

Vliv technologických parametrů na jakost odlitků připravených vysokotlakým litím

Bc. René Kafka

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. René Kafka
Osobní číslo:	T22665
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vliv technologických parametrů na jakost odlitků připravených vysokotlakým litím

Zásady pro vypracování

- Teoretická studie na dané téma
- Návrh experimentu zahrnující použití mikro postřiků na formy určené pro vysokotlaké odlévání
- Kvalitativní hodnocení jakosti odlitku po aplikaci mikro postřiků
- Porovnání výsledků s běžnou technologií užívající postřikových hlav
- Hodnocení environmentálních a technicko-ekonomických aspektů
- Diskuse výsledků a návrh doporučení

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BLONDHEIM, David, Jr. a Alex MONROE, 2021. Macro Porosity Formation: A Study in High Pressure Die Casting [online]. 17. duben 2021. B.m.: Springer Science and Business Media LLC. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-021-00602-x
- NIU, Zhichao, Guangyu LIU, Tian LI a Shouxun JI, 2022. Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings [online]. květen 2022. B.m.: Elsevier BV. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2022.117525
- MALLICK, P. K. Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2010, 1 online zdroj (XII, 369 pages). Woodhead Publishing in materials. ISBN 9781613443644. Dostupné také z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMDMLV002/materials_design_and_manufacturing_for_ligh
- NATH, Jagan. Aluminum Castings Engineering Guide. ASM International, 2018, Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kPACEG000M/aluminum-castings-engineering/aluminum-castings-engineering>
- BEDNÁŘ, Bohumír. Technologičnost konstrukce odlitků. Ústí nad Labem: UJEP, ÚTŘV, 2004, 101 s. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 8070446145.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o vlivu technologických parametrů na jakost odlitků vyhotovených pomocí technologie vysokotlakého lití s použitím technologie mikro postřiku. Teoretická část se zabývá popisem technologie vysokotlakého lití a technologiemi s tím spjatými, ale i procesy vyhodnocování kvality a vlivy na jakost odlitku. Praktická část se zaměřuje na dílčí nastavení procesů vysokotlakého odlévání, volbou vhodných parametrů a experimentaci s metodami postřikových technologií. V závěru je ověřena jakost odlitku a výsledky celého procesu lití.

Klíčová slova: vysokotlaké lití, mikro postřiková technologie, parametry procesu, slitina hliníku, jakost a kvalita

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of technological parameters on the quality of castings made by high-pressure casting technology using micro-spray technology. The theoretical part deals with the description of high-pressure casting technology and related technologies, as well as quality evaluation processes and effects on casting quality. The practical part focuses on the partial setup of high-pressure casting processes, selection of appropriate parameters and experimentation with spraying technologies. Finally, the quality of the casting and the results of the whole casting process are verified.

Keywords: high pressure die casting, micro-spray technology, process parameters, aluminium alloy, quality and grade

Poděkování

Touto stranou bych rád poděkoval panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za konzultace a odborné příspěvky při zpracování této diplomové práce. Velké poděkování taktéž patří společnosti MESIT & RÖDERS v.o.s., zejména výrobnímu a technologickému oddělení za poskytnutí spolupráce a cenné konzultace. Zvláštní poděkování patří panu Josefu Suchánkovi vedoucímu slévárny, panu Lukáši Šubardovi a řediteli společnosti panu Ing. Pavlovi Gašparovi za podporu v oblasti slévárenské technologie.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PŘEHLED PROCESŮ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ.....	13
1.1 ÚVOD DO VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	13
1.2 TYPY PROCESŮ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	14
1.2.1 Tlakové lití	14
1.2.2 Squeeze Casting	16
1.2.3 Thixocasting	17
1.2.4 Vysokotlaké lití (HPDC).....	19
2 VÝHODY A OMEZENÍ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ.....	21
2.1 VÝHODY VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	21
2.2 OMEZENÍ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	22
3 NEJNOVĚJŠÍ VÝVOJ A INOVACE.....	23
4 PRINCIPY VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	26
4.1 NÁVRH A PŘÍPRAVA FORMY	26
4.2 VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVÁNÍ	27
4.3 PLNĚNÍ FORMY A TUHNUTÍ	30
4.4 VYHAZOVÁNÍ A CHLAZENÍ DÍLU	31
4.4.1 Vyhozovací mechanismus	31
4.4.2 Proces chlazení	32
4.4.3 Ořezávání a konečná úprava	32
4.4.4 Inspekce a kontrola kvality	32
5 POPIS TECHNOLOGIE MIKRO POSTŘIKU A JEJÍ APLIKACE PŘI ODLÉVÁNÍ	33
5.1 MAZIVA VYUŽÍVANÁ PŘI APLIKACI TECHNOLOGIE MIKRO POSTŘIKU.....	35
5.2 DISKUSE O TECHNOLOGII MIKRO POSTŘIKU A JEJÍCH VÝHODÁCH	36
5.2.1 Parametry procesu	37
5.2.2 Parametry materiálu	37
5.2.3 Konstrukce nástrojů a forem	37
5.2.4 Monitorování a kontrola procesu	38
5.2.5 Shrnutí o technologii mikro postřiku	38
6 TEORETICKÉ MODELY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU ODLITKŮ.....	39
6.1 TEORIE TUHNUTÍ	39
6.1.1 Nukleace.....	43
6.1.2 Růst pevné fáze	43
6.1.3 Přední strana tuhnutí	43
6.1.4 Mikrostrukturní evoluce.....	43
7 MODELOVÁNÍ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ TEKUTIN	44

7.1	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD).....	44
7.2	ANALÝZA KONEČNÝCH PRVKŮ (FEA).....	44
7.3	MODELOVÁNÍ FÁZOVÝCH ZMĚN.....	45
7.4	OPTIMALIZACE NÁVRHU FORMY.....	45
8	NÁVRHY EXPERIMENTŮ A ANALÝZY.....	46
8.1	FAKTOROVÉ NÁVRHY.....	46
8.2	METODIKA POVRCHU ODEZVY.....	46
8.3	SEKVENČNÍ EXPERIMENTOVÁNÍ.....	47
8.4	STATISTICKÁ KONTROLA PROCESU (SPC).....	48
8.4.1	Kontrolní diagramy.....	48
8.4.2	Analýza způsobilosti procesu.....	49
8.4.3	Metodika Six Sigma.....	49
8.4.4	Analýza hlavní příčiny.....	50
8.4.5	Sledování a kontrola v reálném čase.....	50
8.4.6	Neustálé zlepšování.....	50
8.5	NASAZENÍ FUNKCE KVALITY (QFD).....	51
8.5.1	Identifikace požadavků zákazníka.....	51
8.5.2	Identifikace funkcí kvality.....	52
8.5.3	Propojení funkcí kvality s technologickými parametry.....	52
8.5.4	Prioritizace a hodnocení technologických parametrů.....	52
8.5.5	Optimalizace technologických parametrů.....	52
8.5.6	Sledování a zlepšování výsledků.....	52
9	SHRUTÍ DOSAVADNÍHO VÝZKUMU.....	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	55
10	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	56
11	ODLÉVANÝ PRODUKT.....	57
12	PŘÍPRAVA MATERIÁLU A TAVENÍ.....	58
12.1	TRIMAL 37.....	58
12.1.1	Chemické složení.....	59
12.1.2	Mechanické vlastnosti.....	59
12.1.3	Proces tavení slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn).....	60
12.1.4	Proces odplynění Trimal 37 (AlSi9Mn).....	61
12.1.5	Kontrola slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn).....	62
13	UPNUTÍ FORMY A SEŘÍZENÍ LICÍHO CENTRA.....	64
13.1	PŘÍPRAVA A SEŘÍZENÍ LICÍHO CENTRA.....	65
13.2	UPNUTÍ LICÍ FORMY.....	67
13.2.1	Mechanické nastavení zdvihu vyhazovačů.....	69
13.2.2	Zapojení temperačních a chladících okruhů.....	70
13.3	MONTÁŽ VSTŘIKOVACÍHO PÍSTU.....	75
13.3.1	Nastavení systému mazání vstřikovacího pístu.....	76

14	NASTAVENÍ LICÍCH A PROVOZNÍCH PARAMETRŮ	77
14.1	NASTAVENÍ LICÍ JEDNOTKY	77
14.2	NASTAVENÍ FÁZE PLNĚNÍ	80
14.3	NASTAVENÍ POHYBŮ FORMY	86
14.4	NASTAVENÍ LICÍHO PÍSTU	90
15	VYUŽITÍ VAKUOVÉHO SYSTÉMU	93
16	APLIKACE, NASTAVENÍ TECHNOLOGIE MIKRO POSTŘIKU A POROVNÁNÍ S KONVENČNÍ METODOU POSTŘIKU	94
16.1	KONVENČNÍ METODA POSTŘIKU	97
16.2	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY APLIKACÍ MIKRO POSTŘIKOVÉ TECHNOLOGIE	98
17	ZHODNOCENÍ KVALITY A JAKOSTI ODLITKU	99
17.1	RENTGENOVÁ ZKOUŠKA	99
17.2	ROZMĚROVÁ MĚŘENÍ A ZKOUŠKA ROVINNOSTI	100
17.3	VZNIKLÉ KOMPLIKACE V TESTOVACÍ FÁZI PROCESU LITÍ	102
18	NÁVRH OPATŘENÍ K ELIMINACI CHYB VZNIKLÝCH PŘI VÝZKUMU MIKRO POSTŘIKOVÉ TECHNOLOGIE	103
19	ZHODNOCENÍ ENVIROMENTÁLNÍCH A TECHNICKO – EKONOMICKÝCH ASPEKTŮ	104
20	DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	106
	ZÁVĚR	108
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	109
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	114
	SEZNAM OBRÁZKŮ	115
	SEZNAM TABULEK	118

ÚVOD

Technologie vysokotlakého lití je oborem, ve kterém se aktivně vzdělávám a experimentuji více než pět let, proto tato oblast byla jasným favoritem při výběru tématu diplomové práce.

Vysokotlaké lití je výrobní proces používaný při výrobě kovových součástí, zejména pro složité tvary nebo vysoce kvalitní díly. Zahrnuje vstříknutí roztaveného kovu do dutiny formy pod vysokým tlakem, kde ztuhne a vytvoří požadovaný tvar. Vysokotlaké lití nabízí několik výhod oproti tradičním metodám lití, včetně zlepšené rozměrové přesnosti, povrchové úpravy a mechanických vlastností konečného produktu.

V této diplomové práci se také zaměřím na technologii mikro postřiku, což je specializovaná metoda používaná v procesech vysokotlakého lití ke zvýšení kvality a vlastností odlévaných součástí. Tato technologie vyvinutá společností Wollin GmbH spolu s výrobcí maziv Chem-Trend zahrnuje řízenou aplikaci jemné mlhy, spreje maziva nebo separačního prostředku na povrch dutiny formy během procesu odlévání.

Jednou z klíčových výhod technologie mikro postřiku je její schopnost zlepšit celkovou účinnost a produktivitu procesů vysokotlakého lití. Snížením potřeby ručního nanášení separačních činidel a zlepšením plnění formy a uvolňování dílů může tato technologie pomoci výrobcům dosáhnout vyšší výkonnosti, nižších výrobních nákladů a lepší kvality odlitků.

Celkově vzato, vysokotlaké lití v kombinaci s technologií mikro postřiku nabízí spolehlivé a cenově výhodné řešení pro výrobu vysoce kvalitních kovových součástí se složitou geometrií a úzkými tolerancemi. Vzhledem k tomu, že zpracovatelský průmysl stále vyžaduje vyšší efektivitu a přesnost, hrají tyto inovativní technologie klíčovou roli při plnění těchto požadavků a vedou k pokroku v procesech odlévání kovů.

V souvislosti s vysokotlakým litím, zejména se začleněním technologie mikro postřiku, je zapotřebí komplexně pochopit a optimalizovat souhru mezi různými technologickými parametry a jejich dopadem na kvalitativní vlastnosti odlitků. Zatímco vysokotlaké odlévání nabízí významné výhody z hlediska kvality a produktivity odlitku, účinnost technologie mikro postřiku při zvyšování těchto kvalit vyžaduje další zkoumání a optimalizaci.

Tato práce si klade za cíl odstranit tuto mezeru systematickou analýzou vlivu klíčových technologických parametrů, jako je např. vstřikovací tlak, teplota formy, frekvence mikro postřiku a složení maziva na metriky kvality odlitků včetně rozměrové přesnosti, povrchové úpravy, mechanických vlastností a tvorby defektů. V práci budu hledat komplexní vztahy mezi těmito parametry a jejich vlivy na kvalitu odlitků. Budu se snažit poskytnout cenné poznatky pro optimalizaci procesů vysokotlakého lití s využitím technologie mikro postřiku, a tím umožnit výrobu vysoce kvalitních litých součástí se zlepšenou účinností a spolehlivostí.

Celkově je studium vlivu technologických parametrů na kvalitu odlitků zásadní pro zlepšování procesů odlévání, zvyšování kvality produktů a řešení problémů, kterým čelí slévárenský průmysl. Poznatky z takového výzkumu by mohly přispět k rozvoji účinnějších, udržitelnějších a konkurenceschopnějších výrobních postupů, z nichž mají prospěch jak průmyslová odvětví, tak společnost jako celek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED PROCESŮ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ

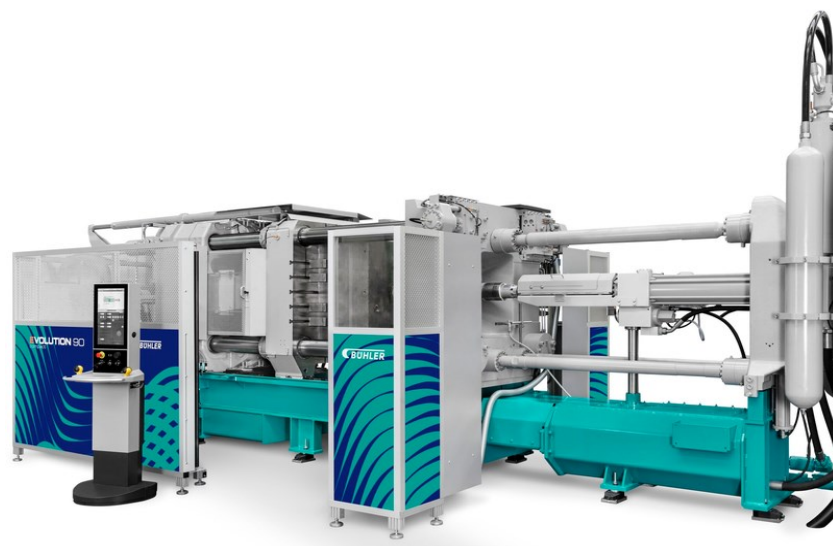
Vysokotlaké lití je široce používaná výrobní technika při výrobě složitých kovových dílů, zejména v průmyslových odvětvích, jako je automobilový průmysl, letecký průmysl a elektronika. Tato část poskytuje hloubkový průzkum různých procesů vysokotlakého lití, jejich principů, výhod a aplikací. [1]

1.1 Úvod do vysokotlakého lití

Vysokotlaké lití, také běžně označované jako tlakové lití, je technika tváření kovů charakterizovaná aplikací vysokého tlaku, aby se roztavený kov vtlačil do dutiny formy. Tato metoda umožňuje rychlou a efektivní výrobu dílů s vysokou přesností a složitými tvary. Historicky se vysokotlaké lití vyvinulo během 20. století jako reakce na potřebu vyrábět díly s různými tvary a nízkými náklady na sekundární zpracování.

Základní princip vysokotlakého lití se točí kolem působení vysokého tlaku na roztavený kov, což usnadňuje jeho vstřikování do dutiny formy. Tento proces umožňuje rychlé a efektivní vytváření složitých geometrií a detailních povrchů. Mezi klíčové komponenty vysokotlakého lití patří formy (nástroje) a odlévací materiál, přičemž oba musí odolávat tlakovým a teplotním extrémům. Formy jsou obvykle vyráběny z vysoce odolných materiálů, jako jsou nástrojové oceli, zatímco pro odlévání se používají různé kovy a jejich slitiny. (Obrázek 1)

Tímto způsobem umožňuje vysokotlaké lití výrobu široké škály dílů s vysokou přesností a kvalitou, což je klíčové pro mnoho průmyslových aplikací. [1,2]



Obrázek 1: Tlakový licí stroj Bühler [8]

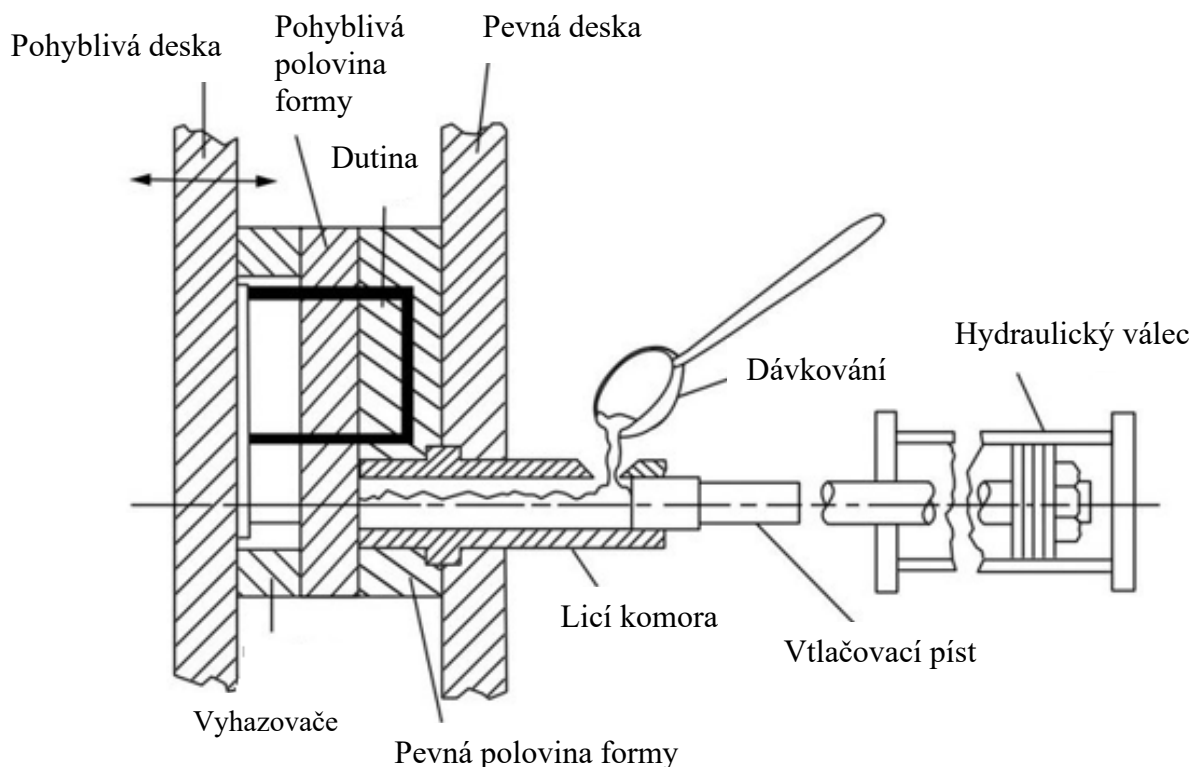
1.2 Typy procesů vysokotlakého lití

Vysokotlaké lití zahrnuje několik metod používaných pro výrobu kovových dílů s přesností a účinností. Níže jsou uvedeny některé z klíčových typů procesů vysokotlakého lití. [1]

1.2.1 Tlakové lití

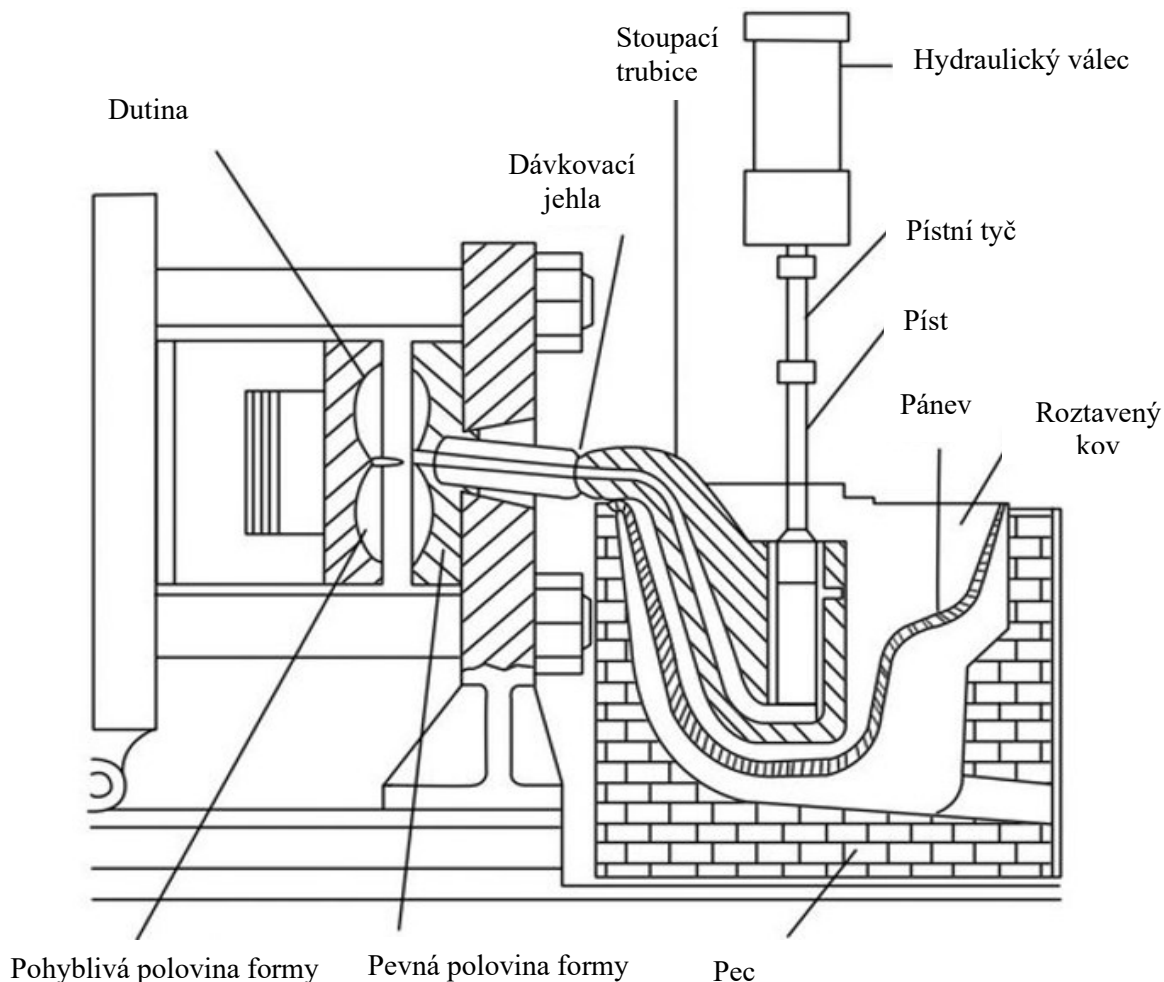
Tlakové lití je prominentní metoda vysokotlakého lití široce používaná v různých průmyslových odvětvích pro výrobu složitých kovových součástí s vysokou přesností a účinností. Tato část se ponoří do spletitosti tlakového lití a nastíní jeho principy, varianty procesu, výhody a aplikace.

