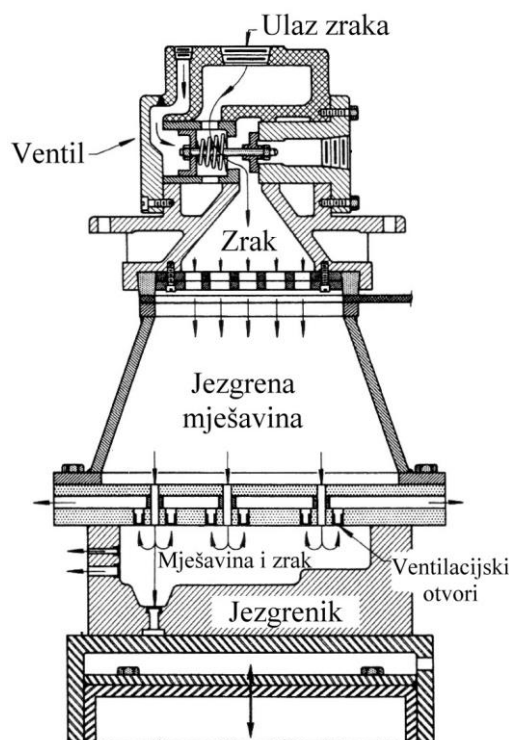
- postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima **od kemijski vezanih mješavina koje očvršćuju primjenom plinskog katalizatora** (engl. *Cold Box Processes*),
- postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima **od samoočvršćujućih kemijski vezanih mješavina**, tj. od kemijski vezanih mješavina koje očvršćuju primjenom tekućeg katalizatora (*No-Bake (Self-setting) Processes*).

Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima od kemijski vezanih mješavina koje očvršćuju primjenom plinskog katalizatora pogodni su za srednju i velikoserijsku proizvodnju manjih jezgri. Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrenicima od samoočvršćujućih kemijski vezanih mješavina pogodni su za veće jezgre.

Više vrsta kemijski vezanih mješavina s plinovitim katalizatorom upotrebljava se za izradu jezgri u hladnim jezgrenicima [3, 13, 104]:

- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je plinoviti amin,
- kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo, a katalizator je SO₂,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo akrilno-epoksidna smola, a katalizator je SO₂.
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je CO₂,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenolna smola, a koreaktant je plinoviti ester,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenol-formaldehidna smola, a katalizator je CO₂.

Navedene mješavine uvode se u jezgrenik i sabijaju, a potom se kroz mješavinu propuhuje plinoviti katalizator da bi došlo do očvršćivanja mješavine. Uvođenje mješavine u jezgrenik obično se provodi upuhivanjem čime se odmah postiže nužno sabijanje (slika 12.1).



Slika 12.1. Shematski prikaz tipične izvedbe upuhivanja jezgrene mješavine u jezgrenik na stroju za izradu jezgri [104]

Kemijski vezane mješavine sa tekućim katalizatorom koje se upotrebljavaju za izradu jezgri u hladnim jezgrenicima su [3, 13, 104]:

- kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo, a katalizator je fosforna ili sulfonska kiselina,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolna smola, a katalizator je sulfonska kiselina,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenolna smola, a koreaktant je tekući ester.
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je tekući organski ester,
- kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je tekući amin.

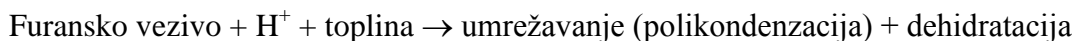
Navedene mješavine uvode se u jezgrenik i sabijaju, a potom dolazi do samočvršćivanja. Prema tome, u ovom slučaju u jezgrenik, odnosno mješavinu nije potrebno uvoditi dodatno sredstvo izvana da bi došlo do očvršćivanja. Ovisno o vrsti mješavine, za 30 s do 1 h jezgre postaju dovoljno čvrste da bi se mogle ukloniti iz jezgrenika. Dodatno očvršćivanje može se nastaviti nekoliko sati.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je plinoviti amin. Radi se o istoj mješavini kao za proizvodnju jednokratnih kalupa. Prvi komponenta je fenolna smola otopljena u specijalnoj mješavini otapala. Druga komponenta dio je polimerni metilen difenil diizocijanat. Treća komponenta je plinski katalizator amin (npr. trietilamin i dimetiletilamin dimetilizopropilamin), koji uzrokuje reakciju između prve dvije komponente pri čemu nastaje uretanska veza koja brzo očvršćuje mješavinu. Pijesak se

oblaže s prvom i drugom komponentom veziva i dobivena mješavina upuhuje se u jezgrenik na sobnoj temperaturi. Nakon toga uvodi se katalizator čime se postiže gotovo trenutno očvršćivanje mješavine. Nakon uvođenja plinskog katalizatora slijedi ciklus pročišćavanja zrakom koji potiskuje i raspodjeljuje plinski katalizator (amin) kroz mješavinu i uklanja preostali amin iz očvrstnute mješavine.

Kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo, a katalizator je SO₂. U ovom slučaju kao vezivo upotrebljava se furanska smola u količini od 0,9 do 1,5 % [3]. Organski hidroperoksidi u količini od 30 do 50 % u odnosu na masu smole dodaju se u mješavinu i/ili se miješaju sa smolom. Za povećanje čvrstoće, produženje vremena skladištenja i povećanje otpornosti na vlagu upotrebljava se metanolom razrijeđen silan u količini od 5 do 10 % od mase smole.

Pijesak se miješa sa navedenim komponentama i dobivena mješavina upuhuje se u jezgrenik, a potom SO₂ plin. Navedeni plin reagira s peroksidom i vodom u furanskoj smoli uzrokujući „in situ“ stvaranje kompleksne skupine kiselina koje očvršćuju furansko vezivo. Proces očvršćivanja može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom:



Reakcija očvršćivanja započinje čim SO₂ dođe u kontakt s peroksidom i nastavlja se čak i nakon uklanjanja jezgre iz jezgrenika. S vremenom voda nastala kao rezultat polimerizacije furana nastavlja isparavati iz još uvijek očvršćujuće mješavine (jezgre) sve dok reakcija nije završena. Nakon očvršćivanja mješavina mijenja svoju boju od svijetle do tamno zelene ili crne.

Kod ovog postupka proizvodnje jezgri temperatura pijeska trebala bi iznositi od 25 do 40 °C. Niže temperature smanjuju brzinu očvršćivanja mješavine i mogu rezultirati djelomično očvrstulim jezgrama. Više temperature pospješuju isparavanje otapala i smanjuju vremenski period u kojem se mješavina može upotrijebiti. Da bi se postiglo optimalno očvršćivanje treba provesti propuhivanje zrakom pri 95 °C.

Nakon uklanjanja iz jezgrenika vlačna čvrstoća jezgri iznosi 20 do 50 % krajnje vlačne čvrstoće. Nakon ~ 1 h vlačna čvrstoća jezgri iznosi 85 do 95 % krajnje vlačne čvrstoće. Nakon što se pomiješa pijesak i vezivo, nastala mješavina mora se upotrijebiti u roku od 12 do 24 h. Za upuhivanje mješavine u jezgrenik primjenjuju se relativno niski tlakovi (od 275 do 415 kPa) jer mješavina ima izvrsnu tečljivost.

Furan/SO₂ postupak ima nekoliko važnih prednosti: mješavine za izradu jezgri imaju visoku tečljivost, mješavine se lako raspadaju pa je i vađenje odljevaka lako, vrlo dobra dimenzijska točnost odljevaka, odlična površina odljevaka i mogućnost dugog skladištenja jezgri.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo akrilno-epoksidna smola, a katalizator je SO₂. Ova mješavina zasniva se na primjeni akrilnih i akrilno-epoksidnih smola kao veziva [3]. Uz smolu dodaje se organski hidroperoksid. Pijesak se miješa sa navedenim komponentama i dobivena mješavina upuhuje u jezgrenik. Očvršćivanje se postiže propuhivanjem mješavine sa SO₂. Svojstva mješavine i odljevaka ovise o omjeru akrilnih i epoksidnih funkcionalnih komponenti u sustavu veziva.

Akrilna veziva prvenstveno se upotrebljavaju u proizvodnji odljevaka od lakih metala zbog dobre istresljivosti. U proizvodnji odljevaka od željeznih i čeličnih ljevova akrilna veziva primjenjuju se u slučajevima kada primjenom ostalih sustava vezivanja nastaju greške na odljetcima u obliku „žila“. Pri tome treba upotrijebiti odgovarajući vatrostalni premaz i izbjeći turbulencije tijekom punjenja kalupa da bi se smanjila opasnost od erozije.

Varijacija sastava akrilno-epoksidnog veziva utječe na krutost jezgri, brzinu očvršćivanja, potrošnju SO₂ plina, otpornost na vlagu i sposobnost raspadanja jezgri. Osim toga, promjenom sastava akrilno-epoksidnog veziva utječe se i na svojstva odljevaka (otpornost na nastajanje „žila“, kvaliteta površine).

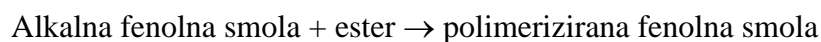
Dodatak veziva obično se kreće do 1,8 % ovisno o vrsti upotrijebljenog pijeska i vrsti lijeva. Budući da komponente veziva ne reagiraju dok ne dođu u kontakt sa SO₂ plinom, pripremljena mješavina ima vrlo dug životni vijek u odnosu na ostale vezivne sustave kod postupka s hladnim i toplim jezgrenicima. Na taj način se minimalizira količina otpadne mješavine, osigurava konstantna tečljivost i smanjuje neproduktivno vrijeme strojeva za izradu jezgri jer se bunker i mješavinom i mješači ne moraju čistiti svaki dan.

Zbog odsutnosti vlage i dušika minimalizirana je opasnost od pojave dušikove i/ili vodikove plinske poroznosti često povezane s postupcima s hladnim jezgrenicima kod kojih je prisutan dušik i vlaga.

Ovaj postupak proizvodnje jezgri ima niz prednosti: odsutnost formaldehida ili izocijanata, odlična sposobnost raspadanja mješavine, smanjenje pojave greški u obliku „žila“ i toplih pukotina, niži troškovi čišćenja odljevaka i konzistentna svojstva zbog dugog perioda upotrebljivosti.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je CO₂. Radi se o istoj mješavini kao za proizvodnju jednokratnih kalupa. Tekući natrijev silikat (vodeno staklo - Na₂SiO₃ (Na₂O · SiO₂)) upotrebljava se kao vezivo, a očvršćivanje se postiže propuhivanjem sa CO₂ plinom.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenolna smola, a koreaktant je plinoviti ester. Kao vezivo za izradu ove mješavine upotrebljava se alkalna fenolna smola [3]. Pijesak se oblože fenolnom smolom i tako dobivena mješavina upuhuje se u jezgrenik. Plinoviti ester metil formijat propuhuje se kroz mješavinu i djeluje kao koreaktant pri čemu dolazi do očvršćivanja. Proces očvršćivanja mješavine može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom:



Budući da se ester troši u reakciji očvršćivanja, uklanjanje viška para estera može se provesti propuhivanjem (pročišćavanjem) s vrlo malim volumenom zraka. Osim toga, zrak za pročišćavanje pomaže raspodjelu para estera kroz mješavinu.

Alkalno fenolno vezivo je tekućina niskog viskoziteta (0,1 do 0,2 Pa/s). Sustav sadrži < 0,1 % dušika i stvara manje reduktivnu atmosferu u kalupu od drugih sustava vezivanja u hladnim jezgrenicima.

Fenol/ester postupak u hladnim jezgrenicima je osjetljiv na fizikalne karakteristike pijeska, kao što su finoća zrna, oblik zrna i raspodjela veličine zrna. Najbolje čvrstoće postižu se s visoko čistim, ispranim i osušenim kvarcnim pijeskom koji ima zaobljena zrna. Optimalna temperatura pijeska iznosi 15 do 30 °C. Zbog alkalne prirode smole postupak nije jako osjetljiv na kiselost pijeska. Činjenica da je to u vodi topiva smola čini sustav manje osjetljiv na vlagu i može se tolerirati do 0,3 % vode u pijesku.

Miješanje se može provesti u konvencionalnim i kontinuiranim mješačima. Količina veziva varira ovisno o vrsti pijeska. Ako se upotrebljava isprani i osušeni kvarcni pijesak dodatak veziva iznosi od 1,75 do 2,5 %. Za dovoljnu čvrstoću tijekom manipulacije zahtijevaju se nešto viši dodatci veziva u odnosu na druge vezivne sustave kod kojih se upotrebljavaju organska veziva i plinski katalizatori.

Stehiometrijski promatrano, za očvršćivanje mješavine potrebno je ~ 15 % metil formijata u odnosu na masu fenolne smole. Međutim, u praksi potrebna količina metil formijata iznosi od 30 do 80 %. Najbolji rezultati postižu se pri nižim tlakovima propuhivanja i dužim vremenima očvršćivanja.

Jezgre proizvedene ovim postupkom imaju nižu čvrstoću zbog čega se posebna pažnja mora posvetiti tijekom manipulacije. Odljevci imaju dobru površinu, a otpornost na eroziju i stvaranje „žila“ na odljercima je bolja nego kod fenol/uretan postupka i postupka s fenolnom smolom i vrućim jezgri. Preporučuje se upotreba premaza za jezgre da bi se spriječile greške koje potječu od prodiranja tekućeg metala u mješavinu. Kod tog postupka nije potrebno dodavati aditive u mješavinu da bi se smanjilo nastajanje „žila“ na odljercima i grešaka iniciranih dušikom. Zbog alkalne prirode mješavine treba paziti da ona ne kontaminira sustav mješavine koji je osjetljiv na promjenu pH, posebno ako se regenerirani pijesak upotrebljava i za ostale postupke izrade jezgri i kalupa.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenol-formaldehidna smola, a katalizator je CO₂. Fenol-formaldehidna smola koja sadrži vezivno sredstvo miješa se sa pijeskom i dobivena mješavina upuhuje se u jezgri [13]. Dodatak smole iznosi 2 do 2,5 %. Mješavina se propuhuje sa CO₂ plinom pri čemu dolazi do smanjenja pH vrijednosti i aktivacije vezivnog sredstva, što u konačnici rezultira očvršćivanjem smole. Za izradu ove mješavine upotrebljava se kvarcni pijesak čija pH vrijednost iznosi 7. Kromitni i cirkonski pijesak također se mogu upotrijebiti, ali ne i olivinski. Optimalna temperatura pijeska iznosi 15 do 30 °C. Čvrstoća jezgri nije tako visoka kao kod postupka gdje se fenolna smola očvršćuje primjenom amina kao katalizatora. Ove mješavine pogodne su za izradu većih jezgri u proizvodnji odljevaka od željeznih i čeličnih ljevova te aluminijskih slitina.

Kemijski vezana mješavina koja sadrži furansko vezivo, a katalizator je fosforna ili sulfonska kiselina. Radi se o istoj mješavini kao za proizvodnju jednokratnih kalupa. Vezivo je furanska smola, a katalizator je fosforna ili organska sulfonska kiselina. Komponente se pomiješaju sa pijeskom. Dobivena mješavina uvodi se u jezgri i sabija, a potom očvršćuje.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolna smola, a katalizator je sulfonska kiselina. Radi se o istoj mješavini kao za proizvodnju jednokratnih kalupa. Komponente se pomiješaju sa pijeskom. Dobivena mješavina uvodi se u jezgri i sabija i potom očvršćuje.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo alkalna fenolna smola, a koreaktant je tekući ester. Kod tog postupka proizvodnje jezgri primjenjuje se dvokomponentni vezivni sustav koji se sastoji od u vodi topive alkalne fenolne smole i tekućeg estera kao koreaktanta [3]. Smola i ester miješaju se sa pijeskom. Dobivena mješavina uvodi se u jezgri i sabija i potom očvršćuje. Obično se dodaje od 1,5 do 2 % veziva u odnosu na masu pijeska i 20 do 25 % koreaktanta u odnosu na količinu smole. U većini slučajeva upotrebljava se isprani i osušeni kvarcni pijesak.

Smola i koreaktant topivi su u vodi što omogućuje lako čišćenje. Fizikalna čvrstoća očvrstnule mješavine nije tako visoka kao kod primjene samoočvršćujućih smola s kiselinskim katalizatorom i uretana pri sličnim količinama veziva. Međutim, uz brižljivo manipuliranje i transport mogu se postići dobri rezultati lijevanja. Posebne prednosti samoočvršćujućih postupaka uz primjenu alkalnog fenolnog veziva i estera kao koreaktanta su smanjenje nastanka grešaka u obliku „žila“ na odljercima i izvanredna otpornost na eroziju.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo natrijev silikat, a katalizator je tekući organski ester. Kao vezivo upotrebljava se natrijev silikat, a kao sredstvo za očvršćivanje tekući organski ester [3]. Omjer SiO_2 : Na_2O u vezivu mora se kretati u granicama od 2,5 : 1 do 3,1 : 1. Dodatak veziva obično iznosi od 3 do 4 % u odnosu na masu pijeska. Za očvršćivanje primjenjuju se esteri, kao što je glicerol diacetat i triacetat ili etilen glikol diacetat. To su tekućine niskog viskoziteta, a mogu imati ugodan miris ili miris sličan mirisu octene kiseline. Najčešće se dodaje 10 do 15 % estera u odnosu na masu natrijevog silikata. Ester se mora dodati u pijesak prije dodatka silikatnog veziva.

Brzina očvršćivanja ovisi o omjeru SiO_2 : Na_2O u silikatnom vezivu i sastavu estera. Danas su na tržištu dostupne i mješavine estera što omogućuje kontrolu i podešavanje vremena očvršćivanja. Tijekom reakcije očvršćivanja, uključujući nastajanje silika gela iz natrijevog silikata, ne dolazi do nastajanja topline ili plina. Kada se doda u mješavinu koja sadrži alkalni natrijev silikat, ester hidrolizira kontroliranom brzinom reagirajući s natrijevim silikatom pri čemu nastaje silika gel koji povezuje zrna pijeska. Mehanizam očvršćivanja može se prikazati slijedećom reakcijom:



Nakon uklanjanja iz jezgrenika potrebno je još nekoliko sati da se postigne potpuno očvršćivanje. Čvrstoća jezgri proizvedenih ovim postupkom može biti veća od čvrstoće jezgri proizvedenih u hladnim jezgrenicima uz primjenu natrijevog silikata kao veziva i CO_2 plina kao očvršćivača.

Emisija plinova i mirisa tijekom miješanja, lijevanja, hlađenja i istresanja je niska, ali ovisi o količini organskih aditiva u mješavini. Greške na odljercima u obliku „žila“ rijetko se pojavljuju. Međutim, u odnosu na ostale samoočvršćujuće postupke proizvodnje jezgri znatno su više izražene greške zbog zapečenja pijeska na površini odljevka i penetracije taline u jezgrenu mješavinu.

Kemijski vezana mješavina kod koje je vezivo fenolni uretan, a katalizator je tekući amin. Radi se o istoj mješavini kao za proizvodnju jednokratnih kalupa. Komponente se pomiješaju sa pijeskom. Dobivena mješavina uvodi se u jezgrenik i sabija i potom očvršćuje.

12.1.2 Postupci izrade jezgri u vrućim i toplim jezgrenicima

Kod postupaka proizvodnje jezgri u vrućim (engl. *Hot Box*) i toplim (engl. *Warm Box*) jezgrenicima upotrebljava se vlažna mješavina pijeska i veziva [104]. Tekuće termoočvršćujuće vezivo i tekući katalizator pomiješaju se sa suhim pijeskom i upuhuju u zagrijani metalni jezgrenik po tlakom od 480 do 700 kPa. Temperatura očvršćivanja ovisi o procesu. Pod djelovanjem temperature oslobađaju se kiselinske pare iz katalizatora i dolazi do brzog očvršćivanja veziva. Zbog toga se jezgre mogu ukloniti iz jezgrenika vrlo brzo. Očvršćivanje se nastavlja nakon uklanjanja jezgre iz jezgrenika, što rezultira potpunim očvršćivanjem jezgre.

Ovi postupci pogodni su za izradu manjih jezgri. Debljina stijenke jezgri ograničena je na ~ 64 mm. Manje jezgre mogu se spajati lijepljenjem, što omogućuje proizvodnju jezgri vrlo složenih oblika.

Razlikuje se nekoliko postupaka izrade jezgri u vrućim i toplim jezgrenicima ovisno o vrsti kemijski vezane mješavine koja se upotrebljava [104]:

- Croning postupak,
- postupak s vrućim jezgrenicima i fenolnim vezivima
- postupak s vrućim jezgrenicima i furanskim vezivima,
- postupak s toplim jezgrenicima i furanskim vezivima

Izrada jezgri **Croning postupkom** odvija se na isti način kao i izrada kalupa tim postupkom. I u ovom slučaju upotrebljava se obloženi ljevaonički pijesak, odnosno zrna pijeska obložena su fenol-formadelhidnom novolak smolom i heksametilentetraminom uz dodatak aditiva i maziva. Obloženi pijesak uvodi se u zagrijani jezgrenik gdje očvršćuje pod djelovanjem topline. Očvršćivanje se odvija samo u tankom sloju uz jezgrenik. Zbog toga proizvedene jezgre imaju oblik školjki, odnosno samo vanjsku krutu koru, a u unutrašnjosti su šuplje (slika 12.2). Kao i kod izrade kalupa, višak pijeska uklanja se nakon što je postignuta dovoljna debljina školjke.



Slika 12.2. Jezgre proizvedene Croning postupkom

Postupci proizvodnje jezgri u vrućim jezgrenicima uz primjenu fenolnih ili furanskih veziva [3, 104]. Postupci sa vrućim jezgrenicima prvotno su razvijeni za mješavine sa furanskim vezivima koja se baziraju se na furfuralu alkoholu. Fenol u pojedinim slučajevima zamjenjuje sav ili dio furfural alkohola. Na taj način dobiveno je više vezivnih sustava, odnosno mješavina smola. Furanski sustav upotrebljava vezivo koje se sastoji od furfural alkohola i urea-formaldehida. Za fenolni sustav upotrebljava se vezivo koje se sastoji od fenola i urea-formaldehida. Modificirani fenolni sustav upotrebljava vezivo sastavljeno od fenola, furfural alkohola i urea-formaldehida. Sastav veziva može se prilagođavati ovisno o slitini od koje se lijevaju odljevci. Npr. za odljevke od aluminijskih i magnezijjskih slitina smanjuje se udio furfural alkohola u vezivu da bi se poboljšala raspadljivost jezgri. U slučaju lijevanja odljevaka od čeličnog lijeva povećava se udio furfural alkohola da bi se postigla veća čvrstoća jezgri.

Furansko vezivo koje se primjenjuje kod postupaka proizvodnje jezgri u vrućim jezgrenicima odlikuju se bržim očvršćivanjem u odnosu na fenolni tip veziva, zbog čega se na taj način proizvedene jezgre mogu brže ukloniti iz jezgrenika. Osim toga, furansko vezivo omogućuje lakše istresanje i manje je problematično za odlaganje jer ne sadrži fenol. Tipični dodatak furanskog veziva iznosi 1,5 do 2 %.

Proces očvršćivanja u vrućem jezgreniku može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom



Izbor katalizatora ovisi o ADV vrijednosti pijeska, odnosno udjelu alkalija, temperaturi i drugim kemijskim svojstvima. Kao katalizator upotrebljava se vodena otopina amonijevih soli, obično kloridni i bromidi. Dodatak katalizatora obično iznosi 20 do 25 % u odnosu na masu smole.

Smole koje se upotrebljavaju u postupcima proizvodnje jezgri u vrućim jezgrenicima imaju ograničeno vrijeme skladištenja i raste im viskoznost s vremenom skladištenja. Ako je moguće kontejnere treba staviti izvan direktnog djelovanja sunca, na hladno mjesto. Za razliku od smola, katalizatori imaju neograničeno vrijeme skladištenja.

Vezivo se miješa sa pijeskom i katalizatorom i dobivena mješavina se upuhuje u vrući jezgrenik. Optimalna temperatura pijeska iznosi 20 do 25 °C. Temperatura jezgrenika ne smije varirati za više od 28 °C. Mjerenja treba provesti na najvišim i najnižim točkama duž jezgrenika. Često se temperatura jezgrenika održava u granicama od 230 do 290 °C. Međutim, idealna temperatura nalazi se u intervalu od 220 do 245 °C. Najčešća pogreška kod postupaka proizvodnje jezgri u vrućim jezgrenicima je previsoka temperatura jezgrenika, jer negativno utječe na kvalitetu površine jezgri. Zbog previsoke temperature jezgrenika površina jezgre može se trusiti, što je posebno štetno kod tankostjenih jezgri.

