

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Židlík
Vojtěch

2022



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Židlík** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **459903**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití mikropostřiku v technologii tlakového liti

Název diplomové práce anglicky:

The using of microspraying in HPDC technology

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod a cíle práce
2. Technologie tlakového liti a materiál
3. Řízení teplotních polí forem pro tlakové liti
4. Analýza stávající technologie
5. Návrhy změn
6. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá tématem využití mikropostřiku v technologii vysokotlakého lití a skládá se ze dvou částí, teoretické a praktické. Teoretická část je zaměřena na obecné fakta týkající se vysokotlakého lití, ošetření forem především s použitím technologie mikropostřiku a metalurgie neželezných kovů s detailnějším zaměřením na slévárenské slitiny hliníku. V praktické části diplomová práce řeší aplikaci technologie mikropostřiku pro výrobu hliníkového odlitku vysokotlakým litím ve firmě Ljunghäll s.r.o. Výsledky praktické části hovoří o přínosech aplikace mikropostřiku, jakými jsou především životnost a autonomní údržba formy, ekologický dopad ve firmě, likvidace odpadních vod a další.

Klíčová slova

Slitiny hliníku, EN AC - 46000, technologie vysokotlakého lití, vysokotlaké lití, mikropostřik, ošetření formy, forma, chladicí systém, temperační systém, teplotní pole formy

Abstrakt

This diploma thesis concerns the topic of the use of microspraying in high-pressure die casting technology and consists of two parts, theoretical and practical. The theoretical part is focused on general facts regarding high-pressure die casting, mold treatment mainly by using microspray technology and metallurgy of non-ferrous metals with a more detailed focus on foundry aluminum alloys. In the practical part, the diploma thesis deals with the application of microspraying technology during the production of aluminum casting by high-pressure die casting in the company Ljunghäll s.r.o.. The results of the practical part displays the benefits of the application of micro-spraying technology, such as the lifetime and autonomous maintenance of the mold, the ecological impact in the company, the disposal of waste water and others.

Keywords

Aluminium alloys, EN AC – 46000, High pressure die casting, die casting, microspraying, mould treatment, mould, cooling system, temperature system, mould temperature regulation

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Využití mikropostřiku v technologii tlakového lití** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D., dále svému konzultantovi panu Davidu Řepovi a všem ostatním kolegům z firmy Ljunghäll s.r.o. za věcné připomínky, jejich čas, obětavost a cenné rady, které mi byly velkým přínosem během vypracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Ljunghäll s.r.o. za poskytnutí podkladů důležitých k vypracování diplomové práce a za možnost tvořit práci pod vedením této firmy.

Obsah

ÚVOD A CÍLE PRÁCE.....	- 9 -
1. TECHNOLOGIE VYSOKOTLAKÉHO LITÍ.....	- 10 -
1.1. AUTOMATIZOVANÉ LICÍ PRACOVNÍŠTĚ	- 12 -
1.2. FÁZE LICÍHO PROCESU	- 14 -
1.3. VYSOKOTLAKÉ LICÍ FORMY	- 15 -
1.4. VTOKOVÁ SOUSTAVA TLAKOVÉHO LITÍ.....	- 17 -
1.4.1. ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	- 18 -
1.4.2. VTOKOVÝ ZÁŘEZ.....	- 20 -
1.4.3. VTOKOVÝ KANÁL	- 21 -
1.4.4. TABLETA A VTOKOVÝ KUŽEL.....	- 21 -
2. TEPLTNÍ POLE FORMY.....	- 22 -
2.1. TEPELNÁ BILANCE FORMY	- 22 -
2.2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY TEPELNÝCH PODMÍNEK V TUHNOUCÍ TAVENINĚ ..	- 22 -
2.3. VZORCE PRO VÝPOČET ODEVZDANÉHO TEPLA Z TAVENINY DO FORMY.....	- 23 -
2.3.1. VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET ODEVZDANÉHO TEPLA Z TAVENINY DO FORMY	- 23 -
2.3.2. VÝPOČET PŘESTUPU TEPLA	- 24 -
2.4. TERMOREGULACE FORMY	- 24 -
2.4.1. TEMPERACE A CHLAZENÍ FOREM PRO VYSOKOTLAKÉ LITÍ	- 24 -
2.4.2. TEMPERAČNÍ SYSTÉMY PRO JÁDRA A TENKÉ MÍSTA VLOŽEK.....	- 26 -
2.4.3. CHLAZENÍ JADER METODOU JET – COOLING	- 28 -
2.5. OŠETŘENÍ LÍCE FORMY.....	- 31 -
2.5.1. LEIDENFROSTOVA TEPLOTA	- 33 -
2.6. KONVENČNÍ ZPŮSOB OŠETŘENÍ LÍCE FORMY PRO TLAKOVÉ LITÍ.....	- 33 -
2.7. MIKROPOSTŘÍK	- 38 -

3.	SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU	- 40 -
3.1.	CHEMICKÉ SLOŽENÍ SLITIN HLINÍKU	- 40 -
3.2.	SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU	- 41 -
3.3.	AlSi9Cu3 (EN AC 46000).....	- 41 -
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 42 -
4.1.	VÝVOJOVÁ FÁZE.....	- 43 -
4.1.1.	VSTUPNÍ PARAMETRY	- 43 -
4.1.1.1.	GEOMETRIE	- 43 -
4.1.1.2.	POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY	- 45 -
4.1.2.	CHLAZENÍ FORMY	- 45 -
4.1.2.1.	CHLAZENÍ PEVNÉ POLOVINY FORMY	- 46 -
4.1.2.2.	CHLAZENÍ POHYBLIVÉ POLOVINY FORMY.....	- 48 -
4.1.3.	SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE FORMY	- 49 -
4.2.	LICÍ PRACOVIŠTĚ	- 51 -
4.3.	OSTŘIHOVACÍ LIS, MANIPULAČNÍ ROBOT	- 52 -
4.4.	TECHNOLOGIE A KOMPONENTY MIKROPOSTŘIKU	- 53 -
4.4.1.	POSTŘIKOVÁ HLAVA A DDV TRYSKY	- 53 -
4.4.2.	DÁVKOVACÍ STANICE – ZÁSOBNÍK MAZADLA	- 55 -
4.4.3.	STANICE KE ZVÝŠENÍ TLAKU – MAXIMÁTOR S MANUÁLNÍM VENTILEM.....	- 55 -
4.4.4.	VOLBA SEPARÁTORU	- 56 -
4.5.	PRVNÍ VZORKOVÁNÍ	- 57 -
4.5.1.	MONTÁŽ FORMY	- 57 -
4.5.2.	ZKOUŠKA TĚSNOSTI FORMY	- 59 -
4.5.3.	ZÁVĚREČNÉ ÚKONY	- 59 -
4.5.4.	PROCES ODLÉVÁNÍ	- 60 -
4.5.5.	NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 1. VZORKOVÁNÍ	- 62 -

4.6.	DRUHÉ VZORKOVÁNÍ.....	- 62 -
4.6.1.	NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 2. VZORKOVÁNÍ.....	- 66 -
4.7.	TŘETÍ VZORKOVÁNÍ	- 67 -
4.7.1.	NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 3. VZORKOVÁNÍ.....	- 71 -
4.8.	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	- 72 -
5.	ZÁVĚR.....	- 74 -
	BIBLIOGRAFIE	- 77 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 82 -
	SEZNAM TABULEK	- 85 -

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Technologie vysokotlakého lití, sloužící pro výrobu odlitků z neželezných slitin, představuje v dnešní době jednu z nejvíce rozšířených metod výroby ve slévárenském odvětví. Důvodem je především její hojné využití v automobilovém průmyslu, pro který dokáže plnit jeho přísné podmínky na koncovou kvalitu. Mezi největší výhody této technologie patří její vysoká produktivita, vhodnost pro velkosériovou výrobu, dále schopnost vyrábět tvarově a konstrukčně velmi složité díly, které vzhledem k svým specifickým tvarům vyžadují před finálním použitím obvykle relativně malé množství dokončovacích operací a v neposlední řadě disponují kvalitním povrchem. Přes velké množství výhod technologie vysokotlakého lití však nelze opomenout i její nevýhody. Těmi nejzásadnějšími jsou vysoké pořizovací náklady jak na samotné lící stroje, tak na kovové formy s omezenou životností. Jelikož se jedná o složitý proces, není úplně snadné dosáhnout okamžitých kvalit při rozběhnutí výrobního procesu a je potřeba mít k dispozici kvalifikovaný a zkušený personál.

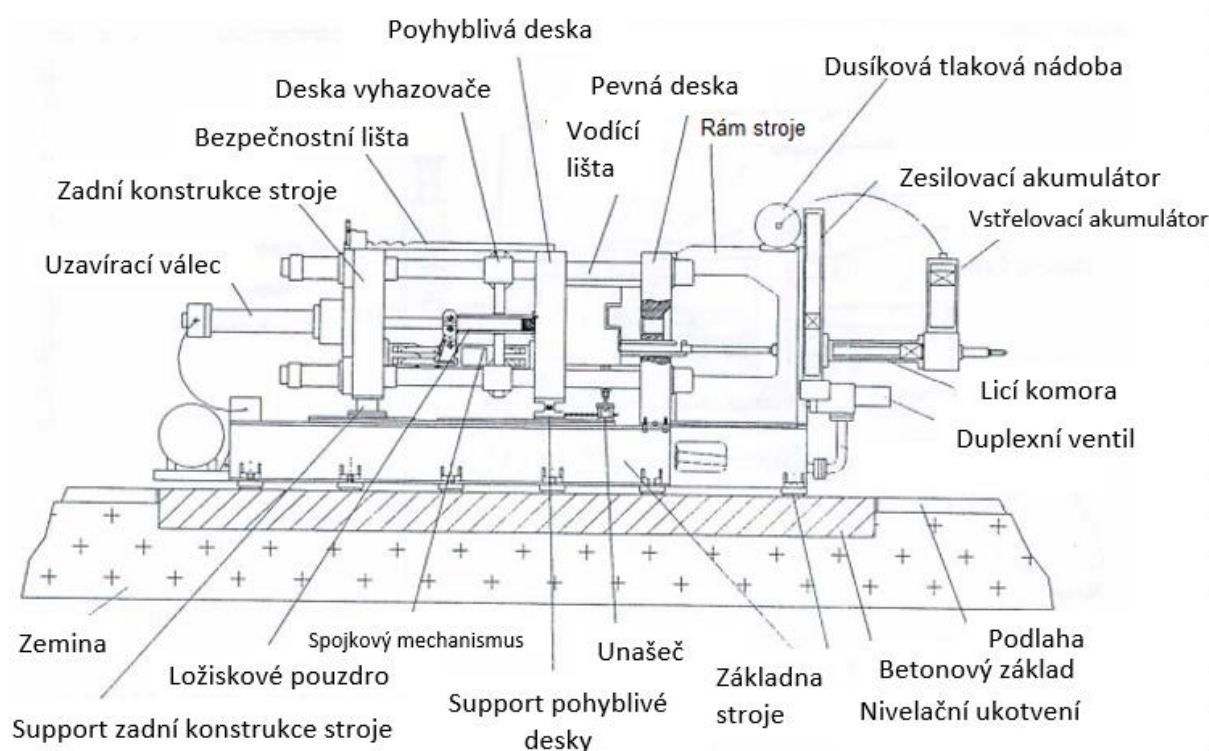
Na samotnou kvalitu odlitků má vliv několik jevů. Kvalita taveniny, konstrukce odlitku a jeho formy včetně chladících kanálků a odvodušňovacích cest, ošetření líce tlakové formy a další. Formy bývají nejčastěji ošetřovány konvenčními způsoby, které vyžadují k hladkému průběhu procesu velké množství vody. Následný vznik odpadních vod a jeho zpracování je velmi energeticky a ekologicky náročné. Se zvyšujícími se požadavky na šetrnost životního prostředí se začíná dostávat většímu prostoru technologii ošetření líce formy mikropostřikem, kterému se tato diplomová práce detailně věnuje.

Experimentální část diplomové práce proběhla ve firmě Ljunghäll s.r.o. se sídlem v Čáslavi a zaměřila se na vzorkování součásti využívané v motorech nejmenované automobilky. Cílem této diplomové práce je navrhnout a optimalizovat technologii ošetření líce formy pomocí mikropostřiku s vysokotlakým litím, kterou je zadaný odlitek vyráběn. Teoretickou částí nabyté znalosti by měly napomoci dosáhnout cílů v části experimentální, kterými jsou především:

- kladný vliv na životní prostředí absencí odpadních vod
- snížení spotřeby separátoru
- menší energetická náročnost a snížení emisí CO₂
- prodloužení životnosti formy díky absenci šokového namáhání formy separátorem
- dosažení vyšší produktivity

1. TECHNOLOGIE VYSOKOTLAKÉHO LITÍ

Technologie tlakového lití tvoří v podstatě samostatný obor ve slévárenství. Jde o naprosto odlišný způsob lití odlitků, kdy se místo pískových forem využívají formy kovové. Ty jsou chlazeny vodou a dutiny tvoří kovová jádra. Píst mechanicky, případně hydraulicky vtlačuje slitinu přes vtokovou soustavu přímo do dutiny formy pod tlakem dosahujících hodnot až 500 MPa. Záleží na typu stroje, obvykle se však tato hodnota pohybuje někde okolo 250 MPa. Díky ojedinělosti této technologie lze odlévat tvarově složité a tenkostěnné odlitky. Obecně se uvádí, že jednou z největších výhod technologie vysokotlakého lití je rozměrová přesnost odlitků, kdy odlitky dosahují odchylek pouze zhruba 0,3 – 0,5 %. Jejich velikost je omezena maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje. Jedná se o hodnotu síly svírající obě části formy. Maximální přípustnou plochu odlitku v dělicí rovině lze získat díky uzavírací síle a plnicího tlaku. [1,3,5,40]



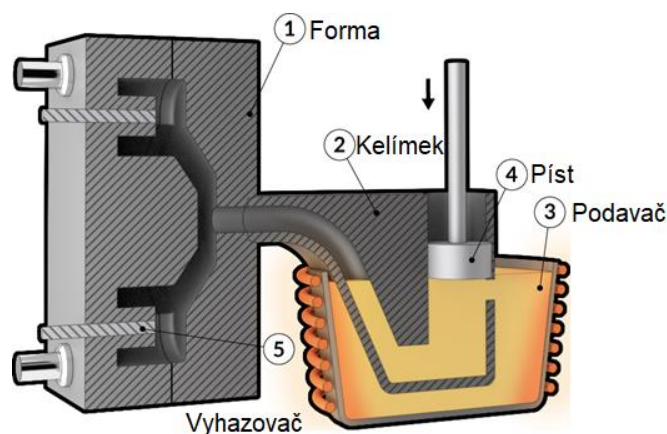
Obrázek 1 - Popis vysokotlakého lícího stroje [4]

Vysokotlaké lití je realizováno na speciálních strojích, které dle jejich konstrukčního provedení dělíme do dvou skupin. V případě, že je samotný tavící kelímek přímo součástí stroje, jedná se o stroj s teplou (vytápěnou) komorou. Další možností je stroj se studenou komorou, kdy

je kov taven mimo stroj a před každým odlitím je dopraven do tlakové komory. Dále se stroje dělí podle směru pohybu plnicího pístu a umístění dělicí roviny a sice na svislé, nebo horizontální. V současné době jsou slitiny hliníku odlévány převážně na strojích se studenou horizontální komorou. [1,4,40]

Stroje s teplou komorou

Ve stroji zabudovaný kelímek je vytápěn plynem, nebo elektrickou energií. Stroje s teplou komorou jsou využívány především pro kovy s nízkou tavící teplotou, např. tedy cín a zinek. Použití slitin s vyšší tavící teplotou by mohlo vést k poškození stroje, konkrétně například k poškození trysek. Pístem, nebo stlačeným vzduch dochází k vstřikování roztaveného kovu přes komoru přímo do formy. K uzavření plnicího otvoru dojde při pohybu pístu směrem dolů. Jakmile dojde k ztuhnutí odlitku, následuje odsunutí pohyblivé části formy a následně je odlitek vyhazovacími trny (vyhazovači) vytlačen. Na plynem, nebo elektricky vytápěném kelímku, jež je zabudován přímo ve stroji, působí pomocí pístu tlak. Ten zajišťuje v horní poloze otevření plnicího otvoru a dochází k toku kovu z kelímku do tlakové komory. Vysokotlaký lící stroj s teplou komorou je znázorněn na Obrázku 2. [1,4]



Obrázek 2 - Vysokotlaký lící stroj s teplou komorou [3]

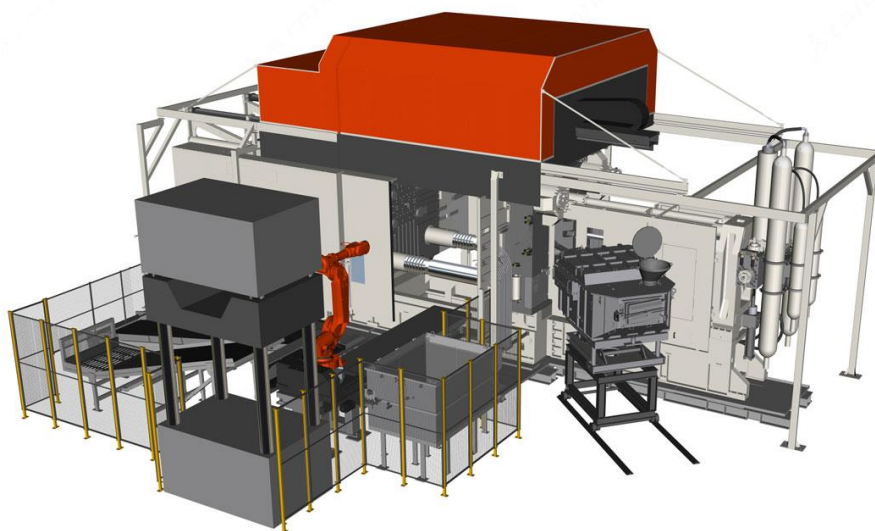
Stroje se studenou komorou

Největším rozdílem mezi strojem s teplou a studenou komorou je umístění tavící pece mimo lící stroj a transport kovu do komory. Tlaková komora se skládá z plnicího válce s vložkou, která

se vyrábí z nitrídané oceli. Jedna strana vložky je uzavřena lisovacím pístem, druhou tvoří pohyblivá část formy. Do tlakové formy je roztavený kov naléván lžící, neboli dávkovačem. Aby nedocházelo k zatékání kovu do formy, je vtokový zářez umístěn v horní části tlakové komory nad hladinou roztaveného kovu. Hlavní výhodou stroje se studenou lící komorou je menší tepelná zátěž pro stroj, nevýhodou naopak tepelné ztráty při dopravování kovu do komory. [4,5]

1.1. AUTOMATIZOVANÉ LICÍ PRACOVÍŠTĚ

Vzhledem k požadavkům trhu na vysokou sériovost odlitků se ve slévárnách čím dál méně setkáváme s pracovišti ručními, které jsou nahrazovány automatizovanými licími pracovišti. Mezi jejich hlavní přednosti patří automatizace dávkování kovu, vyjmutí odlitku a ošetření líce formy. Dodavatelé licích pracovišť jsou schopni provést návrh tak, aby vyhovoval požadavkům konkrétních sléváren a to včetně různé vybavenosti a stupně automatizace. Obvykle to sebou samozřejmě nese vyšší náklady, ale také naději ve vyšší produktivitu a menší zmetkovitost, aby investice do pracovišť byly co nejdříve navráceny. V dnešní době lze navrhnout taková pracoviště, která jsou schopna zajistit bezobslužný chod celého centra. Schéma automatického licího pracoviště je možné vidět na Obrázku 3.



Obrázek 3 - Automatizované licí pracoviště [6]

Základní části tlakových licích center:

- tlakový licí stroj s udržovací pecí
- dávkovač taveniny
- systémy pro ošetření formy
- robotická ramena pro vyjmutí odlitku
- zařízení pro rozměrovou kontrolu a kontrolu celistvosti odlitku
- chladící vany
- ostříhovací lis

Tlakový licí stroj s udržovací pecí

Poloha pece by se měla nacházet v nejbližší možné vzdálenosti od vstřikovacího mechanismu, aby nedocházelo k zbytečným tepelným ztrátám během transportu kovu do licí komory. Velikost pece se odvíjí od spotřeby taveniny pro jeden proces výroby odlitku a výpočtu cyklů za jednu minutu. Teorie udává, že obsah pece by měl vystačit alespoň na dvě hodiny provozu, aby byla slévárna schopna doplňovat všechna svá pracoviště. Nejrozšířenějšími druhy pecí v takovýchto licích centrech jsou indukční a odporové, konkrétně pak indukční kelímkové pece.

Dávkovač taveniny

Hlavním úkolem dávkovače taveniny je zajištění plynulé regulace jednotlivých dávek kovu s tolerancí 3%. Dávkovače dělíme na mechanické a pneumatické. Pneumatické pracují na principu přetlaku, případně podtlaku. Podtlakové jsou přesnější. S největší přesností však pracují mechanické dávkovače.

Systémy pro ošetření formy

Tyto systémy se dělí dle konstrukčního uspořádání:

- a) Zařízení je umístěno na třmenu licího stroje.
- b) Zařízení je umístěno na portálu nad strojem.
- c) Ošetřování se provádí pomocí manipulátoru, nebo robota.

Robotické ramena pro vyjmutí odlitku

V dnešní době se pro vyjímání odlitků navrhuje spíše robotická ramena. Lze také využívat manipulátory, které jsou levnější a jednodušší, nedosahují však kvalit robotických ramen. Neoddiskutovatelnými výhodami robota jsou možnosti navázání na další operace jakými jsou kontrola odlitku, jeho ochlazení, založení a vyjmutí z ostřihovací lisu a odložení na dopravníkový pás.

Zařízení pro rozměrovou kontrolu a kontrolu celistvosti odlitku

Nejdůležitějším úkolem tohoto zařízení je případné zastavení výroby v okamžiku, kdy dochází k výrobě zmetků. Děje se tak většinou v situaci, kdy část odlitku zůstane přilepená ve formě. Zařízení funguje buď na optickém, nebo dotykovém principu.

Chladicí vany

Po vyjmutí odlitku z formy a následném ostřížení vtokové soustavy a odvzdušňovacích kanálků je nutno vložit mezioperaci, kdy je odlitek zchlazen. Většinou jsou pro tyto účely využívány vodní lázně (případně sprchy), nebo je odlitek zchlazen vzduchem.

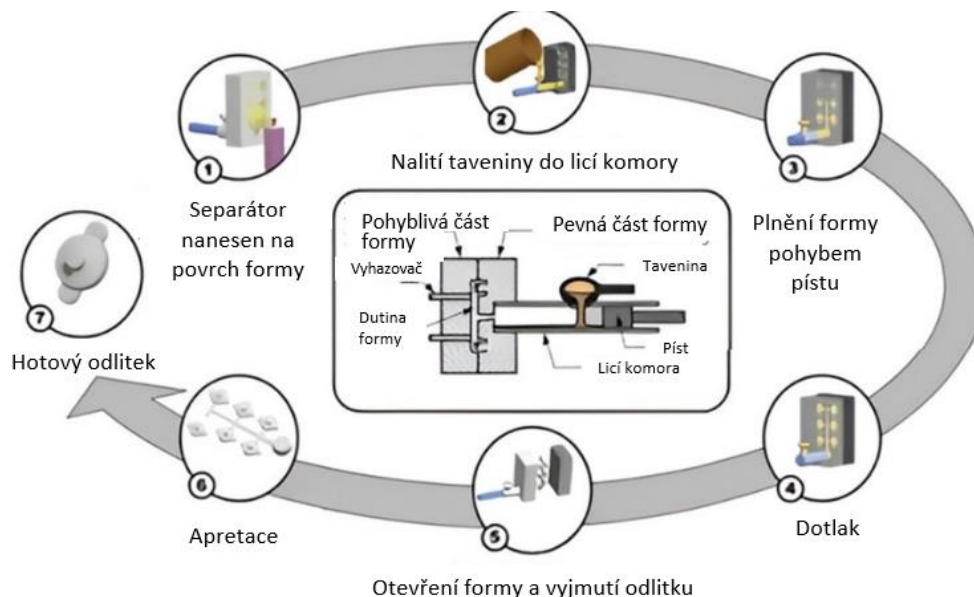
Ostřihovací lis

Přítomnost ostřihovacích lisů na pracovišti je důležitá pro odstranění vtoku a všech ostatních přetoků od odlitku. Tlakové licí centra využívají vertikálních ostřihovacích lisů. [3,7]

1.2. FÁZE LICÍHO PROCESU

V první fázi je nutné formu ošetřit separačním prostředkem. Následně dochází k nalití taveniny do licí komory. Dochází k pohybu pístu, který se v této fázi pohybuje pomalu, aby nedošlo k vystříknutí taveniny z dávkovacího otvoru (0,1 – 0,4 m/s). Kromě bezpečnosti má tato fáze ještě účel eliminovat zvěření vzduchu přítomného v licí komoře. Tento pohyb se nazývá zdvih plnění, nebo lisování. V momentě, kdy je dávkovací otvor zakrytý, dojde k prudkému vstřelení taveniny do formy (2 – 4 m/s). Poslední fází tohoto procesu je dotlak (60 – 100 MPa), kdy dochází k zhutnění odlitku pomocí multiplikátoru, který je součástí lisovací jednotky. Funkcí dotlaku je především eliminování staženin vznikajících během tuhnutí. Jakmile dojde k zatuhnutí odlitku, je z formy odejmut pomocí vyhazovačů. Přebytečný kov (vtoková

soustava) je po zatuhnutí ještě za tepla uražen, nebo dochází k jeho odstřižení pomoc hydraulického lisu. Schematicky je proces na horizontálním licím stroji se studenou komorou zobrazen na Obrázku 4 .[8,9]



Obrázek 4 - Průběh licího procesu a schéma licího stroje se studenou komorou [2]

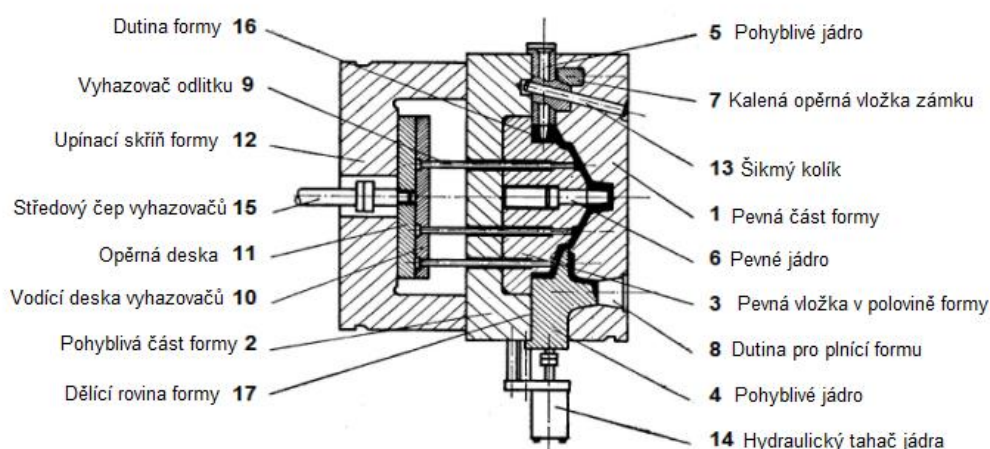
1.3. VYSOKOTLAKÉ LICÍ FORMY

Formy pro vysokotlaké lití jsou vyráběny v nástrojařských firmách. Ve většině případů mají dvě části – rám a vložku tvořící funkční část formy, která přichází do styku s kovem. Jelikož je forma během procesu vysoce mechanicky a teplotně namáhána, tak se její funkční části (vložka formy, razníky, vyhazovače, vedení formy, dorazy, posunovače, středění a rozpěrné desky) vyrábí z vysokolegovaných ocelí určených pro práci za tepla, např. ČSN EN 1.2343, 1.2344, 1.1730, 1.17131, 1.2379, 1.2767 a následně ještě dochází k jejich tepelnému zpracování. Ve většině případů se jedná o kalení s následným popouštěním. Dále mohou být použity povrchové úpravy. Nejčastěji se aplikuje plazmové nitridování, obvykle je nanášeno po prvním vzorkování z důvodu optimalizace. Části formy, které nejsou tolik namáhané jako např. rám bývají obvykle vyráběny z méně ušlechtilých ocelí, např. konstrukčně legované oceli ČSN EN 1.2311, 1.2312. U vysokotlakého lití rozlišujeme dvě části forem – statickou a pohyblivou. V případě, že jsou tyto dvě části navzájem uzavřeny, tvoří tak společně dutinu pro výsledný odlitek. Vstupními daty pro konstruktéry bývají obvykle 3D modely odlitků. Samotný návrh

a výroba forem je velmi složitý proces a vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál s konstrukčními a výrobními zkušenostmi. Je potřeba myslet na velké množství aspektů, kterými jsou například:

- Optimalizace odlitku pro tlakové lití (úkosy, zaoblení, apod.)
- Navrhnout otvory vhodné pro předlití
- Odvzdušnění, případně vakuování formy
- Přiradit konkrétním formám vhodné licí pracoviště
- Zvětšení modelu odlitku o hodnotu smrštění slitiny
- Návrh vtokové soustavy
- Chlazení a temperování formy, které má zásadní vliv na kvalitu odlitků
- Snadné vyjmutí odlitku z formy. Odlitek by měl být po konci licího procesu unesen pohyblivou částí formy. Na to navazuje správné konstrukční řešení vyhazovačů, aby byl odlitek z formy odebrán tak, aniž by došlo k jeho případnému poškození, nebo deformaci.

