

LJEVARSTVO, tehnologija oblikovanja metalnih predmeta lijevanjem rastaljenog metala (litine) u kalupe da bi se tako dobio konačan proizvod — odjlevak. Ljevarstvo obuhvaća sve proizvodne operacije potrebne da se od sirovine izradi gotov odjlevak. Lijevanje se mogu, uz primjenu jednostavnih i ekonomičnih postupaka, dati metalima najrazličitiji vrlo složeni oblici, npr. s unutrašnjim i vanjskim šupljinama. Primjena lijevanih dijelova u strojogradnji znatno pojednostavljuje konstrukciju. Mnogi dijelovi strojeva, koji bi se inače morali izraditi od više komada, mogu se odlisti u jednom komadu. Lijevanje se primjenjuje onda kad predstavlja najekonomičniji način proizvodnje (npr. za velika i masivna kućišta strojeva komplikiranih oblika), a posebno za dijelove koje je na drugi način nemoguće proizvesti (npr. za dijelove s unutrašnjim kanalima nepravilna oblika). Lijevanje je obično ekonomičnije od ostalih postupaka za serijsku proizvodnju dijelova komplikiranog oblika.

Lijevanje metala postalo je moguće tek nakon što je čovjek otkrio metale, izradio peć za njihovo taljenje i pronašao prikladan materijal za izradbu kalupa. Lijevanje bakra počinje u trećem tisućljeću prije naše ere; bakar je prema tome najstariji metal koji se oblikovalo lijevanjem. Loša ljevačka svojstva bakra (visoko talisti i sklonost upijanju plinova) prevladana su upotrebom bronce kao ljevački znatno pogodnijeg materijala. Tehnologija lijevanja bronce osobito se razvila u starom vijeku, a iz tog vremena početkom mnogi upotrebljni i umjetnički brončani odjeljci. U srednjem vijeku od bronce su se lijevale i topovske cijevi, različita oružja i oruđa te drugi predmeti. U sredozemnom kulturnom području razvila se, osim lijevanja bronce, i tehnika lijevanja mjeđi (slitine bakra s cinkom). Od mjeđi su se lijevali najčešće ukrasni predmeti (npr. svjećnjaci i svjetiljke). Kasnije se mjeđ počela primjenjivati i u strojogradnji.

Već prije naše ere Kinezzi su lijevali odjeljke od sivog ljeva, dok je u Evropi proizvodnja sivog ljeva počela tek u srednjem vijeku. Čelik je bio poznat već od ranije, ali proizvodnja čeličnog ljeva do tada još nije bila moguća. U ognjištima i niskim jamskim pećima dobivala se izravno iz rude ispod vatre od drenovog ugljena gnječava željezna masa, tzv. nado, koja se zatim kovala. Litina na bazi željeza dobivena je kad su u jamskoj peći prirodnji propuh i ručno puhalo zamjenjeni puhalom na mehanički pogon vodom ili parom, pa je veća dobava zraka poboljšala izgaranje u peći i omogućila postizanje viših temperatura. Time je omogućena proizvodnja sivog ljeva. Međutim, prethodno su se morali poboljšati i materijali za kalupe da bi bili otporni prema višim temperaturama lijevanja. Prvi poznati odjeljci od sivog ljeva bile su topovske kugle u XV st. Novo razdoblje u lijevanju sivog ljeva nastupilo je izumom peći za taljenje sirovog gvožđa, tj. kad se litina nije više uljevala u kalupe neposredno iz peći za taljenje rude. U XVII i XVIII st. za taljenje su služile plamene peći, a krajem XVIII st. kupolne peći u kojima je ljevač mogao taliti sirovo gvožđe, lomljevinu, željezne otopatke i drugo. Primjenom tih peći ljevač više nije bio ovisan o sirovu gvožđu iz visoke peći, već je mogao sastav litine podešiti mijenjanjem pojedinih komponenti zasipa.

Žarenje odjeljka bilo je poznato već početkom XVII st. Žarenjem lijeva s bijelim lomom, koji je tvrd, krhak i neobradiv, dobivali su se žilavi odjeljci. U to vrijeme otpočela je i proizvodnja tvrdog ljeva i ljeva za izradbu valjaka. Godine 1851. izliveno je i prvo zvono od čeličnog ljeva. Čelični ljev talio se ranije u grafitnim loncima, dok se sada u tlu svrhu primjenjuju u prvom redu električne peći. Izrada je kalupa za čelični ljev u početku također stvarala poteškoće.

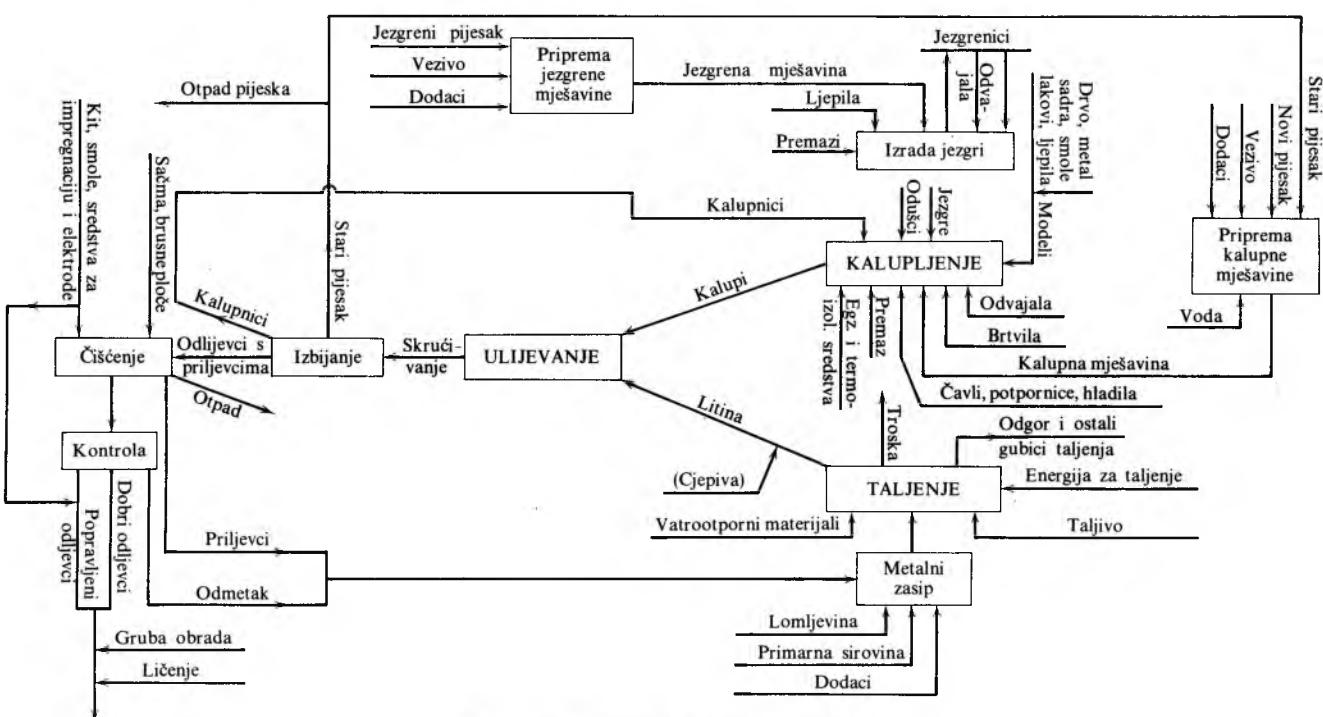
Aluminij se najprije upotrebljavao samo u Cu-Al broncama. Prva aluminjska slitina s bakrom (92% Al, 8% Cu) proizvedena je za vrijeme prvog svjetskog rata. Silumin je proizведен 1920. a silumin-gama 1935. godine. Ljevarstvo je nakon prvog svjetskog rata znatno napredovalo, pa je poboljšanjem kvalitete ljeva i primjenom novih tehnoloških postupaka zauzeo vodeće mjesto u strojogradnji. Metalni odjeljci postali su nenačinjivi elementi u strojogradnji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, u brodogradnji i drugdje.

Proizvodni proces kojim se u ljevaonicama taljenjem sirovine (zasipa) i lijevanjem u kalupe izrađuje gotov odjlevak složen je i sastoji se od niza operacija (sl. 1). Dvije su osnovne operacije: kalupljenje, tj. priprema kalupa za lijevanje rastaljene kovine, i taljenje, tj. priprema litine od metalnog zasipa s dodacima u prikladnim pećima.

KALUPLJENJE

Za izradbu kalupa potrebne su modelne naprave koje se u modelarnici izrađuju od drveta ili drugih materijala. Ako odjlevak ima unutrašnje šupljine, potrebni su jezgrenici za izradbu jezgre kalupa. U kaluparnici se pomoću modelnih naprava i jezgrenika izrađuju kalupi i jezgre koji su većinom od pjeska određene vrste i kvalitete, uz još neke dodatke. Kalupna mješavina sabija se ručno ili pomoću strojeva u metalne okvire, tzv. kalupnike. Osim pješčanih kalupa za jednokratnu upotrebu postoje i kalupi (kokile) za višekratnu primjenu.

Tip peći za taljenje ovisi o vrsti metala koji se želi lijevati. Zasip je sastavljen od primarnih sirovina, sekundarnih sirovina (otpadnog materijala) i dodataka. Pravilnim izborom i dizajniranjem zasipa dobiva se litina željenog sastava. Toplina potrebna za taljenje zasipa stvara se izgaranjem krutog, tekućeg ili plinovitog goriva, a u električnim pećima pretvaranjem električne energije u toplinsku. Ponekad se prije lijevanja dodaju u litinu cjepiva (za poboljšanje strukture materijala). Lijevanje litine u uljevnu šupljinu kalupa provodi se prema jednom od predviđenih postupaka (gravitacijsko, centrifugalno ili tlačno lijevanje). Litina se u kalupu hlađi određenom brzinom, a kad se skruti, dobiva se odjlevak određene strukture. U toku hlađenja pretvara se taljevina postepeno u krutinu, pri čemu dolazi do skrućivanja (koje određuje svojstva ljeva).



Sl. 1. Shema proizvodnog procesa u ljevaonici

stezanja materijala i eventualno do pojave napetosti u materijalu.

Ohladeni se odljevci ručno ili strojno izbiju iz kalupa i očiste od pjeska. S očišćenih odljevaka odvoje se priljevci (kanali uljevnog sustava) koji se kasnije kao tzv. kružni materijal ponovno vraćaju u zasip. Prilikom kontrole odljevci se sortiraju u nekoliko skupina. Djelomično se slabi odljevci popravljaju zavarivanjem, brušenjem, nekom drugom mehaničkom obradom ili toplinskom obradom (pri prikladnoj strukturi). Dobri i popravljeni odljevci grubo se obrađuju, boje i upućuju na dalji postupak. Važnu ulogu u ljevaonicama ima unutrašnji transport kojim se prenose pjesak, kalupi, primarne sirovine, sekundarne sirovine i dodaci, zatim litinu, odljevci, otpad i troska.

Različiti pojmovi iz područja metalurgije i metalografije nisu detaljno objašnjeni, pa za tumačenje takvih pojmoveva v. *Aluminijum*, TE 1, str. 223; v. *Bakar*, TE 1, str. 651; v. *Čelik*, TE 3, str. 43; v. *Elektrokemija*, TE 5, str. 182; v. *Gvožde*, TE 6, str. 309; v. *Metalografija*.

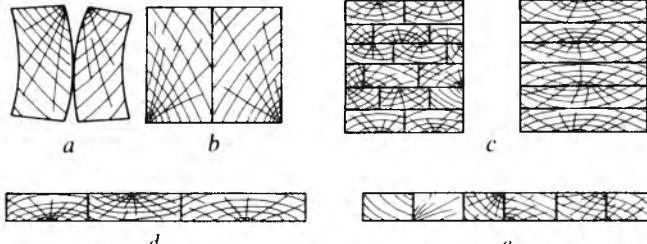
Modelne naprave

Modelne naprave služe za oblikovanje uljevine šupljine kalupa, u koju se ulijeva tekući metal. Uljevna šupljina kalupa za jednokratno lijevanje oblikuje se pomoću modelnih naprava: modela, jezgrenika i šablona. Modeli mogu biti trajni i jednokratni. Trajni se modeli izrađuju od drveta, umjetnih smola, sadre ili metala, a jednokratni od taljivih ili isparljivih tvari.

Prema konstrukciji trajni se modeli mogu svrstati u više grupa. Jednostavnii modeli služe pri izradbi kalupa za jednostavne, pune odljevke (npr. za ploče i štapove); slični su odljevku, jedino su im mjere povećane za dodatak za skupljanje, obradu i skošenje. Modeli s jezgrenicima upotrebljavaju se pri izradbi kalupa za odljevke sa šupljinama. Ti modeli ne sliče sasvim odljevku, jer se na njima nalaze oslonci za ležišta jezgri u kalupu. Modelne ploče služe za serijsku izradbu kalupa, pri strojnom kalupljenju. Modelne šabline mogu biti rotacijske za izradbu rotacijskih tijela, ili povlačene za izradbu ravnih tijela konstantnog presjeka. Skeletni modeli označuju samo konture odljevka i primjenjuju se pri izradbi velikih kalupa.

Pri izradbi modelnih naprava valja paziti na ljevarskotehnološke propise na temelju kojih se bira prikladna vrsta modela. Pri konstrukciji modela treba uzeti u obzir skupljanje lijeva, dodatak za obradu, nagib vertikalnih stijenki odljevka (skošenje radi vađenja modela), zaobljenje bridova i uglova te priljevke. Skupljanje za vrijeme hlađenja ovisi o vrsti i sastavu lijeva, o obliku, veličini i debljini stijenki odljevka i o načinu lijevanja. Za masivne odljevke s debelim stijenkama smanjuje se dodatak za skupljanje. Dodatak za obradu treba predviđjeti samo na plohamo koje će se na odljevku obrađivati. Taj dodatak ovisi o vrsti lijeva, dimenzijama odljevka, načinu izrade kalupa, načinu lijevanja i o položaju pojedinih ploha. Skošenje modelnih ploha određuje se prema dimenzijama odljevka, materijalu i načinu izrade kalupa. Model mora biti tako izrađen da se može bez poteškoća izvući iz kalupa, a da se pri tom kalup ne ošteti.

Trajni modeli izrađuju se od drva, sadre, umjetnih smola i metala. Drveni modeli primjenjuju se uglavnom za trajnu upotrebu. Drvo za izradbu modela ne smije sadržavati više od 12% vlage, i mora biti zdravo, bez pukotina i čvorova. Za



izradbu modela služe mekane vrste drva: smreka, bor, jela ili topola, i tvrde vrste: javor, orah, kruška, trešnja ili bukva. Model može biti jednodijelan ili višedijelan. Obično se upotrebljavaju dvodijelni i višedijelni modeli koji omogućuju izradbu kalupa za složenije odljevke. Budući da modeli dolaze u dodir s vlažnim pjeskom, to se veći drveni modeli moraju izraditi od više slojeva lijepljenih u križ da se sprječi vitoperenje (sl. 2). Osim toga modeli se zaštićuju i premazima boje. Boja ujedno označuje i vrstu lijeva za koji služe kalupi izrađeni tim modelima: crvena boja za sivi lijev, ljubičasta za žilavi lijev, siva za kovasti lijev, plava za čelični lijev, zelena za lijev od lakih obojenih metala, žuta za lijev od teških obojenih metala i crna za jezgrene oslonce. Veoma opterećeni i izloženi dijelovi modela oblažu se limom ili se pojačavaju metalnim ulošcima.

Sadreni modeli primjenjuju se pri strojnom kalupljenju za izradbu manjeg broja kalupa, kad su metalni modeli preskupi. Sadrena se kaša ulje u pješčani kalup gdje se skruti. Tako dobivenom modelu izglača se površina pa se model pričvrsti na modelnu ploču. Da ne bi pukao ili da se pri radu ne bi ošteto, model je ojačan žičanjem jezgrom.

Modeli i jezgrenici od umjetnih smola vrlo su lagani i otporni prema trošenju. Umjetne su smole vrlo žilave, elastične, malo se troše (habaju), a postaju još čvršće ako su pojačane staklenim vlaknima. Za izradbu modela upotrebljavaju se u prvom redu epoksidne i akrilne smole, a rjeđe fenolne i poliesterske smole.