Lití ve studené komoře: Při této metodě se roztavený kov nabere do komory a poté hydraulicky ovládaný píst vstříkne kov do dutiny formy. Pro slitiny s vysokými teplotami tání a slitiny náchylné k erozi se upřednostňuje tlakové lití ve studené komoře. (Obrázek 2) [1,9,10]



Obrázek 2: Schéma lití ve studené komoře [1,9]

Tlakové lití v horké komoře: Zde je kov uchovávan v peci připojené přímo k tlakovému licímu stroji, což eliminuje potřebu samostatného procesu nabírání. Tato metoda je vhodná pro kovy s nízkou teplotou tání, jako jsou slitiny zinku a hořčíku. (Obrázek 3) [1,9,10]



Obrázek 3: Schéma lití v horké komoře [9]

Výhody tlakového lití:

- Tlakové lití umožňuje rychlou výrobu dílů ve velkém množství.
- Přesnost a hladké povrchy dutin formy poskytují díly s vynikající kvalitou povrchu.
- Tlakové lití umožňuje vytvářet díly s přesnou rozměrovou přesností.
- Všestrannost tlakového lití usnadňuje výrobu složitých konstrukcí součástí s tenkými stěnami a jemnými detaily. [9]

Aplikace:

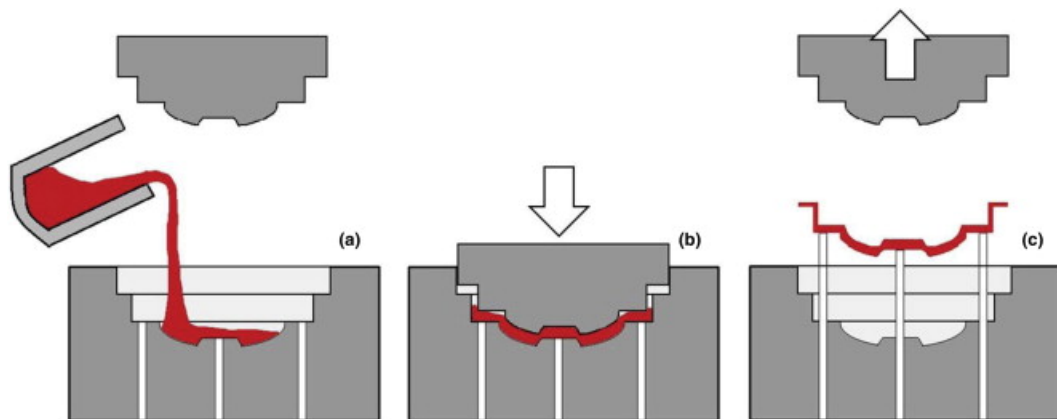
- Automobilový průmysl: Tlakové lití se široce používá pro výrobu součástí motorů, skříní převodovek, dílů podvozku a dekorativních ozdobných prvků.
- Elektronika: Tlakové lití se používá při výrobě elektronických skříní, chladičů a konektorů díky své vysoké přesnosti a rozměrové stabilitě.
- Spotřební zboží: Různé spotřební výrobky, jako jsou domácí spotřebiče, elektrické nářadí a dekorativní předměty, využívají tlakově lité komponenty pro svou odolnost a estetický vzhled. [9]

1.2.2 Squeeze Casting

Squeeze casting je specializovaný proces vysokotlakého lití, který kombinuje prvky techniky lití a kování za účelem výroby vysoce celistvých kovových součástí se sníženou porézností a zlepšenými mechanickými vlastnostmi.

Squeeze casting, také známé jako tekuté kování nebo tekuté kovové kování, zahrnuje současné lití a kování kovové slitiny. Proces začíná litím roztaveného kovu do otevřené dutiny formy. Poté je na roztavený kov v dutině formy aplikován vysoký tlak, typicky prostřednictvím použití hydraulických nebo mechanických sil. Tento tlak napomáhá ke stlačení materiálu, snížení poréznosti a zlepšení celkových mechanických vlastností finálního dílu. (Obrázek 4)

Základní princip squeeze castingu spočívá v aplikaci tlaku k současnému tvarování a tunutí roztaveného kovu. Vystavením materiálu vysokému tlaku během tunutí dosáhne squeeze casting jemnější struktury zrna a minimalizuje tvorbu defektů, jako je pórovitost a smrštění. [11]



Obrázek 4: Schéma squeeze castingu [12]

Izotermické lití squeeze: V této variantě jsou forma a kov během procesu udržovány při zvýšených teplotách, aby se usnadnil tok materiálu a minimalizovalo se tepelné namáhání.

Semi-solid squeeze casting: Tato metoda zahrnuje použití kovových slitin v polotuhém stavu, což zlepšuje tokové vlastnosti a snižuje riziko defektů.

Výhody Squeeze casting:

- Squeeze casting produkuje díly se zlepšenou pevností, tažností a odolností proti únavě ve srovnání s konvenčními metodami lití.
- Použití tlaku během tuhnutí minimalizuje pórovitost a zajišťuje hustší, homogennější části.
- Squeeze casting umožňuje výrobu součástí s téměř čistým tvarem s minimálním potřebným obráběním, čímž se snižuje plýtvání materiálem a výrobní náklady.
- Squeeze casting lze aplikovat na širokou škálu kovových slitin, včetně slitin hliníku, hořčíku a mědi, takže je vhodný pro různé průmyslové aplikace. [11]

Aplikace:

- Letecký průmysl: Squeeze casting se používá k výrobě kritických součástí pro letadla a kosmické lodě, včetně částí motorů, konstrukčních součástí a podvozků.
- Automobilový průmysl: Squeeze casting vyrábí součásti pro automobilové aplikace, jako jsou díly zavěšení kol, součásti motorů a skříně převodovek.
- Obranný průmysl: Squeeze casting se používá při výrobě vojenské techniky, včetně střelných zbraní, součástí dělostřelectva a dílů obrněných vozidel. [11]

1.2.3 Thixocasting

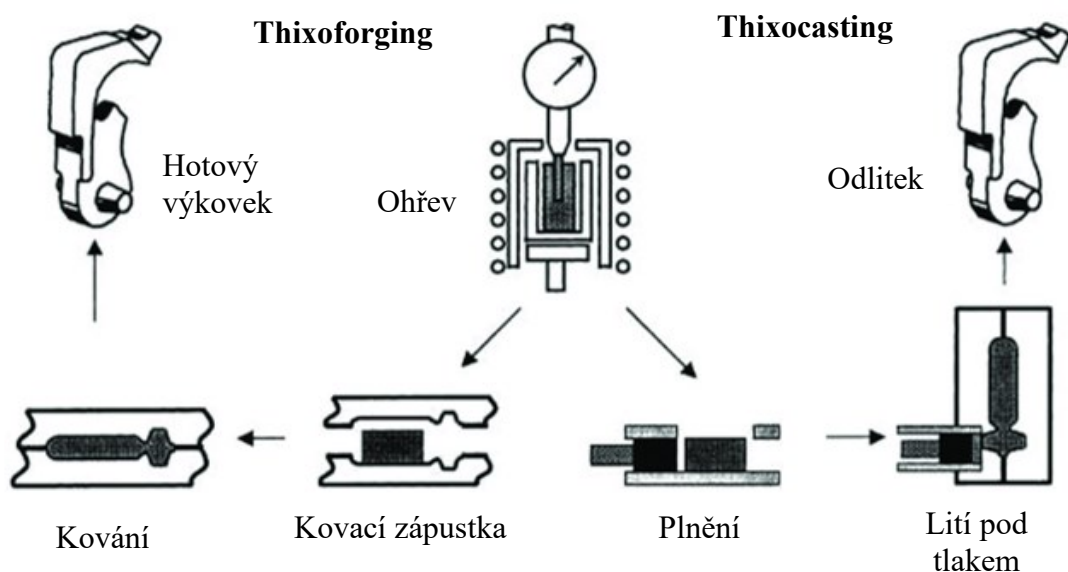
Thixocasting je pokročilý proces vysokotlakého lití, který kombinuje aspekty odlévání a tváření za účelem výroby kovových součástí s téměř čistým tvarem se zlepšenými mechanickými vlastnostmi a sníženým počtem zpracovatelských kroků.

Thixocasting, také známý jako polotuhé zpracování kovů, zahrnuje manipulaci s kovovými slitinami v polotuhém stavu, typicky mezi teplotami solidu a likvidu. Proces začíná přípravou sochoru nebo suspenze polotuhého kovu, často dosaženého částečným roztavením nebo mechanickým promícháním slitiny. Polotuhý kov je pak pod vysokým tlakem vstřikován do dutiny formy, kde ztuhne a vytvoří požadovaný tvar součásti. (Obrázek 5)

Thixocasting nabízí několik výhod oproti tradičním metodám odlévání, včetně zlepšených mechanických vlastností, snížené poréznosti a schopnosti vytvářet složité geometrie s minimálním následným zpracováním. [13,14]

Thixoforging: V této variantě je polotuhý kov tvarován pomocí tvářecích technik, jako je kování, vytlačování nebo válcování, spíše než odlévání, aby se vyrobily hotové součásti s přesnými rozměry a vlastnostmi.

Thixomolding: Tato metoda kombinuje thixocasting s technikami vstřikovacího lití k výrobě složité tvarovaných součástí s vysokou rozměrovou přesností a povrchovou úpravou.



Obrázek 5: Schéma Thixocastingu [14]

Výhody Thixocasting:

- Thixocasting produkuje díly se zvýšenou pevností, tažností a odolností proti únavě ve srovnání s konvenčními metodami odlévání.
- Tixotropní chování polotuhých kovů minimalizuje tvorbu defektů, jako je smršťování a plynová pórovitost, což má za následek hustší a homogennější díly.
- Thixocasting umožňuje výrobu složitých návrhů součástí s tenkými stěnami, jemnými detaily a minimálními nároky na následné zpracování.
- Thixocasting obvykle vyžaduje méně materiálu ve srovnání s tradičními metodami odlévání, což vede ke snížení plýtvání materiálem a nižším výrobním nákladům. [13,14]

Aplikace:

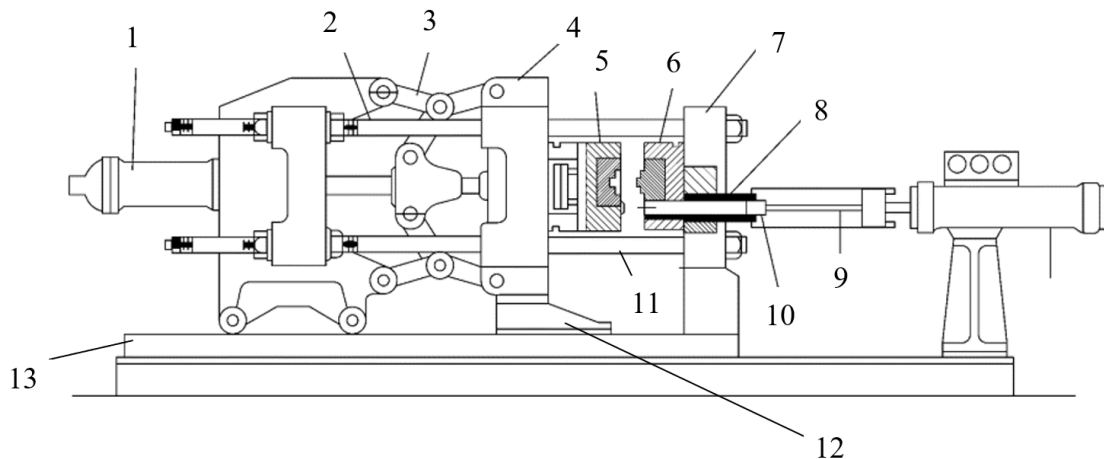
- Automobilový průmysl: Thixocasting se používá k výrobě široké škály automobilových součástí, včetně dílů motorů, skříní převodovek, součástí zavěšení a konstrukčních dílů.
- Letecký průmysl: Thixocasting vyrábí kritické součásti pro aplikace letadel a kosmických lodí, včetně součástí podvozků, konstrukčních prvků a součástí motorů.
- Spotřební elektronika: Thixocasting se používá při výrobě elektronických skříní, chladičů a dalších vysoce přesných součástek pro zařízení spotřební elektroniky. [13]

1.2.4 Vysokotlaké lití (HPDC)

Vysokotlaké lití pod tlakem je vysoce účinný a všestranný proces odlévání používaný pro hromadnou výrobu složitých kovových dílů s úzkými tolerancemi a vynikajícími povrchovými úpravami.

HPDC je proces odlévání kovu, který zahrnuje vstřikování roztaveného kovu do dutiny ocelové formy při vysokém tlaku. Dutina formy, také známá jako matrice, je typicky vyrobena ze dvou polovin: pevné poloviny (krycí matrice) a pohyblivé poloviny (vyhazovací matrice). Roztavený kov je pod vysokým tlakem vtlačován do dutiny formy, kde rychle tuhne a vytváří požadovaný tvar součásti. HPDC se široce používá pro výrobu různých dílů, od malých, složitých součástí až po větší konstrukční díly. (Obrázek 6)

Základní princip HPDC spočívá v aplikaci vysokého tlaku k vtlačení roztaveného kovu do dutiny formy s přesností a rychlostí. Vysoký tlak zajišťuje rychlé vyplnění dutiny formy, výsledkem čehož jsou díly s jemnými povrchovými detaily a rozměrovou přesností. HPDC umožňuje výrobu dílů s tenkými stěnami, složitou geometrií a minimálními požadavky na následné zpracování. [1,2]



Obrázek 6: Schéma vysokotlakého licího stroje [15]

1 - hlavní uzavírací válec stroje, 2 - tažný sloup výsuvný, 3 - kloubový mechanismus stroje, 4 – upínací deska pohyblivá, 5 – pohyblivá část formy, 6 – pevná část formy, 7 – upínací deska pevná, 8 – licí komora, 9 – píst, 10 – táhlo pístu, 11 – tažné sloupy pevné, 12 – kluzné komponenty, 13 – kluzné pásy

Výhody vysokotlakého lítí:

- HPDC umožňuje rychlou výrobu dílů ve velkém množství, takže je vhodný pro aplikace hromadné výroby.
- Přesná konstrukce formy a vysokotlaké vstřikování vedou k dílům s hladkým povrchem a minimálními defekty.
- HPDC umožňuje výrobu dílů s úzkými rozměrovými tolerancemi, což zajišťuje konzistentní kvalitu a lícování.
- HPDC nabízí úsporu nákladů ve srovnání s jinými výrobními procesy díky menšímu plýtvání materiálem a kratším výrobním cyklům. [1,2]

Aplikace:

- Automobilový průmysl: HPDC se široce používá pro výrobu automobilových součástí, jako jsou bloky motorů, hlavy válců, skříně převodovek a konstrukční díly.
- Elektronický průmysl: HPDC vyrábí elektronická pouzdra, chladiče, konektory a další komponenty pro spotřební elektroniku, telekomunikace a výpočetní zařízení.
- Letecký průmysl: HPDC vyrábí součásti letadel, jako jsou díly motorů, konstrukční prvky a další součásti letadel, díky vysokému poměru pevnosti k hmotnosti a přesnosti. [1,2]

2 VÝHODY A OMEZENÍ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ

Tato kapitola pojednává o výhodách technik vysokotlakého lití, včetně vysoké rychlosti výroby, rozměrové přesnosti, vynikající povrchové kvality a schopnosti vyrábět složité tvary. Řeší omezení a problémy spojené s vysokotlakým litím, jako jsou vysoké náklady na nástroje, omezený výběr materiálů a potenciální vady, jako je pórovitost a smrštění. [1,2]

2.1 Výhody vysokotlakého lití

Vysoká efektivita výroby: Procesy vysokotlakého lití mají obvykle kratší doby cyklu ve srovnání s jinými metodami odlévání, což umožňuje rychlou výrobu součástí ve velkém množství.

Vynikající povrchová úprava: Použití vysokého tlaku během odlévání vede k dílům s vynikající kvalitou povrchu, minimální porézností a sníženými povrchovými defekty, což snižuje potřebu dalších dokončovacích operací.

Rozměrová přesnost: Techniky vysokotlakého lití nabízejí přesnou kontrolu nad rozměry součástí, což umožňuje výrobu součástí s úzkými tolerancemi a konzistentními geometriemi.

Schopnost komplexní geometrie: Vysokotlaké lití může vyrábět díly se složitým designem, tenkými stěnami a složitými geometriemi, takže je vhodné pro výrobu součástí s různými tvary a konfiguracemi.

Flexibilita materiálů: Procesy vysokotlakého lití lze použít pro širokou škálu kovů a slitin, včetně slitin hliníku, zinku, hořčíku a mědi, což nabízí všestrannost při výběru materiálů pro různé aplikace.

Snížení plýtvání materiálem: Přesná kontrola plnění formy a tuhnutí při vysokotlakém lití minimalizuje plýtvání materiálem, což vede k úsporám nákladů a přínosům pro životní prostředí. [1,2]

2.2 Omezení vysokotlakého lití

Vysoké počáteční náklady na nástroje: Návrh a výroba forem (zápustek) pro procesy vysokotlakého lití může být nákladná, zejména u složitých dílů nebo nízkoobjemových výrobních sérií, což může ovlivnit proveditelnost určitých projektů.

Omezený výběr materiálů: Zatímco vysokotlaké lití může pojmout různé kovy a slitiny, některé materiály mohou vykazovat omezení, pokud jde o tekutost, chování při tuhnutí nebo kompatibilitu s formami, což omezuje jejich vhodnost pro určité aplikace.

Potenciál pórovitosti a defektů: Navzdory snaze minimalizovat pórovitost a defekty mohou procesy vysokotlakého lití stále narážet na problémy, jako je zachycení vzduchu, smršťovací pórovitost nebo povrchové defekty, zejména u složitých nebo tenkostěnných dílů.

Složitost procesu: Operace vysokotlakého lití vyžadují pečlivou kontrolu parametrů procesu, jako je teplota, tlak a rychlost vstřikování, stejně jako údržbu zařízení a nástrojů, což vyžaduje kvalifikovanou obsluhu a specializovaná zařízení.

Omezení velikosti a hmotnosti: Zatímco vysokotlakým litím lze vyrábět malé až středně velké součásti s vysokou přesností, proces může být méně vhodný pro velké nebo těžké díly, které mohou vyžadovat alternativní metody odlévání.

Environmentální hlediska: Procesy vysokotlakého lití mohou zahrnovat použití energeticky náročných zařízení a spotřebních materiálů, stejně jako vytváření odpadních materiálů, jako jsou separační činidla nebo chladicí kapaliny, což vyžaduje pozornost věnovanou dopadu na životní prostředí a opatřením udržitelnosti. [1,2]

3 NEJNOVĚJŠÍ VÝVOJ A INOVACE

Nedávný vývoj a inovace v oblasti vysokotlakého lití se zaměřily na zvýšení efektivity procesu, zlepšení kvality dílů a rozšíření škály materiálů a aplikací.

Pokročilá simulace a modelování, jako použití výpočetní dynamiky tekutin (CFD) a analýzy konečných prvků (FEA) umožnilo přesnější predikci a optimalizaci procesů vysokotlakého lití. To pomáhá při minimalizaci defektů, optimalizaci vtokových a ventilačních systémů a zkrácení doby cyklu. Aditivní výroba pro nástroje, jako jsou techniky aditivní výroby, jako je 3D tisk, se stále více využívají k výrobě složitých forem a zápusťek používaných při vysokotlakém lití. To umožňuje rychlé prototypování, přizpůsobení a zkrácení dodacích lhůt pro výrobu nástrojů.

Výzkum nových složení slitin a mikrostruktur vedl k vývoji materiálů optimalizovaných pro procesy vysokotlakého lití. Tyto slitiny vykazují zlepšenou tekutost, chování při tuhnutí a mechanické vlastnosti, což umožňuje výrobu vysoce výkonných součástí. Zkoumají se hybridní výrobní přístupy, které kombinují vysokotlaké lití s jinými technologiemi, jako je obrábění, kování nebo aditivní výroba, s cílem vytvořit díly s vlastnostmi na míru a složitou geometrií. Tato integrace zvyšuje flexibilitu návrhu a funkčnost dílů. [16]

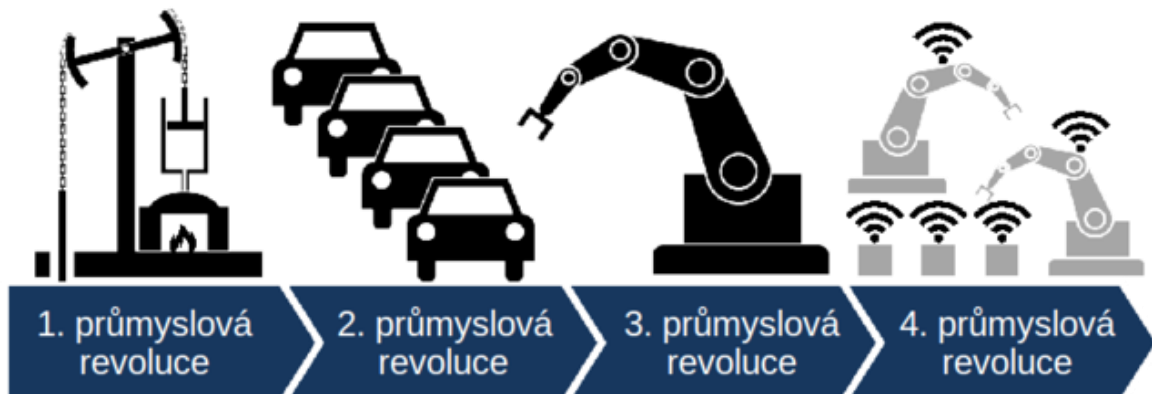
Zvýšená integrace automatizace a robotiky v zařízeních pro vysokotlaké lití vedla ke zlepšenému řízení procesu, konzistenci a produktivitě (Obrázek 7). Automatizované systémy pro manipulaci s formami, dávkování kovů a extrakci dílů přispívají ke snížení nákladů na pracovní sílu a vyšší bezpečnosti. Vybíjejí se snahy o snížení dopadu vysokotlakého lití na životní prostředí prostřednictvím přijímání ekologických materiálů, energeticky účinných zařízení a recyklace odpadních materiálů. Systémy s uzavřeným okruhem pro řízení chladicí kapaliny a maziva pomáhají minimalizovat spotřebu zdrojů a tvorbu odpadu. [16,18]



Obrázek 7: Průmyslový robot Titan KR 1000 KUKA [18]

Implementace technologií Průmyslu 4.0, jako jsou senzory IoT, analýza dat a systémy monitorování v reálném čase, umožňuje prediktivní údržbu, kontrolu kvality a optimalizaci operací vysokotlakého lití (Obrázek 8). Tato digitalizace zvyšuje transparentnost procesů, efektivitu a sledovatelnost. Technologie vysokotlakého lití se stále více používají k výrobě přizpůsobených a personalizovaných komponentů, které vyhovují individuálním preferencím a specifickým požadavkům. Tento trend je patrný zejména v automobilovém, leteckém a spotřebním průmyslu. [19]

Tento vývoj znamená pokračující vývoj v procesech vysokotlakého lití, poháněný pokroky ve vědě o materiálech, výrobních technologiích a praktikách udržitelnosti. Pokračující výzkum a inovace v této oblasti se zaměřují na řešení nových výzev a využití příležitostí pro další zvýšení produktivity, kvality a konkurenceschopnosti ve výrobě kovových součástí. [19]

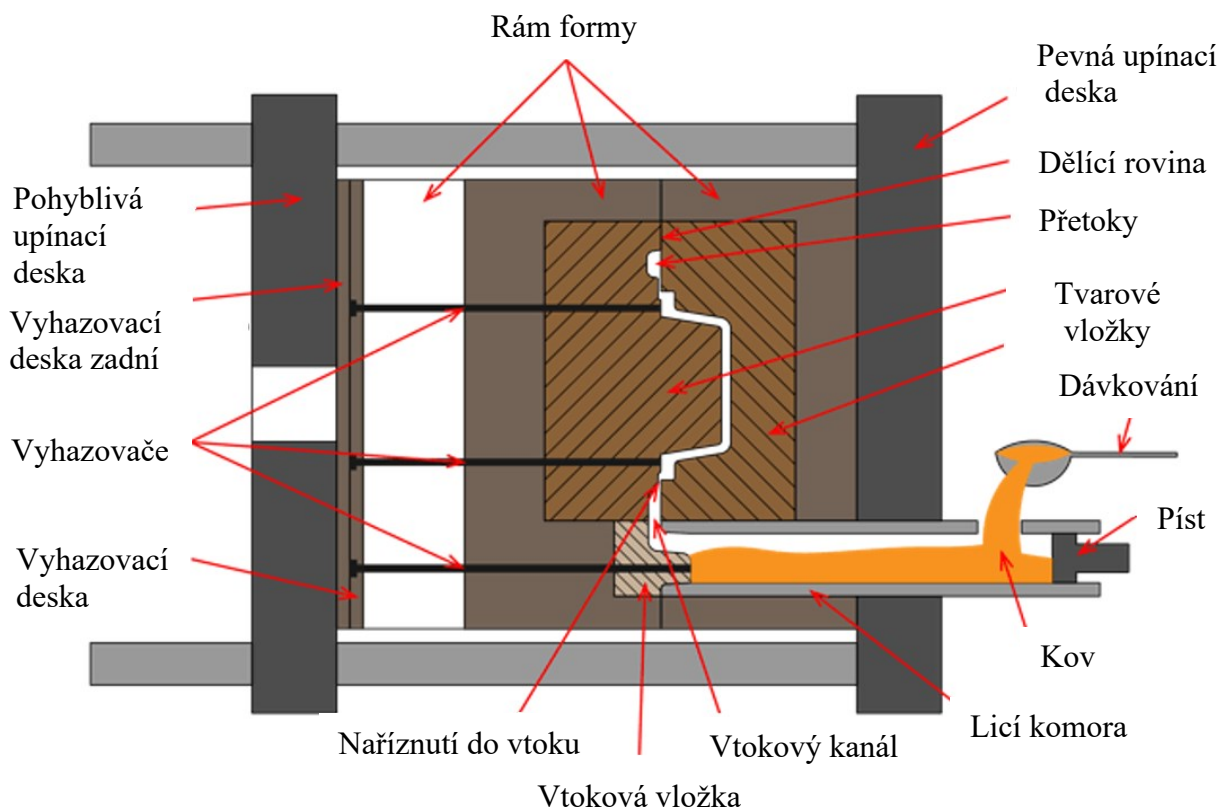


Obrázek 8: Průběh průmyslové revoluce 4.0 [19]

1 - Mechanizace, vodní energie, parní energie, 2 - Masová produkce, montážní linky, elektřina, 3 - Počítače, automatizace, 4 - Kyberneticky-fyzikální systémy

4 PRINCIPY VYSOKOTLAKÉHO LITÍ

Vysokotlaké lití je výrobní proces používaný k výrobě složitých kovových součástí s vysokou přesností, úzkými tolerancemi a vynikající povrchovou úpravou. Proces zahrnuje vstřikování roztaveného kovu do dutiny formy pod vysokým tlakem, kde ztuhne a vytvoří požadovaný tvar konečné součásti. (Obrázek 9) [1,2]



Obrázek 9: Schéma licí jednotky [21]

4.1 Návrh a příprava formy

Vysokotlaké lití začíná návrhem a přípravou formy, která se skládá ze dvou polovin: pevné poloviny (krycí matrice) a pohyblivé poloviny (vyhadzovací matrice). Dutina formy je přesně opracována do tvaru a rozměrů konečného dílu, včetně všech složitých prvků nebo detailů. Do formy jsou integrovány chladicí kanály pro regulaci teploty a tuhnutí roztaveného kovu během odlévání.