Kvalita formy výrazně ovlivňuje produktivitu sléváren, proto jsou kladeny vysoké požadavky na její materiálovou a rozměrovou jakost. Následné možnosti úprav po jejím vyrobení jsou velmi omezené. Jak již bylo zmíněno, formy pro vysokotlaké lití jsou na výrobu finančně velmi náročné a proto jedním z požadavků na ně je vysoká životnost. Obecný požadavek se pohybuje okolo 100 000 cyklů. Z výše uvedených důvodů jsou tyto formy vhodné výhradně pro velkosériovou výrobu. [10]



Obrázek 5 - Popis vysokotlaké licí formy [11]

1.4. VTOKOVÁ SOUSTAVA TLAKOVÉHO LITÍ

Vtoková soustava slouží jako přívod taveniny z lící komory do dutiny formy. Obvykle je tvořena jednoduššími a složitějšími kanály. Mezi její hlavní úkoly patří zabezpečení správného a pokud možno co nejplynulejšího naplnění dutiny formy a následnou snadnou apretací od hotového odlitku. Dle typu odlitku rozlišujeme 3 druhy vtokových systémů:

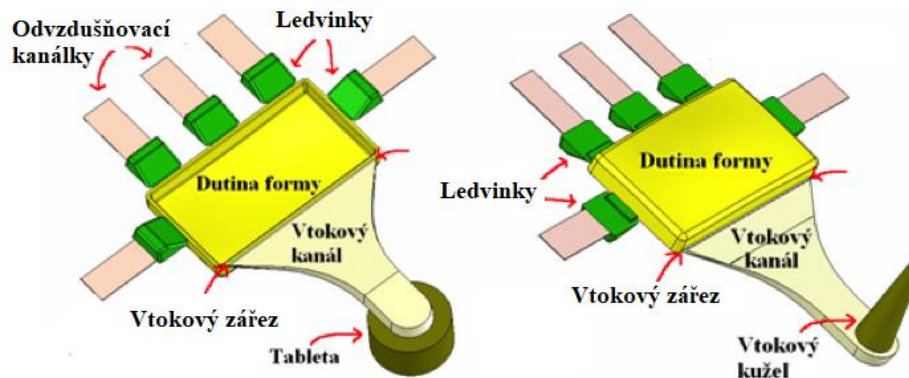
- Prstencový vtok – kruhový průřez v dělicí rovině
- Středový vtok – souměrný odlitek větších rozměrů s předlitým otvorem
- Nožový (lamelový) vtok – pro dlouhé odlitky s malou tloušťkou v dělicí rovině

Během plnění formy je důležité co nejvíce eliminovat turbulentní proudění kovu. V případě, že zadaný odlitek má tvar obdélníku, volíme napojení vtokové soustavy na kratší straně. Ledviny a odfuky se konstruují v místech, kde se předpokládá hromadění plynu. Jedná se tedy o protější stranu od vtokového naříznutí a místa, která jsou na odlitku nějakým způsobem uzavřená, případně pokud jejich členitost nedovoluje nepřerušovaný odchod plynu z dutiny. Návrh vtokové soustavy většinou záleží na počtu tvarových dutin a jejich vlastní rozmístění. Jelikož soustava prodlužuje dráhu tečení taveniny do formy, dochází k negativnímu vlivu na snížení teploty a částečného poklesu vstřikovacího tlaku. Z toho vyplývá, že při konstruování vtokových kanálů by se mělo hledět na jejich co nejkratší trasu a pokud možno co největší rozměry zářezů. Při navrhování vtokového systému je důležité brát zřetel na:

- Správné plnění dutiny formy
- Hmotnost a tvar odlitku
- Vhodný směr proudění taveniny v dutině formy, aby nedocházelo k předčasnému opotřebením jejích stěn
- Omezení místních změn teplot, které by vedli k nadměrnému opotřebením a zhoršení povrchové čistoty odlitku
- Minimalizace vírů v proudu taveniny, které vede k uzavírání plynů v objemu odlitku
- Výsledný požadovaný tvar a kvalita povrchu

Po prvním vzorkování většinou dochází k optimalizaci vtokového kanálu a přepuštění. Děje se tak ve formě přidání nebo zvětšení ledvinek, přetoků, úprav vtoku a naříznutí apod. Cílem je dosažení kvalitního odlitku bez zavalenin, porezity a dalších vad. Výpočet vtokové soustavy je dán normou ČSN 228601 a jeho samotný proces dnes velmi ulehčují simulační

programy, které dokážou spoustu nedostatků odhalit již v části vývoje vtokových soustav a pomoci tak kvalitnějšímu odladění formy. Na Obrázku 6 jsou znázorněny hlavní části vtokového systému. [10, 12]



Obrázek 6 - Hlavní části vtokového systému [12]

1.4.1. ODVZDUŠNĚNÍ FORMY

Odvzdušnění tvarové dutiny připadá nemalá váha. Vzhledem k tomu, že doba zalisování je velmi krátká a lisování je prováděno velkou rychlostí s vysokým tlakem, tak by v dutině přítomný vzduch přes netěsnosti formy nestíhal unikát. To by mělo za následek neúplné vyplnění formy a kritický nárůst tlaku v dutině. Při návrhu vtokové soustavy je důležitý návrh odpovídajícího odvzdušňovacího systému. Jeho umístění se realizuje v dělicí rovině a zpravidla tam, kde se dutina plní jako poslední, případně v místech uzavírání vzduchu. Existuje několik variant, jak formu odvzdušnit.

Ledviny a odvzdušňovací kanálky

Jednou z variant jsou ledviny a odvzdušňovací kanálky zobrazené na Obrázku 6. Ledvinky mají tvar v podobě jamek a uloženy jsou v dělicí rovině. Od odlitku jsou odsazeny a propojeny pomocí zářezů. Vzhledem k jejich realizaci je ale potřeba si dát pozor na možný vznik otřepů na odlitku. Nesprávné konstrukční řešení může mít dopad na vznik porezity, nebo nedostatečného zaběhnutí taveniny. Tvar průřezu musí splňovat parametry schopné dostatečně rychle odvést nahromaděné plyny v dutině formy. Je však potřeba si uvědomit, že plyny by neměly dutinu opouštět příliš velkou rychlostí. Poloha a rozměry odvzdušňovacích kanálků a ledvin jsou velmi závislé na rozměrech odlitku. [12]

Statický vakuový ventil – vlnovec

Jedná se podstatně účinnější volbu pro odvzdušnění. Vlnovec nedisponuje žádným pohyblivým segmentem pro uzavření vakua, které by využívalo tuhnutí taveniny. Jeho funkcí je po odvzdušnění vyvolat zpomalení protékajícího kovu, odvedení jeho tepla a na závěr taveninu přinutit tuhnout. To je způsobeno jeho tvarem (viz. Obrázek 7). Instalace vlnovce se provádí v místě dělicí roviny, tedy v polovině formy. Vyráběny jsou buď z kalených ocelí, a nebo z různých slitin bronzů. Bronzové vlnovce mají lepší schopnost odvádět teplo, nevýhodou je jejich odolnost proti vymytí taveninou. Obecně lze říct, že čím lepší tepelnou vodivost materiál vykazuje, tím větší vůli je možné aplikovat mezi díly vlnovce. Jedná se o celkem relativně levnou variantu odvzdušnění formy a s přihlédnutím na jejich statické vlastnosti nevyžadují nikterak pravidelnou údržbu. Je potřeba ale přihlédnout na jejich čištění během procesu. Při nesprávném nastavení procesu dochází nahromaděným plynem k ucpání otvorů pro tekoucí vzduch a tím se snižuje účinnost vakua. [10,12,26]



Obrázek 7 - Statický ventil - vlnovec [10]

Dynamický vakuový ventil

Dynamický vakuový ventil je zařízením, jehož patent vlastní firma Fondarex. Je vyroben z nerezové oceli. Znázorněn je na Obrázku 8. Jedná se o technologii, kdy je vzduch z dutiny vysáván těsně před naplněním taveninou a tím ji vakuuje. Jelikož samotné zařízení je samo o sobě velmi složité, je doporučeno ho využívat především pro konstrukčně složité odlitky. V tomto případě je potřeba mít kvalifikovaný personál, který dokáže v podstatě dokonale seřídít licí stroj a celý cyklus kolem něj. Tento proces si žádá precizní přiléhavost formy. V momentě, kdy by tato podmínka nebyl splněna, začne celý proces výrazně ztrácet na své efektivitě, což samozřejmě ovlivní celou produktivitu slévárny. Oproti statickým ventilům

disponují větším průřezem, což má za následek menší časovou prodlevu při nárůstu vakua po jeho zahájení. [10,13,26]



Obrázek 8 - Dynamický vakuový ventil - Fondarex [13]

1.4.2. VTOKOVÝ ZÁŘEZ

Ve vtokové soustavě představuje zářez místo, v němž se zmenšuje průřez vtokového kanálu před vniknutím taveniny do dutiny formy. V závislosti na zmenšení průřezu dochází k nárůstu rychlosti proudění roztaveného kovu. Jeho poloha se určuje především dle tvaru odlitku. V momentě, kdy je vtokový zářez v konstrukci navrhován, je potřeba klást důraz na níže zmíněné požadavky:

- Situovat jej tak, aby během plnění dutiny bylo dosaženo postupného vyřazení jednotlivých odvzdušňovacích prvků s ohledem na zachování funkčnosti těch nejvzdálenějších i během poslední fázi plnění (dotlaku).
- Navrhnout jeho polohu tak, aby proud taveniny nenarážel například do jader, výstupků nebo jiných kolmých překážek. Tyto překážky mají za následek podstatné vlivy na změnu režimu plynulého plnění dutiny formy, míchání proudu taveniny a následně uzavírání plynů v objemu kovu. Zároveň během střetů proudícího kovu s překážkami dochází k jeho ztrátě kinetické energie, která může způsobit ochlazení taveniny s případným nedolitím.
- V případě, že se na odlitku vyskytuje výstupek podlouhlého tvaru, je nezbytné vést proud taveniny po jeho delší straně.

- Plochu průřezu zvolit tak, aby při průchodu taveniny nedocházelo ke vzniku disperzního proudění. Míchání plynů a taveniny samotné v dutině formy způsobuje vysokou pórovitost. [12,14]

1.4.3. VTOKOVÝ KANÁL

Vtokový kanál spojuje v celé vtokové soustavě plnicí komoru se zářezem. V případě forem s jednou tvarovou dutinou se realizuje pouze hlavní vtokový kanál bez kanálů vedlejších. Pokud se však jedná o formy vícenásobné a složité, je na místě během projektování navrhnout i zmíněné vedlejší kanály. Tvarově by si měly být velice podobné a roztavený kov by jimi měl urazit ideálně co nejvíce stejnou dráhu a to z důvodu stálého plnění formy s následným rovnoměrným chladnutím odlitku ve všech místech dutiny formy. Dodržení této zásady může vést k zabránění hrozícímu vzniku staženin. Tvar vtokových kanálů se nejčastěji volí lichoběžníkový, případně kruhový. V kanálcích těchto tvarů nedochází k výrazným tepelným ztrátám a ulehčují vyjmutí odlitku z formy, aniž by docházelo k deformacím. Vtokový kanál se obvykle nachází v dělící rovině. Výpočet celé vtokové soustavy je teoreticky dán normou ČSN 228601. V dnešní době se však při návrhu vtokových soustav využívají ve velké míře simulační programy, které dokážou poukázat na případná kritická místa ve vtokových soustavách a výrazně tak urychlit proces odladění formy. [12,14]

1.4.4. TABLETA A VTOKOVÝ KUŽEL

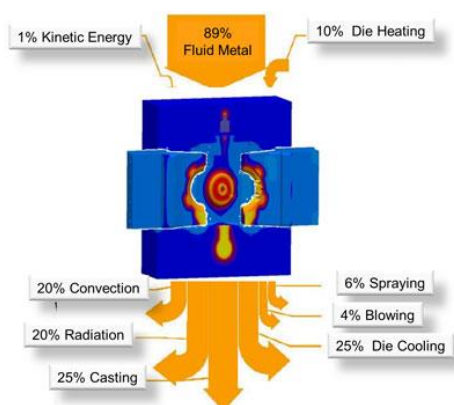
Tableta společně s vtokovým kuželem tvoří přechod mezi plnicí komorou a vtokovým kanálem. Svým tvarem představují kopii tvaru plnicí komory. Oba prvky mají ve své podstatě stejnou úlohu, rozdíl je pouze v technologii lití. Tableta je využívána u strojů se studenou horizontální komorou, vtokový kužel naopak u strojů s teplou komorou.

Tableta je během licího procesu posledním místem, kde zůstává kov v tekutém stavu. Tvoří zásobník kovu, který je během fáze dotlaku eliminátorem smrštění odlitku a podporuje přenos dotlaku z lisovacího pístu až po nejvzdálenější místa v dutině formy. Průměr tablety se odvíjí od průměru plnicí komory. Výška tablety se volí taková, aby obsahovala dostatek kovu pro dotlak a přenos tlaku. V případě, že by byla navržena nedostatečná výška tablety, může docházet nedolití a nehomogenitě odlitku. U velké výšky se jedná o problém vykazující zbytečné ztráty materiálu vedoucí k ekonomickým deficitům. [12,14]

2. TEPLOTNÍ POLE FORMY

2.1. TEPELNÁ BILANCE FORMY

Vysokotlaké licí formy jsou během celého průběhu odlévání každým cyklem vystavovány extrémním teplotním výkyvům. Od zahájení procesu, kdy dochází k zalísování taveniny do dutiny formy následuje relativně rychlé zchladnutí kovu. V momentě kdy nastane zatuhnutí odlitku přichází zpomalení odvodu tepla. Po otevření formy a vyjmutí odlitku je důležité, aby se teplota v celém objemu formy ustálila a dosáhla rovnovážných hodnot. V tomto momentě dochází ve většině případů k ošetření líce formy dělicím prostředkem. Ten způsobí další fázi odvodu tepla z formy a zároveň také nejvýraznější teplotní šok na její povrch. Obrázek 9 zobrazuje procentuální poměr vyhodnocení tepelné bilance formy. [15]



Obrázek 9 - Kvantitativní vyhodnocení tepelné bilance formy [16]

2.2. ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY TEPELNÝCH PODMÍNEK V TUHNOUCÍ TAVENINĚ

Tepelné poměry v soustavě tavenina - forma závisí jak na tepelně – fyzikálních vlastnostech formy, tak odlévaném materiálu, avšak i na podmínkách sdílení tepla na rozhraní těchto dvou objektů. Jednou z rozhodujících schopností slévárenské formy je akumulovat a odvádět teplo z taveniny a následně i z odlitku. Po celou dobu, od nalití taveniny do dutiny formy až po vyjmutí odlitku z formy, je forma jedním z rozhodujících faktorů vlastností budoucího odlitku. Určuje nejen tvar, rozměry, krystalickou strukturu, ale také vlastnosti materiálu odlitku.

Rozhodujícím procesem při utváření odlitku ve slévárenské formě je přenos (sdílení) tepelné energie (nepřesně tepla) mezi odlitkem a slévárenskou formou. Sledování celého procesu je velmi obtížné, neboť v soustavě odlitek - forma probíhá řada pochodů, z nichž k nejvýznamnějším se řadí:

- a) přenos tepla v tekutém kovu;
- b) přenos tepla z taveniny do slévárenské formy;
- c) uvolňování skupenského tepla při tuhnutí a fázových přeměnách;
- d) přestup tepla mezi tekutým a ztuhlým kovem v odlitku;
- e) vedení tepla tuhým kovem;
- f) přestup tepla z formy do okolí;
- g) sálání tepla otevřenými nálitky.

Pro řešení uvedených dějů je nutné znát celou řadu podmínek, které tyto děje charakterizují. Z hlediska obecného pohledu na tepelné děje mezi odlitkem a formou dochází k výměně tepla: vedením (kondukcí); prouděním (konvekcí); sáláním (radiací). [17]

2.3. VZORCE PRO VÝPOČET ODEVZDANÉHO TEPLA Z TAVENINY DO FORMY

2.3.1. VSTUPNÍ PARAMETRY PRO VÝPOČET ODEVZDANÉHO TEPLA Z TAVENINY DO FORMY

mhmotnost odlitku s vtokovou soustavou [kg]

$T_{lití}$ teplota slitiny ve vstřikovací komoře [°C]

T_{kr}teplota krystalizace slitiny [°C]

T_{ok} teplota okolí stroje [°C]

c_{tav} měrná tepelná kapacita taveniny [J/kg.K]

c_{tuh}měrná tepelná kapacita slitiny v tuhém stavu [J/kg.K]

L_{KR} latentní krystalizační teplo taveniny [J/kg] [20]

2.3.2. VÝPOČET PŘESTUPU TEPLA

Teplo uvolněné z přehřáté taveniny

$$Q_{PŘ} = m \cdot c_{tav} \cdot (T_{lití} - T_{kr}) \text{ [J]}$$

Teplo uvolněné při přechodu z tekuté do tuhé fáze

$$Q_{KR} = m \cdot L_{KR} \text{ [J]}$$

Teplo uvolněné při chladnutí odlitku

$$Q_{CHL} = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{kr} - T_{ok})] \text{ [J]}$$

Energie kovu v okamžiku nalití do vstřikovací komory

$$Q = Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHL} \text{ [J] [20]}$$

2.4. TERMOREGULACE FORMY

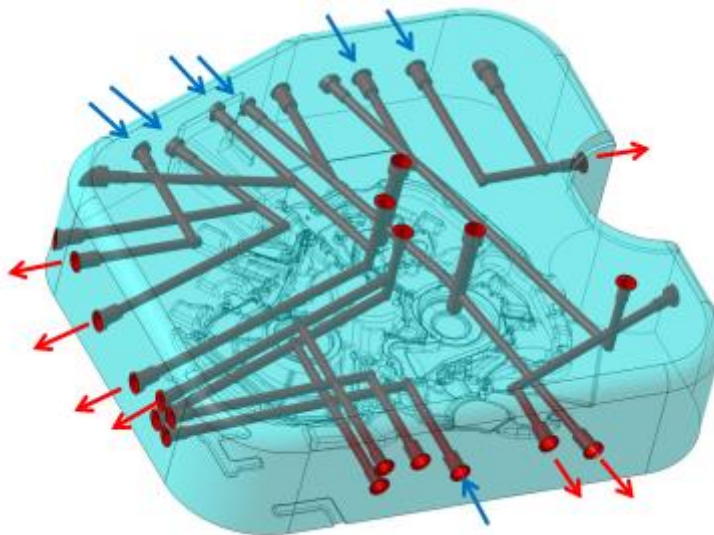
Teplota líce formy je důležitým aspektem pro optimalizaci procesů ve slévárnách. Správné nastavení těchto parametrů má zásadní vliv na životnost formy a vad spojených s licím procesem. Není však důležité dosáhnout stejné teploty v celém průřezu formy.

Ochlazení formy lze dosáhnout několika způsoby. Aby forma plnila požadavky pro hladký průběh výroby, měla by se její teplota pohybovat v intervalu cca 200 – 350°C. Tato teplota výrazně ovlivňuje několik faktorů, mezi které patří především doba tuhnutí odlitku, zabíhavost taveniny, schopnost separátoru přilnout na povrch formy a také samotná životnost formy. [18,19]

2.4.1. TEMPERACE A CHLAZENÍ FOREM PRO VYSOKOTLAKÉ LITÍ

Temperace a chlazení forem pro vysokotlaké lití jsou vedeny navrtnými kanály uvnitř formy. Konvenční temperační systémy se skládají z kanálů kruhového tvaru, které jsou vrtány rovnoběžně s dělicí rovinou formy a to jak v rámu, tak v tvarových vložkách. Jejich umístění v odlitku a velikost průměru jsou závislé na typu odlitku. K propojení těchto kanálů se používají hadice tvořící jednotlivé temperační okruhy. Důležité části formy jakými jsou např. rám, vložky, vtok a jednotlivá jádra mají své jednotlivé kanály, které se zapojují do jednotlivých okruhů.

Pro udání směru toku média jsou kromě hadic využívány také přepážky, ucpávky a zátky. Účinnost tohoto typu chlazení je závislá především na již zmíněné velikosti a průměru samotných kanálů, dále také na vzdálenosti od povrchu formy a druhu použitého média. Schéma temperačních kanálů je vidět na Obrázku 10. [21, 22]



Obrázek 10 - Schéma temperačních kanálů [10]

K ovládnutí chlazení formy pomocí temperování je potřeba řízených zdrojů, tzv. temperačních zařízení, které je možné vidět na Obrázku 11. Dle velikosti a tvarové složitosti odlitku se většinou využívají v počtu 4 – 8 ks. Dvě nejpoužívanější média pro temperování forem jsou voda a olej. Využití vody má význam spíše v momentě, kdy chceme dosáhnout odvodu tepla. V případě oleje lze ale kalkulovat jak s ochlazením, tak i s ohřevem. Modernější zařízení jsou schopny využívat vodu i pro ohřev až do 180°C za vyššího tlaku. Velkým rozdílem mezi olejem a vodou jsou jemnější účinky oleje, kdy forma nedostává tak výrazné teplotní šoky, které by mohly vést až prasklinám ve formě. Vhodné používání má samozřejmě zásadní vliv na životnost formy. V rozměrově objemnějších místech, jakými jsou třeba tablety, ve kterých dochází k tuhnutí většího množství kovu je účelnější použít vodu, která disponuje vyšším chladícím účinkem. Kanály uložené blíže tavenině jako např. tvarové vložky, nebo jádra je zase vhodné zchlazovat olejem. Vzdálenost kanálu od kraje dutiny formy by měla být alespoň 25 mm a v místech, kde jsou rohy, se doporučuje až 50 mm. V případě nedodržení těchto podmínek hrozí popraskání formy, vniknutí kapaliny do dutiny a u oleje, který má vznětlivé vlastnosti i k havárii. [23,24]



Obrázek 11 - Temperační zařízení na vodní bázi od firmy IECI [25]

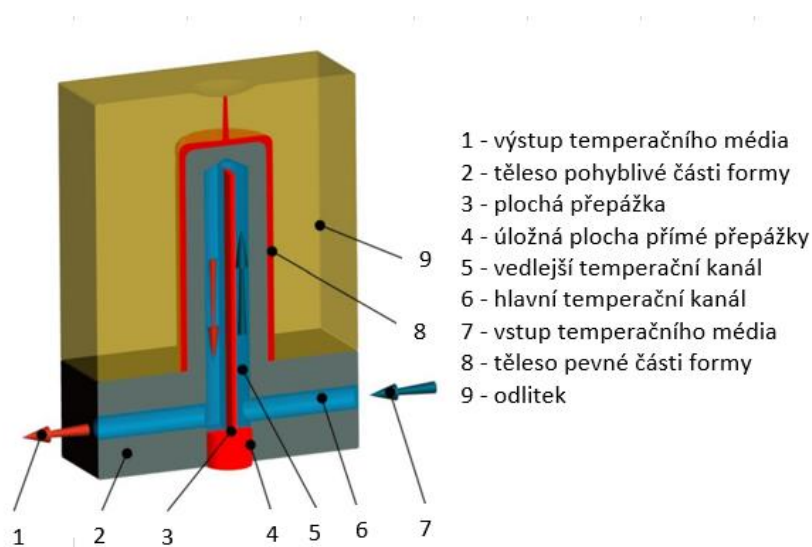
2.4.2. TEMPERAČNÍ SYSTÉMY PRO JÁDRA A TENKÉ MÍSTA VLOŽEK

V některých případech se ve formách objevují úseky s horšími schopnostmi ochlazení. V takových situacích se volí chlazení bodové, které využívá přepážkových systémů, chlazení pomocí tepelných trubíc, nebo jsou v těchto místech navrženy vložky z vysoce vodivých materiálů. Aktuálním trendem v této problematice je technologie jet – cooling patentovaná německým výrobcem Lethiguel, které je věnována samostatná kapitola níže.