Većina jezgri uklanja se iz jezgrenika nakon 5 do 20 s. U tom vremenu jezgra je očvrtnula do dubine od 4,8 do 7,9 mm. Površina jezgre je tvrda, bez znakova termoplastičnosti. S takvim jezgrama može se slobodno rukovati. Dodatno očvršćivanje unutrašnjosti jezgre odvija se tijekom 10 do 20 min. nakon što je jezgra uklonjena iz jezgrenika.

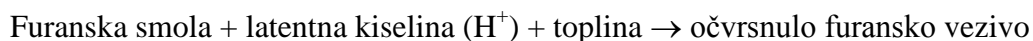
Boja površine jezgre pokazuje koliko je cjelovito jezgra očvrtnula i dobar je pokazatelj stupnja očvršćivanja. Površina mora biti svjetlo žuta ili vrlo svjetlo smeđa, a ne smije biti tamno smeđa ili crna.

Općenito, fenolne i furanske smole upotrebljavaju se za izradu kompleksnih jezgri u vrućim jezgrenicima koje se potom upotrebljavaju u kalupima za proizvodnju odljevaka za automobilsku industriju.

Postupci proizvodnje jezgri u toplim jezgrenicima uz primjenu furanskog veziva [3]. Smole koje se upotrebljavaju u postupcima proizvodnje jezgri u toplim jezgrenicima sadrže visok udio furfuril alkohola (~ 70 %) i vrlo malo vode (< 5 %), a udio dušika je < 2,5 %. Budući da mješavina pijeska i smole pokazuje visoku krutost kad je potpuno očvrtnula, nakon uklanjanja iz jezgrenika uglavnom ne dolazi do deformacije ili omekšanja jezgre. Ako se eventualno pojavi deformacija i omekšanje, radi se vrlo malim vrijednostima. Visoka vlačna svojstva u vrućem i hladnom stanju karakteristična su za mješavine za tople jezgrenike, zbog čega dodatak veziva iznosi od 0,8 do 1,8 %, što je manje u odnosu na količinu veziva kod postupaka s vrućim jezgrenicima.

Katalizatori koji se primjenjuju kod postupaka proizvodnje jezgri u toplim jezgrenicima su bakrene soli primarno bazirane na aromatskim sulfonskim kiselinama u vodenoj otopini metanola. Dodatak katalizatora iznosi od 20 do 35 % u odnosu na masu smole. Ti katalizatori su specifični po tome jer su nereaktivni pri sobnoj temperaturi, ali kad se zagriju stvaraju jake kiseline. Oni promoviraju potpuno očvršćivanje pri temperaturi od ~ 65 °C ili višoj.

Proces očvršćivanja u toplom jezgreniku može se pojednostavljeno prikazati slijedećom reakcijom:



Komponente veziva ostaju stabilne u mješavini kad se zajedno pomiješaju u pravilnim omjerima sve dok se ne aktiviraju toplinom koja razgrađuje katalizator pri čemu se oslobađa kiselina koja uzrokuje polimerizaciju smole.

Temperatura jezgrenika treba iznositi od 150 do 230 °C. Optimalna temperatura iznosi 190 °C i niža je od radne temperature vrućih jezgrenika. Kombinacijom niske viskoznosti smole i katalizatora dobiva se tečljiva mješavina. Jezgre proizvedene postupkom s toplim jezgrecima imaju dobru dimenzijsku točnost i izvanrednu otpornost na eroziju.

12.1.3 Postupci izrade jezgri u hladnim jezgrecima uz naknadno pečenje jezgri

Jezgre se mogu izrađivati primjenom različitih prirodnih ulja kao veziva [3, 13, 104]. U tu svrhu često se upotrebljava laneno ulje koje polimerizira i očvršćuje kada se izloži zraku i toplini. Prirodna ulja mogu se kemijski modificirati da bi se ubrzao proces očvršćivanja.

Kvarcni pijesak miješa se sa lanenim uljem, cerealijama (žitaricama) i vodom. Dodatak lanenog ulja u odnosu na masu pijeska obično iznosi 1 do 2 %, dodatak cerealija kreće se od 1 do 2 %, a dodatak vode od 2 do 2,5 %. Dobivena mješavina ručno se sabija ili upuhuje u hladni jezgrenik. Cerealije, najčešće škrob, dodaju se da bi se vlažna mješavina mogla ručno sabiti ili upuhati u jezgrenik i da bi jezgra zadržala svoj oblik nakon vađenja iz jezgrenika. Voda se dodaje da bi se aktivirale cerealije i na taj način postigla potrebna čvrstoća prije pečenja.

Udio cerealija treba održavati na minimumu jer tijekom zagrijavanja nastaju plinovi. Zbog toga je pogodan mali dodatak bentonita (do 0,5 % u odnosu na masu pijeska) uz cerealije, jer bentonit razvija puno manje plinova od cerealija tijekom zagrijavanja, a povećava čvrstoću jezgri prije pečenja.

Nakon uklanjanja iz jezgrenika neočvrstnute jezgre stavljaju se na odgovarajuće postolje koje ih pridržava tijekom pečenja. Potom slijedi pečenje jezgri u peći uz strujanje zraka na temperaturama od 200 do 260 °C. Vrijeme pečenja obično iznosi 1 h za svakih 25 mm debljine stijenke jezgre. Tijekom pečenja dolazi do očvršćivanja uljnog veziva, čime se dobiva kruta jezgra s kojom se može slobodno manipulirati.

Jezgre proizvedene primjenom uljnih veziva imaju odličnu raspadljivost nakon lijevanja. Međutim teško je održati dimenzijsku točnost jezgri.

12.2 Premazi za jezgre

Jezgre koje se upotrebljavaju kod proizvodnje odljevaka od željeznih i čeličnih ljevova obično se premazuju odgovarajućim tekućim vatrostalnim premazima čime se sprječava prodor taline u jezgru i poboljšava kvaliteta površine odljevaka. Osim toga, premazi djeluju kao izolatori između pijeska i taline sprječavajući prijanjanje jezgrene mješavine na odljevak čime se olakšava čišćenje odljevka. Jezgre koje se upotrebljavaju kod proizvodnje odljevaka od neželjeznih ljevova mogu se također premazati odgovarajućim premazima. Male jezgre obično se uranjaju u sredstvo za premazivanje, dok se na velike jezgre premaz nanosi četkama ili špricanjem.

Obično se primjenjuju dvije vrste premaza za jezgre: premazi na osnovi ugljika i premazi bez ugljika [104]. Premazi na osnovi ugljika sastoje se u velikoj mjeri od grafita ili ostalih oblika praškastog ugljika. Pored ugljika, mogu sadržavati kvarcno brašno, glinu ili talk. Premazi bez ugljika obično se sastoje se od kvarca, talka, magnezijevog oksida,

cirkonijevog oksida, cirkonijevog silikata itd. Premazi na osnovi ugljika primjenjuju se kod proizvodnje odljevaka od sivih željeznih ljevova, odnosno željeznih ljevova sa grafitom te neželjeznih ljevova. Jezgre koje se primjenjuju kod proizvodnje čeličnih odljevaka obično se premazuju premazima koji ne sadrže ugljik.

Vatrostalna komponenta premaza miješa se sa tekućim sredstvom (najčešće voda ili alkohol (metanol, etanol)) da se dobije tekući premaz, što omogućuje ravnomjerno nanošenje na jezgre. Prije nego što se jezgre postavke u kalup, premaz nanosen na jezgre mora se osušiti. Premazi na bazi vode suše se pod plamenom ili u peći. Premazi koji sadrže alkohol obično se suše tako da se premaz zapali pri čemu dolazi do isparavanja alkohola.

Pored navedenih komponenti, premaz sadrži određenu količinu veziva (obično organske smole). Vezivo povezuje čestice vatrostalne komponente premaza i omogućuje prijanjanje premaza na jezgre.

12.3 Sredstva za razdvajanje jezgre od jezgrenika

Sva veziva za jezgre su ljepljiva, neka više, a neka manje. Zbog toga treba primijeniti odgovarajuće sredstvo koje omogućuje lako odvajanje jezgre od jezgrenika, bez obzira od kog materijala je napravljen jezgrenik [104]. Međutim, prije svega, jezgrenik mora biti u dobrom stanju, odnosno površine moraju biti glatke.

Sredstva za razdvajanje jezgre od jezgrenika mogu se nanositi na jezgrenik ili se mogu dodati u jezgenu mješavinu tijekom miješanja. Oleinska kiselina razrijeđena sa kerozinom (omjer 10:1) upotrebljava se kao sredstvo za razdvajanje uljnih jezgri od jezgrenika. Dodaje se u jezgenu mješavinu.

U Croning postupku i postupcima za vrućim i toplim jezgrenicima kao sredstvo za razdvajanje jezgri od jezgrenika upotrebljava se emulzija silicija u vodi. Sredstvo se nanosi na jezgrenik špricanjem. Manja količina emulzije silicija može se dodati i u jezgenu mješavinu tijekom miješanja.

U postupcima izrade jezgri u hladnim jezgrenicima upotrebljavaju se različita sredstva za razdvajanje jezgri od jezgrenika. Za velikoserijsku proizvodnju manjih i srednje velikih jezgri upotrebljavaju se tekuća sredstva koje se nanose špricanjem na jezgrenik. Sastojci tih sredstava (u različitim kombinacijama) su: voda, alkohol, klorirana otapala, tinjac, talk, silicij, aluminijski prah, grafit i sojino ulje.

13. PROIZVODNJA ODLJEVAKA U TRAJNIM KALUPIMA

Značajna količina odljevaka proizvodi se lijevanjem u trajne kalupe. **Uglavnom se to odnosi na odljevke od neželjeznih slitina**, prvenstveno od aluminijskih slitina, magnezijjskih slitina, slitina na osnovi cinka te bakrenih slitina, premda se i slitine na osnovi željeza mogu lijevati u trajne kalupe. Trajni kalupi sa vertikalnom ili horizontalnom diobenom ravninom najčešće su izrađeni od legiranih čelika za rad u vrućem stanju. Budući da su izrađeni od metala, trajni kalupi često se nazivaju kokilama ili alatima. Kalupna šupljina odgovarajućeg oblika izrađuje se strojnom obradom. Često je izvedena od segmenta koji se postavljaju u zajednički nosač čime se dobiva potpuna kalupna šupljina željenog oblika. To omogućuje da se oštećeni dijelovi kalupne šupljine jednostavno zamijene, čime se produžuje radni vijek kalupa. Obzirom na cijenu legiranih čelika i zahtjevnu strojnu obradu za izradu kalupne šupljine, trajni kalupi imaju visoku cijenu. Međutim, pomoću takvih kalupa često se može odliti i više od 100000 odljevaka.

U trajnim kalupima mogu se upotrijebiti jezgre koje su izrađene od čelika, sivog lijeva, pijeska ili gipsa, ovisno o postupku lijevanja. **Metalne jezgre** mogu biti pokretne ili nepokretne. Nepokretne jezgre moraju biti okomite na diobenu ravninu kalupa da bi se odljevak mogao ukloniti iz kalupa. Pored toga, moraju biti tako oblikovane da se odljevak može lako ukloniti. Metalne jezgre koje nisu okomite na diobenu ravninu kalupa moraju biti pokretne da bi se mogle izvući iz odljevka prije njegovog vađenja iz kalupa.

Ljevarske slitine mogu reagirati s trajnim kalupom uzrokujući lijepljenje ili zavarivanje dijelova odljevaka za kalup. Ako se to pojavi, uklanjanje odljevka iz kalupa postaje otežano, a može doći i do oštećenja samog kalupa. Da bi se to izbjeglo na površinu kalupa nanosi se odgovarajući premaz.

U usporedbi sa lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe, lijevanjem u trajne kalupe jednostavnije se mogu proizvoditi odljevci kompleksnih oblika sa uskim dimenzijskim tolerancijama, glatkom površinom i poboljšanim mehaničkim svojstvima. Međutim, mora se raditi o velikoserijskoj proizvodnji odljevaka da bi se opravdali visoki troškovi kalupa. Pored toga, lijevanjem u trajne kalupe ne mogu se proizvoditi veliki odljevci.

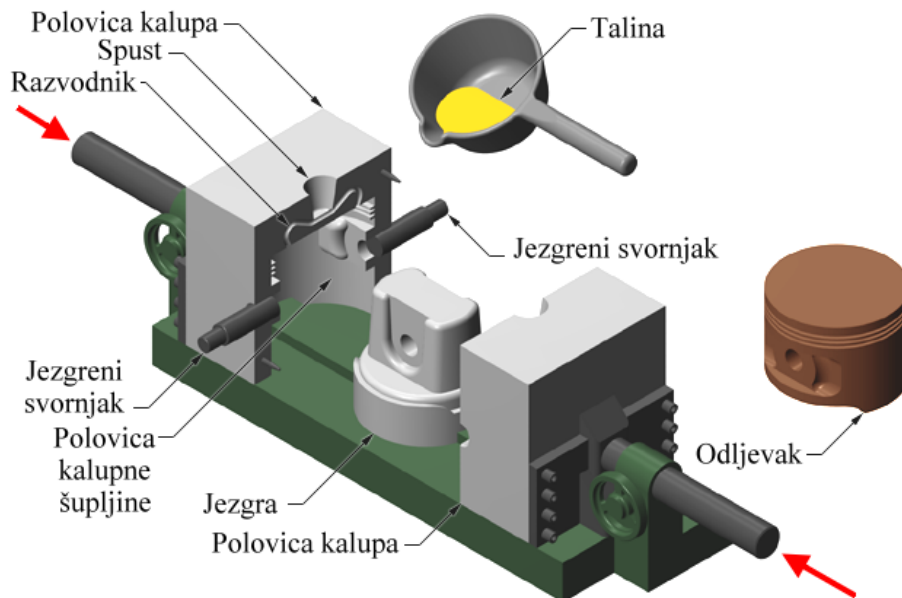
Postupci lijevanja u trajne mogu se svrstati u tri skupine ovisno o načinu na koji se talina uvodi u kalupnu šupljinu:

- **gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe,**
- **niskotlačno lijevanje u trajne kalupe i**
- **visokotlačno lijevanje u trajne kalupe.**

Ljevarske slitine koje se lijevaju u trajne kalupe mogu biti u tekućem, odnosno rastaljenom stanju ili u djelomično rastaljenom stanju (engl. *Semi Solid Metal Processing*). Slitine u tekućem stanju mogu se lijevati gravitacijski, niskotlačno i visokotlačno, dok se slitine u djelomično rastaljenom stanju lijevaju samo visokotlačno.

13.1 Gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe

Gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe (engl. *Gravity Permanent Mold Casting, Gravity Die Casting*) shematski je prikazano na slici 13.1. Često se naziva kokilni lijev jer je kalup načinjen od metala. Taj postupak lijevanja pogodan je za veću proizvodnju manjih jednostavnijih odljevaka sa prilično jednoličnom debljinom stijenke najčešće od aluminijskih, magnezijских i bakrenih slitina [32, 105]. Za manju proizvodnju kalupi se izrađuju od sivog lijeva, a za velikoserijsku proizvodnju kalupi se izrađuju od čelika. Kalupi se najčešće sastoje od dvije polovice i imaju vertikalnu diobenu ravninu. Obzirom da se lijevanje provodi gravitacijski, kalupi mogu imati dug radni vijek.



Slika 13.1. Shematski prikaz gravitacijskog lijevanja u trajni kalup [106]

Postupak gravitacijskog lijevanja u trajne kalupe sastoji se od nekoliko koraka. Prije upotrebe kalup se priprema tako da se zagrije na 205 do 370 °C i potom se špricanjem ili četkom nanese keramička prevlaka na kalupnu šupljinu. Metalne jezgre također treba pripremiti nanošenjem prevlake. Prevlaka štiti kalup od metala koji se lijeva, kontrolira tok taline, prijenos topline i kvalitetu površine odljevka te olakšava uklanjanje odljevka iz kalupa. Postoje dva osnovna tipa prevlaka: izolacijske i prevlake koje djeluju kao mazivo. Na kalup se najprije nanosi izolacijska prevlaka, a potom prevlaka koja djeluje kao mazivo da bi se odljevak mogao lakše ukloniti iz kalupa. Može se upotrijebiti i jedna prevlaka koja se dobije miješanjem prethodno navedenih prevlaka. Prevlake se sastoje od tri komponente: mješavine praškastih vatrostalnih materijala (Al_2O_3 , grafit, željezni oksid, kvarc itd.), veziva (najčešće natrijev silikat) i vode.

Pripremljeni kalup prije ulijevanja taline treba dovesti na radnu temperaturu, koja ovisi o vrsti slitine koja se lijeva, temperaturi lijevanja, brzini izrade odljevaka, masi, obliku i debljini stijenke odljevka, debljini stijenke kalupa te debljini prevlake na kalupnoj šupljini. Previsoka radna temperatura negativno utječe na kalup, usporava skrućivanje odljevka te negativno utječe na mehanička svojstva i kvalitetu površine odljevka. Preniska radna temperatura otežava tok taline u kalupu i može dovesti do grešaka kao što su hladni zavar, nekompletno odliiven odljevak, usahline itd. Ako se uzme u obzir da slitine koje se lijevaju imaju različite temperature taljenja, može se zaključiti da će u pojedinim slučajevima trebati zagrijati kalup plinskim gorionicima, a u nekim slučajevima trebat će hladiti kalup vodom ili

zrakom da bi se postigla optimalna radna temperatura kalupa. Optimalna temperatura kalupa u slučaju lijevanja aluminijskih slitina iznosi 150 do 300 °C. Ako se lijevaju bakrene slitine, temperatura kalupa trebala bi iznositi od 120 do 260 °C.

U sastavljen kalup u koji su prema potrebi umetnute jezgre ulijeva se talina. Jezgre mogu biti izrađene od čelika, sivog lijeva, pijeska ili gipsa. Talina koja se lijeva u kalup prolazi kroz uljevni sustav i ispunjava kalupnu šupljinu. Plinovi izlaze iz kalupa kroz ventilacijske otvore. Kad se kalup napuni talinom, prekida se lijevanje i čeka dok se tekući metal skrutne. Nakon skrućivanja izvlače se metalne jezgre iz kalupa, otvara se kalup i vadi odljevak. Ako su upotrijebljene jednokratne jezgre, one ostaju u odljevku i zajedno s njim se vade iz kalupa. Zadnja faza u procesu je uklanjanje jednokratnih jezgri iz odljevka te odvajanje uljevnog sustav i pojila sa odljevka.

13.2 Niskotlačno lijevanje u trajne kalupe

Niskotlačno lijevanje u trajne kalupe (engl. *Low-Pressure Permanent Mold Casting, Low-Pressure Die Casting*) je postupak u kojem se kalup mirno puni talinom odozdo prema gore, što se postiže na različite načine [107]. Taj postupak upotrebljava se za velikoserijsku proizvodnju kompaktnih odljevaka visoke dimenzijske točnosti, glatke površine i kompleksnog oblika mase od 5 do 100 kg od raznih ljevarskih slitina [107]. Aluminijske slitine najčešće se upotrebljavaju, premda se uspješno mogu lijevati i odljevci od magnezijevih slitina, bakrenih slitina i slitina na osnovi cinka. Kalupi se izrađuju od sivog lijeva ili čelika, a jezgre mogu biti jednokratne ili trajne. Zbog navedenih karakteristika niskotlačno lijevanje našlo je široku primjenu u automobilske industriji za razne odljevke od lakih metala, kao što naplatci, kućišta i glave motora, stapovi, komponente ovjesa, razna kućišta itd.

Obzirom na način kako se postiže punjenje kalupa odozdo prema gore, razlikuje se nekoliko vrsti niskotlačnog lijevanja u trajne kalupe:

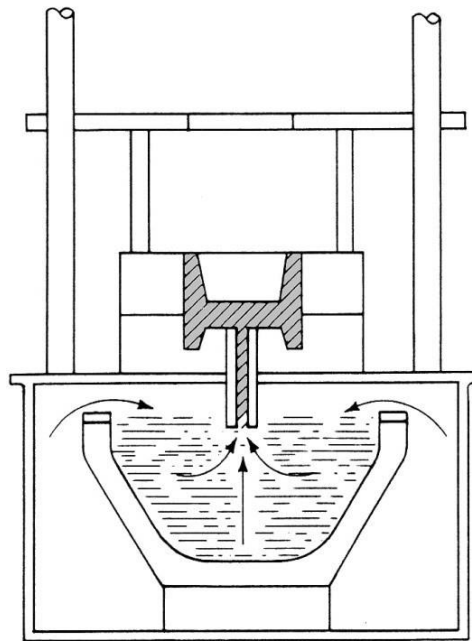
- **konvencionalno niskotlačno lijevanje u trajne kalupe,**
- **protutlačno lijevanje u trajne kalupe i**
- **vakuumsko niskotlačno lijevanje u trajne kalupe.**

Osim konvencionalnog niskotlačnog lijevanja kod kojeg se tekući metal potiskuje u kalup primjenom tlaka na površinu hermetički zatvorene taline u peći koja se nalazi ispod kalupa ili primjenom vakuuma, postoje i varijante ovog procesa. U jednoj varijanti tlak se primjenjuje na talinu u peći i na kalupnu šupljinu odozgo, dok se u drugoj varijanti talina pod djelovanjem vakuuma i tlaka uvlači u kalup.

13.2.1 Konvencionalno niskotlačno lijevanje u trajne kalupe

Kod konvencionalnog niskotlačnog lijevanja trajni kalup smješta se u uređaj za lijevanje iznad hermetički zatvorene peći u kojoj se nalazi tekući metal (slika 13.2) [107, 108]. Kalup se prije lijevanja mora predgrijati, a na kalupnu šupljinu nanosi se odgovarajuća prevlaka. Keramička ili metalna cijev povezuje talinu u peći s donjim dijelom kalupa. Nakon zatvaranja kalupa, primjenjuje se tlak zraka ili inertnog plina (dušika ili argona) na površinu taline u peći. Zbog djelovanja tlaka talina se potiskuje kroz keramičku ili metalnu cijev i

ispunjava kalup odozdo prema gore. Sustav je tako programiran da tlak dostiže svoj maksimum kada je kalup potpuno napunjen. U većini aplikacija maksimalni tlak nije veći od 1,5 bara. Obzirom da je cijev uronjena u talinu u peći na dubinu od 305 do 760 mm, spriječen je ulaz oksida sa površine taline, odnosno nečistoća u kalup. Tlak se održava sve dok odljevak skrućuje. Budući da je pod tlakom, talina u cijevi napaja odljevak tijekom skrućivanja, što rezultira visokim iskorištenjem. Kad tlak prestane djelovati talina preostala u cijevi vraća se nazad u lonac. Kalup se tada može otvoriti, a odljevak se uklanja primjenom postavljenih klinova za izbacivanje. Ovaj postupak lijevanja je potpuno automatiziran i obično se obavlja pri nižim temperaturama kalupa i kraćim vremenima ciklusa u odnosu na gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe. Veće brzine skrućivanja povezane s niskotlačnim lijevanjem rezultiraju odljevcima sa sitnijim zrnom, manjim razmakom dendritnih grana i poboljšanim mehaničkim svojstvima.



