

Primjena termografije u optimiranju visokotlačnog lijevanja

Hojnik, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:814759>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Filip Hojnik

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Filip Hojnik

**PRIMJENA TERMOGRAFIJE U OPTIMIRANJU
VISOKOTLAČNOG LIJEVANJA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc.dr.sc. Ivan Jandrić

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac – predsjednik
Doc.dr.sc. Ivan Jandrić – član
Prof.dr.sc. Zoran Glavaš – član
Doc.dr.sc. Jakov Baleta – zamjenski član

Sisak, rujan 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem svojem mentoru doc.dr.sc. Ivanu Jandrliću na pomoći i odličnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem i kolegama iz Lipovice d.o.o. na podršci i savjetima tijekom studija i izrade ovog rada, posebno pomoćniku voditelja proizvodnje Dubravku Poje.

Nadasve zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj potpori tijekom studiranja.

SAŽETAK

PRIMJENA TERMOGRAFIJE U OPTIMIRANJU VISOKOTLAČNOG LIJEVANJA

U ovom radu dan je pregled metoda proizvodnje lijevanjem, s posebnim osvrtom na tehnologiju visokotlačnog lijevanja Al legura u trajne kalupe. Opisani su postupci proizvodnje visokotlačnim lijevom, te poteškoće koje mogu nastati u procesu proizvodnje. Nadalje su pobliže opisane karakteristične greške koje se javljaju na odljercima od visokotlačnog lijeva, s naglaskom na nedolivenost. Kao glavni razlog nedolivenosti uzima se pothlađenost dijelova kalupa, odnosno loša temperaturna raspodjela po kalupu. Za dobivanje mogućih informacija o temperaturnoj raspodjeli dan je osvrt na metode mjerenja temperature, točnije na termografsku metodu. Opisani su principi termografske metode i načini mjerenja. Također su dani primjeri iz prakse iz kojih se vide pouzdanost i prednosti primjene termografske metode pri istraživanju temperaturne raspodjele i otkrivanju mogućih zona u kojima može dolaziti do pothlađenja i toplinskih naprezanja.

Ključne riječi: ljevarstvo, visokotlačni lijev, greške ne odljercima, termografija.

SUMMARY

APPLICATION OF THERMOGRAPHY IN THE OPTIMIZATION OF HIGH-PRESSURE DIE CASTING

In this paper, an overview is given on production methods by casting, with special reference to the technology of high-pressure die casting of Al alloys into permanent molds. High-pressure die casting production processes are described, as well as difficulties that may arise in the production process. The characteristic defects that occur during high-pressure castings are described, with an emphasis on misruns. The main reason for misruns is the low temperature of the mold parts, and poor temperature distribution on the mold.

In order to receive information on the temperature distribution, a review is given on the temperature measuring methods, in particular on the thermographic method. The principles of the thermography and measuring methods are described. Practical examples are also given, which show the reliability and advantages of using thermographic methods in the study of temperature distribution in order to detect zones in which there is possibility of low temperature zones and occurrence of heat stresses.

Keywords: casting, high pressure die casting, defects in castings, thermography.

Popis slika:

Slika 1.	<i>Postupak lijevanja</i>	3.
Slika 2.	<i>Odljevci proizvedeni visokotlačnim lijevom</i>	4.
Slika 3.	<i>Ciklus tlačnog stroja sa toplom komorom</i>	5.
Slika 4.	<i>Ciklus lijevanja na stroju sa hladnom komorom</i>	6.
Slika 5.	<i>Presjek trajnog kalupa za visokotlačni lijev</i>	7.
Slika 6.	<i>Trajni kalup za visokotlačni lijev</i>	9.
Slika 7.	<i>Dijagram temperaturnog opterećenja kalupa kroz ciklus lijevanja</i>	10.
Slika 8.	<i>Shema kanala za grijanje i hlađenje kalupa</i>	12.
Slika 9.	<i>Šprica za nanošenje premaza "Acheson mod ECO 2B4/2"</i>	13.
Slika 10.	<i>Kvalifikacijski niz za procjenu poroznosti aluminijskog tlačnog lijeva</i>	14.
Slika 11.	<i>Dijagram topivost vodika u čistom aluminiju u ovisnosti o temperaturi</i>	15.
Slika 12.	<i>Plinski mjehuri (plikovi)</i>	16.
Slika 13.	<i>Nedoliven odljevak</i>	16.
Slika 14.	<i>Vrste zračenja u prirodi</i>	17.
Slika 15.	<i>Ukupna energija promatranog tijela detektirana IC – kamerom</i>	19.
Slika 16.	<i>Primjer termografske snimke iz članka</i>	21.
Slika 17.	<i>Način postavljanja ogledala između polovica kalupa</i>	22.

Popis tablica:

Tablica 1.	<i>Čelika za izradu trajnih kalupa za visokotlačni lijev</i>	9.
Tablica 2.	<i>Premazi koji su korišteni u istraživanju</i>	24.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POSTUPCI LIJEVANJA	2
2.1. VISOKOTLAČNI LIJEV	3
2.1.1. Strojevi za visokotlačni lijev	4
2.1.2. Trajni kalupi za visokotlačni lijev	7
2.1.3. Utjecaj parametara lijevanja na kvalitetu odljevaka i trajnost kalupa pri visokotlačnom lijevanju.	10
2.1.4. Premazi koji se koriste i njihova uloga za visokotlačno lijevanje.....	12
2.1.5. Greške koje se javljaju na odljencima dobivenim visokotlačnim lijevom i kako ih izbjeći	13
3. TERMOGRAFIJA	17
3.1. Osnove na kojima se baziraju termografska ispitivanja.....	18
3.2. Primjena termografske metode u metalurškim postrojenjima.....	20
4. ZAKLJUČAK	26
5. LITERATURA.....	27

1. UVOD

Prilikom izrade predmeta od metala, tehnologija lijevanja koristi se više od 5000 godina. Danas se susrećemo s različitim tehnologijama lijevanja kojima je moguće proizvesti širok spektar proizvoda u preciznim i složenim oblicima. Najčešće se primjenjuje u strojogradnji, medicini, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, svemirskoj industriji itd.

Ljevarstvo je tehnologija gdje se rastaljeni metal ulijeva u kalup, skrućivanjem poprima dimenzije i oblik kalupne šupljine. Postupke lijevanja dijelimo na lijevanje uz primjenu tlaka i gravitacijsko lijevanje. Za odljevke složenih oblika i točnih dimenzija najčešće se primjenjuje visokotlačno lijevanje. Visokotlačni lijev je postupak kod kojeg se talina pod visokim tlakom ubrizgava u kalup. Visokotlačno se najčešće lijevaju legure aluminijske, ali se mogu lijevati i različite vrste drugih legura.

Kod lijevanja u trajne kalupe (alat) talina može reagirati s materijalom od kojeg je izrađen kalup, iz tog razloga se primjenjuju premazi za zaštitu kako bi se olakšalo izbacivanje odljevka, ali i spriječila oštećenja samog odljevka i kalupa za lijevanje.

Na odljencima od visokotlačnog lijeva mogu se pojaviti različite vrste grešaka, te greške mogu se izbjeći pažljivim odabirom tehnoloških parametara. Neke od čestih grešaka na odljencima su: poroznost, plinski mjehuri, nedolivenost. Na mjestima gdje je kalup hladniji ili gdje su tanje stijenke odljevka taline brže skrućuje te se pojavljuje nedolivenost.

Jedan od najvažnijih faktora koji utječu na kvalitetu odljevaka od visokotlačnog lijeva je raspodjela temperature po kalupu. Postoje razne kontaktne i beskontaktne metode mjerenja temperaturne raspodjele po kalupu, a najefikasnija metoda za ispitivanje temperaturne raspodjele po kalupu je termografska metoda.

Termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature tijela koja ima sve veću ulogu u metalurškoj praksi. Osnovni uređaj za termografska ispitivanja je tzv. infracrvena (termovizijska) kamera, a njome se mjeri temperatura promatranih tijela. Pomoću termografske metode moguće je odrediti razne izvore toplinskog zračenja, a to omogućava lociranje nepravilnosti u procesu.

2. POSTUPCI LIJEVANJA

Ljevarstvo je tehnologija koja se za izradu predmeta od metala koristi više od 5000 godina, gdje se rastaljeni metal ulijeva u kalup, skrućivanjem poprima dimenzije i oblik kalupne šupljine. Danas poznajemo različite tehnologije lijevanja kojima je moguće proizvesti širok spektar proizvoda u vrlo složenim i preciznim oblicima, najčešće se primjenjuje u automobilskoj industriji, strojogradnji, građevinskoj industriji, medicini, zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, lijevanje umjetnina, itd.

Lijevanje se primjenjuje kada predstavlja najekonomičniji način proizvodnje (npr. kod izrade dijelova strojeva, koji bi se inače morali izraditi od više komada, lijevanjem se izrade u jednom komadu). Najviše se koristi za dijelove koje je nemoguće proizvesti na neki drugi način (npr. za dijelove s unutarnjim kanalima nepravilnog oblika) [1,2].

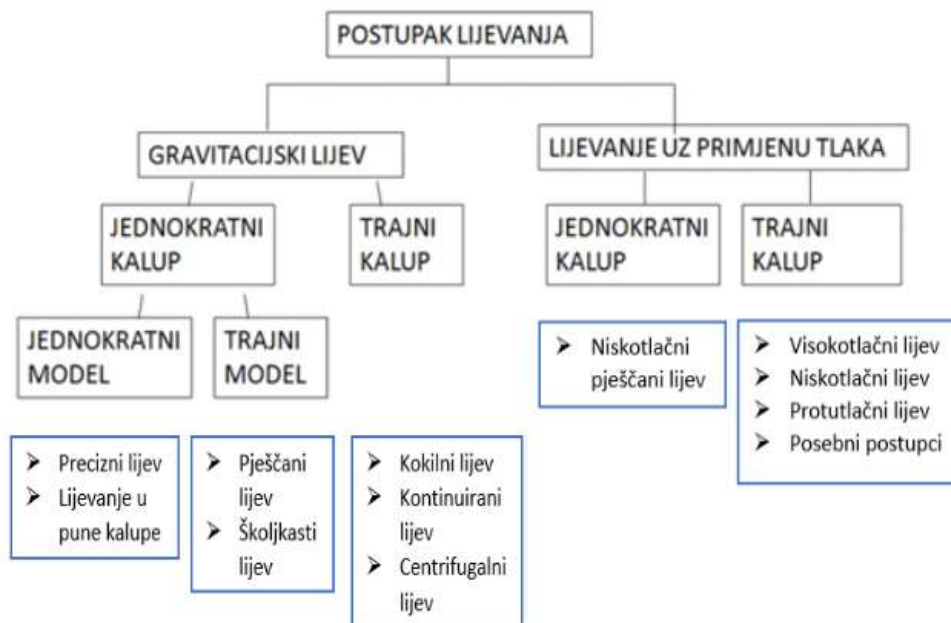
Osnovna podjela lijevanja, ovisno o primjeni kalupa:

- Lijevanje u jednokratne kalupe
 - lijevanje u pješčani kalup
 - lijevanje u pune kalupe
 - precizni ili točni lijev
 - školjkasti lijev
 - lijevanje u keramičke kalupe
- Lijevanje u trajne kalupe:
 - tlačni lijev
 - kokilni lijev (gravitacijski lijev)
 - centrifugalni lijev
 - kontinuirani lijev

Jednokratni kalupi izrađuju se od odgovarajuće kalupne mješavine (pijesak + vezivo + aditivi) uz pomoć modela odljevka. Nakon lijevanja kalup je potrebno uništiti kao bi se izvadio odljevak. Najčešće se ovaj tip lijevanja koristi za složene oblike odljevaka.