Rozeznáváme více druhů bodového chlazení a přepážkové systémy jsou jedním z nich. Princip přepážkových systémů tkví v navrtání otvoru do jádra, nebo tvarové vložky. V těchto otvorech je implementována chladicí vložka. Druhy chladících vložek dělíme na ty s plochou přepážkou, spirálovou přepážkou a tzv. fontánky. V těchto kanálech následně proudí olejové, případně vodní medium. Důležitým parametrem pro plnou funkčnost těchto systémů je absolutní těsnost vložky v otvoru. [10]

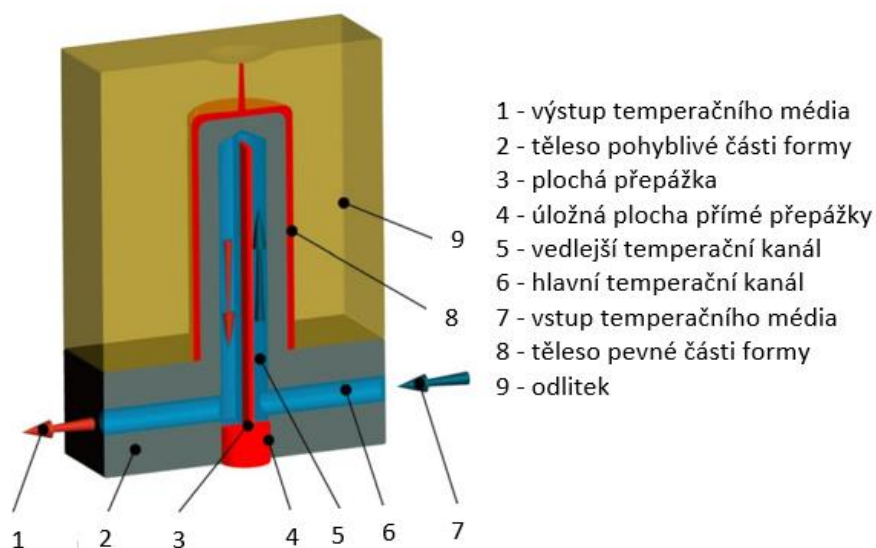
Plochá přepážka dělí vyvrtný otvor na dva kanály s průřezem půlkruhu. Aby bylo dosaženo rovnoměrného odvodu tepla, je potřeba aby byly kanály přepážkou rozděleny na dva stejně velké. V jednom z kanálů proudí medium od otvoru podél přepážky až k jeho vrcholu v němž

jej ona přepážka obtéká a vrací se druhou půlkou kanálu ven. Schematicky je systém ploché přepážky zobrazen na Obrázku 12.[10,27]



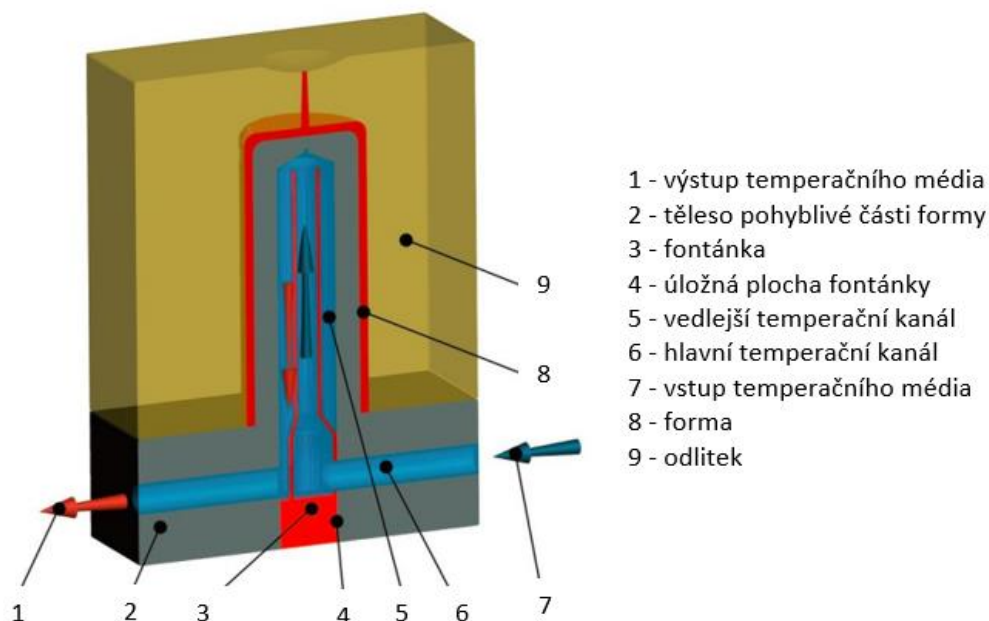
Obrázek 12 - Systém plochých přepážek [27]

Spirálové přepážky, též nazývány temperačními šneky, pracují v podstatě na stejném principu jako výše zmíněné ploché přepážky. Zásadním rozdílem je především tvar samotné přepážky (viz. Obrázek 13), který svou podobou připomíná spirálu. Ta rozděluje vedlejší temperační kanál na dva závity s velkým stoupáním. [10,27]



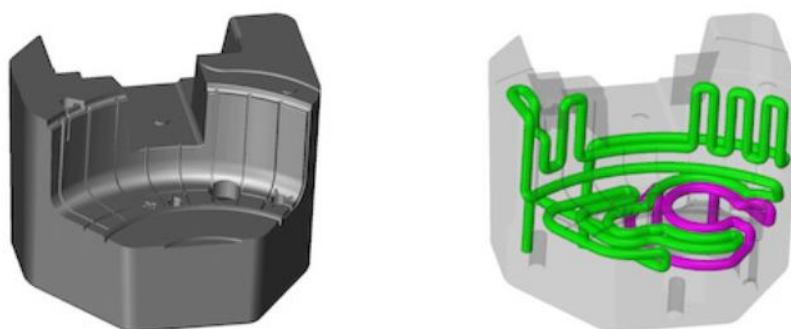
Obrázek 13 - Systém spirálových přepážek [27]

Fontánky tvoří soustavu jednoho nebo více otvorů do kterého jsou vloženy přepážky ve tvaru malých trubiček (viz. Obrázek 14). Vnitřním otvorem trubičky je k jejímu vrcholu přiváděno chladící médium a po vnější straně teče zpět do oběhu. [10,27]



Obrázek 14 - Systém fontánek [27]

Konformní chlazení je systém chladících okruhů navržený tak, že v nejkratší možné vzdálenosti od stěny formy k odlitku kopíruje jeho povrchový tvar. Díky výrobním možnostem 3D tisku jsme schopni aplikovat do nových forem nebo při úpravě formy stávající účinnější systém chladících kanálů. Chladící kanály konformního chlazení lze na vyžádání ošetřit antikorozní povrchovou úpravou [41]



Obrázek 15 - Systém konformního chlazení [41]

2.4.3. CHLAZENÍ JADER METODOU JET – COOLING

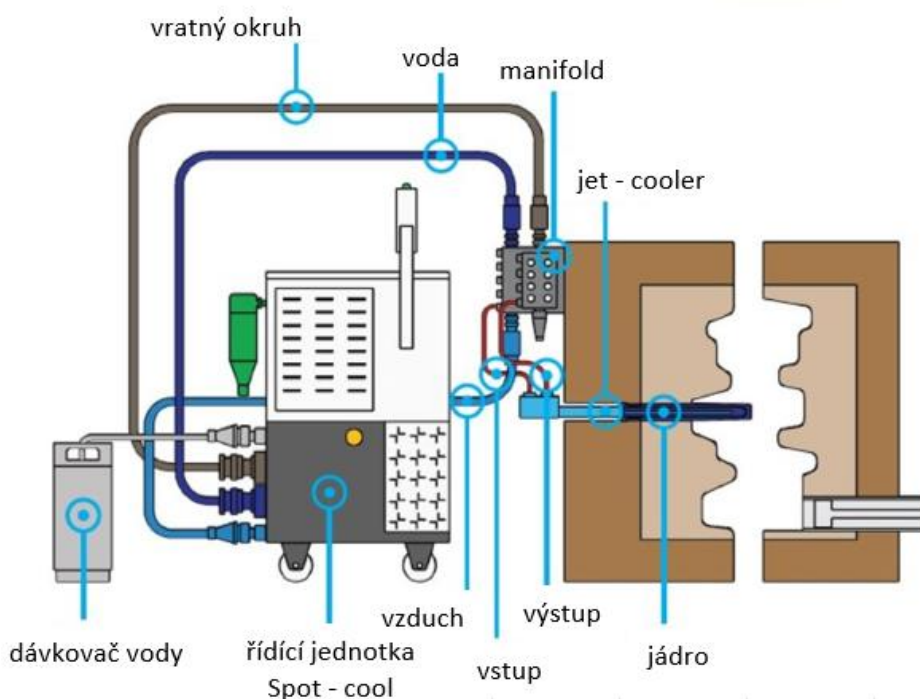
Metoda jet – cooling je nejefektivnějším systémem pro chlazení velmi tenkých jader, většinou se jedná o jádra s průměrem menším než 10 mm. Jeho zásadní úlohou v procesu lití je řídit

a kontrolovat přestup tepla v částech formy s nejmenšími rozměry během tuhnutí odlitku. U dlouhých a tenkých jader, kde není jet – cooling aplikován dochází k vzniku teplotních uzlů.



Obrázek 16 - Jet - cooler s otočnou hlavou [28]

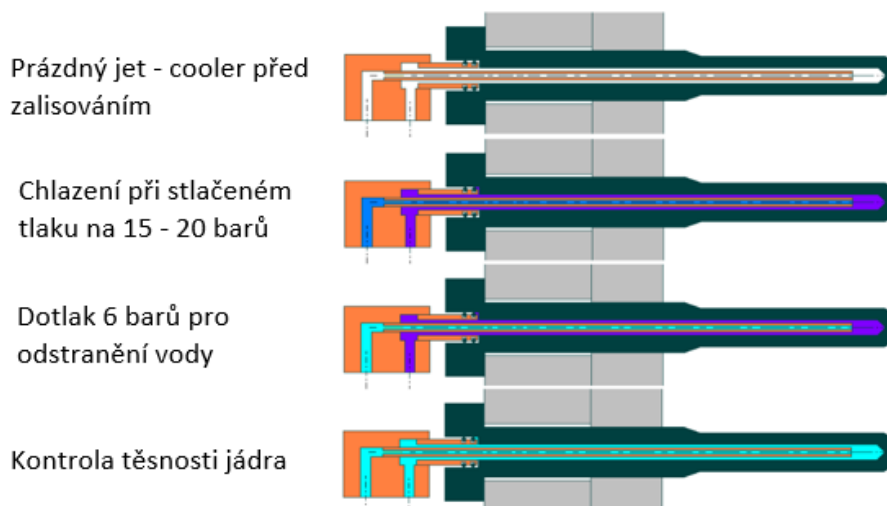
Způsob fungování technologie jet – cooling tkví v navrtání otvorů do jader, která mají podléhat chlazení. Otvor vzhledem k velikosti jader musí být velice přesně vycentrován. Do vyvrtaného otvoru se zavede jet – cooler (viz. Obrázek 16), který připomíná injekční stříkačku. Jeho hlavní funkcí je pak po dobu několika málo sekund přivést pod velkým tlakem chladicí vodu. [15]



Obrázek 17 - Princip metody jet - cooling [21]

V momentě kdy licí stroj uvede do pohybu píst, dojde ke spuštění jet – coolingu s definovaným odstupem chlazení vodou pod tlakem dosahujících hodnot až 20 barů hadičkou přes manifold

do jádra. Dojde ke změně skupenství z vody na páru, tím se přes jádro okolnímu hliníku rychle a efektivně odebere energie a sníží se teplota. Doba chlazení závisí na počtu jader, potřeby chlazení a tvaru odlitku. Obvykle se však pohybuje v intervalu 5 – 10 s. V poslední fázi dojde díky stlačení vzduchu k odstranění vody z jádra, jet – cooleru i hadičky. Tento postup ilustruje Obrázek 18. [29]



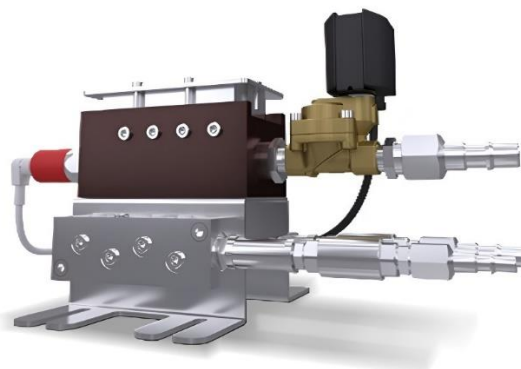
Obrázek 18 - Fáze cyklů jet - coolingu [30]

Obrázek 19 zobrazuje řídicí jednotku SpotCool, která má na starost ovládání chlazení jader technologií jet – cooling. Jedná se o řízený zdroj demineralizované chladící vody, kterou průběžně kontroluje pod vysokým tlakem. Obsahuje 4 – 8 chladících uzavřených cyklů. Tato jednotka je schopna chladit 1 – 64 jader, komunikuje se strojem a kamerami. Kontroluje také těsnost systému po každém cyklu. [23]



Obrázek 19 - Pracovní jednotka SpotCool [23]

Na Obrázku 17 a v odstavci pod ním je zmínka o „manifoldu“. Ten dokáže obsloužit z jednoho chladicí okruhu až 8 jader. Dalšími důležitými funkcemi manifoldu je opticky kontrolovat průtok chladicí vody, zabránění ucpání chladících trubek a také funguje jako bezpečnostní prvek, který zabraňuje vylití horké vody, takže je možné provádět se systémem operace aniž by hrozilo pro personál nebezpečí úrazu. Manifold je zobrazen na Obrázku 20. [21]



Obrázek 20 - Manifold [21]

Technologie jet – coolingu má nezpochybnitelný vliv na prodloužení životnosti jader a to především z důvodu eliminace vzniku nalepenin v těchto místech. Dochází v nich totiž k výrazně menšímu mechanickému i tepelnému namáhání než u konvenčních jader. [21]

2.5. OŠETŘENÍ LÍCE FORMY

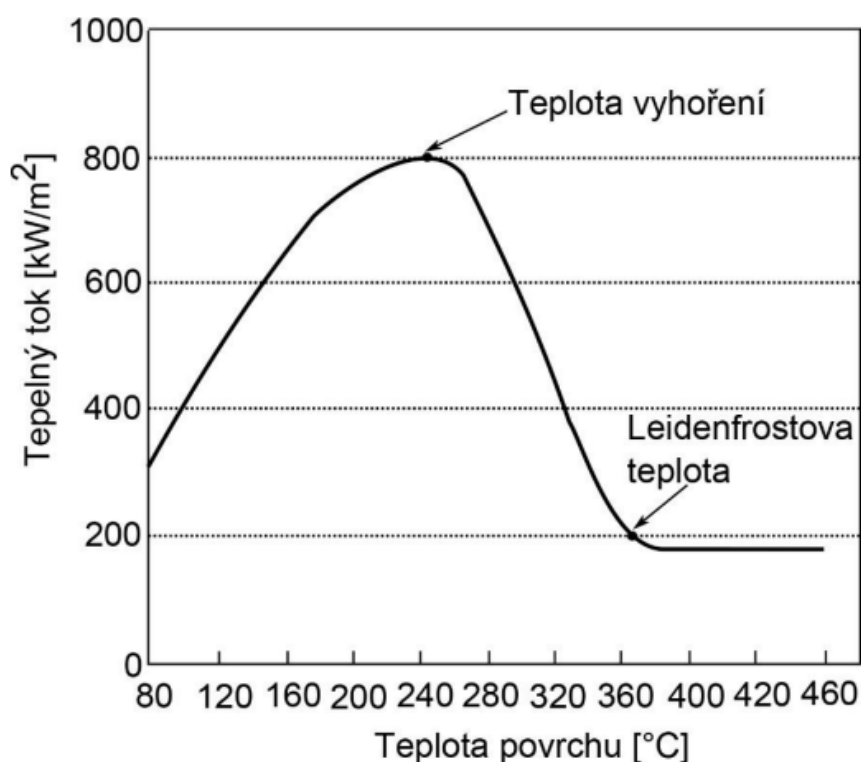
Ošetření líce formy je jedna z nejdůležitějších operací během procesu výroby odlitků technologií vysokotlakého lití. Má zásadní vliv na výslednou kvalitu povrchu odlitku a i jeho vnitřní strukturu. V případě, kdy forma není správně ošetřena, dochází k výpadkům výroby, což má negativní účinek na ekonomickou situaci sléváren. Hlavními funkcemi postřiky tlakových forem jsou:

- Nanesení dělicího prostředku.
- Namazání pohyblivých částí formy (např. vyhazovače)
- Odstranění nečistot z formy
- Ochlazení formy [31]

Teplota formy by měla dosahovat stejnoměrných hodnot, které by se měly pohybovat na intervalu zhruba 180 – 250°C. Jedná se o stěžejní požadavek pro konstrukce forem a jejich teploty. V dnešní době jsou prostředky na vodní bázi nejhojněji využívanými prostředky

pro ošetření tlakových forem. V momentě nanesení dělicího prostředku se na formě začne vytvářet chemická vrstva, která usnadní vyjmutí odlitku a tím zabrání i jeho případné deformaci během tohoto kroku. Jak již bylo zmíněno, nástřik také promazává pohyblivé části formy. Dalšími funkcemi mazadla je odvod tepla z formy. V některých případech je tato funkce považována za nežádoucí, jelikož v těchto situacích dochází k teplotním rázům, které mají negativní vliv na životnost formy. Teplota povrchu formy určuje schopnost odvádět z ní teplo pomocí dělicího prostředku. S rostoucí teplotou se navyšuje rozdíl teplot mezi povrchem formy a dělicím prostředkem. To má za následek nárůst rychlosti odpařování separátoru. Tepelný tok tak nabývá hodnot a forma se ochlazuje až do doby, kdy začne na povrchu formy vznikat pára. V tomto okamžiku dochází ke vzniku teploty vyhoření, která je zobrazená na Obrázku 21. [31]

Pokud je teplota ošetřovaného povrchu příliš vysoká, dochází v tomto místě ke vzniku tzv. Leidenfrostova jevu. V důsledku toho kapky separačního prostředku od povrchu formy odskakují a nedojde tak ke smáčení povrchu a tím k jeho namazání.



Obrázek 21 - Graf znázorňující odvod tepla z povrchu formy dělicím prostředkem [22]

2.5.1. LEIDENFROSTOVA TEPLOTA

V momentě, kdy dojde ke kontaktu separačního prostředku na bázi vody s povrchem formy jejíž teplota výrazně převyšuje teplotu separátoru (min. rozdíl mezi prostředkem a formou musí být 193°C), následuje vypařování části objemu separátoru, které je doprovázeno tzv. Leidenfrostovým jevem. Část separátoru vypařená vytvoří páru, která zbylý prostředek přítomný na formě tepelně zaizoluje od povrchu. Na formě se začnou vytvářet drobné kuličky konající neuspořádaný pohyb, přičemž se odpařováním neustále zmenšují. Nejvyšší možná teplota, během které je separátor na vodní bázi schopen přilnout k povrchu formy se označuje jako Leidenfrostova teplota a je znázorněna na Obrázku 21. [32,33]

Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že v momentě kdy teplota formy nedosahuje požadovaných teplot, nenastává odpařování vodní složky separátoru. Následuje jeho stékání po formě a požadovaný vznik ochranné vrstvy se nedostaví. I toto se považuje za nežádoucí. [33]

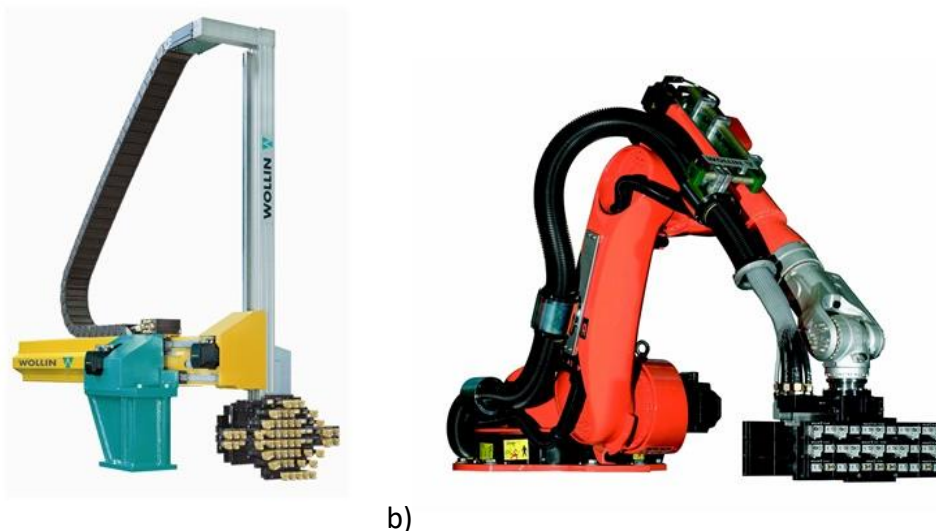
2.6. KONVENČNÍ ZPŮSOB OŠETŘENÍ LÍCE FORMY PRO TLAKOVÉ LITÍ

V aktuální době jsou pro postřik forem nejčastěji využívány dělicí prostředky ředitelné vodou. Složení těchto separátorů se skládá z koncentrátu, vody a emulgátorů. Emulgátory tvoří aktivní přísadu ve vodou ředitelných dělicích prostředcích. V některých případech jsou využívány pro ošetření forem výrobky na bázi rozpouštědel, nicméně jejich použití je velmi nebezpečné pro zdraví, životní prostředí a bezpečnost, kdy hrozí riziko výbuchu. Koncentráty dělíme do pěti základních skupin a sice:

- Minerální oleje
- Esterové oleje
- Silikonové oleje
- Vosky
- Separátory s povrchově aktivními látkami. [15]

Postřik líce formy je ve slévárnách aktuálně prováděn až na pár výjimek pomocí soustavy trysek, jež je upevněna na postřikovou hlavu. Ta se upevňuje na dvouosé manipulační zařízení zvané manipulátor, případně na ošetrovacího robota. Výhodou manipulátorů bývá jeho vyšší pracovní rychlost, snadnější údržba a ovladatelnost. Rameno robota však dokáže pracovat

pouze v osách x , y . Ošetřovací robot zvládá šestiosý pohyb a dokáže ošetřit i hůře přístupná místa. Je však nutné počítat s vysokými vstupními náklady na jeho pořízení a výše kvalifikovaný personál, který ho zvládne obsloužit. Obě tyto zařízení jsou zobrazeny na Obrázku 22.



Obrázek 22 - a) dvouosý manipulátor, b) robot s postřikovou hlavou [34]

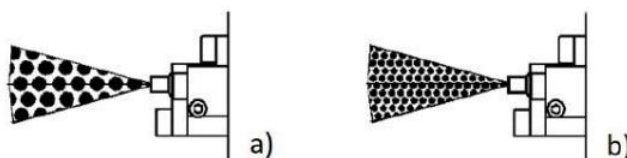
Konstrukce postřikových hlav se mohou velmi lišit. Jedním z nejpříznivějších a uživatelsky nejpříjemnějších řešení je využití modulárního systému, kterým se prezentuje například německá firma Wollin GmbH. Tento systém umožňuje doplňovat a manipulovat s tryskami přímo na postřikové hlavě tak, aby bylo dosaženo co možná nejlepšího přístupu na všechna místa dutiny formy.

Nanesení a přilnutí dělicího prostředku na formu je věc důležitá, je však potřeba uvažovat také množství zbytkové chladicí vody ve formě. Ta má zásadní vliv na kvalitu odlitků. Je tedy dobré formu před každým vtlačáním taveniny osušit od této přebytečné vody, avšak cílem je samozřejmě co možná největší absorpce celého separátu formou. Kvalita odlitků však není jediným důvodem, proč je přebytečná stékající voda nežádoucí. Je potřeba se na tuto problematiku podívat také z hlediska ekonomie a ekologie. Stečená voda putuje do odpadových systémů pod formou a nastává zvýšená zátěž životního prostředí v podobě odpadních vod a s tím i růst nákladů na jejich likvidaci.

Faktory ovlivňující účinnost postřiku:

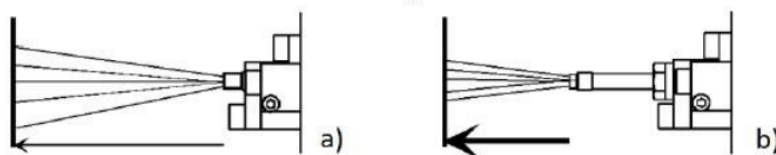
- Hustota postřiku
- Velikost a rychlost kapek (více malých kapek je účinnější než málo kapek velkých rozměrů)
- Velikost ošetřované plochy formy
- Tlak vzduchu zajišťující rozprášení dělicího prostředku (souvisí s velikostí kapek)
- Tlak působící na dělicí prostředek (má vliv na hustotu postřiku)
- Délka postřiku (má vliv na spotřebu)
- Vzdálenost mezi tryskou a formou (ovlivňuje velikost ošetřené plochy)
- Úhel mezi osou trysky a rovinou formy [15]

Objem dělicího prostředku je udáván jeho tlakem protékajícím tryskou. S tím souvisí i jeho hustota dopadající na plochu formy. Rozprášení dělicího prostředku zaopatřuje tlak vzduchu a s jeho nárůstem se navyšuje i rychlost proudících kapek. Pro vysokou účinnost postřiku je žádoucí poměrně vysoký tlak, jelikož pak jsou kapky jemnější a mají vyšší rychlost, což vykresluje Obrázek 23. [22]



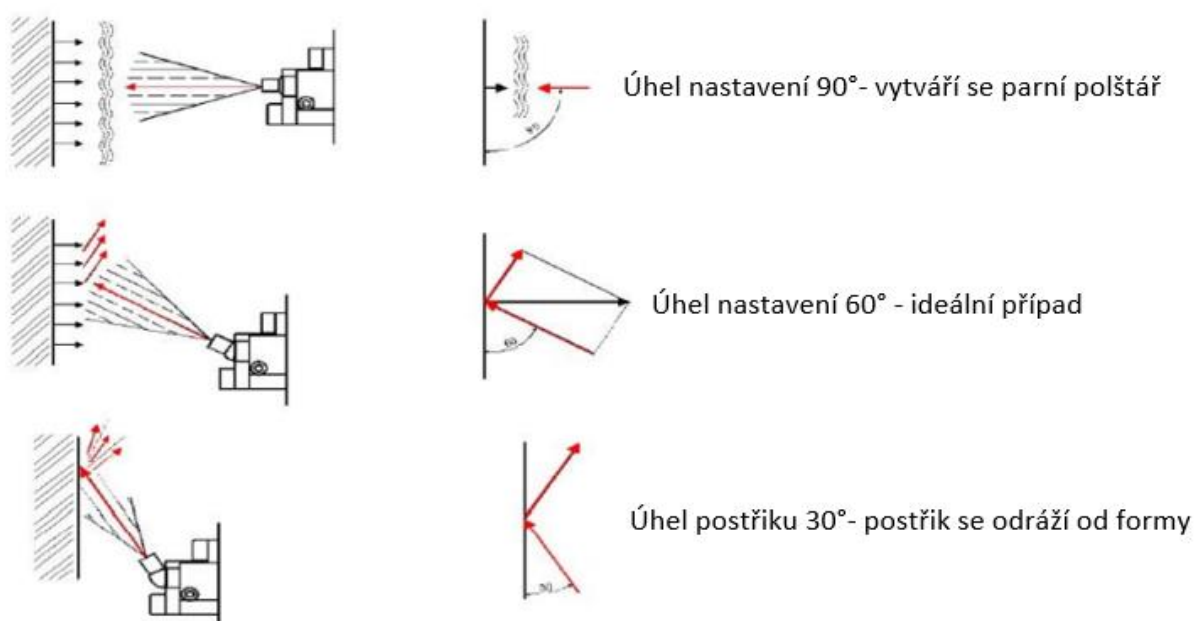
Obrázek 23 - a) malý tlak vzduchu, b) vysoký tlak vzduchu [22]

Co se týče velikosti ošetřené plochy, hustoty postřiku, velikosti a rychlosti kapek, tak zde jsou tyto faktory ovlivněny především vzdáleností mezi formou a tryskou. Obvykle se doporučuje pohybovat se v intervalu 100 – 200 mm. V místech vykazujících přehřáté hodnoty se využívá kratší vzdálenosti, naopak pro studená místa se volí vzdálenost větší, jak je vidět na Obrázku 24.