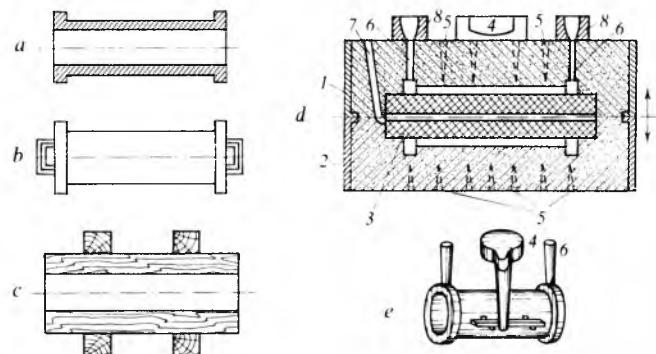
Metalni modeli služe za serijsku strojnu proizvodnju kalupa i pri izradbi kalupa za odljevke s vrlo tankim stijenkama. Izrađuju se od sivog lijeva, mjeđi ili aluminijskih slitina. Metalni su modeli doduše skuplji nego modeli od drva, sadre ili umjetne smole, ali imaju dug vijek trajanja i oblik im točnije odgovara nacrtu. Kalupi izrađeni pomoću metalnih modела imaju pravilnije oblike, oštire bridove i točnije dimenzije, jer se ti modeli zbog svoje glatke površine lakše vade iz nabijenog pjeska. Pri strojnom kalupljenju metalni su modeli pričvršćeni na modelnu ploču.

Jednokratni modeli mogu biti isparljivi i lako taljivi. U posljednje se vrijeme često primjenjuju isparljivi modeli od spužvastog (staničnog) polistirola (92% C i 8% H). U dodiru s rastaljenim metalom polistirol se brzo tali i ispari, a njegove se pare u dodiru sa zrakom zapale.

Izradba kalupa s pomoću lako taljivih modela poznata je još u starom Egiptu, a upotrebljavala se za umjetničke odljevke. Taj se postupak počeo u posljednje vrijeme ponovno primjenjivati za tzv. točni lijev. Za izradbu taljivih modela služe smjese voskova i smola, koje se istale, odnosno izgore bez ostatka pepela (do 0,01%). To su obično smjese parafina, stearina, kolofonija, pčelinjeg voska, sintetskih smola i sličnih tvari.

Materijali za izradbu kalupa i jezgara

Vrste kalupa. Kroz sustav kanala, tzv. uljevni sustav, litina se ulijeva u uljevnu šupljinu kalupa (sl. 3). Za odvođenje



Sl. 3. Odljevak, model i kalup. a obradeni odljevak, b model odljevka, c jezgrenik, d sklopjeni kalup, e odljevak s priljevcima. 1 gornjak (gornja polovica kalupa), 2 donjak (donja polovica kalupa), 3 jezgra, 4 uljevna čaška, 5 ventilacijski odušak, 6 odušci, 7 odušak jezgre, 8 čaška oduška

zraka i plinova iz kalupa služe posebni kanali, tzv. odušci. Manjak tekućeg metalata nastao zbog skrućivanja litine pri hlađenju nadoknađuje se iz pojila (rezervoara tekućeg metalata). Skup svih kanala i ostalog što nakon ohladijanja odljevka ostaje priliveno uz odljevak zove se priljevi. Ljevarski kalupi mogu biti kalupi za jednokratnu upotrebu i kalupi za višekratnu upotrebu (kokile).

Kalupi za jednokratnu upotrebu izrađuju se od kalupne mješavine koja se sastoji od ljevarskog pjeska, veziva i dodataka. Svi materijali moraju posjedovati određena propisana svojstva. Nakon završenog lijevanja pješčani se kalup razbijaju radi vađenja odljevka, a upotrijebljeni se pjesak nakon dorade ponovno iskorišćuje za pripremu nove kalupne mješavine. Većina se većina odljevaka izrađuje pomoću jednokratnih kalupa.

Kalupi za višekratnu upotrebu (kokile) izrađuju se od različitih metala. O vrsti metala koji se ulijeva i o materijalu i kvaliteti kokile ovise koliko se odljevaka može izraditi s jednom kokilom; to može iznositi i do 100 000 odljevaka. Odljevci uliveni u kokilama imaju točne mjere i glatku površinu. U kokilama se upotrebljavaju metalne ili pješčane jezgre. Izbor materijala za izradbu kokila ovise o vrsti lijeva. Dobra toplinska vodljivost važno je svojstvo kokila, tako da se može postići brzo hlađenje.

Ljevarski pjesak i glina. Jednokratni kalupi izrađuju se od mješavine pjeska, veziva i dodataka. Najčešće se za izradbu kalupa upotrebljavaju mješavine kremenih zrnaca i gline, a rjeđe zrnca cirkona, olivina, kromita ili šamota. Dodatkom vode mješavine dobivaju tražena svojstva: propusnost, čvrstoću i kalupljivost koja omogućuje oblikovanje i zadržavanje oblike.

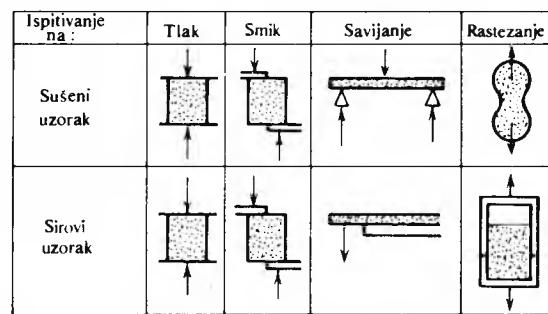
Zrnce pjeska ocjenjuje se prema njegovoj veličini, površini i obliku, prema količini prašine i ispranih tvari, prema udjelu štetnih primjese i otpornosti povišenoj temperaturi. S veličinom zrnaca raste propustljivost za plinove i postojanost pri visokim temperaturama. Promjer zrnaca ne smije biti veći od 0,75 mm. Pri izradbi kalupa, pjesak grubljeg zrnca teže se oblikuje, ali je postojaniji na povišenoj temperaturi. Za izradbu lakših odljevaka uzima se sitnije zrnati pjesak da bi se dobile glade površine. Zrnatost pjeska treba da bude što jednoličnija, tj. da u pjesku ima najviše zrnaca iste veličine, jer neravnomjerna zrnatost snizuje propustljivost za plinove. Pjesak se klasificira prema prevladavajućoj veličini zrnaca. Pri analizi pjeska najprije se ispere glina, zatim se zrnca posuše i prosiju. Prema količini zrnaca koja preostaju na pojedinim sitima pjesak se ocjenjuje kao sitnozrnat, srednjezrnat, grubozrnat i vrlo grubozrnat.

Glina međusobno vezuje zrnca pjeska i daje ljevarskoj mješavini čvrstoću i plastičnost. Količina gline u mješavini mora biti pravilno odmjerena, jer s porastom udjela gline opada propustljivost za plinove. Prema načinu raspodjele gline oko zrnaca razlikuje se vezana i slobodna glina. Vezana glina obavlja zrnca pjeska, dok se slobodna glina nalazi u obliku grudica između zrnaca. Što je glina ravnomjernije razdjeljena po zrcima pjeska, to je čvrstoća i propustljivost mješavine pjeska veća.

Mineraloški sastav gline također utječe na upotrebljivost mješavine. Za izradbu kalupa upotrebljavaju se montmorilonitna, kaolinitna i ilitna glina. Montmorilonit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$) ima rastegljivu kristalnu rešetku, a kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i ilitna glina ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$) imaju krutu kristalnu rešetku. Bentonitom se naziva glina s visokim sadržajem montmorilonitne gline. Kalupna mješavina pjeska s montmorilonitnom glinom ima pri istom postotku gline veću čvrstoću, a lošiju termostabilnost s obzirom na druge vrste glina. Montmorilonitna glina bubri dodatkom vode, što joj povećava plastičnost, te bolje obavlja zrnca kremena i zato daje veću čvrstoću nego kaolinitna glina. Pješčane mješavine s bentonitnom glinom primjenjuju se pri lijevanju u sirove (nesušene) kalupe. Mješavine s kaolinitnom glinom upotrebljavaju se, zbog svoje bolje termostabilnosti, pri lijevanju teških odljevaka. Prema sadržaju gline pjesak može biti kremeni, mršavi, srednjemasni i masni.

Osnovna su svojstva ljevarskog pjeska kalupljivost (oblikovnost), čvrstoća, propustljivost i termostabilnost. Kalupljivost

(oblikovnost) je svojstvo kalupne mješavine da se dade oblikovati i da svoj oblik sačuva, a ovisi o količini i raspodjeli gline i veličini pješčanih zrnaca, a raste s porastom udjela gline i sa smanjenjem zrnaca pjeska. Čvrstoća je svojstvo pjeska da se odupire deformacijama zbog statičkih i dinamičkih tlakova pri lijevanju. Na čvrstoću pjeska utječe vrsta i količina gline, veličina i oblik zrnaca, sadržaj vlage, način pripreme i stupanj sabitljivosti. Propustljivost za plinove jest sposobnost pjeska da propušta plinove, odnosno zrak kroz stijenke kalupa. Propustljivost je to veća što su zrnca ravnomjernije veličine i što je manji sadržaj gline u pjesku. Dodavanjem vode propustljivost raste do nekog maksimuma, a zatim opada. Vlagom se utječe na propustljivost i čvrstoću pjeska. Suvše ovlažen ili suviše suh pjesak ima slabu propustljivost i čvrstoću. Za određivanje čvrstoće i propustljivosti pjeska služe standardni cilindrični uzorci, izrađeni od nabijenog pjeska, promjera 50 mm i visine 50 mm (sl. 4). Termostabilnost jest svojstvo pjeska da na višim temperaturama ne srašće (da ne dođe do sinteriranja) i da se oko odljevka ne stvara tvrda kora od sraštenog pjeska. Termostabilnost ovisi o mineraloškom i kemijskom sastavu pjeska. Talište je kremena tako visoko da tokom lijevanja kremeni pjesak ne omeša. U praksi nema potpuno čistog kremenog pjeska, nego pjesak uvijek sadrži primjese koje snizuju talište. Osobito su štetni oksidi alkalija i željeza.



Sl. 4. Postupci ispitivanja mehaničkih svojstava ljevarskog pjeska

Kemijski sastav nema odlučujući utjecaj na upotrebljivost ljevarске mješavine ako pojedine štetne primjese ne smanjuju termostabilnost pjeska, što je osobito važno kod lijevanja čeličnog lijeva. Kremeni pjesak bez gline smije, pored SiO_2 , imati do 3% primjesa. Ta granica (97% SiO_2) važi za novi pjesak kao uvjet kod izrade kalupa za čelični lijev. Za sivi lijev dozvoljeno je 90% SiO_2 . Primjese u pjesku koji sadrži gline ne smiju prekoracićti gornju granicu od 7%. Pri tom ne smije sadržavati više od 4% CaCO_3 , više od 4% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ i više od 5% $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$.

Mješavine za izradbu kalupa i jezgara. Za izradbu kalupa služe različite vrste kalupnih mješavina (kalupni pjesak). Novim se pjeskom naziva još neupotrijebljeni pjesak bez dodataka i primjese. Stari kalupni pjesak je već upotrijebljeni pjesak dobiven istresanjem kalupa. Prema načinu primjene razlikuju se modelni, dopunski i jedinstveni kalupni pjesak. Modelni je pjesak osobito pažljivo pripremljen novi pjesak propisanih svojstava. Model se oblaže 20–50 mm debelim slojem modelnog pjeska. Utrošak modelnog pjeska varira prema masi i obliku odljevka. Udio modelnog pjeska obično iznosi 15–30%. Za vrijeme lijevanja i hlađenja modelni je pjesak u neposrednom dodiru s tekućim metalom. Dopunski pjesak služi za popunu preostale supljine u kalupniku. U tu svrhu služi stari, već upotrijebljeni pjesak koji nije posebno pažljivo pripremljen. Jedinstveni se pjesak upotrebljava u mehaniziranim ljevaonicama, osobito za strojno kalupljenje, a predstavlja mješavinu starog i novog pjeska uz dodatak veziva. Upotreba jedinstvenog pjeska znatno pojednostavljuje proizvodnju.

U ljevarstvu se primjenjuje tzv. prirodni i sintetski pjesak. Prirodni se pjesak upotrebljava u onom stanju u kojem je dobiven iz nalazišta. On sadrži 5–20% gline, nema stalan sastav, ni stalna svojstva, ali je jeftiniji. Sintetski se pjesak dobiva miješanjem pranog i selezioniranog kremenog pjeska

s bentonitnom glinom kao vezivom. Za 1 tonu odljevka potrebno je 2–10 tona pjeska. Posebno je važna prednost sintetskog pjeska u tome što sadrži manje gline (koja je bolje kvalitete) s obzirom na prirodnji pjesak, a time je znatno umanjena ovisnost propustljivosti o stupnju sabitljivosti.

Mješavine za izradbu sirovih kalupa. Budući da se sirovi kalupi prije ulijevanja litine ne suše, mora se tehnologija izrade kalupa vrlo pažljivo kontrolirati. Površina kalupa brzo gubi vlagu, pa zato vremenski interval između izrade, sklapanja kalupa i lijevanja mora biti što kraći. Odljevci izrađeni u sirovim kalupima imaju glatkou i čistu površinu. Također je lijevanje sa sirovim kalupima ekonomičnije, jer nema troškova za nabavku i pogon specijalnih peći za sušenje kalupa. Nadalje, prostor potreban za odlađivanje gotovih kalupa je manji, jer odmah nakon izrade kalupa počinje lijevanje. Sirovi su kalupi ugodljiviji, lakši se istresaju, brže se hlađe i čiste s obzirom na suhe kalupe, pa je potrebno manje radne snage.

Sivi lijev i neželjene slitine bez poteškoća se lijevaju u sirove kalupe, ali za čelični lijev kalupna mješavina mora biti posebno dobrih svojstava, naročito što se tiče propustljivosti. Budući da tim zahtjevima prirodnji pjesak samo rijetko odgovara, to se za izradbu sirovih kalupa u prvom redu upotrebljava sintetski pjesak. Primjena sirovih kalupa je neizbjegljiva kad se lijevanje provodi na tekućoj traci, a kalupi se izrađuju strojem. Pjesak se izabire prema zahtjevima koje postavlja proizvodnja; dodatak gline ovisi o njegovoj kakvoći. Obično se upotrebljava bentonitna glina jer posjeduje veću sposobnost vezivanja nego kaolinska glina.

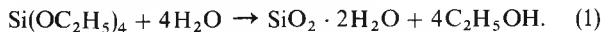
Mješavine za izradbu suhih kalupa. Suhu se kalupu prije lijevanja litine suše u specijalnim pećima, a služe u prvom redu za lijevanje krupnih i težih odljevaka kad postoji opasnost da statički tlak litine deformira kalup. Za izradbu takvih kalupa upotrebljavaju se prirodni i sintetski kalupni pjesak, ljevarske mase (pjesak sa više od 30% gline). Kao vezivo obično služi kaolinitna glina, pa stoga takve mješavine imaju veću termostabilnost. Dodatak gline rijetko je manji od 15%, što uzrokuje manju propustljivost za plinove, ali daje veću čvrstoću. Pješčani kalupi za sivi lijev suše se na temperaturi do 400 °C, a kalupi za čelični lijev na temperaturi do 600 °C. Dok se u sirovim kalupima zrnca pjeska vežu zbog ljepljivosti vlažne gline, u suhim su kalupima zrnca pjeska vezana keramički. Sušenjem kalupa povećava se čvrstoća i propustljivost za plinove, pa se time nadoknađuje smanjenje propustljivosti zbog većeg postotka gline.

Mješavine za izradbu jezgri. Jezgre su izložene više nego kalup neposrednom djelovanju tekućeg metalna i visokim temperaturama. Budući da su jezgre uronjene u rastaljeni metal, one moraju imati dovoljnu čvrstoću da izdrže djelovanje sile uzgona. Osim toga, one moraju imati veliku propusnost da bi se plinovi nastali izgaranjem veziva mogli bez poteškoća odstraniti. Također jezgre moraju biti termostabilne da ne bi došlo do reakcije s tekućim metalom i da ne dođe do sraščivanja pjeska na površini odljevka. Mora postojati mogućnost da se nakon završenog lijevanja jezgra bez poteškoća odstrani iz odljevka. Takva se svojstva jezgre postižu upotrebo grubozrnatog pjeska bez gline, a čvrstoću daju prikladna veziva.

Za izradbu jezgara upotrebljavaju se organska i anorganska veziva. Ta veziva mogu biti u voditopljiva ili netopljiva, a razlikuju se i prema mehaničkim svojstvima koja daju jezgrama, osobito prema čvrstoći na vlast i savijanje. Hidrofobna, tj. u vodi netopljiva veziva u prvom redu su veziva biljnog porijekla, mineralna ulja i bitumen. Za sva ta veziva važna je ireverzibilnost procesa. Ona se dodaju mješavini u tekućem stanju. U grupu veziva topljivih u vodi ubrajaju se umjetne smole, dekstrin, melasa, celulozna veziva, sulfitna lužina i sl. Dodatkom umjetne smole mješavine pjeska otvrduu zbog polimerizacije ili polikondenzacije.