Slika 13.2. Shematski prikaz konvencionalnog niskotlačnog lijevanja u trajne kalupe [108]

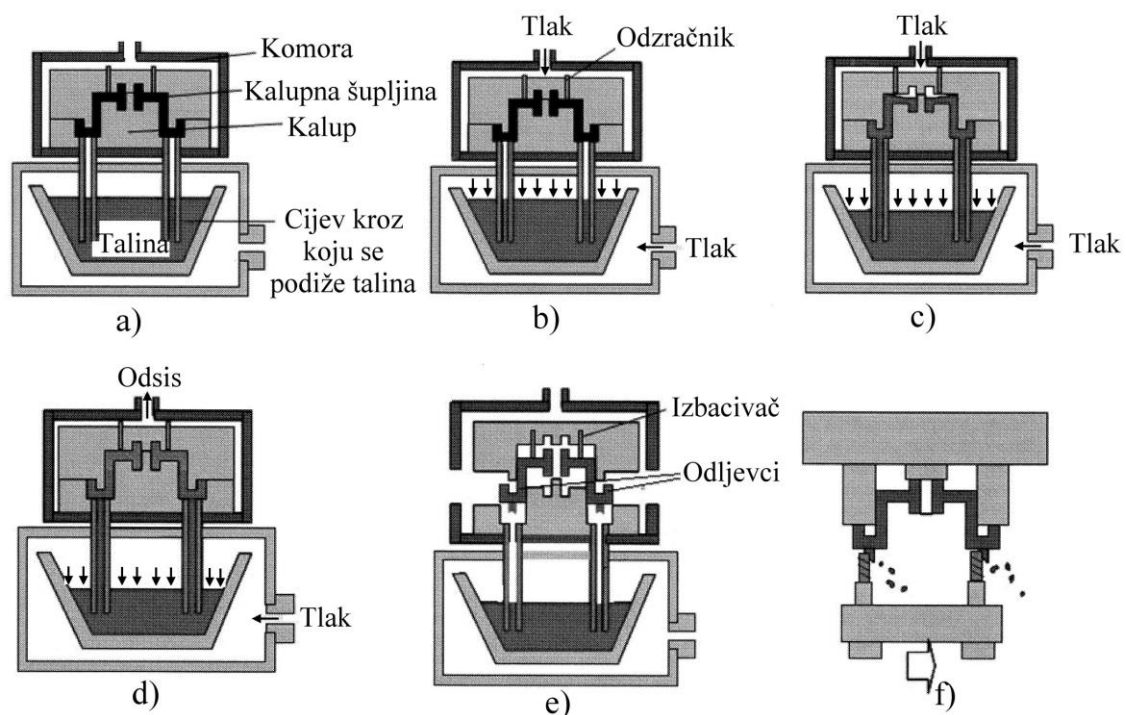
13.2.2 Protutlačno lijevanje u trajne kalupe

Protutlačno lijevanje (engl. *Counterpressure Casting*) razvijeno je na osnovi konvencionalnog niskotlačnog lijevanja [107]. Oprema je vrlo slična kao kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. Jedinствena karakteristika protutlačnog lijevanja je primjena hermetične komore oko trajnog kalupa s horizontalnom diobenom ravninom (slika 13.3).

Postupak započinje zatvaranjem kalupa oko kojeg se nalazi komora pri atmosferskom tlaku. Nakon toga tlak se primjenjuje na talinu u peći koja se nalazi ispod kalupa i na zrak u komori oko kalupa. Čim tlak koji djeluje na talinu u peći i tlak zraka u komori oko kalupa dostignu određenu vrijednost, tlak se održava određeno vrijeme (~ 5 s) da dođe do ujednačavanja. Sljedeći korak je povećanje tlaka koji djeluje na talinu u peći. Za to vrijeme tlak u komori ostaje konstantan, zbog čega se tekući metal iz peći diže kroz cijevi i popunjava kalup. Obzirom da je tlak u komori konstantan, dolazi do tlačenja zraka koji se istiskuje iz cijevi i kalupne šupljine prilikom podizanja taline. Kada se kalup napuni talinom sustav se još

određeno vrijeme drži pod tlakom. Potom se ispušta zrak iz komore, odnosno uklanja tlak. Tlak koji djeluje na talinu u peći održava se sve dok odljevak skrućuje (period napajanja odljevka). Kada se završi skrućivanje tlak na talinu u peći prestaje djelovati i odljevak se hladi u kalupu dovoljno dugo da bi se mogao sigurno izvaditi iz kalupa. Slijedi vađenje odljevka iz kalupa.

Obzirom da se kalup puni mirno i da se skrućivanje odljevka odvija pod tlakom, ovim postupkom lijevanja mogu se proizvesti visokokvalitetni, kompaktni i cijenom prihvatljivi odljevci od aluminijskih slitina ako se pažnja posveti kritičnim aspektima procesa. Odljevci proizvedeni ovim postupkom imaju bolja mehanička svojstva od odljevaka proizvedenih lijevanjem u jednokratne pješčane kalupe, gravitacijskim lijevanjem u trajne kalupe ili konvencionalnim niskotlačnim lijevanjem u trajne kalupe. Po svojstvima mogu se usporediti sa odljercima koji su proizvedeni znatno skupljim postupcima, kao što lijevanje tiskanjem ili lijevanje u djelomično rastaljenom stanju.

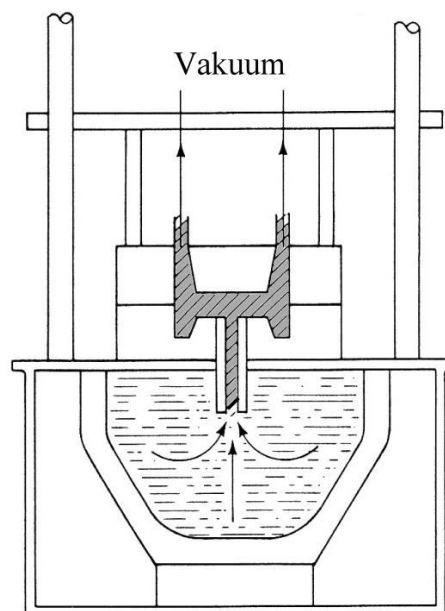


Slika 13.3. Shematski prikaz faza u procesu proizvodnje odljevaka protutlačnim lijevanjem u trajne kalupe a) kalup se zatvara pri atmosferskom tlaku, b) na kalupnu šupljinu i talinu u peći primjenjuje se tlak, c) tlak koji djeluje na talinu u peći nastavlja se povećavati i tekući metal ispunjava kalupnu šupljinu, d) prestanak djelovanja tlaka u komori uz nastavak tlačenja taline u peći. Odljevak skrućuje, a talina u cijevima napaja odljevak, e) prestanak djelovanja tlaka na talinu u peći. Kalup se otvara i vadi se odljevak, f) uklanjanje uljevnog sustava [107]

Veliko područje primjene je automobilska industrija. Razne komponente automobila od kojih se zahtijeva visoka sigurnost, kao što su npr. naplatci i nosači kotača, mogu se uspješno proizvesti ovim postupkom. Vojna industrija je također jedno od mogućih područja primjene.

13.2.3 Vakuumsko niskotlačno lijevanje u trajne kalupe

Lijevanje pod vakuumom (engl. *Vacuum Riserless/Pressure Riserless Casting*) slično je konvencionalnom niskotlačnom lijevanju. Pomoću otvora na gornjem dijelu kalupa uspostavlja se vakuum u kalupu, zbog čega se talina počinje dizati iz peći ispod kalupa kroz cijev i na taj način se puni kalup (slika 13.4) [107]. Nakon toga primjenjuje se tlak na površinu taline u peći da bi se u kalupu i u cijevi između peći i kalupa zadržao tekući metal. Kao i kod konvencionalnog niskotlačnog lijevanja, talina u cijevi za punjenje kalupa djeluje kao pojilo, što rezultira visokim iskorištenjem taline. Obično se primjenjuje za lijevanje odljevaka od aluminijskih slitina. Izvanredna mehanička svojstva i visoki proizvodni učinci često se postižu ovim postupkom. Postupak je moguće automatizirati i kao rezultat toga proizvoditi veće količine visoko kvalitetnih odljevaka po konkurentnoj cijeni. Postupak je obično povezan s manjim odljevcima i zahtijeva specijalnu, kompleksnu konstrukciju kalupa za pravilno induciranje vakuuma.



Slika 13.4. Shematski prikaz vakuumske niskotlačne lijevanja u trajne kalupe [108]

Odljevci proizvedeni ovim postupkom lijevanja mogu se toplinski obraditi, a mehanička svojstva slična su svojstvima odljevaka koji su proizvedeni postupkom lijevanja tiskanjem. Primjenjuje se u automobilske industrije za izradu dijelova šasijske i ovjesne od kojih se zahtijeva visoka sigurnost.

13.3 Visokotlačno lijevanje u trajne kalupe

Kod visokotlačnog lijevanja u trajne kalupe (engl. *High-Pressure Die Casting*) tekući metal se pod djelovanjem visokog tlaka velikom brzinom potiskuje u vodom hlađeni kalup. Visokotlačno lijevanje pogodno je za aluminijske, magnezijске i bakrene slitine te slitine na osnovi cinka. Visoki tlakovi i hlađenje kalupa osiguravaju brzo skrućivanje odljevaka, izvanrednu površinu i reproducibilnost detalja. Mnogi visokotlačno lijevani odljevci zahtijevaju malu ili nikakvu strojnu obradu.

Primjenom visokotlačnog lijevanja u trajne kalupe postiže se znatno veća produktivnost nego u slučaju gravitacijskog ili niskotlačnog lijevanja u trajne kalupe. Uređaji za visokotlačno lijevanje su sofisticirani, visokoautomatizirani, često sposobni proizvoditi vrlo veliki broj odljevaka po satu. Obzirom da se mogu proizvesti odljevci sa viskom dimenzijskom točnošću, znatno se smanjuje potreba za strojnom obradom. Visokotlačno lijevanje pogodno je za proizvodnju odljevka vrlo složenih oblika. Još jedna od prednosti je mogućnost lijevanja odljevaka s vrlo tankim stijenkama (< 1 mm), čime se smanjuje masa odljevka.

Visokotlačno lijevanje ima i neke nedostatke. Zahtjev za visokim tlakovima ograničava primjenu na manje odljevke. Visoki troškovi izrade kalupa i kupovine uređaja za lijevanje ograničavaju postupak na vrlo velike serije. Samo ograničen broj slitina može se lijevati pod visokim tlakom (čelični i željezni ljevovi ne lijevaju se visokotlačno). Jedan od značajnih nedostataka pojedinih postupka visokotlačnog lijevanja je poroznost u odljevku, što negativno utječe na mehanička svojstva odljevka te onemogućuje toplinsku obradu i zavarivanje.

Odljevci proizvedeni visokotlačnim lijevanjem u trajne kalupe imaju vrlo široku primjenu. Razni dijelovi za automobile i ostala motorna vozila, električne alate i kućanske uređaje, zatim radijatori i dekorativni odljevci samo su neki od primjera primjene.

Razlikuje se nekoliko postupka visokotlačnog lijevanja u trajne kalupe:

- **konvencionalno visokotlačno lijevanje,**
- **vakuusko visokotlačno lijevanje,**
- **lijevanje tiskanjem i**
- **lijevanje u djelomično rastaljenom stanju.**

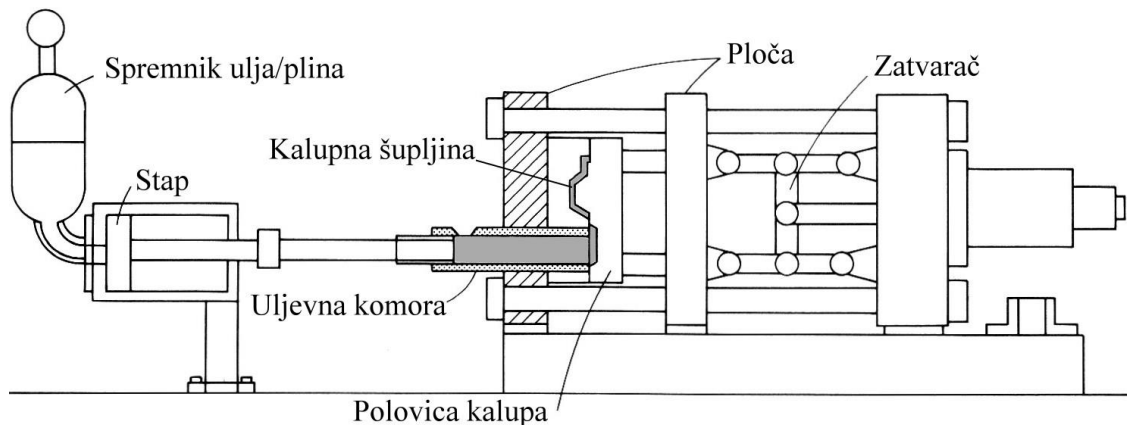
13.3.1 Konvencionalno visokotlačno lijevanje

Za konvencionalno visokotlačno lijevanje (engl. *Conventional High-Pressure Die Casting*) upotrebljavaju se dvije vrste uređaja. To su uređaji za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom (engl. *Cold Chamber Die Casting Machine*) i uređaji za visokotlačno lijevanje s vrućom uljevnom komorom (engl. *Hot Chamber Die Casting Machine*)

13.3.1.1 Uređaji za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom

Uređaji za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom (slika 13.5) upotrebljavaju se za lijevanje neželjeznih slitina sa višom temperaturom taljenja, kao što aluminijske i magnezijske slitine [109 - 111]. Te slitine nisu pogodne za lijevanje na uređajima s vrućom uljevnom komorom jer bi došlo do oštećenja komponenti sustava za injektiranje.

Željezo i većina legirnih elemenata u čeliku u većoj ili manjoj mjeri otapaju se u tekućem aluminiju. Zbog toga može doći do značajnog otapanja površine čelične komponente ako je kompletno uronjena u mirujuću talinu aluminija. Iz tog razloga za lijevanje aluminijskih slitina upotrebljavaju se uređaji s hladnom uljevnom komorom, odnosno uljevnom komorom koja nije stalno u kontaktu s tekućim metalom.



Slika 13.5. Shematski prikaz uređaja za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom [110]

Sklonost aluminija da otapa željezo iz komponenti uređaja za lijevanje koje su napravljene od čelika može se značajno smanjiti ako aluminijska slitina koja se lijeva sadrži 0,9 do 1 % željeza. Time se ujedno smanjuje mogućnost naljepljivanja aluminijske slitine na kalup.

Vodom hlađeni trajni kalup s vertikalnom diobenom ravninom načinjen od legiranog čelika postavljen je između dvije ploče na uređaju. Ploča do uljevne komore je fiksna i na nju je pričvršćena jedna polovica kalupa. Druga ploča je pokretna i na nju je pričvršćena druga polovica kalupa. Pokretanjem pomiče ploče druga polovica kalupa pomiče se prema naprijed i nazad. Time je omogućeno zatvaranje i otvaranje kalupa.

Temperaturna razlika između površine kalupa i tekućeg metala ne smije biti previsoka. Početni kontakt hladnog kalupa sa tekućim metalom dovodi do velikih temperaturnih šokova u kalupu. Zbog toga se kalup treba predgrijati. Optimalna temperatura predgrijavanja kalupa ovisi o vrsti slitine koja se lijeva. U slučaju lijevanja aluminijskih i magnezijjskih slitina kalup treba predgrijati na 250 do 350 °C.

Uz uređaj se nalazi peć u kojoj se drži tekući metal i održava njegova temperatura. Tekući metal doprema se u tu u peć iz peći u kojima se provodi taljenje.

Tekući metal ulijeva se u horizontalno postavljenu uljevnu komoru i pomoću hidraulički pokretanog stapa injektira u kalupnu šupljinu. Tlakovi koji se primjenjuju variraju ovisno o slitini koji se lijeva i veličini odljevka, a obično su u području od 20 do 140 MPa. Pri tome brzina kojom se kreće stap i tlakovi značajno utječu na kvalitetu odljevka. Zbog toga je na suvremenim uređajima za visokotlačno lijevanje s hladnom uljevnom komorom proces lijevanja podijeljen u tri faze.

U prvoj fazi lijevanja ulijeva se određena količina tekućeg metala u uljevnu komoru i nakon toga stap se kreće malom brzinom prema naprijed potiskujući tekući metal prema kalupnoj šupljini. Na taj način sprječava se rasprskavanje tekućeg metala i formiranje vala te stvaranje turbulencija i s tim povezano zahvaćanje zraka.

U drugoj fazi lijevanja stap se velikom brzinom kreće prema naprijed i injektira tekući metal u kalupnu šupljinu. Što je veća brzina stapa bolje je popunjavanje kalupne šupljine, bolja su mehanička svojstva odljevka i bolja je kvaliteta površine odljevka. Druga faza lijevanja traje vrlo kratko, zbog čega se ne uspije sav zrak ukloniti iz kalupne šupljine kroz ventilacijske otvore, tj. odzračnike na kalupu. Zbog toga je u unutrašnjosti odljevaka lijevanih ovim postupkom prisutna određena poroznost.

U trećoj fazi lijevanja daljnjim pomicanjem stapa prema naprijed dodatno se povećava tlak na tekući metal u kalupnoj šupljini. Time se u određenoj mjeri povećava kompaktnost odljevka (smanjuje poroznost) i poboljšava napajanje odljevka tijekom skrućivanja. Treća

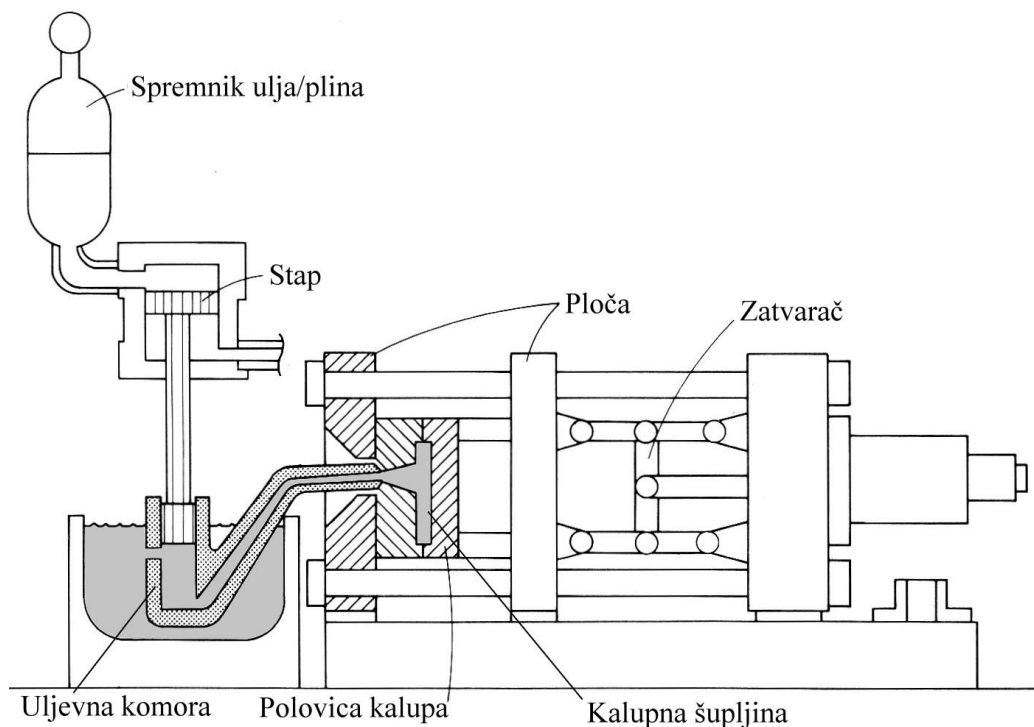
faza lijevanja aktivira se pri kraju popunjavanja kalupne šupljine tekućim metalom. Što je veći tlak u trećoj fazi lijevanja odljevci će imati bolja mehanička svojstva, manju poroznost i bolju kvalitetu površine.

Odljevak brzo skrutne u kalupnoj šupljini. Nakon toga otvara se kalup, izvlače se jezgre koje nisu okomite na diobenu ravninu kalupa i odljevak se potiskuje van iz kalupne šupljine pomoću izbacivala koja prolaze kroz pomičnu polovicu kalupa do odljevka. Broj izbacivala mora biti dovoljno velik da se spriječi deformacija odljevka tijekom vađenja iz kalupa. Proces završava uklanjanjem uljavnog sustava sa odljevka.

Prije ponovnog zatvaranja kalupa prskanjem vode dodatno se ohladi kalup. Potom se pomoću komprimiranog zraka odstrani zaostala voda i ostale nečistoće sa unutarnjih površina kalupa. Nakon toga špricanjem se na kalupnu šupljinu nanosi sredstvo (molibdenov disulfid ili koloidni grafit u ulju) koje djeluje kao mazivo i na taj način olakšava tok taline u kalupnoj šupljini i sprječava lijepljenje taline na kalup, a time omogućuje i lakše uklanjanje odljevka iz kalupa. Slijedi zatvaranje kalupa i može se ponovo provesti lijevanje.

13.3.1.2 Uređaji za visokotlačno lijevanje s vrućom uljvnom komorom

Uređaji za visokotlačno lijevanje s vrućom uljvnom komorom (slika 13.6) upotrebljavaju se za lijevanje neželjeznih slitina sa nižom temperaturom taljenja, kao što slitine na osnovi cinka, olovne slitine i kositrene slitine koje ne nagrízaju komponente uređaja lijevanje [110 - 112].



Slika 13.6. Shematski prikaz uređaja za visokotlačno lijevanje s vrućom uljvnom komorom [110]

Po pitanju konstrukcije i otvaranja kalupa, izbacivanja odljevka, hlađenja i predgrijavanja kalupa te pripreme za iduće lijevanje, nema razlike između uređaja za lijevanje

s vrućom uljevnom komorom i uređaja s hladnom komorom. Razlika postoji u izvedbi jedinice za injektiranje taline u kalup.

Tekući metal nalazi se u peći uz uređaj za lijevanje. Ta peć može služiti i za taljenje i pripremu taline ako u ljevaonici ne postoji talionica sa pećima za taljenje. Uljevna komora postavljena je vertikalno i uronjena je u talinu u peći. Takvom izvedbom minimalizirano je izlaganje tekućeg metala turbulencijama i zraku te su smanjeni toplinski gubitci. Talina ulazi u uljevnu komoru i pomoću hidraulički pokretanog stapa injektira se kroz kanal koji spaja peć i uređaj za lijevanje u kalupnu šupljinu. Tlakovi koji se primjenjuju variraju ovisno o slitini koji se lijeva i veličini odljevka, a obično su u području od 10 do 30 MPa.

Kad se kalupna šupljina ispunji tekućim metalom, stap ostaje u donjem položaju i tlači talinu dok odljevak skrućuje. Nakon skrućivanja odljevka, hidraulički sustav podiže stap, kalup se otvara i vadi se odljevak.

13.3.1.3 Nedostaci konvencionalnog visokotlačnog lijevanja

U industrijski razvijenim zemljama odljevci proizvedeni konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem čine više od polovice ukupne mase odljevaka od aluminija. Veliki uspjeh visokotlačno lijevanih komponenti proizlazi iz prednosti glede točnosti, kvalitete površine i sposobnosti reproduciranja detalja i to po niskoj cijeni uz prihvatljivu produktivnost. Međutim, konvencionalno visokotlačno lijevanje ima i nekoliko ozbiljnih nedostataka.

Većina strojeva za konvencionalno visokotlačno lijevanje upotrebljava ubrizgavajuće udare narušavajući tako ispravnost gotovih odljevaka. Talina se obično ubrizgava pod mlazom i raspršuje na suprotnu stranu kalupne šupljine i potom odbija i pljuska po stjenkama nazad začepujući putove odzračivanja plinova iz kalupne šupljine i na taj način zarobljava preostali zrak unutar odljevka. Pored zarobljavanja zraka, uzrok poroznosti može biti razlaganje sredstva (maziva) kojim se prska površina kalupne šupljine i plinovi otopljeni u talini. Raspršivanje taline unutar kalupne šupljine uzrokuje začepljenje ventilacijskih otvora, tako da se visoki tlakovi upotrebljavaju većinom za sabijanje zarobljenih plinova. Rezultat takvog načina punjenja kalupne šupljine je odljevak koji pokazuje tipičnu poroznu strukturu – izvanredna kora ali puno zračnih mjehurića upravo ispod površine.

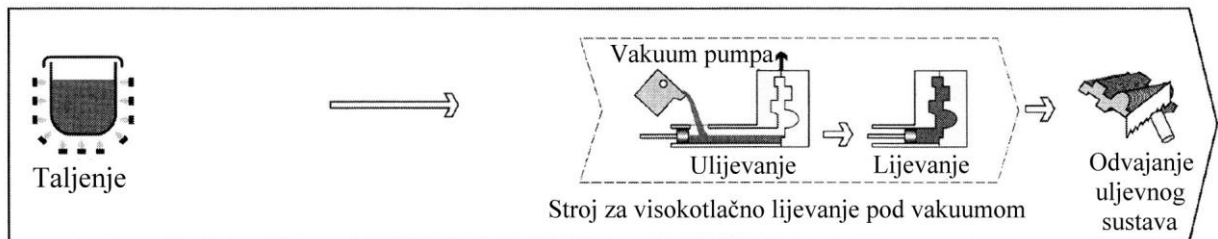
Odljevci proizvedeni konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem imaju strukturu koja je puna diskontinuiteta koji proizlaze iz okruživanja talinom početno štrcanih, oksidiranih i već skrnutih kapi metala. Ne mogu se žariti (homogenizirati) jer smanjenje čvrstoće i otpornosti na puzanje metala pri temperaturama toplinske obrade omogućuje ekspanziju zarobljenih plinova uzrokujući stvaranje mjehura na površini ili čak deformaciju odljevka.