Trajni kalup omogućuje višekratno lijevanje, koristi se za proizvodnju velikog broja odljevaka, manjih dimenzija i jednostavnijeg oblika. Naziva se alat ili kokila, a najčešće je izrađen od čelika.

Postupci lijevanja u trajne kalupe dijele se na gravitacijsko lijevanje i na lijevanje uz primjenu tlaka. Detaljnija podjela svih postupaka lijevanja navedena je na slici 1.



Slika 1. Postupak lijevanja [1]

2.1. VISOKOTLAČNI LIJEV

Visokotlačni lijev je proces lijevanja rastaljenog ili djelomično rastaljenog materijala koji se velikom brzinom, pod utjecajem visokog tlaka uvodi u trajni kalup (alat). Zbog velike brzine ulijevanja i visokog tlaka, kroz cijelo vrijeme skrućivanja, ovim postupkom se mogu lijevati odljevci složenih oblika s dobrim mehaničkim svojstvima i s malim dimenzijskim odstupanjem. Vrijeme ulijevanja kod visokotlačnog lijevanja je vrlo kratko i kreće se od 3 ms do 500 ms, brzine ulijevanja vrlo velike, od 10 do 70 m/s na ušću sustava ulijevanja, tlak ulijevanja dostiže i do 150 MPa. Zbog ovih karakteristika lijevanja, visokotlačni odljevci imaju sitno zrnatu strukturu i dobra mehanička svojstva [3,4].

U jednom trajnom kalupu može se odliti više desetaka tisuća odljevaka i zato se tlačni lijev primjenjuje u masovnoj i serijskoj proizvodnji. Sam proces je skoro uvijek automatiziran, a ishod je povećanje kvalitete odljevaka i veća produktivnost te niža cijena gotovog proizvoda. Visokotlačno se mogu lijevati legure magnezija, cinka, bakra i aluminija. U posebnim slučajevima visokotlačno se lijevaju i superslitine bazirane na niklu, kompozitni materijali i željezne slitine. Najčešće se upotrebljavaju aluminijske legure legirane s bakrom, cinkom, manganom i silicijem. Ovim postupkom mogu se lijevati odljevci različitih dimenzija i oblika pa se proizvode dijelovi kao što su : radiatori, dijelovi za auto industriju, pa čak i okviri mobilnih telefona [1]. Na slici 2 prikazani su odljevci koji su proizvedeni visokotlačnim lijevom.



Slika 2. Odljevci proizvedeni visokotlačnim lijevom: a) razni dijelovi, b) radiator [5]

Visokotlačni lijev u odnosu na druge postupke lijevanja ima svoje prednosti i nedostatke [3,6,7].

Glavne prednosti visokotlačnog lijevanja prema drugim postupcima su:

- visoka produktivnost
- velika točnost oblika i dimenzije u tijeku cijele serije lijevanja
- kvalitetne površine odljevka
- mogućnost lijevanja tankostijenih zahtjevnih odljevaka
- velika trajnost kalupa za lijevanje (alata, kokila, matrica)
- mogućnost prerade kružnog materijala i škarta direktno u proizvodnji
- mogućnost upotrebe sekundarnih legura
- dobra mehanička svojstva odljevka
- lako odvajanje uljevnog sistema i čišćenja srha
- velika mogućnost automatizacije lijevanja i obrade odljevaka.

Glavni nedostaci visokotlačnog lijeva su:

- relativno skupi strojevi i kalupi za visokotlačni lijev
- ograničena toplinska obrada odljevaka zbog pojave mjehuravosti površine
- veća mogućnost pojave poroznosti uslijed stezanja, naročito kod debljih stijenki i toplih čvorova odljevka zbog nemogućnosti napajanja
- turbulencija taline na ušćima odljevka zbog čega dolazi do zarobljenog zraka u odljevku (poroznost)
- manje istežanje odljevka.

2.1.1. Strojevi za visokotlačni lijev

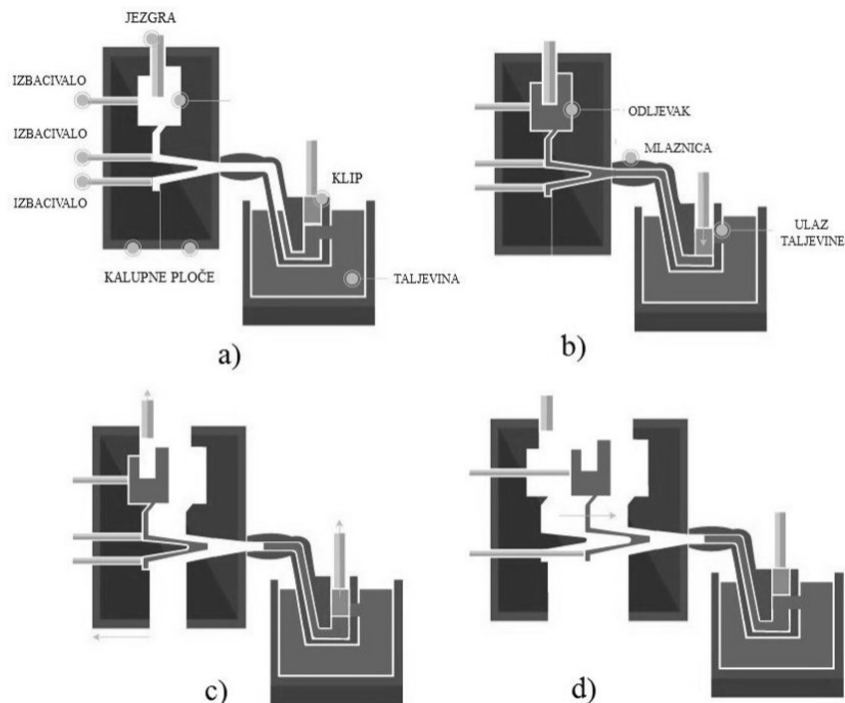
Visokotlačni strojevi spoj su 3 sustava: električki sustav, hidraulični sustav i mehanički sustav. Svaki od navedenih sustava sastoji se od više zasebnih komponenata gdje svaka ima posebnu zadaću i u kombinaciji s komponentama drugog sustava omogućuju da se izvrše operacije koje su potrebne za proizvodnju odljevaka. Mehaničke komponente su elementi

poput vodilica, steznih ploča, nosive konstrukcije i sl. Električni sustav su elektromagnetni ventili, senzori, elektromotori, program stroja itd. Hidraulični sustav sastoji se od hidrauličnih ventila i pumpi, te raznih drugih hidrauličnih elemenata [1,8].

Strojeve za visokotlačni lijev dijelimo u dvije osnovne skupine:

- strojeve s hladnom komorom
- strojeve s toplom komorom.

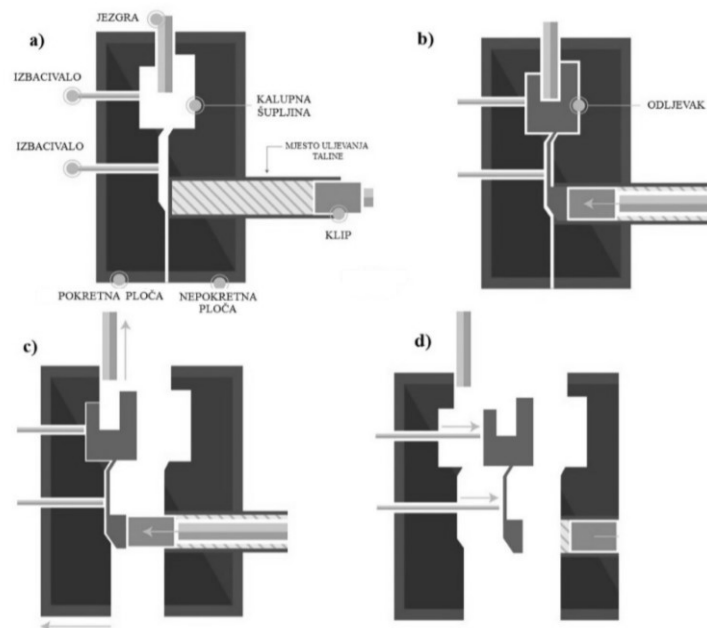
Kod visokotlačnih strojeva s toplom komorom su uljevni cilindar, klip i integrirana metalna pumpa za lijevanje uronjeni u talinu. Iz tog razloga ovi strojevi se mogu upotrebljavati kod legura nižeg tališta koje nisu agresivne prema čeličnim dijelovima (bakar, cink, magnezij), slika 3.



Slika 3. Ciklus tlačnog stroja s toplom komorom: a) su dijelovi stroja i zatvorenog kalupa, b) ubrizgavanje taline u kalupnu šupljinu, c) otvaranje kalupa i izvlačenje jezgre i d) izbacivanje odljevka [1]

Prednost ovih strojeva je lakše doziranje taline, manja oksidacija i gubitak topline pri doziranju. Za lijevanje aluminijskih legura isključivo se koriste visokotlačni strojevi s hladnom komorom koji imaju posebno doziranje taline. Razlog tome je što aluminijske legure djeluju agresivno na čelične dijelove [3,9].

Kod visokotlačnih strojeva s hladnom komorom pogonski klip smješten je unutar tlačnog cilindra u koji se talina ulijeva ljevačkom žlicom (šeflja, fana), slika 4.



Slika 4. Ciklus tlačnog stroju s hladnom komorom, a) su dijelovi stroja i zatvorenog kalupa, b) ubrizgavanje taline u kalupnu šupljinu, c) otvaranje kalupa i izvlačenje jezgre i d) izbacivanje odljevka [1]

Ciklus proizvodnje na stroju s hladnom komorom sastoji se od nekoliko sljedećih koraka, (ti koraci su prikazani na slici 4):

1. Kalup se zatvara, te se talina ulijeva u tlačnu komoru iz lijevačke žlica (slika 4a).
2. Klip potiskuje talinu u kalupnu šupljinu (tri faze procesa) (slika 4b).
3. Visoki tlak se održava sve dok se talina ne skrutne (vrijeme skrućivanja)
4. Otvaranje kalupa (zajedno sa otvaranjem kalupa, pomiče se pokretna strana kalupa i klip kako bi se osiguralo da odljevak ostane u pokretnom dijelu kalupa) (slika 4c).
5. Izvlače se jezgre (ako ih ima).
6. Izbacivači guraju odljevak iz pokretnog dijela kalupa (slika 4d).
7. Klip se vraća u početni položaj.

Tlačni cilindar je s jedne strane zatvoren klipom, a s druge strane se nalazi uljevni sustav odljevka. Hidraulični sustav služi za upravljanje položajem, brzinom i ubrzanjem tlačnog klipa. Kako bi omogućio učinkovito ubrizgavanje taline u kalupnu šupljinu, kako bi se ostvarili idealni parametri i najbolja moguća kvaliteta odljevka.

Suvremeni horizontalni visokotlačni strojevi s hladnom komorom najčešće imaju proces lijevanja podijeljen u tri faze.