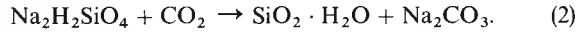
U ljevarstvu se primjenjuju polikondenzacijske smole koje omogućuju stvaranje kalupa, a po potrebi taj se proces može i prekinuti. Najvažnije polikondenzacijske smole, iz kojih se pri stvaranju većinom izlučuje voda, jesu alkidne, furanske i formaldehidne smole. Posebna grupa veziva za jezgre jesu

anorganska veziva, među koja se ubrajaju etilsilikat, vodenog stakla, cement, glina i sl. Etilsilikat vezuje pomoću koloidnog SiO₂ koji se izlučuje pri hidrolizi:



Tetraetilsilikat pri hidrolizi polimerizira, pa se izlučuje koloidni SiO₂ koji vezuje zrnca.

Vodenog stakla stvrdne propuhavanjem sa CO₂ (CO₂-postupak), pri čemu se izlučuje silicijev gel koji vezuje zrnca i stvara jezgru:



Organskim se dodacima (smolom, šećerom) postiže da se jezgre nakon lijevanja brzo raspadnu. Dodatak vodenog stakla iznosi 3–5% mješavine. Kvaliteta vodenog stakla ovisi o modulu vodenog stakla, tj. o odnosu između SiO₂ i Na₂O. Taj modul obično iznosi $M = 2,4 \dots 2,7$. Nedostatak je vodenog stakla da se povećava Na₂CO₃ u pjesku i da se jezgra teško rasipa nakon lijevanja.

Cement već odavno služi kao vezivo za kalupe i jezgre. U prvom redu se upotrebljava portlandski cement s dodacima koji ubrzavaju vezivanje i organskim dodacima koji olakšavaju da se nakon lijevanja istreže kalup.

Jezgre se mogu sušiti na zraku ili u peći. Izbor veziva treba prilagoditi složenosti jezgre.

Dodaci i premazi. Između kalupa i rastaljenog metala nastaju međusobne reakcije zbog kojih se dobije lošija površina odljevka. Naime, tekući metal penetrira u kalup i obavija zrnca pjeska, ili kemijski reagira s materijalom kalupa. Dubina prodiranja (penetracije) ovisi o vrsti lijeva i o kalupu. Da se spriječi ta pojava, upotrebljavaju se sredstva za površinsku zaštitu kalupa: posipi, dodaci i premazi.

Posipi služe za naprašivanje radnih površina sirovih kalupa. U tu se svrhu upotrebljava prašina drvenog ugljena, kamenog ugljena ili grafita. Ugljena prašina sprečava sraščivanje pjeska jer se pri lijevanju stvara reduktivska atmosfera, a time i tanak sloj plina između kovine i kalupa. Slično djelovanje ima i prašina kamenog ugljena koja se pomiješa s pjeskom. Prašina drvenog ugljena primjenjuje se osobito u kalupima za manje odljevke. Grafitna prašina upotrebljava se pri izradbi težih odljevaka. Da bi odljevak imao što oštire konture, grafit mora biti što finije smljeven (promjer čestica manji od 0,06 mm), čist i sa što manjim udjelom sumpora. Nakon naprašivanja kalup se izglađi.

Dodaci se mijesaju s pjeskom kod sirovih kalupa. Granulacija dodataka mora biti prilagođena zrcnicima pjeska. Prah kamenog uglja koji se upotrebljava pri lijevanju sivog lijeva u sirove kalupe za odljevke srednje težine, mora imati više od 25–33% hlapljivih sastojaka, manje od 5% pepela i manje od 0,8–1,4% sumpora. Granulacija mora iznositi 0,07–0,2 mm, a dodana količina ovisi o namjeni pjeska (da li se dodaje modelnom ili jedinstvenom pjesku), pa za sivi lijev iznosi 4–8%, za kovasti lijev 3–5%.

Premazi poboljšavaju površinu odljevka kod lijeva u pjesak, jer sprečavaju penetraciju litine u kalup i sraščivanje pjeska s odljevkom. Općenito se premazi sastoje od osnovnog termostabilnog ili izolacijskog materijala, od tekućeg medija (vode ili isparljive organske tekućine, npr. alkohola), od sredstva za stvaranje gela, od veziva i regulatora. Osnovni su premazi s velikim sadržajem ugljika (grafit, koksna prašina), s malim sadržajem ugljika (do najviše 20%) i bez ugljika (cirkon i drugi keramički materijali). Tekući medij je obično voda ili izopropil-alkohol sa što manje vode.

Priprema ljevarskog pjeska

U toku pripreme ljevarskog pjeska stari se i novi pjesak rastresa, čisti i miješa s dodacima da bi se dobila mješavina propisanih tehnoloških svojstava.

Sušenje pjeska. Izradba mješavine i miješanje pjeska otežano je ako je novi pjesak suviše vlažan, jer se u pjesku stvaraju grude, pa je otežano homogeniziranje. Stoga je ponekad

potrebno sušiti pjesak. Tako se npr. suši pjesak za sintetske kalupne mješavine radi točnog odmjeravanja vlage i postizanja određenih svojstava. Kremeni pjesak za kalupe i jezgre mora se također prethodno sušiti ako se primjenjuju veziva koja u vodi nisu topljiva, odnosno kad se želi postići točno određen udio vlage.

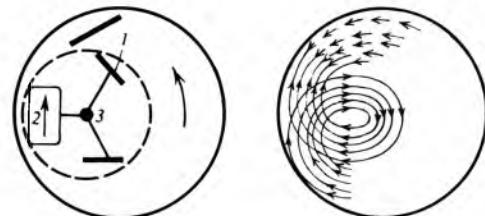
Pjesak se suši u rotacijskim pećima s uzdužnom osi nagnutom pod kutom od 10° . U plaštu valjka rotacijske peći ugrađena su rebra koja miješaju pjesak. Često se za sušenje upotrebljavaju i vertikalne peći u kojima pjesak iz jednog tanjura pada u drugi. Svaki se drugi tanjur vrti, a na svojoj donjoj strani ima ugrađene lopatice koje prebacuju pjesak. U posljednje se vrijeme primjenjuju i naprave u kojima se padajući pjesak suši u struji vrućeg zraka ili dimnih plinova.

Sijanje pjeska. Nakon sušenja pjesak treba prosijati da bi se odvojio sitan pjesak od gruda. Za sijanje pjesaka služe sita bubnjastog i poligonskog oblika te vibracijska sita. Prve dvije vrste sita imaju oblik valjka, odsjećenog konusa ili piramide i vrte se oko svoje horizontalne osi. Pjesak se sipa u manji otvor, sitan pjesak pada kroz sito u spremište, dok se grude otpremaju u drobilicu. Uz sita su obično smješteni i magnetski separatori koji izdvajaju preostale komadiće željeznog lijeva.

Istresanje kalupa, drobljenje i separacija pjeska. Ohlađeni odljevci izbjaju se iz kalupa iznad rešetke za istresanje. Zbog titranja rešetke kalup se raspade, pjesak pada kroz mrežu s otvorima $40\text{--}80$ mm, dok odljevak odlazi na čišćenje. Grude starog pjeska obično se drobe u drobilici s valjcima, a rjeđe u celjskoj ili koturastoj drobilici. Valjkaste se drobilice mogu uključiti i u kontinuiranu pripremu pjeska. Iz starog pjeska višepolni magnet magnetskog separatora odstranjuje preostale komadiće željeza, čavle i sl.

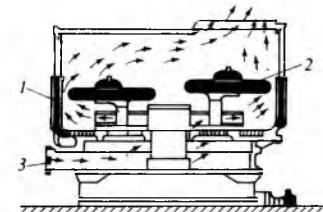
Mješalice za pjesak moraju što brže i uz što manji utrošak energije ravnomerno promiješati sastavne dijelove kalupne mješavine da bi se dobila tražena svojstva. Za pripremu pjeska miješanjem, gnjećenjem i trenjem služe različite vrste mješalica koje obavljaju sve tri, dvije ili samo jednu od tih operacija. Mješalice mogu biti s lopaticama i s valjcima. Mješalice s lopaticama ili krilcima primjenjuju se u prvom redu za pripremu mješavine za jezgre kad se lako postiže dobra raspodjela sastavnih materijala i za pripremu tekućih mješavina s tekućim vezivom male viskoznosti. Mješalice s valjcima služe za pripremu mješavina s krutim ili gustim vezivima. Valjci gnječe i taru mješavinu, dok je lopatice miješaju i prenose. Zbog gnjećenja i trenja vezivo obavije zrnce pjeska i priljubi se uz njega. Prema obliku traga po kome se kreću valjci dnom mješalice razlikuju se mješalice s centričnim (Simpson), eks-

tričnim (Eirich) i bočnim tragom (Speedmullor). Valjci miješalice s centričnim tragom učvršćeni su na koljenaste osovine. Valjci gnječe pjesak svojom težinom, a da pri tom ne drobe zrnca (sl. 5). Slično radi mješalice s valjcima stožasta oblika. U mješalici s ekscentričnim tragom (sl. 6) rotiraju u suprotnom smjeru posuda za miješanje i ekscentrično postavljena zjvezdasta naprava za miješanje. Ta se naprava sastoji od dvije lopatice i valjka, učvršćenih na pogonskom ekscentrično postavljenom vratilu. Pri radu se pjesak tlači i miješa, a pojedina se zrnca međusobno taru zbog neprestane promjene smjera miješanja. Mješalice s bočnim tragom imaju valjke za miješanje učvršćene horizontalno tako da se kreću po bočnim stijenkama posude (sl. 7). Valjci se zbog velike brzine vrtnje priljube uz bočne stijenke i pri tom gnječe pjesak (njihalne mješalice). U mješalici se pjesak propuhavanjem otprašuje, hlađi i rastresa.

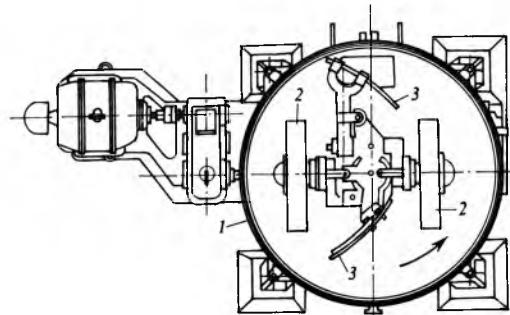
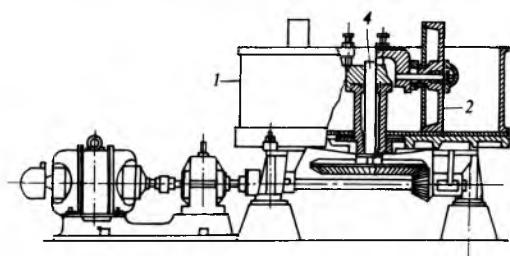


Sl. 6. Shema mješalice tipa Eirich s ekscentričnim tragom.
1 lopata, 2 valjak, 3 vratilo

Dopunski pjesak ne zahtijeva tako intenzivnu pripremu, mada se često traži visoka propustljivost. Priprema se tako da se starom pjesku, nakon sijanja i vlaženja, doda potrebna količina novog pjeska i veziva, a zatim se miješa i razrahljuje. Za razrahljivanje dodatnog pjeska služe dezintegratori s bubnjem, rebrima i palcima te aeratori s lopatama.



Sl. 7. Mješalica tipa Speedmullor s bočnim tragom. 1 gumena obloga, 2 valjak za miješanje, 3 dovod zraka



Sl. 5. Mješalica tipa Simpson. 1 posuda za pjesak i glinu, 2 valjak za gnjećenje smjese pjesaka i gline, 3 lopatica za miješanje, 4 vratilo

Organizacija pripreme pjeska. Priprema pjeska može biti mehanizirana, polumehanizirana ili individualna. Mehanizirana (automatska) priprema pjeska primjenjuje se gotovo uvijek u suvremenim velikim pogonima koji svakodnevno troše velike količine kalupnog pjeska. Rad je potpuno mehaniziran i obuhvaća sve operacije od otpreme starog pjeska skupljenog ispod istresnih rešetki pa do transporta pripremljenog pjeska do mjesta njegove upotrebe. Pri automatskoj pripremi pjeska radnik samo nadzire rad postrojenja koje miješa stari i novi pjesak u propisanom omjeru, ovlažuje mješavinu i obavlja sve ostale poslove. U mehaniziranoj pripremi pjeska razlikuju se u početku dva toka pjeska, tok starog i tok novog pjeska, koji se kasnije združuju. Polumehanizirana priprema pjeska primjenjuje se u manjim ljevaonicima sa serijskom proizvodnjom. Utovar i transport pjeska obavlja se ručno. Niz ostalih operacija provodi se strojevima, ali pojedine faze provode se samostalno. Obično su udruženi: rešetka za istresanje, magnetski separator, naprava za utovarivanje, mješalica i aerator, a ponekad i spremište pjeska. Individualnu pripremu pjeska imaju manje ljevaonice gdje svaki ljevač priprema sebi pjesak pomoću prijenosnih mješalica.

Za transport pjeska u većim ljevaonicama sa serijskom proizvodnjom služe gumeni transporteri koji prenose pjesak na radna mjesta, odnosno u spremište pjeska iznad kaluplaca. U posljednje se vrijeme primjenjuje i pneumatski transport pjeska. Prema konstrukciji pneumatski su uređaji tlačni i usisni.

Izradba kalupa i jezgara

Ručno kalupljenje primjenjuje se kod izrade kalupa na podu ili u jami ljevaonice, te za izradbu kalupa u metalnim okvirima (kalupnicima) i za izradbu kalupa pomoću šablona.

Kalupljenje na podu je najstariji način izrade kalupa. Takvi kalupi mogu biti otvoreni ili zatvoreni. Otvoreni kalupi služe za lijevanje plosnih odljevaka kojima gornja površina ne treba biti glatka, već je dovoljno da je samo donji dio odljevka pravilno oblikovan. Otvoreni kalupi moraju ležati vodoravno da bi debljina odljevka bila na svim mjestima jednaka. U zatvorenim je kalupima i gornja površina odljevka glatka, te ima oblik koji joj daje kalup. Zatvoreni kalupi u jamama upotrebljavaju se za lijevanje odljevaka velike mase, kao što su npr. kućišta velikih alatnih strojeva ili dijelovi strojeva za koje ne postoje dovoljno veliki kalupnici.

Kalupljenje pomoću modela u kalupnicima primjenjuje se danas u većini ljevaonica. Lijevanje pri tom nije vezano za mjesto izrade kalupa, ne treba se pripremati podloga, a time se skraćuje i vrijeme potrebno za izradbu kalupa i povećava proizvodnost. Kalupnici se prave od čelika, sivog lijeva ili aluminija. Pjesak se u njih sabija ručno ili pomoću stroja. Osnovne operacije izrade tih kalupa jesu: centriranje modela u kalupniku, punjenje i nabijanje pjeska, izradba uljevnog sustava i pojila, vađenje modela, obrada i popravak kalupa, te sklapanje kalupa. Obično se kalup izrađuje pomoću dvodijelnog modela. Razdjelna ploha modela poklapa se s razdjelnom plohom između gornjeg i donjeg kalupnika i razdjelnom plohom između gornje i donje polovice kalupa (gornjaka i donjaka). Ako modeli nisu dvodijelni, kalupi se izrežu ili se primjenjuju tzv. slijepi kalupi. Nakon što je kalup potpuno izrađen, ulože se jezgre, dijelovi kalupa se sklapaju i opterete.

Šabline za kalupljenje mogu biti rotacijske i povlačne. Pomoću rotacijskih šabloni, koje se vrte oko svoje osi, izrađuju se kalupi za rotacijska tijela kao što su, npr., remenice, zvona i posude. Tada se radi s pjeskom ili masom. Takva izrade kalupa primjenjuje se kad se želi izbjegići izrade skupih modela, odnosno ako postoji opasnost da se model u pjesku ovlaži i deformira. Rad sa šablonama je dugotrajniji i skuplj, tako da se izrade modela isplati već za lijevanje pet jednakih odljevaka. Osim rotacijskih šabloni, upotrebljavaju se i povlačne šabline s kojima se izrađuju jednostavni uski i dugi kalupi.

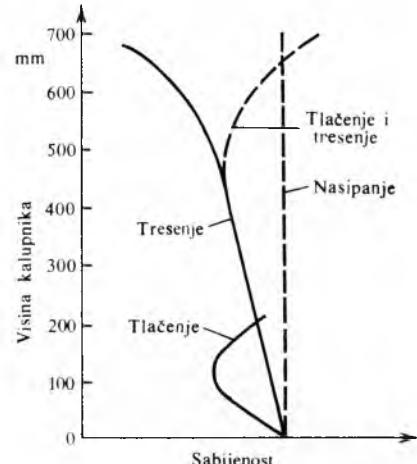
Skeletni se modeli upotrebljavaju radi uštede drva, često za izradbu kalupa velikih odljevaka koji imaju velike jezgre (kao npr. cijevi ili spiralne cijevi).