Návrh formy začíná pochopením geometrie finální součásti, která má být vyrobena. To zahrnuje identifikaci prvků, jako jsou otvory, podříznutí, žebra a další složité detaily, které je třeba v odlitku přesně replikovat. Úhly úkosu jsou začleněny do konstrukce formy pro usnadnění vyjímání odlitku z dutiny formy.

Konstrukce systému vtoku je rozhodující pro řízení toku roztaveného kovu do dutiny formy. Obsahuje prvky, jako jsou vtokové kanály, přetoky a odvodušňovací kanály, které zajišťují správné plnění a minimalizují vady, jako je zachycení vzduchu a pórovitost. Chladicí kanály jsou integrovány do formy pro regulaci teploty povrchů formy a usnadňují rovnoměrné tuhnutí roztaveného kovu.

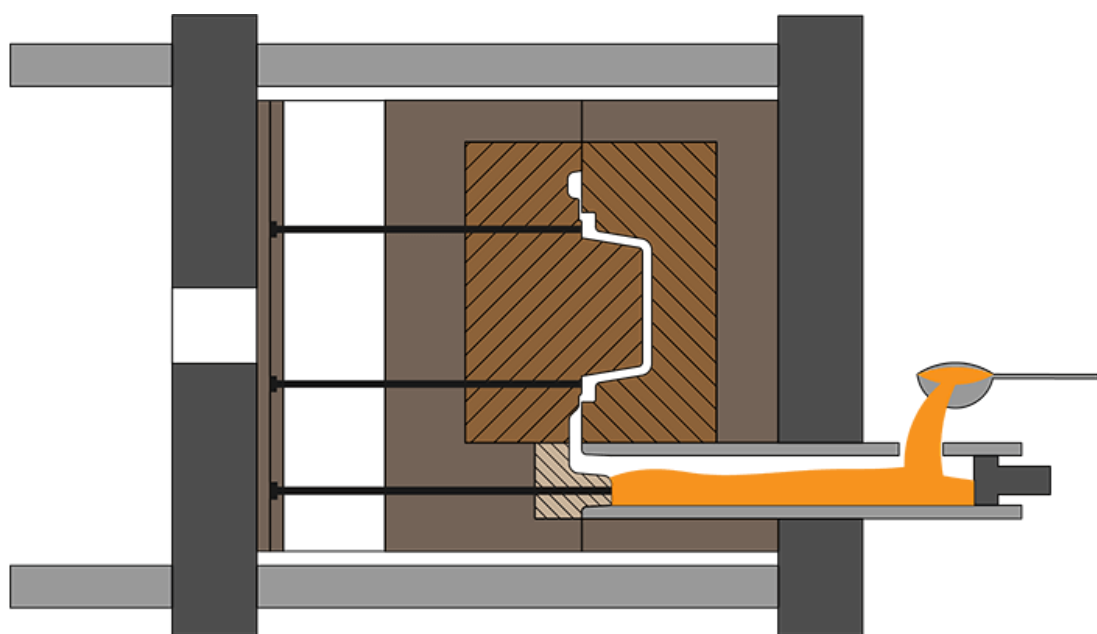
Konstrukce formy zahrnuje systém pro vyjmutí ztuhlého odlitku z dutiny pohyblivé části formy. Jeho součástmi jsou vodící kolíky, vyhazovací desky, vyhazovací tyče a v neposlední řadě samotné vyhazovače. Pohyb celého systému zajišťuje hydraulická vyhazovací deska, která je součástí licího stroje. [1,2,21]

4.2 Vysokotlaké vstřikování

Vysokotlaké vstřikování je kritickou fází při vysokotlakém lití, kde je roztavený kov vstřikován do dutiny formy za zvýšeného tlaku, aby se vytvořily složité kovové součásti. Proces začíná přípravou roztaveného kovu v peci, kde se kovové ingoty nebo šrot taví, aby se dosáhlo požadované teploty a viskozity. Roztavený kov se přenese do udržovací pece nebo pánve, kde se udržuje na kontrolované teplotě, dokud není připraven pro vstřikování.

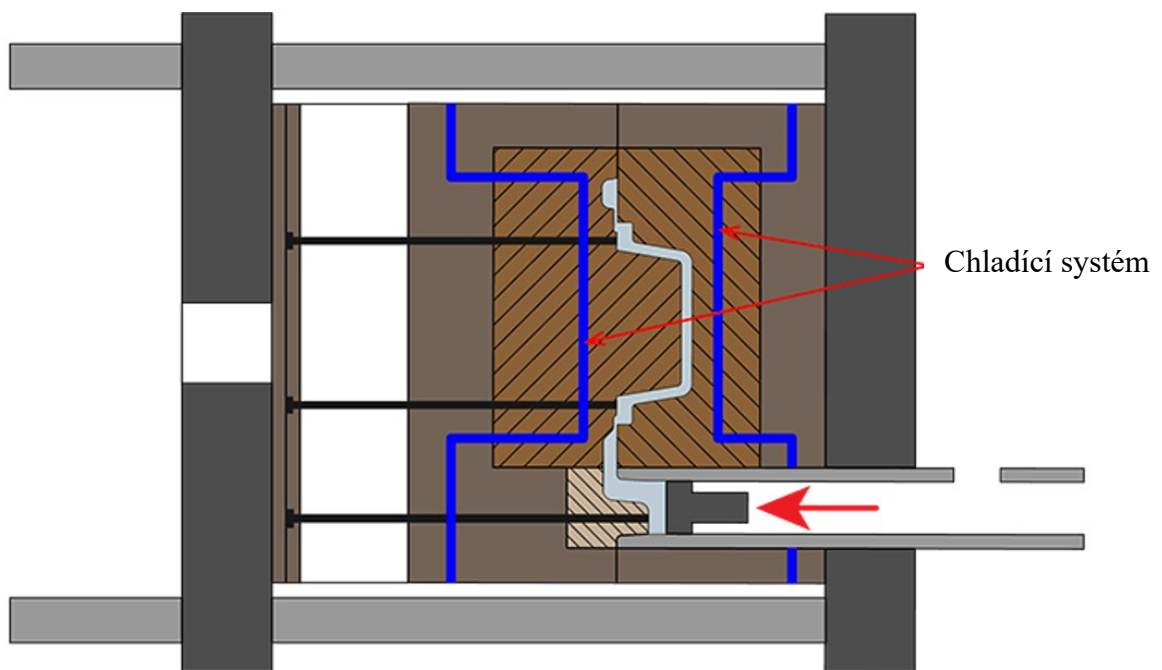
Roztavený kov je pak převáděn z udržovací pece do licí komory, která je umístěna přilehle k dutině formy v licím stroji. Licí komora slouží jako zásobník pro roztavený kov a je navržena tak, aby odolala vysokým tlakům vznikajícím během procesu vstřikování.

(Obrázek 10) [1,2,21]



Obrázek 10: Plnění komory kovem [21]

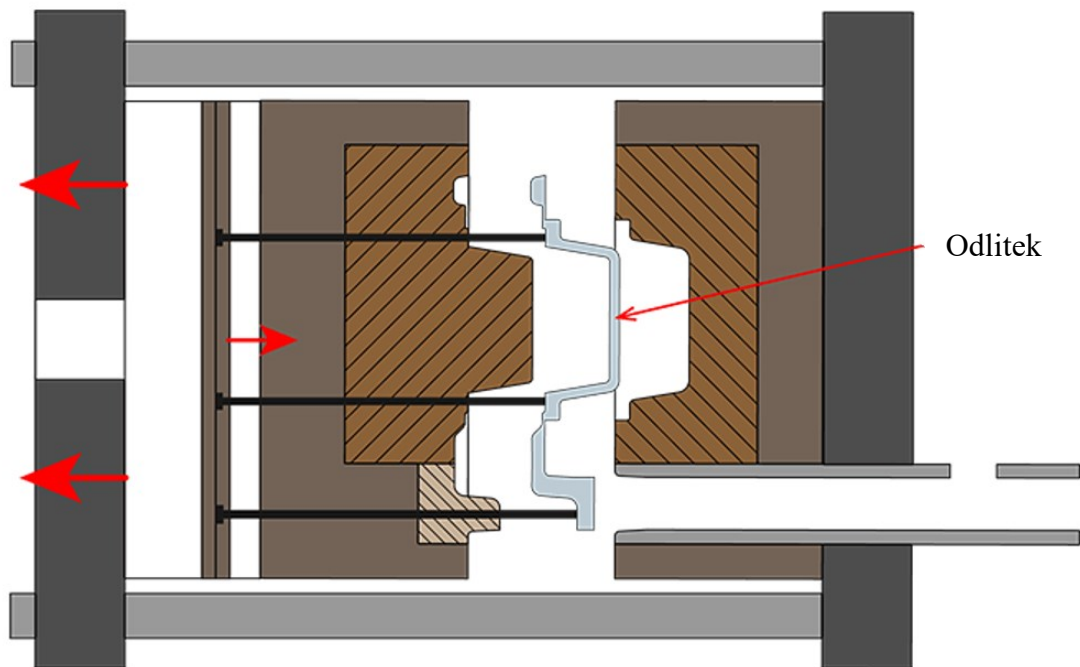
Vstřikovací jednotka licího stroje je zodpovědná za optimální naplnění dutiny formy, které v zásadě probíhá ve třech fázích. 1. fáze, kdy licí píst pomalou rychlostí (0,2 m/s) evakuuje vzduch obsažený v licí komoře a ve vtokovém kanále. 2. fáze, kdy píst prudce zrychluje (až 6 m/s) a dojde k rychlému naplnění dutiny formy včetně přetoků a odvzdušňovacích kanálů (Obrázek 11). O obě tyto fáze se stará tzv. akumulátor tvořený hydraulickým válcem a tlakovými lahvemi s dusíkem. Úkolem akumulátoru je zajistit extrémní průtok hydraulické kapaliny, která je potřebná k vyvinutí vysokých rychlostí pístu. 3 fáze, kdy na konci plnění dojde k přepnutí hydraulického systému na fázi dotlaku, který je nutný k doplnění objemu kovu při krystalizaci v době tuhnutí. O tuto fázi se stará tzv. multiplikátor tvořený také hydraulickým válcem a tlakovými lahvemi s dusíkem. Úkolem multiplikátoru je zajistit extrémní tlak při malém průtoku ke zhutnění odlitku (až 1200 bar). [1,2,21]



Obrázek 11: Plnění dutiny formy [21]

Když je roztavený kov vstřikován do dutiny formy pod vysokým tlakem, rychle vyplní celou dutinu a kopíruje tvar požadované součásti. Vysoký tlak zajišťuje úplné vyplnění dutiny formy, a to i ve složitých geometriích a tenkostěnných úsecích, při minimalizaci defektů, jako je zachycení vzduchu a pórovitost. Jakmile je dutina formy naplněna, roztavený kov začne tuhnout, když se dostane do kontaktu s ochlazenými povrchy formy. [1,2,21]

Po naplnění dutiny formy a dostatečném ztuhnutí roztaveného kovu se odlitek nechá vychladnout v dutině formy. Po ochlazení je odlitek vyhozen z dutiny formy pomocí vyhazovacího mechanismu (Obrázek 12) a veškerý přebytečný materiál na odlitku je odstříhnut. Odlitek je poté podroben dalšímu chlazení a dokončovacím procesům, než je připraven k použití nebo montáži. [1,2,21]



Obrázek 12:Odformování odlitku [21]

4.3 Plnění formy a tuhnutí

Plnění formy a tuhnutí jsou rozhodující fáze v procesu vysokotlakého lití, kdy je roztavený kov vstříkovan do dutiny formy a ponechán ztuhnout do požadovaného tvaru konečného dílu. Poté, co je roztavený kov vstříkovan do dutiny formy pod vysokým tlakem, rychle vyplní celou dutinu a replikuje tvar požadovaného dílu. Vysoký tlak zajišťuje úplné vyplnění dutiny formy i ve složitých geometriích a tenkostěnných úsecích.

Vstříkovací systém řídí průtok a rychlost roztaveného kovu, aby se zajistilo rovnoměrné plnění a minimalizovaly se vady, jako je zachycení vzduchu, pórovitost a neúplné plnění. Správná konstrukce vtoku a nařiznutí hraje klíčovou roli při řízení toku kovu do dutiny formy. Před výrobou lze použít software pro simulaci plnění matrice k predikci a optimalizaci chování při plnění roztaveného kovu v dutině formy. To pomáhá identifikovat potenciální problémy a optimalizovat parametry procesu pro efektivní plnění forem.

Jakmile je dutina formy naplněna roztaveným kovem, začíná proces chlazení. Chladicí kanály integrované do formy pomáhají regulovat teplotu povrchů formy a řídit rychlost tuhnutí roztaveného kovu. Teplo se přenáší z roztaveného kovu na chlazené povrchy formy, čímž dochází ke ztuhnutí kovu a vytvoření požadovaného tvaru konečného dílu. Rychlost přenosu tepla ovlivňuje mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a povrchovou úpravu odlitku. Čelo tuhnutí postupuje od stěn formy směrem ke středu odlitku, jak se roztavený kov ochlazuje a tuhne. Správná konstrukce chladicích kanálů a řízení rychlosti chlazení pomáhá zajistit rovnoměrné tuhnutí a minimalizovat vnitřní defekty.

Během tuhnutí kov podléhá objemové kontrakci, což má za následek smrštění odlitku. Správná konstrukce formy a vtokového systému pomáhá kompenzovat smrštění a minimalizovat zkreslení v konečné části. Rychlost ochlazování a tuhnutí roztaveného kovu ovlivňují strukturu zrna a mikrostrukturní charakteristiky odlitku. Jemnozrnné struktury jsou žádoucí, protože často vedou ke zlepšení mechanických vlastností a povrchové úpravy.

Doba potřebná pro tuhnutí závisí na faktorech, jako je velikost a složitost odlitku, rychlost chlazení a tepelné vlastnosti formy a kovu. Jakmile odlitek zcela ztuhne, je připraven k vyhození z dutiny formy. Po dokončení tuhnutí se aktivuje vyhazovací mechanismus formy, aby se vytáhl ztuhlý odlitek z dutiny formy. Odlitek je poté přemístěn do chladicí stanice nebo dopravního pásu k dalšímu chlazení a zpracování. [2,4,15]

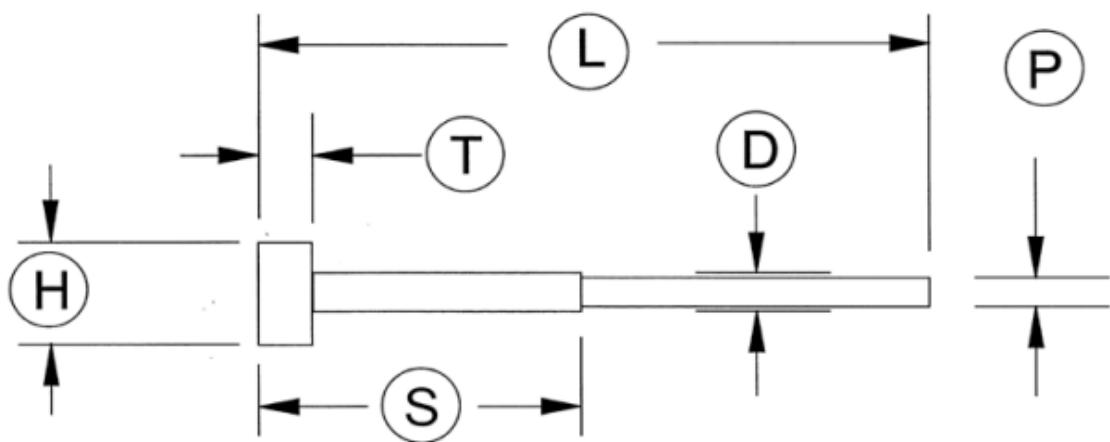
Souhrnně lze říci, že plnění formy a tuhnutí jsou kritickými fázemi v procesu vysokotlakého lití, kde je řádná kontrola procesních parametrů a konstrukce formy zásadní pro dosažení vysoce kvalitních odlitků s přesnými rozměry, minimálními vadami a optimálními mechanickými vlastnostmi. Efektivní plnění formy a řízené tuhnutí přispívají k celkovému úspěchu procesu odlévání a výrobě vysoce výkonných kovových součástí. [2,4,15]

4.4 Vyhazování a chlazení dílu

Vyhazování a chlazení součásti jsou základními kroky v procesu vysokotlakého lití po plnění formy a tuhnutí. Tyto fáze zajišťují bezpečné vyjmutí odlitku z dutiny formy a umožňují další ochlazování a tuhnutí. [15]

4.4.1 Vyhazovací mechanismus

Ve většině vysokotlakých licích forem se používají vyhazovací kolíky k vytlačení ztuhlého odlitku z dutiny formy (Obrázek 13). Tyto kolíky jsou typicky umístěny na vyhazovací polovině formy a jsou aktivovány hydraulickými nebo mechanickými prostředky.



Obrázek 13: Schématický výkres vyhazovacího kolíku [38]

Některé formy mohou mít vyhazovací desku nebo systém, který působí stejnou silou na celý povrch odlitku, což usnadňuje jeho vyjmutí z dutiny formy.

Ejektorový systém je synchronizován s mechanismy zavírání a otevírání formy licího stroje. Jakmile se forma dostatečně ochladí a ztuhne, aktivuje se vyhazovací systém, aby se odlitek uvolnil z dutiny formy. [4,15]

4.4.2 Proces chlazení

Po vyhození odlitek pokračuje v přirozeném chlazení v okolním prostředí. Tato fáze umožňuje další tuhnutí odlitku a pomáhá stabilizovat jeho mikrostrukturu. V některých případech může být odlitek přenesen do vyhrazené chladicí stanice nebo dopravního pásu pro řízené chlazení. To umožňuje rovnoměrné chlazení více odlitků a pomáhá předcházet deformaci.

Doba chlazení závisí na faktorech, jako je velikost a složitost odlitku, odlévaný materiál a požadované vlastnosti finálního dílu. Pro tlustší nebo složitější odlitky mohou být vyžadovány delší doby chlazení. Během procesu chlazení je teplo odváděno z odlitku do okolního prostředí. Správné chlazení pomáhá snižovat zbytková napětí, minimalizovat deformace a zlepšovat mechanické vlastnosti odlitku. [2,4,15]

4.4.3 Ořezávání a konečná úprava

Po ochlazení lze veškerý přebytečný materiál nebo ořepy kolem okrajů odlitku oříznout nebo odstranit pomocí řezných nástrojů nebo automatizovaných systémů ořezávání. Tento krok zajišťuje, že odlitek splňuje požadované rozměrové tolerance a požadavky na povrchovou úpravu. V závislosti na aplikaci a specifikacích zákazníka může být odlitek podroben dalším povrchovým úpravám, jako je tryskání, pískování, broušení nebo leštění, aby se dosáhlo požadované povrchové úpravy.

Některé odlitky mohou vyžadovat procesy tepelného zpracování, jako je žíhání, kalení nebo temperování, aby se zlepšily jejich mechanické vlastnosti, zvýšila se jejich životnost nebo se zmírnilo zbytkové pnutí. [2,4,15]

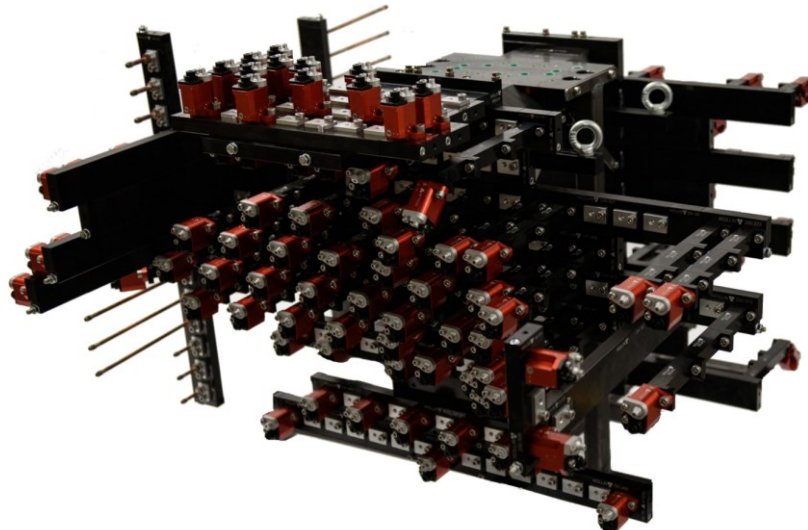
4.4.4 Inspekce a kontrola kvality

Jakmile odlitek vychladne a projde nezbytnými dokončovacími procesy, zkontroluje se jeho rozměrová přesnost pomocí přesných měřicích přístrojů, jako jsou posuvná měřítka, mikrometry nebo souřadnicové měřicí stroje (CMM). Odlitek je vizuálně kontrolován na povrchové vady, jako je pórovitost, smršnění, praskliny nebo nepravidelnosti povrchu. K odhalení vnitřních defektů lze použít nedestruktivní testovací metody, jako je testování penetračním barvivem nebo rentgenová kontrola. Opatření kontroly kvality jsou implementována v průběhu celého procesu odlévání, aby bylo zajištěno, že všechny díly splňují stanovené normy kvality a požadavky zákazníků. Všechny vadné díly jsou identifikovány a řešeny, aby byla zachována kvalita a integrita produktu. [2,4,15]

5 POPIS TECHNOLOGIE MIKRO POSTŘIKU A JEJÍ APLIKACE PŘI ODLÉVÁNÍ

Technologie mikro postřiku je inovativní metoda používaná v procesech vysokotlakého lití pro zlepšení mazání forem a zlepšení kvality odlitků. Tato technologie zahrnuje přesné nanesení jemné mlhy nebo spreje maziva na povrchy dutiny formy bezprostředně před vstřikováním roztaveného kovu.