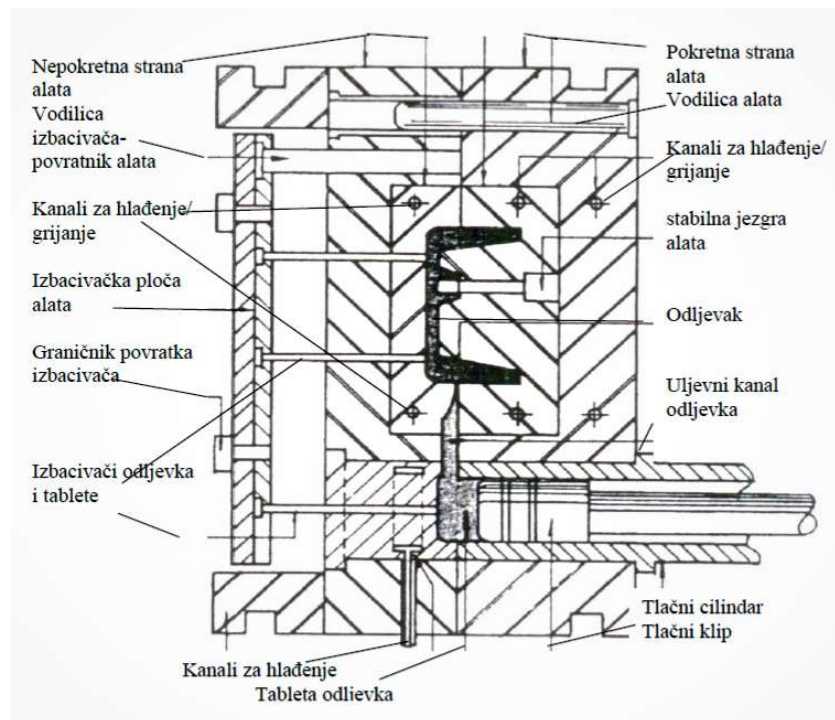
U **prvoj fazi** lijevanja brzina tlačnog klipa kreće se od 0,05 m/s do 0,7 m/s, a traje od 0,5 s do 4 s što zavisi od veličine stroja i duljine tlačne komore, gdje rastaljeni materijal treba polagano doći do ušća. U ovoj se fazi treba istisnuti zrak iz tlačnog cilindra preko odzračnika [3,4].

U *drugoj fazi* tlačni klip ima brzinu do 8 m/s, pri čemu talina treba popuniti odljevak kroz ušće u što kraćem vremenu. Brzina taline na ušću odljevka kreće se od 30 m/s do 70 m/s za aluminijske legure, a zavisi od debljine stijenke i presjeka ušća odljevka. U ovoj fazi zbog kratkoće vremena praktički se ne može odzračiti uljevna šupljina kalupa za lijevanje. Tlak u drugoj fazi se kreće od 10 do 15 MPa [3,4].

U *trećoj fazi* dodatno se poveća tlak na talinu u kalup tako da se komprimiraju plinovi zarobljeni u talini, te se odzračuje uljevna šupljina i poboljša se napajanje odljevka pri skrućivanju [3].

2.1.2. Trajni kalupi za visokotlačni lijev

Alati za visokotlačni lijev su trajni kalupi napravljeni od alatnog čelika, koji se sastoje od pokretne i nepokretne strane, te popratnih elemenata, slika 5.



Slika 5. Presjek trajnog kalupa za visokotlačni lijev [3]

Kalupi mogu imati jedno ili više kalupnih šupljina (istih ili različitih odljevaka u kalupu), što ovisi od veličine serije lijevanja, veličine tlačnog stroja i vrste legure kojom se lijeva. Kalupi mogu imati jednu ili više stabilnih, odnosno pokretnih jezgri koje formiraju šupljine na odljevku [3]. Kalupi su tijekom lijevanja opterećeni visokim tlakovima u kalupnoj šupljini (od 0 do 150 MPa), te promjenama temperature od prskanja premazom oko 15°C do ulijevanja taline oko 700°C.

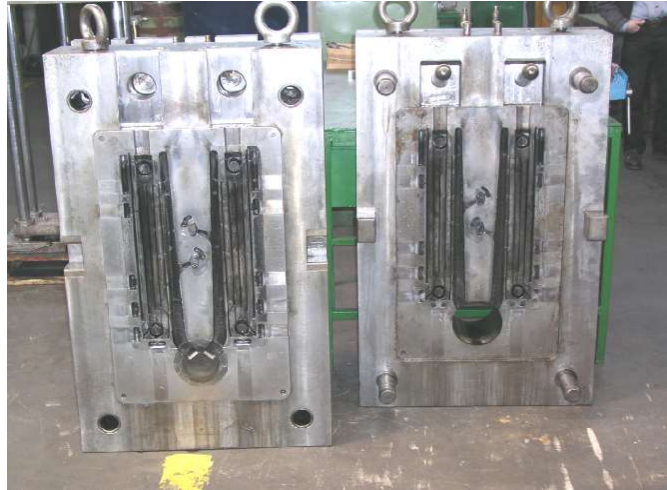
Budući da se visokotlačni lijev uglavnom primjenjuje u velikoserijskoj proizvodnji, kalupi moraju izdržati i do 150 000 ciklusa lijevanja. Neki od čimbenika kojima su topli dijelovi kalupa izloženi tijekom ciklusa lijevanja su [3,10]:

- visoki radni tlakovi (do 150 MPa)
- visoka radna temperature do najviše 700°C (na pojedinim dijelovima kalupa u trenutku ulijevanja zbog trenja i tlakova ubrizgavanja taline i do 1200°C)
- toplinski šokovi zbog velike razlike u temperaturi između površine i unutrašnjosti kalupa
- površina kalupa se prije ulijevanja dodatno prska premazima na bazi vode koji imaju temperaturu od 10°C do 20°C (dodatno hlađenje površine kalupa)
- agresivno djelovanje taline
- toplinski zamor površine i pojava mreže pukotina
- kalupi moraju osigurati i postojanost dimenzija zbog naglih toplinskih promjena

Ti utjecaji na kalup smanjuju vijek trajanja kalupa i dovode do skupih popravka i zastoja proizvodnje. Da bi se ti utjecaji smanjili na kalupni materijal se postavljaju brojni zahtjevi kako bi se produljio vijek trajanja kalupa. Neki od zahtjeva koje materijal mora zadovoljiti [3,10]:

- visok stupanj homogenosti i sposobnosti poliranja
- sposobnost za kovanje i mehaničku obradu
- neosjetljivost prema ogrebotinama i minimalno mijenjanje dimenzija pri toplinskoj obradi
- postojanost prema popuštanju na visokim radnim temperaturama
- visoko naprezanje tečenja na povišenim temperaturama
- otpornost prema toplinskim šokovima i pucanju u vrućem stanju
- otpornost prema trošenju i naljepljivanju prerađivanog materijala
- otpornost prema kemijskim i fizikalnim utjecajima mlaza taline

Kalup se izrađuje od legiranog čelika, slika 6. Optimalan izbor različitih legirajućih elemenata doprinosi njihovom zajedničkom djelovanju, te se postižu optimalna svojstva. Npr. visoka čvrstoća, otpornost na trošenje, povećanje postojanosti na popuštanje i smanjenje krhkosti postižu se dodacima karbidotvornih elemenata (W, Mo, V, Cr). Kod izbora čelika, osim kemijskog sastava i svojstava čelika potrebno je uzeti u obzir način lijevanja, vrstu ljevačke legure i predviđeni opseg serije. Čelici koji se koriste za izradu kalupa za visokotlačno lijevanje legura lakih metala prikazani su u tablici 1.



Slika 6. Trajni kalup za visokotlačni lijev

Tablica 1. Kvalitete čelika koje se koriste za izradu kalupa za visokotlačni lijev [3]

Oznaka prema DIN 17006	Oznaka prema HRN	Sastav u mas. %							Područje primjene
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	
X38 CrMoV 5 1	Č4751	0,38	1,0	0,4	5,0	1,3	0,3	-	Al i Mg Legure
X40 CrMoV 5 3	Č4753	0,40	1,0	0,4	5,0	1,3	1,0	-	Al i Mg legure
X32 CrMoV 3 3	Č7450	0,32	0,3	0,3	2,8	2,8	0,5	-	Lijewane komore

Na kvalitetu i vijek trajanja kalupa također utječe i strojna i toplinska obrada samog kalupa. Čelici za rad pri povišenim temperaturama upotrebljavaju se obično u kaljenom i popuštenom stanju pri vlačnoj čvrstoći od 1200 do 1800 N/mm². Polazno stanje prije toplinske obrade je meko žareno stanje u kojem čelik ima najmanju čvrstoću, te je pogodan za mehaničku obradu, najpovoljnija mehanička obrada je glodanjem jer ne izaziva pukotine u kalupu koje negativno utječu na žilavost.

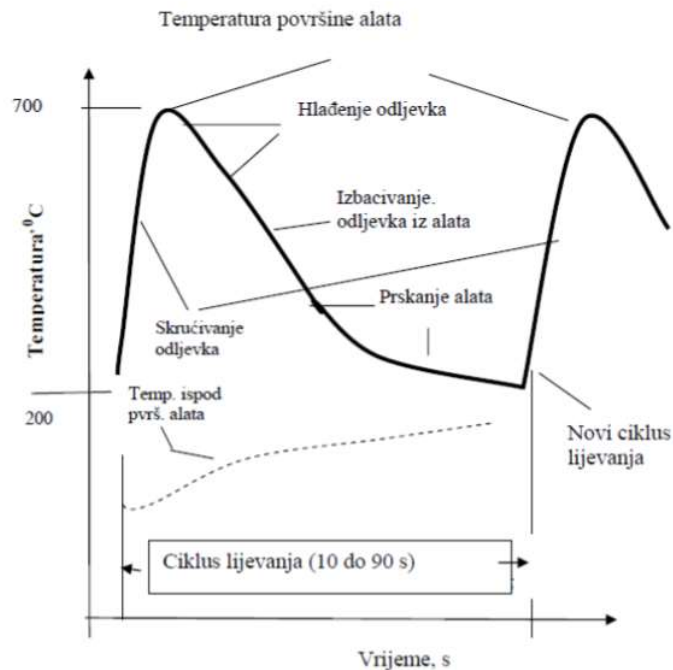
Po pravilu se čelici za izradu kalupa za visokotlačni lijev kale s gornje granice temperature austenitizacije. Kaljenje se izvodi u ulju, toploj kupci i na zraku ovisno o vrsti dimenzija. Nakon kaljenja zbog zaostalih napreznja u mikrostrukturi ovi čelici nemaju dobru žilavost. Da bi se postigla kvalitetna žilavost popuštaju se nekoliko puta, s time da s brojem popuštanja raste i čvrstoća čelika [3,11,12].

Na kalupima za visokotlačni lijev mogu nastati greške zbog velikog broja različitih i istovremenih djelovanja napreznja. Napreznja se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe, odnosno napreznja nastala tijekom izrade kalupa (alata, matrice) i napreznja koja se javljaju uslijed ubrizgavanja vruće taline u kalup [13].

Za ekonomičnu proizvodnju aluminijskih odljevaka visokotlačnim lijevanjem važno je da kalup ima dug vijek trajanja, zato što pojava ovog čini velik trošak poduzeću i gubitke zbog zastoja u proizvodnji [13-15].

Najčešći kvarovi trajnih kalupa za visokotlačni lijev su [13,16]:

- pukotine u uglovima, oštih radijusa ili oštih rubova
- pucanje uslijed trošenja ili erozije.