Odljevci se ne bi smjeli strojno obrađivati i ne mogu se zavarivati zbog porozne strukture. Čak i manja strojna obrada vjerojatno će narušiti ispravnu koru odljevka i otkriti nezadovoljavajuću poroznu strukturu ispod nje. Bušenjem nastali provrti mogu se povezati s unutarnjom mrežom poroznosti i tako uzrokovati propuštanje fluida preko udaljenih točaka na odljevku.

Osim karakterističnih pogrešaka vezanih za postupak lijevanja taline pod visokim tlakom, mora se kod konvencionalnih postupaka visokotlačnog lijevanja računati i sa greškama vezanim za sam proces skrućivanja: usahline zbog volumnog stezanja materijala, mjehuravost, vruće i hladne pukotine. Obzirom na intenzitet odvođenja topline i brzinu skrućivanja taline u kalupu ne može se računati na djelotvornu upotrebu pojila i napajanje tako da topla čvorišta pokazuju manje ili veće usahline uslijed stezanja materijala pri skrućivanju.

13.3.2 Vakuumsko visokotlačno lijevanje

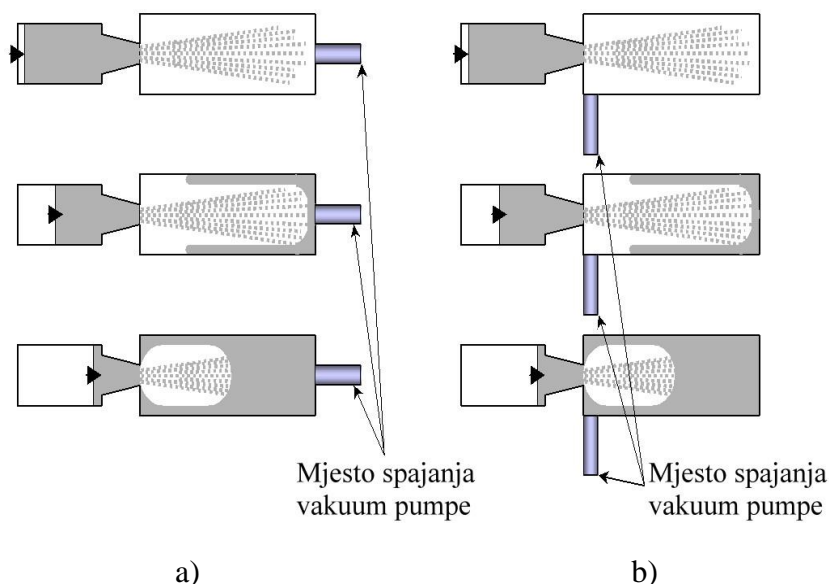
Vakuumsko visokotlačno lijevanje (engl. *Vacuum High Pressure Die Casting*) je suvremeni postupak visokotlačnog lijevanja kod kojeg se primjenjuje vakuum da bi se uklonili plinovi iz kalupne šupljine i uljavnog sustava (slika 13.7) [113, 114]. Obično se tlak smanjuje na 100 mbar, 150 mbar ili 200 mbar. Kod pravilno primijenjenog vakuuma ~ 95 % svih plinova može se ukloniti iz kalupa. Taj postupak eliminira većinu nedostataka konvencionalnog visokotlačnog lijevanja i omogućuje proizvodnju visokokvalitetnih odljevaka.



Slika 13.7. Shematski prikaz vakuumske visokotlačne lijevanja [114]

Vakuumsko visokotlačno lijevanje razlikuje se od konvencionalnog visokotlačnog lijevanja samo po vanjskoj vakuumskoj pumpi (i pripadajućoj opremi) koja je povezana s kalupom. Tijekom procesa lijevanja vakuum u kalupnoj šupljini treba primijeniti što je duže moguće da se ukloniti što više plinova. Trenutak početka primjene vakuuma ima značajan utjecaj na konačne rezultate. Vakuum treba primijeniti odmah nakon što vrh stapa prođe kraj otvora za uljevanje taline u uljenu komoru. Udarom metala o ventil prekida se veza kalupa sa sustavom za vakuumiranje i na taj način sprječava njegovo oštećenje.

Da bi se ovaj postupak pravilno odvijao i postigli zadovoljavajući rezultati vakuum pumpa treba biti povezana s kalupnom šupljinom na mjestu koje se zadnje puni (slika 13.8).



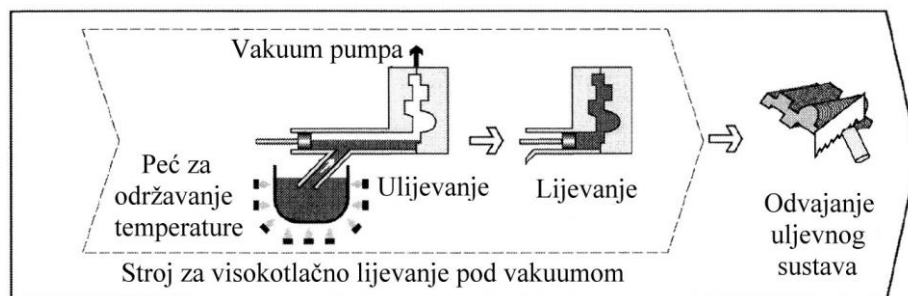
Slika 13.8. Shematski prikaz punjenja kalupne šupljine u slučaju nepravilnog (a) i pravilnog (b) položaja priključka vakuumske pumpe na kalup [113]

Na slici 13.8 može se vidjeti da i kod vakuumnog visokotlačnog lijevanja dolazi do raspršivanja taline tijekom punjenja kalupne šupljine, odnosno ne postiže se mirno punjenje kalupa.

U pogledu poroznosti zbog volumnog stezanja tijekom skrućivanja, vakuusko visokotlačno lijevanje ne nudi prednosti u odnosu na konvencionalno visokotlačno lijevanje. Prema tome, vakuuskim visokotlačnim lijevanjem može se eliminirati problem poroznosti koja potječe od zahvaćanja plinova, ali ne i problem koji je povezan s poroznošću zbog volumnog stezanja.

Komponente proizvedene vakuuskim visokotlačnim lijevanjem primjenjuju se za različite aplikacije. Mnoge komponente za suvremene automobile uspješno se izrađuju ovim postupkom. Kada je potrebno ovi odljevci mogu se toplinski obraditi bez pojave grešaka, odnosno mjehura na površini koji se javljaju kod toplinski obrađenih odljevaka lijevanih konvencionalnim visokotlačnim postupkom.

Na osnovi iskustava sa vakuuskim visokotlačnim lijevanjem kompanija Müller-Weingarten prva je razvila uređaj za visokotlačno lijevanje kod kojeg je uljevna komora povezana s peći, tako da se ulijevanje taline u uljevnu komoru i lijevanje u kalup provodi pod vakuumom (slika 13.9). Kalupna šupljina je također pod vakuumom. Taj postupak poznat je pod nazivom Vacural.



Slika 13.9. Shematski prikaz Vacural postupka visokotlačnog lijevanja [114]

Kod Vacural postupka može se ostvariti znatno viši vakuum nego kod vakuumnog visokotlačnog lijevanja zbog boljeg brtvljenja kompletnog sustava (kalupa i uljevne komore). Tlakovi obično iznose od 20 do 50 mbar [114].

Brzina punjenja uljevne komore i brzina stapa slične su kao kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. Taj postupak uspješno se primjenjuje za lijevanje tankostjenih odljevaka koji se mogu zavarivati i toplinski obrađivati, a namijenjeni su prvenstveno za automobilsku industriju (npr. komponente ovjesa).

13.3.3 Lijevanje tiskanjem

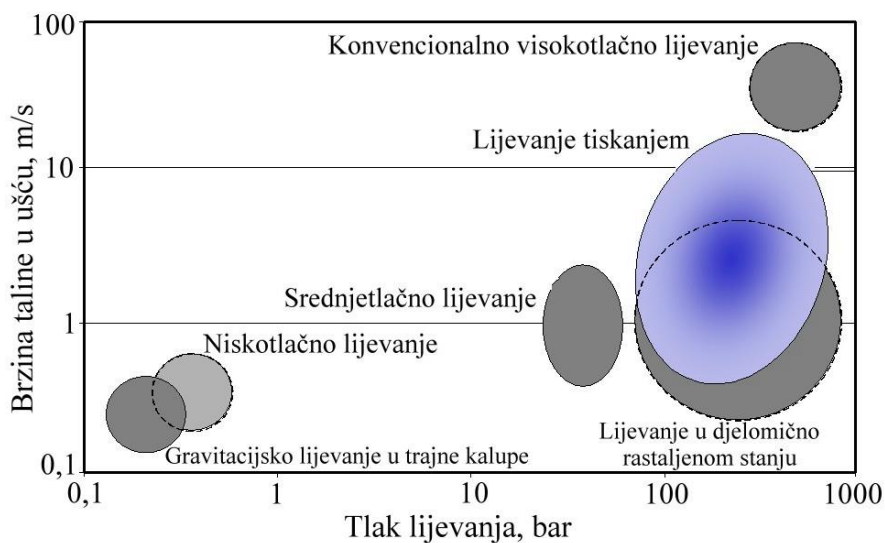
Poroznost je često limitirajući faktor koji ograničava upotrebu odljevaka proizvedenih konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem. Problemi koji su povezani s konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem mogu se eliminirati primjenom postupka lijevanja tiskanjem (engl. *Squeeze Casting*) [113, 115].

Lijevanje tiskanjem je suvremeni postupak lijevanja u trajne kalupe kojeg karakteriziraju niske brzine punjenja kalupne šupljine, minimalna turbulencija taline i visok tlak tijekom skrućivanja. To omogućuje minimalizaciju volumnog stezanja tijekom skrućivanja i zahvaćanja plinova, odnosno proizvodnju visokokvalitetnih odljevaka koji se

moгу toplinski obrađivati. Niže brzine taline i duži vremenski ciklus lijevanja rezultiraju superiornijom mikrostrukturom i mehaničkim svojstvima odljevaka u odnosu na konvencionalno visokotlačno lijevane odljevke. Ovim postupkom mogu se lijevati obojeni metali, kao što je aluminij, magnezij, cink i bakar.

Tlačenjem taline koja skrućuje mogu se proizvesti odljevci gotovo konačnih dimenzija s viskom kompaktnošću. Sposobnost oblikovanja odljevaka na gotovo konačnu dimenziju vrlo je važna karakteristika ovog postupka proizvodnje odljevaka. Često se mogu ostvariti tolerancije od $\pm 0,05$ mm kod odljevaka od obojenih metala [115].

Glavna razlika između lijevanja tiskanjem i konvencionalnog visokotlačnog lijevanja je u brzini taline u ušćima (dijelovima uljevnog sustava kroz koji talina ulazi u kalupnu šupljinu). Za različite postupke lijevanja na slici 13.10 prikazana su područja unutar kojih se nalaze brzine taline u ušćima i tlakovi lijevanja. Može se vidjeti da su kod lijevanja tiskanjem niže brzine taline u ušćima nego kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. Niže brzine taline u ušćima rezultiraju dužim vremenskim ciklusima lijevanja.



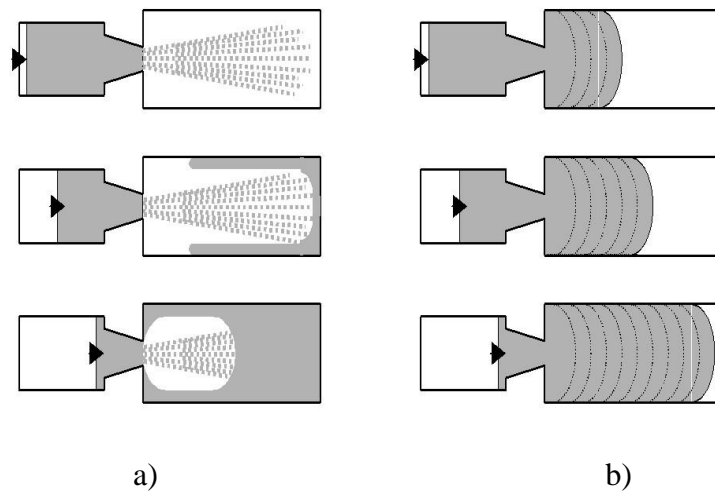
Slika 13.10. Usporedba tlakova lijevanja i brzina taline u ušću za različite postupke lijevanja u trajne kalupe [113]

Primjenom ušća većih poprečnih presjeka i nižih brzina lijevanja izbjegava se raspršivanje mlaza i turbulencija koji su inače prisutni kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. U većini slučajeva tijekom lijevanja tiskanjem talina ravnomjerno ispunjava kalupnu šupljinu (slika 13.11).

Tijekom konvencionalnog visokotlačnog lijevanja i vakuumskog visokotlačnog lijevanja primjenjuju se ušća malih poprečnih presjeka. Ta ušća brzo skrućuju i na taj način predstavljaju barijeru koja sprječava daljnje tlačenje u kalupnoj šupljini, što u konačnici rezultira greškama zbog volumnog stezanja tijekom skrućivanja odljevka. Kod lijevanja tiskanjem primjenjuju se ušća većih poprečnih presjeka zbog čega ušća ne skrućuju tako brzo kao kod prethodno navedenih postupaka. To omogućuje zadržavanje tlaka u kalupnoj šupljini tijekom dužeg vremenskog perioda, što u konačnici rezultira smanjenjem grešaka zbog volumnog stezanja tijekom skrućivanja i plinske poroznosti. Primjenom vakuuma tijekom lijevanja tiskanjem može se dodatno poboljšati kvaliteta odljevaka.

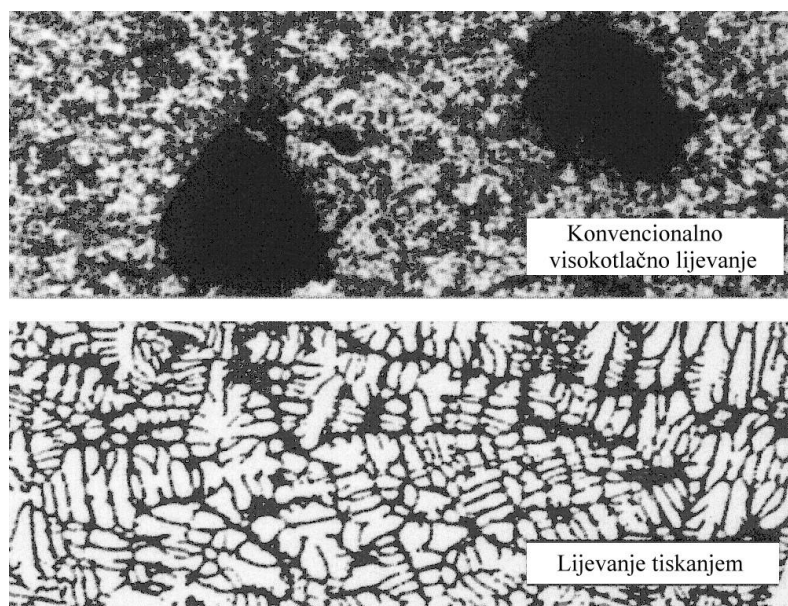
Pored povećanja gustoće, odnosno kompaktnosti, postoji nekoliko razloga zašto odljevci oblikovani ovim postupkom imaju superiorna svojstva. Primijenjeni tlak uzrokuje neposredan kontakt između odljevka i alata uz deseterostruko povećanje brzine prijenosa topline u odnosu na gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe. To rezultira sitnozrnatom

strukturu odljevka. Ova hibridna ljevačko-kovačka tehnologija pozitivno djeluje na svojstva materijala, što proizlazi iz usitnjenja strukture na makroskopskom (veličina zrna) i mikroskopskom nivou (veličina dendritnih grana) te smanjenja poroznosti.



Slika 13.11. Shematski prikaz tijeka punjenja kalupne šupljine kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja (a) i lijevanja tiskanjem (b) [113]

Mikrostrukture odljevaka proizvedenih konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem i lijevanjem tiskanjem značajno se razlikuju (slika 13.12).



Slika 13.12. Usporedba mikrostrukture odljevka od aluminijske slitine proizvedenog konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem i lijevanjem tiskanjem [113]

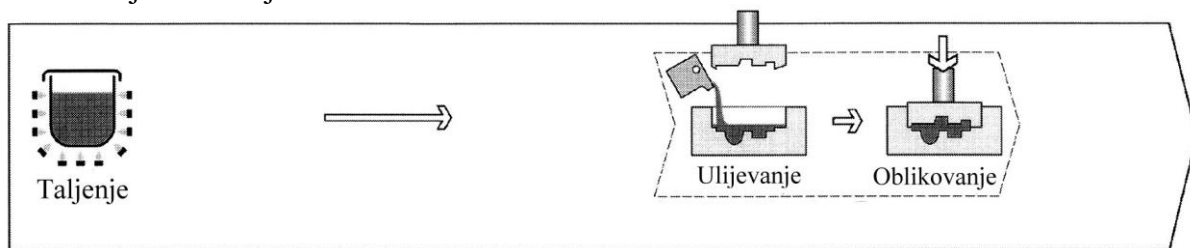
Na slici 13.12 može se vidjeti da mikrostruktura odljevka proizvedenog lijevanjem tiskanjem nije fina kao u slučaju konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. Pored toga, znatno su izraženiji dendriti u mikrostrukтури odljevaka proizvedenog lijevanjem tiskanjem. Međutim, mehanička svojstva odljevaka proizvedenih lijevanjem tiskanjem značajno su poboljšana zbog smanjenja poroznosti.

Razlikuje se nekoliko postupka lijevanja tiskanjem [114, 116]:

- **lijevanje direktnim tiskanjem,**
- **lijevanje indirektnim tiskanjem i**
- **lijevanje lokalnim tiskanjem.**

13.3.3.1 Lijevanje direktnim tiskanjem

Lijevanje direktnim tiskanjem (engl. *Direct Squeeze Casting*) je postupak koji u jednoj operaciji sjedinjuje gravitacijsko lijevanje u trajne kalupe s kovanjem u ukovnjima [113 - 116]. Primjena tlaka preko cijelog poprečnog presjeka kalupa rezultira pretvorbom taline u komponentu visoke kompaktnosti. Točno izmjerena količina talina ulijeva se u donju polovicu predgrijanog i premazanog kalupa s horizontalnom diobenom ravninom, nakon čega se spušta gornja polovica kalupa i provodi tlačenje (slika 13.13). Opterećenje se primjenjuje neposredno nakon što talina započinje sa skrućivanjem i održava se sve dok cjelokupni odljevak ne skrutne. Izbacivanje i manipulacija odljevkom obavljaju se na sličan način kao i kod kovanja u ukovnjima.



Slika 13.13. Shematski prikaz lijevanja direktnim tiskanjem [114]

Primijenjeni visoki tlakovi (od 55 do 140 MPa) uglavnom su dovoljni da spriječe plinsku poroznost, osim u ekstremnim slučajevima kod kojih treba primijeniti otplinjavanje. Sklonost ka usahlinama smanjena jer se lijevanje provodi uz minimalno pregrijanje taline. Kod lijevanja tiskanjem moguće je primijeniti niže pregrijanje taline jer za pravilnu popunu kalupa nije nužna visoka livljivost taline već visok tlak. U debelostjenim odljevcima koji su posebno osjetljivi na stvaranje usahlina, primijenjeni tlak potiskuje talinu ili djelomično tekući metal iz vrućih čvorišta u početno nastale šupljine, sprečavajući na taj način nastanak poroznosti. Slitine s širokim intervalom skrućivanja vrlo dobro se prilagođavaju tom obliku gibanja metala, što u konačnici rezultira ispravnim i kompaktnim odljevcima. Primijenjeni tlak potpomaže napajanje kompenzirajući smanjenje volumena tijekom hlađenja postupnim smanjenjem visine odljevka, kad se materijal pod njegovim djelovanjem sažima. Međutim, s napredovanjem skrućivanja odljevka progresivno se smanjuje tlak prenesen na preostalu talinu u toplinskom centru odljevka zbog povećanja čvrstoće skrutnutog dijela odljevka. Na taj način smanjuje se tlačenje taline prema toplinskom centru. Zbog toga, da bi se dobila tražena ispravnost u toplinskom centru odljevka treba premašiti određeni minimalni tlak za prevladavanje otpora skrutnutog dijela slitine.

Brojne varijable utječu na ispravnost i kvalitetu odljevaka proizvedenih lijevanjem direktnim tiskanjem: volumen taline (utječe na dimenzijsku točnost), temperatura lijevanja, temperatura kalupa (obično se kreću od 190 do 300 °C), premaz kalupa (koloidni grafitni sprej), vremenski pomak između ulijevanja i „kovanja“, stupanj tlačenja, period djelovanja tlaka (za odljevak mase 9 kg utvrđeno je da tlak treba djelovati od 30 do 120 s) itd. Za svaku komponentu koja se lijeva direktnim tiskanjem treba optimirati parametre procesa. Striktno

održavanje utvrđenih procesnih parametara ključno je za postizanje kvalitete komponenti i ponovljivost proizvodnog procesa.

Premda su principi lijevanja direktnim tiskanjem vrlo jednostavni, stvarna proizvodnja visokokvalitetnih odljevka obzirom na unutarnju strukturu i dimenzijske tolerancije prilično je otežana. Posebno može biti izražen problem dimenzijske točnosti jer volumen ulivene taline u donju polovicu kalupa određuje konačne dimenzije odljevka. Dakle, varijacije u volumenu ulivene taline rezultiraju varijacijama u dimenzijama odljevaka, što može dovesti do povećanog škarta.

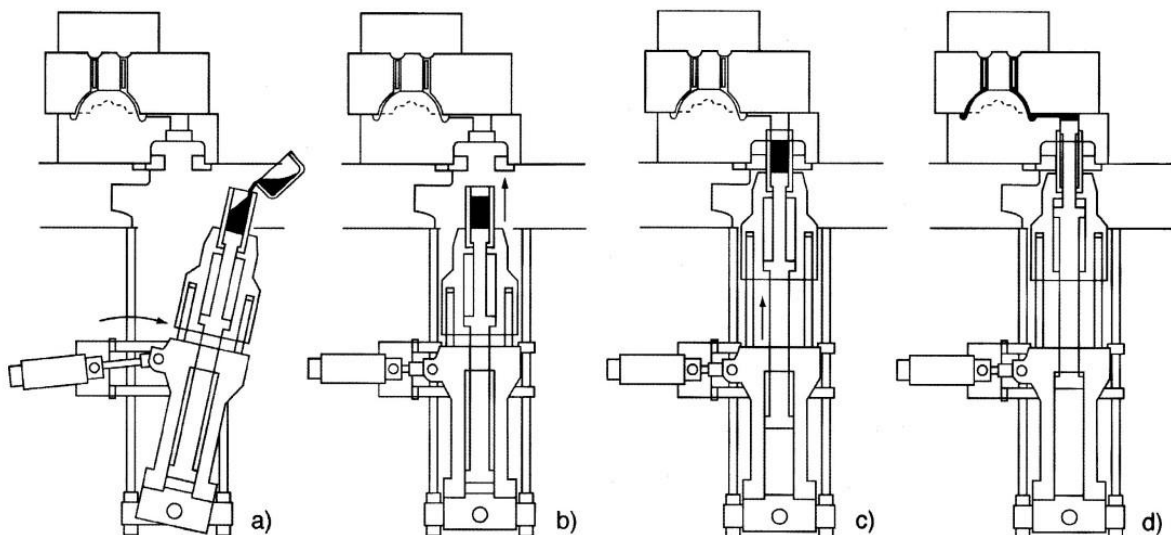
Povoljna karakteristika ove metode je vrlo visoko iskorištenje taline (~ 100 %) jer kod ovog postupka lijevanja nema uljevnog sustava i pojila. Međutim, zbog toga može biti narušena kvaliteta odljevaka. Kod odljevaka koji su proizvedeni lijevanjem direktnim tiskanjem obično nije prisutna unutarnja poroznost, ali mogu biti prisutni uključci.

Lijevanje direktnim tiskanjem nije zastupljeno u širem opsegu u praksi. Razlog za to je i činjenica da se ovim postupkom mogu proizvoditi samo relativno jednostavni oblici. Uglavnom se primjenjuje kod lijevanja probnih odljevaka od kompozitnih materijala te proizvodnje stapova za motore s unutarnjim izgaranjem.

13.3.3.2 Lijevanje indirektnim tiskanjem

Lijevanje indirektnim tiskanjem je relativno nov postupak koji predstavlja kombinaciju visokotlačnog i niskotlačnog lijevanja. Punjenje kalupne šupljine odvija se odozdo, tj. od dna prema vrhu. Taj postupak lijevanja primjenjuje se u znatno većem opsegu od lijevanja direktnim tiskanjem.