Strojno kalupljenje. Za serijsku se proizvodnju traži da svi odljevci imaju što točnije dimenzije, da njihova površina bude što glatka, da troškovi izrade budu što manji, da rad bude što lakši, a proizvodnost što veća. Pri strojnom kalupljenju, pjesak se u kalupnicima zbijja tresenjem, tlačenjem i nabacivanjem. Strojevi za izradbu kalupa mogu biti strojevi koji tlače, tresu, vibriraju, nabacuju (pjeskometni strojevi) i kombinirani strojevi, koji istodobno tresu i stiskaju, ili vibriraju i stiskaju.

Strojevi za izradbu kalupa tlačenjem mješavine (pritiskalice) imaju najjednostavniju konstrukciju. Ti strojevi rade s tlakom $2 \dots 8$ bara ($2 \dots 8 \cdot 10^5$ Pa). Zbog relativno visokog tlaka ti se strojevi upotrebljavaju samo za rad s manjim kalupnicima (do 5000 cm^3). Sabijenost pjeska nakon tlačenja najveća je ispod ploče kojom se tlači, nešto manja u sredini kalupa, a opet raste u donjem dijelu kalupa (sl. 8). Među strojeve visokog tlaka (30 bara) ubrajaju se strojevi tipa Osborn, Cobomatic i Dismatic. Ti strojevi upuhavaju pjesak pod tlakom, sabiju ga, a naknadno ga još mehanički stlače.

Strojevi za izradbu kalupa tresenjem (treskalice) podignu radni stol zajedno s kalupnikom na 30 do 80 mm visine, pa ga zatim ispuše da padne na nakovanj. Pjesak se zbog tih udaraca zgušnjuje. Broj udaraca potreban da se pjesak dovoljno sabije obično iznosi do 80, već prema vrsti stroja. Bočni tlak je kod treskalica manji nego kod pritiskalice, pa se stoga postiže ravnomjernija tvrdoća i gustoća kalupne

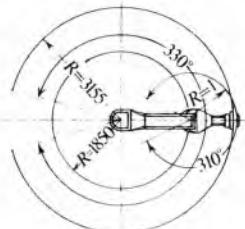
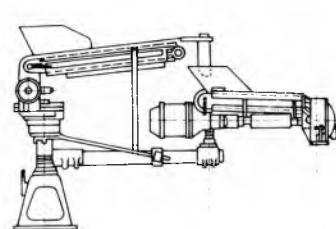
mješavine po cijeloj visini kalupa (v. sl. 8). Treskalice se upotrebljavaju u prvom redu za rad s višim kalupnicima.



Sl. 8. Dijagram sabijanja pjeska u kalupu

Vibracijski strojevi rade s malom amplitudom ali visokom frekvencijom. Obično se upotrebljavaju za vađenje modela iz kalupa, ali dolaze u obzir i za nabijanje pjeska u kalupe.

Pjeskometi su strojevi koji ubacuju pjesak u kalupnike pomoću brzo rotirajuće lopatice. Glava pjeskometra pomiče se iznad kalupnika, izbacujući pjesak velikom brzinom na model, odnosno u kalupnik (sl. 9). Tako se kalupnik puni i istodobno nabija.



Sl. 9. Pjeskomet

Nakon što je pjesak sabijen potrebno je model izvaditi iz kalupa. Pri ručnoj izradi kalupa potrebna je velika vještina da se izvadi model, a da se kalup pri tom ne ošteći. Zato se mehanizira vađenje modela. Model se vadi iz kalupa podizanjem kalupa ili spuštanjem modela, odnosno spuštanjem modelne ploče pomoću vodilica. Model se može izvući i kroz modelnu ploču za podupiranje ili pomoću ploče za okretanje.

Izradba jezgara. Za vrijeme lijevanja i hladjenja jezgre su veoma opterećene i izložene utjecajima tekućeg metala. Zato jezgre moraju prije ulijevanja posjedovati visoku vatrootpornost, čvrstoću i propustljivost, a nakon hladjenja odljevka moraju biti rasipljive da se lako mogu odstraniti. Većina se jezgara izrađuje od pranog i odabranog kremenog pjeska te organskih, odnosno anorganskih veziva. Izbor veziva ovisi o vrsti i složenosti jezgre. Glinasti se pjesak upotrebljava samo za kalupne jezgre jednostavnih i težih odljevaka.

Kad se jezgre izrađuju ručno, pješčana se mješavina sipa u jezgrenik koji može biti od drva ili od metala. Površina jezgrenika mora biti glatka da se kalupna mješavina ne lijepi. Komplikirane jezgre izrađuju se od više dijelova koji se zatim slijepi. Strojna je izradba jezgara na principu tlačenja, tresenja, nabacivanja i puhanja pjeska. Tlačenje i tresenje upotrebljava se za izradbu jednostavnih jezgara, a nabacivanje za jezgre velike težine i većih dimenzija. Većina manjih i srednjih jezgara izrađuje se puhanjem pješčane mješavine, i to najčešće upuhavanjem. U strelnjkama zrak pod tlakom $4 \dots 8$ bara ($4 \dots 8 \cdot 10^5$ Pa) potiskuje mješavini pjeska u jezgrenik. Kompr-

mirani se zrak dovodi odozgo ili sa strane. Strojna izradba jezgara dolazi u obzir jedino kad se rade velike serije manjih jezgri. Nedostatak je strojne izrade ograničenost s obzirom na veličinu jezgara, te broj jezgri mora biti dovoljno velik da bi se isplatila primjena stroja.

Sušenje kalupa i jezgara. Suhu se kalupi upotrebljavaju za lijevanje odljevaka većih masa, kad se traži velika čvrstoća i dobra propustljivost kalupa, i za lijevanje složenijih tankih odljevaka, kad se želi da odljevak ima glatkou površinu. Naime, suhi se kalupi mogu presvući zaštitnim premazima, što sprečava da pjesak sraste s odljevkom. Temperatura sušenja kalupa ovisi o njegovu materijalu. Pješčani se kalupi suše na 300...500 °C, a šamotni kalupi za čelični lijev na temperaturama do 600 °C. Kalupi se mogu sušiti na mjestu gdje su izrađeni ili u komornim ili konvejerskim pećima s vrućim plinovima. Prijenosne se peći upotrebljavaju za sušenje kalupa velike mase za koje ne postoji prikladna komorna peć. Prijenosne peći su različitih konstrukcija, a lože se krutim, tekućim ili plinovitim gorivom. Njihov ventilator ubacuje dimne plinove ili ugrijani zrak u kalup. Komorne peći se lože krutim, tekućim ili plinovitim gorivom, odnosno električnom strujom. Dimenzije komora, vrijeme i temperatura sušenja mijenjaju se prema veličini kalupa, vrsti lijeva i debljinu stijenki kalupa.

Posebni način izrade kalupa i jezgara. *Cementni kalupi i jezgre* izrađuju se od ljevarske mješavine koja se sastoji od pranog kremenog pjeska, portlandskog cementa i vode. Imaju dobru propustljivost i čvrstoću, ali se teže oblikuju. Nakon dva dana sušenja na zraku takav je kalup sposobljen za lijevanje. Kad je lijevanje završeno, kalup se bez poteškoća može razbiti, a intenzivno čišćenje odljevka nije potrebno. Dodatak cementa iznosi 9...14%, dodatak vode 5...6%. Treba paziti da se ne doda previše vode jer se time sušenje kalupa produžuje. Za lijevanje sivog lijeva dodaje se mješavini i 2...4% ugljene prašine. Radi boljeg oblikovanja kalupa dodaju se organska veziva, a time se ujedno postiže lakše rasipanje kalupa nakon lijevanja. Budući da nije potrebno umjetno sušenje cementnog kalupa, uštedjuje se gorivo i smanjuje transport u ljevaonici. Cementni se pjesak ne srašćuje s odljevkom jer je termostabilan. Cementni se kalupi skrućuju na hladnom zraku, što se može još i pospješiti mlazom zagrijanog zraka (do 120 °C). Jezgre s dodatkom organskih tvari suše se u pećima.

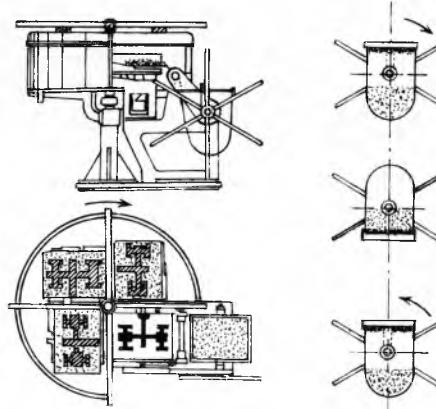
Postupak sa CO₂. Za taj je postupak mješavina sastavljena od pranog kremenog pjeska. Kao vezivo služi vodeno staklo s organskim primjesama koje olakšavaju raspadanje kalupa nakon lijevanja. Ako se zbijena mješavina propuše plinom CO₂, ona se skruti u toku nekoliko sekundi prema procesu definiranom izrazom (2). Pri tom se SiO₂ izlučuje kao gel koji ovija i vezuje zrnca kremena te daje jezgri čvrstoću. Prednost postupka s CO₂ je u brzini izrade kalupa i jezgri, u točnosti dimenzija (kalup se skrućuje u modelnoj napravi) i u velikoj čvrstoći. Postupak je prikladan za pojedinačnu i velikoserijsku izradbu malih i velikih kalupa i jezgara. Nedostatak je postupka da se kalupi i jezgre nakon lijevanja teško istresaju. Nezgodno je i to što vezivo unosi u pjesak Na₂CO₃, pa se snizuje talište pjeska.

Postupak s tekućim pjeskom. Tim postupkom mogu se kalupi i jezgre izraditi bez sabijanja. Ljevarska mješavina je sastavljena od kremenog pjeska i vodenog stakla (6...7%). Dodavanjem detergenta (0,3...0,5%) dobije se pjena koja pravi pjesak tekućim tako da se može ulijevati u kalupe i jezgrenike. Kalup se skrućuje zbog dodatka dikalcijskog silikata. Gustoća je pjeska u kalupu oko 15% manja od uobičajene. Kalup ima dobro propustljivost, a penetracija se sprečava pomoću premaza.

Postupak s keramičkim kalupima (postupak Shaw). Za taj je postupak mješavina sastavljena od siluminata u prahu. Kao vezivo služi otopina etilsilikata koja veže prema reakciji danoj izrazom (1). Termostabilna zrnca i otopine etilsilikata pomiješaju se u gustu tekuću mješavinu kojom se tada zalijeva model. Ubrzivačem se bira vrijeme vezivanja između 30 s i 3 min, već prema veličini kalupa. Po završenom vezivanju kalup postane elastičan i može se bez poteškoća odvojiti od modela. Nakon

toga se kalup zagrije, a alkohol se, nastao u toku hidrolize, spali. Pri tom kalup gubi elastičnost i stvrdne se. Silicijski gel oslobađa vodu; Si(OH)₄ → SiO₂ + 2H₂O, a zrnca vezuju skelet kremena. Na površini kalupa stvaraju se mikroskopske pukotine koje povećavaju propustljivost kalupa za plinove.

Postupak sa školjkastim kalupima (postupak Croning). Za obične kalupe potrebna je 3...10 puta veća količina pjeska od količine litine koja se ulijeva, a debljina stijenki kalupa iznosi 100...200 mm i više. Lijevanje u školjke omogućuje da debljina stijenki kalupa iznosi samo 3...10 mm, pa je potrošak pjeska manji. Mješavina pjeska sastoji se od sitnozernatog (0,1...0,2 mm), pranog, suhog i kremenog pjeska s dodatkom 1,8...6% fenolformaldehidne smole. Zrnca pjeska mogu se već prije izrade kalupa obaviti smolom. Tako dobivena mješavina sipa se na metalnu modelnu ploču zagrijanu na 250...300 °C. Budući da je talište smole između 60 °C i 90 °C, ona se otopi te veže sloj pjeska oko modelne ploče (maska, školjka). Debljina školjke ovisi o temperaturi i vremenu pečenja. Na primjer tokom 6...12 sekundi, pri temperaturi ploče od 250 °C nastane sloj debljine 5 mm. Pjesak koji se nije uhvatio strese se sa školjke (sl. 10). Silikonsko ulje ili emulzija sprečava da se školjka prilijepi za modelnu ploču. Školjka se stvrdne za 40...60 sekundi. Šuplje se jezgre također izrađuju ovim postupkom tako da se suh i sipak pjesak s dodatkom smole stavlja ili ubacuje mlazom zraka u jezgrenik koji je zagrijan na 240...280 °C. Debljina stijenke jezgre ovisi o trajanju zagrijavanja.



Sl. 10. Izradba školjki postupkom Croning

Izradba jezgara u toplim jezgrenicima ili tzv. postupak hot-box, služi za velikoserijsku proizvodnju manjih i srednjih jezgara. U tu se svrhu primjenjuju topli jezgrenici u koje se stavlja mješavina pjeska s vezivom od furanskih i fenolnih smola s dodatkom katalizatora. Prednosti tog postupka jesu: kratko vrijeme proizvodnje, velika točnost dimenzija, glatka površina jezgara, dobra postojanost pri uskladištenju, sposobnost jezgre da se raspade nakon lijevanja i velika čvrstoća u hladnom i toplog stanju. Mješavina se sipa u topao jezgrenik (180...240 °C) gdje se za kratko vrijeme (5...20 sekundi) na površini toliko stvrdne da se jezgra može izvaditi. Skrućivanje jezgre nastavlja se zatim na zraku.

Izradba jezgara u hladnim jezgrenicima (postupak cold-box). Za razliku od postupka s toplim jezgrenicima, ovaj je postupak prikladan za srednje i male serije jezgara. Pomoću mlaza zraka ubacuje se jezgrena mješavina u jezgrenik i zatim skrućuje upuhavanjem mješavine zraka i katalizatora. Prednost je tog postupka u tome što je mješavina sipka i dobro se zglašuje, a dobivaju se glatke površine i kad je pjesak grublji. Nakon lijevanja te se jezgre lako raspadaju, mogu se ostavljati i duže vremena na zraku, a premaz im obično nije potreban.

Izradba jezgara i kalupa hladnim postupkom. Postupak No bake primjenjuje se sve više za izradbu jezgara i kalupa srednjih i većih dimenzija, bilo u pojedinačnoj ili serijskoj proizvodnji odljevaka. Za taj se postupak upotrebljavaju fenolne i furanske smole koje se skrućuju pomoću katalizatora. Prednost

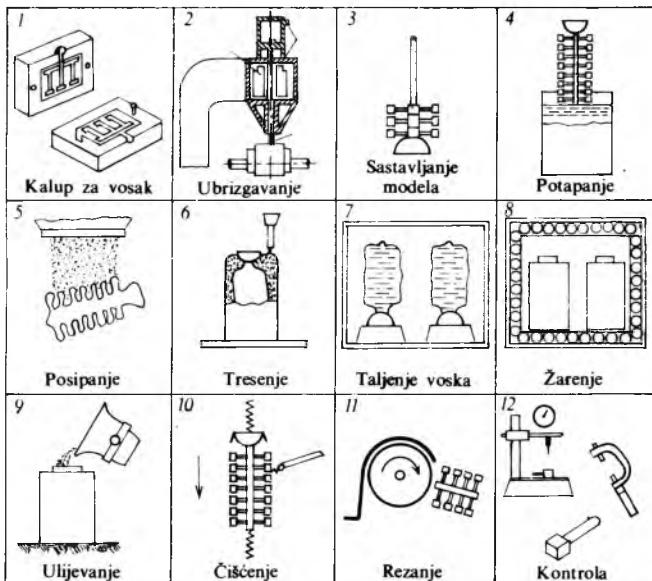
je tog postupka da otpada sušenje jezgara i kalupa i s time povezani transport. Nedostaci su: rad s kiselinom (80%-tina H_3PO_4), usko temperaturno područje mješavine i karakterističan miris, ali su ti nedostaci manji od prednosti postupka.

Kalupi s rastaljivim modelima. Primjenom rastaljivih modela mogu se dobiti jednodijelni kalupi vrlo točnih dimenzija i vrlo glatkih radnih površina kalupa. Zbog toga se taj postupak zove i točni lijev.