Technologie mikro postřiku využívá specializovaný systém dodávání maziva sestávající z přesných trysek nebo stříkacích hlav strategicky umístěných kolem dutiny formy (Obrázek 14). Systém je navržen tak, aby dodával kontrolované a rovnoměrné rozprašování maziva na povrchy formy, což zajišťuje konzistentní pokrytí a distribuci. [21]



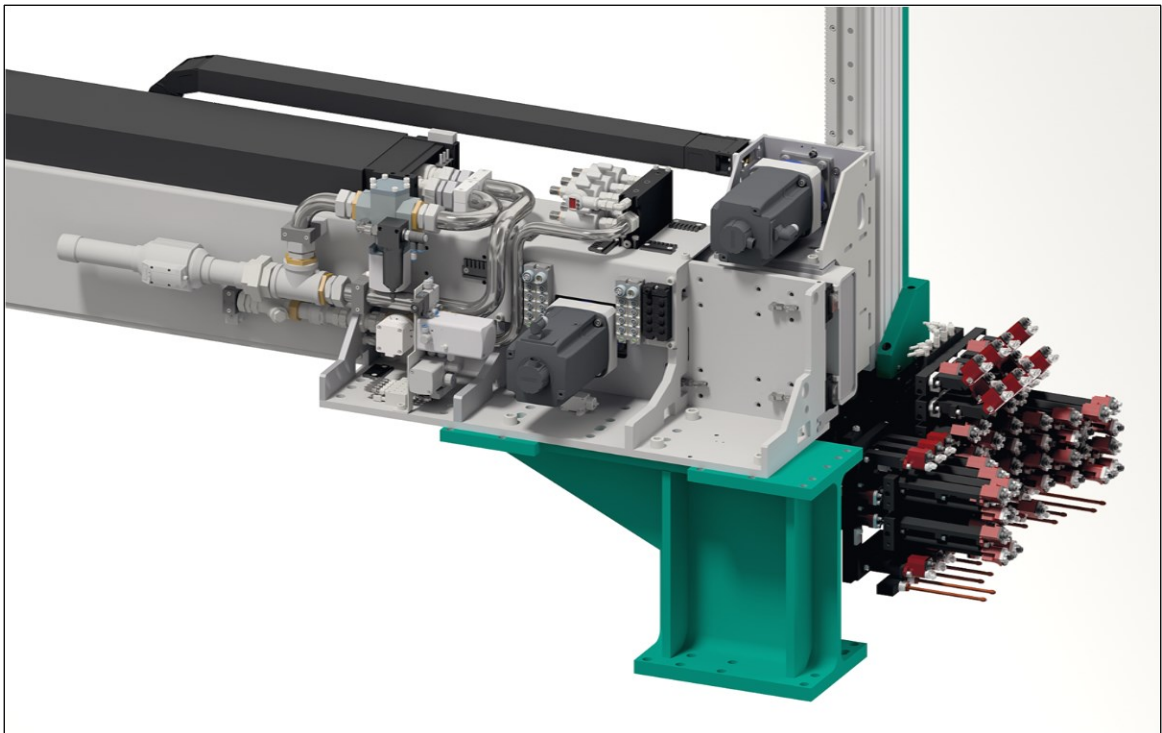
Obrázek 14: Mikro-postřiková hlava [21]

Mazivo se rozprašuje na jemnou mlhu nebo sprej pomocí stlačeného vzduchu nebo jiných hnacích plynů. Velikost kapiček v mlze lze upravit tak, aby se dosáhlo požadovaného pokrytí mazivem a tloušťky filmu na površích formy.

Aplikace spreje maziva je synchronizována s procesem vysokotlakého lití, čímž je zajištěno řádné promazání povrchů formy bezprostředně před vstřikováním roztaveného kovu. K aktivaci systému dodávky maziva v optimálním okamžiku licího cyklu se používají přesné časovací a kontrolní mechanismy. [21]

Technologie mikro postřiku často využívá ekologicky šetrná maziva, která jsou biologicky odbouratelná a netoxická, čímž se minimalizuje dopad procesu odlévání na životní prostředí. Tato maziva jsou pečlivě vybírána tak, aby poskytovala účinné mazání forem při zachování kompatibility s odlévacími materiály a podmínkami procesu.

Primární aplikací technologie mikro postřiku je zajistit mazání povrchů dutiny formy v procesech vysokotlakého lití. Sprej maziva pomáhá snižovat tření mezi roztaveným kovem a povrchy formy, což umožňuje hladší a rovnoměrnější vyplnění dutiny formy (Obrázek 15). Snižováním tření a minimalizací tvorby defektů, jako je zachycování vzduchu, smršťování nebo slevování, přispívá technologie mikro postřiku k výrobě vysoce kvalitních odlitků s vynikající povrchovou úpravou a rozměrovou přesností. Přesná aplikace mazacího spreje pomáhá optimalizovat plnění formy a tuhnutí, výsledkem čehož jsou díly se sníženou porézností a zlepšenými mechanickými vlastnostmi. [21]



Obrázek 15: Postřiková jednotka Wollin ESM3 [21]

Technologie mikro postřiku může vést ke zvýšení efektivity procesu a produktivity při operacích vysokotlakého lití. Technologie může být aplikována na širokou škálu kovových slitin, což umožňuje všestrannost a přizpůsobivost různým aplikacím odlévání a výrobním požadavkům. [21]

5.1 Maziva využívaná při aplikaci technologie mikro postřiku

Díky jedinečnosti každého z procesů a také rozmanitosti používaných surovin je vyvinuta široká škála maziv, dle požadovaného efektu. Uvolňovací prostředky a chemická struktura musí být navržena tak, aby fungovala skvěle i ve velmi náročných podmínkách a materiálech. Výzkum maziv společností ChemTrend je založen na rozsáhlé sadě polymerních technologií vyvinutých a syntetizovaných tak, aby specificky poskytovaly, co nejlepší mazání na matrici forem, což pomáhá v tlakovém lití zaznamenat méně prostojů a vyšší kvalitu díky nižším úrovním poréznosti. [41]

Technologie mikro postřiků HERA (High Efficiency Release Agent), která přináší aplikaci mnohem méně separátoru na daný cyklus stroje. To umožňuje maximální efektivitu s použitím minimálního množství produktu a vytváří nové paradigma ve výrobním potenciálu. [41]

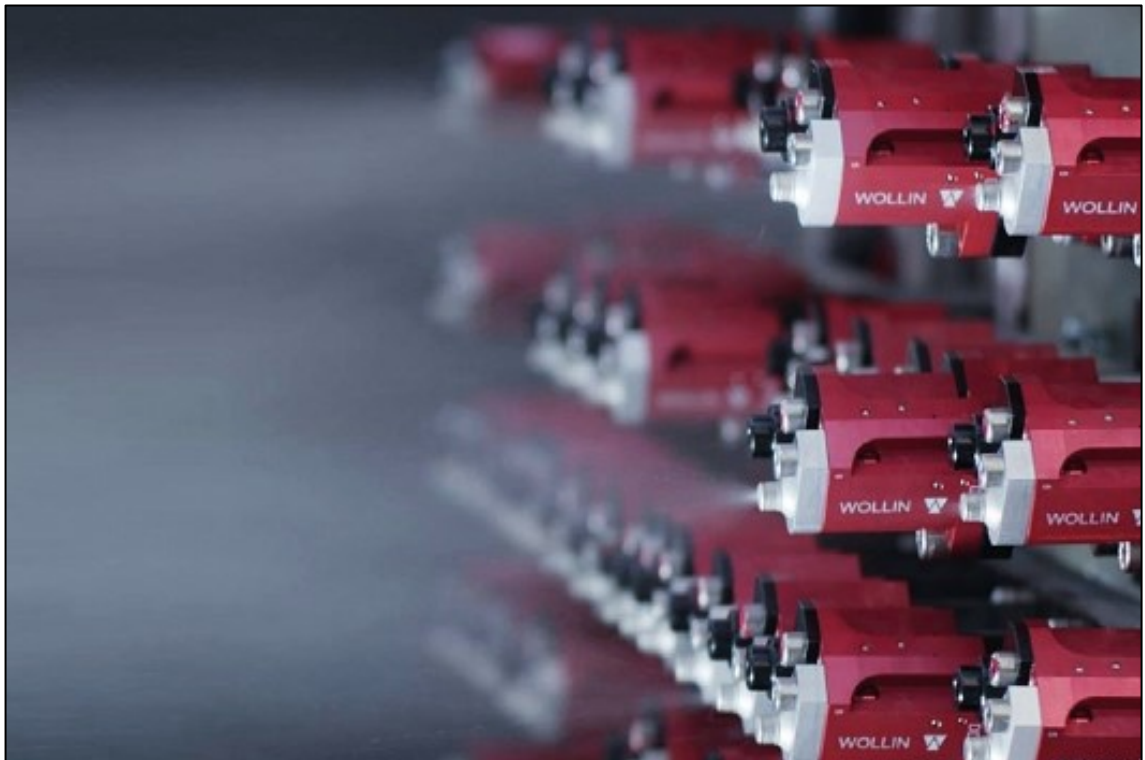
Maziva jsou navržena tak, aby zlepšila procesy a umožnila dosáhnout vyšší efektivity. Mazadla pro matrice mohou být navržena tak, aby poskytovala výjimečné uvolňování a ochranu matrice s optimalizovaným nanášením, podporovala tečení kovu, rychle ochlazovala povrch matrice a udržovala teplotu matrice v úzkém teplotním pásmu, což vše umožňuje rychlejší cykly a delší životnost matrice. [41]

Mazivo HERA pomáhá snížit zmetkovitost, prostoje a spotřebu energie. Jeho složení na vodní bázi může být použito v různých aplikacích a jeho výkonnostní charakteristiky z něj dělají ideální řešení pro vysokoteplotní i nízkoteplotní provozy. [41]

5.2 Diskuse o technologii mikro postřiku a jejích výhodách

Technologie mikro postřiku je specializovaná metoda. Aplikací mazacího spreje do dutiny formy technologie mikro postřiku snižuje tření mezi roztaveným kovem a povrchem formy. Toto snížení tření usnadňuje hladší a stejnoměrnější plnění dutiny formy, což má za následek zlepšenou kvalitu dílu a snížený výskyt defektů, jako je neúplné plnění nebo chybné běhy.

Jemná mlha maziva vytváří tenkou bariéru mezi roztaveným kovem a povrchem formy, čímž zabraňuje přímému kontaktu a minimalizuje vznik povrchových defektů, jako je zachycení vzduchu, smrštění nebo lepení formy (Obrázek 16). Výsledkem je, že součásti vyrobené pomocí technologie mikro postřiku vykazují vynikající povrchovou úpravu s menším počtem nedokonalostí, což snižuje potřebu operací následného zpracování, jako je obrábění nebo leštění. [21]



Obrázek 16: Vizualizace mikro postřiku za pomoci trysek DDV [21]

Použití mazacího spreje pomáhá snižovat tření a opotřebení na povrchu dutiny formy, prodlužuje životnost matric a minimalizuje četnost údržby a oprav. To vede k úspoře nákladů a prodloužení doby provozuschopnosti při operacích vysokotlakého lití, stejně jako ke zlepšené spolehlivosti a konzistenci ve výrobě dílů. [21]

5.2.1 Parametry procesu

Studie ukázaly, že vyšší vstřikovací tlaky v procesech vysokotlakého lití vedou k lepšímu plnění formy, snížení pórovitosti a zlepšení mechanických vlastností odlitků. Rychlost vstřikování ovlivňuje chování toku roztaveného kovu v dutině formy. Optimální rychlosti vstřikování jsou rozhodující pro dosažení rovnoměrného plnění a minimalizaci defektů, jako jsou studené uzávěry a zachycení vzduchu.

Dalším důležitým aspektem je řízení teploty formy, je klíčové pro regulaci rychlosti tuhnutí a mikrostruktury odlitků. Teplota formy má velký vliv na kvalitu součásti, včetně povrchové úpravy a mechanických vlastností. Správná rychlost ochlazování během tuhnutí pomáhá předcházet defektům smršťování a zajišťuje požadované mikrostrukturální vlastnosti odlitků. Optimalizace parametrů chlazení, jako je průtok chladicí kapaliny a teplotní gradient, přispívá ke zlepšení kvality odlitku. [22,39,40]

5.2.2 Parametry materiálu

Složení slévárenských slitin významně ovlivňuje jejich tekutost, smršťování a mechanické vlastnosti. K úpravě mikrostruktury licích slitin se používají techniky zjemnění zrna, jako je očkování a činidla pro zjemnění zrna. Jemnější struktury zrn zlepšují mechanické vlastnosti a snižují vady odlitků. Přítomnost vměstků a nečistot v licích slitinách může nepříznivě ovlivnit kvalitu odlitku tím, že podporuje defekty, jako je pórovitost, vměstky a nepravidelnosti povrchu. [22,39,40]

5.2.3 Konstrukce nástrojů a forem

Konstrukce vtokových systémů ovlivňuje průběh proudění roztaveného kovu během odlévání. Konstrukce vtoku, včetně velikosti, tvaru a umístění vtoku, má velký vliv na plnění formy, pórovitost a kvalitu součásti. Účinné odvzdušňovací systémy jsou nezbytné pro odstranění vzduchu a plynů z dutiny formy během odlévání. Role designu a umístění větracích otvorů při prevenci defektů, jako je poréznost plynu a smršťovací dutiny je nezbytným aspektem při vývoji forem.

Povrchové nátěry a úpravy aplikované na formy mohou zlepšit uvolňování formy, omezit pájení a zlepšit povrchovou úpravu. Je ověřeno, že vliv povlakových materiálů a aplikačních metod má příznivý vliv na kvalitu odlitku a životnost nástroje. [22,39,40]

5.2.4 Monitorování a kontrola procesu

Techniky monitorování v reálném čase, jako je tepelné zobrazování, akustické emise a tlakové senzory, poskytují cenné informace o procesu odlévání. Metody statistického řízení procesu (SPC) se používají k analýze procesních dat a identifikaci trendů nebo odchylek, které mohou ovlivnit kvalitu odlitku. Studie aplikovaly techniky SPC na procesy vysokotlakého lití pro zlepšení stability a konzistence procesu.

Vliv technologických parametrů na kvalitu odlitků zdůrazňuje význam optimalizace procesu, výběru materiálu, konstrukce nástrojů a řízení procesu pro dosažení vysoce kvalitních odlitků s minimálními vadami. Další výzkum v této oblasti nadále rozšiřuje naše chápání procesů odlévání a podporuje zlepšování kvality a produktivity odlévání. [22,39,40]

5.2.5 Shrnutí o technologii mikro postřiku

Technologie mikro postřiku umožňuje rychlejší plnění formy a rychlost tuhnutí, což má za následek kratší doby cyklu a vyšší rychlost výroby. Zlepšená efektivita procesu se promítá do snížení výrobních nákladů a zlepšení celkové produktivity pro operace vysokotlakého lití. Technologie mikro postřiku je kompatibilní se širokou škálou procesů vysokotlakého lití a kovových slitin, takže je vhodná pro různé aplikace v různých průmyslových odvětvích. Technologie může být snadno integrována do stávajících výrobních linek a přizpůsobena konkrétní geometrii dílů a výrobním požadavkům.

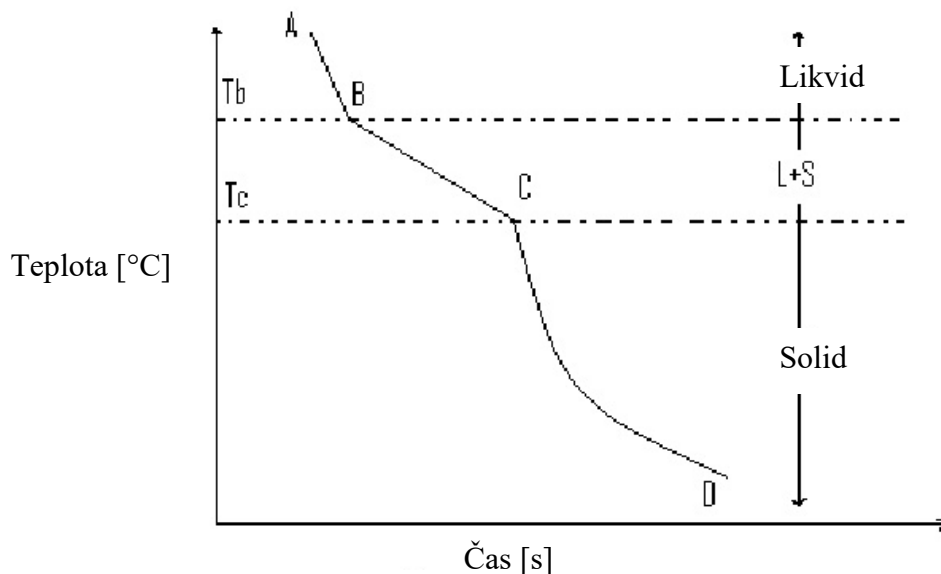
Přesná aplikace mazacího spreje minimalizuje přestřík a plýtvání, což má za následek sníženou spotřebu maziv a dopad na životní prostředí. Použití ekologicky šetrných maziv dále zlepšuje profil udržitelnosti procesů vysokotlakého lití využívající technologii mikro postřiku Wollin. [21]

6 TEORETICKÉ MODELY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU ODLITKŮ

Při studiu vlivu technologických parametrů na kvalitu odlitků v procesech vysokotlakého lití může být relevantních několik teoretických modelů a rámců z oblasti materiálové vědy, inženýrství a výroby. Tyto modely a rámce poskytují teoretický základ pro pochopení komplexní souhry mezi parametry procesu a kvalitou odlitků. [23,24]

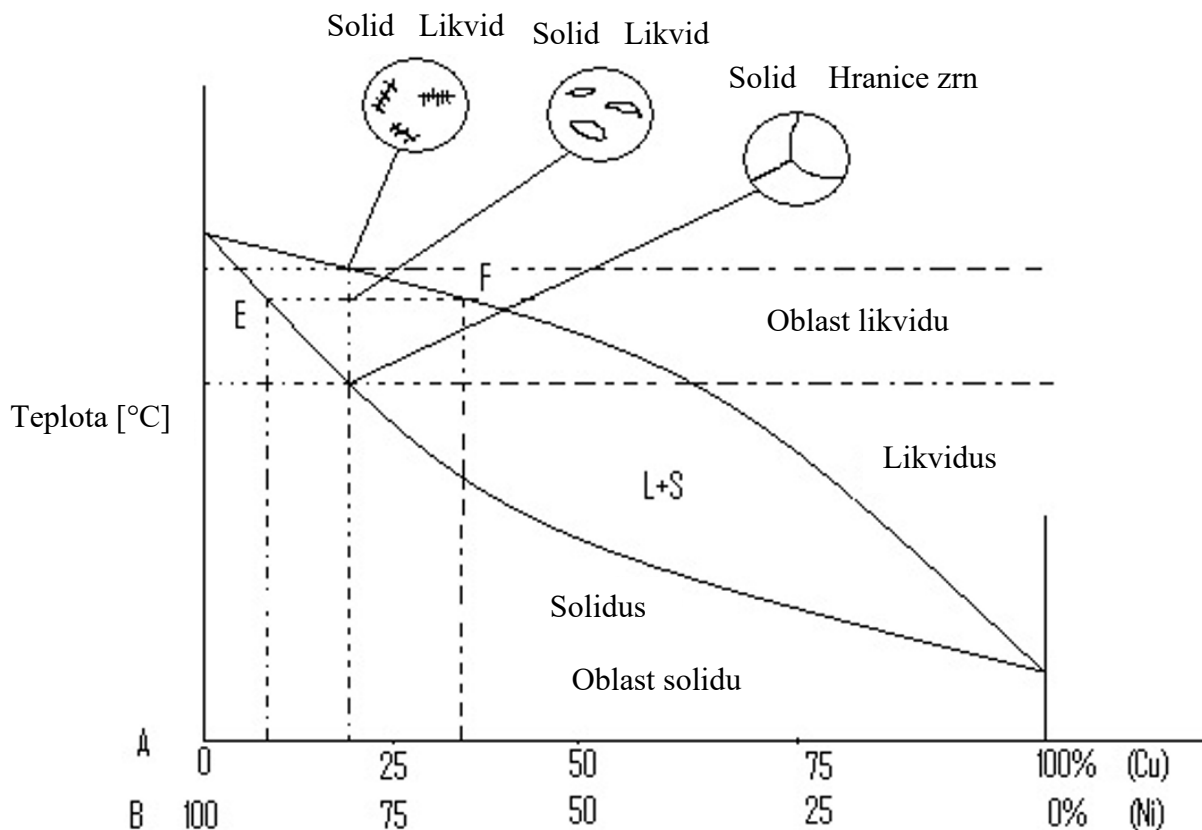
6.1 Teorie tuhnutí

Teorie tuhnutí poskytuje základní pochopení procesu tuhnutí roztavených kovů během odlévání (Obrázek 17). Teoretické modely, jako je Scheil-Gulliverova rovnice, Chvorinovo pravidlo a pákové pravidlo, lze použít k predikci chování tuhnutí, rychlosti ochlazování a vývoje mikrostruktury v odlitcích. Teorie tuhnutí je základním konceptem materiálové vědy a inženýrství, který se zabývá procesem, kterým se materiál mění z kapalného do pevného skupenství. V kontextu procesů vysokotlakého lití je teorie tuhnutí zásadní pro pochopení vzniku mikrostruktury odlitku, vývoje vad a predikce mechanických vlastností. [23,24]



Obrázek 17: Graf křivky ochlazování binárních slitin v pevném roztoku [24]

- Od A do B je slitina v kapalném stavu.
- Tuhnutí začíná v bodě B a končí v C.
- Na rozdíl od čistých kovů dochází k tuhnutí v celém teplotním rozsahu (tj. od T_b do T_c)
- Latentní teplo tání se postupně uvolňuje z B do C a má tendenci prodlužovat dobu potřebnou k tuhnutí. [24]



Obrázek 18: Fázový diagram pro slitinový systém [24]

Fázový diagram ukazuje dvě různé a odlišné fáze, jedna je roztok tekutého kovu a druhá je pevný roztok. V těchto dvou fázích, tj. liquidus a solidus, obě fáze kapalina a pevná látka vystupují společně. Tyto dva celky existující společně mohou být mechanicky odděleny dekantací kapalné fáze.

Likvidus je čára (a), nad kterou je slitina v kapalném stavu a (b) kde začíná tuhnutí. Solidus je čára (a), pod kterou je slitina v pevném stavu a (b) kde tuhnutí končí.

Pokud je ve fázovém diagramu pro každou změnu fáze poskytnut dostatečný čas na dokončení změny, aby změna fáze proběhla za rovnovážných podmínek, bude fázový diagram také známý jako rovnovážný diagram (Obrázek 18).

Tuhnutí slitin probíhající za rovnovážných podmínek je známé jako rovnovážné tuhnutí. Rovnovážných podmínek není obecně dosaženo během tuhnutí odlitků, protože difúze může být extrémně pomalá v důsledku velké rychlosti ochlazování odlitků. Odlitky tedy nejčastěji tuhnou za nerovnovážných podmínek a proces tuhnutí je známý jako nerovnovážné tuhnutí.

Nerovnovážné tuhnutí má za následek porézni, sloupcovitý (nebo dendritový) jádrový materiál, který má obvykle velmi nehomogenní složení. Nerovnovážné tuhnutí zahrnuje velkou rychlost ochlazování a neumožňuje úplnou difúzi v pevném skupenství a tím vede k jádrování a segregaci. [24]

Scheil-Gulliverova rovnice

Scheil-Gulliverova rovnice je matematický model, který se používá k predikci složení fází, které se krystalizují během solidifikace slitiny. Tato rovnice se používá zejména k popisu rozdělování různých prvků v krystalizujících fázích, což je důležité pro porozumění mikrostruktúře a vlastnostem výsledného materiálu. Někdy se také nazývá Scheilova rovnice nebo Gulliverova rovnice. [25]

Rovnice byla pojmenována po německém metalurgovi Alfredu Scheilovi a anglickém vědci Peteru Gulliverovi, kteří nezávisle vypracovali podobné modely ve 20. století.