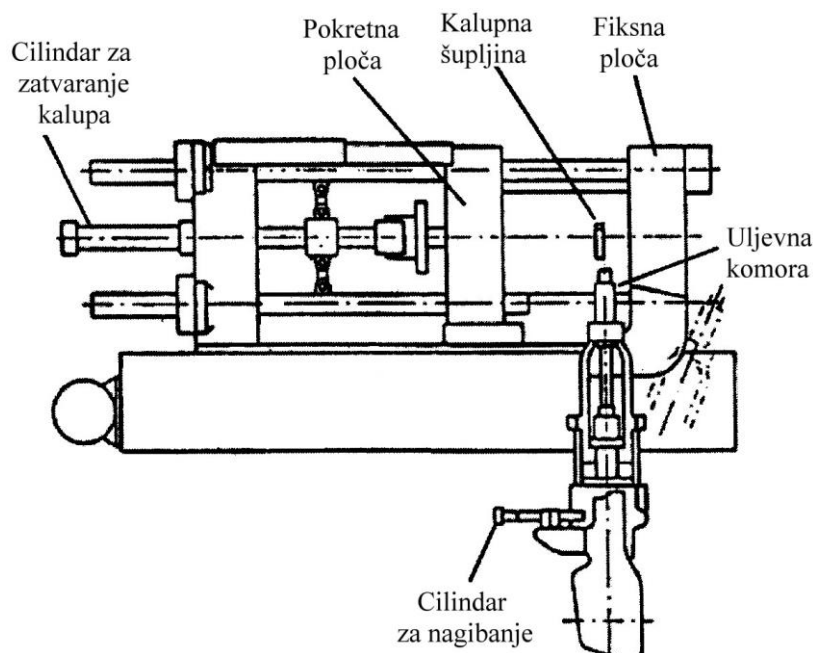
U osnovi razlikuju se dva postupka lijevanja indirektnim tiskanjem: lijevanje vertikalnim indirektnim tiskanjem (engl. *Indirect Vertical Squeeze Casting*) i lijevanje horizontalnim indirektnim tiskanjem (engl. *Indirect Horizontal Squeeze Casting*) [113, 114]. Postupak lijevanja vertikalnim indirektnim tiskanjem (slika 13.14) primjenjuje se u većem opsegu od lijevanja horizontalnim indirektnim tiskanjem.



Slika 13.14. Ciklusi pri lijevanju kućišta motora od aluminijske slitine vertikalnim indirektnim tiskanjem: a) doziranje taline u uređaj za lijevanje, b) zakretanje uređaja za lijevanje u vertikalni položaj, c) spajanje uređaja za lijevanje sa kalupom, d) punjenje kalupa, tlačenje i skrućivanje [114]

Uređaj za lijevanje koji se nalazi ispod osnovnog nivoa zatvoren je odozdo tlačnim stapom i neznatno se zakreće iz vertikalnog položaja da bi se ulila odgovarajuća količina taline (slika 13.14a). Nakon završetka ulijevanja taline, uređaj za lijevanje zakreće se u vertikalni položaj (slika 13.14b), podiže i spaja sa kalupom (slika 13.14c). Zatim se stap pokreće prema gore tako da se talina s ravnom frontom punjenja potiskuje u kalupnu šupljinu (slika 13.14d). Tlačenje taline u kalupnoj šupljini primjenjuje se sve do završetka skrućivanja odljevka. Pri tome se zrak iz kalupne šupljine istiskuje prije nego što metal skrutne pod djelovanjem visokog tlaka. Završna faza obuhvaća vađenje odljevka iz kalupa i uklanjanje uljavnog sustava.

U praksi se primjenjuje i jedna varijanta uređaja za lijevanje vertikalnim indirektnim tiskanjem kod kojeg je uljevna komora postavljena vertikalno, dok je jedinica za zatvaranje (sklapanje) kalupa postavljena horizontalno (engl. *Horizontal-Vertical Squeeze Casting*) (slika 13.15). Prema tome, kalup kod tih uređaja ima vertikalnu diobenu ravninu, a kalup kod uređaja za lijevanje potpuno vertikalne izvedbe ima horizontalnu diobenu ravninu.



Slika 13.15. Stroj za lijevanje vertikalnim indirektnim tiskanjem kod kojeg je uljevna komora postavljena vertikalno, a jedinica za zatvaranje (sklapanje) kalupa postavljena je horizontalno [114]

Da bi se iskoristio potencijal sporog punjenja kalupne šupljine za poboljšanje kvalitete tlačno lijevanih odljevaka, predloženo je lijevanje horizontalnim indirektnim tiskanjem koje se zasniva na konvencionalnom visokotlačnom lijevanju. Suvremeni strojevi za visokotlačno lijevanje s odgovarajućom kontrolom brzine punjenja kalupne šupljine omogućuju kontrolirano sporo punjenje primjenom većih ušća i razvodnika taline u kalupu. Stoga lijevanje horizontalnim indirektnim tiskanjem u osnovi predstavlja konvencionalno visokotlačno lijevanje s odgovarajuće prilagođenim parametrima. Rezultati koji se postižu tim postupkom slični su kao kod lijevanja vertikalnim indirektnim tiskanjem.

Ulazak uključaka u kalupnu šupljinu može se spriječiti postavljanjem čeličnih mrežastih filtara ili pjenastih keramičkih filtara ispred ušća. Temperature kalupa kod lijevanja tiskanjem nešto su više nego kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja.

Ključ držanja poroznosti unutar predviđenog, prihvatljivog nivoa je vrlo sporo uvođenje taline u kalupnu šupljinu. Punjenje kalupne šupljine odvija se kroz ušća većih

dimenzija uz malu brzinu tlačnog stapa, pri čemu se postižu brzine taline u ušćima od ~ 0,5 m/s [117]. To je znatno manja brzina nego kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja (obično 20 do 60 m/s), što rezultira mirnim punjenjem kalupne šupljine s ravnom frontom. Zrak se ne zarobljava već se istiskuje iz kalupa, zbog čega vakuumski uređaji za odzračivanje nisu potrebni. Povećanje brzine povećava opasnost od turbulencije i zarobljavanja zraka. Održavanjem toka taline tijekom punjenja kalupa i primjenom visokog tlaka nakon popunjavanja kalupa (150 do 170 MPa) može se djelotvorno smanjiti poroznost zbog volumnog stezanja tijekom skrućivanja. Da bi se talina pri sporom ulijevanju održala tečljivom, ovaj postupak lijevanja zahtijeva znatno veća ušća.

Sporije punjenje minimalizira zahvaćanje zraka, a primjena visokog tlaka tijekom skrućivanja olakšava napajanje odljevka. Zbog toga se mogu proizvesti ispravni i kompaktni odljevci s vrlo niskim stupnjem poroznosti. Odljevci proizvedeni postupkom lijevanja indirektnim tiskanjem mogu se toplinski obraditi bez pojave površinske mjehuravosti. Kao rezultat toga, mehanička svojstva odljevaka proizvedenih tim postupkom, pogotovo dinamička i vlačna čvrstoća te istezljivost, znatno su bolja od svojstava odljevaka proizvedenih uobičajenim načinima lijevanja.

Da bi se ostvarili optimalni parametri procesa, pažljivo treba kontrolirati konstrukciju ušća, brzinu punjenja i toplinske uvjete postupka. Ti parametri su značajno drugačiji nego kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja.

Za većinu odljevaka za automobilsku industriju koji se lijevaju tiskanjem upotrebljava se postupak indirektnog tiskanja. Smanjenje mase aluminijskih naplataka postignuto je putem reduciranja debljine stjenke za 20 % u odnosu na onu lijevanu gravitacijski odnosno pod niskim tlakom. Da bi se zadržala razina sigurnosti, ta komponenta proizvodi se lijevanjem indirektnim tiskanjem.

Posebna karakteristika lijevanja vertikalnim indirektnim tiskanjem je fina struktura površine odljevka, što je djelomično povezano s primijenjenim visokim tlakom tijekom skrućivanja, a djelomično s različitim mazivima kojima se šprica površina kalupne šupljine. Zbog toga su automobilski naplatci proizvedeni ovim postupkom vrlo pogodni za naknadno kromiranje. Pored toga, indirektno lijevanje tiskanjem pogodan je proces za proizvodnju kućišta motora (slika 13.14), stapova, dijelova ovjesa i upravljačkog mehanizma te niza drugih komponenti suvremenog automobila.

13.3.3.3 Lijevanje lokalnim tiskanjem

Lijevanje lokalnim tiskanjem novija je inačica lijevanja tiskanjem koja podrazumijeva lokalno tiskanje toplih čvorišta ili mjesta na kojima je moguć nastanak usahlina [118]. Topla čvorišta u odljevku su mjesta koja posljednja skrućuju, zbog čega u većini slučajeva sadrže usahlone (praznine) zbog nekompenziranog volumnog stezanja metala tijekom skrućivanja. Premda se mogu primijeniti pojila, hladila, tlačenje itd., nije uvijek moguće eliminirati usahlone u toplim čvorištima odljevaka [119]. Virtualna izrada odljevaka uz primjenu programskih paketa za simulaciju skrućivanja omogućuje procjenu mjesta i vremena nastajanja usahlina te konstrukciju komponenti koje u okviru konvencionalnog visokotlačnog stroja omogućuju lokalno djelovanje na mjestima pojave usahlina, što u konačnici rezultira odljevcima veće ispravnosti i superiornijih svojstava [120].

13.3.3.4 Prednosti i nedostaci postupka lijevanja tiskanjem

Lijevanje tiskanjem predstavlja jednostavan, ekonomičan i učinkovit postupak koji se može automatizirati kod velikoserijske proizvodnje. Postupak omogućuje proizvodnju odljevaka s vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, visokom kompaktnošću, konačnim oblicima i manjom masom. Pored toga, odljevke proizvedene lijevanjem tiskanjem moguće je toplinski i strojno obrađivati. Usitnjenje mikrostrukture i kompaktnost odljevaka proizvedenih ovim postupkom poželjna su svojstva za mnoge sigurnosne komponente i kritične primjene. U suvremenom automobilu komponente lijevane tiskanjem sve više zamjenjuju odljevke od željeznog lijeva zbog smanjene mase.

Spektar slitina koje se mogu lijevati tiskanjem obuhvaća sve komercijalne slitine za visokotlačno lijevanje i dodatno slitine za oblikovanje gnječenjem. Polagano punjenje kalupa kombinirano s specijalnim sredstvima za odvajanje odljevka od kalupa omogućuje lijevanje slitina s niskim udjelom željeza, kao što je npr. slitina AlSi7Mg sa $< 0,15\% \text{Fe}$ ili slitina za oblikovanje gnječenjem koje se ne mogu lijevati konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem jer su sklone lijepljenju na kalup [117].

Lijevanje tiskanjem nije ograničeno na potpuno tekuće stanje slitine koja se lijeva. Na magnezijevim slitinama ustanovljeno je da se lijevanjem indirektnim tiskanjem može preraditi sirovi trupac u djelomično tekućem stanju [117].

Lijevanje tiskanjem ima nekoliko nedostataka [116]. Prvi nedostatak je relativno kraći životni vijek kalupa, što je rezultat viših temperatura taline u odnosu na konvencionalno visokotlačno lijevanje. Npr. temperature talina aluminijske tijeke lijevanja tiskanjem obično se kreću od 700 do 750 °C, što je nešto više nego kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja (650 do 660 °C). Zbog toga je temperaturna razlika između kalupa i taline veća, što uvjetuje veći toplinski umor površine kalupa. Drugi nedostatak povezan je s veći troškovima uklanjanja uljevnog sustava (deblja ušća moraju se od odljevka odvojiti pilom). U nedostatke ovog postupka može se ubrojiti i ograničena pogodnost za proizvodnju tankostjenih i vrlo kompleksnih komponenti.

13.3.4 Lijevanje u djelomično rastaljenom stanju

Lijevanje u djelomično rastaljenom stanju je specifičan način proizvodnje metalnih odljevaka u kojem se djelomično skrutnuta metalna suspenzija koja sadrži 40 do 60 % krute faze injektira u trajni kalup. Postupci lijevanja u djelomično rastaljenom stanju zbog svojih povoljnih karakteristika sve više dobivaju na značenju, posebno u automobilske industriji. To su hibridni postupci proizvodnje koji uključuju elemente lijevanja i kovanja.

Komponente oblikovane u djelomično rastaljenom stanju imaju povoljnu kombinaciju čvrstoće i žilavosti, mogu se toplinski obrađivati i zavarivati, nepropusne se pod tlakom i relativno jeftine. Ti postupci oblikovanja na gotovo konačnu dimenziju bazirani su na otkrićima tijekom ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća na MIT-u (*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA*) [121 - 123]. Da bi dobili spoznaje o veličini sila uključenih u deformaciju i fragmentaciju rastućih dendritnih struktura, istraživači na MIT-u konstruirali su visokotemperaturni viskozimetar. Pomoću dva koncentrična cilindra formirali su međuprostor u koji su lijevali slitine olovo-kositar i mjerili sile koje se prenose kroz skrućujuće slitine kad vanjski cilindar rotira. Tijekom tih eksperimenata otkrili da slitina u djelomično tekućem stanju pri kontinuiranom rotiranju vanjskog cilindra pokazuje značajno nižu smičnu čvrstoću, čak i pri relativno visokom udjelu krute faze. To jedinstveno svojstvo pripisano je novonastaloj nedendritnoj, tj. globularnoj strukturi. Viskoznost globularne

strukture bila je značajno niža od viskoznosti dendritne strukture, tako da na taj način formirana suspenzija ima tečljivost kao strojno ulje. Takav djelomično kruti materijal zadržava svoj oblik kao krutina. Međutim, kada se podvrgne smičnom naprezanju postaje dovoljno tekuć da se može injektirati u trajni kalup. To svojstvo poznato je kao tiksotropija.

Tiksotropija je svojstvo nekih materijala da postanu fluidni kad se potresaju ili miješaju, a postaju ponovno kruti kada se stave u fazu mirovanja. Izraz tiksotropija je izveden iz grčkih riječi *tikso*, što znači kontakt, dodir i *tropi*, što znači promjena, modifikacija. To smanjenje viskoznosti posljedica je privremenog raspada unutarnje strukture sustava pod djelovanjem smicanja ili tangencijalnog naprezanja. Viskoznost tiksotropnog sustava ovisi o prošlosti smicanja, tj. stupnju prethodnog mehaničkog miješanja kojem je materijal bio podvrgnut. Zahtjev za tiksotropno ponašanje tečenja je posebna mikrostruktura u djelomično rastaljenom stanju. Na početku lijevanja kruta faza materijala mora imati globularnu morfologiju, oblik koji se može proizvesti snažnim miješanjem tijekom skrućivanja. Zbog jasnog tiksotropnog modela tečenja tjestaste suspenzije u djelomično rastaljenom stanju mogu se očekivati visoke brzine proizvodnje slične onima kod konvencionalnog visokotlačnog lijevanja. Pored toga, tim postupcima eliminiraju se nedostaci konvencionalnog visokotlačnog lijevanja.

Tjestaste suspenzije mogu se u principu proizvesti u bilo kojem metalnom sustavu gdje tekuća i kruta faza koegzistiraju duž nekog intervala skrućivanja. Primjeri uključuju slitine aluminija, bakra, cinka i magnezija, čelike, superslitine na osnovi nikla i kompozitne materijale. Komercijalno lijevanje slitina u djelomično rastaljenom (tjestastom) stanju uspješno se primjenjuje za slitine lakih metala, posebno aluminija i magnezija.

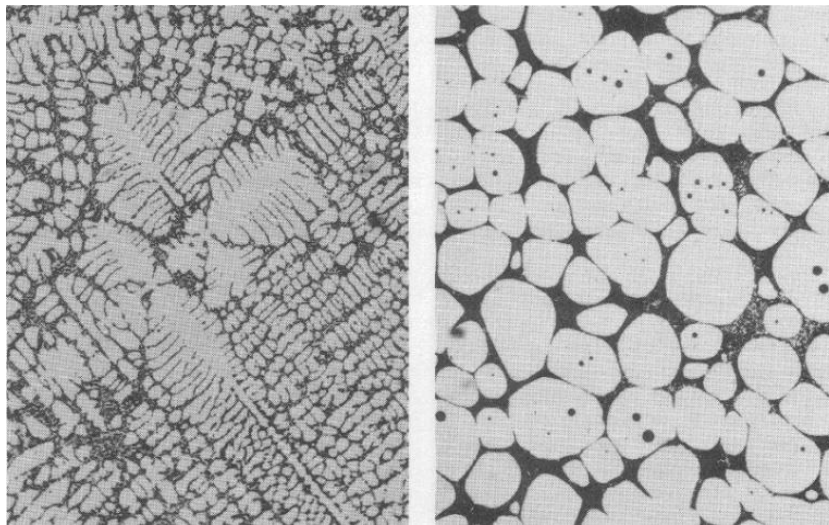
Pretpostavka za uspješnu proizvodnju odljevaka lijevanjem materijala u djelomično rastaljenom stanju je postojanje posebne mikrostrukture materijala u trenutku lijevanja. Materijal mora biti prisutan u obliku metalne tjestaste suspenzije niske viskoznosti koja sadrži globularnu krutu fazu okruženu tekućom fazom i pokazuje tiksotropno ponašanje (slika 13.16).



Slika 13.16. Pravilno zagrijan valjkasti poluproizvod u djelomično rastaljenom (tjestastom) stanju lako se, poput maslaca reže nožem [122]

Prema tome, da bi se ostvarila dovoljna tečljivost mora se dendritna struktura konvencionalno lijevanih slitina zamijeniti globularnom sitnozrnatom strukturom (slika

13.17). U tu svrhu primjenjuju se različiti postupci. Takve metalne suspenzije pokazuju kontinuirano smanjenje viskoznosti pod djelovanjem smičnog naprezanja, a viskoznost se ponovno uspostavljaju kad prestane djelovanje tog naprezanja.



a)

b)

Slika 13.17. Mikrostruktura AlSi7Mg0,5 slitine: a) dendritna, konvencionalno lijevana, b) globularna, oblikovana u djelomično rastaljenom stanju [121]

Slitine u djelomično rastaljenom stanju mogu se ponašati kao kruta tijela ili tekućine, što ovisi o primijenjenim naprezanjima (ili brzinama deformacije). Tim se materijalima tijekom procesa može manipulirati kao "krutinama" koje potom pod djelovanjem visokih sila deformacije teku kao viskozne tekućine, održavajući mirno tečenje i kao rezultat toga popunjavaju kalupnu šupljinu znatno ravnomjernije [122].

Postupci oblikovanja u djelomično rastaljenom stanju nude važne **prednosti u odnosu na konvencionalne postupke lijevanja** [121, 122]. Komponente oblikovane u djelomično rastaljenom stanju imaju povoljnu kombinaciju čvrstoće i žilavosti, mogu se toplinski obrađivati i zavarivati, nepropusne se pod tlakom i relativno jeftine. Ostvaruje se visok nivo kontrole nad konačnom mikrostrukturom metalne komponente oblikovane u djelomično rastaljenom stanju. Kontrolom udjela krute faze tijekom obrade i postupka oblikovanja suspenzije mogu se podesiti različite viskoznosti suspenzije, ovisno o pojedinoj primjeni. Mogućnost postizanja i održavanja mirnog tečenja tijekom punjenja kalupa jedna je od najvažnijih karakteristika postupka oblikovanja u djelomično tekućem stanju. Miran tok tjestastih suspenzija minimalizira zarobljavanje plina, čime se smanjuje poroznost. To ima važnu ulogu u postizanju visokih mehaničkih svojstava komponenti. Također, zbog nižih temperatura lijevanja zahtijevaju se kraća vremena skrućivanja, što povećava životni vijek kalupa i produktivnost. Budući je materijal već djelomično skrutnut, smanjuje se volumno stezanje tijekom skrućivanja i proizvode se odljevci s užim dimenzijskim tolerancijama. Postupci oblikovanja u djelomično rastaljenom stanju su ekološki prihvatljiviji i zahtijevaju manje energije od ostalih postupaka konvencionalnog lijevanja.

U osnovi, danas se lijevanje metala u djelomično rastaljenom stanju odvija pomoću tri bazna procesa:

- **tiksolijevanje,**
- **reolijevanje i**
- **tiksooblikovanje.**

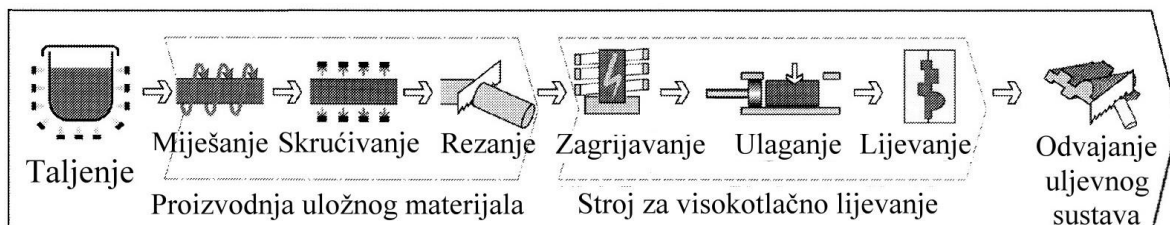
Kod tiksolijevanja (engl. *Thixocasting*) posebna vrsta uložnog materijala (valjkasti poluproizvod dobiven različitim postupcima) zagrijava se, prevodi u djelomično rastaljeno stanje radi oblikovanja globularne, ne dendritne tjestaste suspenzije i potom primjenjuje u daljnjim operacijama lijevanja.

Kod reolijevanja (engl. *Rheocasting*) tjestasta suspenzija proizvodi se direktno iz tekuće faze i odmah upotrebljava u operacijama lijevanja. Dakle, nema hlađenja do sobne temperature (tj. proizvodnje poluproizvoda) i ponovnog zagrijavanja te prevođenja u tjestasto stanje, kao u slučaju tiksolijevanja.

Tiksooblikovanje (engl. *Thixomolding*) je specijalni postupak razvijen za lijevanje magnezijских slitina u djelomično rastaljenom stanju. Karakteristika tog postupka je da se izrada tjestaste suspenzije i lijevanje provodi u jednom koraku.

13.3.4.1 Tiksolijevanje

Kod tiksolijevanja kao uložni materijal upotrebljava se valjkasti poluproizvod (trupac) promjera 50 do 150 mm sa odgovarajućom strukturom koja je pogodna da se nakon njegovog zagrijavanja i prevođenja u djelomično rastaljeno stanje dobije globularna struktura pogodna za lijevanje [114, 116, 122, 124]. Uložni materijal reže na odgovarajuće dimenzije, indukcijski zagrijava do djelomično rastaljenog stanja, čime se dobiva globularna tjestasta metalna suspenzija čvrstog oblika i potom robotom prenosi i stavlja u uljevnu komoru uređaja za visokotlačno lijevanje i injektira u kalup (slika 13.18). Nakon lijevanja odljevak se vadi iz kalupa i uklanja uljevni sustav koji se reciklira u pogonima za proizvodnju uložnog materijala.



Slika 13.18. Shematski prikaz tiksolijevanja [114]

Zagrijani valjkasti poluproizvodi ponašaju se i dalje kao kruta tijela, što olakšava manipulaciju. Viskozna priroda tjestaste metalne suspenzije omogućuje joj da teče relativno velikim brzinama (≥ 2 m/s) tijekom injektiranja u kalup, održavajući pri tome još uvijek stabilnu frontu tečenja bez zarobljavanja zraka.

Kritična točka kod ovog postupka je točno podešavanje omjera krute i tekuće faze u uložnom materijalu koji se induktivno zagrijava. Preduvjet za tiksolijevanje je uložni materijal odgovarajuće strukture sa dovoljno širokim interval skrucivanja da bi se mogao podesiti definirani odnos krute i tekuće faze. Udio taline obično se kreće od 30 do 60 %.

Temperatura zagrijavanja ima presudan utjecaj na udio krute, odnosno tekuće faze. Promjena temperature od ± 1 °C može imati, posebno kod slitina sa uskim intervalom skrucivanja, vrlo značajan utjecaj na ponašanje pri tečenju.

Vrijeme zadržavanja u uređaju za indukcijsko zagrijavanje također ima važnu ulogu. Obzirom da se u kratkom vremenskom intervalu u uložni materijal unosi značajna količina energije, izuzetno je važno točno održavati vremena zagrijavanja kako bi se točno ostvario propisani udio krute faze.