Obrázek 24 - a) velká vzdálenost od formy - zásah větší plochy, b) kratší vzdálenost od formy - zásah menšího množství plochy [22]

Dalším faktorem ovlivňující správné přilnutí separátoru k povrchu formy a odpaření jeho vodní složky je nastavení úhlu mezi osou trysky a rovinou formy. V případě nastavení malého úhlu postřiku nastává jeho odrazení od povrchu formy. Kolmý úhel však také není žádoucí. Pokud se tak stane, začne vznikat uzavírání par uvnitř postřiku, které nejsou schopny opouštět formu. To má za následek případný vznik tzv. parního polštáře, který tvoří jakousi bariéru pro nanesení dalšího separátoru. Občas na tuto problematiku zabírá nastavení pulzování trysky. Různé typy úhlů a jejich vlastnosti jsou detailněji znázorněny na Obrázku 25. [22]



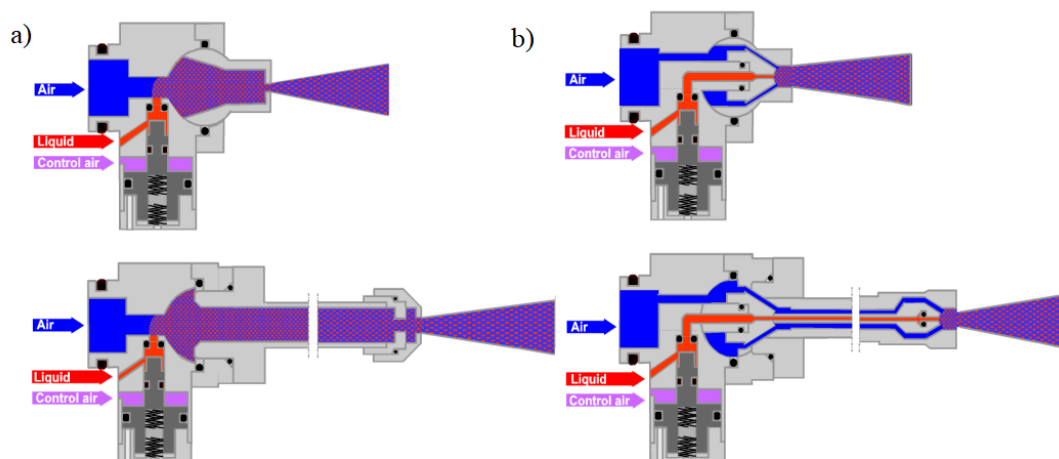
Obrázek 25 - Nastavení úhlu trysek [22]

Obecně rozdělujeme trysky na dva druhy. Základním rozlišovacím prvkem je mechanismus směšování separátoru se vzduchem a kde k tomuto procesu dochází. Prvním druhem trysek jsou ty s vnějším směšováním, druhým trysky s vnitřním směšováním. Oba druhy trysek disponují rozdílnými ovládacími mechanismy a není možné je používat zároveň na jedné postřikové hlavě. Jejich princip je možné vidět na Obrázku 26. [35]

Trysky s vnějším směšováním mají separátor přiveden až přímo k vyústění trysky, ke které je pomocí tlaku vzduchu dopravován a následně rozprášen na formu. Vnější směšování způsobuje konstantnější a jemnější rozprášení kapek tvořící mlhu, která je šetrnější a účinnější vůči formě. [35]

Trysky s vnitřním směšováním mají separátor zaveden do směšovací komory, kam proudí tlakový vzduch způsobující rozprášení separátoru na povrch formy. Výhodou této technologie

oproti tryskám s vnějším směřováním je vyšší hodnota dopadové energie separátoru. Konstrukčně se jedná o méně náročnou technologii, což má dopad i na nižší cenu. [35]



Obrázek 26 - a) tryska s vnitřním směřováním, b) tryska vnějším směřováním [22]

Dalším faktorem dle kterého se mohou trysky dělit je charakteristický tvar proudu. Ten má vliv na hustotu postřiku, ale třeba také na velikost postřikové hlavy. Všechny druhy trysek dle tohoto dělení jsou popsány níže a zobrazeny na Obrázku 27.

Standartní tryska disponuje svázaným proudem a ošetřuje tak malé plochy.

Tryska se širokým proudem se využívá pro pokrytí větších ploch.

Tryska s plochým proudem je charakteristická širokým a plochým proudem, který je schopen snadno ošetřovat na formě tvary elips. [35]

2



Obrázek 27 - Dělení trysek dle tvaru proudu [35]

2.7. MIKROPOSTŘÍK

Mikropostřík během svého procesu na rozdíl od konvenčních způsobů ošetření forem nevyužívá vodu, což je zásadním rozdílem mezi těmito technologiemi. Obvykle bývá dutina ošetřena koncentrátem na vodní bázi. Tento faktor se výrazně podepisuje na ekonomické situaci sléváren především díky absenci velkého množství odpadních vod, které u konvenčních způsobů stékají z formy do kanalizace a je nutná jejich energeticky náročná likvidace. Během procesu nelze mezi mikropostříkem a konvenčními způsoby ošetření forem hledat diametrální rozdíly, principiálně jsou si podobné. Technologie mikropostříku s rostoucím důrazem společností na šetrnost vůči životnímu prostředí udělala velký pokrok, stále je však její optimalizace v procesu a práce s ní vyžaduje kvalifikovaný personál. [36]

Mikropostřík vznikl nejenom z důvodu snížení spotřeby vody. Další snížení vykazuje u emisí CO₂, jelikož se jedná o energeticky méně náročný proces. Pokud bychom chtěli vyhledat snížení nákladů spojené s odléváním odlitků, tak je dobré se zaměřit na životnost formy. Ta by díky násobně menším šokům na ní působících při správném obsluhování měla dosáhnout 2x větší životnosti. Shrnutí přímých a vedlejších přínosů mikropostříku lze definovat takto:

- Minimální výkyvy tepelného zatížení, žádné termické namáhání formy vyvolané separátorem
- Vyšší životnost forem
- Snížená zmetkovitost
- Vyšší produktivita (krátká doba cyklu, opravy)
- Úspora nákladů na energie
- Široká aplikační teplota (220 – 310°C)
- Minimalizace nákladů na likvidaci odpadních vod
- Snížení výskytu koroze na formě a v prostředí kolem formy
- Snížení spotřeby separátoru.

Požadavky na zavedení technologie mikropostříku lze rozdělit do čtyř skupin:

- a) Optimalizace teplotních uzlů formy. Jelikož je při použití technologie mikropostříku forem minimalizován odběr tepla z povrchu formy separátorem, je nutné formu dostatečně chladit vnitřně. Je potřeba si uvědomit, že tento požadavek vykazuje negativní vlastnosti v ohledu vyšších pořizovacích nákladů forem. V tomto směru

je doporučeno před výrobou formy provést důkladnou simulaci cyklu pro ověření teplotního pole a odhalení přehřátých míst a dle výsledků simulací navrhnout vhodné chlazení vnitřních tvarů.

- b) Příprava postřikového zařízení na technologii mikropostřiku
- c) Sestavení vhodné postřikové hlavy a výběr vhodných trysek
- d) Volba vhodného separátoru [35]

3. SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Čistý hliník svými vlastnostmi nespĺňuje požadavky kladené pro konstrukční účely. Z toho důvodu se pro výrobu odlitků využívají výhradně jeho slitiny. Vliv přísadových prvků pozitivně ovlivňuje mechanické a technologické vlastnosti. Finální vlastnosti slitin jsou určeny jednotlivým množstvím a kombinací přísadových složek. [1,2]

3.1. CHEMICKÉ SLOŽENÍ SLITIN HLINÍKU

Slitiny hliníku se skládají z:

- Základního prvku
- Hlavního přísadového prvku
- Vedlejšího přísadového prvku
- Doprovodných prvků

Základním prvkem se v našem případě vždy jedná o hliník. Hlavním přísadovým prvkem je prvek takový, který určuje rozhodující vlastnosti slitin. Obvykle se po základním prvkem vyskytuje v tavenině prvek s nejvyšší koncentrací. Podle hlavního přísadového prvku dělíme slitiny hliníku na tři základní typy, pro tuto diplomovou práci jsou však stěžejní:

- Slitiny Al – Sisiluminy

Vedlejší přísadové prvky příznivě ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny. Mohou např. zvyšovat mechanické vlastnosti, zlepšovat obrobiteľnost, ovlivňovat strukturu kovu apod. Těchto prvků se ve slitině může vyskytovat více. Dále slitiny obsahují doprovodné prvky. Jedná se takové druhy prvků, které nebyly do slitiny přidány záměrně a při překročení určitých koncentrací mohou mít na slitinu negativní vliv. Podle počtu přísadových prvků (kromě doprovodných) se slitiny dělí na:

- Binárnízákladní kov + přísadový prvek
 - Ternárnízákladní kov + přísadový prvek + jeden přísadový prvek
 - Vícesložkovézákladní kov + přísadový prvek + více přísadových prvků
- [1,2,37]

3.2. SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Slévárenské vlastnosti jsou vlastnosti úzce související s procesem odlévání a řadíme mezi ně:

- Zabíhavost slitiny
- Sklon ke vzniku soustředěných staženin nebo ředin
- Sklon k naplynění taveniny a ke vzniku plynových dutin v odlitcích
- Sklon ke vzniku trhlin

Tyto vlastnosti jsou úzce spjaty se šířkou intervalu tuhnutí dané slitiny. Nejlepší slévárenské vlastnosti vykazují slitiny s úzkým intervalem tuhnutí. Jedná se tedy o druhy blížící se čistému kovu, nebo eutektickému složení. Špatnými slévárenskými vlastnostmi naopak disponují slitiny se širokým intervalem tuhnutí. Mají obvykle horší zabíhavost a sklon ke vzniku rozptýlených staženin a mikrostaženin. Jejich nálitkování je málo účinné, neboť nálitky mají krátkou dosazovací vzdálenost. Implikací těchto faktorů je pak netěsnost odlitků. [1,2,37]

3.3. AlSi9Cu3 (EN AC 46000)

Slitina AlSi9Cu3, normou dána jako EN AC 46000 je jednou z nejčastěji používaných slitin hliníku pro odlévání, jelikož mezi její hlavní přednosti patří dobré mechanické vlastnosti. Jedná se o mírně podeutektickou slitinu, která disponuje kvalitními licími vlastnostmi a její užití se nachází především u tenkostěnných odlitků s tvarově složitou geometrií. Vzhledem ke svým vlastnostem je slitina vhodná pro aplikace vyžadující kombinaci dobrých tepelných vlastností při relativně nízké hmotnosti. Má dobrou odolnost vůči trhlínám, je spolehlivě svařitelná a obrobitelná. Vzhledem ke všem výše zmíněným aspektům je hojně využívána především v automobilovém, ale také leteckém a elektrotechnickém průmyslu. [38]

Tabulka 1 - Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [39]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
Zbytek	8-11%	1,30%	2-4%	0,55%	0,5-0,55%	0,15%	0,55%	1,20%	0,35%	0,25%	0,25%

Tabulka 2 - Vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [39]

Slévárenské vlastnosti		Mechanické vlastnosti		Mechanické a fyzikální vlastnosti	
Interval tuhnutí [C°]	600 - 490	Pevnost v tahu R _m [MPa]	240	Měrná hmotnost [kg/m ³]	2,76
Licí teplota [C°]	600 - 650	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	140	Svařitelnost	vynikající
Smršťění [%]	0,5 - 0,8	Tažnost [%]	1	Obrobitelnost	vynikající
Odolnost vůči trhlínám za tepla	vynikající	Tvrdoost dle Brinella	80 HBS	Odolnost proti korozi	dobrá

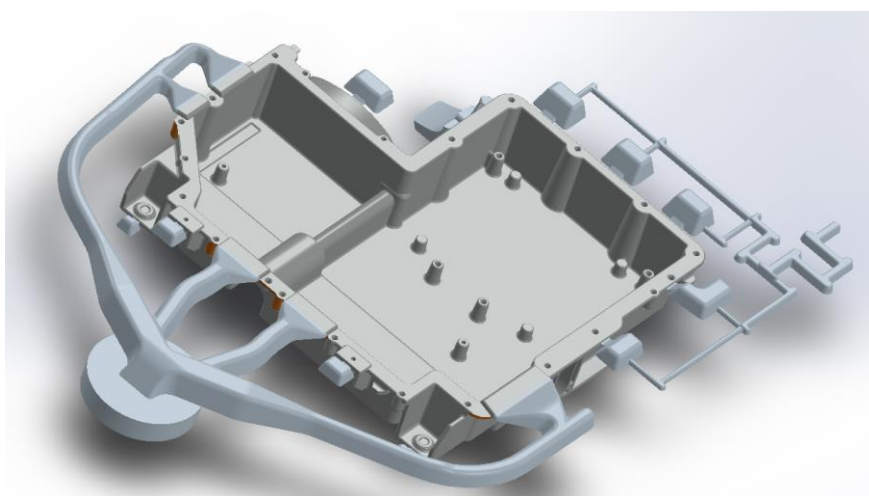
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této diplomové práce probíhala ve společnosti Ljunghäll s.r.o., která se zabývá vysokotlakým litím hliníkových odlitků se zaměřením především na automobilový průmysl.

Pro experiment byl vybrán ve firmě nový odlitek, sloužící jako díl pro e – mobilitu nákladních vozidel a cílem byla úspěšná optimalizace ošetření líce formy pomocí mikropostřiku během výroby této součásti. Důvodem upřednostnění technologie mikropostřiku před konvenčním metodou bylo:

- absence odpadních vod
- snížení zmetkovitosti
- snížení vnitřní porezity
- krátký čas nanášení separátoru a snížení jeho spotřeby – vyšší produktivita.

Experimentální část byla rozdělena do čtyř částí. První část se zabývá případovou studií a analýzou výrobního procesu pomocí simulačních programů. Tým projektantů se zaměřil na simulace a přípravu výroby, především z důvodu odhalení kritických míst během odlévání a předejití nežádané zmetkovitosti ve výrobě. Tyto možnosti nabízí firmě ověření kvality technologického řešení před zahájením výroby. Druhá část práce popisuje licí pracoviště a vše s ním spojené. Třetí část pojednává o analýze proběhnuvších vzorkování ve firmě s optimalizačními procesy. V poslední části dochází ke zhodnocení veškerých dosažených informací během experimentu a jeho zpracování do přehledných výsledků.



Obrázek 28 – 3D model surového odlitku zadaného pro experimentální část

4.1. VÝVOJOVÁ FÁZE

Forma pro vysokotlaké lití je komplexní sestava mnoha částí, mezi které patří vložky, rám formy, jádra atd. Pro výrobu formy bylo důležité přesně popsat každou část geometrie odlitku. Nynější technologie v podstatě nedávají na výběr jiné možnosti, než geometrii připravit ve formě 3D modelu. Před zahájením samotné výroby a optimalizačních procesů během jednotlivých vzorkování došlo k vytvoření několika počítačových simulací. Slévárna Ljunghäll s.r.o. své simulace provádí v softwaru NOVAFLOW&SOLID. Simulace jsou užitečné především pro ověření správnosti konstrukce formy a případné korekce vyskytujících se nedostatků před zadáním výroby formy dodavateli. Díky tomuto postupu je možné dosáhnout zkrácení licího času, předejít zvýšené zmetkovitosti, případně lze úplně odstranit neshodné výrobky. Vstupní parametry simulací byly zkušeným týmem technologů navrženy tak, aby se co nejvíce přiblížily reálnému procesu. Pro účely experimentální části této diplomové práce budou detailně rozebrány pouze stěžejní části simulací, nicméně během vývoje proběhlo simulování vícero vlastností, mezi které patří:

- teplotní pole během plnění dutiny formy
- porezita
- odvzdušnění formy a množství uzavřeného vzduchu
- rychlost plnění dutiny formy
- doba tuhnutí odlitku
- teplotní pole během tuhnutí odlitku.

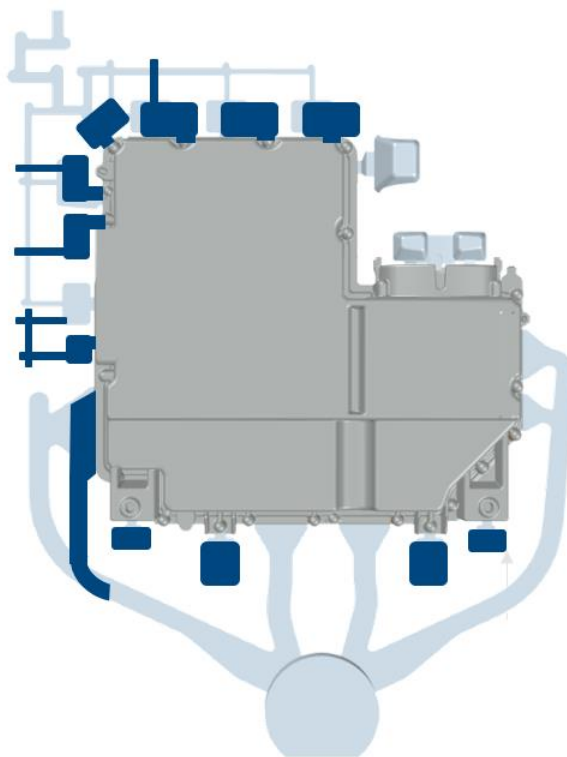
4.1.1. VSTUPNÍ PARAMETRY

4.1.1.1. GEOMETRIE

Prvním krokem pro tým konstruktérů byla 3D geometrie poptávaného odlitku. Konstruktéři museli se zákazníkem vykomunikovat u kterých ploch odlitku je možné provést napojení vtokové soustavy, kam mohou být připojeny přetoky a ve kterých místech je možná úprava geometrie pro snadné odlití technologií vysokotlakého lití. Důležitým faktorem při přípravě geometrie odlitku bylo taktéž brát v úvahu smrštění odlévané slitiny. Výsledný vzhled a 3D model poptávaného odlitku (včetně vtokové soustavy), který byl týmem konstruktérů vytvořen, je zobrazen na Obrázku 28.

V další fázi následovalo navržnutí vtokové soustavy. To je spojeno s rozměry odlitku, kdy u menších odlitků lze umístit do formy větší množství kusů. V tomto případě to však rozměry odlitku a rozměry licího pracoviště neumožnily. Do sestavy vtokové soustavy jsou zahrnuty dutiny v tlakové komoře, tableta a vtokové kanály napojené na nařiznutí, které slouží jako propojení vtokové soustavy s odlitkem. V případě odlitku zkoumaného v této diplomové práci bylo zvoleno 5 nařiznutí, které zajistí rovnoměrné zaběhnutí kovu do formy a omezí riziko uzavření plynů v tavenině. Na opačné straně formy bylo navrženo odvodušnění formy technologií dynamického vakuového ventilu od firmy Fondarex (princip popsán v kapitole 1.4.1).

Obrázek 29 názorně vykresluje situaci, kdy byla díky simulacím upravena vtoková soustava pro snadnější průběh procesu lití. Světle modrá barva představuje původní návrh. Tmavě modrá naopak zobrazuje optimalizaci. Zásadním zásahem bylo upravení tvaru vtokové soustavy na levé straně odlitku směrem od tablety. Další korekcí bylo zvětšení rozměru několika ledvinek. Po schválení návrhu vtokové soustavy mohli konstruktéři vytvořit geometrii celé formy. V momentě, kdy je zkonstruován návrh vtokové soustavy se vývoj posouvá do fáze numerických simulací plnění a tuhnutí.



Obrázek 29 - optimalizace vtokové soustavy

4.1.1.2. POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Ještě než byly samotné simulace spuštěny, musel být definován celý proces cyklování, plnění a tuhnutí za pomoci počátečních a okrajových podmínek. Ty popisuje Tabulka 3, která uvádí všechny důležité parametry. Stěžejní pro simulování technologie mikropostřihu jsou kanálky pro vnitřní chlazení formy.

Tabulka 3 - počáteční a okrajové podmínky

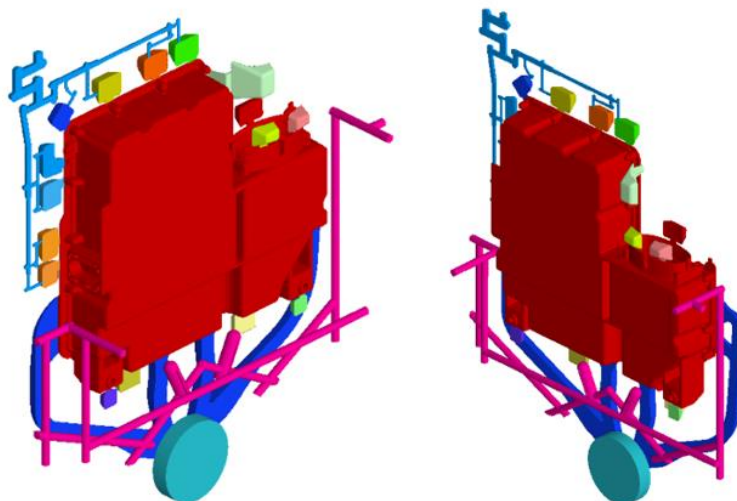
Odlévání materiál	EN AC - 46000			
Materiál formy	ČSN EN 1.2738			
Teplota taveniny při odlévání	700°C (±15°C)			
Teplota formy před prvním cyklem	20°C			
Licí pracoviště	IDRA OL 1900 CS			
Vnitřní průměr komory	120 mm			
Nastavení cyklu formy	Zavření komory	9 s		
	Dávkování kovu	37 s		
	Vstřikování	22 s		
	Otevření formy	10 s		
	Vyjmutí kusu	23 s		
	Postřík	14 s		
	Celkem	115 s		
Chlazení formy	Číslo temperační jednotky	Okruh	Kanál	Médium
	1	PEV. - TVAR. VL. 1-2 + RÁM	1,2,5	voda - 160°C
	2	PEV. - TVAR. VL. 3	3	voda - 160°C
	3	PEV. - TVAR. VL. 4	4	voda - 90°C
	4	POH. - ZÁMKY	7, 14	voda - 120°C
	5	POH - TVAR. VL. 8-9-10	8,9,10	voda - 160°C
6	KOMORA	-	olej - 185°C	
Průběh lisování	Poloha pístu	Rychlost (m.s ⁻¹)		
	0	0,10		
	200	0,15		
	550	0,20		
	570	3,50		
	708	3,50		

4.1.2. CHLAZENÍ FORMY

Pro chlazení formy bylo navrženo sedm na sobě nezávislých temperačních zařízení od firmy IECI, které jsou tvořeny chladícími kanálky spolu s fontánkami. Některé temperační jednotky chladí více než jeden kanál. Jednotlivé kanály a fontánky jsou zobrazeny v této kapitole na obrázcích níže. U šesti temperačních jednotek byla jako chladící médium zvolena demineralizovaná voda. Pro jeden okruh, konkrétně pro plnicí okruh byl u temperační jednotky jako chladící médium navržen olej.

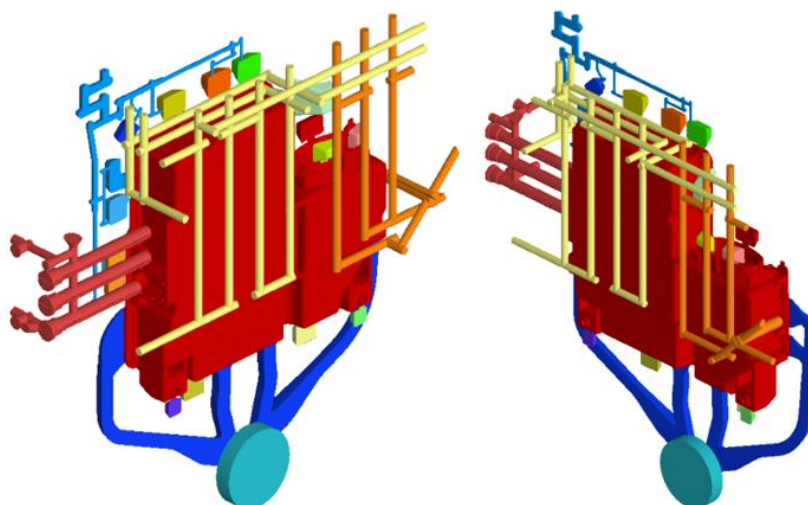
4.1.2.1. CHLAZENÍ PEVNÉ POLOVINY FORMY

Temperační zařízení č. 1 – Na Obrázku 30 je fialovou barvou zobrazen kanálek, který byl navržen k chlazení vtokové soustavy. V něm proudící médium byla zvolena demineralizovaná voda o teplotě 90°C.