Slika 7. Dijagram temperaturnog opterećenja kalupa kroz ciklus lijevanja [3]

Jedan od glavnih uzroka oštećenja kalupa su temperaturni šokovi koji nastaju kod pokretanja procesa i samog procesa lijevanja. Ciklusi u proizvodnji uključuju lijevanje (visoke temperature), vađenje odljevaka (dolazi do hlađenja kalupa), nanošenje premaza (naglo hlađenje kalupa), te ponovnog lijevanja (dovodi do naglog porasta temperature kalupa), slika 7. Uslijed tih toplinskih razlika i toplinskog naprezanja koje se javlja u ciklusima lijevanja dolazi do nastanka i širenja pukotina, te time i erodiranja kalupa. Na faktore koji utječu na oštećenje kalupa, u određenoj mjeri mogu utjecati dizajneri kalupa, proizvođači, te ljevači, a to su [13]:

- Dizajn
- Izbor materijala za izradu
- Toplinska obrada
- Završna obrada
- Korištenje i rukovanje

2.1.3. Utjecaj parametara lijevanja na kvalitetu odljevaka i trajnost kalupa pri visokotlačnom lijevanju

Kako bi proizveli kvalitetan proizvod visokotlačnim lijevom parametre tijekom proizvodnje treba držati unutar granica koje omogućuju dobivanje točnih oblika i dimenzija odljevka, te pažljivim podešavanjem parametara može se utjecati da mehanička i fizikalna

svojstva odljevka budu visoke kvalitete. Osnovni parametri koji imaju utjecaj na kvalitetu odljevka su [1,17]:

- kalup za lijevanje
- faze tlačnog stroja
- legura

Izbor materijala za visokotlačni ljev ovisi o željenim svojstvima odljevaka, kalupu za tlačni ljev, te vrsti ljevaoničke opreme s kojom raspolaže ljevaonica. U današnje vrijeme postoje računalni programi s kojima se može izračunati potrebni kemijski sastav materijala da se dobiju potrebna mehanička svojstva odljevaka kod istih uvjeta skrućivanja [3,18].

Da bi odljevak od visokotlačnog lijeva bio kvalitetan treba kontrolirati parametre procesa lijevanja i skrućivanja, odabranu ljevačku leguru, pratiti i držati u granicama kemijski sastav te time i metalografsku strukturu. Kemijski sastav legure kontrolira se jednostavno preko pogonskog ili laboratorijskog spektrometra, a može se i popraviti dodavanjem primarnog aluminija ili legirajućih elemenata [3,19].

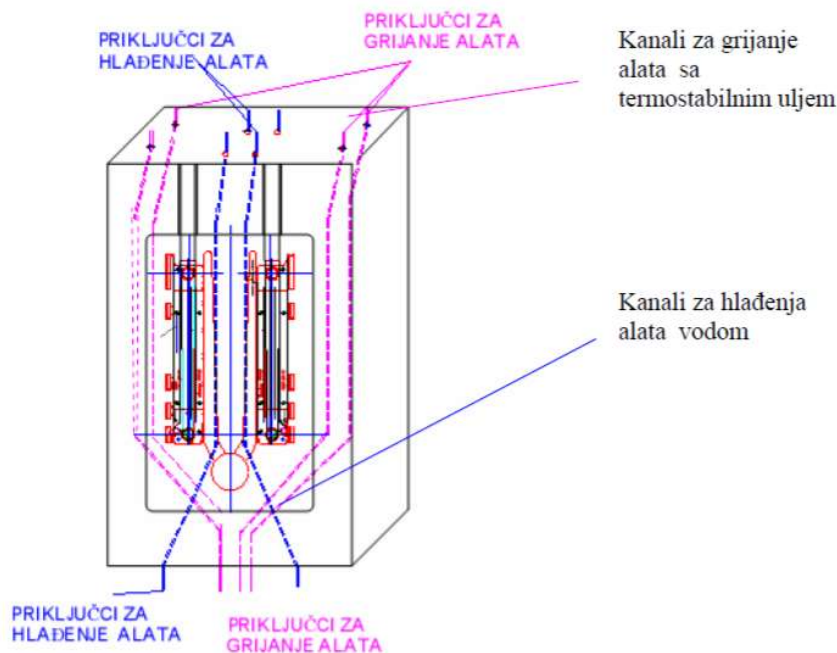
Uz kemijski sastav legure važno je održavati u propisanim granicama i temperaturu taline i kalupa za lijevanje. Optimalna temperatura taline prvenstveno ovisi o postupku lijevanja, temperaturi kalupa, obliku i dimenzijama odljevka. Tankostjeni odljevci s dubljim tanjim rebrima, kao što su naprimjer aluminijski radijatori, zahtijevaju višu temperaturu lijevanja. Legure neadekvatnog kemijskog sastava i temperature može uzrokovati greške u odljevku, kao što su: nedolivenost odljevka, poroznost, nemetalni uključci, lijepljenja legure na kalup, a s time loša mehanička i fizikalna svojstva odljevka, te oštećenje kalupa [3].

Parametri visokotlačnog stroja koji imaju najveći utjecaj na svojstva odljevaka kod visokotlačnog lijevanja su [3,4]:

- brzina, duljina i oblik prve faze lijevanja
- brzina i tlak druge faze
- tlak treće faze
- vrijeme skrućivanja
- ukupni ciklusa lijevanja

Loša konstrukcija kalupa i dimenzije uljevnog sustava također mogu uzrokovati greške na odljercima. Pod pretpostavkom da je kalup dobro konstruiran i točno izrađen tijekom lijevanja najveći utjecaj na kvalitetu odljevaka ima temperatura kalupa i uljevnog sustava koja treba iznositi od 220°C do 260°C [3,20].

Pravilno dovođenje i odvođenje topline u kalupu nema samo iznimnu važnost za kvalitetu odljevka nego i na vijek trajanja kalupa. Za vrijeme ciklusa željena temperatura kalupa osigurava se uz pomoć kanala za temperiranje kroz koji teče voda koja je medij za odvođenje topline i kanala za temperiranje kroz koji teče zagrijano ulje, slika 8. Kod određenih područja Kalupa kod kojih postoji opasnost od preranog skrućivanja za zagrijavanje se, također, mogu koristiti kanali za temperiranje kroz koje teče ulje.



Slika 8. Shema kanala za grijanje i hlađenje kalupa [3]

Prije početka lijevanja i nakon dužeg stajanja kalup treba zagrijati na radnu temperaturu, da se smanji toplinsko naprezanje kalupa, te tako poveća vijek trajanja kalupa. Početno zagrijavanje kalupa može biti plinom, električnim grijačima i uljem, dok se uljevni sustav može zagrijati ulijevanjem taline bez ubrizgavanja u kalup [3].

Također prije početka lijevanja kalup (alat) se kistom premazuje zaštitnim premazom na bazi organskih maziva, a za vrijeme lijevanja se nanosi vodotopivi zaštitni premaz prskanjem radi lakšeg izbacivanja odljevka te zaštite kalupa.

2.1.4. Premazi koji se koriste i njihova uloga za visokotlačno lijevanje

Kod lijevanja u trajne kalupe talina može reagirati s kalupnim materijalom (alatnim čelikom) uzrokujući lijepljenje ili navarivanje dijelova odljevaka za kalup (alat, kokilu), ako se to pojavi, izbacivanje odljevka postaje otežano, a može doći i do oštećenja samog kalupa.

Zbog toga se primjenjuju premazi kalupa kako bi se olakšalo izbacivanje odljevaka i zaštitilo kalup. To su vatrostalne suspenzije, koje se sprejom ili kistom nanose na površinu kalupa radi stvaranja sloja koji se prilično čvrsto zalijepi na kalup kad se osuši. Premazi kalupa mogu se upotrijebiti i radi kontrole brzine skrućivanja u određenim dijelovima odljevka. Npr. brzina skrućivanja se može usporiti upotrebom premaza s niskom toplinskom provodljivošću (kao što je glinica) ili ubrzati upotrebom materijala visoke toplinske vodljivosti (kao što je grafit) [21].

Kao primjer može se dati postupak koji se provodi u ljevaonici aluminijskih radiatora Lipovica d.o.o. Na kalup za visokotlačni lijev prije ulijevanja aluminijske legure u kalupnu šupljinu nanosi se vodotopivi premaz u koncentraciji od oko 2 %, s automatskom ili ručnom špricom. Zadatak nanošenja ovog premaza je stvaranje zaštitnog sloja i odvajanje tekuće legure aluminijske od površine čeličnog kalupa radi sprečavanja lijepljenja te dodatno hlađenje kalupa za lijevanje (alata, kokile).

Premaz se sastoji od sintetičkih ulja namijenjenih za korištenje pri visokim temperaturama, uz dodatak voska i aditiva, te vode za lakše odvajanje odljevka od kalupa i sprečavanje korozije kalupa i odljevka. Da bi bilo što manje taloženih mineralnih naslaga na kalupu, voda za razrjeđivanje premaza se omekšava s ionskom izmjenjivačem na bazi $NaCl$. Nakon prskanja kalupa premazom, premaz se mora ispuhati radi bolje raspršenosti premaza po svim točkama kalupa, te uklanjanje viška premaza iz kalupne šupljine. Slika 9 prikazuje glavu šprice "Acheson mod ECO 2B4/2" za automatsko nanošenje premaza [3].



Slika 9. Šprica za nanošenje premaza "Acheson mod ECO 2B4/2" [3]

Nanošenje premaza ima važan utjecaj na svojstva odljevka jer pravilno nanesen premaz sprječava savijanje i povlačenje odljevka, povoljno utječe na kvalitetu površine odljevka i dodatno regulira temperaturu kalupa. Suvišak premaza ne stigne ispariti, previše ohladi kalup i postoji mogućnost da premaz smanji kvalitetu odljevka, iz tog razloga jednako je važno kao i špricanje premaza kvalitetno i precizno ispuhivanje zrakom [3].

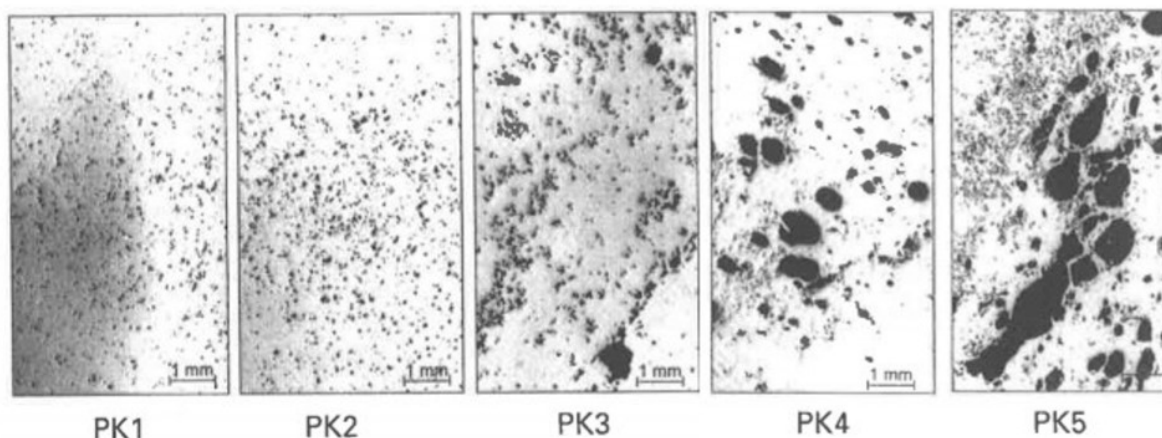
2.1.5. Greške koje se javljaju na odljencima dobivenim visokotlačnim lijevom i kako ih izbjeći

Na odljencima proizvedenom tlačnim lijevom vrlo često se pojavljuju različite vrste grešaka. Generalno te se greške mogu podijeliti u četiri osnovne skupine:

- dimenzijske greške na odljencima
- površinske greške
- unutarnje greške
- greške koje umanjuju mehanička svojstva odljevka.