Prva je faza postupka izradba voštanog modela. Vosak s niskim talištem ($50\text{--}90^\circ C$) uštrca se pod visokim tlakom u kalup gdje se stvrđne i tako nastane voštan model. Budući da su ti modeli obično manjih dimenzija, to se više voštanih modela skupi u zbirni model ili tzv. uljevni grozd (sl. 11). Grozd se presvuča zaštitnim vatrostalnim premazom. Već prema vrsti metala i temperaturi lijevanja, kao zaštitni sloj služe premazi od: cirkonij-oksida, silimanita, korunda, krom-oksida ili kremana. Zrnca zaštitnog sloja moraju biti što sitnija i manja od $0,04\text{ mm}$, a za vezivo služi etilsilikat. Silicijev gel, koji se pri tom izlučuje, vezuje zrnca prema reakciji, izraz (1). Alkohol djelimice ishlapi već pri sušenju na zraku, a voda tek zagrijavanjem na višu temperaturu:



Silicijev gel izgubi vodu, a silicij-oksid sačinjava čvrst skelet koji vezuje vatrostalan materijal. Grozd, presvučen zaštitnom prevlakom, postavlja se u okvir napunjén gustom tekućom mješavinom kremenog pijeska i veziva. Zrnca su tog pijeska manja od $0,08\text{ mm}$, a kao sredstvo za vezivanje služi etilsilikat ili glina. Nakon obrade na treskalici kalupna mješavina nakon $1\text{--}3$ sata postiže zadovoljavajuću čvrstoću. Nakon toga se voštani modeli istake iz kalupa na temperaturi do $100^\circ C$, pa se zatim kalup očvršćuje pečenjem na $700\text{--}1000^\circ C$. Pri tim temperaturama izgore ostaci voska u kalupnoj šupljini.



Sl. 11. Redoslijed izradbe odljevka postupkom točnog lijeva

Umjesto voštanih modela upotrebljavaju se također modeli od smrznute žive (postupak Mercast) ili sintetskih tvari. Agregat za taljenje mora biti prilagođen tehnicu točnog lijeva.

Kalupi s isparljivim modelima. Prednost lijevanja u kalupe bez razdjelnih ploha ima i lijevanje u kalupe ispunjene isparljivim polistirolnim modelima. Taj je postupak prikidan za rad s jednostavnijim kalupima bez jezgri, a ako je jezgra potrebna, ona se ulaže u kalup zajedno s modelom. Zbog visoke temperature litine polistirolni model ispari. Odljevak ima točne mjere i nema rubove koji inače nastaju na spojnim plohami višedijelnih kalupa. Polistirolni model premaže se posebnim premazima koji služe kao zaštitni sloj kalupne površine.

Magnetsko kalupljenje. Za magnetsko kalupljenje kalupi se izrađuju od željeznog granulata. U sipki željezni granulat, veličine zrnca do $0,4\text{ mm}$, uloži se isparljivi model od polistirola. Nakon toga se granulat u kalupu zgušćeće na vibracijskom stroju sve dok se ne dobiju oštret konture, pa se zatim kalup stavi u magnetsko polje i u njemu učvrsti. Za vrijeme lijevanja model ispari, a kalup ispunjen litinom ostaje u magnetskom polju sve dok se odljevak ne skruti. Čim se struja isklopi, nestane magnetskog polja i željezni granulat postane ponovno sipak. Nakon hlađenja i čišćenja granulat je opet upotrebljiv za izradbu kalupa. Za magnetsko kalupljenje ne upotrebljavaju se jezgre, propustljivost mješavine je velika, a skrućivanje odljevaka brzo. Tim se postupkom može svakog sata izraditi $20\text{--}50$ odljevaka.

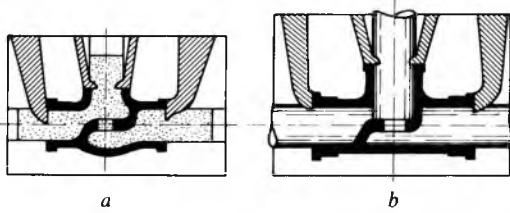
Kalupi za višekratno lijevanje

Pješčani kalup služi samo za jedno lijevanje, dok se u stalnom kalupu može izraditi mnogo odljevaka. Stalni kalupi moraju biti tako oblikovani i izrađeni da se iz njih odljevak može bez poteškoća izvaditi. Prema načinu lijevanja razlikuje se lijevanje u kokile, lijevanje pod tlakom i centrifugalno lijevanje. Pri lijevanju u kokile kalup miruje, a litina teče u uljevnu šupljinu kroz sustav kanala (gravitacijski lijev). Pri lijevanju pod tlakom kalup miruje, a tekuća se kovina utiskuje pod tlakom u uljevnu šupljinu. Pri centrifugalnom lijevanju kalup se vrti, pa se zbog djelovanja centrifugalne sile metal porazdijeli u kalupnoj šupljini. Osim metalnih, upotrebljavaju se i keramički i grafitni stalni kalupi.

Odljevci izrađeni u stalnim kalupima imaju točne mjere, gladku površinu, gustu strukturu i bolja mehanička svojstva. Zbog bolje toplinske vodljivosti kokila, odljevak se u njima brže skruti nego u pješčanim kalupima. Struktura odljevaka je sitnozrnata, a čvrstoća lijeva je veća. Prema točnosti dimenzija odljevci se mogu usporediti s odljevcima izrađenim školjkastim ili točnim lijevom. Prostor lijevaonica je tada bolje iskorišten jer otpada prostor za pripremu, transport i uskladištenje pijeska, prostor za izradbu kalupa, čišćenje odljevaka i druge operacije.

Kokilno lijevanje. Lijevanje u kokile započelo je s izradbom odljevaka od kositra, cinka i olova, koji su trebali imati što točnije dimenzije. Razvoj lijevanja slitina aluminija, magnezija i bakra još je više unaprijedio i proširio upotrebu kokila. Osim dvodijelnih kokila za lijevanje jednostavnih odljevaka, počele su se, osobito u automobilskoj industriji, upotrebljavati i komplikirane, višedijelne kokile.

Razlikuju se cjelovite kokile, kojima su kalup i jezgra napravljeni od metala, i djelomične kokile s metalnim kalupom i pješčanom jezgrom (sl. 12). Vrsta kokile ovisi o složenosti odljevaka. Većinom se upotrebljavaju kokile s metalnim jezgrama, napose za jednostavnije odljevke. Materijal za izradbu kokile mora se lako obradivati, mora biti postojan i otporan na mehanička i toplinska opterećenja, ne smije se izvitoperiti, pucati ili oksidirati pri promjenama toplinskog opterećenja. Kokile se izrađuju od nelegiranog sivog lijeva i legiranog sivog ili čeličnog lijeva. Najčešće se primjenjuje sivi lijev, jer se lako obrađuje i ima zadovoljavajuću toplinsku vodljivost. Manje se upotrebljavaju bakrene i aluminijске kokile.



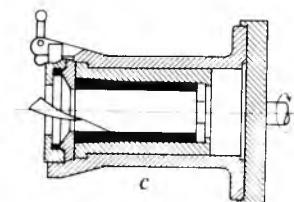
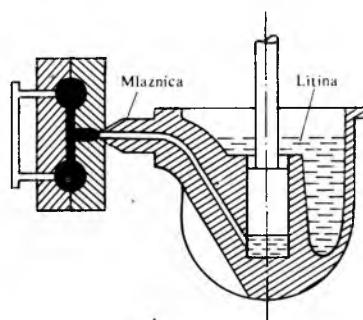
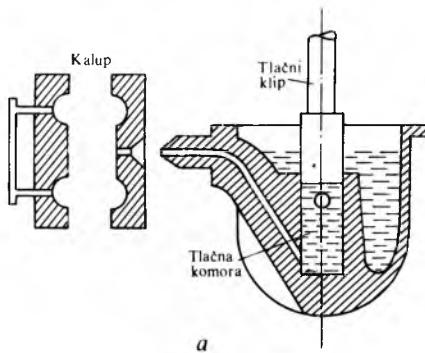
Sl. 12. Jednostavna dvodijelna kokila. a s pješčanom jezgrom
b s metalnom jezgrom

Postoje jednostavne kokile i kokilni strojevi. Jednostavne kokile služe za lijevanje manjih i jednostavnijih odljevaka bez jezgre ili s jednostavnom jezgrom, a mogu biti mirujuće i nagibne. Nagibanjem kokila postiže se ravnomjernije punjenje

uljevne šupljine i glaća površina odljevka bez nabora i preljeva. Nagibne kokile služe u prvom redu za lijevanje mjeđi i visokih odljevaka. Kokilni se strojevi upotrebljavaju za rad s većim kokilama, koje se zbog velike mase teško otvaraju i zatvaraju. Jezgre se ulažu u kokile ručno ili strojno. Kokile se obično izrađuju tako da je jedna polovica pomicna, a druga nepomicna. Za rukovanje kokilama primjenjuju se ručni, mehanički ili hidraulički pogoni. Strojevi za lijevanje imaju mehanizirane, odnosno automatizirane sljedeće operacije: otvaranje i zatvaranje kokile, izbacivanje odljevaka i lijevanje litine u kokilu. Hidraulički sustav zatvaranja s poluautomatskim ili automatskim vodenjem povećava proizvodnost. Dalje povećanje proizvodnosti može se postići mehanizacijom ulijevanja, tako da se primjenom niskog tlaka kokile pune izravno iz peći za taljenje. Za lijevanje većih serija jednakih odljevaka služi karuselni stol, promjera 3...5 m, na kojem je učvršćeno do 12 kokila.

Lijevanje pod tlakom. Tekuća se kovina ulijeva pod visokim tlakom u točno obradenu šupljinu čelične kokile i potpuno je ispunji. Odljevci imaju glaću površinu, dobru strukturu i točne dimenzije. Pri lijevanju pod tlakom odljevci se izrađuju brzo jedan iza drugoga, tako da se dobiva serija odljevaka koji se po svojim svojstvima, dimenzijama i obliku međusobno ne razlikuju. Strojevi za lijevanje pod tlakom mogu biti s vrućom ili hladnom komorom.

U strojevima s vrućom komorom tlačna se komora nalazi u litini, pa je zato zagrijana na temperaturu rastaljenog metalata. Tlak se u tlačnoj komori proizvodi klipom (klijnimi tlačni strojevi, sl. 13) ili pomoću komprimiranog zraka koji potiskuje tekući metal u kokilu. Iznimno, takvi strojevi rade i pomoću vakuuma. U strojevima s vrućom komorom lijevaju se slitine olova, kositra, cinka i magnezija.

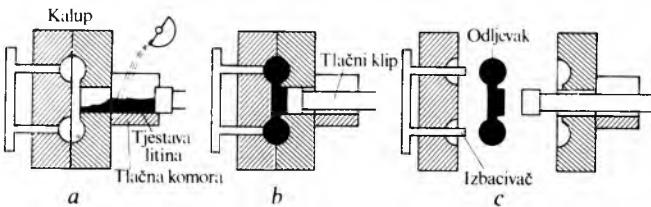


Sl. 15. Centrifugalno lijevanje. a i b vertikalne kokile za lijevanje manjih šupljih rotacijskih dijelova, c horizontalna kokila za lijevanje šupljih rotacijskih dijelova

Sl. 13. Stroj s topom komorom za lijevanje pod tlakom. a stroj prije lijevanja, b ulijevanje litine iz tlačne komore stroja u kokilu, c vađenje odljevka

Strojevi s hladnom komorom (sl. 14) nemaju ugrijanu komoru, pa se litina može ohladiti i prijeći u tjestasto stanje. Litina ulazi pod visokim tlakom kroz uljevni kanal u kokilu. Strojevi s hladnom komorom mogu imati vodoravnu ili vertikalnu tlačnu komoru, a primjenjuju se prije svega za lijevanje aluminijskog i bakrenog lijeva. Tlačni je stroj sastavljen od stroja za lijevanje i naprave za učvršćivanje kokile. Pri lijevanju pod tlakom mora rastaljeni metal protjecati u kokilu velikom brzinom i pod višim tlakom, i to u tlačnim strojevima s vrućom komorom s radnim tlakom 50...250 bara ($50\ldots250 \cdot 10^5$ Pa), a u strojevima s hladnom komorom 300...3000 bara ($300\ldots3000 \cdot 10^5$ Pa).

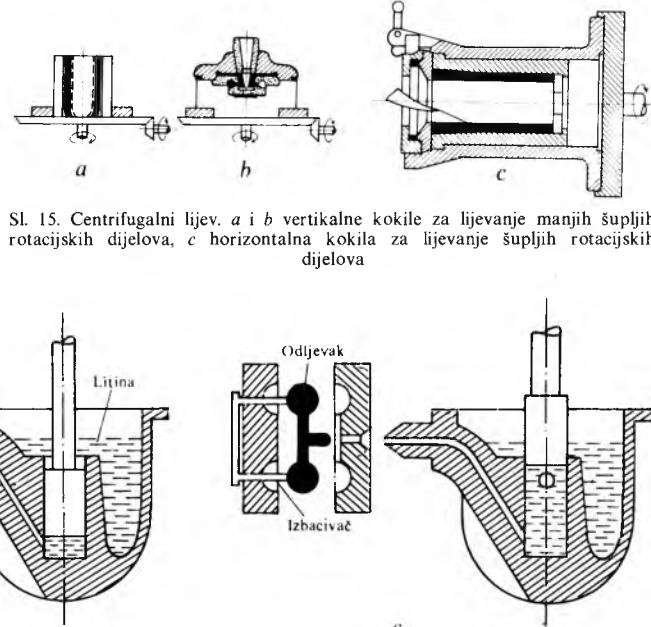
Kokile za tlačno lijevanje sastavljene su od dviju polovicu u kojima je kalupna šupljina koja odgovara obliku odljevka.



Sl. 14. Stroj s hladnom komorom za lijevanje pod tlakom. a ulijevanje litine u cilindar stroja, b potiskivanje tjestaste litine u kokilu, c vađenje odljevka

Obje se polovice kokile otvaraju i zatvaraju posebnim mehanizmom. Pri otvaranju i zatvaranju kokila je naizmjence izložena hlađenju i zagrijavanju te mehaničkim utjecajima. Materijal za jezgre treba pažljivo odabrati, jer su one najviše izložene termičkom opterećenju i kemijskom djelovanju litine. Za izradbu takvih kokila upotrebljavaju se nelegirani ugljični alatni čelici, rjeđe legirani kromni alatni čelici, krom-molibdenski čelici i krom-volframski čelici. Prednosti tlačnog lijevanja su: izravno se iz litine dobiva gotov odljevak, uljevni sustav je malen pa je stoga i gubitak materijala manji, vrijeme izradbe je skraćeno jer otpada kalupljenje i čišćenje, odljevci imaju točne dimenzije i glaću površinu, proizvodnost je veća, a rukovati strojevima mogu i priučeni radnici.

Centrifugalno lijevanje jest postupak kojim se lijevaju rotacijska tijela primjenom centrifugalne sile. Razlikuju se centrifugalno lijevanje i centrifugiranje. Pri centrifugalnom lijevanju rastaljeni se metal, zbog centrifugalne sile proizvedene vrtnjem kokile, razdijeli po stijenkama uljevne šupljine, što omogućuje izradbu šupljih rotacijskih tijela, kojima os simetrije odgovara osi rotacije (sl. 15). Pri centrifugiranju os simetrije odljevka nije i os



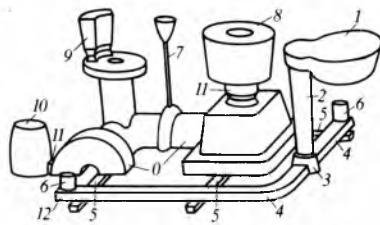
vrtnje, a vrtnjom se poveća uljevni tlak pri lijevanju u kalup, pa se stoga dobiju kvalitetni odljevci točnih dimenzija. Povećanjem obodne brzine znatno se poveća i tlak litine na stijenku kalupa.

Za centrifugalno lijevanje upotrebljavaju se kokile koje se vrte, ili oko svoje vertikalne, ili horizontalne ili nagnute osi. Kalupi koji se vrte oko vertikalne osi služe za manje odljevke, npr. za ležajne prstene kojima je visina manja od polumjera. Za odljevke veće visine a relativno manjeg polumjera upotrebljavaju se kokile koje rotiraju oko horizontalne osi. Za lijevanje većih i teških cijevi služi stroj za lijevanje s osi nagnutom $\sim 5^\circ$. Pri centrifugalnom lijevanju mora djelovanje centrifugalne sile biti veće od sile teže da bi se litina porazdijelila ravnopravno po obodu kalupa. Zato uspješnost lijevanja ovisi o brzini vrtnje, koja mora biti dovoljno velika da se spriječi kapanje litine sa stijenki kokile. Kokile za centrifugalno lijevanje izrađene su od sivog ili čeličnog lijeva. Primjenom kokila postiže se brzo hlađenje i sitnozrnata struktura odljevaka, a odljevci su vrlo visokih mehaničkih svojstava.