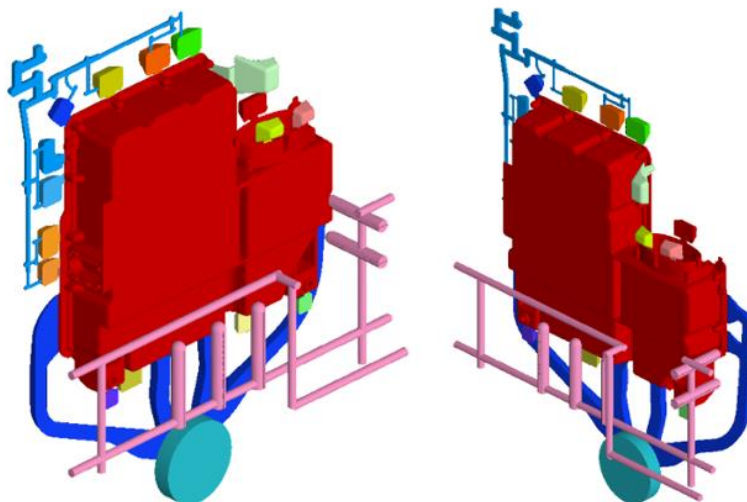
Obrázek 30 – 3D model chladícího kanálku pro vtokovou soustavu

Temperační zařízení č. 2 – Na Obrázku 31 jsou vínovou, světle žlutou a oranžovou barvou znázorněny kanálky, které byly navrženy pro chlazení dutiny formy. Proudí jimi médium v podobě demineralizované vody o teplotě 160°C.



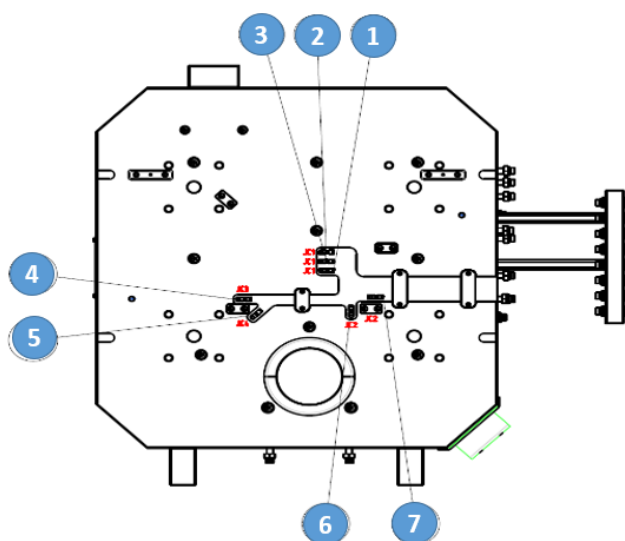
Obrázek 31 - 3D model chladících kanálků pro dutinu formy

Temperační zařízení č. 3 – Na Obrázku 32 je světle fialovou barvou k nahlédnutí navržený kanálek, který má za úkol chladit vtokovou soustavu. V tomto kanálku byla jako chladicí médium zvolena demineralizovaná voda o teplotě 90°C.



Obrázek 32 - 3D model chladícího kanálku pro vtokovou soustavu

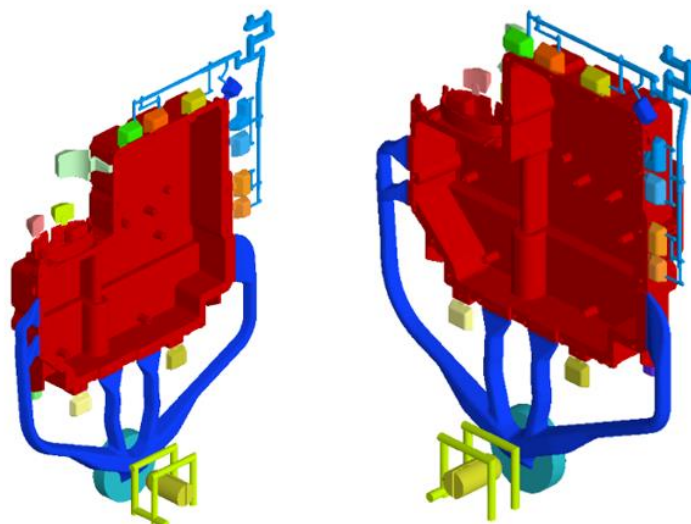
Jet – cooling – na Obrázku 33 je znázorněno schéma rozmístění technologie chlazení jet – cooling, která má za úkol chladit tenká jádra ve formě. V zařízení SpotCool byla pro simulace nastavena teplota vody na 30°C.



Obrázek 33 - Schéma zapojení Jet – coolingu

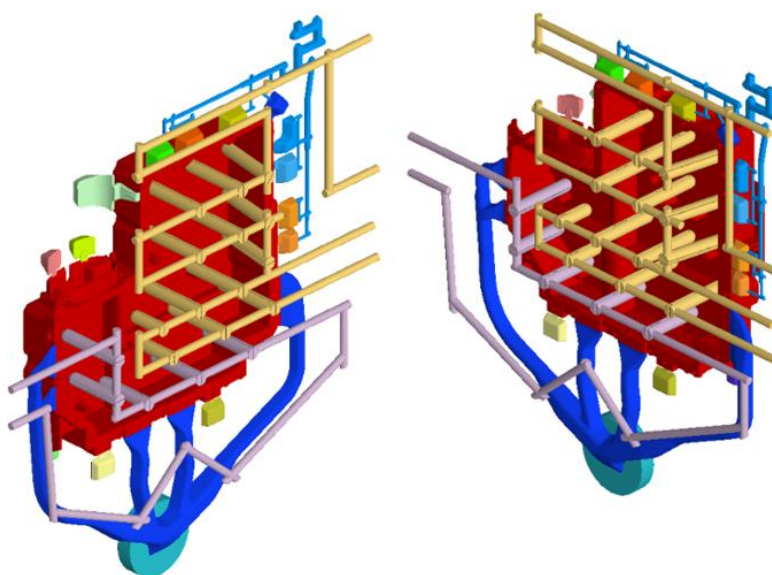
4.1.2.2. CHLAZENÍ POHYBLIVÉ POLOVINY FORMY

Temperační zařízení č. 4 – Na Obrázku 34 je znázorněn limetkovou barvou navržený chladicí kanálek, jehož pole působnosti se zaměřuje na tabletu. Kanálkem protéká demineralizovaná voda o teplotě 30°C.



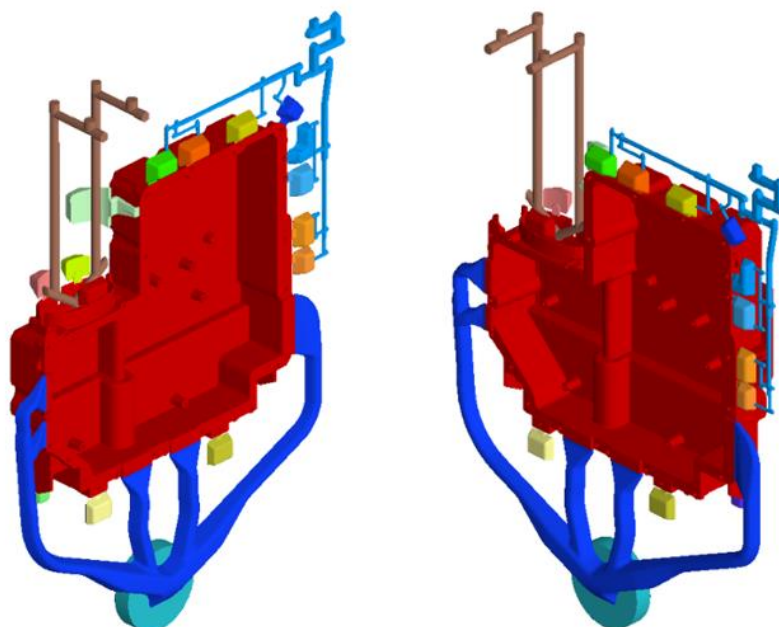
Obrázek 34 - 3D model chladícího kanálku pro tabletu

Temperační zařízení č. 5 – Obrázek 35 představuje dva chladicí kanálky. Kanálek béžové barvy se stará o chlazení dutiny formy. Světle fialovou barvou vyobrazený kanálek chladí vtokovou soustavu. Oběma kanálky proudí médium v podobě demineralizované vody o teplotě 160°C.



Obrázek 35 - 3D model chladících kanálků pro vtokovou soustavu a dutinu formy

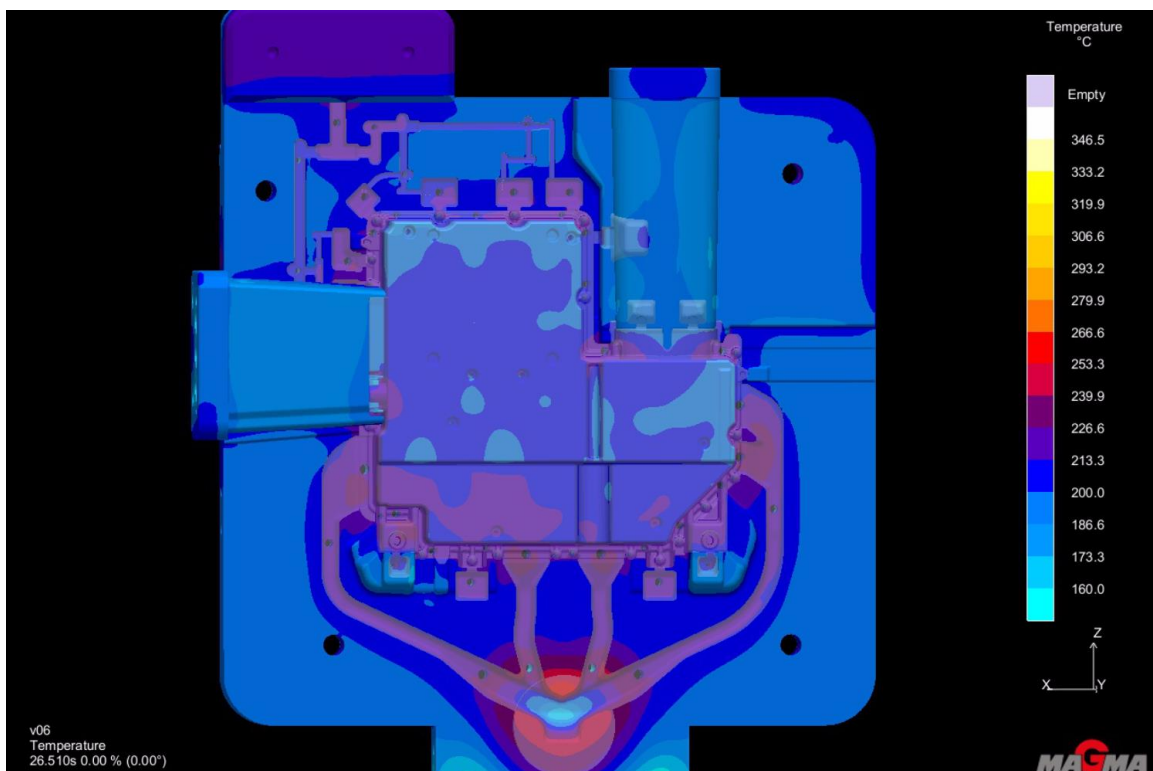
Temperační zařízení č. 6 – návrh posledního chladicího kanálku byl umístěn do místa zámku na pohyblivé části formy. Na Obrázku 36 je zobrazen hnědou barvou. Jako médium pro tento kanálek byla zvolena opět demineralizovaná voda o teplotě 120°C.



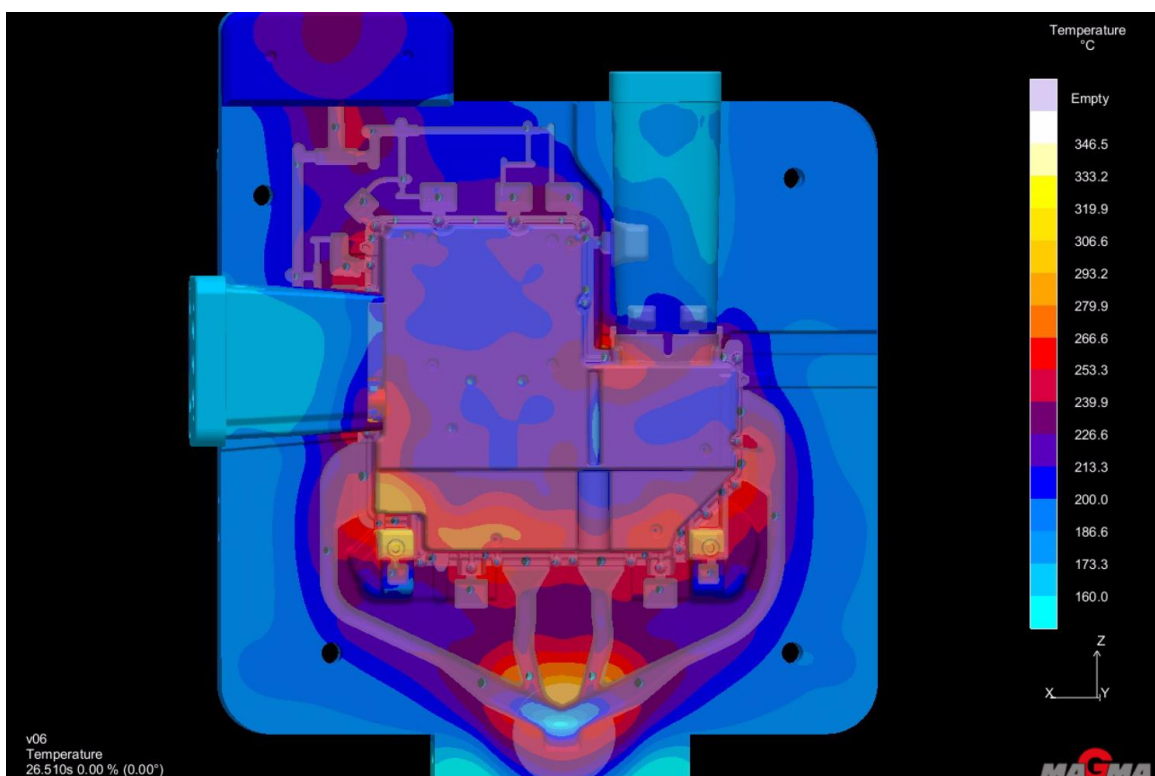
Obrázek 36 - 3D model chladicího kanálku pro zámek formy

4.1.3. SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE FORMY

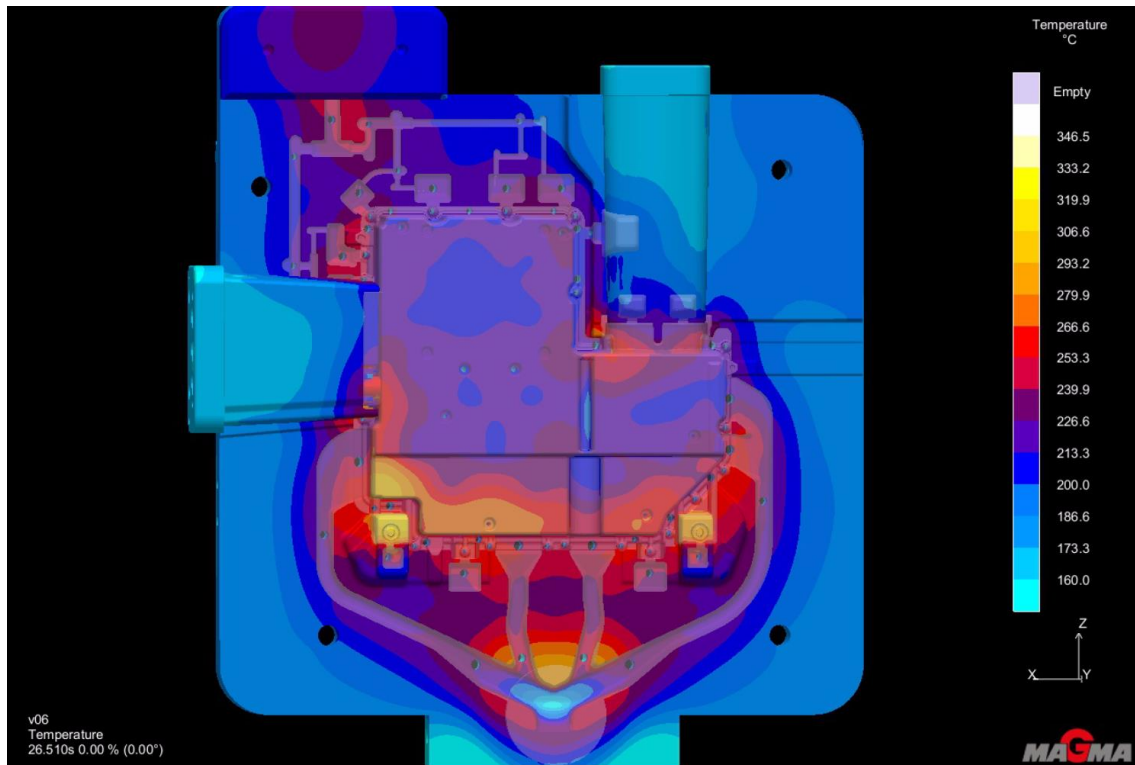
Na základě návrhů chladicích systému proběhly během vývojové fáze simulace teplotního pole formy, které je stěžejní pro správné fungování mikropostřiku. Bylo důležité ověřit navržený systém vnitřních chladicích kanálků, jelikož forma oproti konvenčnímu ošetření není chlazená na povrchu. V tomto případě byl pro simulace využit program MAGMASOFT. Výsledky simulace jsou vidět na obrázcích níže. První obrázek znázorňuje teplotní pole formy před začátkem licího procesu. V dalších je poté názorně vidět, jak se forma s přibývajícím cykly zahřívá. Na posledním obrázku je vidět jak vypadá forma po deseti cyklech. Největších teplot dosahuje forma v oblasti tablety. Dalším mírně kritickým místem se jeví dvě tenká jádra na obou krajích v dolní části formy. Z toho důvodu byl do těchto míst navržen systém chlazení pomocí jet - coolingu. Dle výsledků simulace se teploty v těchto kritických místech pohybují okolo teploty 300 – 320°C. Z teoretické části je zřejmé, že tato teplota je pro formu ještě přijatelná.



Obrázek 37 - Simulace teplotního pole formy - stav před spuštěním procesu



Obrázek 38 - Simulace teplotního pole formy - stav po pátém cyklu



Obrázek 39 - Simulace teplotního pole formy - stav po desátém cyklu

4.2. LICÍ PRACOVÍŠTĚ

Výroba zkoumaného dílu probíhala na licím pracovišti IDRA OL 1900 CS se studenou licí komorou. Jedná se o stroj vyrobený firmou GIGAPRESS, která je označována za největšího výrobce tlakových licích pracovišť na světě. Disponuje uzavírací silou 19 600 kN (1,998 tun), vstřikovací síla s 20 barovým protitlakem dosahuje hodnoty 1,210 kN. Celková hmotnost stroje je 98 tun. S pracovním prostorem 1960x1960 mm a maximální výškou odlitku 1450 mm se jedná o vhodně zvolený stroj pro zadanou výrobu odlitku. Celé licí pracoviště IDRA OL 1900 CS je vidět na Obrázku 40 a), licí komoru pak na Obrázku 40 b).



Obrázek 40 - a) Licí pracoviště IDRA OL 1900 CS; b) studená licí komora

4.3. OSTŘIHOVACÍ LIS, MANIPULAČNÍ ROBOT

Ostřihovací lis využívaný pro oddělení vtokové soustavy od surového odlitku byl do firmy dodán italskou firmou Tecnopres. Jedná se o ostřihovací lis typu KZP, který firma dodává kompatibilní s konkrétním licím pracovištěm. Lisy typu KZP jsou čtyřsloupové hydraulické lisy určeny k ostříhu a povrchové úpravě především hliníkových, ale nejenom, tlakově litých odlitků. Ostřihovací lis umístěný ve slévárně je na Obrázku 41 a).

Téměř veškerá obsluha na licím pracovišti je zajištěna víceúčelovým manipulačním robotem od firmy ABB (viz. Obrázek 41 b)). Jedná se o robota se sériovou kinematikou, na jehož koncovou přírubu lze připevnit libovolný kompatibilní koncový efektor. V našem případě bylo na koncový efektor připnuto dvou – čelistní tvarové chapadlo. Jeho hlavním úkolem byla zejména manipulace s odlitkem. V první fázi byl odlitek robotem vyjmut z formy s následným zchlazením ve vaně. Dále putoval ke gravírování technických dat do odlitku, které byly zadány zákazníkem. V předposlední části došlo k přemístění odlitku do ostřihovacího lisu. Po ostřížení umístil robot odlitek na dopravníkový pás.



Obrázek 41 - a) ostřihovací lis Tecnopres; b) manipulační robot ABB

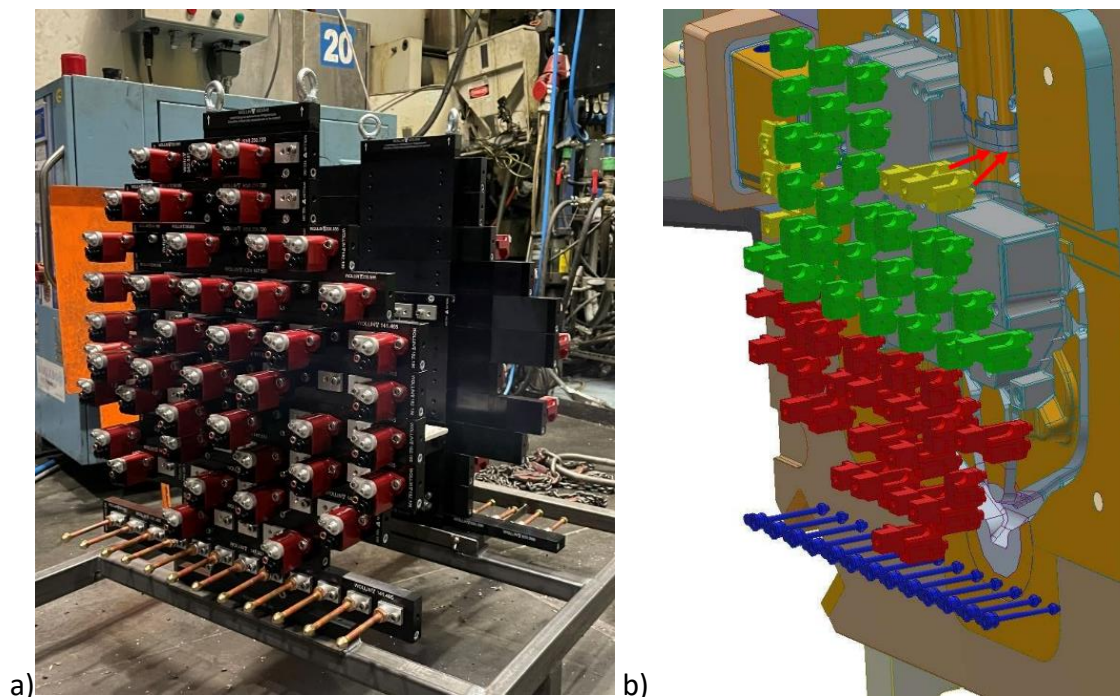
4.4. TECHNOLOGIE A KOMPONENTY MIKROPOSTŘIKU

V této kapitole budou detailněji popsány a rozebrány jednotlivé komponenty nutné pro úspěšné využití technologie mikropostřiku. Při kompletaci součástí proběhlo odborné poradenství s firmou ŠEBESTA – služby slévárnám s.r.o., která díky svým zkušenostem navrhla firmě Ljunghäll s.r.o. sestavu kompatibilní a dostačující pro zadaný odlitek zkoumaný v experimentální části.

4.4.1. POSTŘIKOVÁ HLAVA A DDV TRYSKY

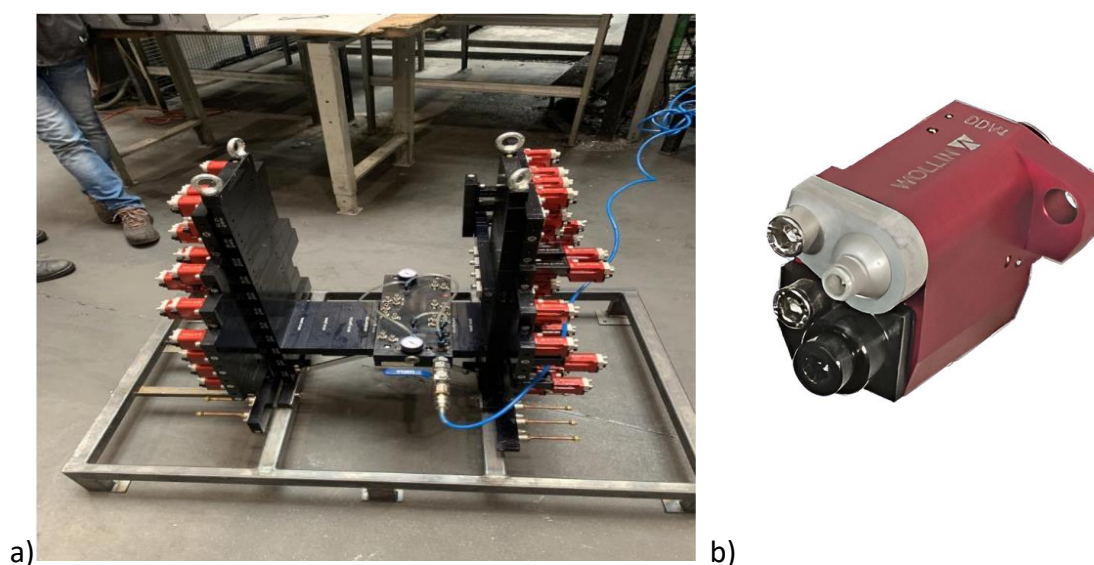
Postřikové hlavy dodávané firmou Wollin GmbH jsou založeny na principu stavebnic. To umožňuje vysokou míru konfigurace trysek pro konkrétní geometrie povrchů forem. Postřikové hlavy disponují určitým počtem okruhů, které mají samostatné ovládání přívodu prostředku a vzduchu. V našem případě se jednalo o šest samostatných okruhů. Postřiková hlava pro mikropostřik využívána ve firmě Ljunghäll s.r.o. je vidět na Obrázku 42 a) a jak již bylo zmiňováno v teorii, v tomto případě je připevněna na dvouosý manipulátor. Obrázek 42 b) znázorňuje 3D model návrhu postřikové hlavy s nastavením směru proudu

trysek. Bylo nesmírně důležité provést tento návrh, aby došlo k dostačujícímu ošetření všech kritických míst v částech formy.



Obrázek 42 - a) postřiková hlava Wollin; b) 3D model návrhu postřikové hlavy

Před každým nasazením postřikové hlavy je stěžejním úkolem přesvědčit se o její těsnosti pomocí speciálního přípravku. Ten je možné vidět na Obrázku 43 a). Bez tohoto ověření by mohlo dojít k jejímu nesprávnému fungování. Mezi zásadní stavební prvky těchto hlav patří: trysky, clony a trubičky.