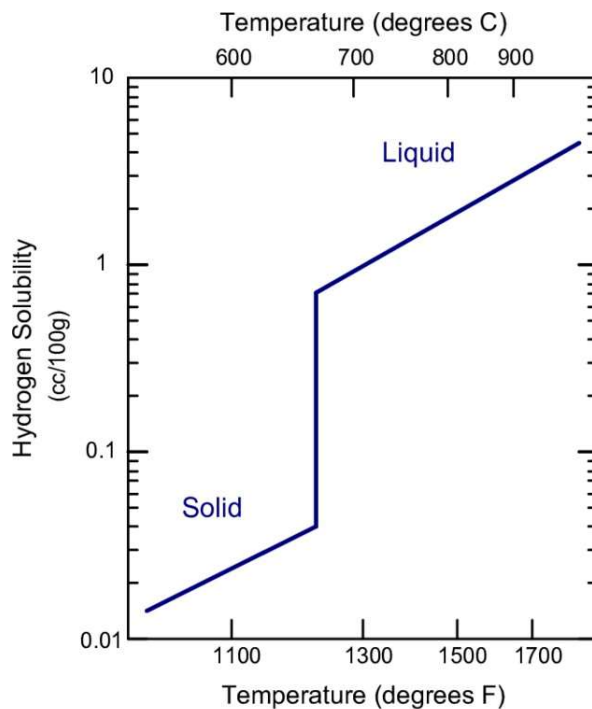
Kada govorimo o unutarnjim greškama za postupak visokotlačnog lijevanja ključna je pojava poroznosti u odljevcima, a kada govorimo o dimenzijskim greškama ključna je nedolivenost odljevka. Pojavu grešaka može se smanjiti ili čak izbjeći preciznim odabirom tehnoloških parametara. Parametri tlačnog stroja imaju utjecaj na stvaranje grešaka u odljevcima, to jest parametri tlačne komore i tlačnog klipa, parametri kalupa za lijevanje i parametri legure za lijevanje. Kako bi ih spriječili poželjno je imati neka saznanja kako su te greške nastale [1,21,22]. Neke od čestih grešaka koje se pojavljuju opisane su u nastavku.

Poroznost odljevka je posljedica koja najčešće nastaje stezanjem metala za vrijeme skrućivanja i poroznost koja je nastala zarobljavanjem plinova za vrijeme sabijanja taline u kalupnu šupljinu. Plinsku poroznost predstavljaju okrugle pore glatkih i sjajnih unutarnjih površina koje su skoro ravnomjerno raspoređene i obično ju je moguće uočiti tek nakon ispitivanja nepropusnosti odljevka ili nakon strojne obrade. Za sada je kod visokotlačnog lijeva skoro nemoguće proizvesti odljevak bez poroznosti. Kada su utjecaji raznih poroznosti na mehanička svojstva poznati, zadani kriteriji kvalitete mogu se bolje uskladiti sa zahtjevima koji se postavljaju na odljevke. Pomoću klasifikacijske slike poroznosti, kod visokotlačnog lijeva, može se točno vidjeti i odrediti utjecaj različite poroznosti na mehanička svojstva, slika 10.



Slika 10. Kvalifikacijski niz za procjenu poroznosti aluminijskog tlačnog lijeva [1]

Plinska poroznost u tlačnim odljevcima se pojavljuje kao učinak plinova koji su nastali kemijskom reakcijom taline s premazom za alate ili klipove, plinova koji su nastali propuštanjem vode iz unutrašnjosti kalupa na površinu kalupne šupljine, uslijed zarobljavanja zraka tijekom punjenja klipa talinom, a to ovisi o brzini klipa. Također i sam kemijski sastav taline ima utjecaj na pojavu poroznosti, pošto neki elementi pogoduju vezanju plinova, koji naknadno tijekom skrućivanja se izdvajaju iz taline i time izazivaju poroznost. Prilikom visokotlačnog lijevanja u različitim fazama lijevanja, uslijed različitih tlakova u klipu za lijevanje, može doći do zarobljavanja zraka ili stvaranja plinovite faze, koji kasnije mogu dovesti do poroznosti odljevaka ili čak nedolivenosti. Stoga brzina klipa v mora biti ispod kritične brzine v_{krit} , jer u suprotnome dolazi do zarobljavanja zraka. v_{krit} je kritična brzina na kojoj dolazi do pojave valovitosti taline u klipu, uslijed stvaranja valova na površini taline može doći do zahvaćanja zraka u klipu, koji se u naknadnoj fazi zajedno s talinom ubrizgava u kalupnu šupljinu. Ovo može dovesti do pojave velike poroznosti odljevka i/ili nedolivenost odljevka. Isto tako poroznost može biti uslijed prevelike količine vodika H, slika 11 [1,3,23-25].



Slika 11. Dijagram topivost vodika u čistom aluminiju u ovisnosti o temperaturi [25]

Iz slike 11 je vidljivo da porastom temperature aluminijske legure, iznad 690°C, dolazi do naglog porasta topivosti vodika u njoj. S obzirom na to da su temperature lijevanja aluminijevskih legura pri visokotlačnom lijevu iznad 700 °C, za očekivati je i veću količinu otopljenog vodika u samoj talini, koji se izdvaja van taline tijekom skrućivanja unutar kalupa, što dodatno dovodi do poroznosti odljevaka [25].

Općenito visokotlačni lijev smanjuje utjecaj poroznosti. S jedne strane brzo hlađenje na stijenkama kalupa stvara sloj metalne kore koja naknadno sprječava propusnost odljevaka uslijed poroznosti. S druge strane, visoki tlakovi i brzina ubrizgavanja taline u kalup izazivaju smanjenje veličine pora, koje budu homogenije raspoređene po odljevku te time smanjuju negativan utjecaj poroznosti [1,3,23,24].

Kada govorimo o visokotlačnom lijevu plinska poroznost može se zaobići na sljedeće načine : provjeravanjem odzračivanja kalupne šupljine, otplinjavanje i čišćenje taline mora se provoditi redovito, čišćenjem i ponovnim premazivanjem kalupa, povećanjem tlaka lijevanja, izbjegavanjem otkidanja vala tako da se podesi manja brzina gibanja klipa za vrijeme prve faze, povećanjem volumena preljeva [1,24].

Plinski mjehuri ili plikovi kod visokotlačnog lijeva nastat će ako se za vrijeme skrućivanja slobodni plinovi, poput vodika ili dušika, odvoje radi smanjenje topljivosti. Ova greška je tipična po šupljinama sa zaobljenim i, vrlo često, glatkim stijenkama koje su prikazane na slici 12. Plinski mjehuri nastaju kao rezultat zarobljenog zraka za vrijeme prve i druge faze ciklusa [1].



Slika 12. Plinski mjehuri (plikovi)

I kod ovih grešaka, za vrijeme ulijevanja taline u kalupnu šupljinu, tehnološki parametri imaju vrlo važnu ulogu. Prebrzo gibanje klipa u prvoj fazi, nagla skretanja taline i smanjenje brzine strujanja će uzrokovati nastajanje vrtloga zbog čega može doći do stvaranja zona prestanka strujanja u kojima nema gibanja taline pa će se plinski mjehuri koncentrirati [1].

Nedolivenost odljevka je greška gdje nedostaje jedan dio odljevka ili cijelo jedno područje odljevka. Najčešće se pojavljuju na rubnom djelu odljevka i na mjestima koja su najudaljenija od ušća, kod odljevka s malom debljinom stijenke ili velikom površinom. Najčešći uzroci tih grešaka su niska temperatura lijevanja, nepravilno izrađen i loše osmišljen kalup za lijevanje ili uljevni sustav, nepovoljan sastav legure, prenizak tlak lijevanja, niska temperatura taline, hladan kalup, nedovoljno odzračivanje kalupa, nepravilno određeni parametri stroja u fazama lijevanje i skrućivanja [26], slika 13.



Slika 13. Nedoliven odljevak.

Na slici 13 prikazan je primjer nedolivenog odljevka iz ljevaonice Lipovica d.o.o., slika prikazuje radiator kod kojeg su nedolivena unutarnja rebra.

Na mjestima gdje je kalup hladniji ili gdje su tanje stijenke odljevka, talina brže skrućuje te se pojavljuje nedolivenost. U ljevaonici Lipovica d.o.o. zbog nedolivenosti dolazi iz više razloga, a jedan od mogućih razloga je pothlađenje kalupa, ili samo jednog djela kalupa, do

kojeg dolazi pri nanošenju premaza na kalup. Također uzrok nedolivenosti može biti i zaostali premaz u kalupu koji se javlja zbog lošeg ispuhivanja premaza, kvalitete samog premaza ili netočne koncentracije premaza.

Pravilno nanošenje premaza na kalup ujedno povećava livljivost, koja je vrlo bitna kod tankostjenog lijevanja. U ljevaonici Lipovica d.o.o. radijator je primarni proizvod, te kao takav ne može biti nedoliven zbog opasnosti od propuštanja. Zbog toga se najviše pažnje posvećuje nedolivenosti kao greški na odljevku. Podešavanjem nekih od parametara kao što su špricanje kalupa, hlađenje kalupa, te brzine prve, druge i treće faze lijevanja, možemo kvalitetno otkloniti nedolivenost kao grešku na odljevku.

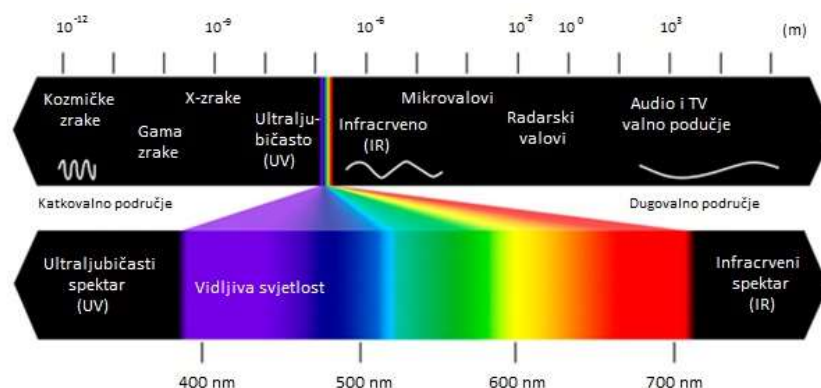
Kako bi se spriječila nedolivenost treba osigurati odgovarajuću temperaturu lijevanja, pravilno konstruirati i kvalitetno izraditi uljevni sustav, upotrijebiti adekvatnu leguru, povisiti temperaturu kalupa, poboljšati odzračivanje kalupa [26].

Jedan od važnih faktora koji utječu na kvalitetu odljevaka od visokotlačnog lijeva svakako je temperaturna raspodjela po kalupu. U slučaju da je kalup na mjestima hladniji, na tom dijelu kalupa dolazi do ranijeg skrućivanja, zbog čega su moguće strukturne promjene i nadoliveni proizvodi. U cilju provjere temperaturne raspodjele po kalupu, te indikacije eventualnih hladnih zona potrebno je provesti mjerenja temperature kalupa. Postoje razne kontaktne i beskontaktno metode mjerenja temperature po kalupu, a najučinkovitija metoda za ispitivanje temperaturne raspodjele po kalupu svakako je termografska metoda.

3. TERMOGRAFIJA

Termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature tijela koja ima sve veću ulogu u raznim laboratorijskim ispitivanjima, a u posljednje vrijeme počela se sve češće primjenjivati metalurškoj praksi za ispitivanje različitih procesa proizvodnje [27,28].