Polazni valjkasti uložni materijal zadržava svoj oblik tijekom perioda zagrijavanja, premda je oko polovice materijala u tekućem stanju. Ta stabilnost oblika omogućuje prenošenje komada u uljevnu komoru uređaja za visokotlačno lijevanje. Tek kad se primjene smične sile na pravilno zagrijani poluproizvod mijenja se njegovo ponašanje i dolazi do tečenja viskozne suspenzije. Ta strukturna viskoznost ili pseudoplastičnost glavni je princip tiksolijevanja. Kad se zagrijani trupac smično opteretiti, razruši se robusni kostur krutih čestica i izolirane globularne primarne čestice teku u viskoznoj talini, rezultirajući znatno manjom viskoznošću. Ako se nakon djelovanja smičnih sila stavi u fazu mirovanja, ponovno dolazi do stvaranja mreže krute faze, oblikujući na taj način „kostur“ koji rezultira "krutim" stanjem tiksolijevane komponente. Drugim riječima, tijekom oblikovanja npr. punjenja kalupne šupljine trajnog kalupa pod tlakom može se zapaziti značajna pretvorba početnog valjkastog poluproizvoda u talinu. Pri velikim iznosima smicanja tijekom procesa punjenja viskoznost slitine opada za nekoliko redova veličine i teče u kalupnu šupljinu gotovo kao potpuno tekuća talina. Zbog tiksotropnih svojstava suspenzije, komponenta se može izvaditi iz kalupa za lijevanje nakon vrlo kratkog vremena skrućivanja (ponovno stvaranje krutog kostura).

Mogućnost lijevanja bez primjene tekućeg metala svakako je jedna od prednosti tiksolijevanja. Ovaj postupak može se visoko automatizirati koristeći pristup sličan onome koji se upotrebljava kod kovanja i utiskivanja (prešanja). Zbog visokog udjela krute faze u tjestastoj metalnoj suspenziji smanjuje se volumno stezanje pri skrućivanju u usporedbi s skrućivanjem konvencionalne taline. To uzrokuje manje dimenzijske razlike između kalupa i odljevka. Niže temperature lijevanja rezultiraju nižim toplinskim opterećenjima, a time i lakšim održavanjem kalupa. Očekuje se povećanje vijeka trajanja kalupa za najmanje 10 % u usporedbi s konvencionalnim visokotlačnim lijevanjem.

S vremenom su uočeni i nedostaci ovog postupka. Tipični valjkasti poluproizvodi imaju izvjestan stupanj nehomogenosti obzirom na strukturu i sastav. Gubitak materijala pri zagrijavanju iznosi od 8 do 10 %. Vrijeme zagrijavanja raste s kvadratom promjera uložnog materijala, čime se otežava lijevanje velikih komponenti i povećavaju troškovi. Uljevni sustavi i neispravni odljevci ne mogu se reciklirati unutar prostora tiksolijevanja, već se moraju poslati nazad u ponovnu proceduru taljenja i lijevanja. Visok udio krute faze i niža temperatura lijeva mogu djelovati kao nedostatak kod odljevaka s velikim ravnim plohami i dugim putovima tečenja, jer može doći do prijevremenog skrućivanja.

Potrebno je imati na umu da ovako suvremena tehnologija zahtijeva visoke kapitalne investicije. Osim strojeva za visokotlačno lijevanje s najmodernijim mogućnostima upravljanja, nužna su i skupa postrojenja za zagrijavanje te aparature za ispitivanje. Osim toga, takvi uređaji zahtijevaju dosta prostora u ljevaoničkim halama.

Ne treba zanemariti da uložni materijal za tiksolijevanje košta 30 do 45 % više od uobičajenih slitina za lijevanje. Tomu treba pridodati troškove za točno rezanje trupaca, što zahtijeva ili dodatno osoblje ili skuplje automatizirane jedinice za obradu. Međutim, energija potrebna za zagrijavanje iznosi samo ~ 65 % od one potrebne za zagrijavanje taline za konvencionalno visokotlačno lijevanje ili lijevanje tiskanjem.

Ustanovljeno je da su proizvodni troškovi povezani s tiksolijevanjem za ~ 20 % veći od proizvodnih troškova kod postupaka reolijevanja, što je rezultiralo znatno manjom primjenom ovog postupka. Istraživanja su usmjerena na pronalaženje novog načina proizvodnje uložnog materijala.

Konvencionalno tiksolijevanje je postupak vrlo pogodan za velike serije visokokvalitetnih komponenti od lakih metala. Moguća je primjena u proizvodnji odljevaka za automobilsku industriju gdje se visoki zahtjevi odnose na mehanička svojstva i niske proizvodne troškove. Međutim, tiksolijevanje ne treba smatrati konkurencijom konvencionalnom kovanju u toplom ili visokotlačnom lijevanju u trajne kalupe, već kao novu mogućnost da se dobiju više nego adekvatna mehanička svojstva s usporedivo manjim

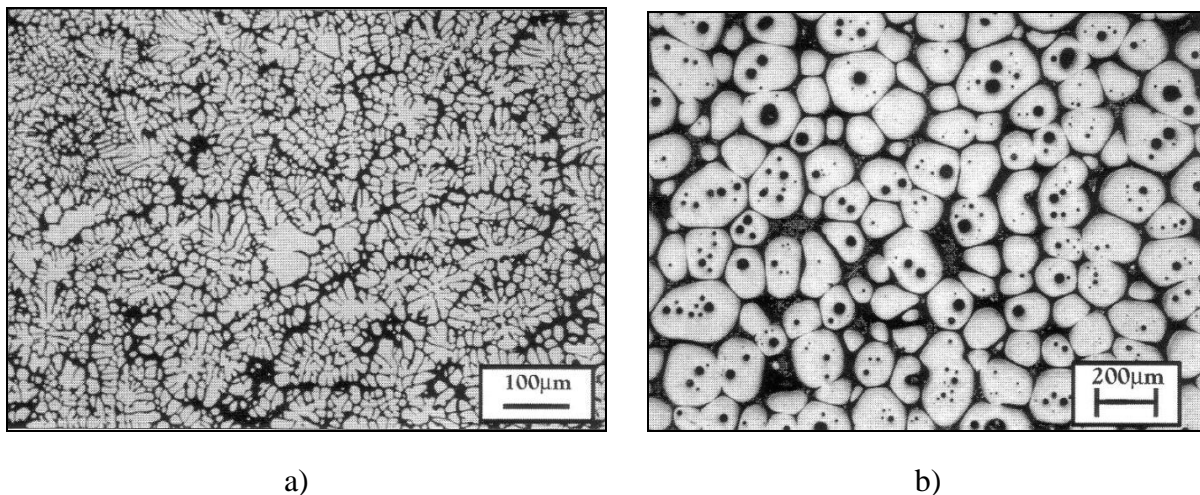
proizvodnim troškovima. Zbog toga ekonomična proizvodnja komponenti gotovo točnih dimenzija putem tiksolijevanja ima značajan potencijal, ne samo zbog vrlo dobrih mehaničkih svojstava i niskih troškova proizvodnje već i zbog razvoja potpuno novih geometrija oblikovanih komponenti koje su se ranije teško postizale ili se uopće nisu mogle ostvariti.

Za proizvodnju valjkastih poluproizvoda (trupaca) upotrebljavaju se različiti postupci. Najširu primjenu imaju sljedeći postupci [122 – 124]:

- magnetsko hidrodinamičko miješanje,
- kemijsko usitnjavanje zrna i
- postupak aktivacija taline induciran naprežanjem.

Cilj ovih postupaka je proizvodnja valjkastih poluproizvoda sa odgovarajućom strukturom koja se sastoji od sitnih (promjera manjeg od 100 μm) sferičnih primarnih čestica, a nazivaju se rozete ili globule ovisno o tome koliko je blizu njihova morfologija kuglastom obliku. Ti postupci, osim što mijenjaju morfologiju čestica, trebaju proizvesti homogenu suspenziju koja je bez uključaka i zarobljenih oksida.

Magnetsko hidrodinamičko miješanje (engl. *Magnetohydrodynamic Stirring* - MHD) najčešće se upotrebljavani postupak za proizvodnju visokokvalitetnih valjkastih poluproizvoda za tiksolijevanje. Taj postupak kombinira elektromagnetsko miješanje tekućeg metala blizu granične površine kruto/tekuće sa polukontinuiranim lijevanjem (engl. *Direct-chill Casting*). Mogu se proizvesti sitnozrnati (30 do 100 μm) homogeni aluminijski trupci promjera do 152 mm u kojima je morfologija primarne faze ćelijasta ili u obliku rozeta, a može biti i njihova kombinacija (slika 13.19a). Kad se brzo ponovno zagriju u djelomično rastaljeno stanje nastaje potpuno globularna, relativno sitna struktura (slika 13.19b).



Slika 13.19. Tipična mikrostruktura uložnog materijala za tiksolijevanje proizvedenog MHD postupkom (a) i nakon zagrijavanja na 580 °C u trajanju od 60 min. Aluminijska slitina AlSi7Mg0,3 [122]

Mikrostruktura uložnog materijala proizvedenog MHD postupkom u velikoj mjeri ovisi o provedenom elektromagnetskom miješanju. Mogu se dobiti gotovo dendritne mikrostrukture ili mikrostrukture sa visokim udjelom globularne faze, što ovisi o intenzitetu i smjeru elektromagnetskih sila.

Kemijsko usitnjavanje zrna (engl. *Chemical Grain Refining*). Primjenom djelotvornijih sredstava za usitnjavanje zrna u kombinaciji sa brzim hlađenjem tijekom polukontinuiranog lijevanja mogu se proizvesti valjkasti poluproizvodi promjera do 90 mm sa sitnozrnatom strukturom pogodni za tiksolijevanje. U tom slučaju morfologija primarnih aluminijskih čestica je globularna ili u obliku rozeta. Globularna tjestasta suspenzija može se dobiti jednostavnim ponovnim zagrijavanjem valjkastog poluproizvoda.

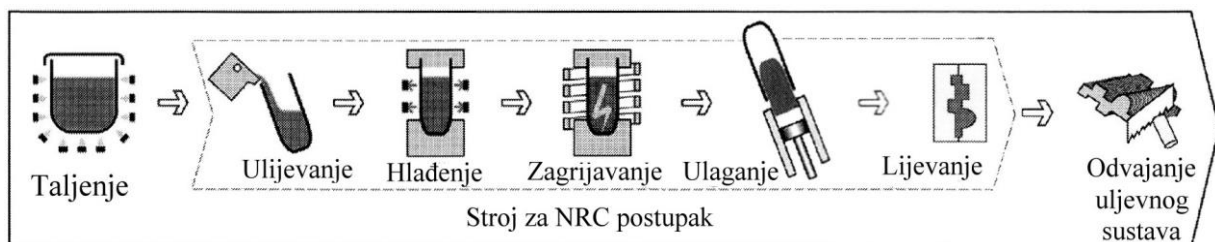
Postupak aktivacije taljevine induciran naprezanjima (engl. *Strain Induced Melt Activation Process - SIMA*) je postupak kod kojeg, za razliku od prethodnih postupaka, proizvodnja tjestastih metalnih suspenzija započinje iz krute faze. Kod tog postupka konvencionalno lijevani trupci se hladno ili toplo deformiraju valjanjem ili ekstrudiranjem na temperaturama ispod temperature rekristalizacije. Zbog visoko induciranog napreznja povećava se gustoća dislokacija za nekoliko redova veličine. Tijekom naknadnog zagrijavanja u temperaturnom području između likvidus i solidus temperature, visoka gustoća dislokacija djeluje kao pokretačka sila globularizacije primarnih čestica. Deformirani materijal najprije rekristalizira na temperaturi ispod solidus temperature pri čemu nastaju nova sitna zrna koja potom okrupnjuju i postaju globularna tijekom kratkog zadržavanja u području između likvidus i solidus temperature. Tako proizvedeni trupci imaju izrazito sitnozrnatu mikrostrukturu i mogu imati prednost u odnosu na trupce proizvedene MHD postupkom ako je materijal teško lijevati. Primjena ovog postupka ograničena je na trupce promjera do 50 mm.

13.3.4.2 Reolijevanje

Za razliku od tiksolijevanja, kod reolijevanja tjestasta metalna suspenzija sa globularnom strukturom proizvodi se direktno iz tekuće faze i odmah se upotrebljava za lijevanje [114, 116, 122, 123, 125]. To znači da nije potrebno proizvoditi valjkasti poluproizvod kao kod tiksolijevanja i ponovo ga zagrijavati. Zbog toga se danas reolijevanje više preferira za lijevanje aluminijskih slitina od tiksolijevanja.

Do danas je razvijeno više varijanti reolijevanja. U nastavku su prikazane osnovne karakteristike postupaka koji su komercijalizirani ili su u završnoj fazi razvoja.

NRC postupak, odnosno novi postupak reolijevanja (engl. *New Rheocasting – NRC*) uveden je 1999. godine od strane japanske korporacije UBE Industries Ltd. Taj postupak predstavlja kombinaciju lijevanja vertikalnim indirektnim tiskanjem i inovativne metode pripreme tjestaste metalne suspenzije od aluminijske ili magnezijske slitine (slika 13.20). Tjestasta suspenzija proizvodi se u nizu izoliranih posuda smještenih na okretnom postolju pored stroja za lijevanje.



Slika 13.20. Shematski prikaz novog postupka reolijevanja (NRC postupak) [114]

Potpuno tekući metal neznatno pregrijan uzima se iz peći i lijeva u specijalno dizajnirane i izolirane čelične posude koje su nagnute, odnosno pomaknute za određeni kut iz vertikalnog položaja i po dimenziji približno iste veličine kao i trupac koji se uvodi u uljevnu komoru uređaja za lijevanje. Pri kontaktu s hladnom stjenkom posuda, u talini se odvija nukleacija primarnih čestica u velikom opsegu. Kontrolirano hlađenje u djelomično rastaljenom području i zadržavanje dovoljno vremena u tom području vodi do stvaranja potpuno globularne tjestaste suspenzije. U završnoj fazi procesa izjednačava se temperatura po poprečnom presjeku posuda putem indukcijskog zagrijavanja. Budući da cijeli postupak hlađenja i zadržavanja u djelomično rastaljenom stanju traje nekoliko minuta, u cilju povećanja produktivnosti istovremeno se primjenjuje 5 do 10 izoliranih čeličnih posuda smještenih na okretnom postolju pored stroja za lijevanje. Pri tome je svaka posuda u različitoj fazi hlađenja. Na taj način moguće je skratiti ciklus lijevanja na samo 30 s.

Nakon što je dobivena tjestasta suspenzija željenih svojstava, izolirana posuda se okreće i vadi djelomično tekući poluproizvod (tjestasta metalna suspenzija) koji se potom odmah smješta u uljevnu komoru uređaja za lijevanje vertikalnim indirektnim tiskanjem i provodi ubrizgavanje u kalup. Punjenje kalupa odvija se sporo i to od dna prema vrhu. Time je ostvaren miran tok materijala, a zrak je istisnut iz kalupne šupljine i nije zahvaćen unutar odljevka. Skrućivanje se odvija pri tlaku od 130 MPa. Nakon skrućivanja odljevak se vadi iz kalupa i odvaja se uljevni sustav koji se vraća u talionicu gdje se reciklira.

Značajna razlika između tiksolijevanja i novog postupka reolijevanja je činjenica da se kontinuirano lijevanje i miješanje, iza čega slijedi ponovno zagrijavanje kod tiksolijevanja, zamjenjuje kontroliranim hlađenjem taline kod novog postupka reolijevanja.

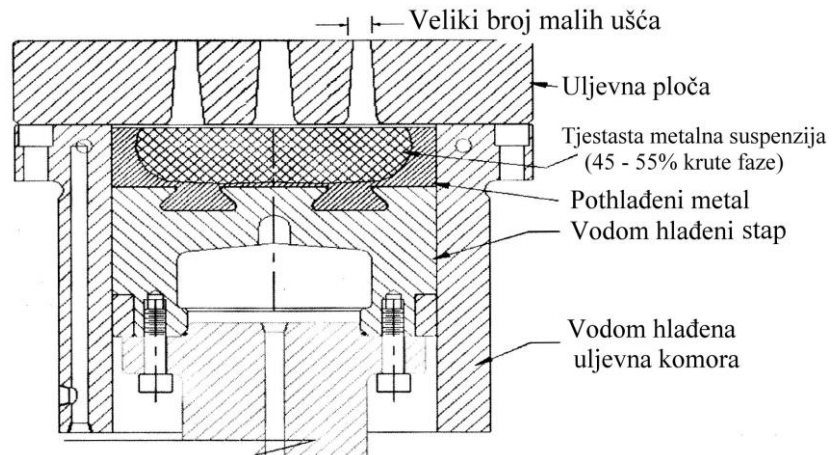
Za dobivanje poluproizvoda visoke kvalitete važno je držati talinu u blizini likvidus temperature i brzo ju ohladiti da se stvori puno nukleusa. Oni se raspodjeljuju preko cijelog poprečnog presjeka posude i rastu radijalno stvarajući globule ako su ispunjena dva uvjeta: veličina nukleusa i temperaturni gradijent u posudi moraju biti mali da bi se spriječio rast dendrita. Ako temperatura zadržavanja taline u djelomično rastaljenom stanju premaši izvjestan nivo stvara se manje nukleusa i oblik primarne faze postaje dendritni. Isti je slučaj ako gradijent postane previsok.

Kvaliteta poluproizvoda ovisi o ostvarenoj homogenosti mikrostrukture, odnosno postizanju što je moguće homogenije raspodjele temperatura u čeličnoj posudi i to preko cijelog volumena poluproizvoda. Kod kontroliranog hlađenja posuda i izoliranja glave i pete keramičkim materijalima može se temperaturna razlika između centra i ruba kod slitine AlSi7Mg0,3 podesiti na 2 °C. Ta temperaturna razlika odgovara varijaciji omjera krute i tekuće faze od 2 %. To osigurava homogenost poluproizvoda dobivenog NRC postupkom.

SLC postupak (engl. *Subliquidus Casting – SLC*) patentiran je 2001. godine od strane kompanije THT Presses, Inc. Taj postupak predstavlja kombinaciju posebno razvijenog stroja za lijevanje vertikalnim indirektnim tiskanjem (*THT Vertical Squeeze Casting Machine*) i inovativnog postupka proizvodnje tjestaste metalne suspenzije. U tom postupku upotrebljava se inovativni način hlađenja pri proizvodnji tjestaste metalne suspenzije koji se razlikuje od onog razvijenog kod NRC postupka. Pri tome se primjenjuje stap većeg promjera u uljevnoj komori uređaja za lijevanje koji služi kao jedinica za hlađenje i lijevanje (slika 13.21). Na taj način nije potrebna primjena okretnog postolja na kojem se proizvodi tjestasta metalna suspenzija, kao u slučaju NRC postupka. Jedinstveni koncept ploče za ulijevanje s većim brojem malih ušća dodatna je karakteristika tog postupka koja omogućuje lako odvajanje uljevnog sustava od odljevka.

Kod SLC postupka zahtijeva se odgovarajući dodatak sredstva za usitnjavanje zrna, nisko pregrijavanje taline prije ulijevanja u uljevnu komoru stroja za lijevanje i pravilna

kontrola temperature uljevne komore da bi se proizvele odgovarajuće tjestaste suspenzije za lijevanje u djelomično rastaljenom stanju.



Slika 13.21. Shematski prikaz uljevne komore, stapa i ploče za ulijevanje kod SLC postupka [114]

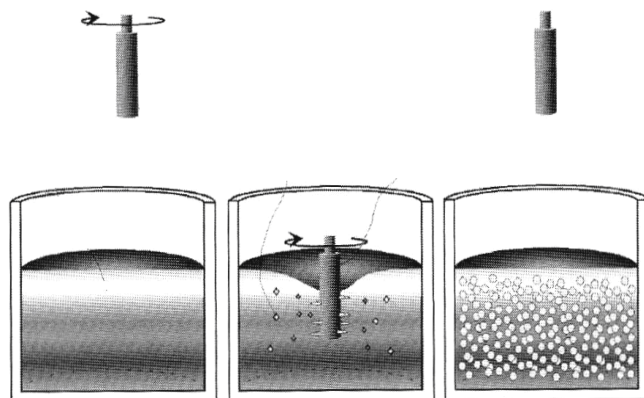
Kao što se može vidjeti na slici 13.21 talina se lijeva u uljnu komoru na površinu stapa. Uljevna komora mora biti čvrsta da bi mogla izdržati tlakove koji se primjenjuju tijekom lijevanja i skrućivanja u postupku indirektnog tiskanja te brzo hladiti talinu i formirati debelu krutu koru. Koncept pretpostavlja da se kod tjestaste suspenzije unutar krute kore dostiže udio krute primarne globularne faze od 40 do 60 % za nekoliko sekundi.

Da bi se održala dovoljna količina tjestaste suspenzije te niži udio krute faze unutar krute kore, odnosno zone s visokim udjelom krute faze, potrebna je primjena stapa velikog promjera. Da bi se 1 kg tjestaste suspenzije uveo u kalupnu šupljinu kod THT stroja za lijevanje potreban je hod stapa od samo 8,5 mm te klip promjera 200 mm. Kod konvencionalnih strojeva za lijevanje tiskanjem s promjerom klipa od 70 mm potreban hod klipa da bi se ispunio kalup je ~ 10 puta veći.

Veći promjer klipa rezultira nižim tlakom na kraju skrućivanja odljevka. U praksi je ustanovljeno da se kod lijevanja u djelomično rastaljenom stanju zahtijevaju viši tlakovi skrućivanja nego kod lijevanja u potpuno tekućem stanju da bi se ostvarila niska poroznost. To je teško postići primjenom klipa velikog promjera.

SSR postupak (engl. *Semisolid Rheocasting – SSR*) razvila je korporacija Idraprice Inc. i zasniva se na proizvodnji tjestaste suspenzije kombinacijom mehaničkog miješanja i lokalnog brzog odvođenja topline blizu ili neznatno ispod likvidus temperature, odnosno novom MIT postupku (*New MIT Process*) proizvodnje tjestaste suspenzije (slika 13.22).

Cilindrična posuda s rastaljenim aluminijem čija se temperatura održava na nekoliko stupnjeva iznad likvidusa prenosi se robotom do stanice gdje se provodi miješanje hladnim grafitnim mješačem u trajanju od 5 do 20 s. Nakon tako kratkog miješanja temperatura taline se snizila do vrijednosti koja odgovara udjelu krute faze od svega nekoliko postotaka. Potom se izvlači grafitni mješač (koji također hladi talinu). Kombinirano miješanje/hlađenje kod likvidus temperature rezultira opsežnom nukleacijom kristala aluminija i distribucijom nukleusa u talini. Nakon uklanjanja grafitnog mješača, djelomično skrutnuta talina (tj. tjestasta metalna suspenzija) prenosi se u uljnu komoru stroja za visokotlačno lijevanje ili se dodatno hladi da bi se povećao udio krute faze u suspenziji.



Slika 13.22. Shematski prikaz SSR postupka [122]

Kod ovog postupka mogu se upotrijebiti metalne suspenzije s niskim (< 20 %) i visokim (~ 50 %) udjelom krute faze. Međutim, postupak je pogodniji za lijevanje metalnih suspenzija s niskim udjelom krute faze. Udjeli krute faze od ~ 15 % zahtijevaju vrlo kratka vremena miješanja i hlađenja, zbog čega se može upotrijebiti samo jedna posuda i nisu potrebne velike i skupe stanice za hlađenje. Fluidnost takve suspenzije je još uvijek prilično visoka i slična je kao kod lijevanja slitine s niskim pregrijanjem.

Vrijeme zadržavanja suspenzije u uljevnoj komori stroja za visokotlačno lijevanje prije potiskivanja u kalupnu šupljinu ima vrlo važan utjecaj na kvalitetu konačnog odljevka. Ako se npr. tjestasta suspenzija slitine AlSi7Mg0,3 pri temperaturi od 608° C sa udjelom krute faze od 15 % ulije u uljevu komoru promjera 70 mm stroja za visokotlačno lijevanje, vrijeme zadržavanja od 4 s rezultirati će ukupnom količinom krute faze od ~ 40 %. To znači da 25 % primarne faze skrućuje pri visokim brzinama hlađenja u uljevnoj komori, zbog čega će uglavnom imati dendritnu strukturu. U tom slučaju suspenzija je mješavina globularne primarne faze nastale tijekom miješanja grafitnim mješaćem, dendritne primarne faze nastale u uljevnoj komori i preostale tekuće faze. Kao rezultat toga može se očekivati nehomogen tok i odvajanje faza.