Obrázek 43 - a) ověření těsnosti postřikové hlavy; b) DDV tryska

DDV trysky (viz. Obrázek 43 b)) jsou takovým typem trysek, u nichž je množství mazadla řízeno komůrkou v trysce. Celý jejich princip spočívá v přívodu mazadla do komůrky. V tento okamžik začíná tryska přijímat řídicí vzduch. Společná kombinace dostatečného množství mazadla a řídicího vzduchu má za následek uvolnění cest pro vzduch unášecí. V momentě, kdy se do komůrky dostane právě zmiňovaný unášecí vzduch, dojde ke zdvihu pístu v komůrce, postříku separátorem a následnému opakování procesu.

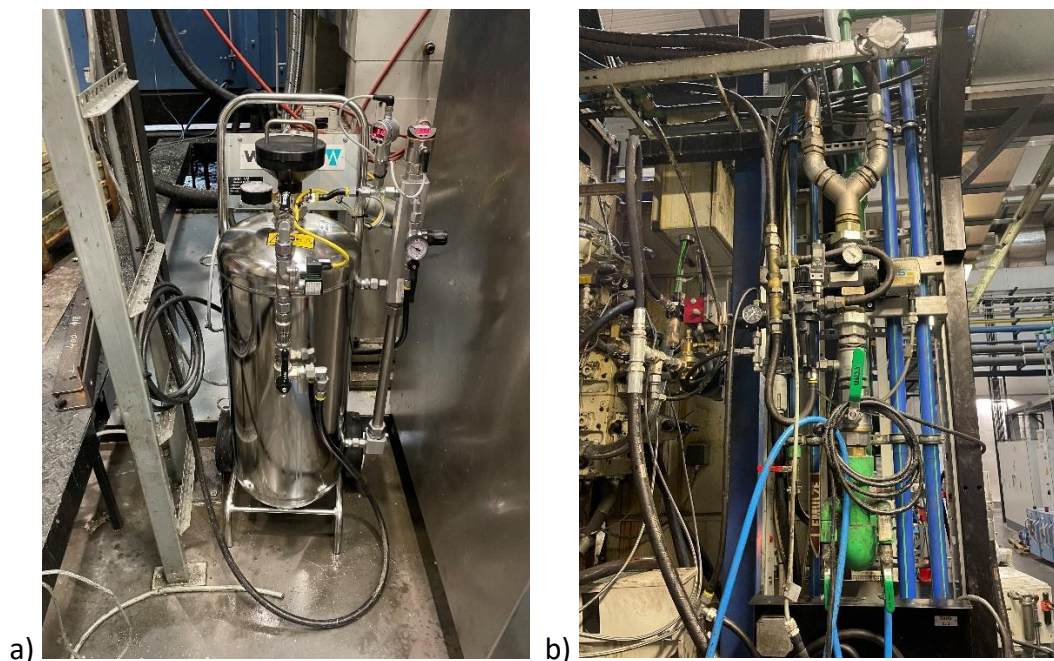
4.4.2. DÁVKOVACÍ STANICE – ZÁSOBNÍK MAZADLA

Jako dávkovací stanice a zásobník mazadla byl využit typ OSA1 od firmy Wollin GmbH, který je možno vidět na Obrázku 44 a). Jedná se o stanici určenou pro koncentrované separátory typu HERA, které se nesměšují. Disponují pneumatickým ovládním a mají tlakový zásobník pro separátor o objemu 50 l. Tlak se u nich nastavuje jemným způsobem na 0,15 – 8 bar, doporučená hodnota se však pohybuje na rozmezí 3 – 4 bar. Uživatelsky příjemná je digitální měřka pro měření výšky hladiny separátoru v zásobníku. V případě nízké hladiny separátoru dojde k rozsvícení signální lampy, která dá pokyn k zastavení procesu a doplnění separátoru. V případě, že by nedošlo k zastavení licího pracoviště, hrozí nevyjmutí odlitku z formy a to má za následek nežádoucí odstávku výroby, sundání formy + její čištění, následně její opětovné nasazení a rozjezd výroby. Při rychlém poklesu hladiny, neboli úniku separátoru v systému dojde k uzavření magnetického ventilu. Díky tomu není možné, aby se dělicí prostředek dostal do pracoviště.

4.4.3. STANICE KE ZVÝŠENÍ TLAKU – MAXIMÁTOR S MANUÁLNÍM VENTILEM

Další nezbytnou komponentou pro technologii mikropostříku je tzv. maximátor s manuálním ventilem (viz. Obrázek 44 b)), jehož hlavní funkcí je zajištění dostatečného množství tlaku. V momentě, kdy je na dvouosý manipulátor nasazena postřiková hlava, je nutné odvzdušnit všechny zapojené trysky. Námi použité samo – odvzdušňovací trysky typu DDV vyžadují pro odvzdušnění tlak vyšší než 8 bar. Maximátor je napojen na standardní přívod vzduchu ze kterého je do zásobníku tlakován dostatečný objem vzduchu, který je posléze vpuštěn do systému pod tlakem 8 – 10 bar. Využitím maximátoru se výrazně snižuje spotřeba mazadla při nasazení nové postřikové hlavy a to až od 95%. V tom případě se u spotřeby dostáváme z hodnot litru na mililitry. Další výhodou maximátoru je zkrácení doby odvzdušnění, která se

pohybuje okolo 10 s. Celé odvzdušnění postřikové hlavy lze snadno provést přímo z ovládacího panelu Wollin.



Obrázek 44 - a) dávkovací stanice OSA1; b) maximátor

4.4.4. VOLBA SEPARÁTORU

Pro experiment, kterým se tato diplomová práce zabývá, bylo důležité zvolit vhodný dělicí prostředek. V tomto případě se firma rozhodla pro separátor HERA® (High Efficiency Release Agent) od firmy ChemTrend. Přesné značení je Chem-Trend® SL-8801. Jedná se o bezvoskový koncentrát na vodní bázi, který se neředí a byl vyvinut speciálně pro potřeby mikropostřiku. Je vhodný pro komplexní a složité odlitky. Dokáže pracovat při vyšších teplotách 220 – 380°C. Mezi největší výhody pak dále patří:

- snížení rychlosti pístu → menší odírání komory a pístu = jejich vyšší životnost
- prodloužení životnosti formy
- kvalitní oddělovací vlastnosti
- snížení spotřeby mazadla pro jeden cyklus v řádech ml
- snížení zmetkovitosti → odstraňuje vnitřní porezitu, jelikož neobsahuje žádnou vodu.
- vhodný pro další operace tepelného zpracování

4.5. PRVNÍ VZORKOVÁNÍ

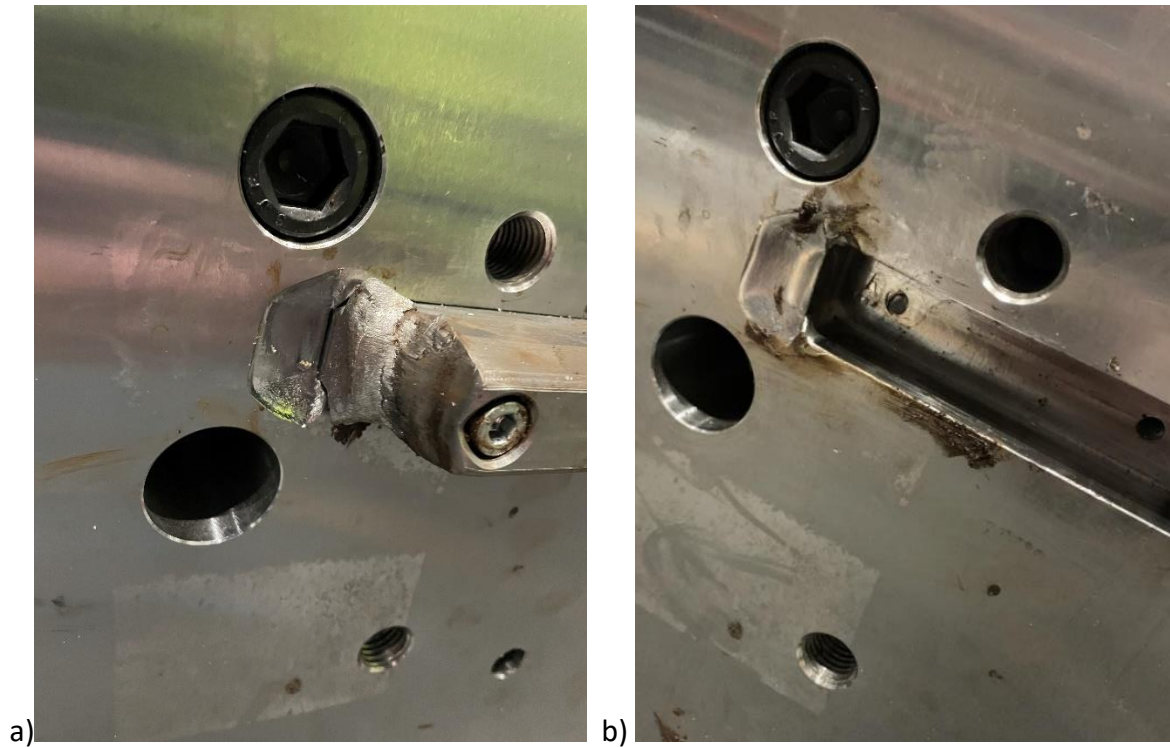
V únoru roku 2022 byla dodavatelem do Ljunghällu přivezena forma. Jak se již zmiňuje v teoretické části, forma se dělí na dvě části – pevnou a pohyblivou. Obě části je možné vidět na Obrázku 45 a rozlišit na první pohled je lze tak, že u pevné poloviny je připravený prostor pro tabletu.



Obrázek 45 - a) pevná polovina formy; b) pohyblivá polovina formy

4.5.1. MONTÁŽ FORMY

V první řadě bylo nutné formu zkontrolovat v nástrojárně. Jednalo se především o kontrolu kvality povrchu formy, rádiusů a dalších aspektů zaručujících nezmetkovou výrobu. Největším problémem byly ostré a neopracované hrany na odvodušnění pohyblivé části formy. Stěžejní byla komunikace mezi nástrojáři, jejichž úkolem bylo dosáhnout na sebe dokonalého pasování forem. Obě poloviny formy na sebe musí dosedat s předepsanou vůlí, která může být ovlivněna nepřesnostmi z výroby. Dalším důležitým úkolem v nástrojárně bylo k ventilům sloužícím pro napojení chladících okruhů přidat ventily redukční, které korespondují s vybavením slévárny. Po úspěšném nasazení dynamického vakuového ventilu od firmy Fondarex byla forma společně s licí komorou o vnitřním průměru 120 mm přesunuta k licímu pracovišti a mohlo být provedena její montáž na upínací desky licího pracoviště. Z důvodu vysoké hmotnosti jedné poloviny formy (až 2350 kg) probíhá její nasazení pomocí mostového jeřábu. V tento okamžik však došlo k odhalení nového problému s formou. Došlo k roztemování ustavovacích kamenů na formě viz Obrázek 46 a). Jednalo se konstrukční problém výrobce formy. Muselo dojít k okamžité úpravě jednoho kamene, která je znázorněna na Obrázku 46 b), a následně bylo možné formu nasadit.



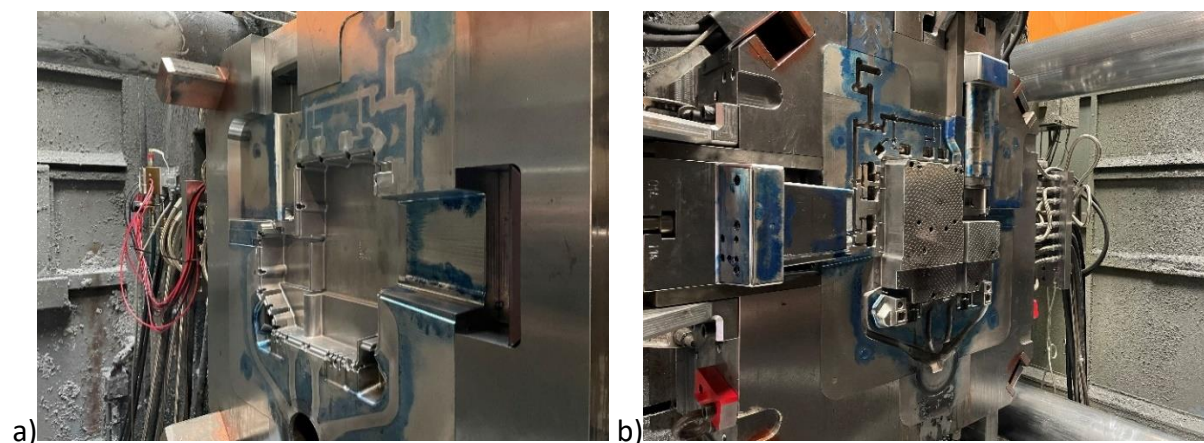
Obrázek 46 - a) ustavovací kámen před úpravou; b) ustavovací kámen po úpravě
Současně bylo zjištěno, že forma je na několika místech vložkováná (viz Obrázek 47), což je u nové formy nepřipustné a byly po výrobci vyžadovány nápravné opatřování.



Obrázek 47 - tvarová vložka na pevné polovině formy

4.5.2. ZKOUŠKA TĚSNOSTI FORMY

Poté, co je forma usazena na upínací desky, je na řadě zkouška těsnosti, neboli tzv. tušírovací zkouška. Jejím cílem je ověřit napojení ploch dělicí roviny mezi pevnou a pohyblivou částí formy. Znamená to, že během procesu lití musí uzavřená forma dosedat natolik, aby nemohlo dojít k úniku taveniny do prostoru. Obvykle se udává jako maximální mezera, kdy nedochází k tvorbě zástříků, zhruba 0,02 mm. K ověření těchto vlastností se využívá tušírovací barva. Jedná se o středně viskózní pastu určenou pro vyznačování nerovností při slícování styčných ploch strojních součástí a forem. Díky této pastě tak nástrojáři mohli bez větších problémů vyhodnotit lícovací obraz dělicí roviny. Nejdříve byla nabarvena jedna strana formy, v našem případě se jednalo o pevnou polovinu formy (viz. Obrázek 48 a)), a následně při velkém tlaku vyvinutém uzavřením formy došlo k obtisknutí tušírovací barvy na pohyblivou polovinu formy (viz. Obrázek 48 b)). Tímto procesem byly nástrojářům odhaleny nedostatky dosednutí formy. V případě, že by se na formě vyskytly místa, kde by obtisknutí barvy neproběhlo, došlo by na navaření materiálu a následné obroušení. Tato situace je spíše nežádoucí, jelikož hrozí popuštění formy, které má nepříznivé vlastnosti na její životnost. Naštěstí situace byla vyhodnocena tak, že stačilo pouze některé plochy formy zabrousit a při opakování tušírovací zkoušky se i díky bohatým zkušenostem nástrojářů dosáhlo požadovaných kvalit.



Obrázek 48 - Tušírovací zkouška - a) pevná polovina formy; b) pohyblivá polovina formy

4.5.3. ZÁVĚREČNÉ ÚKONY

Po úspěšném nasazení formy a provedení její zkoušky těsnosti bylo potřeba formu připravit do stavu schopného lití. Mezi úkony potřebné pro dokončení přípravy formy patří např.

montáž přípojek chladících okruhů, hadice chladících okruhů, zapojení jet – coolingu, usazení a zapojení manifoldu. Dalším nezbytným krokem je zkouška chladících okruhů. Byl vytvořen prvotní program na ošetření líce formy. Jednalo se o prozatímní dva impulzy na každou polovinu. Po splnění všech těchto kroků je forma připravena k provedení zkušebních ostříků s následnou optimalizací.

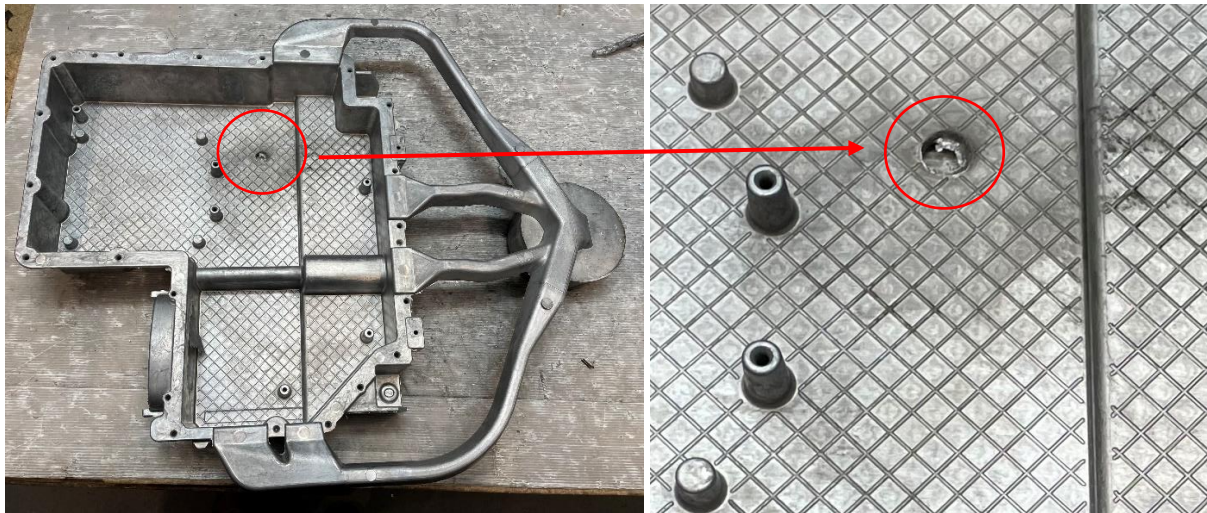
4.5.4. PROCES ODLÉVÁNÍ

Během rozjezu technologie mikropostřiku docházelo celé dopoledne k problémům se softwarem licího pracoviště IDRA. Po následném zprovoznění přišla na řadu optimalizace ošetření formy. V tento okamžik bylo zjištěno, že na hale dochází k velkému kolísání přívodního vzduchu. U ošetření líce formy konvenčním způsobem by se o zásadní problém nejednalo. V případě technologie mikropostřiku je stabilita přívodního vzduchu velice důležitá, protože je potřeba stabilním řídicím vzduchem otevírat a zavírat trysky. Řídicí vzduch musí být stabilně vyšší o minimálně 0,5 bar, což způsobuje pravidelné otevírání a zavírání DDV trysek. To mělo za následek nedostatečné ošetření líce formy. Pro tuto zkoušku byl problém vyřešen navýšením řídicího tlaku na hodnotu 5 bar. Zásadním nedostatkem během prvního vzorkování byla absence vyhazovačů v pohyblivé vložce, což mělo za následek praskání odlitku při vyrážení z formy (viz Obrázek 49). Tento problém jsme se pokusili vyřešit přidáním a nasměrováním dalších šesti DDV trysek na postřikovou hlavu. Bohužel tento postup opravy nebyl úspěšný. Další snahou o nápravu problému bylo zvýšení dávky mikropostřiku na 20 ml, taktéž se jednalo o neúspěšné nápravné opatření. I přesto se podařilo částečně rozjet sériovou výrobu tak, aby bylo možno doladit technické parametry. Teploty formy dosahovaly vyhovujících hodnot, kolem 230°C. První rentgenové snímky vykazovaly mírné známky přítomné porezity.



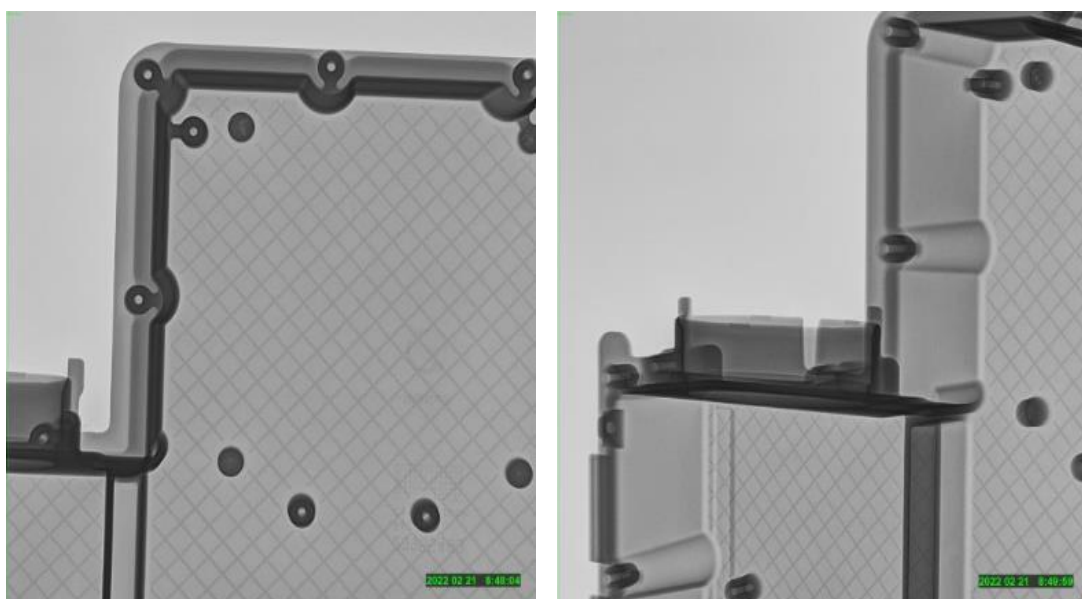
Obrázek 49 - Systematická chyba při vytlačování odlitku z formy

Díl vykazoval nesouměrnou tloušťku obvodové stěny u otvoru v oblasti horního zámku. Toto bylo nutné prověřit měřením. Dalším problémem bylo nalepování výstupků s otvorem na pohyblivé polovině formy. Názorně je chyba vidět na Obrázku 50. Tento problém byl však vyřešen už na místě a sice úspěšným přidáním dvou DDV trysek na postřikovou hlavu. Konečné nastavení dávky mikropostřiku bylo vráceno na původních 10 ml současně s optimalizací profilu plnění podle simulace a skutečné váhy vsázky/dílu.



Obrázek 50 - nalepování výstupků s otvorem na pohyblivou část formy

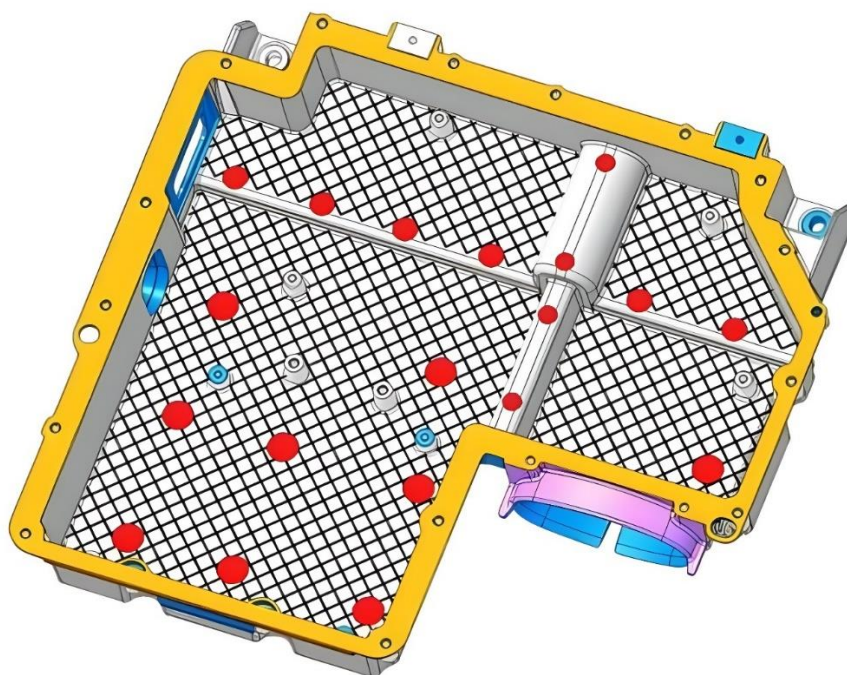
První rentgenové snímky vykazovaly mírné známky porezity. Po optimalizaci všech procesů byly konečné odlitky na základě rentgenových snímků označeny zástupcem kvality jako vyhovující.



Obrázek 51 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu porezity (1. vzorkování)

4.5.5. NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 1. VZORKOVÁNÍ

Systematickou chybu vzniklou při vytlačování odlitku z formy lze napravit doplněním vyhazovačů do vnitřního prostoru viz. Obrázek 52. Červené body naznačují místa, kde by měly být vyhazovače doplněny. Jedná se o úkon pro dodavatele formy. Společně s tím lze dodavateli zadat úpravu dopasování tvarových vložek na pevné polovině formy a opracování ostrých hran po celém obvodu odvzdušnění na pohyblivé polovině formy. Poslední navrhovanou úpravou je povlakování jader pomocí nitridace.



Obrázek 52 - Znáznornění navrhovaného rozmístění nových vyhazovačů

4.6. DRUHÉ VZORKOVÁNÍ

Druhé vzorkování začalo v březnu, poté co byla dodavatelem vrácena upravená forma. Dodavatel splnil všechny požadavky, kromě úprav geometrických tvarů formy došlo i na přidání vyhazovačů dle návrhu oddělení konstruktérů. Proběhlo také povlakování jader nitridací. Dále byl nasazen nový píšť.

U tohoto vzorkování proběhla samozřejmě montáž formy, postřikové hlavy, dokončovací práce a veškeré procesy zmíněné v kapitole 4.5. V tomto se postupy mezi jednotlivými

vzorkováními neliší. Jediným problémem bylo zdržení s nasazením formy, které bylo původně naplánováno na noční směnu. Z důvodu malého množství přítomných seřizovačů vše proběhlo až na směně ranní. V případě vzorkování se nejednalo o zásadní komplikaci. Pokud by se však jednalo o již zaběhnutou sériovou výrobu, byl by to problém. Je potřeba se těmito situacím vyvarovat.

Dále došlo k přípravě a připojení nového zařízení na měření spotřeby dělicího prostředku (Obrázek 53). U postřikové hlavy byly vyměněny filtry, sítka a proběhla zkouška průtoku dělicího prostředku ošetřovacím zařízením. Jak postřiková hlava, tak ošetřovací prostředek byly dále připraveny k dispozici, nutné bylo pouze odzdušnění před startem licího procesu.