Pomoću termografske metode moguće je odrediti razne izvore toplinskog zračenja, a to omogućava lociranje nepravilnosti u procesu (npr. oštećenje kalupa ili greške na odljencima). Osnovni uređaj za termografska ispitivanja je tzv. infracrvena (termovizijska) kamera, a njome se mjeri temperatura promatranih predmeta. Sva tijela koja imaju temperaturu veću od apsolutne nule emitiraju infracrvene elektromagnetske valove, koje detektira termovizijska kamera. Infracrveni spektar valova je oku nevidljiv spektar elektromagnetskog zračenja (900 – 14 000 nanometara valne duljine) [27-30], slika 14.



Slika 14. Vrste zračenja u prirodi [27]

Termovizijske (infracrvene) kamere (*eng. Infrared Cameras IC*) su kamere koje imaju u sebi detektor zračenja, te su po svom izgledu vrlo slične klasičnim digitalnim kamerama. Termovizijske kamere imaju znatno manje rezolucije u odnosu na digitalne kamere, najčešće s rezolucijom 320 x 240 piksela i rjeđe, puno skuplje, rezolucije 640 x 512 piksela [27,28].

Princip metode termografije je taj da se infracrvenom kamerom mjeri raspodjela temperature promatranih predmeta. Infracrvene kamere detektiraju toplinsko zračenje i mjere njegovu vrijednost [27,29,30].

Prednosti termografije:

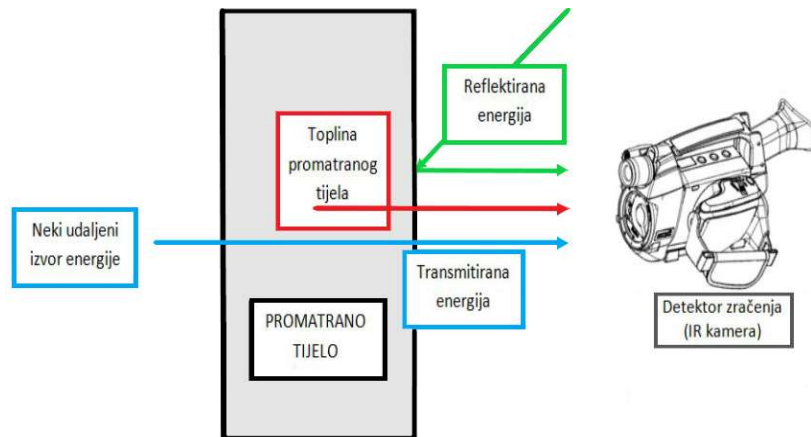
- daje trenutno rezultate u realnom vremenu,
- beskontaktna metoda (što nam omogućuje ispitivanje u teško dostupnim, ponekad opasnim mjestima),
- automatizacija procesa proizvodnje i ranije uočavanje grešaka (čime se povećava sigurnost radnika, smanjuju troškovi proizvodnje i povećava kvaliteta proizvoda),
- jednostavna je za korištenje,
- moguće ju je implementirati na razna mjesta u procesu proizvodnje [28].

Nedostaci termografije:

- osjetljivost metode na okolne izvore toplinskog zračenja (potrebno je poznavanje faktora emisivnosti, ili njihovo prethodno određivanje),
- omogućava mjerenje temperature samo tijela koje se nalazi direktno ispred objektiva kamere (bez mogućnosti mjerenja kroz neke barijere),
- relativno visoka cijena opreme (posebice one koja ima mogućnost mjerenja viših temperatura, te kvalitetnije rezolucije) [28].

3.1. Osnove na kojima se baziraju termografska ispitivanja

U termografskom istraživanju treba uzeti u obzir da infracrvene kamere otkrivaju ukupnu energiju koja dolazi do njegovog detektora. Ta se energija sastoji od *emitirane energije* iz tijela koja zrači energijom, *transmitirane energije* koja prolazi kroz promatrani objekt iz izvora zračenja iza tijela i *reflektirane energije* koju promatrani objekt reflektira iz okoline na detektor zračenja, slika 15 [28-30].



Slika 15. Ukupna energija promatranog tijela detektirana IC – kamerom [27]

Da bi se provela kvalitetna termografska mjerenja, prije samog ispitivanja moraju se utvrditi svi utjecajni parametri, izvršiti kalibraciju kamere i ukloniti svi mogući okolni utjecajni faktori, koje bi detektor mogao mjeriti. Također je vrlo važno osigurati konstantne uvijete u prostoru u kojem se provodi ispitivanje.

U metalurškim pogonima većina materijala nemaju sposobnost transmisije infracrvenog zračenja, stoga se taj dio može zanemariti odmah u startu. S druge strane u metalurškim pogonima ima velik broj različitih drugih izvora toplinskog zračenja. Iz tog razloga vrlo čest problem za dobivanje točnih termografskih ispitivanja predstavlja reflektirana energija od promatranog objekta. Utjecaj reflektirane energije iz okoline može se ukloniti ili smanjiti korištenjem posebnih zastora, koji promatrano tijelo štite od utjecaja energije iz okoline. Također potrebno je uzeti u obzir i različite druge vanjske utjecaje, kao što je:

- strujanje zraka,
- relativna vlažnost zraka okoline,
- iznosi faktora emisivnosti promatranih objekata.

Ukoliko su svi ti uvjeti ispunjeni (uklonjena mogućnost mjerenja reflektirane energije, dok je transmitirana energija jednaka je nuli) te uz poznat točan faktor emisivnosti i okolnih uvjeta, moguće je provesti točna kvantitativna mjerenja termografskom kamerom [27].

Sam princip rada termografske kamere je da kamera mjeri iznos temperature promatranog objekta (T_{obj}) iz vrijednosti izmjerene promjene napona koji daje detektor infracrvenog zračenja [27-30]:

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_{ok}^n + C \cdot \epsilon \cdot T_{ok}^n + C \cdot T_{ur}^n}{C \cdot \epsilon}} \quad (1)$$

gdje je:

- C – konstanta specifična za kameru
- T_{ok} – temperatura okoline
- T_{ur} – temperatura uređaja
- ϵ – faktor emisivnosti tijela.
- U – napon električnog signala
- n – faktor koji ovisi o valnoj duljini koju detektor mjeri

Može se vidjeti kako je jedan od najutjecajnijih čimbenika na točnost mjerenja temperature faktor emisivnosti tijela. Faktor emisivnosti tijela opisuje sposobnost materijala da emitiraju ili oslobađaju apsorbiranu toplinsku energiju. Emisivnost tijela ovisi o vrsti materijala, stanju (kvaliteti) površine tijela, te temperaturi promatranog tijela. Može se reći da faktor emisivnosti predstavlja omjer ukupne energije zračenja realnog tijela u odnosu na ukupnu energiju zračenja idealnog crnog tijela pri istoj temperaturi [27,31,32]:

$$\epsilon = \frac{W_o}{W_{ct}} \quad (4)$$

gdje je:

- ϵ – faktor emisivnosti
- W_o – ukupna energija zračenja realnog tijela
- W_{ct} – ukupna energija zračenja idealno crnog tijela.

Vrijednosti faktora emisivnosti za uobičajene materijale poznate su i dostupne u literaturi. U određenim slučajevima potrebno je utvrditi faktor emisivnosti. Za to je potrebno izmjeriti točnu temperaturu tijela, a zatim u skladu s tim postaviti parametre u infracrvenoj kameri. Često se na površinu tijela nanosi premaz s poznatom emisivnošću kako bi se postigao ujednačeni faktor emisivnosti. To se ne primjenjuje u industrijskim pogonima, zbog značajno velikih površina koja se snimaju ili iz razloga što bi time naštetili uređaju, kao na primjer kod lijevanja u trajni kalup. U tim slučajevima potrebno je nekom od kontaktnih metoda odrediti točnu temperaturu promatranog tijela. Nakon toga se u postavkama kamere faktor emisivnosti podešava sve dok se ne postigne isto očitavanje. Nakon toga moguće je mjerenje temperaturne raspodjele po promatranom tijelu. To se češće događa u ljevaonicama (metalurškim postrojenjima) jer različiti elementi imaju različite vrijednosti faktora emisivnosti [27,28,33-36].

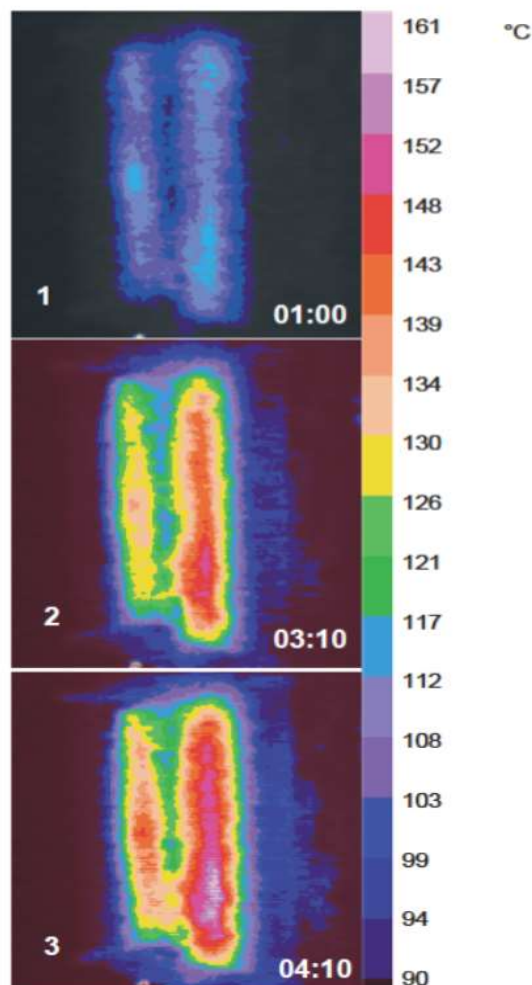
3.2. Primjena termografske metode u metalurškim postrojenjima

U proizvodnji odljevaka upotreba termografije ima široku primjenu, od promatranja proizvodnih uvjeta do analize i otkrivanja nedostataka tijekom lijevanja i hlađenja odljevaka. Svaki nedostatak na instalacijama i na samim postrojenjima za proizvodnju odljevaka može rezultirati velikim financijskim gubicima, pa čak i ozljedama radnika [28].

Tako je termografska metoda pronašla svoju primjenu pri ispitivanjima na pojedinim segmentima i kalupima u procesu proizvodnje pri lijevanju u metalurškim postrojenjima. Svoju primjenu sve više pronalazi u ispitivanju parametara i detektiranju mogućih pukotina i/ili hladnih mjesta na kalupima za visokotlačni lijev [13,36-41] između ostalih, može se istaknuti njena primjena u otkrivanju mjesta nastanka pukotina na kalupima za visokotlačni lijev [13,39], gdje se navodi da je jedan od glavnih uzroka puknuća kalupa toplinsko naprezanje koje se javlja u površinskim slojevima kalupa za lijevanje prilikom pokretanja ciklusa. Uslijed nastalih naprezanja dolazi do pojave lokalnih pukotina koje naknadno rastu i predstavljaju ozbiljan problem u proizvodnji.

Kada aluminijske legure dođu u kontakt s radnom površinom kalupa, kalup se širi, a zatim se skuplja tijekom hlađenja. Što je veća razlika između temperature kalupa i temperature taline koja se ubrizgava, veća će biti kontrakcija i ekspanzija površine kalupa [13]. Uslijed toga dolazi do stvaranja i progresije pukotina, što dovodi do poteškoća u proizvodnji i konačnog loma, tj. oštećenja na kalupu.

Primjer jednog takvog ispitivanja kalupa termografskom kamerom prikazan je na slici 16. Termografska mjerenja provedena su na nepokretnoj strani kalupa, od temperature predgrijavanja kalupa do grijanja kalupa na početnu radnu temperaturu od oko 240°C.