Obecně lze Scheil-Gulliverovu rovnici zapsat následovně:

$$C_{liq} = C_{Ts} + \sum_i \frac{v_i}{(1-L_i)\beta_i} \quad (1)$$

kde:

- C_{liq} je koncentrace prvku v tekuté fázi po solidifikaci
- C_{Ts} je počáteční koncentrace prvku ve slitině
- v_i je objemový zlomek krystalizující fáze obsahující prvek
- L_i je lineární zlomek krystalizující fáze obsahující prvek
- β_i je distribuční koeficient prvků mezi krystalizující fází a tekutou fází

Tato rovnice je základem pro predikci složení krystalizujících fází a umožňuje porozumět distribuci prvků během solidifikace slitiny. Je důležité poznamenat, že Scheil-Gulliverova rovnice předpokládá ideální podmínky solidifikace, jako je například rovnoměrné rozpustění prvků v tekuté fázi a rychlá solidifikace, a může být ovlivněna dalšími faktory, jako jsou například tepelné gradienty, rychlost ochlazování a interakce mezi různými fázemi. [25]

Chvorinovo pravidlo

Chvorinovo pravidlo, pojmenované po ruském metalurgovi Nikolaji Chvorinovi, je empirická rovnice používaná k predikci doby tuhnutí kovového lití. Tato rovnice je užitečná pro odhad času, který je potřebný k tuhnutí odlitku v závislosti na jeho tloušťce. Chvorinovo pravidlo lze využít pro různé typy kovů a slitin, ale je nejpřesnější pro kovy s dobrou tepelnou vodivostí. [26]

Obecně se Chvorinovo pravidlo zapisuje následovně:

$$t = k \cdot V^m \quad (2)$$

kde:

- t je doba tuhnutí odlitku
- k je empirická konstanta
- V je objem odlitku
- m je empirický exponent, který může být různý pro různé materiály a procesy lití

Hodnoty k a m jsou empiricky stanoveny na základě experimentálních dat a mohou se lišit pro různé kovy a procesy lití.

Chvorinovo pravidlo je užitečné pro rychlý odhad doby tuhnutí odlitků při různých tloušťkách. Nicméně je důležité si uvědomit, že je to empirický model, který může mít omezenou přesnost pro určité materiály a podmínky lití. Pro přesnější predikci doby tuhnutí je vhodné provést experimentální ověření nebo použít pokročilejší modely, které zohledňují další faktory jako tepelné gradienty, chladičí médium, tepelné vlastnosti materiálu a další. [26]

6.1.1 Nukleace

Nukleace je počáteční fáze tuhnutí, kdy se v tekutém kovu tvoří jádra pevné fáze. Při vysokotlakém lití může nukleace probíhat buď homogenně v tavenině nebo heterogenně v místech nukleace, jako jsou stěny formy, nečistoty nebo bubliny plynu.

Typ nukleace a přítomnost nukleačních činidel (např. zušlechťovače zrn) ovlivňují rozložení struktury zrna a tvorbu defektů, jako je pórovitost a smršťování. [23,24]

6.1.2 Růst pevné fáze

Po nukleaci pevná fáze roste, když atomy nebo molekuly difundují z kapalně fáze, aby se připojily k existujícím pevným jádrům. Rychlost růstu pevné fáze závisí na faktorech, jako je teplotní gradient, rychlost ochlazování a složení slitiny.

Při vysokotlakém lití mohou rychlé rychlosti ochlazování a vysoké tlaky vést k jemnozrnným strukturám a zlepšeným mechanickým vlastnostem. Nadměrná rychlost chlazení však může také vést k defektům, jako je mikrosegregace, dendritický růst a trhání za tepla. [23,24]

6.1.3 Přední strana tuhnutí

Fronta tuhnutí je hranicí mezi kapalnou a pevnou fází, jak tuhnutí postupuje materiálem. Pohyb čela tuhnutí určuje celkovou dobu tuhnutí a tvorbu mikrostruktury odlitku.

Pochopení chování čela tuhnutí je zásadní pro řízení kvality odlitku a optimalizaci parametrů procesu, jako je teplota formy, rychlost vstřikování a tlak. [23,24]

6.1.4 Mikrostrukturní evoluce

Během tuhnutí se mikrostruktura odlitku vyvíjí, jak zrna nukleují, rostou a vzájemně se ovlivňují. Konečná mikrostruktura odlitku, včetně velikosti zrna, morfologie a distribuce, významně ovlivňuje mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tažnost a odolnost proti únavě.

Teorie tuhnutí také poskytuje pohled na tvorbu defektů, jako je pórovitost, smršťování, praskliny a segregace během odlévání. Faktory jako složení slitiny, rychlost ochlazování, konstrukce formy a parametry procesu ovlivňují tvorbu a šíření defektů.

Po pochopení mechanismů, které jsou základem tvorby defektů, mohou výzkumníci vyvinout strategie pro minimalizaci defektů a zlepšení kvality odlitků při vysokotlakých procesech lití. [23,24]

7 MODELOVÁNÍ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ TEKUTIN

Modely přenosu tepla a proudění tekutiny, včetně simulací počítačové dynamiky tekutin (CFD), lze použít k analýze proudění roztaveného kovu v dutině formy, mechanismů přenosu tepla a rozložení teploty během tuhnutí. Tyto modely pomáhají optimalizovat parametry procesu, jako je rychlost vstřikování, tlak a teplota formy pro zlepšení kvality odlitku.

Přenos tepla a modelování proudění tekutin jsou základními aspekty pochopení a optimalizace procesů vysokotlakého lití. Tyto modelovací techniky poskytují náhled na rozložení teploty, rychlosti a tlaku v dutině formy během odlévání. Zde je přehled přenosů tepla a modelování proudění tekutin, jak souvisí s vysokotlakým litím. [27,28]

7.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) je výkonná numerická metoda používaná k simulaci proudění tekutin, přenosu tepla a dalších souvisejících jevů v rámci složitých geometrií.

Při vysokotlakém lití může CFD modelovat tok roztaveného kovu skrz vtokový systém do dutiny formy a následný proces chlazení. Dokáže předvídat vzory plnění, rychlosti proudění, rozložení tlaku a teplotní gradienty ve formě.

Simulace CFD pomáhají optimalizovat parametry procesu, jako je rychlost vstřikování, tlak a konstrukce formy, aby bylo dosaženo rovnoměrného plnění, minimalizace defektů a zvýšení kvality odlitku. [27,28]

7.2 Analýza konečných prvků (FEA)

Analýza konečných prvků (FEA) je numerická metoda používaná k analýze rozložení napětí, deformací a teplot v pevných konstrukcích vystavených tepelnému a mechanickému zatížení.

Při vysokotlakém lití může FEA modelovat tepelné a mechanické chování formy během procesu odlévání. Dokáže předvídat teplotní gradienty, zbytková napětí a deformace ve formě v důsledku tepelné roztažnosti a smršťování.

Simulace FEA pomáhají při navrhování a optimalizaci materiálů forem, chladicích systémů a podpůrných konstrukcí s cílem minimalizovat tepelné zkreslení a zajistit rozměrovou přesnost odlitků. [27,28]

7.3 Modelování fázových změn

Modelování fázových změn je zásadní pro simulaci procesu tuhnutí během odlévání. Zahrnuje sledování polohy rozhraní pevná látka-kapalina, když roztavený kov tuhne v dutině formy.

K modelování jevů fázových změn a predikci vývoje čela tuhnutí lze použít různé numerické metody, jako je metoda entalpie-poréznosti nebo metoda objemu tekutiny (VOF).

Modelování fázových změn pomáhá optimalizovat teplotu formy, rychlost chlazení a složení slitiny pro řízení vývoje mikrostruktury a minimalizaci defektů v odlitcích. [27,28]

7.4 Optimalizace návrhu formy

Modelování přenosu tepla a proudění tekutiny lze použít k optimalizaci návrhu formy a uspořádání chladicího systému, aby se dosáhlo rovnoměrného rozložení teploty a řízené rychlosti tuhnutí.

Analýzou teplotních gradientů, rychlostí proudění a tlakových spádů v dutině formy mohou inženýři optimalizovat umístění a konfiguraci chladicích kanálů, aby zajistili efektivní odvod tepla a minimalizovali teplotní gradienty. [27,28]

8 NÁVRHY EXPERIMENTŮ A ANALÝZY

Metodika návrhu experimentů (v anglickém překladu Design of Experiments se zkratkou DOE) umožňuje systematické zkoumání procesních parametrů a jejich vlivů na kvalitu odlitků. Techniky jako faktoriální design, metoda plochy odezvy (RSM) a metody Taguchi lze použít k optimalizaci parametrů procesu a identifikaci kritických faktorů ovlivňujících kvalitu odlitku.

DOE je systematický přístup k plánování, provádění, analýze a interpretaci experimentů k pochopení a optimalizaci vztahu mezi vstupními proměnnými (faktory) a výstupními odezvami v procesu. V kontextu vysokotlakého lití je DOE cenným nástrojem pro studium vlivu procesních parametrů na kvalitu odlitku a pro optimalizaci procesních podmínek pro dosažení požadovaných výsledků. [29,30]

8.1 Faktorové návrhy

Faktorová provedení jsou nejběžnějším typem DOE používaným při vysokotlakém lití. Ve faktoriálním návrhu se na různých úrovních současně mění více faktorů (parametrů procesu), aby se studovaly jejich individuální účinky a také interakce mezi faktory.

Například faktory, jako je vstřikovací tlak, teplota formy a rychlost chlazení, lze měnit na několika úrovních, aby bylo možné zkoumat jejich vliv na kvalitu odlitku, jako je poréznost, rozměrová přesnost a mechanické vlastnosti. [29,30]

8.2 Metodika povrchu odezvy

Metodika povrchu odezvy je statistická technika používaná v DOE k modelování a optimalizaci vztahu mezi vstupními faktory a výstupními odezvami. RSM zahrnuje přizpůsobení matematických modelů, jako jsou lineární, kvadratické nebo polynomiální regresní modely vyššího řádu, na experimentální data, aby bylo možné předpovídat povrchy odezvy.

Při vysokotlakém lití lze RSM použít k identifikaci optimálních podmínek procesu, které maximalizují kvalitu odlitku nebo minimalizují vady analýzou povrchů odezvy a prováděním optimalizačních studií. [29,30]

8.3 Sekvenční experimentování

Postupné experimentální přístupy, jako je sekvenční návrh experimentů nebo metodika povrchu odezvy s adaptivním vzorkováním, umožňují iterativní zpřesňování podmínek procesu na základě předchozích experimentálních výsledků.

Při vysokotlakém lití umožňuje sekvenční experimentování neustálé zlepšování parametrů procesu a kvality odlévání prostřednictvím iterativního experimentování a optimalizace.

DOE může být výkonný nástroj pro studium a optimalizaci procesů vysokotlakého lití. Systematickými změnami parametrů procesu, analýzou experimentálních dat a optimalizací podmínek procesu mohou inženýři identifikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu odlitků, optimalizovat nastavení procesu a efektivně dosáhnout požadovaných výsledků. (Obrázek 19) [29,30]



Obrázek 19: Schéma Design of Experiments [33]

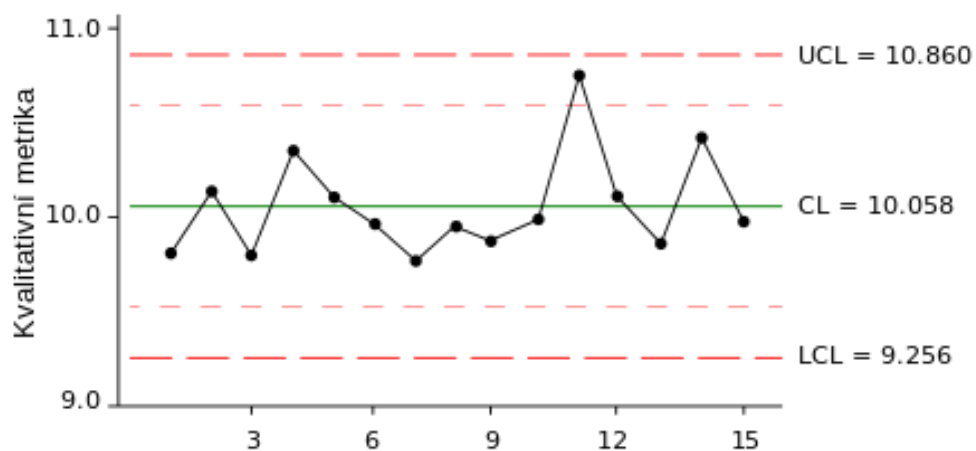
8.4 Statistická kontrola procesu (SPC)

Techniky statistického řízení procesu (SPC) umožňují monitorování a řízení parametrů procesu v reálném čase pro zajištění konzistentní kvality odlitku. Řídicí diagramy, analýzu způsobilosti procesu a metodologii Six Sigma lze použít k identifikaci procesních variací, snížení defektů a zlepšení výkonnosti procesu.

Statistical Process Control (SPC) je metodologie používaná ve výrobním a zpracovatelském průmyslu k monitorování, kontrole a zlepšování kvality produktů a procesů prostřednictvím statistické analýzy. V kontextu vysokotlakého lití jsou techniky SPC zásadní pro zajištění konzistentní kvality odlitku, identifikaci odchylek v procesu a minimalizaci defektů. Zde je přehled statistického řízení procesu a jeho aplikací při vysokotlakém lití. [31,32]

8.4.1 Kontrolní diagramy

Regulační diagramy jsou grafické nástroje používané k monitorování změn procesu v průběhu času vynesemím vzorových datových bodů proti kontrolním limitům (Obrázek 20).



Obrázek 20: Regulační diagram [34]

Kontrolní diagramy poskytují vizuální indikace stability procesu a pomáhají identifikovat stavy mimo kontrolu, které vyžadují vyšetření a nápravná opatření. [31,32]

8.4.2 Analýza způsobilosti procesu

Analýza způsobilosti procesu hodnotí schopnost procesu splnit specifikované požadavky na kvalitu porovnáním variability procesu s limity specifikace.

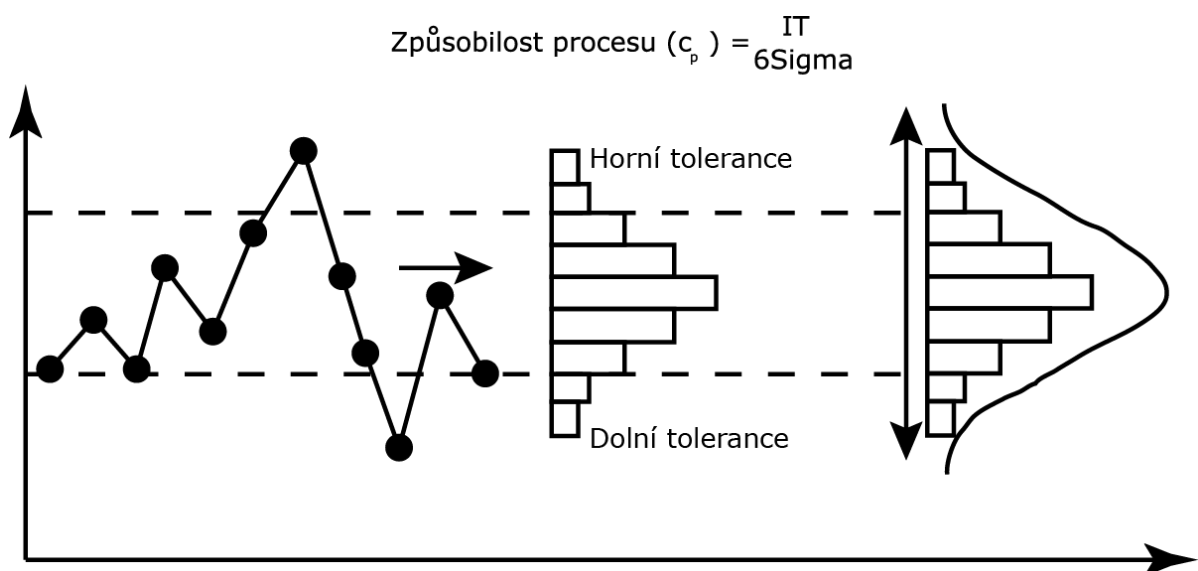
Indexy způsobilosti (C_p , C_{pk}): Kvantifikuje vztah mezi variabilitou procesu a limity specifikací, udávající, zda je proces schopen splnit požadavky zákazníka.

Indexy výkonnosti procesu (P_p , P_{pk}): Podobné jako indexy schopností, ale berou v úvahu jak v rámci podskupiny, tak i celkové variace ve výkonnosti procesu.

Analýza způsobilosti procesu pomáhá posoudit schopnost procesů vysokotlakého lití vyrábět díly v rámci specifikovaných tolerancí a norem kvality. [31,32]

8.4.3 Metodika Six Sigma

Six Sigma je datově řízený přístup pro zlepšování procesů, jehož cílem je omezit odchylky a vady ve výrobních procesech. Projekty Six Sigma se obvykle řídí strukturovanou metodologií známou jako DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) a využívají statistické nástroje a techniky, včetně SPC, k dosažení optimalizace procesu a redukce defektů. (Obrázek 21) [31,32,35]



Obrázek 21: Grafické znázornění Six Sigma [35]

Při vysokotlakém lití lze použít metodologii Six Sigma k identifikaci kritických parametrů procesu, snížení variability procesu a optimalizaci nastavení procesu pro zlepšení kvality a výtěžnosti odlévání.

8.4.4 Analýza hlavní příčiny

Techniky SPC usnadňují analýzu hlavních příčin tím, že poskytují náhled na zdroje procesních variací a defektů. Když jsou na regulačních diagramech detekovány podmínky mimo kontrolu, inženýři používají techniky, jako je Paretova analýza, diagramy Ishikawa (rybí kost) a 5 Proč, k identifikaci a řešení základních příčin odchylek procesu.

Analýza hlavních příčin pomáhá identifikovat nápravná opatření k řešení problémů procesu, zlepšení stability procesu a zabránění opakování defektů při operacích vysokotlakého lití. [31,32]

8.4.5 Sledování a kontrola v reálném čase

Techniky SPC umožňují monitorování a řízení procesů vysokotlakého lití v reálném čase, aby byla zajištěna konzistentní kvalita a výkon. Automatizované systémy sběru dat, senzory a software pro monitorování procesů se používají ke sběru, analýze a vizualizaci procesních dat v reálném čase.

Implementací zpětnovazebních regulačních smyček a alarmů založených na signálech regulačních diagramů mohou inženýři rychle zasáhnout, aby opravili odchylky procesu, zabránili neshodám a udrželi stabilitu procesu. [31,32]

8.4.6 Neustálé zlepšování

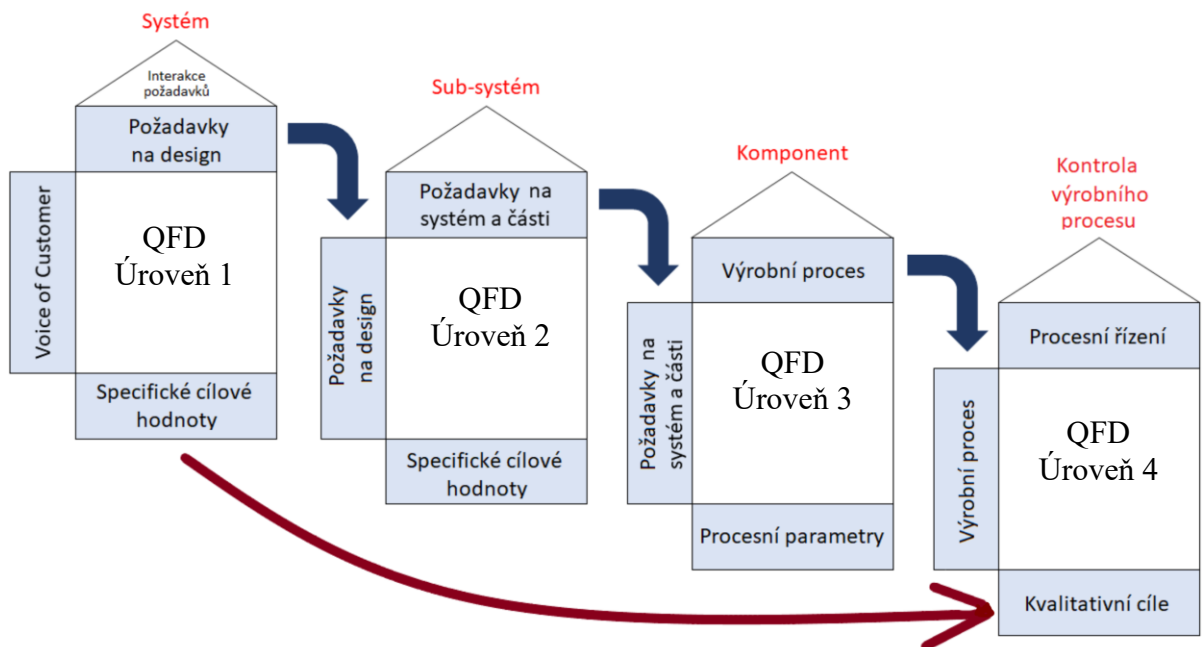
SPC podporuje kulturu neustálého zlepšování tím, že poskytuje strukturovaný rámec pro rozhodování na základě dat, řešení problémů a optimalizaci procesů. Prostřednictvím průběžného monitorování, analýzy a zpětné vazby mohou organizace identifikovat příležitosti ke zlepšení procesů a implementovat nápravná opatření ke zlepšení kvality odlitků, snížení nákladů a zvýšení produktivity v průběhu času.

Stručně řečeno, Statistical Process Control (SPC) je cenná metodika pro monitorování, řízení a zlepšování procesů vysokotlakého lití. Využitím regulačních diagramů, analýzy způsobilosti procesu, analýzy hlavních příčin a technik monitorování v reálném čase mohou inženýři zajistit konzistentní kvalitu, minimalizovat vady a řídit neustálé zlepšování operací vysokotlakého lití. [31,32]

8.5 Nasazení funkce kvality (QFD)

Nasazení funkcí kvality (QFD) je systematický přístup k převodu požadavků zákazníků do specifických charakteristik produktů a procesů. Techniky QFD, jako je House of Quality (HOQ), lze použít k upřednostnění technologických parametrů na základě jejich vlivu na kvalitu odliktů a spokojenost zákazníků.

Nasazení funkce kvality (Quality Function Deployment – QFD) je systematická metodika, která slouží k převodu požadavků zákazníka na konkrétní vlastnosti výrobku nebo procesu. V kontextu vysokotlakého lití QFD umožňuje propojit požadavky zákazníka s technologickými parametry a kritérii kvality, aby bylo možné optimalizovat výrobní procesy a dosáhnout vysoké úrovně spokojenosti zákazníka. (Obrázek 22) [36,37]



Obrázek 22: Fáze tvorby QFD [36]

8.5.1 Identifikace požadavků zákazníka

Prvním krokem při nasazení QFD je identifikace požadavků zákazníka, které se týkají vlastností výrobku, jako jsou například rozměry, mechanické vlastnosti, povrchová úprava nebo odolnost vůči korozi. Tato data mohou být získána prostřednictvím průzkumu zákazníků, analýzy trhu nebo požadavků specifikovaných v kontraktu. [36,37]

8.5.2 Identifikace funkcí kvality

Na základě identifikovaných požadavků zákazníka jsou definovány funkce kvality, které přímo ovlivňují tyto požadavky. Tyto funkce mohou zahrnovat technologické parametry, procesní vlastnosti nebo vlastnosti výrobku, které jsou klíčové pro splnění požadavků zákazníka. [36,37]

8.5.3 Propojení funkcí kvality s technologickými parametry

Dalším krokem je propojení funkcí kvality s konkrétními technologickými parametry, které ovlivňují tyto funkce. V případě vysokotlakého lití mohou tyto parametry zahrnovat například teplotu formy, tlak litého kovu, rychlost vstřikování nebo materiálové vlastnosti. [36,37]

8.5.4 Prioritizace a hodnocení technologických parametrů

Na základě propojení funkcí kvality s technologickými parametry jsou technologické parametry prioritizovány a hodnoceny podle jejich vlivu na splnění požadavků zákazníka. Metody jako House of Quality (HOQ) mohou být použity k vizualizaci vztahů mezi funkcemi kvality a technologickými parametry a k určení klíčových oblastí pro zlepšení. [36,37]

8.5.5 Optimalizace technologických parametrů

Na základě prioritizace technologických parametrů jsou provedeny opatření k optimalizaci procesů tak, aby byly dosaženy požadované vlastnosti výrobku a požadavky zákazníka. To může zahrnovat úpravy procesních parametrů, změny v návrhu forem nebo vylepšení výrobních postupů. [36,37]

8.5.6 Sledování a zlepšování výsledků

Po nasazení QFD je důležité neustále sledovat výsledky procesů a výrobků a porovnávat je s požadavky zákazníka. Získané poznatky mohou být použity k dalšímu zlepšování procesů a k optimalizaci technologických parametrů tak, aby byla dosažena maximální spokojenost zákazníka.