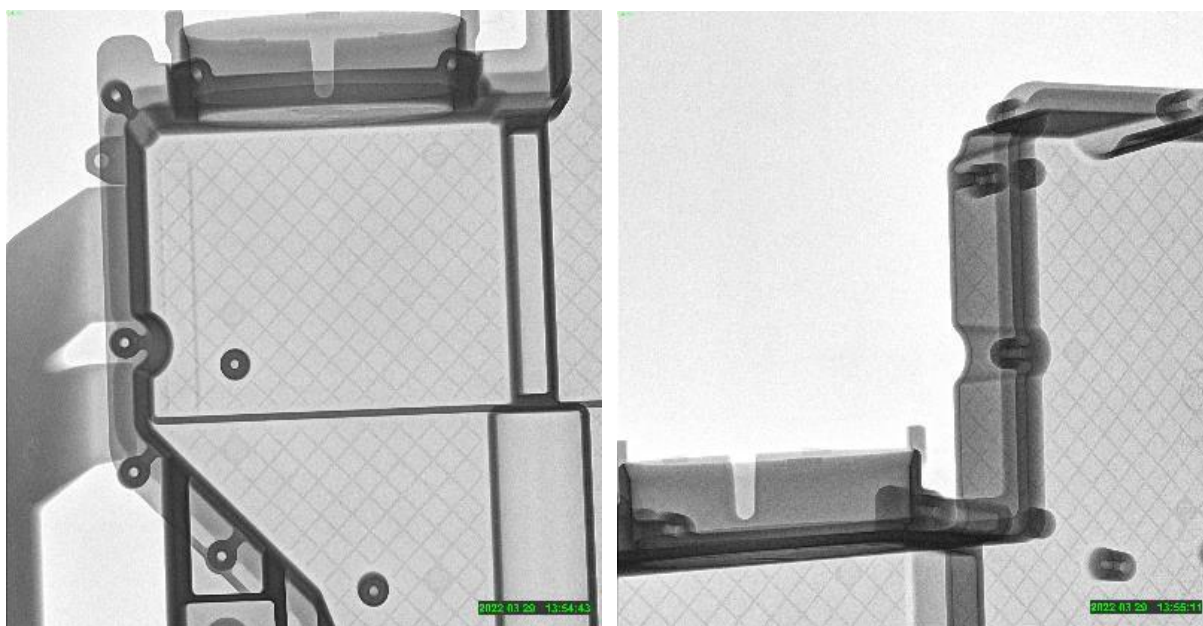


Obrázek 53 – zařízení na měření spotřeby dělicího prostředku

Po nasazení formy došlo na kontrolu programu a jeho úpravu ohledně ošetření formy. Následně se rozjela výroba. Bylo potřeba upravit program vyjímání odlitku manipulačním robotem ABB, který zanechával nežádoucí stopy na odlitku. Menší komplikací bylo zjištění, že je potřeba otočit ostříhvací nástroj v lisu o 90°. S tím samozřejmě souvisela i další úprava programu robota. Po všech korekcích byla opět zahájena výroba. Po odlití cca 40 ks došlo k deformaci bočního tahače na ostříhvacím nástroji. Současně s tím bylo zjištěno, že odlitek zůstává zalisován v horní části střížníku ostříhvacího nástroje. Z tohoto důvodu bylo

rozhodnuto, že výroba poběží bez ostříhu s tím, že nástroj bude opraven. Čas ošetření cyklu se dostal na 15 s se spotřebou dělicího prostředku 8ml/ks, což bylo možno považovat za kvalitní hodnoty.

Další den došlo na neúspěšný pokus nástrojárny o opravu střížníku na ostříhovacím nástroji. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že výroba pojedje bez ostříhování odlitků, které se ostříhnou dodatečně po opravě nástroje. Po rozběhnutí cyklu vykazovaly první odlitky stav vyhovující. Kontrola na rentgenu dopadla zdárně a nebyl odhalen problém s vnitřní strukturou. Spotřeba dělicího prostředku se pohybovala okolo 9 ml/ks.



Obrázek 54 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu porezity (2. vzorkování)

Zhruba po hodině procesu nastala porucha vakuového systému. Řešení bylo stanoveno znovu čištěním vakuového ventilu. Z důvodu této poruchy bylo technologií v programu doděláno ošetření vakuového ventilu. Po rozjetí výroby došlo k poruše licího pracoviště a bylo rozhodnuto, že další kusy se začnou odlévat až v příštím týdnu. V tento okamžik bylo nalito cca 45 ks z potřebných 340 ks.

Jako cíl pro příští týden byl stanoven průběh lití bez přestávky alespoň 48 hod. v kuse, aby bylo možné stanovit nedostatky s případnou optimalizací, případně říci, že technologie je pro výrobu tohoto kusu vyhovující.

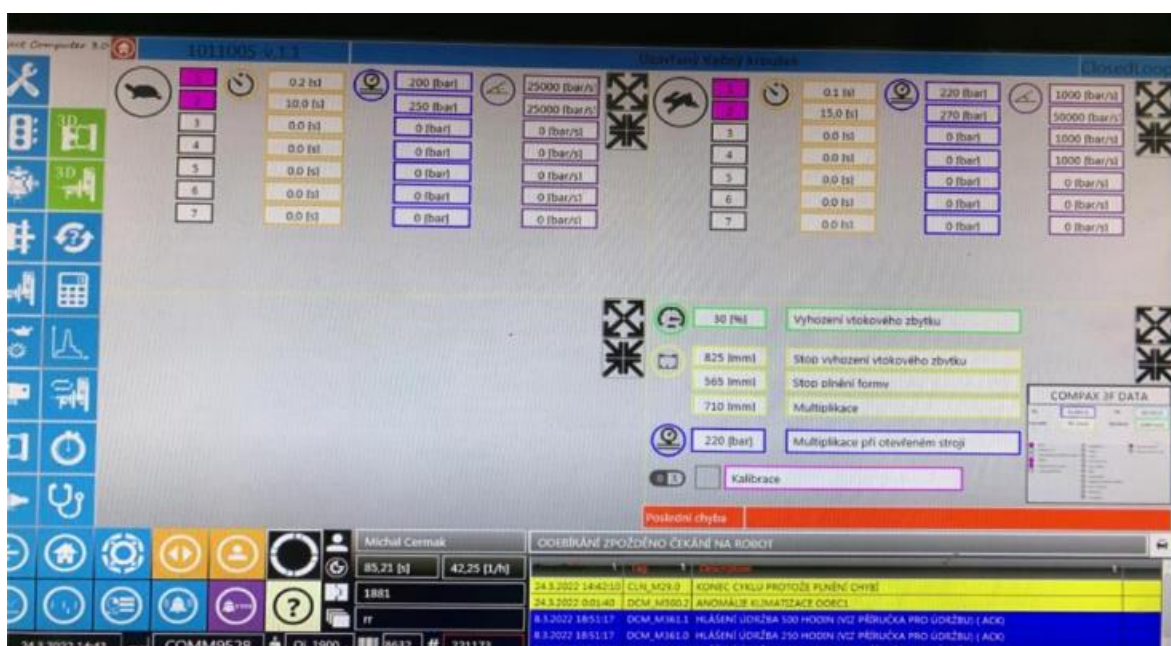
Dalším stanoviskem na další týden bylo sjednocení a upřesnění tolerance pístu. Během druhé vzorkování byl použit nový píst. Během odlévání se na cca 20 kusech objevila tzv. slupka

v místě tablety. Rozměrově dosahovala tloušťky okolo hodnoty 1 mm, což rozhodně není žádoucí jev a má to výrazný vliv na lisovací parametry, případně i na životnost samotného pístu. Tento jev je vidět na Obrázku 55 níže.



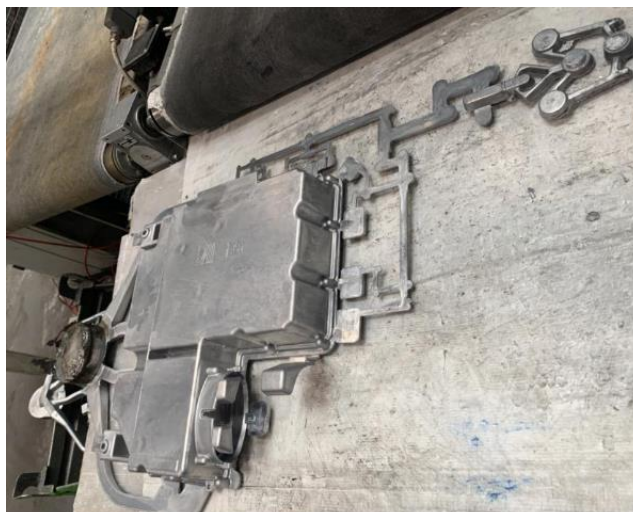
Obrázek 55 - Slupka v místě tablety

V dalším kalendářním týdnu došlo na navázání rozjezu technologie mikropostřihu. Hned z kraje rána nebyly zapnuty 2 temperovací zařízení. Z toho důvodu se muselo počkat na nahřátí formy a začátek procesu byl nuceně odložen o bez mála 3 hodiny. Opět se jedná o faktor, který by v sériové výrobě nebyl žádoucí a měl by za následek ekonomické ztráty.



Obrázek 56 - Nastavené parametry pro 2. vzorkování

Z počátku jela výroba v podstatě bez problémů, došlo ještě k optimalizaci programu na ošetření líce formy. Jednalo se o přiblížení polohy ošetření pevné vložky, u které docházelo k častému nalepování ledvinek o zhruba 3 cm. Dále byly doinstalovány dvě postřikové DDV trysky na pevnou vložku. Odlilo se zhruba 100 OK kusů. Odlitky byly namátkou prověřovány rentgenovou kontrolou, přičemž zde nedocházelo k žádným potížím s vnitřní strukturou.



Obrázek 57 - Surový odlitek z 2. vzorkování

Nedostatkem byla výroba bez deformovaného střižníku, který stále nebyl dodavatelem opraven. V tento okamžik byla naměřena spotřeba dělicího prostředku 9 ml/ks.

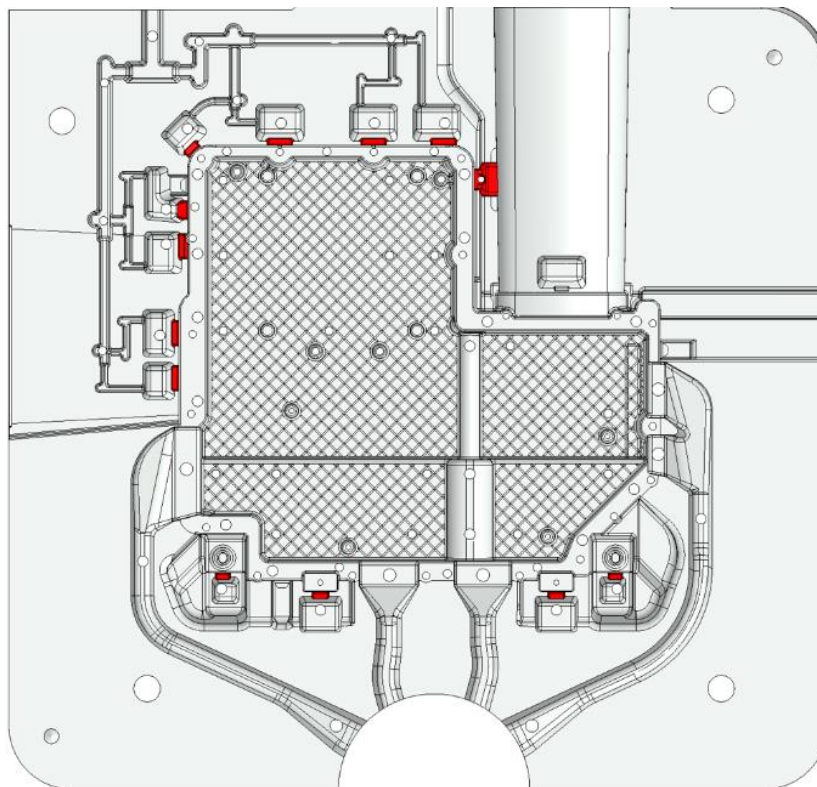
Další den došlo k prověření programu ošetření líce formy a nastavení postřikové trysky na místa, kde docházelo k zalepování nařiznutí do ledvinek. Celkově bylo provedeno 380 zalisování, z toho vyřazeno 30 ks jako NOK. Požadovaný počet 340 ks byl tedy splněn. Pozitivní informací je, že se úplně eliminovala systematická chyba během vyjímání odlitku z formy a lze tedy navržené opatření na přidání vyhazovačů vyhodnotit jako úspěšné.

4.6.1. NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 2. VZORKOVÁNÍ

Během druhého vzorkování docházelo ke komplikacím nejenom během licích procesů, ale vyskytly se také výraznější problémy s částí ostříhu. Je důležité provést kontrolu pružin a pouzder na spodní desce stříhu a odlehčit vyrážecí část.

Výrazný návrh pro opatření byla úprava dokumentace licího nástroje. Bylo navrženo spojení horních ledvin u oválného otvoru a dále zvětšení nařiznutí do všech ledvin na tloušťku 1,6 mm. Tato změna je zdokumentována na Obrázku 58. V návaznosti na to bylo doporučeno provést

simulaci licího procesu se spojenými horními ledvinami a zvětšením naříznutím u všech ledvin na tloušťku 1,6 mm a porovnat rychlost proudění kovu před a po změně procesu. Pokud by simulace prokázaly zlepšení, bylo doporučeno opravy provést.



Obrázek 58 - Úprava dokumentace licího nástroje

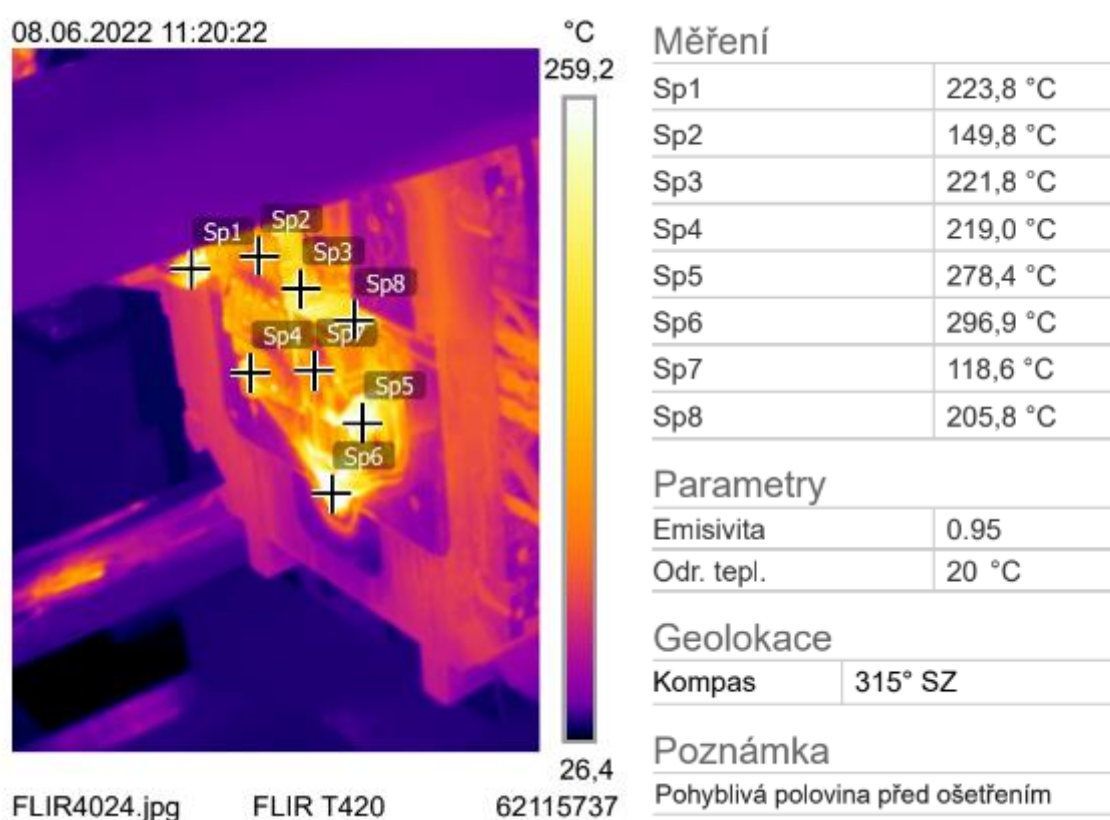
4.7. TŘETÍ VZORKOVÁNÍ

V návaznosti na druhé vzorkování byla všechna opatření týkající se ostříhu vyřešena dodavatelem. V případě návrhu spojení horních ledvin u oválného otvoru a zvětšení naříznutí do všech ledvin na tloušťku 1,6 mm došlo k provedení navržené úpravy. Co se týče prověření návrhu simulací, k té nedošlo.

Proběhla montáž formy a všechny úkony s ní spojené mezi které patří především: příprava pracoviště, zapojení temperace, jet – coolingu a příprava postřikové hlavy včetně zkoušky její těsnosti. Nešťastnou náhodou došlo extérním zaměstnanci k nechtěnému drcnutí do ovládacího panelu systému Fondarex. Výměna za jiný z neznámého důvodu nebyla úspěšná, třetí pokus však způsobil obnovení provozu této technologie. Dále byl identifikován ucházející ventil na manifoldu pro jet – cooling. Pokus o opravu rozebrání a vyčištění ventilu

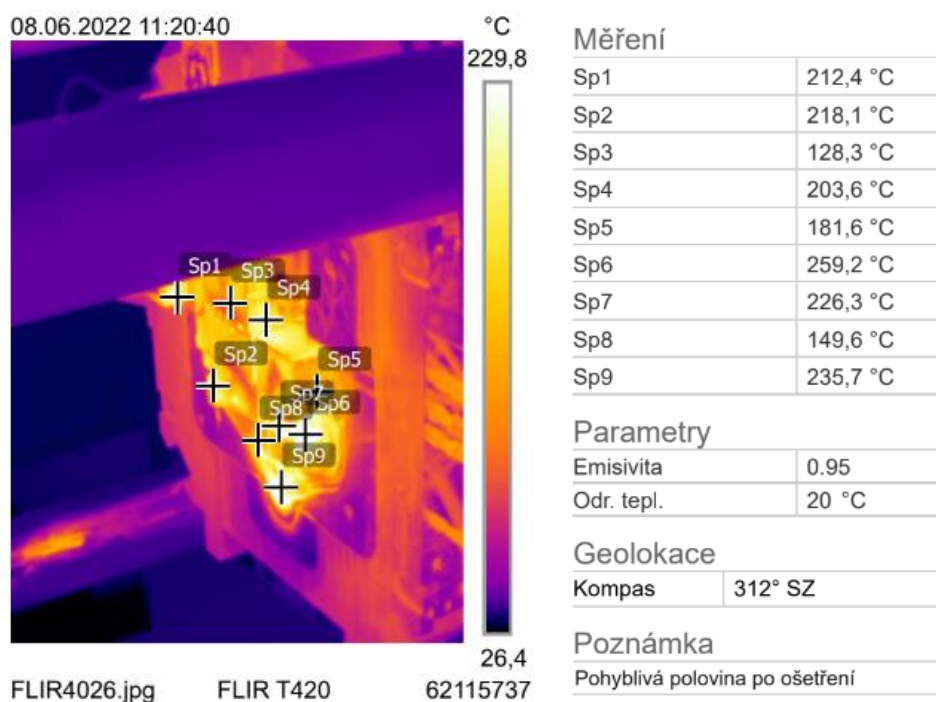
nepomohl. Problémem byla pravděpodobně slabší cívka. Z důvodu časové tísně byl vyměněn celý manifold. Při uvedení lícího pracoviště do provozu se projevila chyba v tekoucí hydraulice. Jednalo se o nedotažené hadice u posuvných prvků formy. Dalším problémem byl nezapojený koncový spínač na vyhazovací desce. Před obnovením procesu je bylo nutné zapojit. To se podařilo za pomoci týmu elektrikářů.

Nastala optimalizační část programu mikropostřiku, která proběhla bez komplikací. Během ní byl naměřen průtok 10,9 ml/ks. Po odlití prvního kusu bylo detekováno chybné nastavení manipulačního robota, kdy problémem bylo špatné uchopení odlitku v kleštích. Korekce této chyby netrvala příliš dlouho. Po zhruba hodině od začátku lícího procesu bylo provedeno měření teplotního pole formy, které nevykazovalo nepřijatelných hodnot.



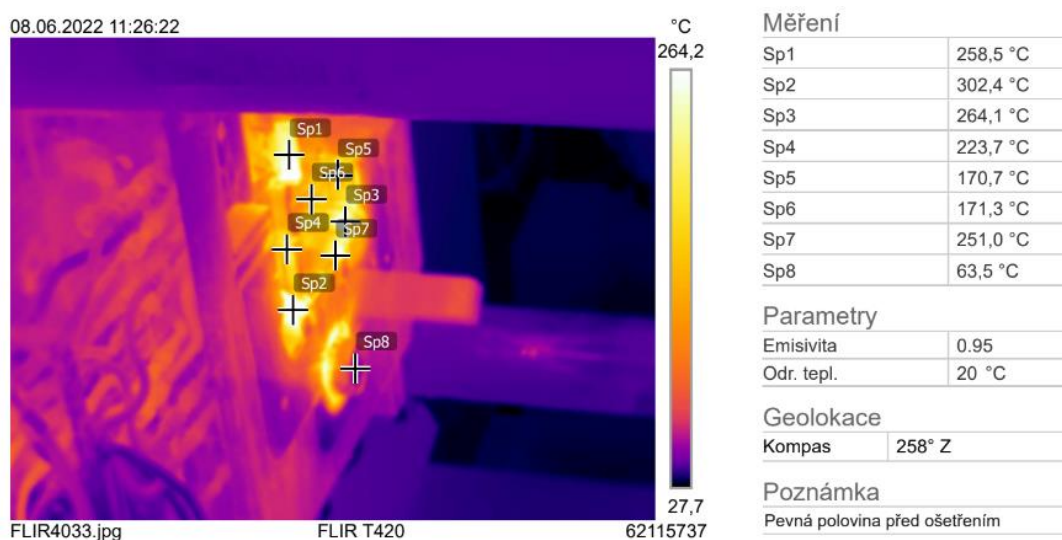
Obrázek 59 - Snímek z termokamery pohyblivé poloviny formy před ošetřením separátorem (3. vzorkování)

Na Obrázku 59 je zobrazen snímek z termokamery po desátém cyklu. Nejvyšší teploty dosahuje forma v bodě Sp6 (296,9°C). Jedná se o místo, kde ústí vtoková soustava do dutiny formy, nešlo tedy o překvapivý fakt. Navíc se nejedná o teplotu, kterou by forma nebyla schopna ustát. Ostatní teploty naznačují, že ve formě je stabilní teplotní pole.



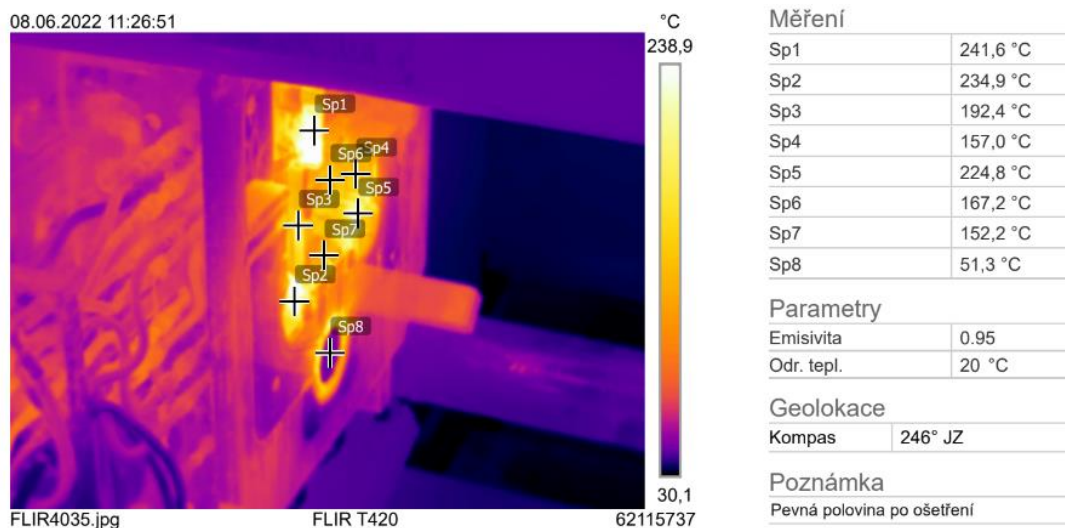
Obrázek 60 - Snímek z termokamery pohyblivé poloviny formy po ošetření separátorem (3. vzorkování)

Na Obrázku 60 je snímek z termokamery pohyblivé poloviny formy po ošetření separátorem. Z porovnání tabulek je důležité si uvědomit, že některé body jsou proházené a nekorespondují. I tak je zřejmé, že rozmezí teplot se nikterak zvlášť nemění. Jedná se o přirozený jev vzhledem k tomu, že samotným mikropostřikem se forma výrazně neochladí. Teplotní pole formy je i v tomto případě stabilní.



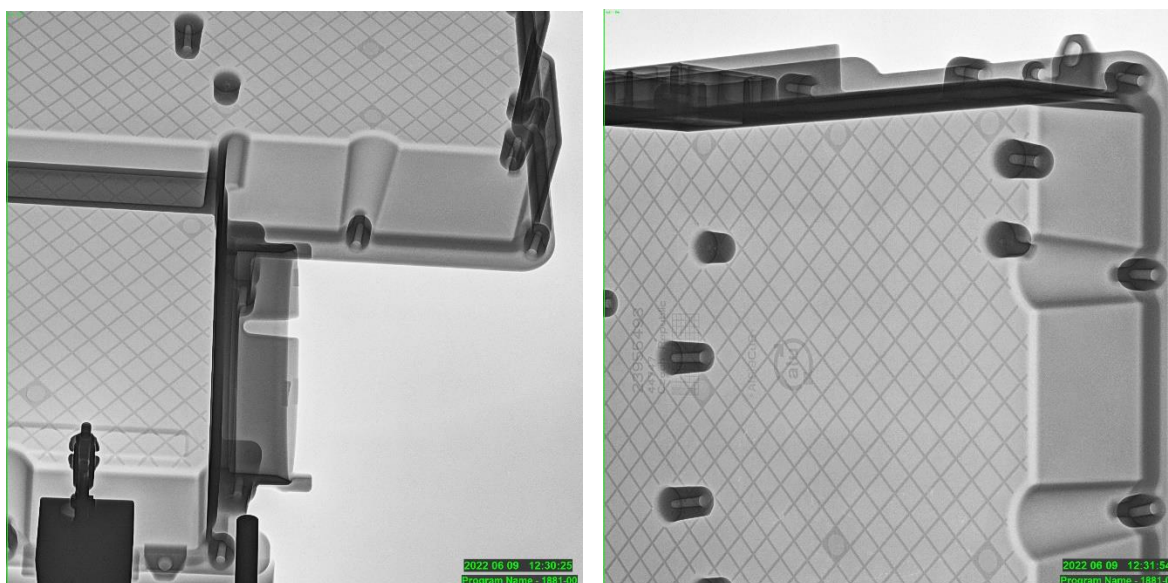
Obrázek 61 - Snímek z termokamery pevné poloviny formy před ošetření separátorem (3. vzorkování)

Snímek z termokamery pevné poloviny formy před ošetřením separátorem je možné vidět na Obrázku 61. Nejvyšší teplota (302,4°C) byla naměřena v bodě Sp2. Řeč je o místě, které je chlazené jet – coolingem. I tak se stále nejedná o teplotu, která by měla být znepokojující. Teplotní pole pevné poloviny formy je i v tomto případě stabilní.