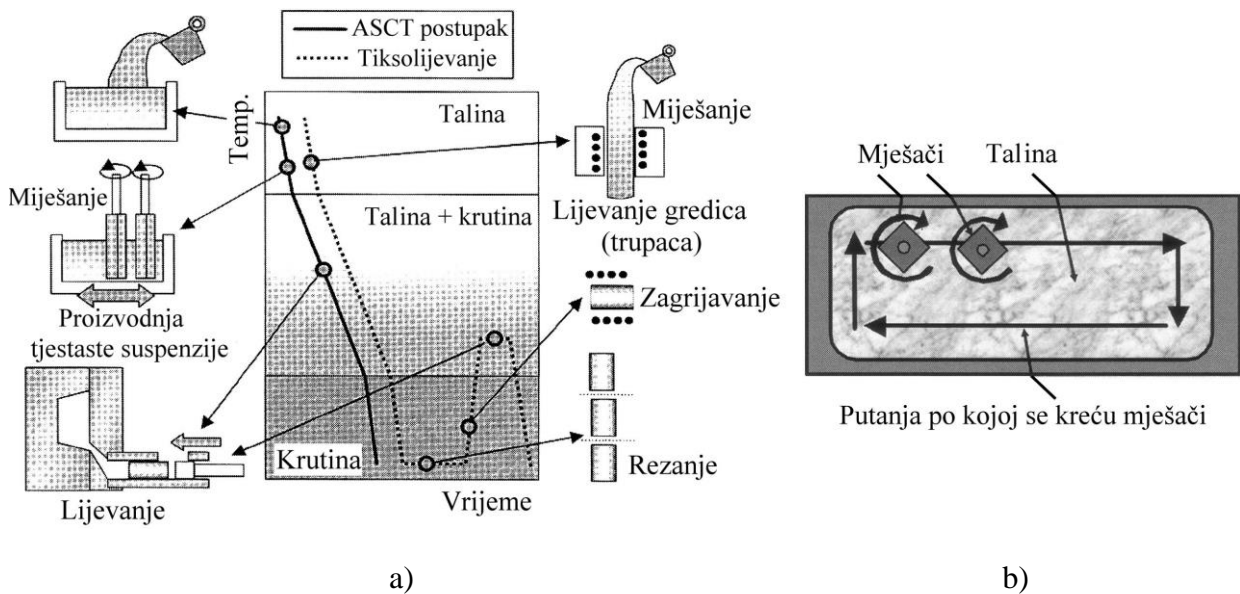
ASCT postupak (engl. *Advanced Semisolid Casting Technology – ASCT*), odnosno naprednu tehnologiju lijevanja u djelomično rastaljenom stanju u trajne kalupe razvila je korporacija Honda za lijevanje kućišta i glava automobilskih motora. Ovaj postupak vrlo je sličan prethodno opisanom SSR postupku u pogledu proizvodnje tjestaste metalne suspenzije.

Hlađeni mješalci gibaju se kroz neznatno pregrijanu talinu i pri tome dolazi do hlađenja taline i stvaranja nukleacijskih mjesta potrebnih za daljnji globularni rast. Dakle, u ASCT postupku zahtijevana suspenzija proizvodi se hlađenjem i mehaničkim miješanjem.

Važan aspekt kod ASCT postupka je kontrola kvalitete suspenzije. Kod većine postupaka lijevanja u djelomično rastaljenom stanju, kvaliteta tjestaste suspenzije određuje se na osnovi mjerenja temperatura i korelacije s udjelom krute faze. Međutim, kod ASCT postupka kvaliteta tjestaste suspenzije određuje se na osnovi mjerenja viskoznosti. Oscilacije u sastavu slitine mogu rezultirati značajnim varijacijama u udjelu krute faze pri određenoj temperaturi. Te oscilacije vode ka oscilacijama u viskoznosti suspenzije i prema tome utječu na tok suspenzije tijekom punjenja kalupne šupljine.

ASCT postupak (slika 13.23a) provodi se tako da se talina s temperaturom neznatno iznad likvidusa ulije u veliku posudu i potom miješa putem programiranog kretanja mješalca po posudi koji istovremeno rotiraju oko svoje osi (slika 13.23b). Kada se dostigne zahtijevani

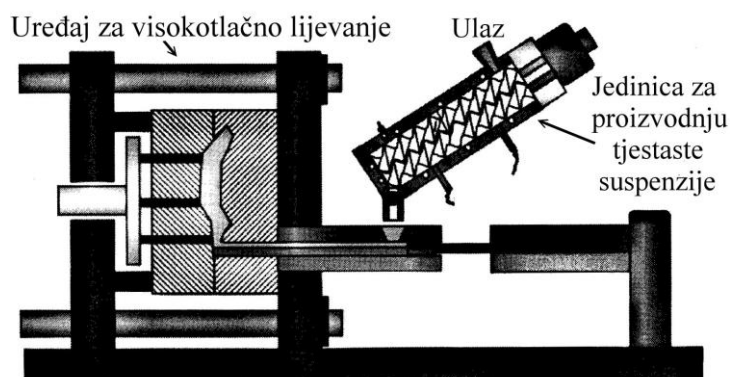
udio krute faze (koji odgovara određenoj viskoznosti), tjestasta metalna suspenzija prenosi se u uljevnu komoru stroja za visokotlačno lijevanje i provodi se lijevanje.



Slika 13.23. a) usporedba tijeka procesa kod ASCT postupka i tiksolijevanja, b) programirano kretanje mješača tijekom proizvodnje tjestaste metalne suspenzije kod ASCT postupka [114]

RDC postupak (engl. *Rheo-Diecasting – RDC*) proizvodi tjestastu metalnu suspenziju primjenom istiskivača sa dva vretena. Pripremljena tjestasta metalna suspenzija uvodi se u uljevnu komoru stroja za visokotlačno lijevanje i provodi lijevanje.

Kod RDC postupka (slika 13.24) cilindrični bubanj, koji sadrži dva vretena, može se povezati s bilo kojim strojem za konvencionalno visokotlačno lijevanje. Talina se ulijeva u cilindrični bubanj i proizvodi se sitna globularna tjestasta metalna suspenzija u uvjetima visokih brzina smicanja pod djelovanjem vretena i visokih turbulencija. Tjestasta metalna suspenzija može se proizvesti unutar 30 s. Unutar cilindričnog bubnja može se primijeniti atmosfera inertnog plina. Kad se sakupi dovoljna količina suspenzije, ona se uvodi u uljevnu komoru stroja za visokotlačno lijevanje.



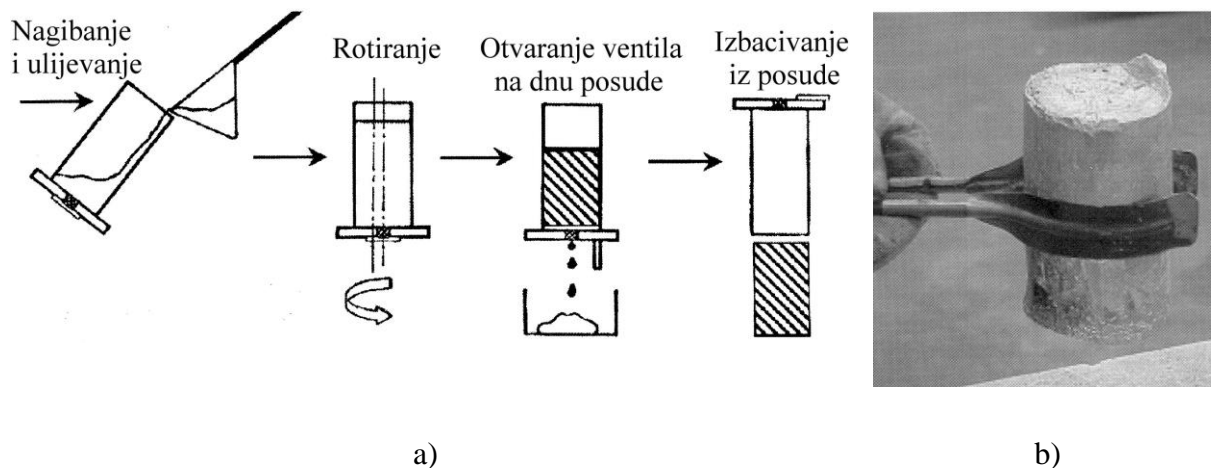
Slika 13.24. Shematski prikaz RDC postupka [114]

Odgovarajuća viskoznost može se postići pravilnom podešavanjem temperature i uvjeta pri smicanju, čime se u konačnici osigurava punjenje kalupne šupljine uz vrlo niske

turbulencije. U kombinaciji s pravilnim parametrima lijevanja poroznost odljevka može biti < 1 %.

Ovaj postupak prvotno je razvijen za lijevanje magnezijskih slitina u djelomično rastaljenom stanju. Danas se ovaj postupak primjenjuje i za lijevanje aluminijskih slitina u djelomično rastaljenom stanju. Kod lijevanje magnezijskih slitina, vretena unutar cilindričnog bubnja za proizvodnju tjestaste suspenzije izrađena su od čelika, a kod lijevanja aluminijskih slitina vretena su izrađena od keramike.

SEED postupak (engl. *Swirled Enthalpy Equilibration Device – SEED*) je nedavno razvijen i patentiran postupak lijevanja u djelomično rastaljenom stanju. Razvila ga je korporacija Alcan. Slično, kao kod NRC postupka, talina se ulijeva u posudu koja je nagnuta, odnosno pomaknuta za određeni kut iz vertikalnog položaja (slika 13.25a). Nakon toga, posuda se vraća u okomiti položaj i rotira oko vertikalne osi brzinom od 100 do 200 okretaja/min. s ekscentričnošću, tj. pomakom iz centra za 12 mm da bi se nukleusi krute faze stvoreni na stijenkama posude jednoliko distribuirali u talini i dostigao udio krute faze od 30 do 45 % koji omogućuje stabilnost, odnos manipulaciju tjestastom metalnom suspenzijom kao krutim uloškom.

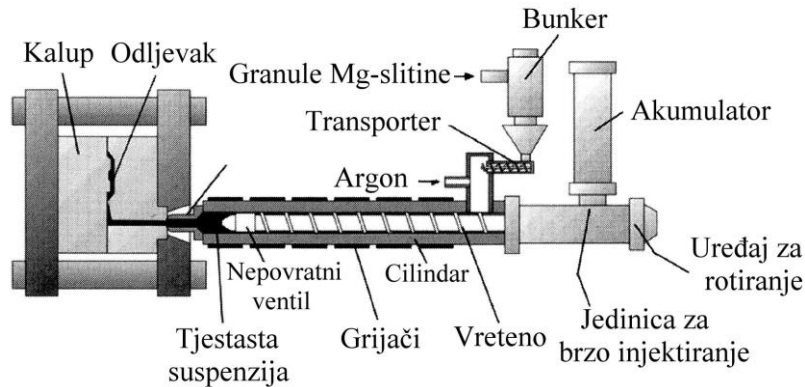


Slika 13.25. a) shematski prikaz SEED postupka, b) stabilni uložni materijal (tjestasta suspenzija) kojim se može rukovati kao krutim materijalom [114]

Rotiranje posude traje od 30 do 60 s ovisno o masi odljevka (1 do 6 kg), nakon čega slijedi kratka faza mirovanja (5 do 10 s). Potom se otvara ventil na dnu posude čime se uklanja preostala talina. Ta faza procesa traje 30 do 45 s, a ukupna količina ispuštene taline iz posude može dostići 10 do 30 %. Zbog uklanjanja tekuće faze postoje određene sumnje u ispravnost ovog postupka koje su povezane s činjenicom da se kemijski sastav taline prije ulijevanja u posudu može bitno razlikovati od kemijskog sastava gotove slitine, odnosno odljevka. Stabilni uložni materijal, odnosno tjestasta suspenzija (slika 13.25b) vadi se iz posude tako da se posuda okrene i potom prenosi u uljevnu komoru stroja za visokotlačno lijevanje.

13.3.4.3 Tiksooblikovanje

Tiksooblikovanje (engl. *Thixomolding*) je komercijalni postupak za oblikovanje magnezijских slitina u djelomično rastaljenom stanju (slika 13.26) [114, 122, 123, 126]. Kod ovog postupka ne primjenjuje se ponovno zagrijavanje uložnog materijala kao kod tiksolijevanja. Tjestasta metalna suspenzija proizvodi se neposredno prije injektiranja u kalup.



Slika 13.26. Shematski prikaz procesa tiksolijevanja [114]

Uljevna komora konvencionalnog stroja za visokotlačno lijevanje zamijenjena je cilindričnim bubnjem promjera 70 mm i dužine 2 m unutar kojeg se nalazi vreteno koje uložni materijal podvrgava smičnoj deformaciji. Cilindrični bubanj izvana se zagrijava pomoću grijača, što rezultira postojanjem nekoliko zona zagrijavanja. Dodatni grijač postavljen je na otvoru za injektiranje u blizini kalupa. Temperatura kalupa iznosi ~ 200 °C.

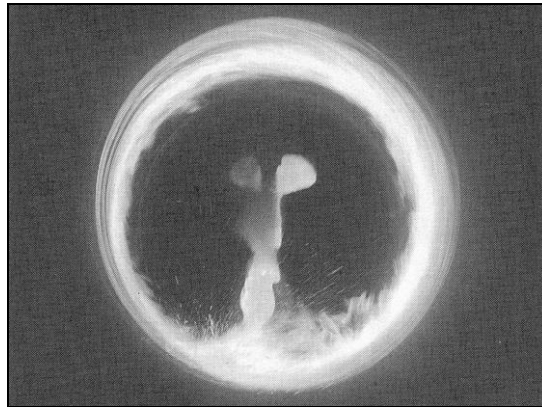
Krute granule magnezijске slitine promjera 2 do 5 mm ubacuju se u bunker koji se nalazi iznad cilindričnog bubnja. Potom se taj materijal uvodi u cilindrični bubanj, zagrijava i podvrgava smičnoj deformaciji primjenom vretena, čime se dobiva tjestasta metalna suspenzija sa niskim udjelom krute faze (< 30 %). Tijekom tog koraka metal je zaštićen od oksidacije atmosferom inertnog plina (argona) u cilindričnom bubnju. Kad se ispred kalupa akumulira dovoljna količina tjestaste suspenzije, povisuje se brzina vretena u cilindričnom bubnju i provodi injektiranje suspenzije u kalup.

Da bi se ostvarila pravilna kontrola procesa preferira se upotreba slitina sa širokim intervalom skrućivanja. Novije varijante ovog postupka primjenjuju miješanje granula različitih magnezijevih slitina koje se potom zajedno istiskuju. Jedan od takvih postupaka je *ThixoBlends* postupak kod kojeg se granule dviju različitih slitina miješaju u bunkeru i potom istiskuju.

Tiksooblikovanje može se smatrati glavnim konkurentnom uređajima za visokotlačno lijevanje s toplom komorom. Posebno je pogodan za lijevanje tankostjenih odljevaka manjih ili srednjih veličina od magnezijских slitina.

14. PROIZVODNJA ODLJEVAKA CENTRIFUGALNIM LIJEVANJEM

Centrifugalno lijevanje je proces u kojem se tekući metal ulijeva u horizontalno ili vertikalno postavljen kalup koji rotira [16, 32, 127 – 129]. Zbog centrifugalne sile nastale rotacijom kalupa, talina se potiskuje prema unutarnjoj površini kalupa i raspoređuje po njoj (slika 14.1). Skrućivanje započinje odmah čim se tekući metal raspodijeli po unutarnjoj površini kalupa. Kontinuiranim ulijevanjem taline u kalup povećava se debljina odljevka.



Slika 14.1. Ulijevanje i raspodjela tekućeg metala u horizontalno postavljenom kalupu koji rotira [16]

Centrifugalno lijevanje prvenstveno se upotrebljava za proizvodnju odljevka cilindričnog i cjevastog oblika. Takvi odljevci odliveni centrifugalnim lijevanjem u trajni kalup imaju viša mehanička svojstva od odljevaka proizvedenih klasičnim načinom lijevanja, tj. u statične kalupe, zbog sitnozrnate strukture koja potječe od samog procesa. Potrebno je naglasiti da se centrifugalnim lijevanjem mogu proizvoditi i puni odljevci, a ne samo odljevci cilindričnog i cjevastog oblika. U tom slučaju tlak koji potječe od rotacije kalupa omogućuje da se odliju tanji odljevci i postignu fini detaljni na površini.

Centrifugalno lijevani odljevci imaju jednaka svojstva u svim smjerovima, što nije slučaj kod kovanih predmeta. Korištenjem glavnih prednosti koje daje centrifugalna sila rotirajućeg kalupa mogu se proizvesti odljevci visoke kvalitete i kompaktnosti jer imaju visoku gustoću, ne sadrže okside, plinove i ostale nemetalne uključke. Ekonomska prednost centrifugalnog lijevanja je odsutnost ili minimalizacija uljevnog sustava i pojila.

Svi metalni koji se mogu lijevati klasičnim načinom lijevanja, tj. u statične kalupe mogu se lijevati i centrifugalno, npr. ugljični i legirani čelici, visokolegirani korozijski i toplinski otporni čelici, sivi lijev, nodularni lijev, visokolegirani željezni ljevovi, nehrđajući čelici, aluminijske slitine, bakrene slitine, magnezijske slitine, slitine na bazi nikla i titanove slitine. Pored toga, tim postupkom mogu se lijevati i nemetali, kao što su razne keramike, stakla, plastike i svi ostali materijali koji se mogu prevesti u tekuće stanje i učiniti livljivim.

Za centrifugalno lijevanje upotrebljavaju se jednokratni, polutrajni i trajni kalupi. Odabir vrste kalupa ovisi o obliku odljevka, potrebnom stupnju njegove kvalitete i količini.

Često se željena svojstva odljevka ne mogu postići primjenom samo jedne ljevarske slitine. Centrifugalno lijevanje omogućuje lijevanje kompozitnih odljevaka koji se sastoje od dvije različite kvalitete materijala. Najprije se lijeva vanjski dio odljevka ulijevanjem prve taline, a nakon njenog skrućivanja u kalup se ulijeva talina drugog materijala.

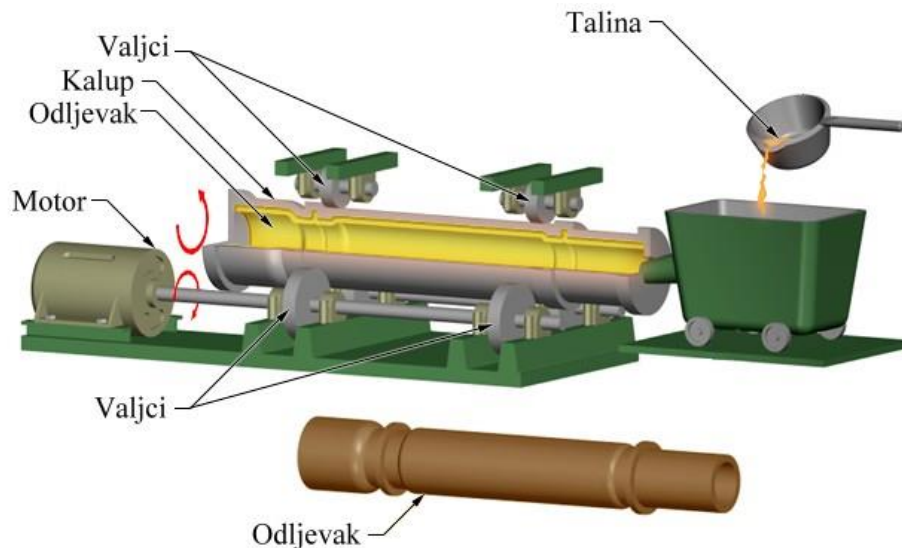
Postupci centrifugalnog lijevanja mogu se svrstati u tri kategorije [127]:

- **pravo centrifugalno lijevanje,**
- **polucentrifugalno lijevanje i**
- **lijevanje centrifugiranjem.**

14.1 Pravo centrifugalno lijevanje

Pravo centrifugalno lijevanje upotrebljava se za proizvodnju cilindričnih i cjevastih odljevaka lijevanjem taline u kalup koji rotira oko svoje horizontalne ili vertikalne osi [128, 129]. Zbog toga se razlikuje horizontalno i vertikalno centrifugalno lijevanje. Za proizvodnju odljevaka tim postupcima nisu potrebne jezgre. Unutarnji promjer, odnosno unutarnja površina takvih odljevaka uvijek ima kružni poprečni presjek, a vanjski oblik ovisi o obliku unutrašnjosti kalupa. Unutarnji promjer odljevaka može biti jednak po čitavoj dužini ili može biti konusan ovisno o tome da li kalup rotira oko svoje horizontalne ili vertikalne osi. Konusnost se javlja kod odljevaka odlivenih u vertikalno postavljene kalupe jer se centrifugalnoj sili suprotstavlja gravitacijska sila.

Horizontalno centrifugalno lijevanje. Kod ovog postupka tekući metal ulijeva se u kalup koji je postavljen horizontalno i rotira oko svoje horizontalne osi (slika 14.2) [128]. Za horizontalno centrifugalno lijevanje upotrebljavaju se jednokratni pješčani ili trajni kalupi ovisno o geometriji, količini odljevaka i svojstvima metala koji se lijeva.



Slika 14.2. Shematski prikaz horizontalnog centrifugalnog lijevanja [130]

Jednokratni kalupi često se upotrebljavaju ako se proizvodi manji broj odljevaka. Obično se izrađuju od svježe kalupne mješavine ili kemijski vezanih mješavina (npr. sa fenolnim vezivima). Kalupna šupljina kod takvih kalupa premazuje se odgovarajućim premazom da se poveća čvrstoća površine kalupa i smanji erozija tekućim metalom te dobije glatka površina odljevaka.

Trajni kalupi koji se primjenjuju za horizontalno centrifugalno lijevanje obično se nazivaju kokilama i najčešće se izrađuju od čelika, bakra i grafita. Čelični kalupi

upotrebljavaju se za velikoserijsku proizvodnju te u slučaju ako se lijevaju slitine koje zahtijevaju specifične uvjete skrućivanja. Osjetljivi su na toplinske šokove zbog čega se primjenjuju cirkonski ili neki drugi keramički premazi koji se nanose špricanjem prije sljedećeg ulijevanja taline. Osim toga, premazi imaju važnu ulogu u reguliranju brzine skrućivanja. Temperatura kalupa mora biti u optimalnom području kad se nanosi prevlaka da bi se ostvarilo odgovarajuće prijanjanje prevlake na kalup. Zbog toga se kalupi izvana hlade vodom da bi se održala optimalna temperatura. Trajni kalupi od bakra ponekad se upotrebljavaju jer imaju visoku toplinsku vodljivost. Zbog niskih troškova grafitni kalupi mogu biti ekonomski prihvatljiva alternativa za jednokratne pješčane kalupe u slučaju proizvodnje male količine odljevaka. Primjenjuju se centrifugalno lijevanje bronci sa visokim udjelom bakra, mjeđi sa visokim udjelom fosfora te ostalih bakrenih slitina. Grafit ima izvrsnu toplinsku vodljivost i otpornost na toplinski šok te se lako strojno obrađuje. Pored toga, ne reagira s većinom rastaljenih metala. Pažnju treba obratiti da se temperatura kalupa održava ispod temperature na kojoj dolazi do oksidacije grafita.

Tekući metal ulijeva se u kalup na jednom kraju, na oba kraja ili kroz kanal promjenjive dužine. Intenzitet ulijevanja ovisi o veličini odljevka koji se proizvodi i metalu koji se ulijeva. Presporo ulijevanje rezultira stvaranjem preklopa i plinske poroznosti. Prebrzo ulijevanje usporava skrućivanje te dovodi do stvaranja uzdužnih pukotina na odljercima.

Temperatura lijevanja ovisi o slitini koja se lijeva, veličini kalupa i fizikalnim svojstvima kalupa. U slučaju lijevanja slitina na osnovi željeza, potrebna je temperatura lijevanja koja je za 50 do 100 °C viša od likvidus temperature slitine. Visoke temperature lijevanja zahtijevaju više brzine rotacije kalupa da bi se izbjeglo klizanje između tekućeg metala i kalupa uslijed čega se tekući metal ne giba jednakom brzinom kao kalup. Niske temperature lijevanja mogu dovesti do stvaranja preklopa i plinske poroznosti u odljevku. Pored toga, treba imati na umu da temperatura lijevanja utječe na intenzitet skrućivanja odljevka.