Slika 16. Primjer termografske snimke [13]

Slika prikazuje termografske snimke zagrijavanja kalupa. Termografija je prikazana u rasponu od 90°C do 161°C, crno područje su temperature ispod 90°C. Slika 16/1 prikazuje kalup na početku predgrijavanja, slika 16/2 nakon otprilike 2 sata zagrijavanja i slika 16/3 na kraju predgrijavanja.

Istraživanje je zaključilo da kako bi se spriječile pukotine nastale uslijed toplinskog naprezanja, odnosno postiglo homogeno temperaturno polje, treba promijeniti i način grijanja i dizajn samog kalupa [13].

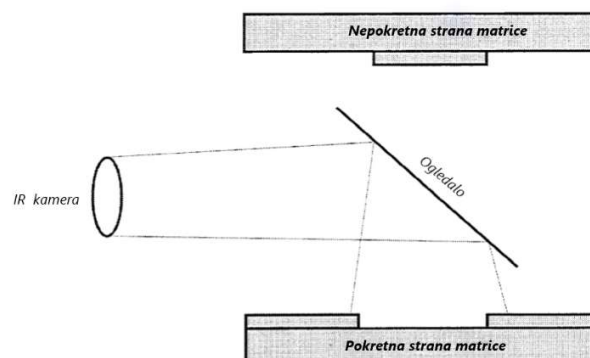
Također i istraživanja u literaturi [37] dokazuju učinkovitost termografske metode u industrijskim uvjetima. Ona pokazuju jedan od postupaka primjene termografije kao učinkovitog kalupa za promatranje cjelokupnog procesa. Rezultati opisuju koje su informacije dostupne u termografskim mjerenjima, kako se odnose na postupak i kako se mogu koristiti za poboljšanje proizvodnje.

Mjerenjem površinske temperature kalupa, može se procijeniti učinkovitost rashladnih vodova i optimizirati učinak špricanja. Naglašava se kako ova tehnika nije prikladna za ispitivanje aluminijskih dijelova, jer je emisivnost aluminijska niska, a optička svojstva površinskog oksidnog sloja se mijenjaju kako se dio hladi [37]. Stoga je pri ispitivanjima termografskom metodom na aluminijskim proizvodima bitno utvrditi raspon temperatura na kojima se ispitivanja provode, te raspon vrijednosti faktora emisivnosti u tom području. Na taj način mogu se dobiti komparativna mjerenja termografijom.

U istraživanjima iz literature [37], temperature površine izmjerene su pomoću infracrvene kamere sa spektralnim odzivom centriranim oko 8-12 μm (Agema 900 LWB, Agema infracrveni sustavi). Snimke površine kalupa dobivene su velikim aluminijskim zrcalom (*Edmund Scientific Company*) koje je postavljeno u prostor između polovica kalupa da bi se slika odrazila na kameru. Također na vruće dijelove koji se ne snimaju po potrebi su postavljeni izolacijski prekrivači kako bi se smanjila reflektirana toplina. Ispravna zaštita je presudna za pouzdana mjerenja temperature u vrućim uvjetima.

Kako se navodi u istraživanju, snimka istog kalupa bez zaštite bila je 220°C, dok je sa zaštitom stvarna temperatura bila 100°C. Također, kad se kalup otvori, uvijek postoji druga polovica koja svoju energiju reflektira s površine. Iz tog razloga postavljen je štit između polovica kalupa.

Jednostavan način ublažavanja problema zalutalih refleksija je postavljanje ogledala na 45° između polovica kalupa i snimanje toplinske slike kao što je prikazano na slici 17. Dobro zrcalo od aluminijska s prednjom površinom odrazit će više od 95% toplinske energije, a kameri omogućuje okomiti pogled na površinu kalupa, te ujedno štiti površinu snimanja od reflektirane energije druge polovice kalupa (matrice). Ovaj pristup također nudi poboljšano vidno polje i dubinu fokusa pri gledanju kalupa sa strane. U slučajevima kada zrcala nisu praktična, potrebno je barem staviti izolacijski pokrivač preko polovine kalupa koja se ne analizira [37].



Slika 17. Način postavljanja ogledala između polovica kalupa [37]

Loša toplinska ravnoteža kalupa može dovesti do vrućih žarišta (hot spot) i toplinskih gradijenata u dijelovima kalupa što zauzvrat stvara zaostala naprezanja, poroznost odljevka, pa čak pucanje kalupa. Najčešći uzroci neravnoteže topline su neprimjereno prskanje, loše dizajnirani rashladni kanali i loše dizajne matrice. Učinkovita upotreba termografije može pomoći identificirati koji od ovih čimbenika loše utječu na kalup, eliminirajući potrebu za nagađanjem i nepotrebnim ponovnim inženjeringom kalupa [36].

Termografija je učinkovita tehnika vizualizacije temperaturnih polja na površini kalupa. Istraživači navode kao primjer kalup koji je znatno toplija duž dna, blizu cilindra za ulijevanje i uljevnog kanala. Neki strojevi zahtijevaju da ovo područje bude vruće kako bi se spriječilo da se talina previše hladi tijekom punjenja kalupne šupljine, ali ako to nije namjera, problem se može riješiti tako da se poveća vrijeme špricanja u donjem dijelu kalupa.

Lijevanje velikih ili složenih odljevaka pod tlakom zahtjeva dodatnu pozornost hlađenju kalupa. Kalupi koje se koriste za lijevanje debelih i velikih površina odljevka zahtijevaju široke unutarnje linije za hlađenje, a kalupi s izbočinama (štiftovima) okruženim aluminijem tijekom lijevanja zahtijevaju dodatno prskanje. Visoke temperature na kraju dovode do naljepljivanja i pucanja površine kalupa. Utvrđeno je da je potrebno "pothladiti" ove dijelove kako bi se spriječilo da se kalup pregrije. Kod ovog kalupa termografska analiza pokazala je da je najučinkovitiji način špricati ove regije jednom na početku ciklusa špricanja i jednom na kraju. Prekid između nanošenja premaza omogućava usmjereno hlađenje prema određenim točkama na kalupu dok se ostatak kalupa ponovno zagrijava zbog provođenja topline ispod površine. Drugi nanos premaza tada učinkovito uklanja toplinu s površine. To se slaže s teoretskim modelima koji se bave tehnikama prskanja [37].

Analiza pretpostavlja da toplinu koja se prenosi od taline aluminijske legure do kalupa tijekom lijevanja treba ukloniti rashladnim vodovima i prskanjem. Loše dizajnirani kanali za hlađenje mogu se otkriti primjenom termografije. Ako temperatura površine kalupa počne rasti nakon završetka ciklusa špricanja, to upućuje na to da je između kanala za hlađenje i površine kalupa najviša temperatura. Što uzrokuje dulje vrijeme skrućivanja, a s time i odgađa vrijeme izbacivanja odljevka, te povećava vrijeme ciklusa.

Na temelju termografske analize istraživači su identificirali kritična područja, te na njihov prijedlog kanali za hlađenje su modificirani. Nakon ponovne instalacije kalupa poslije modifikacije hlađenja ponovljena je termografska analiza, gdje se uspostavilo da su se sve točke nastavile hladiti nakon što je prskanje bilo potpuno, što sugerira da je sada najtoplija točka na površini kalupa, te se predlaže dodatne regulacija temperature prskanjem [37].

U istraživanjima [3] prikazuju upotrebu termografske metode ispitivanja u tijeku proizvodnje visokotlačnim lijevom za određivanje utjecaja parametara visokotlačnog lijevanja na svojstva gotovih odljevaka. Ispitivanja su provedena mjerenjem raspodjele temperature po kalupu, prije i nakon nanošenja premaza. Istraživanje je pokazao da se termografijom može utvrditi točna temperatura površine kalupa. Iz istraživanja zaključeno je kako temperature kalupa i legure treba točno podesiti kako bi se dobio kvalitetan odljevak [3].

Upravo na temelju tih istraživanja istraživači su došli do zaključka da poznavanjem stvarne temperature kalupa možemo promijeniti uvjete hlađenja kalupa i prilagoditi premaz kalupu, a s time povećati produktivnost i poboljšati kvalitetu samog odljevka [3].

Pri ispitivanju učinka premaza je dat zaključak kako premaz utječe i na izbacivanje odljevka i na odvođenje topline iz kalupa [37]. Pretpostavljeno je da nejednoliko nanošenje premaza i poroznost nastala tijekom skrućivanja onemogućuju prijenos topline iz kalupa i na taj način dolazi do nejednačene temperature kalupa i s time čvorišta s izraženim toplinskim gradijentima. Četiri ispitivana maziva koja se navode u članku prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Premazi koji su korišteni u istraživanju [37]

PREMAZ	DOBAVLJAČ	OPĆE KARAKTERISTIKE
AS 116 paint lubricant	Acheson Colloids Chemical, Brantford, Ont.	Crna mast nanescna kistom
Aerodage G	Acheson Colloids,	Aerosolni sprej
Crown 68078	Crown Industrial Products, Whitby, Ont.	Suho grafitno mazivo
Deltacast 1877	Acheson Colloids	Emulzijski sprej, koloidno mazivo

U ovoj su studiji ispitana četiri vrlo različita premaza za podmazivanje i reguliranje temperature kalupa. Rezultati istraživanja [37] pokazali su da premaz Aerodage G nije dobro navlažio površine i nije ohladio površinu kalupa između ciklusa. Mast (Pasta) AS 116 podmazala je kalup u nekoliko ciklusa nakon jednog nanošenja, dozvoljavajući raspršivanje samo rashladnog sredstva između ciklusa. Međutim, mast ASS 116 je ispuštala veliku količinu isparenja koja su ometala pogled na površinu kalupa infracrvenom kamerom. Grafitni sprej Crown 68078 uklonjen je nakon jednog ciklusa i potrebno je zasebno rashladno sredstvo za održavanje normalnih radnih uvjeta. Konačno, emulzijski sprej Deltacast sadržavao je dovoljno vode da ohladi kalup i osigura odgovarajuće podmazivanje, sve dok se nanosi nakon svakog ciklusa [37].

Istraživanja na sustavu za hlađenje kalupa [41] ističu kako ovisno o temperaturi kalupa ovisi kvaliteta površine lijevanog komada, mogućnost pojave nedolivenosti, površinskih grešaka i slično. Ona pokazuju kako korištenjem termografije i promatranjem temperaturne raspodjele moguće je podesiti sustav za hlađenje kalupa na način da se izbjegnu neželjene posljedice. U svojim istraživanjima koriste paralelno uz termografiju i beskontaktni pirometar kojim su potvrdili svoje rezultate. Zaključuju kako je termografska metoda vrlo koristan kalup u nadziranju sustava, te pouzdan izvor potrebnih vrijednosti za daljnji razvoj modela.

U istraživanjima utjecaja premaza na kvalitetu gotovog proizvoda termografska metoda postaje sve češći odabir za ispitivanja temperaturne raspodjele po kalupi.

Kao dobar primjer korištenja termografije kao metode testiranja učinkovitosti premaza može se dati primjer upravo iz ljevaonice Lipovica d.o.o. U suradnji s dobavljačem premaza napravljena termografija na površini kalupa za lijevanje aluminijskih radiatora.

Cilj testiranja bio je odabrati najprimjereniji premaz za lijevanje koji bi omogućio izradu čisteg odljevka i smanjio emisije na stroj i okolinu stroja, na način da se uz promjenu tipa i koncentracije premaza termografskim snimanjem promatrala temperaturna raspodjela po kalupu.