LIJEVANJE

Rastaljeni metal ulijeva se kroz sustav kanala u uljevnu šupljinu gdje se skrućuje i poprima oblik te šupljine (sl. 16). Tem-

peratura kalupa mnogo je niža od temperature litine, pa kalup već u toku lijevanja hlađi metal. Nakon što se uljevna šupljina napuni, litina se počinje hladiti i stezati. Stezanje počinje na temperaturi između temperature lijevanja i temperature početka skrućivanja, nastavlja se za vrijeme skrućivanja, pa i nakon završenog skrućivanja sve dok se odljevak potpuno ne ohladi na temperaturu okoliša. Stezanje za vrijeme skrućivanja znači smanjenje volumena, što može biti uzrokom nastanka šupljina unutar odljevka, tzv. usahlina (koje mogu biti koncentrirane na jednom mjestu ili dispergirane kao porozitet u odljevku). Te se pojave sprečavaju pravilnim dopajanjem odljevaka. Zbog stezanja koje nastupa nakon skrućivanja pa do konačnog ohlajenja mogu se u odljevku pojaviti unutrašnje napetosti.



Sl. 16. Odljevak s priljevcima. 0 odljevak, 1 čaška, 2 spust, 3 razdjelnik, 4 privodnik, 5 ušće, 6 troškolovka, 7 odvjetnik, 8 pojilo, 9 doljevak, otvoreno pojilo, 10 slijepo pojilo, 11 spojnik, 12 slijepak

Ulijevni sustav sastavljen je obično od čaške, spusta, razvodnika i ušća (sl. 16). U pojedinim se slučajevima primjenjuje i uljevni sustav posebnih izvedbi. Uljevni sustav mora biti tako izведен da litina protječe bez prekida, da se kalupna šupljina napuni u propisano vrijeme, da gubici topline budu što manji, da zadrži nemetalne uključke (npr. zrak, trosku), da protjecanje litine bude mirno, da kretanje litine u uljevnoj šupljini bude što mirnije i da utrošak materijala na čitav uljevni sustav bude što manji. Brzina kretanja litine ne smije prekoracići kritičku granicu pri kojoj turbulentno strujanje s laminarnim podслоjem prelazi u pravo turbulentno strujanje koje može oštetići stijenke kalupa i pri kojem litina apsorbira plinove.

Uspješnost lijevanja ovisi o brzini uljevanja, o protjecanju litine i o brzini dizanja razine litine u uljevnoj šupljini. Brzina uljevanja u neposrednoj je vezi s masom odljevka, odnosno sa specifičnom debljinom odljevka. Brzinu uljevanja treba prilagoditi brzini hlađenja odljevka, odnosno debljini odljevka, jer nije svejedno da li se lijeva tanka ili debela ploča jednakom mase. Masa litine m koja se lijeva iznosi:

$$m = A v t \varrho, \quad (4)$$

gdje je A presjek ušća, v brzina kretanja litine, t vrijeme lijevanja i ϱ gustoća litine. Brzina kretanja litine iznosi

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (5)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, a h tzv. metalostatska visina. Vrijeme lijevanja t treba prilagoditi masi odljevka m ; ono iznosi prema W. Dietertu:

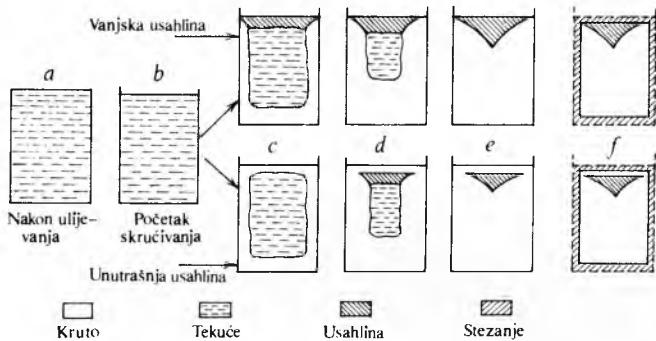
$$t = s \sqrt{m}, \quad (6)$$

gdje je s koeficijent ovisan o vrsti lijeva i debljini odljevka.

Skrućivanje i stezanje. Pri hlađenju od temperature lijevanja do temperature okoliša volumen se litine smanji. Ta se promjena volumena zove stezanje. Razlikuju se tri stupnja stezanja, i to: stezanje u tekućem stanju (do likvidus-linije), stezanje u toku skrućivanja (između likvidus-linije i solidus-linije) i stezanje u skrućenom stanju (ispod solidus-linije). U faznim dijagramima likvidus-linija dijeli područje posve rastaljenog metala (litine) od područja djelomično skrućenog metala, a solidus-linija područje djelomično skrućenog metala od područja skrućenog metala.

Stezanje u rastaljenom stanju djeluje na tok dopajanja odljevka, a pri neusmjerenom skrućivanju i na stvaranje usahlina

(šupljina u odljevku, sl. 17). Iznos stezanja u tekućem stanju ovisi o pregrijanosti litine. U toku skrućivanja, dok je litina u tjestastom stanju, nastaju šupljine i poroziteti. Za vrijeme stezanja nastaje na stijenkama uljevne šupljine sitnozrnati sloj na koji se nastavljaju prema sredini odljevka grublji kristali. Između dendrita (rastućih kristala) nalazi se tjestasti metal koji se steže. Budući da dendriti sprečavaju naknadno dotjecanje litine, koja bi mogla nadoknaditi manjak nastao stezanjem, stvara se između dendrita mikroporozna struktura.

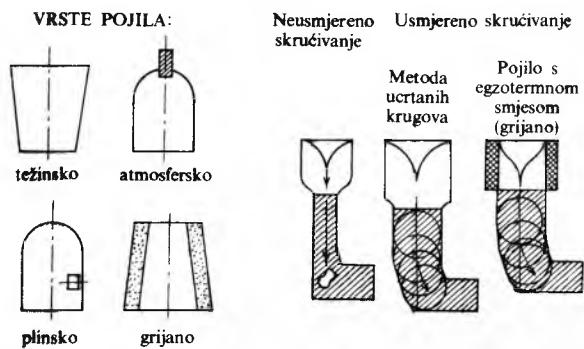


Sl. 17. Stvaranje usahlina za vrijeme skrućivanja. a do f faze postepenog skrućivanja i stvaranja usahlina

Tok skrućivanja odljevaka. Litina se počinje skrućivati uz stijenke kalupa već za vrijeme dotjecanja u uljevnu šupljinu. Tok skrućivanja ovisan je o vrsti i sastavu litine, o vrsti kalupa i o temperaturi pregrijanja. Skrućivanje se može odvijati pri konstantnoj temperaturi (za eutektičke slitine), u temperaturnom intervalu (za krute otopine), ili kombinirano u temperaturnom intervalu i pri konstantnoj temperaturi (za podeutektičke i nad-eutektičke slitine). Pri egzogenom skrućivanju kristalizacija započinje na stijenkama kalupa, a pri endogenom skrućivanju kristali se stvaraju istodobno na cijelom presjeku odljevka. Fronta skrućivanja je pri egzogenom skrućivanju ravna ili hrapava. Endogeno skrućivanje može biti kašasto ili slojasto. Način skrućivanja te oblik i veličina kristala ovise o sastavu litine.

Dopajanje odljevaka. Zbog stezanja u tekućem stanju i za vrijeme skrućivanja dolazi u odljevku do pojave slijeganja, što može uzrokovati pojavu usahlina, i to na mjestima koja se zadnja skrutnu, tj. na mjestima toplinskih čvorišta. Stoga se ugrožena mesta moraju dodatno dopajati rastaljenim metalom iz posebnih pojila, tj. nastala se usahlina popuni litinom iz pojila. Da bi pojilo moglo obavljati svoj zadatak, ono se mora zadnje skrutići. Zato presjek pojila treba biti veći od presjeka odljevka koji se napaja, a oblik pojila takav da za određeni volumen pojila njegova površina bude najmanja. S obzirom na te zahtjeve najbolje odgovaraju pojila okruglog i valjkastog oblika. Prema načinu djelovanja, pojila su težinska, atmosferska, plinska i zagrijavana pojila (sl. 18), a prema konstrukciji otvorena i zatvorena (slijepa).

Težinska su pojila s gornje strane obično otvorena, pa se na površini brzo skrute. Dopajanje odljevaka ovisi o metalostatskom tlaku litine u pojilu, i zato se pojilo nalazi iznad



Sl. 18. Vrste pojila i njihovo djelovanje

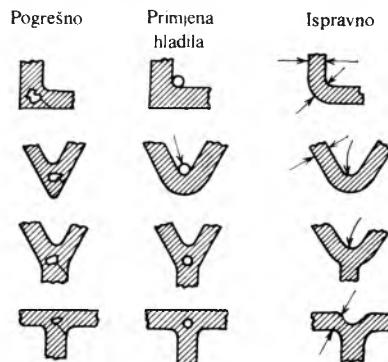
odljevka. Atmosferska su pojila obično zatvorena, a imaju gotovo uvijek oblik polukugle ili valjka. Budući da su zatvorena pojila sa svih strana toplinski izolirana kalupom, to se ona polaganije hlađe i dulje djeluju. Atmosferska pojila imaju u gornjem dijelu ugrađenu poroznu jezgru kroz koju atmosferski tlak može djelovati na litinu u pojilu. Da nema te jezgre, u pojilu bi se pojavio vakuum. U plinskim se pojilima povećava djelotvornost pojila povećanjem tlaka zbog razvijanja plinova iz jezgrice u unutrašnjosti pojila. Izolirana i grijana pojila treba da zadrže metal što dulje u tekućem stanju. Zato se ta pojila oblažu tvarima koje su loši vodiči topline, ili koja još i razvijaju toplinu. Takav se način toplinske zaštite primjenjuje i pri lijevanju čelika u kokile. Zagrijavanjem pojila najlakše se postiže da se ono zadnje skruti. Pojila se griju tako da se na otvoreno pojilo sipa neki egzotermni posip, ili da se pojilo obloži nekom egzoternom tvari. U dodiru s litinom egzoterno sredstvo reagira i pri tom razvija toplinu. Egzoterna su sredstva sastavljena od aluminija, kalcij-silicija ili fero-silicija koji su nosioci egzotermne reakcije, od oksidanta (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) koji olakšavaju reakciju i fluorida (CaF_2 , NaF) kojima se pojačava egzoterna reakcija. Sastav egzoternih sredstava treba prilagoditi veličini i složenosti odljevka. Treba paziti da se za vrijeme zagrijavanja litina ne onečisti i da u nju ne prodrui proizvodi izgaranja.

Veličina pojila određuje se pomoću modula M_0 ili faktora oblika odljevka F_0 . Modul odljevka iznosi $M_0 = V/A$, gdje je V volumen, a A površina odljevka. Faktor oblika odljevka izračunava se prema dimenzijama odljevka pomoću formule $F_0 = (\text{duljina} + \text{širina})/\text{debljina}$. Iz modula ili faktora oblika odljevka određuje se modul pojila M_p ili faktor oblika pojila F_p , koji treba da budu za 20% veći, tj. $M_p = 1,2 M_0$ i $F_p = 1,2 F_0$. Pravilnim dimenzioniranjem ($M_p = 1,2 M_0$) ili grijanjem pojila egzoternim sredstvima postiže se sporo skrućivanje pojila. Ako pojilo nije grijano, tada njegova masa treba biti gotovo jednaka masi složenog odljevka. Primjenom egzoternih sredstava pojilo je manjih dimenzija, a stupanj korisnosti je veći.

Toplinske napetosti nastaju u odljevcima zbog skupljanja odljevka. Unutrašnje napetosti mogu biti tako velike da odljevak pukne ili da dođe do trajne deformacije. Da se izbjegnu deformacije, odljevak treba konstruirati tako da hlađenje bude što ravnomjernije kako bi napetosti bile što manje.

Pri jednakim napetostima deformacije mogu biti različite, tj. elastične ili plastične, već prema temperaturi pri kojoj se pojavljuju. Do temperature 400°C nastupaju pretežno elastične deformacije, ali i plastične nisu isključene. Između 400°C i 600°C nastaju elastične i plastične deformacije, a iznad 600°C prevladavaju plastične deformacije.

Konstrukcija odljevka. Pri konstrukciji odljevaka treba komplikirane detalje podijeliti na više jednostavnih. Oblik odljevka mora se prilagoditi sastavu litine, njezinoj liviljivosti i stezanju.



Sl. 19. Greške u odljevku zbog gomilanja litine

Veoma je važan omjer između debljine i duljine odljevka. Oblik odljevka neka bude što jednostavniji, bez naglih prijelaza, da litina može bez poteškoća ispuniti uljevnu šupljinu. Treba voditi računa i o procesu hlađenja i skrućivanja odljevka. Debljina stijenki mora biti što ravnomjernija. Nagli prijelazi

pobuđuju unutrašnje napetosti, neravnomjernu tvrdoću, usahline i sl., a i tehnologija izradbe kalupa je složenija jer se u kalup trebaju ugraditi rashladna tijela. Spojevi pojedinih stijenki i svi prijelazi moraju biti zaobljeni. Polumjere prijelaza treba prilagoditi debljini stijenke odljevka.

U odljevku će se pojaviti usahline na mjestima gdje je litina ostala najdulje u tekućem stanju. Te se točke zovu »vrucne točke« odljevka. Vruće se točke pojavljuju u odljevku na mjestima gomilanja masa, a određuju se metodom ucrtanih krugova (sl. 18). Opasna mjesta na odljevku, odredena na taj način, obično su na prijelazima i u uglovima odljevaka oblikovanih u obliku slova L, V, Y ili T (sl. 19).

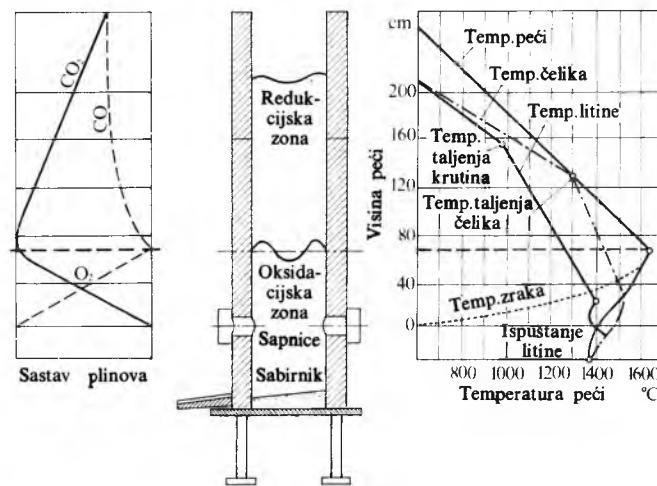
Procesi u pećima za taljenje

Ljevaoničke peći za taljenje mogu se, prema konstrukciji i načinu zagrijavanja uloška, razvrstati na jamaste peći, plamene peći s ognjištem, elektrolučne peći, induksijske peći, električne peći s grafitnim otpornikom i peći s loncem (tiganjske peći). U ljevaonicama sivog i bijelog lijeva prevladavaju kupolne peći ili tzv. kupolke. Kvalitetni čelični lijev tali se u lučnim i induksijskim električnim pećima. Bakar i bakrene slitine tale se u rotacijskim bubenjastim pećima, u induksijskim električnim pećima i u pećima s loncem. Za taljenje aluminija i njegovih slitina služe peći s loncem i električne peći s otpornikom. O konstrukciji ljevaoničkih peći za taljenje v. *Mehanizacija i uređaji ljevaonica*.

Kupolke su peći u koje se može upuhavati hladni ili topli zrak za izgaranje.

Kupolke s hladnim zrakom razvrstavaju se na kupolke bez pretpećice (litina se ispušta neposredno kroz otvor za ispuštanje metala) i na kupolke s pretpećicom. U pretpećici se litina homogenizira i očisti. Kupolka s pretpećicom služi za pripremu litine s nižim postotkom ugljika i ujednačenim kemijskim sastavom radi lijevanja većih odljevaka. Kupolke se proračunavaju prema učinku taljenja, koji iznosi 8–10 tona litine po kvadratnom metru površine presjeka peći i satu.

Čelični cilindar kupolke ozidan je iznutra vatrostalnom izolacijom, npr. kiselom (ili bazičnom) opekom ili nabijenom gnječenom kiselom masom. Debljina izolacije ovisi o veličini peći. Između vanjskog plašta i izolacije predviđen je dilatacijski razmak da bi se opeka pri promjenama temperature mogla širiti i stezati. U kupolnim pećima može se bez poteškoća taliti sivi i bijeli lijev s većim postotkom ugljika. Mali se sadržaj ugljika u kupolkama teže postiže jer je litina u izravnom dodiru s koksom.