Výsledkem nasazení QFD v kontextu vysokotlakého lití by mělo být dosažení optimálního nastavení technologických parametrů a procesů, které umožňuje splnění požadavků zákazníka a vytváření vysoce kvalitních litých výrobků s minimálními vadami a ztrátami. [36,37]

9 SHRUTÍ DOSAVADNÍHO VÝZKUMU

Výzkum ukazuje, že správná volba technologických parametrů, jako je teplota taveniny, tlak lití, rychlost plnění forem a doba zadržetí tlaku, má významný vliv na jakost odlitků. Například, kontrola teploty taveniny při lití může minimalizovat vady spojené s nedostatečnou tekutinou. Studie se často zaměřují na identifikaci optimálních hodnot technologických parametrů, které vedou k minimálnímu množství vad v odlitcích a maximální kvalitě výsledného produktu. Například, experimenty mohou zkoumat, jak různé úrovně tlaku lití ovlivňují distribuci materiálu ve formě a jak to ovlivňuje konečnou strukturu odlitku. Použití mikro postřikové technologie při vysokotlakém lití přináší vylepšení jakosti odlitků. Tato technologie umožňuje lepší kontrolu nad aplikací materiálu a minimalizaci vad spojených s nedostatečným rozptýlením materiálu. Mikro postřiková technologie umožňuje přesnější a cílenější aplikaci materiálu, což vede k menšímu množství vad spojených s nedostatečným rozptýlením materiálu. Výzkumy zkoumají různé aspekty této technologie, jako je například optimalizace geometrie trysky, konstrukční řešení trysky a tlak aplikace, aby dosáhly maximální účinnosti.

Vliv mikrostrukturních parametrů, jako je velikost zrn a morfologie, na vlastnosti odlitků, mohou být ovlivněny technologickými faktory, a proto je důležité je pečlivě monitorovat a optimalizovat. Mikrostruktura materiálu má zásadní vliv na jeho mechanické vlastnosti a chování při zatěžování. Vývoj v oblasti numerického modelování a simulací umožňuje přesnější predikci vlastností odlitků na základě různých technologických scénářů. Pomáhá při optimalizaci procesů a minimalizaci výrobních vad. To umožňuje inženýrům provádět virtuální experimenty a optimalizovat procesy bez nutnosti drahých fyzických testů a opakování.

Zatímco některé studie využívají k analýze procesů odlévání základní modelovací a simulační nástroje, může existovat mezera v integraci pokročilých výpočetních technik, jako je analýza konečných prvků (FEA), výpočetní dynamika tekutin (CFD) nebo sdružené termomechanické modelování. Tyto pokročilé nástroje mohou poskytnout hlubší pochopení složité souhry mezi parametry procesu a kvalitou odlitků.

S rostoucím důrazem na udržitelnost a odpovědnost vůči životnímu prostředí by mohl budoucí výzkum směřovat k vlivu technologických parametrů na ekologickou stopu procesů vysokotlakého lití. Budoucí studie by mohly prozkoumat strategie optimalizace parametrů procesu pro snížení spotřeby energie, emisí a plýtvání materiálem.

Vzhledem k tomu, že průmyslová odvětví stále více vyžadují komponenty s materiálovými vlastnostmi na míru, jedním z předmětů dalšího průzkumu by mohl být vliv technologických parametrů na multimateriálové a hybridní odlévací procesy. Budoucí výzkum by mohl prozkoumat optimalizaci procesních parametrů pro součásti odlévání s odlišnými materiály, rozhraními nebo odstupňovanými mikrostrukturami.

Zatímco monitorování a řízení procesu hrají klíčovou roli při zajišťování kvality odlévání, stálo by se zaměřit na výzkum týkající se integrace pokročilých monitorovacích a kontrolních strategií do procesů vysokotlakého lití. Zaměřit by se mělo na vývoj monitorovacích systémů v reálném čase, prediktivní analýzy a řídicích algoritmů s uzavřenou smyčkou pro optimalizaci parametrů procesu a zmírnění defektů v reálném čase.

Řešení těchto mezer ve stávající literatuře by nejen zlepšilo naše chápání vlivu technologických parametrů na kvalitu odlitků, ale také by podnítilo inovace a zlepšení procesů vysokotlakého lití směrem k udržitelnějším, efektivnějším a spolehlivějším výrobním postupům.

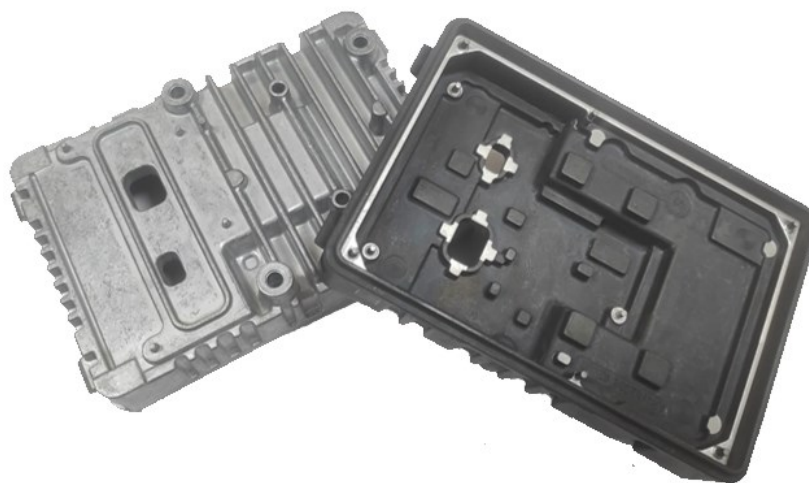
II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této diplomové práce je nastavení procesu výroby pro tvarově složité odlitky k zajištění požadované kvality za použití technologie mikro postřiku. Díky přesnému určení technologických postupů a parametrů výroby, správnému seřízení licího centra a dalších zařízení se pokusím co nejlépe optimalizovat proces a zároveň dosáhnout co nejvyšší kvality. Praktická část je dělena do několika kapitol, tak abych byl schopen zohlednit všechny aspekty procesu výroby už od samotného počátku. Ve finále dochází k porovnání mezi konvenční metodou postřiků a aplikací mikro postřikové technologie a kvalitativnímu zhodnocení odlitku při použití technologie mikro postřiku. Výzkum je prováděn na půdě firmy MESIT & RÖDERS v.o.s. slévárny pro vysokotlaké lití hliníkových odlitků.

11 ODLÉVANÝ PRODUKT

Testovaným odlitkem je součást určená pro automobilový průmysl, konkrétně do světa elektromobility. Odlitek ve finální podobě bude instalován do osobních vozů v kategorii bateriových elektrických vozidel, nebo taky plug-in hybridních elektrických vozidel. Do odlitku je instalována elektro komponenta v podobě základové desky, ale to vše již samotným zákazníkem. Úkolem procesu vysokotlakého lití je vyhotovení odlitku z houževnatého materiálu, dle požadavků a kritérií zákazníka na jakost odlitku (Obrázek 23).



Obrázek 23: Vyráběný odlitek

Odlitek je určen pro velkosériovou výrobu, forma je koncipována jako čtyřnásobná. Hmotnost vsázky pro jeden cyklus je 2520 gramů slitiny Trimal 37, hmotnost samotného odlitku je 247 gramů. Odlitek je tvarově složitý, díky hlubokému žebrování, a především díky pinům průměru již od 1,5 mm. U odlitku je kladen největší důraz na rovinnost, vnitřní strukturu, strukturu povrchovou a rozměrovou přesnost.

12 PŘÍPRAVA MATERIÁLU A TAVENÍ

K správnému nastavení procesů lití a pochopení vlivu všech parametrů a aspektů působící na kvalitu odlitků a proces vysokotlakého lití, je zapotřebí začít výzkum už na samotném začátku procesu, a to při výběru slitiny a kontrole samotného procesu tavení.

12.1 Trimal 37

Jedná se o slitinu hliníku (AlSi9Mn) bez tepelného zpracování s nejvyšší kapacitou absorpce energie a vysokou pevností. Slitina Trimal 37 (AlSi9Mn) byla vyvinuta speciálně pro proces tlakového lití pod vysokým tlakem (Obrázek 24). Ve srovnání s běžnými tlakově litými slitinami má vynikající tažnost a dobré schopnosti pohlcovat energii. V důsledku toho je Trimal 37 zvláště vhodný pro součásti, které musí vykazovat vysokou tažnost bez jakéhokoli nebo nákladného tepelného zpracování.

Trimal 37 má vynikající slévatelnost díky obsahu křemíku kolem 9 % a je tak ideální pro odlévání komplikovaných struktur. Nízký obsah železa v Trimal 37 zabraňuje tvorbě hrubých intermetalických fází, mangan zabraňuje ulpívání na matrici. U extrémně rozměrných konstrukčních dílů lze provést další opatření proti slepení. Rafinací stronciem je struktura eutektického křemíku tak jemná, že jej nelze pozorovat pod světelným optickým mikroskopem ani při 1000x zvětšení.

Prvky zirkon a mangan vytvářejí potřebnou pevnost při pokojové teplotě a poskytují dobrou tepelnou stabilitu při vyšších teplotách. Eutektický křemík může být globulizován krátkým žíháním, které se provádí pod teplotou blistru, čímž se ještě dále zvýší tažnost. Nízký obsah hořčíku zabraňuje stárnutí materiálu.



Obrázek 24: Ingoty Trimal 37 AlSi9Mn

12.1.1 Chemické složení

Následující tabulka ukazuje referenční analýzu pro popsany materiál v hmotnostních procentech.

Tabulka 1: Chemické složení slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zr	Zn	Ti	Sr	Další
Min.	8,5	-	-	0,3	-	0,1	-	-	0,006	-
Max.	10,5	0,15	0,05	0,6	0,08	0,3	0,05	0,15	0,027	Al

12.1.2 Mechanické vlastnosti

Následující mechanické vlastnosti byly stanoveny pomocí skutečných dílů a jsou považovány za referenční hodnoty pro použití slitiny.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)

Třída ošetření	Yangův modul [GPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdość [HB]
F	65-75	120-140	250-290	8-15	80-90
O	65-75	100-120	200-240	10-18	65-75

Většina **F** produktů jsou „polotovary“. Jsou použity při tvarování, konečné úpravě nebo tepelných procesech k dosažení jiných konečných forem nebo temperování. **O** žíhaný. K dosažení nejnižší pevnosti slitiny se používají úpravy žíháním. Hlavním důvodem je maximalizace zpracovatelnosti nebo zvýšení houževnatosti a tažnosti.

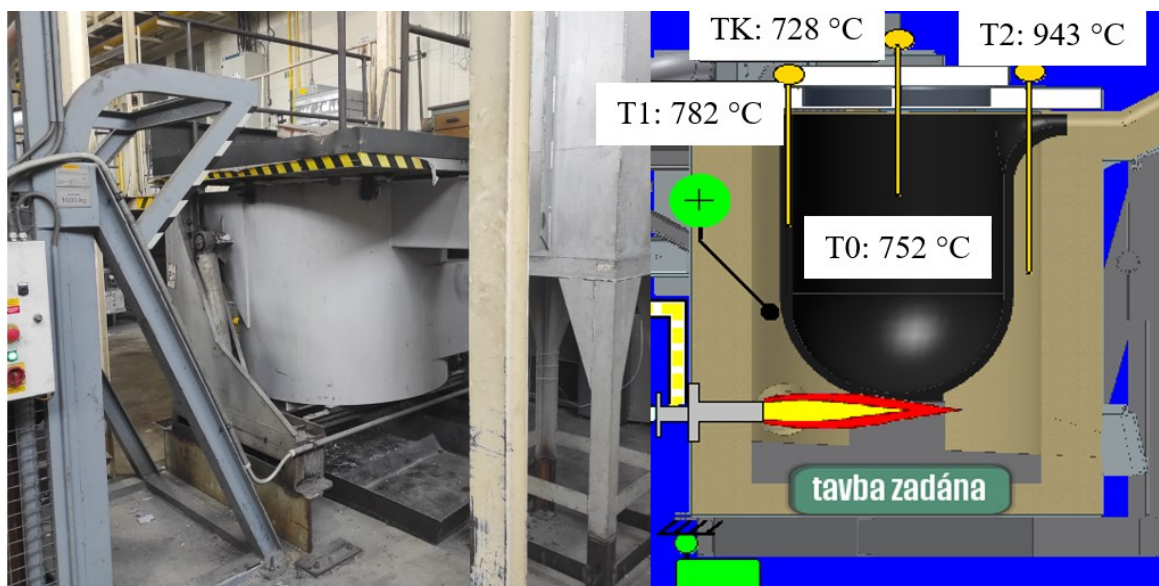
Jelikož slitina Trimal 37 disponuje vlastnostmi, které bude odlitek v procesu výroby vyžadovat a stejně tak v požadavcích na finální vlastnosti, je Trimal 37 optimální volbou slévárenské slitiny. Disponuje vynikajícím chováním při odlévání a vyplňování, lze snadno vyjmout z matrice, má vysokou tepelnou stabilitu, vysokou tažnost v kombinaci s pevností, dobrou odolnost proti korozi a je svařitelný všemi běžnými metodami svařování.

12.1.3 Proces tavení slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)

Postup a správné nastavení v průběhu procesu tavení je nezbytným krokem k vyhotovení kvalitních odlitků. Správně připravená tavenina pomůže zajistit splnění velkých požadavků na vnitřní kvalitu odlitku a mechanických vlastností. Při tavení hliníkových slitin je nutné dodržet tři hlavní zásady, co nejrychleji natavit kov, správně ošetřit taveninu a udržovat taveninu po celou dobu na stanovené teplotě.

K natavení slitiny je použita sklopná kelímková pec s rekuperačním systémem, kde tavenina je ve složení 70 % čistého materiálu v podobě nových ingotů a 30 % taveniny je recyklovaná slitina Trimal 37, která byla ve výrobě již použita (Obrázek 25). Teplota taveniny v průběhu tavení nesmí překročit 780 °C, aby nedošlo k přehřátí taveniny. Přehřátí taveniny může způsobit zvýšenou oxidaci, zvýšený obsah rozpuštěného vodíku a vyhoření legujících prvků (např. hořčík, stroncium). Slitina Trimal 37 se taví na teplotu 750 °C.

K regulaci teplot a nastavení tavby se využívá ovládacích panelů pecí. Pece jsou řízeny za pomoci termočlánků, které zajišťují regulaci teploty taveniny, při samotném tavení se měří teplota nepřímo. Neměří se přímá teplota taveniny, ale měří se teplota kelímku, která se přepočítá díky nastaveným korekcím na teplotu taveniny v kelímku. Na konci procesu tavení se nastaví pec do udržovacího stavu, kde se teplota kovu měří za pomoci termočlánku přímo ponořením v tavenině.



Obrázek 25: Sklopná kelímková pec s rekuperačním systémem

TK – skutečná teplota kovu, T0 – teplota uvnitř kelímku vypočítaná s korekcí, T1 – teplota kelímku měřená termočlánky, T2 – teplota spalovacího prostoru měřená termočlánky

12.1.4 Proces odplynění Trimal 37 (AlSi9Mn)

Nedílným procesem, než může být tavenina převezena do udržovací pece k vysokotlakému licímu stroji je odplynění materiálu a zbavení nečistot. Za pomoci rotoru a vhánění inertního plynu, kterým se vypuzuje vodík a příslušného programového nastavení se provede proces čištění taveniny. Tímto procesem se tavenina zbaví vměstků a alkalických kovů, čímž je zlepšena zabíhavost taveniny v procesu lití, sníží se porozita odlitků alepší se mechanické a povrchové vlastnosti výsledného odlitku. Tavenina je taky zbavena dalších nečistot v podobě oxidů, které jsou následně z povrchu taveniny odstraněny stěrkou (Obrázek 26).



Obrázek 26: Odplynění a čištění taveniny, přístroj FOSECO FDU Mark 100 MTS 1500

12.1.5 Kontrola slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)

Správnost celého procesu a míra odplynění taveniny se zkontroluje za pomoci měření indexu hustoty taveniny. Opatřením dvou vzorků z taveniny, pro atmosférické tuhnutí a tuhnutí při 90 % vakuu, tuhnutí probíhá 4 minuty. Vzorky jsou chlazeny ve vodě a proveden proces vážení. První vážení probíhá na vzduchu a následně pod vodou pro oba vzorky. Z hodnot hmotností na vzduchu a hodnot hmotností ve vodě obou vzorků přístroj Formatic Handy vypočítá hustotu a index hustoty taveniny (Obrázek 27). Pro taveninu slitiny Trimal 37 musí index hustoty taveniny vyjít maximálně 1. Index hustoty taveniny udává míru naplynění taveniny, za daného výpočtu v procentuálním množství.

	Vakuum	Atm. tlak
Hmotnost na vzduchu [g]	66,5	67,7
Hmotnost ve vodě [g]	41,46	42,39
Hustota [g/cm^3]	2,65575	2,67483
Index hustoty [%]	0,71	



Obrázek 27: Měření indexu hustoty taveniny

Dalším krokem před uvedením materiálu do výrobního procesu je ověření chemického složení, které je provedeno za pomoci spektrální analýzy. K měření je použit jiskrový spektrometr Q4 Tasman (Obrázek 28). Je opatřen vzorek taveniny, vybroušena plocha, na které se provádí jiskření a za pomoci přístroje a automatického vyhodnocovacího systému je vytvořen protokol o chemickém složení taveniny (Obrázek 28).



Obrázek 28: Jiskrový spektrometr Q4 Tasman

AATEST - Q4 TASMAN

Vzorek: P1-8/3

Datum analýzy: 18.03.2024 16:19:27

Metoda: Al 100

Jakost: HSI

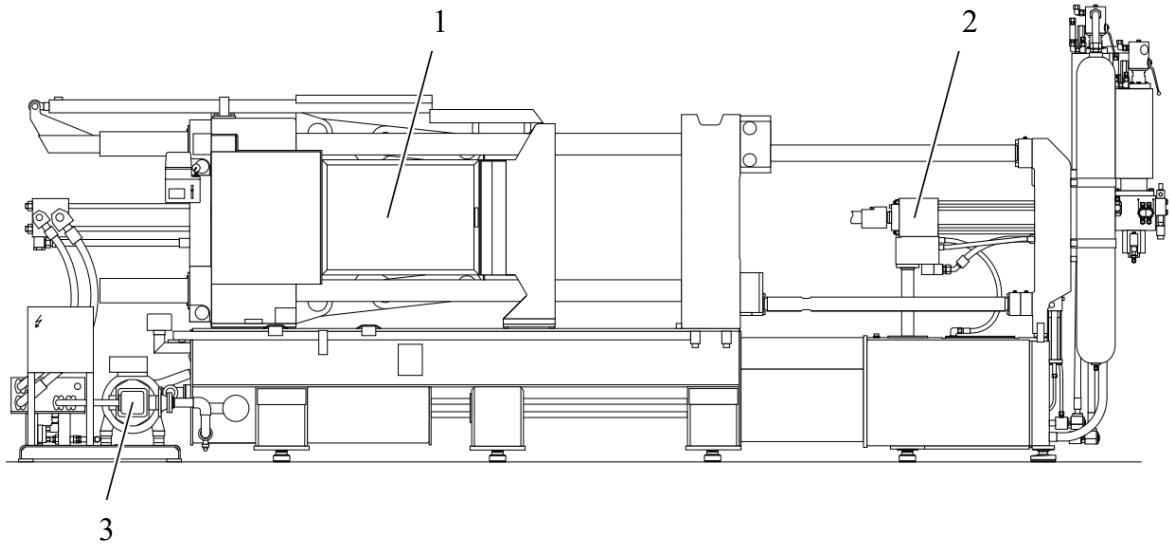
Shoda: Vyhovuje

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
††	10,50	0,150	0,050	0,600	0,080
∅	10,46	0,128	0,035	0,484	0,039
‡‡	9,50	0,000	0,020	0,350	0,000
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Ag [%]
††			0,0500	0,150	
∅	0,0020	0,0027	0,0089	0,077	0,0004
‡‡			0,0000	0,040	
	B [%]	Ba [%]	Be [%]	Bi [%]	Ca [%]
††					0,00200
∅	<0,00010	0,0002	0,00009	<0,0010	<0,00005
‡‡					0,00000
	Cd [%]	Co [%]	Ga [%]	In [%]	Li [%]
††					
∅	<0,00010	0,0002	0,0090	<0,0005	<0,00010
‡‡					
	Mo [%]	Na [%]	Pb [%]	Sn [%]	Sr [%]
††	0,3000	0,0020			0,020
∅	<0,0003	0,0002	0,0012	<0,0004	0,018
‡‡	0,0000	0,0000			0,008
	V [%]	Zr [%]	Sb [%]	Hg [%]	As [%]
††	0,100	0,200			
∅	0,052	0,122	<0,0070	0,0013	0,0017
‡‡	0,030	0,100			
	P [%]	Ce [%]	La [%]	Al [%]	Sc [%]
††	0,0020				
∅	<0,0008	0,0090	0,0031	88,55	<0,0010
‡‡	0,0000				

Obrázek 29: Výsledek spektrální analýzy slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)

13 UPNUTÍ FORMY A SEŘÍZENÍ LICÍHO CENTRA

K procesu odlévání je využit tlakový licí stroj se studenou komorou s horizontálním vstřikovacím pístem (Obrázek 30). Stroj se skládá ze tří hlavních modulů: uzavírací jednotky, licí jednotky a pohonné jednotky.



Obrázek 30: Tlakový licí stroj Bühler 84 D

1- Uzavírací jednotka, 2- Licí jednotka, 3- Pohonná jednotka

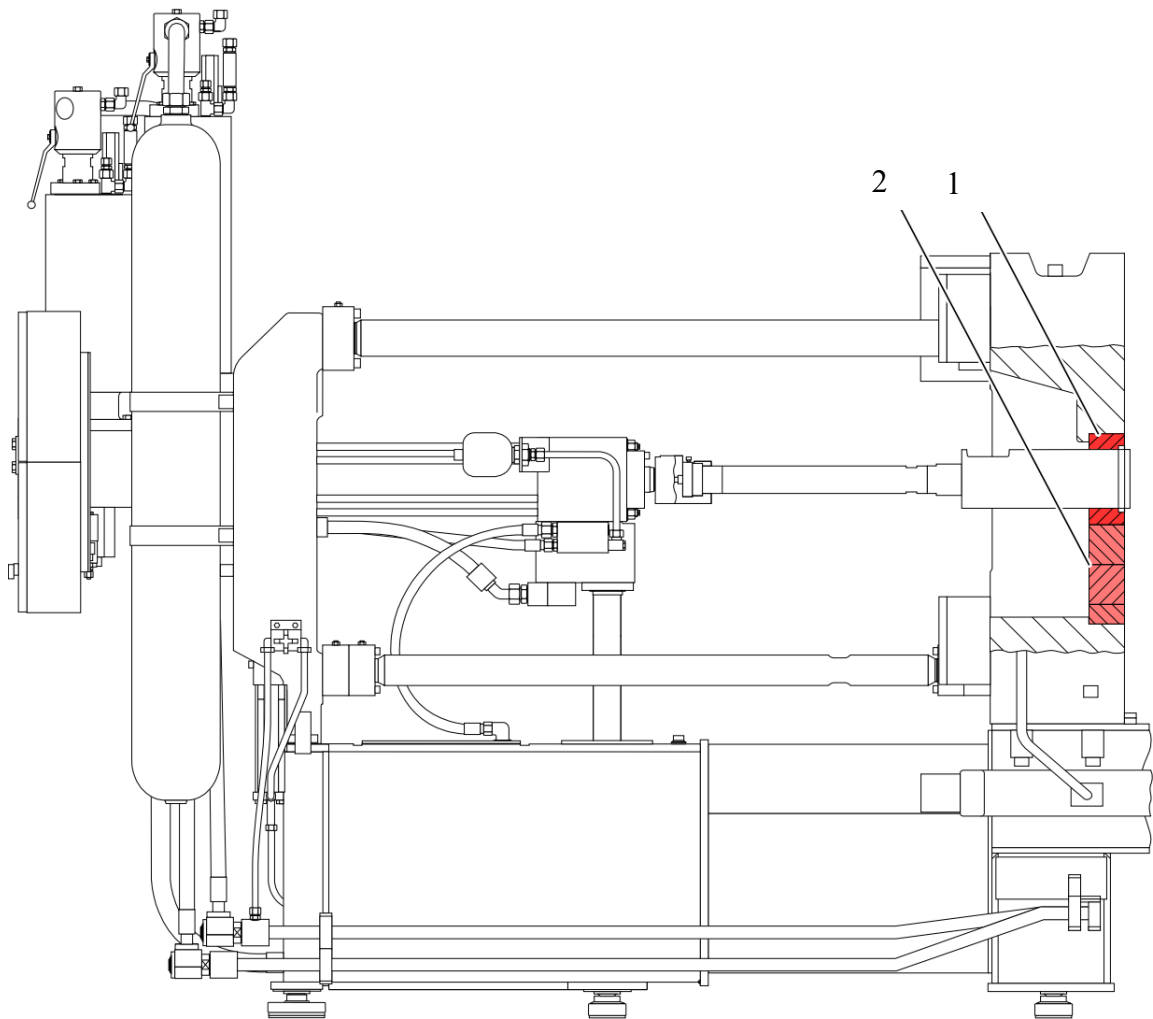
K ovládání a konfiguraci stroje je použit modernizovaný ovládací panel (Obrázek 31), systém DataView. Vstřikovací buňka může být konfigurována centrálně. Přitom mohou být individuálně zvoleny všechny komponenty stroje, periferní zařízení a funkce, potřebné pro tvorbu programu.