Testiranje je provedeno na kalupu "ORION 600L-6A" od AlSi11Cu2(Fe) legure. Za testiranje odabrana su dva premaza koja se danas najviše koriste u ljevaonicama radijatora. Premaz na mineralnoj osnovi (u daljnjem tekstu "premaz 1") i premaz na sintetičkoj osnovi (u daljnjem tekstu "premaz 2"). Premaz 1 je robusniji i fleksibilniji pri upotrebi te manje osjetljiv na kvalitetu vode, dok premaz 2 ostavlja manje mrlja na odljevku te još čišću okolinu stroja [38].

Testiranja su provedena s različitim koncentracijama oba premaza, krenuvši s većim koncentracijama prema nižim. Promatralo se stvaranje zaštitnog filma na kalupima za lijevanje i temperaturna raspodjela.

Rezultati ispitivanja su ukazali kako kod upotrebe premaza 1 odljevak bude, usprkos višoj početnoj koncentraciji premaza, čišći u usporedbi s odljevkom koji se proizveo s redovitim premazom korištenim prije ispitivanja. Kod snižavanja koncentracije testiranih premaza nisu primijećene poteškoće s odvajanjem ili izbacivanjem odljevka, te testirani premaz ne utječe na temperaturu kalupa. Temperature lijevanja smanjile su se za 6-10 °C, u odnosu na stari premaz. Kod upotrebe premaza 2 primijećeno je da je odljevak puno čišći i dosta sjajniji od odljevka proizvedenog sa starim premazom prije ispitivanja. Nisu primijećene nikakve poteškoće kod odvajanja ili izbacivanja odljevka iz kalupa. Primjenom premaza 2 ustanovilo se sniženje temperature lijevanja za 10-12 °C, u odnosu na stari premaz [38].

U istraživanjima [40] također ukazuju na korisnost termografske metode pri ispitivanju utjecaja premaza na kvalitetu proizvoda i optimiranje procesa proizvodnje. Testiranja su provedena na utjecaj količine nanesenog premaza na temperaturnu raspodjelu po kalupu i utjecaju istog na greške na odlivenim proizvodima. Termografskom metodom su mjerena temperaturna raspodjela prije i nakon nanošenja premaza, a konačna analiza je provedena usporedbom s dobivenim proizvodom. Na ovaj način postignuta je optimizacija cijelog procesa, smanjenjem korištenog premaza i smanjenjem ukupne količine defektnih proizvoda.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad daje pregled literature o tematici proizvodnje lijevanjem, s naglaskom na visokotlačni lijev aluminijskih legura. Opisani su procesi visokotlačnog lijevanja, sa specifičnim postupcima koji se provode u tvornici Lipovica d.o.o. Nadalje, navode se greške koje se javljaju pri visokotlačnom lijevanju s naglaskom na probleme oko nedolivenosti.

Iz pregleda literature i prakse može se zaključiti da je nedolivenost posljedica pothlađenja uslijed nepovoljne temperaturne raspodjele po kalupu ili nedovoljne zagrijanosti samog kalupa prije početka lijevanja. Iz pregleda literature vidljivo je kako se danas termografska metoda ispitivanja predstavlja kao vrlo pouzdana metoda za određivanje temperaturne raspodjele na trajnim kalupima za visokotlačni lijev.

Analizom termografskih snimaka raspodjele temperature po kalupu moguće je otkriti mjesta pothlađenja kalupa te je moguće predvidjeti mjesto nastanka greške na odljevku, a naknadnim zahvatima na parametrima stroja moguće je djelomično ukloniti nedolivenost koja se javlja uslijed hlađenja dijela kalupa.

Uz navedeno iz literature korištene za ovaj završni rad vidi se kako je termografija djelotvoran kalup za analizu špricanja kalupa, dizajna rashladnih vodova i otkrivanje toplinske raspodjele po kalupu. Tehnolozi u ljevaonicama mogu koristiti termografiju za otkrivanje malih promjena temperature uslijed nanošenja premaza, kako bi poboljšali hlađenje i podmazivanje kalupa izborom adekvatnog premaza, te ispravnim podešavanjem automatskih prskalica (šprica) za nanošenje premaz gdje je to potrebno. Nadalje, može se procijeniti utjecaj rashladnih sredstava i premaza na temperaturu kalupa. To bi trebalo smanjiti broj toplih mjesta "hot spot" (žarišta), odnosno poboljšati temperaturnu raspodjelu po kalupu, što dovodi do smanjenja temperaturnih naprezanja u kalupu i bolje kvalitete proizvoda.

Sve navedeno ukazuje kako je termografija vrlo koristan alat ili metoda kojom je moguće podešavati određene parametre lijevanja, a sve u cilju optimiranja postupka i postizanja kvalitetnijeg proizvoda.

5. LITERATURA

- [1] K. Tišljar, Simulacija tlačnog lijeva odljevaka od Al legure, [diplomski rad] , Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [2] Tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/ljevarstvo.pdf>, [pristup: 12.05.2020.]
- [3] S. Babić, Utjecaj parametara visokotlačnog lijevanja na svojstva odljevaka, [magistarski rad], Sisak, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
- [4] F. Klein, Tlačno litje-obetajoč postopek, 44. livarsko posvetovanje v Portorožu, 16- 17 September 2004., 36-49
- [5] <http://lipovica.hr/hr/> [pristup: 17.01.2020.]
- [6] H. Steigner, Buehler, Izboljšanje kvalitete tlačnih ulitkov, 8. Kongres livarjev Jugoslavije, 15-19 oktobra 1990, Zbornik referatov, 257-266
- [7] A. Street, The diecasting book, Portcullis Press LTD, 1986, England
- [8] ASM International, ASM handbook volume 15: Casting, 1998.
- [9] F. Klein, Zmanjševanje stroškov pri tlačnem ulivanju, 43. livarsko posvetovanje; Portorož, 18.-19. september 2003.
- [10] D. Mahaček, S. Babić, F. Unkić, Utjecaj radnih uvjeta na vijek trajanja alata za tlačni lijev, 6th International foundry conference, Innovative Foundry Materials and technologies, Opatija, May 23-25, 2005
- [11] I. Siller, H. Schweiger, Einfluss von thermomechanischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften auf die Brandrissbeständigkeit von Warmarbeitsstählen für Druckgussanwendungen, Giesserei-Rundschau 54 (2007), 38-40
- [12] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes, Alatni materijali, Slavonski Brod, 1996.
- [13] B. Kosec, G. Kosec, M. Soković, Case of temperature field and failure analysis of die-casting die, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering vol. 20, (2007) 1-2, 471 - 474
- [14] L.A. Dobrzanski, Technical and Economical Issues of Materials Selection, Silesian Technical University, Gliwice, 1997.
- [15] L.A. Dobrzanski, Synergic Effects of the Scientific Cooperation in the Field of Materials and Manufacturing Engineering, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 15 (2006) 1-2, 9 – 20.
- [16] S. Kalpakjian, Tool and Die Failures - Source Book, ASM International, Metals Park, Ohio, 1982.
- [17] S. Babić, D. Unkić, Ispitivanje utjecaja brzine druge faze na čvrstoću visokotlačnih odljevaka, Ljevarstvo 50(2008)3, 81-88.
- [18] S. P. Udvardy, Unapređenje u istraživanju i tehnologiji tlačnog lijevanja aluminija u SAD, Ljevarstvo 42 (2000) 3
- [19] Z. Zovko Brodarac, Postopek Squeezing za preprečavanje napak zaradi krčenja [magistarski rad], Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, 2005.
- [20] S.Babić, Utjecaj temperature alata za tlačni lijev na kakvoću odljevka i vijek trajanja alata, Ljevarstvo 41 (1999), 91-98

- [21] Z. Zovko Brodarac, Tehnologija lijevanja obojenih metala, (nastavni materijal za predavanje), Metalurški fakultet Sisak.
- [22] B. Budić, Posebni ljevački postupci II.dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2009.
- [23] I. Hrgović, Plinska poroznost u aluminijskim tlačno lijevanim odljevcima, Ljevarstvo 49(2007)2, 47-52.
- [24] M. Galić, Proizvodnja metalnih odljevaka: Priručnik, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2008.
- [25] G. K. Sigworth, (2016) Gas Fluxing of Molten Aluminum. In: Grandfield J.F., Eskin D.G. (eds) Essential Readings in Light Metals. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48228-6_27
- [26] Z. Glavaš, Analiza grešaka na odljevcima, (nastavni materijal za predavanja), Metalurški fakultet Sisak.
- [27] I. Jandrlić, Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, [doktorska disertacija], Sisak, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [28] I. Jandrlić, T. Brlić, S. Rešković, Application of thermography in the production and processing of metallic materials, Proceedings Book of 15th International Foundrymen Conference, ur. Dolić, Natalija ; Zovko Brodarac, Zdenka, Opatija, May 11th-13th, (2016), 99-108
- [29] M. Hrvoje, Đ. Damir, Primjena infracrvene termografije u održavanju stambenih objekata, http://www.huict.hr/images/pictures/impl_doc_1_20.pdf, [pristup: 20.04.2020.]
- [30] J. Nowacki, A. Wypych, Application of thermovision method to welding thermal cycle analysis, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 40 (2010)2, p. 131-137
- [31] Basic Principles Of Non-Contact Temperature Measurement, http://www.optris.com/applications?file=tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR-Basics.pdf [pristup 25.01.2020.]
- [32] Principle of thermal imaging, https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.inmes.hr%2Fpdf%2Fthermography.pdf&ei=Xm5AVYrzBcGMaLfogegM&usg=AFQjCNHcPBSX_0BSY-joA1UZ2g5kTbrRAg, [pristup 25.01.2020.]
- [33] I. Jandrlić, S. Rešković, Primjena termografske metode u određivanju početka plastične deformacije, Proceedings book of 13th International Foundrymen Conference, Sisak : Metalurški fakultet, 2013. p.163-170.
- [34] Y' Huang, C.H. Shih, Application of infra-red techniques to research on mechanical properties, Metallurgical Science and Technology Vol. 4 (1986), p. 3-7
- [35] I. Jandrlić, S. Rešković, L. Lazić, Značaj faktora emisivnosti kod termografskih ispitivanja plastičnosti čelika, Proceedings of 12th International Foundrymen Conference, Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies, ur. N. Dolić, Z. Glavaš, Z. Zovko Brodarac, Metalurški fakultet, Opatija, 24. – 25. svibanj 2012., 169-175.

- [36] S. Tavakoli, I. Ranc, D. Wagner, Thermal behavior study of the mold surface in HPDC process by infrared thermography and comparison with simulation, Proceedings of the 12th International Conference on Quantitative Infrared Thermography, France, Bordeaux, July 2014, Jul 2014, Bordeaux, France
- [37] M. Prystay, C. Ang Loong, K. Nguyen, Optimization of cooling channel design and spray patterns in aluminum die casting using infrared thermography, Industrial Materials Institute, National Research Council of Canada, Canada, 15-24.
- [38] Interna dokumentacija Lipovica d.o.o.
- [39] B. Kosec, Failures Of Dies For Die-Casting Of Aluminium Alloys, Metalurgija 47 (2008) 1, 51-55
- [40] E. Fiorese, F. Bonollo, E. Battaglia, G. Cavaliere, Improving die casting processes through optimization of lubrication, International Journal of Cast Metals Research 30 (2017) 1, 6-12
- [41] L.X. Kong, F.H. She, W.M. Gao, S. Nahavandi, P.D. Hodgson, Integrated optimization system for high pressure die casting processes, Journal of materials processing technology 201(2008) 629–634