Sl. 20. Temperatura i sastav plinova u kupolnoj peći

Za vrijeme taljenja stvara se u unutrašnjosti peći više zona, i to zona predgrijavanja, zona taljenja (reduksijska zona) i zona izgaranja (oksidacijska zona, sl. 20). Zona troske i zona litine nalaze se u prostoru za sabiranje litine. Gornja je granica zone taljenja na 1250°C kad se zasip počinje

taliti. Donju granicu određuje najviša temperatura u peći koja se poklapa s linijom najvećeg postotka CO_2 i najmanjeg postotka O_2 u plinu. Zona taljenja ima konveksno koničan oblik i visoka je 300 do 700 mm. Visina i oblik tog dijela peći, koji je veoma važan za proizvodnost, ovise o količini i tlaku zraka, o reaktivnosti koksa te o broju sapnica i njihovu rasporedu.

U zoni predgrijavanja slojevi koksa i zasipa spuštaju se u peći na niže i preuzimaju toplinu od plinova. U zoni taljenja lomljevina se sivog lijeva i sivo sirovo gvožđe brzo rastale, dok se čelični otpaci tale tek pri višim temperaturama. Kapljice su rastaljenog metala u dodiru s vrućim plinovima i užarenim koksom tako da brzo raste njihova temperatura. Zagrijavanje je to jače što je viša temperatura u toj zoni i što je ta zona veća. U zoni izgaranja oksidiraju se pojedini elementi, u prvom redu silicij i mangan, koji prelaze u trosku, a u litini djelomično se oksidira ugljik. Pri hladnom zraku temperatura iznad sapnica iznosi 1650–1700 °C.

Proizvodnost kupolne peći S , izražena u tonama na sat, može se izračunati pomoću jednadžbe

$$S = \frac{600Z}{Kzk}, \quad (7)$$

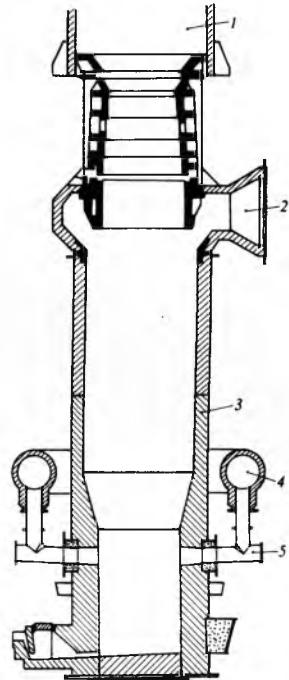
gdje je Z količina zraka u m^3 na minutu, K masa koksa na 100 kg litine, z količina zraka u m^3 potrebna za izgaranje 1 kg koksa, a k količina ugljika u koksu.

Troska mora za vrijeme taljenja vezati pepeo goriva (1–1,1% metalnog zasipa), okside starog lijeva (0,5% metalnog zasipa), izgorjele elemente kao npr. silicij, mangan i željezo (1–1,3% metalnog zasipa), oblogu peći koja se istali (1–2% metalnog zasipa) i ljevarski pjesak koji je zaostao na kružnom materijalu. U kupolki ima približno 5% nečistoća koje su kisele (pepeo, koks, pjesak i ozid). Da se snizi talište troske i smanji njena viskoznost, mora se zasipu dodati krečnjak, i to 3% od kovinskog uloška, odnosno 25–40% od mase koksa. Količina troske iznosi približno 4–8% metalnog zasipa. Kisela troska sadrži 45–50% SiO_2 , 5–18% Al_2O_3 , 20–40% CaO i 2–10% FeO .

Mjere za poboljšanje rada kupolke. Praksa je pokazala da je neekonomično postizanje viših temperaturu pomoću većih dodataka koksa i zraka. Više temperature mogu se, međutim, postići dodatkom HCC-koksa, kalcij-karbida, dodatnim upuhavanjem kisika, dodatnim loženjem, ili uz predgrijavanje zraka. Dodatkom HCC-koksa (kok s visokim postotkom ugljika) povećava se temperatura litine (za 50 °C) i proizvodnost, a smanji potrošak koksa i udio sumpora u litini. HCC-koks ima mali postotak pepela, malu poroznost i veći postotak ugljika, pa se njime poboljšava omjer izgaranja. Ako se doda 1,5–2% kalcij-karbida CaC_2 , smanjuje se u kiseloj kupolci za 20–30% potrošnja zasipnog koksa, smanjuje se u litini udio sumpora, proizvodnost kupolke se poveća, a temperatura litine naraste za 40 °C. Upuhavanjem kisika u kupolku poveća se temperatura litine i proizvodnost, a smanjuje utrošak koksa i udio sumpora u litini. Odgor silicija, mangana i ugljika je veći. Upuhavanje kisika u kupolku je skupo, pa se stoga primjenjuje samo ako ne postoje druge mogućnosti da se povisi temperatura litine. Kisik se može upuhavati zajedno sa zrakom ili odvojeno. Dodatnim loženjem uljem ili prirodnim plinom smanjuje se potrošak koksa. Gorivo se može dodatno dovoditi u peć kroz postojeće sapnice ili kroz dodatne mlaznice iznad sapnica. Pri tom se temperatura litine bitno ne mijenja, ali se potrošak koksa smanji za 40–50%. Dodatno loženje je uspješno samo u većim pećima.

Kupolke s toplim zrakom. Važna prednost kupolki s toplim zrakom jest povišena temperatura litine, što je posljedica intenzivnijeg izgaranja ispred sapnica. Omjer se izgaranja u peći time pogorša. Zona taljenja je visoka svega 200 do 300 mm, leži 100–250 mm iznad sapnica, a njezina širina ovisi o temperaturi vrućeg zraka. Oblik suvremenih kupolki konstruiranih za rad s toplim zrakom razlikuje se od oblika kupolki s hladnim zrakom. Sapnice i zračni vijenac su termički izolirani. Plašt se peći hlađi zrakom ili vodom u visini zone taljenja. Vodenou

hlađenje zone taljenja pokazalo se dobrim ako taljenje traje duže od 8 sati. Unutrašnji profil kupolke s toplim zrakom (sl. 21) nije cilindričan kao u običnim kupolkama, već sliči profilu visoke peći. Ozidana izolacija iznad zone taljenja razmjerno je malena. Takav je profil peći potreban zato što je trošenje obloge u zoni taljenja u početku vrlo brzo.



Sl. 21. Presjek kupolne peći na topli zrak s kiselim oblogom. 1 ubacivanje zasipa, 2 izlaz grotlenih plinova, 3 obloga, 4 zračni vijenac, 5 sapnice

Već prije više godina počele su se uz kisele kupolke upotrebljavati i bazične. Praksa je brzo pokazala da je gradnja kupolki s toplim zrakom i s bazičnom oblogom složena. Zato se grade bazične peći koje u zoni taljenja i u cilindričnom prostoru nemaju izolaciju, prostor ispod sapnica ima izolaciju od ugljenih blokova ili ugljene mase, a dno je od nabijene korundne mase.

U kupoljkama s vrućim zrakom isisavaju se plinovi u gornjem dijelu peći, neposredno ispod zasipne površine. Taj se plin obično odvodi u rekuperator radi ekonomičnije proizvodnje toplog zraka. Plin se može voditi i kroz napravu za čišćenje. Postoje i uređaji koji sišu plin jedino radi čišćenja, a zatim ga očišćenog zapale i puštaju u atmosferu. Tada se topli zrak proizvodi u posebno loženom predgrijalu zraka, a ne iskorišćuju se plinovi nastali izgaranjem u kupolki.

Plamene peći s ognjištem. Bubnjaste rotacijske peći u ljevaonicama lože se naftom, zemnim plinom ili ugljenom prašinom. Kapacitet tih peći iznosi 500 do 5000 kg. Čelični bubanj peći ozidan je iznutra kiselim vatrostalnom opekom ili masom. Izolacija mora izdržati barem 120 taljenja. Peć je položena horizontalno, na čelnoj strani nalazi se gorionik, pa plamen i plinovi izgaranja prolaze uzduž peći zagrijavajući zasip. Plinovi temperature do 1000 °C odvode se s izlazne strane peći u rekuperator u kojem se zrak zagrijava do 500 °C. Peć se njiše ili rotira oko horizontalne osi da bi se tako iskoristila toplina svoda. Izolacijska obloga peći može biti kisela, bazična ili neutralna.

Stabilne plamene peći po konstrukciji su starije i sada se rjeđe upotrebljavaju. U usporedbi s kupolkom, stabilne plamene peći lošije iskorišćuju toplinu. Upotrebljavaju se za lijevanje valjaka i kovkastog (temperiranog) lijeva, tj. za dobivanje litine s malim sadržajem ugljika. Osim ugljenom i koksom, lože se zemnim plinom i naftom. Peći novije konstrukcije imaju ugrađeno predgrijalo zraka.

Martinova peć (martenk) je u neprekidnom pogonu vrlo ekonomična, ali se rijetko upotrebljava. Prikadna je za nelegirani i malo legirani čelični lijev, posebno za lijevanje masivnih odjevaka (v. Čelik, TE 3, str. 60).

Električne peći za taljenje sve se više upotrebljavaju u ljevarnicama, jer u usporedbi s ostalim pećima trebaju manje prostora, a i rad s njima je jednostavniji. Prema načinu rada razlikuju se elektrolučne peći, induksijske električne peći i otporne električne peći (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 182).

Elektrolučne peći imaju veliku specifičnu proizvodnost i vrlo su prikladne za pogone u kojima se kvaliteta lijeva često mijenja. U tim se pećima mogu talići nelegirani i legirani čelici. Temperatura lijevanja može se prema potrebi prilagoditi zahtjevima. Masa uloška (kapacitet) elektrolučnih peći ovisi o veličini peći i iznosi obično 5...30 t. Iskoristivost po jedinici mase čelika veća je nego u Martinovim pećima, a odgor (gubitak zbog izgaranja) je manji (v. *Čelik*, TE 3, str. 63).

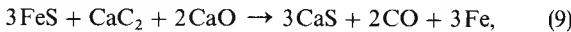
Elektrolučne peći mogu biti s direktnim i indirektnim lukom. Direktna elektrolučna peć ozidana je bazičnom ili kiselom oblogom, a električni luk se uspostavlja izravno između grafitnih elektroda i metalnog uloška. Peći kapaciteta iznad 4 tone imaju pomican svod, što omogućuje mehanizirano punjenje. Budući da vrijeme taljenja ovisi o snazi transformatora, to su suvremene peći opremljene transformatorima velike snage. U pećima s indirektnim lukom luk se uspostavlja između dvije elektrode koje su smještene iznad taljevine. Ta peć radi slično kao plamena peć, jer se litina grije isijavanjem luka i zidova peći. Elektrolučna peć prikladne konstrukcije svestrano je upotrebljiv ljevaonički uređaj koji može, neovisno o kvaliteti uloška, rentabilno svladati sav program današnje proizvodnje čelika.

Taljenje u elektrolučnoj peći ima dvije faze: oksidacijsku i rafinacijsku, a radi se sa dvije troske. Prvom, oksidacijskom troskom odstrane se iz litine ugljik, silicij, mangan i fosfor (oksidacijska, crna ili fosforna troska). Nakon što se ispusti prva troska, ubacuje se druga, dezoksidacijska (bijela ili karbidna) troska, kojom se odstrani sumpor i dezoksidira litina. Druga je troska veoma bazična. Rafinacijom litine uklanjaju se kisik i sumpor. Kisik odstrane dezoksidanti i rafinacijska troska (difuzijska dezoksidacija).

Bijela se troska upotrebljava ako postoji opasnost pougljičenja litine. Njome se uklanja sumpor prema:



Karbidna se troska razlikuje od bijele troske po tome što sadrži više koksa, i što se zbog djelovanja visokih temperatura stvara kalcij-karbid koji uklanja iz taline sumpor:



pa u litini ostane 0,007...0,01% sumpora.

Indukcijske peći manje su od elektrolučnih peći, imaju veliku specifičnu proizvodnost, a upotrebljavaju se u prvom redu za proizvodnju posebno legiranih vrsta čelika. Za dobivanje topline primjenjuje se u induksijskim pećima struja mrežne ili srednje frekvencije. Indukcijske su peći većinom ozidane kiselom oblogom, i jedino se za proizvodnju visokolegiranih čelika upotrebljavaju i bazične peći (v. *Čelik*, TE 3, str. 65).

Indukcijske elektropeći razvrstavaju se prema radnoj frekvenciji na peći za mrežnu frekvenciju 50 Hz (s kanalom i loncem), na induksijske peći za srednju frekvenciju 500...10000 Hz (s loncem i poklopcom) i na induksijske peći za visoku frekvenciju iznad 10000 Hz (s loncem).

Niskofrekvenčna induksijska peć s kanalom i željeznom jezgom ima zidan lonac (korito) na koji je priključen kanal. Cijev kanala je obuhvaćena željeznom jezgom na koju je namotan mrežni (primarni) namot. Litina u kanalu predstavlja kratkospojen sekundarni namot. Nakon što se peć djelomično napuni tekućom litinom, uklopi se električna struja. Zbog velikih struja litina se u kanalu zagrijava. Djelovanje magnetskog polja potiskuje ugrijanu litinu u korito gdje litina predaje toplinu krutom ulošku, i tako ga topi.

Indukcijske peći s loncem bez željezne jezgre grade se za niske, srednje i visoke frekvencije. Rade na principu transformatora bez željezne jezgre. Kao primar tog transformatora služi vodom hlađeni bakreni namot koji okružuje lonac napravljen od mase, dok sekundar predstavljaju pojedini komadi uloška; što su komadi veći, to frekvencija može biti niža. Prednost je

indukcijskih peći da na tonu lijeva troše u prosjeku manje električne energije od elektrolučnih peći iste veličine.

Otporne elektropeći s grafitnim otpornikom. Električna struja prolazi kroz grafitni otpornik u peći, pa se električna energija pretvara u toplinu koja služi za zagrijavanje uloška. Program proizvodnje tih peći vrlo je raznolik. One služe za topljenje čeličnog lijeva, sivog lijeva, bronce, mjedi i drugih metala, a također mogu poslužiti za pregrijavanje, legiranje i rafinaciju tekućeg uloška (do 2 tone), npr. iz kopolke. Peć nije osobito prikladna za taljenje nelegiranog čeličnog lijeva jer je talište čistih čeličnih otpadaka visoko, a ni troska se ne može mijenjati.

Peći s loncem za taljenje (tiganjske peći) primjenjuju se u prvom redu u ljevarnicama željeznih metala. Lože se koksom, prirodnim plinom ili naftom. Razlikuju se stabilne i nagibne peći. Peći s loncem grade se za uložak od 100 do 600 kg. Za taljenje većih količina rađe se upotrebljavaju bubenjaste rotacijske peći. Lonac za taljenje obično je od grafita. Sastav i glazura lonca prilagođeni su kovini koja će se talići. Grafitni se lonac mora prije upotrebe žariti. Za taljenje aluminija i magnezija primjenjuju se željezni lonci premašani zaštitnim premazom.

Otporne elektropeći s loncem imaju na svodu i stijenama zagrevne otpornike (spirale). Po konstrukciji mogu biti stabilne ili nagibne. Ozidane su šamotom. Grade se za uložak mase 300...3000 kg. Upotrebljavaju se u prvom redu za taljenje aluminija.

DORADA ODLJEVAKA

Kad je lijevanje završeno, odljevci se moraju hladiti neko vrijeme u kalupu. Naglo hlađenje na zraku uzrokovalo bi unutrašnje napetosti, deformacije i pukotine na odljevcima. Zato se kalup razbija tek kad se odljevak ohladi na određenu temperaturu. Prije nego što se odljevak dalje obrađuje treba ga očistiti i odrezati priljevke.

Dvije su radne operacije čišćenja odljevka: grubo čišćenje i završno čišćenje. Grubim čišćenjem skida se s odljevka pjesak, uklanjanju se jezgre i jezgrene armature i odrežu priljevci. Pri završnom čišćenju skidaju se s površina odljevka zadnji ostaci pjeska, da se dobije čist i gladak odljevak spremан за dalju strojnu obradu.

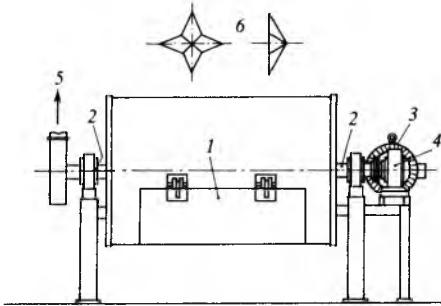
Grubo čišćenje. Pješčani kalup se istrese iznad rešetke tako da pjesak pada kroz rešetku u spremište starog pjeska. Za istresanje kalupa služe vibratori koji se učvrste na kalupnike, odnosno vibracijske i istresne rešetke. Jezgra se iz šupljina odljevka odstranjuje pneumatskim čekićem, vibratorom ili mlazom vode. Rad s ručnim čekićima je dugotrajan, posebno ako su jezgre velike s jakim jezgrenim armaturama. Stoga je proizvodnost rada s pneumatičnim čekićima mnogo veća. Čišćenje mlazom vode primjenjuje se za duge i velike odljevke s više jezgara. Takvi bi se odljevci inače teško mogli očistiti čekićima ili vibratorima, a osim toga bi se razvijalo mnogo prašine, što se želi izbjegći.