Obrázek 31: Ovládací systém stroje Bühler systém DataView

13.1 Příprava a seřízení licího centra

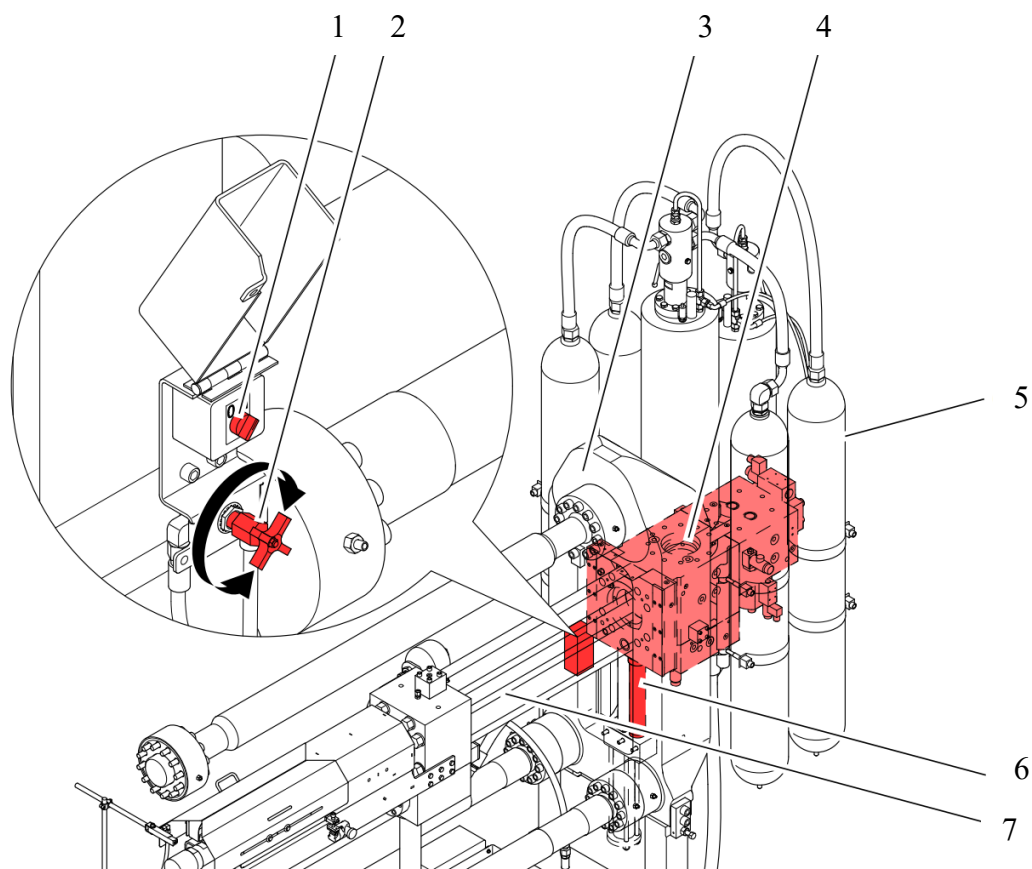
Prvním krokem je příprava upínacích desek licího stroje, tudíž očištění a lubrikace antikorozi pastou. Tím se zajistí čistota a ochrana mezi upínacími deskami a formou. Dalším krokem je montáž držáku licí komory společně s distančními deskami (Obrázek 32). Za pomoci distančních desek (2) je určena výška pro licí komoru a následné usazení pevné části formy. Distanční desky společně s držákem komory (1) se zaaretuje pomocí pneumatické vrtačky a osmi šroubů. Výška je nastavena do 100 mm, dle konstrukce formy.



Obrázek 32: Montáž držáku licí komory a distanční desky

1 – Držák licí komory, 2 – Distanční desky

K seřízení lící pozice je dále zapotřebí pomocí distanční trubky a pohybu modulů lící jednotky (odlévací válec, vodící deska a řídicí blok, jednotka tlakových zásobníků) nastavit výšku pro vstřikovací píst do lící komory (Obrázek 33). Výška je seřízena vytvořením tlaku v hydraulickém systému, spínač (1) je nastaven do polohy „1“ a pomalu otevřen ventil (2), tím válec tlakového čerpadla zvedá pohyblivé moduly lící jednotky. Jakmile je dosaženo dorazu válce tlakového čerpadla, je vyměněna distanční trubka (4) a pomalu zavřen ventil (2), tím se spustí pohyblivé moduly lící jednotky a dosáhne se požadované výšky, ventil je uzavřen (2) a spínač (1) nastaven na „0“.

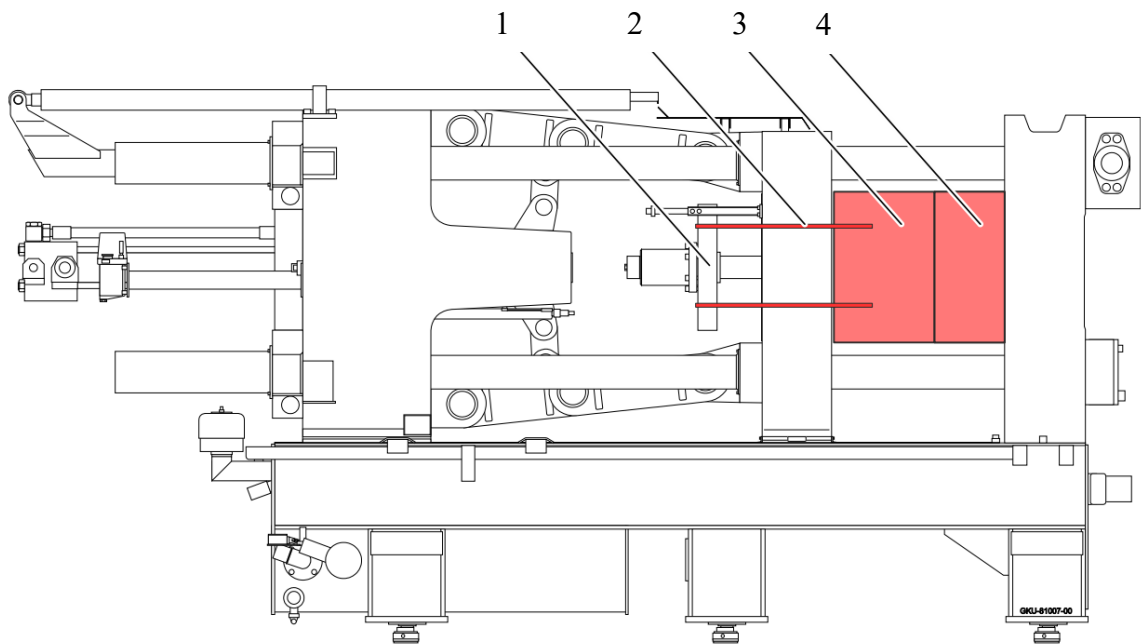


Obrázek 33: Výměna distanční trubky

- 1 – Spínač, 2 – Ventil, 3 – Vodící rám, 4 – Vodící deska a řídicí blok,
5 – Jednotka tlakového zásobníku, 6 – Distanční trubka, 7 – Lící válec

13.2 Upnutí licí formy

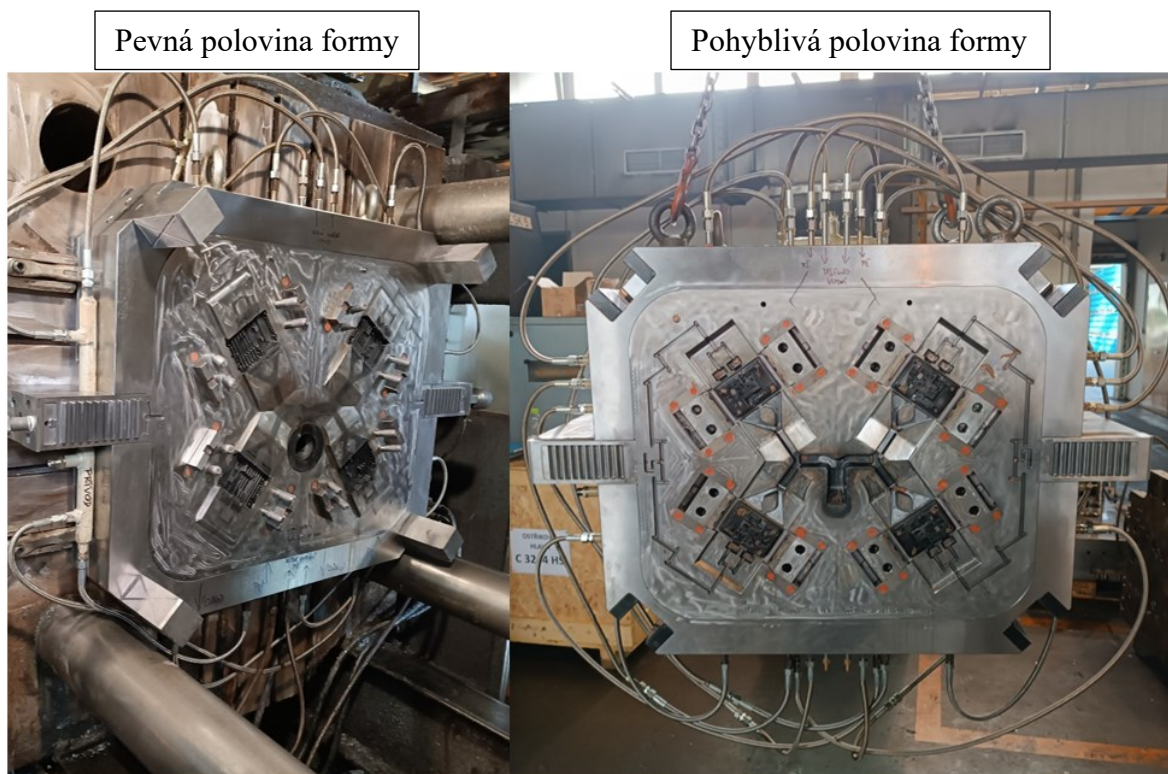
Jakmile je nastavena licí pozice společně s umístěnou licí komorou, o průměru licího otvoru $\varnothing 70$ mm a délkou 600 mm s rádiusem R10 mm, je možné upnout části licí formy (Obrázek 34).



Obrázek 34: Upnutí licí formy

- 1 – Vyhazovací deska, 2 – Vyhazovací tyče, 3 – Pohyblivá polovina formy,
4 – Pevná polovina formy

Jako první je upnuta pevná polovina formy za pomoci jeřábu (Obrázek 35), forma je zasunuta mezi sloupy, před upínací desku stroje. Forma je nasunuta na licí komoru k pevné montážní desce a vyrovnána její poloha pomocí vodováhy. Pevná polovina formy (4) je zafixována upínacími čelistmi na pevné montážní desce. Při tom jsou pevně utaženy matice.

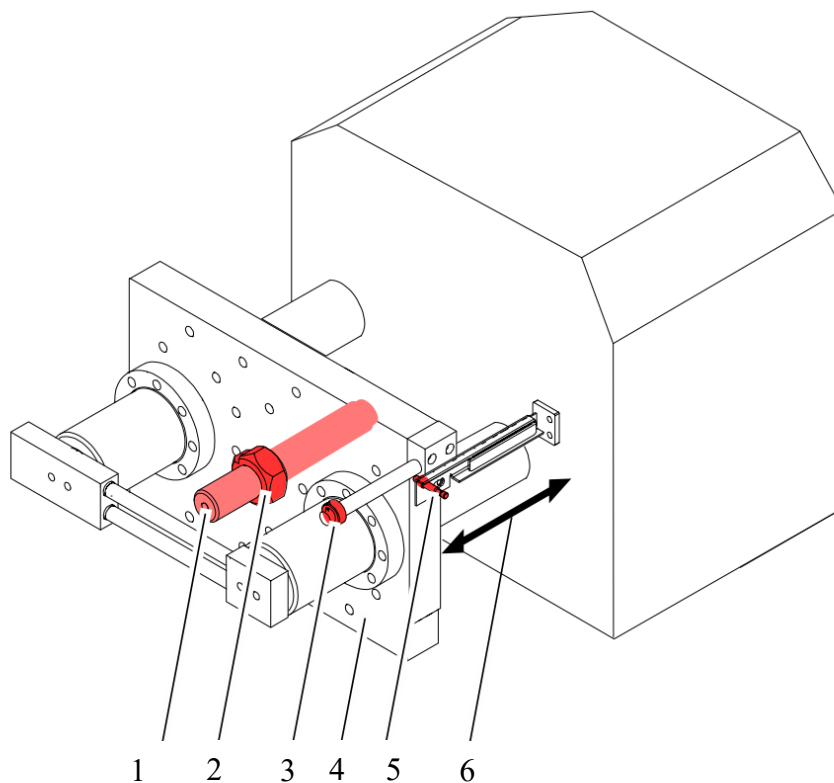


Obrázek 35: Upínání formy

V druhé řadě je upnuta pohyblivá část formy (Obrázek 35), pomocí jeřábu a nasunutím pohyblivé části formy (3) na kolíky pevné části formy (4) a upínací deskou jsou dotlačeny dělicí roviny forem k sobě. Pohyblivou upínací deskou je odjeto a vyhazovací tyče (2) jsou nasazeny do vrtaných otvorů pohyblivé montážní desky a vyhazovací desky (1), aby bylo možné přišroubovat vyhazovací tyče (2). Vyhazovací tyče (2) jsou pevně zašroubovány do závitových otvorů pohyblivé poloviny formy (3). Pohyblivá polovina formy (3) je zafixována upínacími příložkami na pohyblivé montážní desce, vyrovnána je pomocí vodováhy a následně upevněna. Vyhazovací tyče (2) jsou přišroubovány šrouby k vyhazovací desce (1) stroje. Při upínání je použito vyhazovacích tyčí o délce 520 mm.

13.2.1 Mechanické nastavení zdvihu vyhazovačů

Před samotným zapojením temperačních a chladících okruhů formy, je seřízen zdvih vyhazovačů (Obrázek 36), tím je předcházeno lámání odlitků, otláčením vyhazovačů a zajištěno bezpečné vyjmutí odlitku robotem.



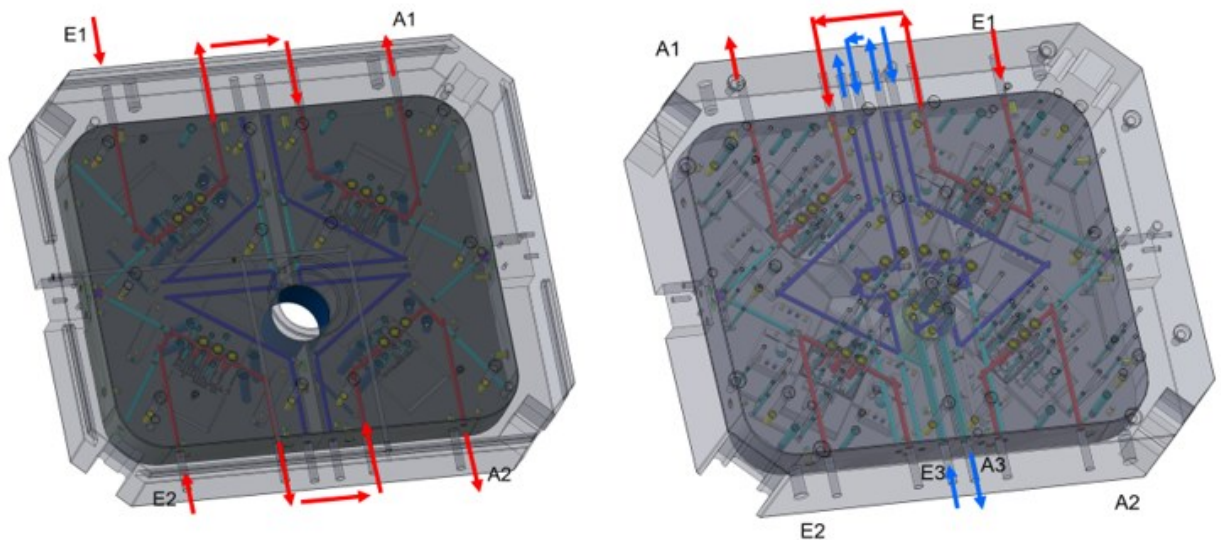
Obrázek 36: Mechanické nastavení zdvihu vyhazovačů

- 1 – Vřeteno, 2 – Matice, 3 – Vačka, 4 – Vyhazovací deska, 5 – Přibližovací spínač,
6 – Zdvih vyhazovače

Zdvih vyhazovačů (6) je nastaven uvolněním matice (2), následně nastavením vřetena (1), na požadovaný zdvih a utažením matic (2). Funkce a nastavení vyhazovačů je kontrolována na ovládacím panelu za pomoci čidel.

13.2.2 Zapojení temperačních a chladících okruhů

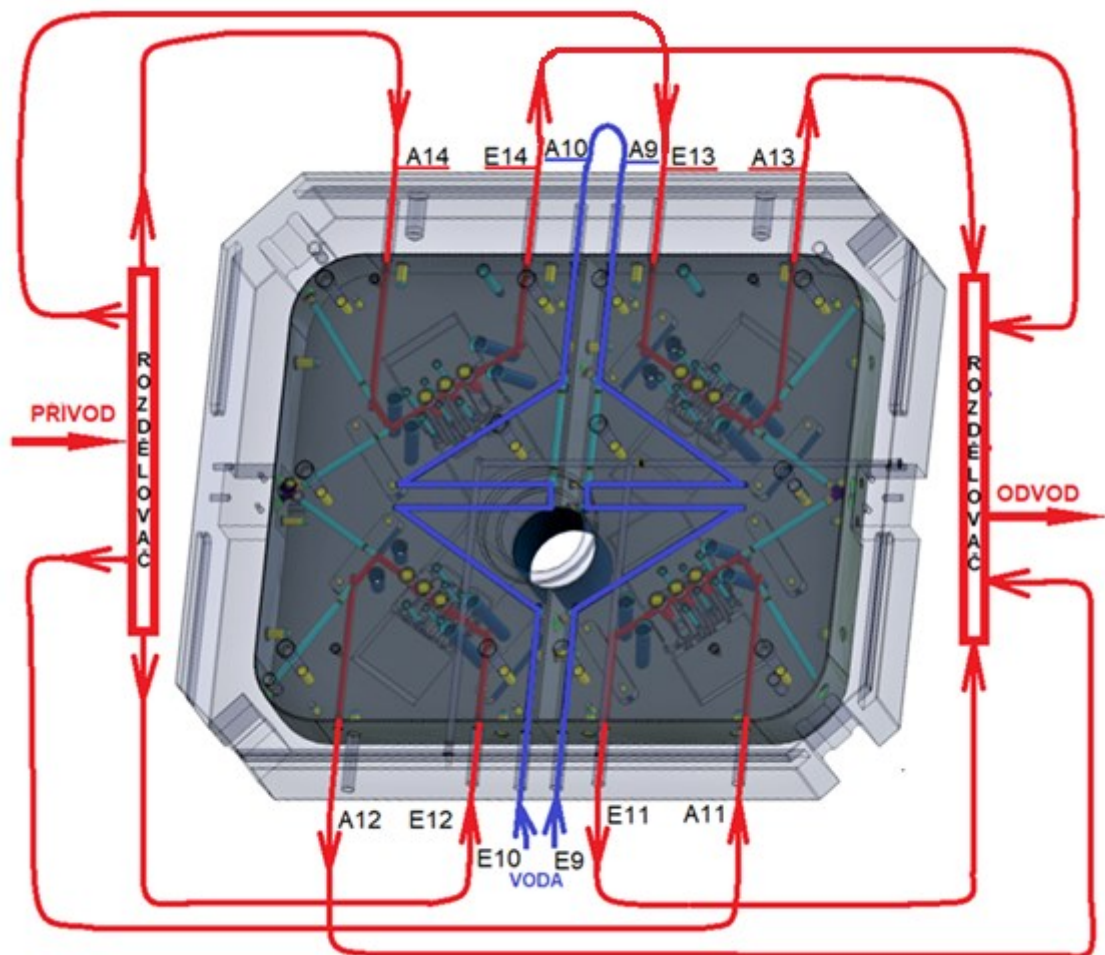
V této podkapitole dochází k pochopení úzkého vztahu s aplikací mikro postřiku, samotná aplikace mikro postřiku má mnoho výhod, avšak vyžaduje naprosto perfektní konstrukci temperačních a chladících okruhů ve formě. Jestliže by se tak nestalo, mohlo by docházet k zůstatku mikro postřikové emulze na formě vlivem teplot a následně se projevit i otisky na povrchu odlévaných dílů. Jelikož odlévané díly musí být jak vnitřně, tak i povrchově v perfektní kondici a bez jakýchkoliv defektů, tak je nutné dosáhnout teplotního optima.



Obrázek 37: Prvotní plán zapojení temperačních a chladících okruhů formy

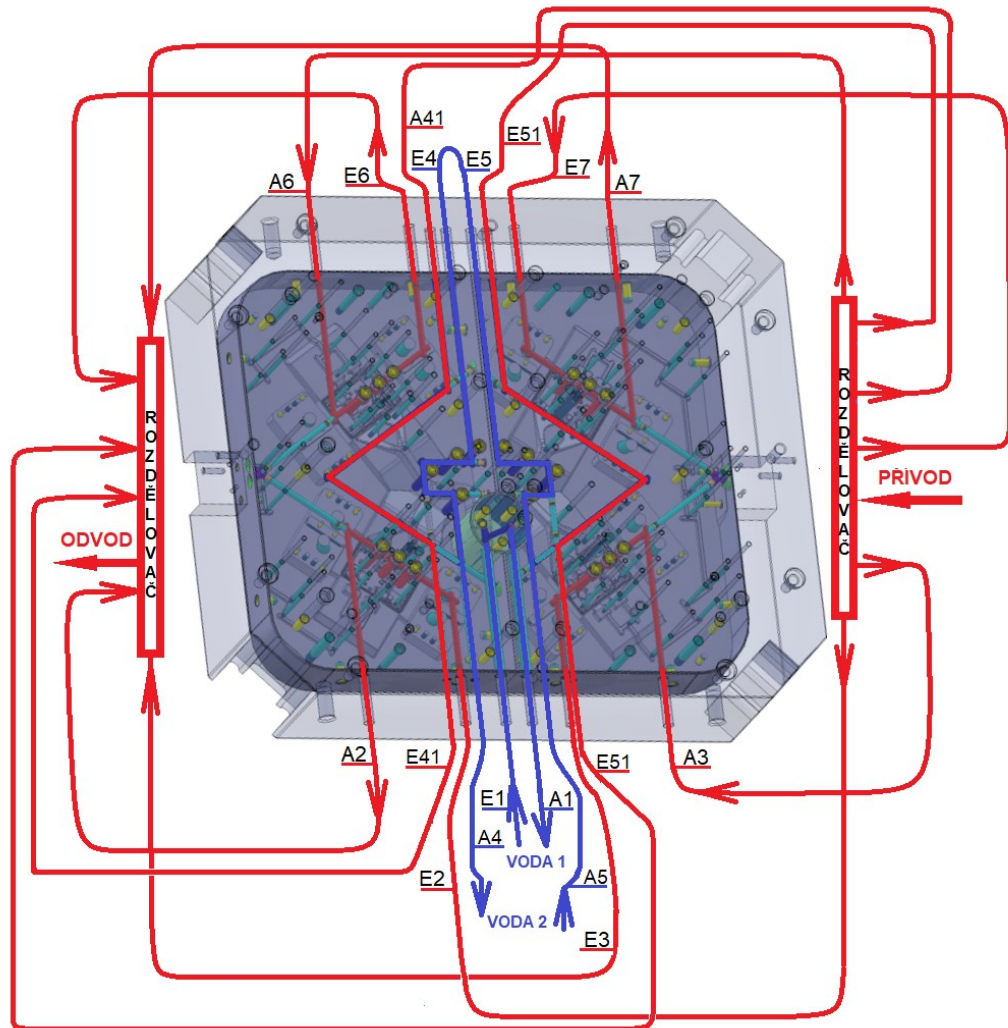
Prvotní plán při výrobě formy byl s následujícími okruhy (Obrázek 37), avšak po prvních testech se projevilo, že forma nemá temperační okruhy vhodně konstrukčně navrženy. Při použití mikro postřiku byly výsledky povrchu odlitku nepříznivé a na formě se tvořil nános spáleného ostřikového koncentrátu, díky nevhodnému chlazení. Taktéž kusy bylo komplikované odformovat. Proto bylo zapotřebí formu upravit a provést teplotní měření.