Da bi se kalup ravnomjerno ispunio, centrifugalna sila treba biti veća od sile gravitacije. Centrifugalna sila ovisi o broju okretaja kalupa. Za orijentaciono određivanje broja okretaja kalupa u slučaju lijevanja odljevke kod kojih je $r_{maks.} : r_u = \sim 1,15$ upotrebljava se sljedeći izraz [32]:

$$n = \frac{k}{r_{maks.}} \quad (14.1)$$

gdje je n – broj okretaja kalupa u minuti, k – koeficijent koji ovisi o gustoći slitine koja se lijeva, $r_{maks.}$ – najveći polumjer odljevka (cm) i r_r – unutarnji polumjer odljevka (cm). Vrijednosti koeficijenta k za neke slitine prikazane su u tablici 14.1.

Tablica 14.1. Vrijednosti koeficijenta k [32]

Slitina	Koeficijent k
Čelični lijev	2150
Sivi lijev	2000
Aluminijske slitine	2600 do 3600
Mjed	2000 do 2200
Olovna bronca	1900
Kositrena bronca	2300 do 2800

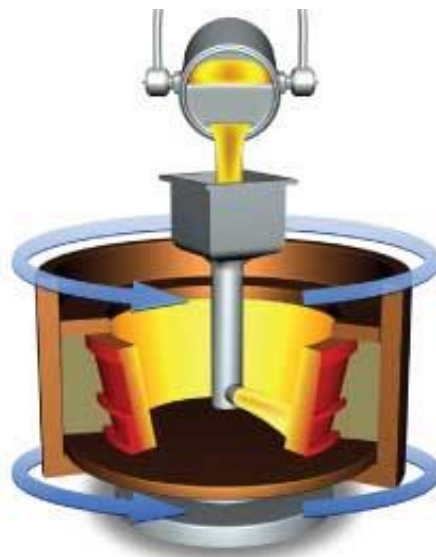
Općenito gledano, kalup rotira brzinom koja stvara centrifugalnu silu koja je 75 do 120 puta veća od sile gravitacije. Za vrijeme ulijevanja tekućeg metala u kalup, kalup rotira

brzinom koja je dovoljna da se tekući metal potisne na stijenke kalupa. Kad tekući metal dosegne drugi kraj kalupa, povećava se brzina rotacije. Brzina rotacije održava se konstantnom određeno vrijeme nakon ulijevanja. To vrijeme ovisi o vrsti kalupa, metalu koji se lijeva i zahtijevanoj debljini stijenke odljevka. Preniska brzina rotacije kalupa može dovesti do klizanja između tekućeg metala i kalupa, što rezultira lošom površinom odljevka. Prevelika brzina rotacije može dovesti do vibracija i stvaranja pukotina.

Hlađenje i skrućivanje odljevaka odlivenih u trajne kalupe odvija se usmjereno od vanjske prema unutarnjoj površini. Zbog takvog načina skrućivanja moguće je proizvesti visokokvalitetne odljevke bez grešaka, posebno onih grešaka koje potječu od nekompensiranog smanjenja volumena tijekom skrućivanja, odnosno volumnog stezanja koje su najčešći tip grešaka kod klasičnog lijevanja u statične kalupe. Nečistoće, tj. nemetalni uključci i plinovi zbog svoje male gustoće potisnuti su na unutarnju površinu odljevka i mogu se ukloniti strojnom obradom.

Centrifugalno lijevanje u horizontalno postavljene kalupe uglavnom se upotrebljava za proizvodnju odljevaka koji imaju velik omjer dužine i promjera ili imaju jednoličan unutarnji promjer. To uključuje cijevi, košuljice cilindara i sve druge cilindrične ili cjevaste odljevke jednostavnog oblika.

Vertikalno centrifugalno lijevanje. Kod ovog postupka tekući metal ulijeva se u kalup koji je postavljen vertikalno i rotira oko svoje vertikalne osi (slika 14.3) [129]. Uglavnom se primjenjuje za odljevke koji imaju mali omjer dužine i promjera (osim u slučaju vertikalnog lijevanja jako dugačkih valjaka) ili su koničnog oblika. Obično je maksimalna dužina odljevka dva puta veća od njegovog vanjskog promjera. Spektar odljevaka koji se mogu lijevati centrifugalno u vertikalno postavljene kalupe je znatno veći, jer se mogu odliti odljevci koji nemaju cilindričan, pa čak ni simetričan oblik. Za vertikalno centrifugalno lijevanje upotrebljavaju se jednokratni pješćani ili trajni kalupi ovisno o geometriji, količini odljevaka i svojstvima metala koji se lijeva.



Slika 14.3. Shematski prikaz vertikalnog centrifugalnog lijevanja [131]

Jednokratni kalupi obično se izrađuju od svježe kalupne mješavine uz upotrebu kalupnika (najbolje kružnog oblika). Kod takvih kalupa obično treba započeti lijevanje tekućeg metala pri niskoj brzini rotacije kalupa. Kad se kalup djelomično ili potpuno ispuni talinom, brzina rotacije povećava se do potrebne. Kalupna šupljina kod takvih kalupa

premazuje se odgovarajućim premazom da bi se povećala čvrstoća površine kalupa i smanjila erozija tekućim metalom te dobila glatka površina odljevka. Prekomjerna erozija kalupa ne pojavljuje se zbog relativno male brzine rotacije kalupa.

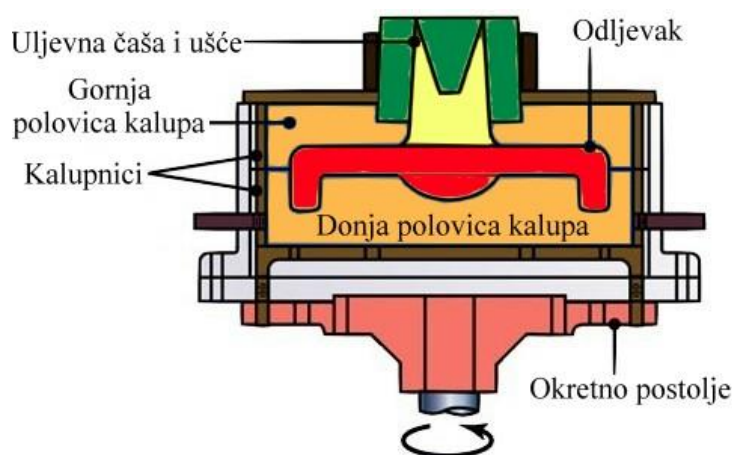
Trajni kalupi koji se primjenjuju za vertikalno centrifugalno lijevanje obično se izrađuju od niskougličnog čelika ili grafita. Čelični kalupi brzo odvedu toplinu, zbog čega se poboljšavaju svojstva odljevaka. Osjetljivi su na toplinske šokove zbog čega se primjenjuju cirkonski ili neki drugi keramički premazi koji se nanose špricanjem. Osim toga, premazi imaju važnu ulogu u reguliranju brzine skrućivanja. Temperatura čeličnih kalupa treba se održavati u temperaturnom području od 150 do 260 °C, zbog čega se izvana hlade vodom. Hlađenje se obično aktivira odmah nakon završetka ulijevanja tekućeg metala i provodi se dovoljno dugo da bi se nakon izvlačenja odljevka iz kalupa, a prije ponovnog ulijevanja taline za novi odljevak, mogao nanijeti premaz na kalup u pravilnom temperaturnom području koje omogućuje odgovarajuće prijanjanje prevlake na kalup. Grafitni kalupi lako se strojno obrađuju što omogućuje izradu kalupnih šupljina raznih oblika.

Brzina rotacije treba biti tako odabrana da se na unutarnjem promjeru odljevka dobije centrifugalna sila koja je 75 puta veća od sile gravitacije. S povećanjem unutarnjeg promjera odljevka smanjuje se potrebna brzina rotacije kalupa. To znači da bi u slučaju lijevanja odljevka čiji unutarnji promjer iznosi npr. 125 mm brzina rotacije kalupa trebala bi iznositi 1000 o/min. Ako unutarnji promjer odljevka iznosi 1250 mm, brzina rotacije kalupa trebala bi iznositi ~ 320 o/min.

Vertikalno centrifugalno lijevanje u trajne kalupe zahtijeva da temperatura tekućeg metala bude viša za ~ 40 °C nego u slučaju lijevanja tog istog metala u statične jednokratne kalupe. Na početku ulijevanja taline u kalup intenzitet ulijevanja treba biti visok za se spriječiti stvaranje hladnih zavara.

14.2 Polucentrifugalno lijevanje

Polucentrifugalno lijevanje omogućuje proizvodnju odljevaka različitih oblika lijevanjem u kalup koji rotira oko svoje vertikalne osi (slika 14.4) [127].



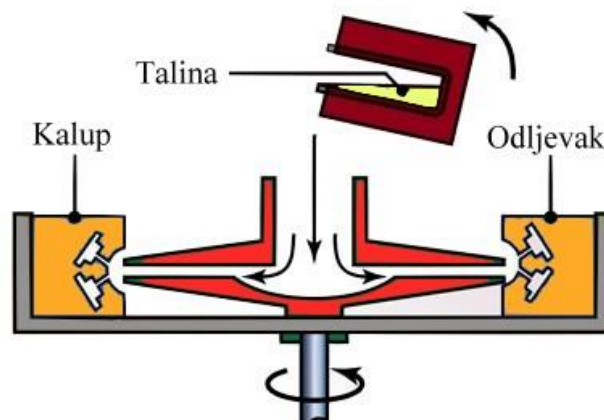
Slika 14.4. Shematski prikaz polucentrifugalnog lijevanja [127]

Kalup definira vanjski i unutarnji oblik odljevka. Za formiranje šupljina određenog oblika u odljevku upotrebljavaju se jezgre. Odljevci koji se teško mogu proizvesti lijevanjem u statične kalupe često se ekonomično proizvode polucentrifugalnim lijevanjem, jer zbog

djelovanja centrifugalne sile tekući metal pod tlakom napaja odljevak tijekom skrućivanja i na taj način efikasno kompenzira smanjenje volumena, odnosno volumno stezanje odljevka tijekom skrućivanja. Time se značajno povećava iskorištenje tekućeg metala i kompletno popunjava kalup, što u konačnici rezultira visokokvalitetnim odljercima u kojima nema praznina i poroznosti. Polucentrifugalnim lijevanjem mogu se odliti tanje stijenke odljevka nego lijevanjem u statične kalupe. Tipični primjeri takvih odljevaka su remenice, zupčanici, kotači, rotor električnih motora itd.

14.3 Lijevanje centrifugiranjem

U postupku lijevanja centrifugiranjem kalupi su raspoređeni oko centralno postavljenog otvora kroz koji se ulijeva tekući metal (slika 14.5) [127].



Slika 14.5. Shematski prikaz lijevanja centrifugiranjem [127]

Svaki kalup je povezan sa centralno postavljenim otvorom. To omogućuje da se istovremeno lijeva više odljevaka. U kalupu se nalazi kalupna šupljina odgovarajućeg oblika i uljevni sustav, što omogućuje proizvodnju odljevaka različitih oblika. Tekući metal ulijeva se u centralno postavljeni otvor. Cijeli sustav rotira oko vertikalne osi, a centralni otvor nalazi se u centru rotacije. Zbog rotacije nastaju centrifugalne sile koje potiskuju tekući metal iz centralnog otvora prema kalupima. Kada se kalupi potpuno napune talinom sustav i dalje nastavlja s rotacijom i odvija se skrućivanje odljevaka. Rotiranje se zaustavlja kada se odljevci skrutnu. Tipični odljevci proizvedeni ovim postupkom lijevanja su: kućišta ventila, poluge, nosači itd.

15. LITERATURA

- [1] ..., A Modern Casting Staff report, 47th Census of World Casting Production, Modern Casting 103(2013) 12, 18– 23.
- [2] <http://www.worldsteel.org>
- [3] J. Jorstad, M. B. Krusiak, J. O. Serra, V. L. Fay, Aggregates and Binders for Expendable Molds, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 528 - 548.
- [4] M. Goodway, History of Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 15 – 23.
- [5] T. E. Prucha, D. Twarog, R. W. Monroe, History and Trends of Metal Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 3 – 15.
- [6] www.wikipedia.org
- [7] M. Trbižan, Lito železo – material industrijske revolucije, Proceedings book of 8th International Foundry Conference, Opatija, 5. – 7. lipanj 2008., 02-2008.
- [8] K. Roesch, E. Lindemann, Gescichtliche Darstellung der Schmelz- und Formtechnik im Deutschen Werkzeugmuseum Remscheid-Hasten, Giesserei 57(1970) 26, 826 – 828.
- [9] H. Wübbenhorst, Zum frühen Bronzeuß in Asien, Ägypten und Europa, Giesserei 68(1981) 25, 751 – 755.
- [10] W. W. Krysko, J. Krysko, Beitrag zur Geschichte der Gießereitechnologie, Giesserei 70(1983) 26, 692 – 698.
- [11] M. Horáček, Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings book of 8th International Foundry Conference, Opatija, 5. – 7. lipanj 2008., 03-2008.
- [12] V. Muljević, I. Rabljanin – Ljevač zvona i topova, JAZU i Skupština općine Rab, Rapski zbornik, Zagreb, 1987, 301 – 312.
- [13] J. R. Brown, Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, England, 2001.
- [14] D. M. Stefanescu, Classification of Ferrous Casting Alloys, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 627 – 628.
- [15] ..., Shape Casting of Steel, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008. 926 – 948.
- [16] ... Steel Castings Handbook, Sixth Edition, ed.: M. Blair, T. L. Stevens, Steel Founders' Society of America and ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.
- [17] D. Poweleit, Steel Castings Properties, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 949 – 974.
- [18] J. M. Svoboda, Plain Carbon Steels, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 702 – 714.
- [19] ASM Review Committee on Steel Castings, Steel Castings, chapter in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 1, Properties and Selection: Irons and Steels, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978, 377 - 402.
- [20] Lj. Ivanić, Livarstvo, Tehnički fakultet u Boru, Bor, 2000.
- [21] J. M. Svoboda, Low-Alloy Steels, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 715 – 721.
- [22] J. M. Svoboda, High-Alloy Steels, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 722 – 735.

- [23] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [24] M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, Canada, 2004.
- [25] ..., Malleable Iron, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 686-697.
- [26] C. J. van Ettinger, Malleable Iron Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 884 - 895.
- [27] M. Branković, S. Marković, Livene legure železo-ugljenik, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1980.
- [28] R. B. Gundlach, High-Alloy White Irons, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 678 - 685.
- [29] R. B. Gundlach, White Iron and High-Alloyed Iron Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 896 – 903.
- [30] G. Laird, R. Gundlach, K. Röhrig, Abrasion Resistant Cast Iron Handbook, American Foundry Society, Des Plaines, Illinois, 2000.
- [31] J. F. Major, Aluminum and Aluminum Alloy Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 1059 – 1084.
- [32] I. Katavić, Ljevarstvo, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1983.
- [33] J. R. Brown, Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, England, 1999.
- [34] <http://www.standoutcars.com/home/new-gm-lt1-engine-set-to-power-next-corvette>
- [35] <http://boutique.lr-performance.net/composants-moteur-evo7/646-culasse-ams-evo7-evo8-evo9.html>
- [36] <http://shop.mr-gasket.com/engine-components-and-accessories/oil-accessories/aluminum-oil-pan-sbc-1955-79.html>
- [37] <http://www.gasgoo.com/auto-images/engine-parts-354/1067939.html>
- [38] http://www.ecstuning.com/Volkswagen-Golf_R--2.0T/Suspension/ES2612300/
- [39] <http://www.gfau.com/content/gfau/com/en/products-and-solutions/passenger-car.html>
- [40] <http://www.tunershop.com/Borbet/>
- [41] K. Sadayappan, L. Whiting, M. Sahoo, H. T. Michels, Cooper and Copper Alloy Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 1083 – 1094.
- [42] F. E. Goodwin, Zinc and Zinc Alloy Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 1095 – 1099.
- [43] K. Savage, Magnesium and Magnesium Alloys, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 1100– 1113.
- [44] S. F. Carter, Cupolas, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 383 – 392.
- [45] W. L. Powell, A. P. Druschitz, Cupola Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 99 – 107.
- [46] ..., Cupola Handbook, 6th Edition, American Foundry Society, USA, 2006.
- [47] www.dueker.de
- [48] R. Y. Perkul, Induction Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 368 – 374.
- [49] R. Y. Perkul, Induction Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 108 – 115.
- [50] ..., Principles of Induction Melting, American Foundry Society, Cast Metals Institute, USA; 2005.

- [51] N. Wukovich, Electric Arc Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 356 – 368.
- [52] ..., Electric Arc Furnace Melting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 87 – 98.
- [53] J. A. T. Jones, B. Bowman, P. A. Lefrank, Electric Furnace Steelmaking, chapter in The Making, Shaping and Treating of Steels, 11th Edition, The AISE Steel Foundation, 1998., 525 – 660.
- [54] ASM Committee on Carbon and Alloy Steels, Steels and Steelmaking Practice, chapter in Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 1, Properties and Selection: Irons and Steels, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1978, 109 – 116.
- [55] E. Hot, Elektrotermička konverzija energije, Svetlost, Sarajevo, 1985.
- [56] Z. Pašalić, Metalurgija čelika, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica, Zenica, 2002.
- [57] A. Kearney, Reverberatory Furnaces and Crucible Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 374 – 383.
- [58] D. White, M. Reeves, P. Campbell, Reverberatory and Stack Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 160 – 169.
- [59] G. Giles, Crucible Furnaces, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 155 – 159.
- [60] A. L. Suschil, L. A. Plutshack, Gating Design, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 589 - 597.
- [61] S. I. Karsay, The Practical Foundryman's Guide to Feeding and Running Grey-, CG – and SG Iron Castings, Ferrous Casting Centre Ltd., Republic of South Africa, 1985.
- [62] ..., Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [63] ..., Basic Principles of Gating, American Foundry Society, USA, 2005.
- [64] ..., Ductile Iron – The Essentials of Gating and Riser Design, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Kanada, 2000.
- [65] S. I. Karsay, Ductile Iron III, Gating and Riser Design, QIT –Fer Et Titane Inc, Kanada, 1981.
- [66] ..., The Basic Principles of Fluid Dynamics Applied to Running Systems of Castings, Institute of Cast Metals Engineers, England, 2007.
- [67] ..., GFD DISA 230-B, Sand Moluding System, Application Manual, Georg Fischer DISA, Denmark, 1999.
- [68] www.foseco.com
- [69] www.magmaflow.com
- [70] R. Elliott, Cast Iron Technology, Butterworth & Co, England, 1988.
- [71] ..., Basic Principles of Riser Design, American Foundry Society, Cast Metals Institute, USA, 2000.
- [72] L. A. Plutshack, A. L. Suschil, Riser Design, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 577 - 588.
- [73] B. Ule, Ulivanje in napajanje, Livarski vestnik 31(1984) 3-4, 65 – 130.
- [74] C. Veerabhadraiah, R. Gopal, Riser Design of Steel Castings, The British Foundryman 68(1975) 6, 184 – 192.
- [75] [http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexikon/?tx_contagged\[source\]=default&tx_contagged\[uid\]=4649&cHash=c57d55d65e81ea29ca9ef082176e253b](http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexikon/?tx_contagged[source]=default&tx_contagged[uid]=4649&cHash=c57d55d65e81ea29ca9ef082176e253b)
- [76] M. Galić, Ljevarski rječnik, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 1999.

- [77] J. L. Jorstad, Shape Casting Processes – An Introduction, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 485 – 487.
- [78] R. C. Voigt, Patterns and Patternmaking, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 488 – 496.
- [79] C. D. Nelson, J. Jorstad, Slurry Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 617 – 633.
- [80] R. A. Horton, Investment Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 646 – 661.
- [81] R. Donahue, K. Anderson, Lost Foam Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 640 – 645.
- [82] F. Unkić, Z. Glavaš, Z. Kivač, Inovativni postupci proizvodnje metalnih odljevaka u jednokratnim kalupima, Ljevarstvo 46(2004) 4, 95-101.
- [83] ..., Replicast Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 662 – 664.
- [84] B. V. Smith, Introduction – Expendable Mold Processes with Permanent Patterns, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 525 - 527.
- [85] M. Galić, T. Grgasović, L. Karbić, M. Komadina, S. Šestek, F. Tomić, V. Žura, Kalupljenje – II dio, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1979.
- [86] M. Galić, T. Grgasović, L. Karbić, M. Komadina, S. Šestek, F. Tomić, V. Žura, Kalupljenje – I dio, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1979.
- [87] M. Branković, Tehnologija livničkih kalupa, Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1982.
- [88] D. F. Hoyt, Svježa kalupna mješavina (sastav, dodaci, svojstva, ispitivanje i kontrola procesa), Ljevarstvo 38(1996) 3, 67-78.
- [89] I. Budić, Osnove tehnologije kalupljenja, Jednokratni kalupi, I. dio, II. izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski Brod, 2010.
- [90] M. Galić, Proizvodnja metalnih odljevaka, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2008.
- [91] Green Sand Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 549 - 566.
- [92] www.disagroup.com
- [93] http://en.wikipedia.org/wiki/Sand_casting
- [94] G. J. Maurer, Shakeout and Core Knockout, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 502 – 506.
- [95] ..., No-Bake Sand Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 567 - 580.
- [96] ..., Ein Känguru sorgt für hohne Formsand – Mischleistungen, Giesserei 94(2007) 8, 126.
- [97] S. McIntyre, Shell Molding and Shell Coremaking, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 598 - 616.
- [98] J. J. Archibald, R. L. Smith, Resin Binder Processes, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 214 – 221.
- [99] P. Mikkola, G. Scholl, Low-Pressure Countergravity Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 709 – 711.
- [100] ..., No-Bond Sand Molding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 628 - 633.
- [101] J. Thielke, Automatic Pouring Systems, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 497 – 501.

- [102] R. L. Lewis, Y. L. Chu, Foundry Automation, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 566 – 573.
- [103] J. H. Carpenter, Blast Cleaning of Castings, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 506 – 520.
- [104] ..., Coremaking, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 581 – 597.
- [105] D. Tyler, Permanent Mold Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 689 – 699.
- [106] <http://www.custompartnet.com/wu/permanent-mold-casting>
- [107] G. G. Woycik, G. Peters, Low-Pressure Metal Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 700 – 708.
- [108] C. E. West, T. E. Grubach, Permanent Mold Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 275-286.
- [109] R. J. McInerney, Cold Chamber Die Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 724 – 731.
- [110] L. J. D. Sully, Die Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 286-295.
- [111] D. L. Twarog, Die Casting Tooling, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 734 – 746.
- [112] F. E. Goodwin, Hot Chamber Die Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 719 – 723.
- [113] E. J. Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, John Wiley & Sons, Inc. New York, 2003.
- [114] H. Kaufmann, P. J. Uggowitzer, Metallurgy and Processing of High-Integrity Light Metal Pressure Castings, Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2007.
- [115] J. L. Dorcic, S.K. Verma, Squeeze Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 323-327.
- [116] F. Unkić, Z. Glavaš, Z. Zovko-Brodarac, Suvremeni postupci visokotlačnog lijevanja metala, Ljevarstvo 47(2005) 1, 3 – 15.
- [117] H. Kaufman, Endabmessungsnahes Gießen: Ein Vergleich von Squeeze-casting und Thixocasting, Giesserei 81(1994) 11, 342 - 348.
- [118] R. Zalba, K. Palan, J. Čech, Local Squeeze Casting – a Way to The Improvement of Utility Properties of Al Alloy Castings, Slévárství 52(2004) 9, 368 – 370.
- [119] L. Xiao, K. Anzai, E. Niyama, K. Nakahara, Reducing Shrinkage Defects at Hot Spot in Aluminium Squeeze Castings, International Journal of Cast Metals Research, 12(1999)11, 197 - 203.
- [120] T. McMillin, CAE Opens New Frontiers in Casting Design, Modern Casting 93(2003)8, 31 – 34.
- [121] M. P. Kenney, J. A. Courtois, R. D. Evans, G. M. Farrior, C. P. Kyonka, A. A. Koch, Semisolid Metal Casting and Forging, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988., 327-338.
- [122] A. de Figueredo, Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, 2001.
- [123] Q. Y. Pan, D. Apelian, J. Jorstad, Semisolid Casting – Introduction and Fundamentals, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 761 – 763.
- [124] J. Hensch, Thixocasting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 764 – 772.
- [125] Q. Y. Pan, D. Apelian, J. Jorstad, Rheocasting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 773 – 776.

- [126] R. D. Carnahan, Thixomolding, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 777 – 782.
- [127] S. Wei, Centrifugal Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 667 – 673.
- [128] Y. V. Murty, Horizontal Centrifugal Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 674 – 679.
- [129] Y. V. Murty, Vertical Centrifugal Casting, chapter in ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 680 – 686
- [130] <http://www.custompartnet.com/wu/centrifugal-casting>
- [131] <http://www.metaltek.com/divisions/wisconsin-centrifugal/centrifugal-casting-process.html>