Obrázek 62 - Snímek z termokamery pevné poloviny formy po ošetření separátorem (3. vzorkování)

V tomto případě, kdy se jedná o snímek z termokamery pevné poloviny formy po ošetření separátorem (Obrázek 62), je vidět, že během fáze ošetření formy, která zabrala zhruba 29 s, se temperačnímu systému podařilo formu zchladit na hodnoty dostatečné pro stabilní teplotní pole pevné poloviny formy.



Obrázek 63 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu porezity (3. vzorkování)

Po všech optimalizačních procesech se na noční směně podařilo nalít cca 300 nezmetkových kusů. Čas jednoho licího cyklu se v tento okamžik podařilo stáhnout na 75 s. Spotřeba separátoru klesla dokonce na 7,8 ml. Dá se v tomto případě hovořit o úspěchu.



Obrázek 64 - Fotografie odlitku ze třetího vzorkování

Kusy byly namátkově zkontrolovány na RTG a snímky jejich kritických míst jsou zobrazeny výše. Oddělení kontroly je označilo jako vyhovující. Z celkového hlediska proběhlo třetí vzorkování nejúspěšněji ze všech předešlých a je znát jistý progres. Je však stále potřeba dosáhnout optimalizací ve všech fázích procesu, ať už se jedná o přípravu výroby, nebo například samotný proces odlévání. Pro následnou sériovou výrobu je potřeba eliminovat jakékoliv nežádoucí výpadky výroby a odstávky způsobené nežádoucími aspekty. I přes relativně uspokojivé výsledky tohoto vzorkování jsou v kapitole níže zmíněna navržená opatření pro optimalizaci procesu.

4.7.1. NAVRŽENÁ OPATŘENÍ PO 3. VZORKOVÁNÍ

Z tohoto vzorkování nevyplývalo tolik závažných opatření, která by nějakým způsobem např. zbrzdila sériovou výrobu. Jednalo se spíše o závady menšího charakteru, přesto je potřeba k nim přistoupit zodpovědně, aby se dal proces považovat za co nejvíce zoptimalizovaný. Mezi nutné opatření k projednání patří:

- překontrolování dělení zámků v nichž vzniká nežádoucí průnik taveniny
- opravení mírně posunutého jádra na pohyblivé části formy v rohu odlitku
- opravení vyhazovače, který vykazuje známky mírné netěsnosti.

4.8. TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola je zaměřena především na úspory spojené s finančními náklady na celkový proces lití. Po rozběhnutí sériové výroby je prozatím v plánu výroba 150 000 ks odlitek. Během původního nastavení cyklu byla jeho délka stanovena na 115 s. Stejně hodnoty byly využity během prvního vzorkování a postupně docházelo k jejich optimalizaci. Pokud se ohlédneme za posledním vzorkováním, dokázal se čas jednoho licího cyklu snížit na hodnotu 75 s.

Tabulka 4 - Porovnání výrobní produktivity po optimalizace času licího procesu

Doba licího cyklu	75 s	115 s
Počet ks vyrobený za 1 hod	48	31
Počet ks vyrobený za 12 hod	576	376
Počet ks vyrobený za 24 hod (1 den)	1152	751
Počet ks vyrobený za 72 hod (3 dny)	3456	2254
Počet ks vyrobený za 120 hod (5 dní)	5760	3757
Počet ks vyrobený za 148 hod (7 dní)	7104	4633

Tabulka 4 výše porovnává produktivitu slévárny po optimalizaci času licího procesu během všech uběhnuvších vzorkování. I přesto, že původní požadavek 115 s by byl dostačující a s přehledem by bylo možné plnit požadavky zákazníka, se čas procesu zkrátil o 40 s. Hodnoty v tabulce jsou samozřejmě čistě matematické a není možné v oboru slévárenství odhadovat všechny proměnné (odstávka procesu, předání směny apod.), i přesto je zřejmé, že došlo k výraznému urychlení procesu. Za pracovní týden je teoreticky možné vyrobit o 2003 ks víc a při rychlejší naplnění objednávek zákazníka může být licí pracoviště využito pro jiné typy odlitek. Je důležité vzít v úvahu, že technologie mikropostřiku je sama o sobě časově výrazně méně náročnější na ošetření formy, než konvenční způsob. Už jenom tedy upřednostnění technologie mikropostřiku se dá považovat za další ušetření času.

Časová úspora mikropostřiku oproti konvenčnímu způsobu je neoddiskutovatelná, nejedná se však o jedinou jeho výhodu. Mikropostřik má prokazatelně nižší spotřebu separátoru. V případě tohoto experimentu byla u třetího vzorkování naměřena hodnota 7,8 ml dělicího prostředku na jeden odlitek a nejedná se o vodou ředitelný separátor. V případě konvenčních způsobů ošetření líce formy se standardně udává poměr separátoru ku vodě 1:150. Interními

výpočty bylo stanoveno, že pro tento odlitek by při konvenčním způsobu bylo třeba formu při každém cyklu zchladiť zhruba čtyřmi litry vody ($\pm 0,5$ l). Po dosažení této hodnoty do zmiňovaného poměru docházíme k hodnotě 27 ml dělicího prostředku na jeden licí proces.

Tabulka 5 - Porovnání spotřeby separátoru pro mikropostřik a pro konvenční způsob ošetření líce formy

Spotřeba separátoru ml/ks	7,8	27
Spotřeba v litrech po 5000 cyklech	39	135
Spotřeba v litrech po 10 000 cyklech	78	270
Spotřeba v litrech po 50 000 cyklech	390	1350
Spotřeba v litrech po 150 000 cyklech	1170	4050

Tabulka 5 pojednává o porovnání obou technologií využívaných pro ošetření líce formy. Je zřejmé, že mikropostřik spotřebuje výrazně méně mazadla. Po naplnění nasmlouvaného množství kusu může dojít k úspoře mazadla až ve výši 2880 litrů. Ceny dělicích prostředků pro jednotlivé technologie se neliší a v podstatě se jedná o podobné sumy. V tomto případě je však potřeba brát v úvahu, že na každý jeden licí proces je separátor ředěn zhruba čtyřmi litry vody. Jedná se tak při naplnění objednávky o vznik 600 000 litrů odpadní vody, jelikož většina vody po ošetření formy steče do odpadních systémů, jen zlomek se odpaří, a je potřeba se postarat o její ekologickou likvidaci. Ta je samozřejmě finančně a energeticky v takovémto množství náročná.

Přes veškeré výše zmíněné úspory je potřeba zmínit, že v jednom aspektu je mikropostřik výrazně finančně náročnější, než konvenční technologie. Řeč je o pořizovacích nákladech na formu. Jelikož forma není zvnějšku chráněna postřikem, je jedinou možností ji uchladiť zevnitř navrtanými kanálky. Jedná se o finančně velmi náročné obráběcí operace, které se na celkové ceně formy razantně promítanou. I přesto se vzhledem ke všem výše zmíněným úsporám investice do nové formy vyplatí, pokud se jedná o velkosériovou výrobu.

5. ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo proniknutí do problematiky vysokotlakého lití a technologie mikropostřiku. Práce se skládá ze dvou částí, teoretické a experimentální. Experimentální část proběhla ve firmě Ljunghäll s.r.o. a byla zaměřena na optimalizační procesy během vzorkování nového odlitku sloužícího pro e – mobilitu nákladních automobilů.

Před uvedením odlitku do výrobního procesu bylo potřeba provést konstrukční projekt formy s následnými simulacemi pro ověření funkčnosti celého návrhu. Simulace byly zaměřeny především na teplotní pole formy odlitku, dále plnění formy, porozitu, tuhnutí taveniny a odvzdušnění formy. Po ověření procesu ve vývojové fázi proběhla tři kola vzorkování, pro které bylo zásadní dosáhnout co nejdokonalejší optimalizace.

Během prvního vzorkování byly odhaleny nesnáze vyžadující nápravné opatření. Zásadním nedostatkem byla forma dodaná ve stavu nepříznivém pro sériovou výrobu. Tvarové vložky na pevné polovině formy nebyly dopasovány, dále bylo potřeba opracovat ostré hrany po celém obvodu v části odvzdušnění na pohyblivé polovině formy a posledním problémem byla absence vyhazovačů, což mělo za následek vznik systematické chyby při vyjímání odlitku z formy. Veškerá nápravná opatření byla vyřešena dodavatelem formy. Vzhledem k nalepování slitiny v místě jader byla v těchto místech provedena povrchová úprava v podobě plazmového nitridování.

Předložená nápravná opatření z prvního vzorkování byla provedena a ukázala se jako vhodně navrhnutá. U druhého vzorkování došlo k nejvýraznějším komplikacím v ostříhovací části celého procesu. Deformace střížníku výrazně omezila optimalizaci procesu jako celku a průběh byl tedy zaměřen čistě na licí část. Zásadní byla montáž zařízení na měření průtoku separátoru. Proces lití si vyžádal v některých momentech nucené odstávky z důvodu optimalizací, nicméně požadovaný počet nalitých kusů se podařilo splnit. U některých odlitků docházelo k mírné porozitě, proto byla do příštího vzorkování navrhnutá nápravná opatření v podobě spojení dvou ledvin u oválného otvoru odlitku a zvětšení naříznutí do všech ledvin z původní tloušťky 1,4 mm na 1,6 mm.

U třetího vzorkování bylo největší přítěží poškození systému Fondarex, které způsobilo výrazné prodlení při spouštění procesu. Co se týče následného procesu lití, nedocházelo k výrazným komplikacím. To se však nedá říct o stavu formy a licího pracoviště. I přes příznivé

výsledky kvality odlitků, bylo doporučeno do příštího procesu opravit vyhadzovače, které vykazují mírné známky netěsností. Další netěsnost způsobující nežádoucí průnik taveniny byla detekována v místě zámků.

Z pohledu cílů zadaných pro tuto práci lze potvrdit, že proces splnil požadavek kladného vlivu na životní prostředí absencí odpadních vod. Prozatím byla zákazníkem požadována výroba 150 000 odlitků během kterých dojde díky technologii mikropostřiku k úspoře až 600 000 litrů vody. S tím samozřejmě souvisí nepřítomnost její energeticky náročné likvidace a tím pádem i snížení emisí CO₂.

V případě snížení spotřeby separátoru se podařilo mezi prvním a třetím vzorkováním udělat veliký pokrok, kdy se hodnota pro výrobu jednoho odlitku snížila z 10,9 ml na 7,8 ml. V porovnání s konvenčním způsobem ošetření líce formy se však jedná o ještě výraznější úsporu separátoru. U toho by totiž pro jeden cyklus byla potřeba dávka 27 ml. Jelikož se cena těchto separátorů nikterak výrazně neliší, dá se říci, že díky zvolení technologie mikropostřiku bude během výroby požadovaného počtu odlitků ušetřeno 2880 ml separátoru. Z procentuálního hlediska se jedná o 71% úsporu.

Tabulka 6 - Porovnání spotřeby separátoru pro mikropostřik a způsob ošetření formy konvenčním způsobem

Spotřeba separátoru ml/ks	7,8	27
Spotřeba v litrech po 150 000 cyklech	1170	4050

Dalším cílem bylo dosáhnout vyšší produktivity. Z vývojové fáze byl vypočten čas jednoho cyklu na celkových 115 vteřin a s tímto parametrem se také vstupovalo do prvního vzorkování. Během všech vzorkování se podařilo licí čas snížit na celkovou hodnotu 75 s. I tento výsledek samozřejmě souvisí se snížením emisí. Tabulka 6 názorně vyjadřuje rozdíl, kterého lze dosáhnout zvýšením produktivity. Hodnoty v tabulce samozřejmě uvažují dvousměnný provoz bez zastavení výroby. Ušetřených 69 dnů může být využito pro výrobu jiných odlitků a pomoci tak naplňovat výrobní kapacity.

Tabulka 7 - Porovnání upraveného a původního času lití

Doba licího cyklu	75 s	115 s
Čas v hodinách potřebný pro výrobu 150 000 ks	3215	4792
Počet dnů potřebný pro výrobu 150 000 ks	130	199

Posledním cílem této diplomové práce bylo prodloužení životnosti formy absencí šokového namáhání separátorem. Během půlroční stáže se tento faktor nedá s jistotou vyhodnotit. Běžně jsou formy schopny vydržet zhruba 100 000 cyklů, u mikropostřiku se však počítá s minimálně jednou tak vysokou životností, tedy 200 000 cyklů.

Prostor pro další zlepšení a optimalizaci procesu je u této technologie samozřejmě ještě velký. Je potřeba se v tomto oboru neustále vzdělávat, včetně operátorů licích pracovišť, zaznamenávat data a následně je vyhodnocovat. Jenom tak je možné se během sériové výroby vyvarovat nežádoucím odstávkám. Firma Ljunghäll s.r.o. má ve své výrobě bezpochyby odlitky, u kterých se vzhledem k jejich geometrickým tvarům a nasmlouvaným počtem kusů do budoucích let nabízí technologii mikropostřiku zavést. Pokud by k takovému rozhodnutí došlo, doporučil bych pro výběr chlazení formy ověřit možnosti konformního chlazení.

BIBLIOGRAFIE

- [1] What's the Difference Between Hot Chamber and Cold Chamber Die Casting?. Chicago White Metal Casting, Inc [online]. 2016, May 27, 2016 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://cwmdiecast.com/2016/05/27/die-casting-101-hot-chamber-vs-cold-chamber/>
- [2] FAVI, Claudio, Marco MANDOLINI a Michele GERMANI. *Analytical Cost Estimation Model in High Pressure Die Casting* [online]. Università di Parma, 2017, **2017** [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/319887626>
- [3] Warm chamber die casting: Forming process where a piston presses the molten metal through a preheated die into a chamber with high pressure and where the pressure is maintained until the metal has solidified. MANUFACTURINGGUIDE [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/warm-chamber-die-casting>
- [4] ALLEN MILLER, R. Modeling the Mechanical Performance of Die Casting Dies [online]. The Ohio State University, 2004, February 27, 2004 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/822064>
- [5] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *TEORIE SLÉVÁNÍ*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [6] Manufacturing Automation Cells for Casting. ItalPresseGauss: A Norican Technology [online]. Itálie [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.italpressegauss.com/en-gb/die-casting-automation-cell>
- [7] SVOBODA, Rostislav. *TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z MG SLITIN - TRENDY VÝVOJE* [online]. BRNO, 2008 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6292. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Čech, CSC.
- [8] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOŘEJŠ. *Technologie slévání*. Fakulta strojní, Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-491-0.
- [9] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.

- [10] HYNEK, Martin, Miroslav GRACH a Jiří BENDA. TLAKOVÉ LITÍ HLINÍKU [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf
- [11] Konstrukce formy pro tlakové lití. *Ústav strojírenské technologie ČVUT* [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT cit. 2022-01-25]
- [12] MAJERNÍK, Ján. Vplyv konštrukcie vtokového systému na kvalitu odliatok. *Posterus* [online]. 2014, 7(Číslo 8) [cit. 2022-03-23]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <https://www.posterus.sk/?p=17208&output=pdf>
- [13] FONDAREX - VACUUM SYSTEMS FOR PRESSURE DIE-CASTING. *Foundry planet* [online]. 27.2.2011 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/d/fondarex-vacuum-systems-for-pressure-die-casting/>
- [14] . KRŇÁVEK, V.; STŘÍTECKÝ, F.: Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad. *Slévárství* č. 2-3, 2007, s. 81-86
- [15] KOPLÍK, Jiří. *SNÍŽENÍ NÁKLADŮ NA VÝROBU ODLITKU LITÉHO TLAKOVÝM LITÍM POMOCÍ APLIKACE VYSOKOTEPLNÍHO SEPARÁTORU* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149540. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [16] *Druckguss: Optimierte Qualität, robuste Werkzeuge und wirtschaftliche Prozesse* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.magma-soft.de/de/loesungen/druckguss/>
- [17] NOVÁ, Iva. *PŘENOS TEPLA VE SLÉVÁRENSKÝCH FORMÁCH*. Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-141-2.
- [18] VINARCIK, Edward J. *High integrity die casting processes*. New York: John Wiley, 2003, 223 s. ISBN 04-712-0131-6
- [19] ANDRESEN, Bill. *Die casting engineering: a hydraulic, thermal, and mechanical process*. New York: Marcel Dekker, 2005. ISBN 0-8247-5935-4.

- [20] MACHÁČKOVÁ, Adéla a Radim KOCICH. *Sdílení tepla a proudění* [online]. In: . VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 187 [cit. 2022-04-09]. ISBN 978-80-248-2576-2. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf
- [21] Manifold. *Lethiguel Europe* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://lethiguel.org/manifolds-pressure-monitor.html>
- [22] FIEBIGER, Patrik. *Analýza vlivu ošetření formy mikropostřikem ve vztahu ke kvalitě odlitku bloku motoru 1.0. MPI EVO* [online]. Liberec, 2019 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/153893/BP_Fiebiger.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [23] *Temperovací zařízení pro ohřev a chlazení forem IECI®: Řízená regulace teploty formy* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.sebestasro.cz/podsluzby/temperovaci-zarizeni-pro-ohrev-a-chlazení-form-thermobiehl-r>
- [24] Thermobiehl Apparatebau GmbH. Topná a chladicí zařízení. Gladbeck; 6 s.
- [25] ALUMINIUM-DRUCKGIESSEREI LOMO INVESTIERT IN ANLAGEN UND IN DIE ZUKUNFT: Betriebsbesichtigung bei LOMO zusammen mit den Druckguss-Temperierspezialisten von IECI. *Foundry planet* [online]. 1.6.2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/de/d/aluminium-die-casting-foundry-lomo-former-lomopress-srl-ita-invests-in-equipment-and-in-the-future/>
- [26] BAUMGARTNER, Dominik. *Fondarex, Makes Vacuum Technology Accessible for Foundries of all Sizes* [online]. 1.7.2021 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.publiteconline.it/ael/fondarex-makes-vacuum-technology-accessible-for-foundries-of-all-sizes/>
- [27] *VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO ZPRACOVÁNÍ TERMOPLASTŮ: Temperace vstřikovacích forem* [online]. [cit. 2022-07-03].
- [28] *Jet cooler* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://lethiguel.org/die-casting-jet-cooler.html>

[29] FRANZ, P. Termoregulace nástrojů pro tlakové lití a tenkých jader, cesta k provozním úsporám. Německo, 2014.

[30] Herausforderungen mit Innovation begegnen – am Beispiel eines dickwandigen Ventilgehäuses. G.A. Röders [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://www.gkvtecpart.com/images/tecpart/Veranstaltungen/Jahrestagung2017/Praesentationen/Herausforderungen-mit-Innovation-begegnen--am-Beispiel-eines-dickwandigen-Ventilgehuses-Kompatibilittsmodus.pdf>

[31] ENGELHORN, G. Automatizovaný postřik forem. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2008, roč. 56, č. 3-4, s. 147-148.

[32] BŘEZOVÁ, V., J. POVOLNÝ a P. PRIEBEROVÁ. *Leidefrostův jev* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2017-2018/Zima17/proc/leidenfrost.pdf>.

[33] DORBOLO, Stéphane, Benjamin SOBAC, Alexey REDNIKOV, Pierre COLINET a Florian MOREAU. *Droplet Wetting and Evaporation: Chapter 24 - Complex Fluids Droplets in Leidenfrost State* [online]. 2015, 369-379 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128007228000242>

[34] Products, services: Mold spraying machines esm, Robot spraying systems psr. *Wollin GmbH* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: https://www.wollin.de/files/downloads/wollin-broschure_englisch_5.2022_digital.pdf

[35] GÜNTER, E. WOLLIN GmbH. Školení postřiku, 2008, 35s.

[36] OPTIMIZATIONS IN MICRO-SPRAYING AND A NEW SERIES OF SPRAY NOZZLES: GERLIEVA shows new developments at the EUROGUSS 2020. *Foundry planet* [online]. 6.2.2020 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/d/optimizations-in-micro-spraying-and-a-new-series-of-spray-nozzles/>

[37] MICHNA, Štefan, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ A SPOL. *Encyklopedie hliníku*. Prešov, 2005. ISBN 80-89041-88-4.

[38] VONČINA, Maja, Nataša MOČNIK, Aleš NAGODE, Anton STOIČ a Milan BIZJAK. *Dependence of mechanical properties on Cu content in AlSi9Cu3(Fe) alloy* [online].

Květen 2017 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1330-3651. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317215071_Dependence_of_mechanical_properties_on_Cu_content_in_ALSi9Cu3Fe_alloy

[39] *Die casting alloys* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.stenaaluminium.com/aluminium-alloys-and-services/alloy-specifications/>

[40] BRYKSÍ, Vlastimil a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Vývoj a porovnání odlitků vyrobených tlakovým litím a technologií rheocasting z hlediska technologičnosti* [online]. Prosinec 2020 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/348629421_Vyvoj_a_porovnaní_odlitku_vyrobených_tlakovým_litím_a_technologií_rheocasting_z_hlediska_technologicnosti

[41] Konformní chlazení: Technologie výroby konformního chlazení. Innomia [online]. [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.innomia.cz/konformni-chlazení>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 - Popis vysokotlakého licího stroje [4]
- Obrázek 2 - Vysokotlaký licí stroj s teplou komorou [3]
- Obrázek 3 - Automatizované licí pracoviště [6]
- Obrázek 4 - Průběh licího procesu a schéma licího stroje se studenou komorou [2]
- Obrázek 5 - Popis vysokotlaké licí formy [11]
- Obrázek 6 - Hlavní části vtokového systému [12]
- Obrázek 7 - Statický ventil - vlnovec [10]
- Obrázek 8 - Dynamický vakuový ventil - Fondarex [13]
- Obrázek 9 - Kvantitativní vyhodnocení tepelné bilance formy [16]
- Obrázek 10 - Schéma temperačních kanálů [10]
- Obrázek 11 - Temperační zařízení na vodní bázi od firmy IECl [25]
- Obrázek 12 - Systém plochých přepážek [27]
- Obrázek 13 - Systém spirálových přepážek [27]
- Obrázek 14 - Systém fontánek [27]
- Obrázek 15 - Systém konformního chlazení [41]
- Obrázek 16 - Jet - cooler s otočnou hlavou [28]
- Obrázek 17 - Princip metody jet - cooling [21]
- Obrázek 18 - Fáze cyklů jet - coolingu [30]
- Obrázek 19 - Pracovní jednotka SpotCool [23]
- Obrázek 20 - Manifold [21]
- Obrázek 21 - Graf znázorňující odvod tepla z povrchu formy dělicím prostředkem [22]
- Obrázek 22 - a) dvouosý manipulátor, b) robot s postřikovou hlavou [34]
- Obrázek 23 - a) malý tlak vzduchu, b) vysoký tlak vzduchu [22]
- Obrázek 24 - a) velká vzdálenost od formy - zásah větší plochy, b) kratší vzdálenost od formy - zásah menšího množství plochy [22]
- Obrázek 25 - Nastavení úhlu trysek [22]
- Obrázek 26 - a) tryska s vnitřním směřováním, b) tryska vnějším směřováním [22]
- Obrázek 27 - Dělení trysek dle tvaru proudu [35]
- Obrázek 28 – 3D model surového odlitku zadaného pro experimentální část
- Obrázek 29 - optimalizace vtokové soustavy

- Obrázek 30 – 3D model chladícího kanálku pro vtokovou soustavu
- Obrázek 31 - 3D model chladících kanálků pro dutinu formy
- Obrázek 32 - 3D model chladícího kanálku pro vtokovou soustavu
- Obrázek 33 - Schéma zapojení Jet – coolingu
- Obrázek 34 - 3D model chladícího kanálku pro tabletu
- Obrázek 35 - 3D model chladících kanálků pro vtokovou soustavu a dutinu formy
- Obrázek 36 - 3D model chladícího kanálku pro zámek formy
- Obrázek 37 - Simulace teplotního pole formy - stav před spuštěním procesu
- Obrázek 38 - Simulace teplotního pole formy - stav po pátém cyklu
- Obrázek 39 - Simulace teplotního pole formy - stav po desátém cyklu
- Obrázek 40 - a) Licí pracoviště IDRA OL 1900 CS; b) studená licí komora
- Obrázek 41 - a) ostříhovací lis Tecnopres; b) manipulační robot ABB
- Obrázek 42 - a) postřiková hlava Wollin; b) 3D model návrhu postřikové hlavy
- Obrázek 43 - a) ověření těsnosti postřikové hlavy; b) DDV tryska
- Obrázek 44 - a) dávkovací stanice OSA1; b) maximátor
- Obrázek 45 - a) pevná polovina formy; b) pohyblivá polovina formy
- Obrázek 46 - a) ustavovací kámen před úpravou; b) ustavovací kámen po úpravě
- Obrázek 47 - tvarová vložka na pevné polovině formy
- Obrázek 48 - Tušírovací zkouška - a) pevná polovina formy; b) pohyblivá polovina formy
- Obrázek 49 - Systematická chyba při vytlačování odlitku z formy
- Obrázek 50 - nalepování výstupků s otvorem na pohyblivou část formy
- Obrázek 51 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu pomezí (1. vzorkování)
- Obrázek 52 - Znázornění navrhovaného rozmístění nových vyhazovačů
- Obrázek 53 – zařízení na měření spotřeby dělicího prostředku
- Obrázek 54 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu pomezí (2. vzorkování)
- Obrázek 55 - Slupka v místě tablety
- Obrázek 56 - Nastavené parametry pro 2. vzorkování
- Obrázek 57 - Surový odlitek z 2. vzorkování
- Obrázek 58 - Úprava dokumentace licího nástroje
- Obrázek 59 - Snímek z termokamery pohyblivé poloviny formy před ošetřením separátorem (3. vzorkování)
- Obrázek 60 - Snímek z termokamery pohyblivé poloviny formy po ošetření separátorem

Obrázek 61 - Snímek z termokamery pevné poloviny formy před ošetřením separátorem (3. vzorkování)

Obrázek 62 - Snímek z termokamery pevné poloviny formy po ošetření separátorem (3. vzorkování)

Obrázek 63 - Rentgenové snímky kritických míst výskytu porezity (3. vzorkování)

Obrázek 64 - Fotografie odlitku ze třetího vzorkování

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [39]

Tabulka 2 - Vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 [39]

Tabulka 3 - počáteční a okrajové podmínky

Tabulka 4 - Porovnání výrobní produktivity po optimalizace času licího procesu

Tabulka 5 - Porovnání spotřeby separátoru pro mikropostřik a pro konvenční způsob ošetření líce formy

Tabulka 6 - Porovnání spotřeby separátoru pro mikropostřik a způsob ošetření formy konvenčním způsobem

Tabulka 7 - Porovnání upraveného a původního času lití