Završnim čišćenjem u bubenjevima za čišćenje ili sačmanjem, odnosno pjeskarenjem, odstrane se zadnji ostaci pjeska s površine odljevaka.

Bubanj za čišćenje, promjera ~1500 mm i duljine ~3000 mm, rotira brzinom ~25 min⁻¹. Za pogon bubenja služi elektromotor (sl. 22). Zbog rotacije bubenja odljevci smješteni u bubenju međusobno se taru, pa se trenjem skida pjesak s površina odljevaka. U bubenj se stavlja i određena količina tvrdih, metalnih, zvjezdolikih komada promjera 10...15 mm. Ti oštiri komadi skidaju pjesak u šupljinama odljevaka i s onih površina koje zbog svog oblika ne mogu da dođu u međusobni dodir. Radi manjeg stvaranja buke tokom rada, unutrašnja strana bubenja je obložena gumom.

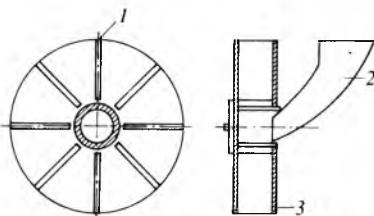
Čišćenje pomoću sačme je postupak koji se danas najčešće upotrebljava za čišćenje pjeska s površine odljevaka. Strojevi za sačmanje (sačmalice) imaju rotor s lopaticama koje velikom brzinom nabacuju zrna metalne sačme na površinu odljevaka. Veličina zrna i vrsta sačme ovise o veličini i materijalu odljevaka. Čelična sačma veličine zrna 0,8...1,2 mm služi za

čišćenje odljevaka od željeznih slitina (sivi lijev, čelični lijev, kovasti lijev, žilavi lijev). Odljevci od obojenih metala i tvrdih lakih metala čiste se čeličnom sačmom zrna $0,1 \dots 0,6$ mm, a za odljevke metala male tvrdoće upotrebljava se aluminijска visokosilicijska sačma. Sačma se dovodi u središte rotora (sl. 23) koji se vrti brzinom ~ 3000 min $^{-1}$, pa lopatice rotora zahvataju zrna sačme i izbacuju ih brzinom ~ 75 m/s na odljevak. Količina izbačenih zrna ovisi o promjeru rotora i broju njegovih lopatica. Rotor promjera 300 mm s dvije lopatice izbacuje do 25 kg/min sačme, a s osam lopatica i do 100 kg/min. Za čišćenje jedne tone odljevaka utroši se 2 \dots 5 kg sačme.



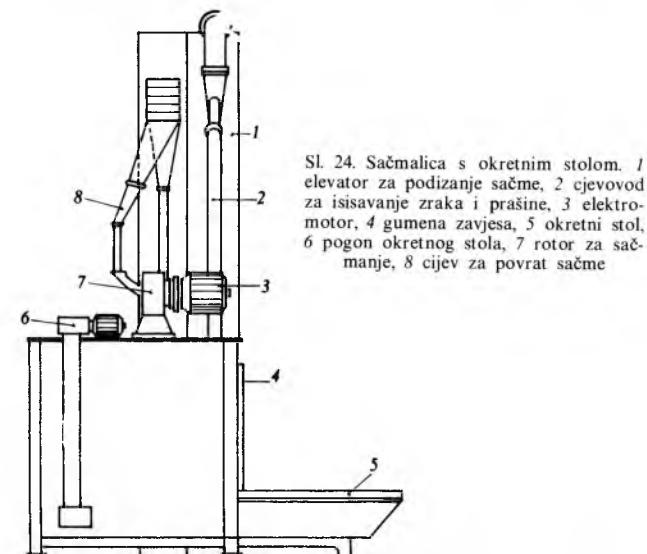
Sl. 22. Bubanj za čišćenje odljevaka. 1 vrata za punjenje bubnja, 2 šupljji rukavac, 3 elektromotor, 4 reduktor, 5 isisavanje prašine, 6 zvjezdica

Prema konstrukciji razlikuju se sljedeći tipovi strojeva: sačmalica s okretnim stolom, sačmalica s beskrajnom trakom, tunelska sačmalica i komorna sačmalica.



Sl. 23. Rotor za nabacivanje sačme. 1 lopatica, 2 lijevak za sačmu, 3 disk rotora

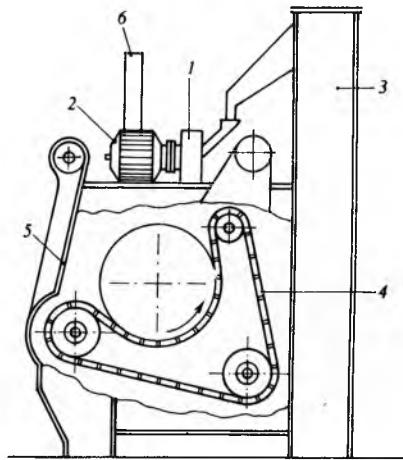
Sačmalica s okretnim stolom (sl. 24) služi za čišćenje manjih, plosnatih i lomljivih odljevaka. Glavni dijelovi stroja jesu: okretni stol na kojem su poslagani odljevci, komora za čišćenje koja pokriva 2/3 stola i rotor smješten na stropu komore. Okretanjem stola odljevci prolaze kroz komoru gdje ih čisti mlaz sačme, a zatim kad izadu iz komore, treba ih okretati da im se i druga strana izloži sačmi, pa onda ponovno ulaze u komoru.



Sl. 24. Sačmalica s okretnim stolom. 1 dovod sačme, 2 cjevovod za isisavanje zraka i prašine, 3 elektromotor, 4 gumeni zavjesa, 5 okretni stol, 6 pogon okretnog stola, 7 rotor za sačmanje, 8 cijev za povrat sačme

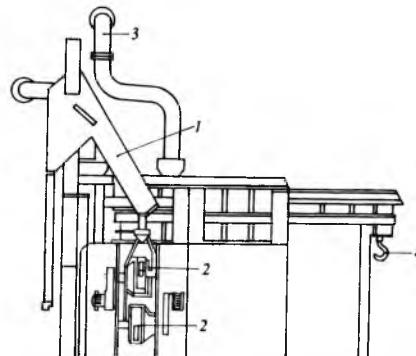
To se ponavlja nekoliko puta sve dok odljevak ne bude sa svih strana potpuno čist.

Sačmalica s beskrajnom trakom (sl. 25) služi za čišćenje sitnih, masivnih i kompaktnih odljevaka. U komori za čišćenje nalazi se pokretna beskrajna traka, postavljena tako da tvori neku vrstu korita u koje se ulažu odljevci. Na vrhu komore je rotor za nabacivanje mlaza sačme. Kad se traka kreće, odljevci se prevrću i miješaju, pa su tako sa svih strana izloženi mlazu sačme.



Sl. 25. Sačmalica s beskrajnom trakom. 1 rotor, 2 elektromotor, 3 elevator za podizanje sačme, 4 metalna beskrajna traka, 5 vrata za ubacivanje odljevaka, 6 cijev za isisavanje zraka i prašine

Tunelska sačmalica ili sačmalica s ovjesnim transporterom (sl. 26) služi u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji srednje velikih odljevaka. Taj je stroj prikladan i za čišćenje osjetljivih i lako lomljivih odljevaka, kao npr. blokova motora, glava motora, posuda s tankim stijenkama itd. Ovješeni o kuke transportera odljevci ulaze u tunel za čišćenje. Na stropu i bočnim stijenama tunela nalaze se rotori za sačmanje, tako da je odljevak izložen mlazu sačme sa dvije ili tri strane.



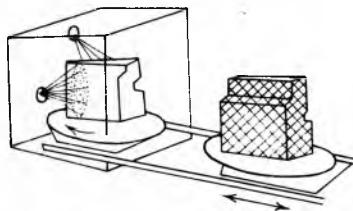
Sl. 26. Sačmalica s ovjesnim transporterom. 1 dovod sačme, 2 rotor, 3 cijev za isisavanje prašine, 4 kuka ovjesnog transportera

Komorna sačmalica (sl. 27) služi za čišćenje srednjih i teških odljevaka. Odljevak, položen na pomični stol, uveze se u komoru za čišćenje. Rotori za sačmanje su smješteni na stropu i bočnim stijenama komore. Budući da je stol okretni, odljevak se može u komori zajedno sa stolom okreći, pa se tako očisti sa svih strana, osim one kojom leži na stolu.

Pjeskarenje se nekada upotrebljavalo za čišćenje odljevaka, ali je taj postupak danas gotovo napušten i zamijenjen sačmanjem. Pjeskarenje danas služi samo za čišćenje odljevaka od mjeđi i nekih lakih metala koji su toliko mekani da bi im sačmanje oštetilo površinu.

Uredaji za pjeskarenje rade pomoću komprimiranog zraka što ga dobavlja kompresor. Posebna mlaznica bacu mlaz kre-

menog pijeska na površinu odljevka i tako ga čisti. Pri tom se pijesak usitnjava, stvarajući velike količine kremene prašine. Pjeskarjenje je skuplje od sačmanja zbog relativno velikog utroška energije za proizvodnju komprimiranog zraka i odvod nastale prašine; kremeni se pijesak može upotrijebiti samo za jedno čišćenje, dok metalna sačma služi za višekratnu upotrebu, a i čišćenje pijeskom traje duže nego čišćenje sačmom.



Sl. 27. Sačmalica s komorom

Pogreške na odljevcima. Kvaliteta dovršenog odljevka ovisi o mnogobrojnim faktorima koji u različitim oblicima i na različite načine sudjeluju u tehnološkom procesu proizvodnje odljevaka. Svaki od tih faktora zasebno, ili interakcija više faktora zajedno, može biti uzrok grešaka na odljevku. Zadatak je kontrolje kvalitete dovršenih odljevaka da različitim metodama pronađe moguće greške i da ustaniovi da li odljevak zadovoljava propisane zahtjeve i standarde.

Prema najnovoj međunarodnoj klasifikaciji, greške se na odljevcima svrstavaju u sedam razreda. Svaki se razred dalje raspoređuje na skupine, svaka skupina na podskupine, a podskupine na pojedinačne greške. Tom je klasifikacijom definirano 110 pojedinačnih grešaka, raspoređenih u razrede na sljedeći način:

Razred A000. Metalne izrasline: suvišne pločaste ili masivne izbočine; neravnomjerna površina zadebljanja; udubljenja uljevine šupljine koja su djelomično ili potpuno ispunjena skrućenom litinom.

Razred B000. Šupljine: odljevak ima u unutrašnjosti ili na površini jednu ili više šupljina koje potječu od zraka ili plinova, odnosno posljedica su slijeganja.

Razred C000. Prekinuti odljevak: masa odljevka je djelomično ili potpuno prekinuta; položaj prekida prema površini odljevka može biti proizvoljan; pojedini dijelovi mogu se još držati skupa, mogu biti razmaznuti ili potpuno odvojeni.

Razred D000. Površinski nedostaci: površine odljevaka nisu dovoljne glatke ili homogene, ili se na njima nalaze nabori, plitke jamicice ili plitki uključci. Ako su te greške većih razmjera, onda se nazivaju šupljinama (B000) ili uključcima (G000).

Razred E000. Nepotpuni odljevak: nedostaje dio odljevka, bilo zbog nedovoljno ispunjene uljevine šupljine, bilo zbog prijeloma.

Razred F000. Netočnosti mjera i oblika: odljevak ima pravilan geometrijski oblik, ali su mu dimenzije netočne; geometrijski oblik odljevka je netočan i izvitoperen.

Razred G000. Uključci i heterogenost: u osnovnoj se masi nalaze strana tijela (uključci metala, pijeska, troske, oksida

itd.) s izdancima ili bez njih na površini. Heterogenošću se smatra nejednak izgled i raspored svojstava u odljevku (strukturne anomalije).

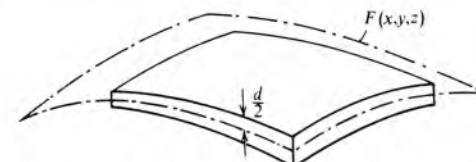
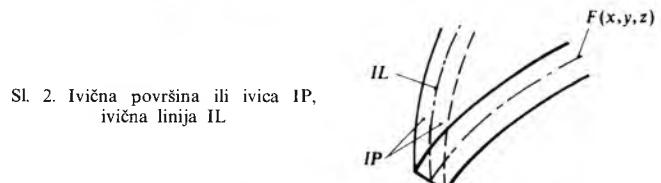
Popravljanje odljevaka. Neke se greške na odljevcima mogu i popraviti. Površinske šupljine koje kvare izgled odljevka popunjavaju se pastom (kitom) od metalnog praha i veziva. Veća se porozna mjesta zatrvaju nanošenjem i ubrizgavanjem istorodnog rastaljenog metala (metализiranje), a sitne se poroznosti impregniraju prikladnim tekucinama koje ulaze u mikropore i tu čvrstu. Elektičnim ili plinskim zavarivanjem mogu se popuniti i zatvoriti šupljine i pukotine. Nepotpuni odljevci popravljaju se ljevačkim zavarivanjem tako da se dio odljevka, koji nedostaje, naknadno dolije (sl. 28). Taj se postupak najviše primjenjuje za popravke velikih odljevaka od sivog lijeva. Slomljeni ili naprsli odljevci, koji kasnije neće biti mehanički opterećeni, mogu se popraviti lemljenjem.

Da li će se neki odljevak s greškom popravljati, i koji će se postupak primijeniti za popravak, ovisi o vrsti greške i namjeni odljevka.

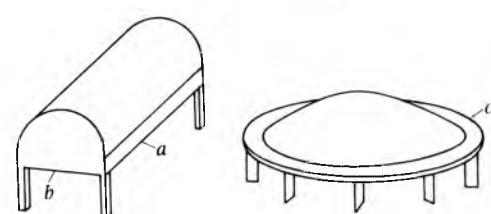
LIT.: R. Girard, La fonderie sous pression. ATF, Paris 1953. — E. Brumhuber, Leicht- und Schwermetall-Kokillenguss. Schiele Schön, Berlin 1958. — G. Sömigli, Fonderia meccanizzata. AIM, Milano 1960. — F. Roll, Handbuch der Giesserei-Technik. Springer Verlag, Berlin 1963. — F. Hoffmann, Technologie der Giessereiformstoffe. Georg Fischer, Schaffhausen 1965. — W. R. Heine, C. P. Rosenthal, Principles of metal casting. McGraw-Hill, New York 1967. — V. Kondic, Metallurgical principles of founding. E. Aron, London 1968. — P. R. Beeley, Foundry technology. Butterworths, London 1972. — International atlas of casting defects. American Foundrymen's Society, Des Plaines 1974.

C. Pelhan

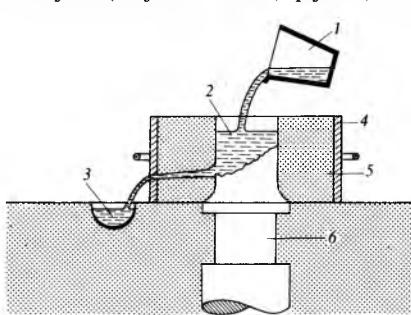
LJUSKE, tankozidne zakriviljene noseće konstrukcije sa prostornim prenošenjem opterećenja (v. *Armiranobetonske konstrukcije*, TE 1, str. 403). U odnosu na ostale dimenzije ljske njena je debljinu vrlo mala. Skup tačaka koje polove debljinu ljske obrazuje srednju površinu ljske (sl. 1). Granična površina ljske, koja je upravna na srednju površinu ljske, naziva se ivičnom površinom ili ivicom, a ivičnom linijom pre-

Sl. 1. Srednja površina ljske $F(x,y,z)$ 

Sl. 2. Ivična površina ili ivica IP, ivična linija IL

Sl. 3. Ivični element a , ivična dijafragma b , ivični prsten c

sečna linija ivične i srednje površine (sl. 2). Ljske su obično ograničene ivičnim elementima (a na sl. 3) i ivičnim dijafragmama (b na sl. 3), ili su obuhvaćene ivičnim prstenom (c na sl. 3).



Sl. 28. Ljevačko zavarivanje sivog lijeva. 1 lonac, 2 rastaljeni metal, 3 bazen za višak materijala, 4 kalupnik, 5 pijesak, 6 odljevak