Na pevné polovině formy se přidaly rozdělovače a propojily s jednotlivými okruhy za účelem lepší regulace teplot (Obrázek 38). Teplota pro pevnou polovinu formy byla po testování stanovena na 140 °C jako optimální. A chladicí okruh formy byl nastaven do automatického režimu s dobou chlazení 60 sekund, aby docházelo k chlazení ve specifických intervalech v procesu lití a při možných odstávkách.

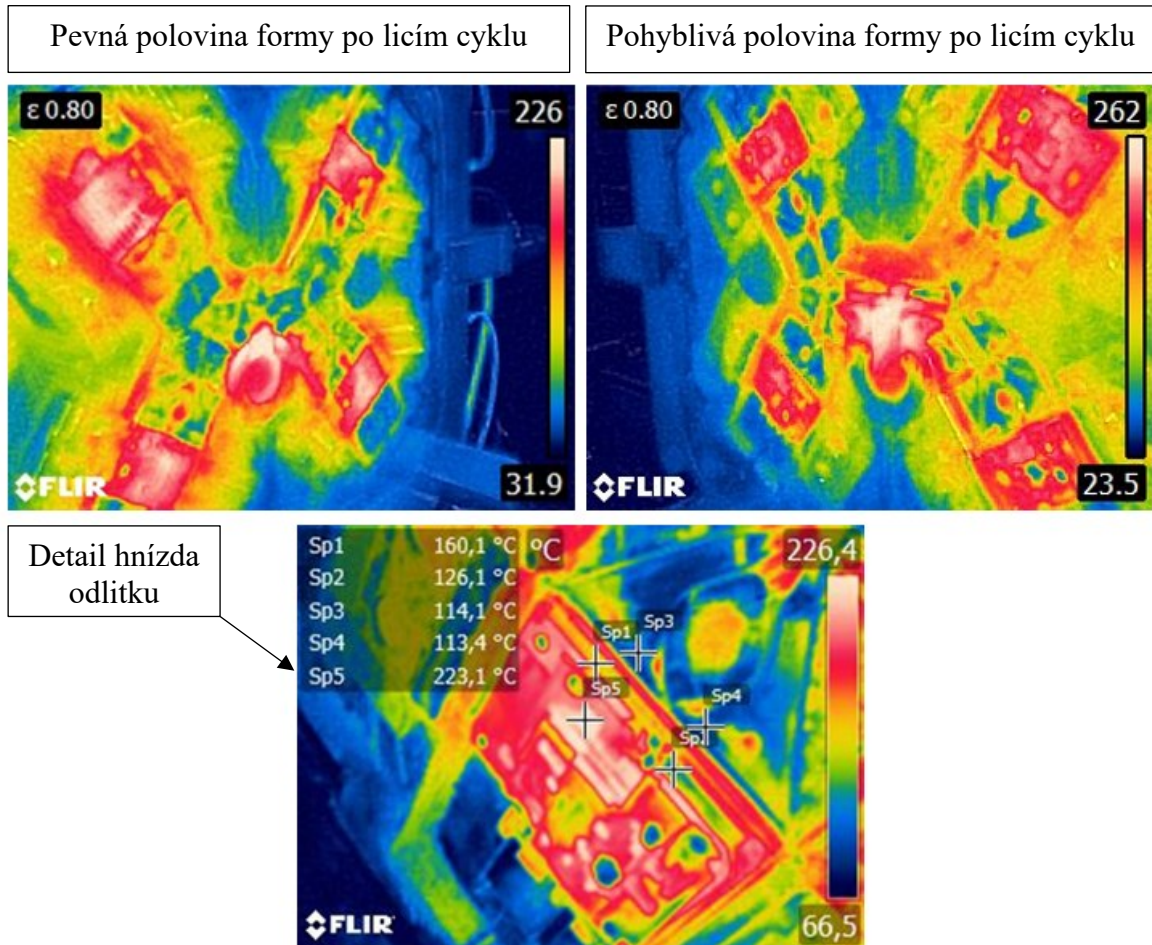


Obrázek 38: Zapojení temperačních a chladících okruhů pevné části formy

Na pohyblivé polovině formy se přidaly rozdělovače a rozdělil se středový okruh na dva jednotlivé okruhy (Obrázek 39). Teplota pro pevnou polovinu formy byla po testování stanovena na 130 °C jako optimální. A chladicí okruh formy byl nastaven do automatického režimu s dobou chlazení 60 sekund, aby docházelo k chlazení ve specifických intervalech v procesu lití a při možných odstávkách.



Obrázek 39: Zapojení temperačních a chladících okruhů pohyblivé části formy

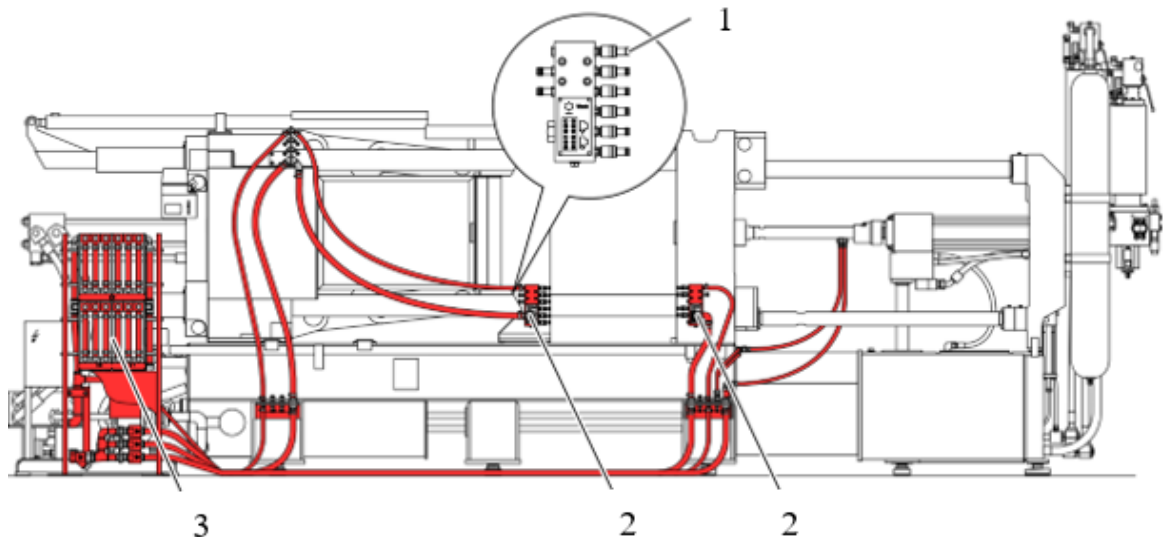


Obrázek 40: Teplotní snímky kamery po ostřikovacím cyklu za použití mikro postříkové technologie

Na teplotních snímcích kamery lze vidět vyvážená teplota ve všech hnízdech odlitku, vtokové části jsou temperovány taktéž dostatečně, což zajistí snadnější odformování a plynulý tok taveniny bez rychlého chladnutí.

Na detailu odlitku lze vidět, že tepelná mapa na hnízdě je nerovnoměrná, což je zapříčiněno konstrukčním řešením formy a vedením temperačních kanálů, zároveň však lze konstatovat že temperace/ chlazení formy i jednotlivých hnízd je dostatečné a při správném nastavení mikro postříkových trysek by povrch i odformování odlitku mělo být zcela v pořádku (Obrázek 40).

Chladicí okruhy jsou zapojeny do pevné části formy, pohyblivé části formy, chlazení do komory a je nutné taky chladit samotný vstřikovací píst, jinak by došlo k přehřátí a následnému zadření pístu (Obrázek 41).



Obrázek 41: Zapojení chladících okruhů stroje

1 – Rychlospojka, 2 – Přípojka chladicí vody, 3 – Regulátor průtoku

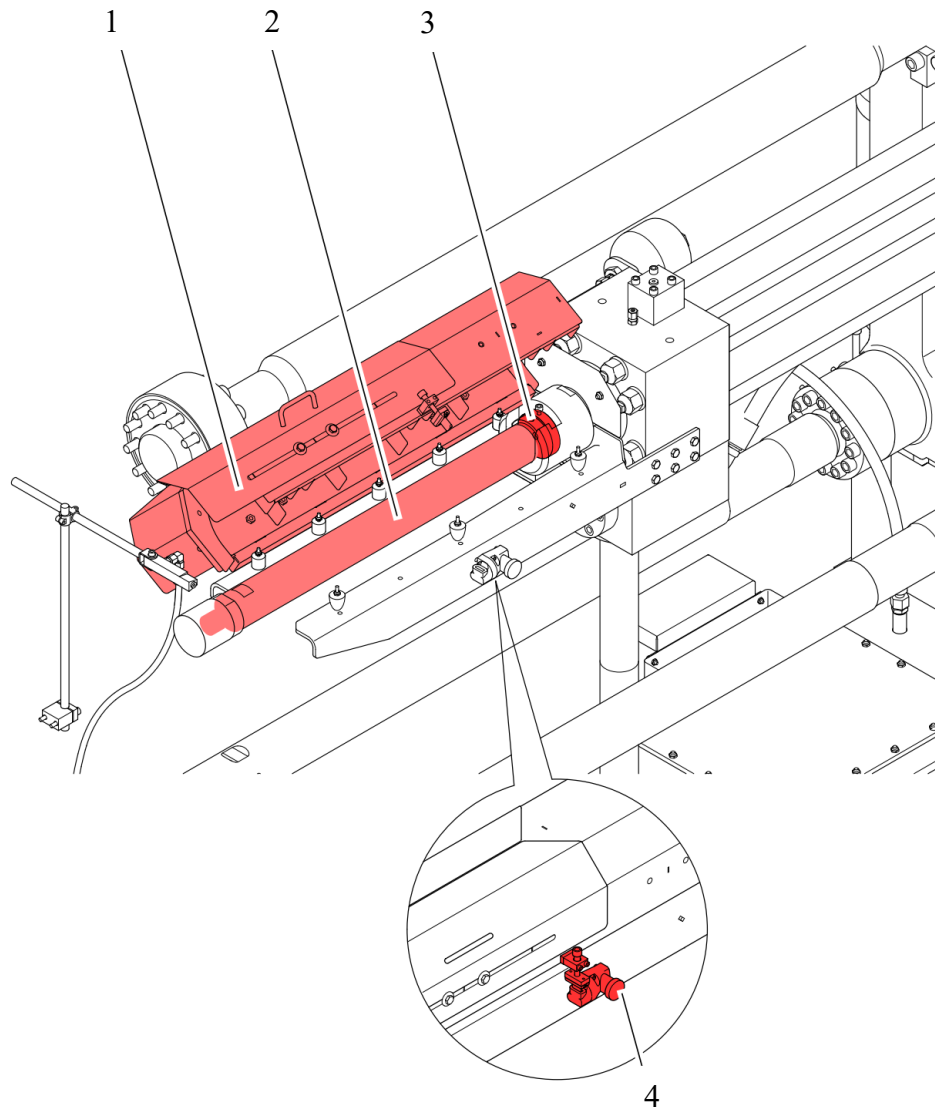
Pevná i pohyblivá část formy je temperována za pomoci temperačních zařízení, kde použité medium je speciální typ oleje na temperaci forem. Při práci s danou formou je zvolena teplota pro pevnou část formy 140 °C a pohyblivou část formy 130 °C s tolerancí 10 °C. Z nastavených teplot je tedy zřejmé, že v procesu se za pomoci temperačních okruhů je forma spíše chlazená. Nízké teploty temperace jsou zvoleny z důvodů mikro postřikové technologie, kdy forma není chlazená ostřikem, ale jen je nanášen separátor (Obrázek 42).



Obrázek 42: Temperační zařízení TOOL TEMP TT 388

13.3 Montáž vstřikovacího pístu

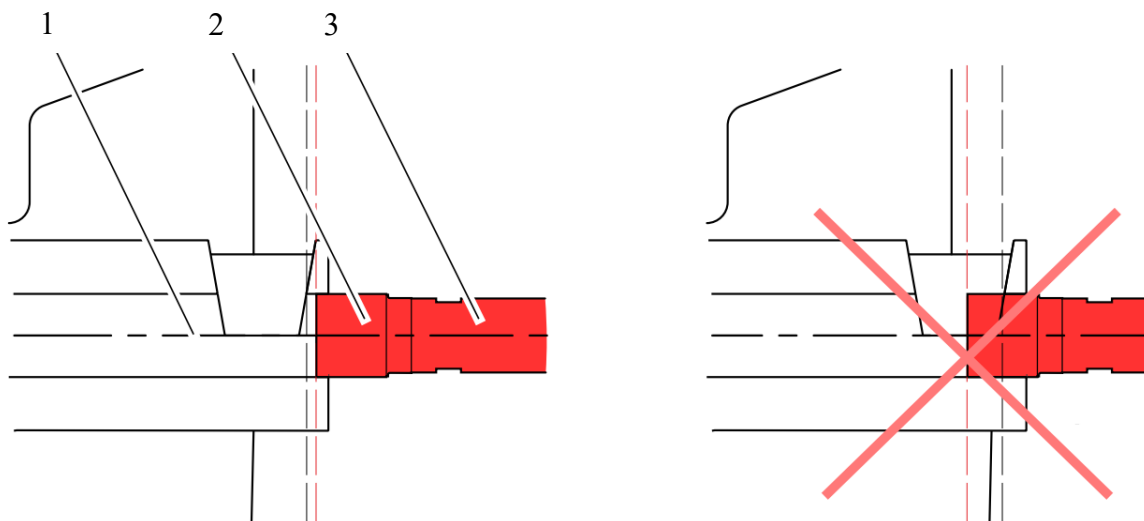
Je otevřen ochranný kryt (1) pístnice vstřikovacího pístu bezpečnostního spínače klíčkem (4). Vložen vstřikovací píst (2) s kotoučem spojky(3). Přišroubovány přípojky pro chladicí systém lící jednotky. Zavřen ochranný kryt vstřikovacího pístu a vytažen klíč z bezpečnostního spínače (Obrázek 43).



Obrázek 43: Montáž vstřikovacího pístu

1 – Ochranný kryt, 2 – Vstřikovací píst, 3 – kotouč spojky, 4 – Zámek

Píst nesmí zasahovat do prostoru nalévacího otvoru licí komory, došlo by k poškození pouzdra pístu a narušení dávkovacího cyklu (Obrázek 44). Píst je umístěn do komory přibližně 20 mm, a přitom dodržena aktivní licí délka, která je určena dle seřízení pístu komory a samotné formy na 580 mm.

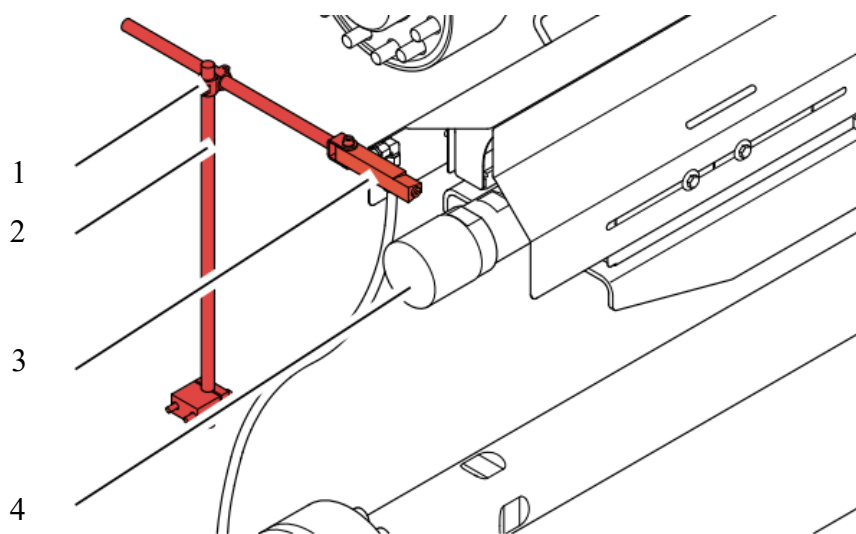


Obrázek 44: Umístění vstřikovacího pístu do komory

1 – Licí komora, 2 – Vstřikovací píst, 3 – Táhlo

13.3.1 Nastavení systému mazání vstřikovacího pístu

Mazání je nastaveno tak, aby při mazacím cyklu olej dopadl na střed čela licí komory a zároveň, aby se nedostal do licího otvoru, ale dokonale a rovnoměrně namazal obě poloviny pouzdra vstřikovacího pístu (Obrázek 45). Tímto je zamezeno dření pístu při vstřikování.



Obrázek 45: Nastavení mazání pístu

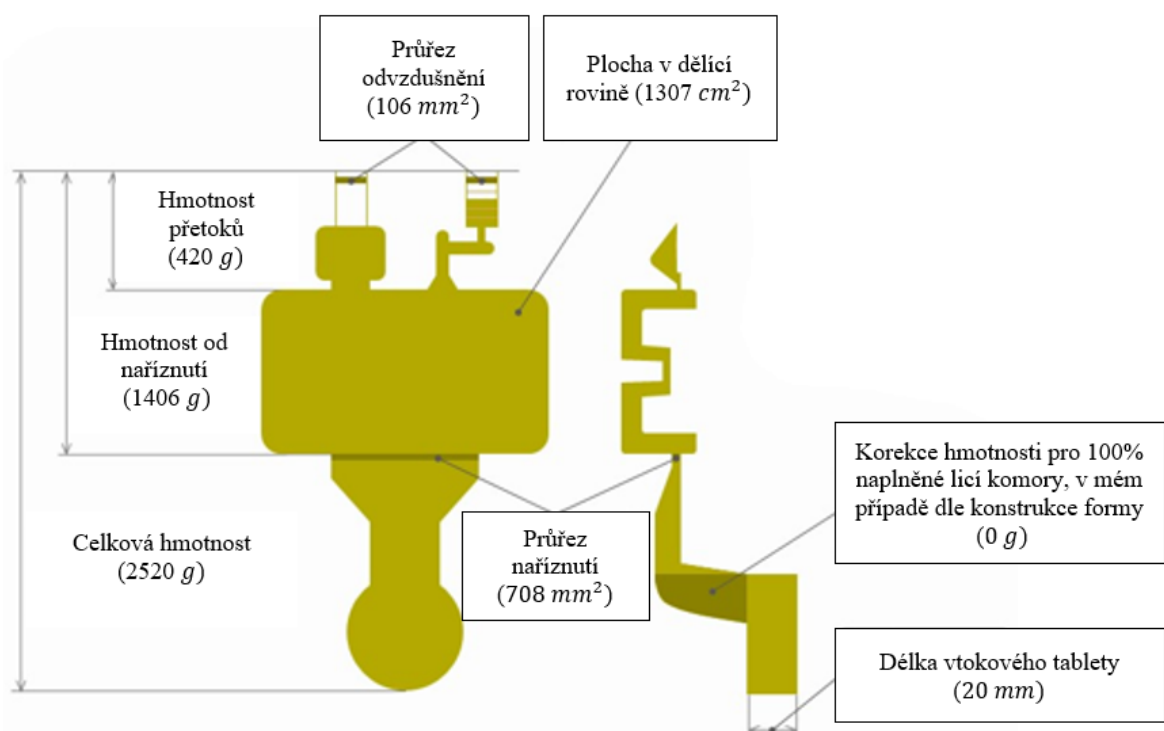
1 – Křížová svorka, 2 – Držák, 3 – Mazací aparát, 4 – Vstřikovací píst

14 NASTAVENÍ LICÍCH A PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

Nastavení licího centra je nedílnou součástí procesu výroby, kdy je zapotřebí jak technologicky, tak z hlediska odlévaných odlitků a konstrukce formy nastavit parametry přesně v závislosti s jakostí a kvalitou odlitků. Tento proces může i s nastavením všech dalších periferií licího centra trvat od několika hodin až po desítky, v závislosti na složitosti odlitku a náročnosti na finální strukturu.

14.1 Nastavení licí jednotky

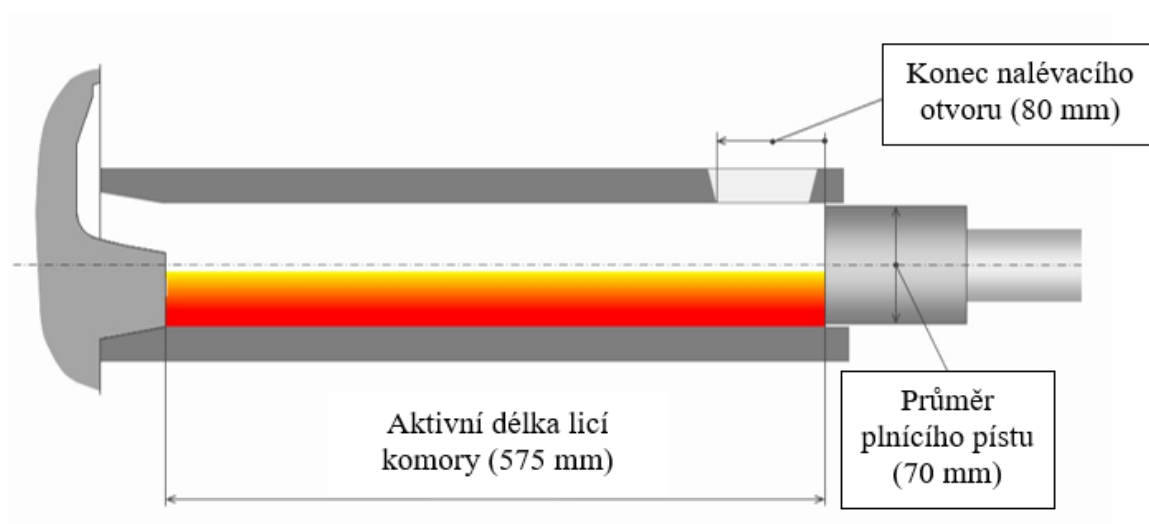
Na základě vstupních údajů pro odlitek, jenž jsou zadány, jsou následně tlakovým licím strojem Bühler 84 D počítány důležitá technologická data „s Ma c“ – kov na nařiznutí, „s Ffin c“ – konec plnění formy, „s lfin c“ – konec zdvihu lití (plnění). Rozměrové charakteristiky mohou být získány z 3D modelů odlitku a formy nebo změřeny na samotné formě (Obrázek 46).



Obrázek 46: Hmotnost a plochy odlitku

Hustotní koeficient pro Trimal 37 zadán 0,95 a je vypočten jako hustota slitiny v kapalném stavu 2,67 g/cm³/ hustota slitiny v pevném stavu 2,81 g/cm³.

Dalšími zadanými parametry jsou parametry pro lící soupravu, které například ovlivní strojní výpočet tlaku kovu v reakci na zadaný průměr vstřikovacího pístu (Obrázek 47). Data se navíc používají pro kontrolu věrohodnosti dalších zadaných parametrů uživatelem. Například body fáze plnění nesmí být vyšší než aktivní délka plnicí komory. Při mém výzkumu byl použit píst o průměru 70 mm a lící komora s aktivní délkou 575 mm. Tyto hodnoty určují stupeň zaplnění komory, který by se měl pohybovat v rozmezí 35–60 % pro zajištění ideálního pohybu taveniny v lící komoře v rámci nastavení lící křivky. Aktivní délka lící komory taktéž určuje maximální zdvih vstřikovacího pístu, který je možné provést při uzavřené lící formě bez kovu.

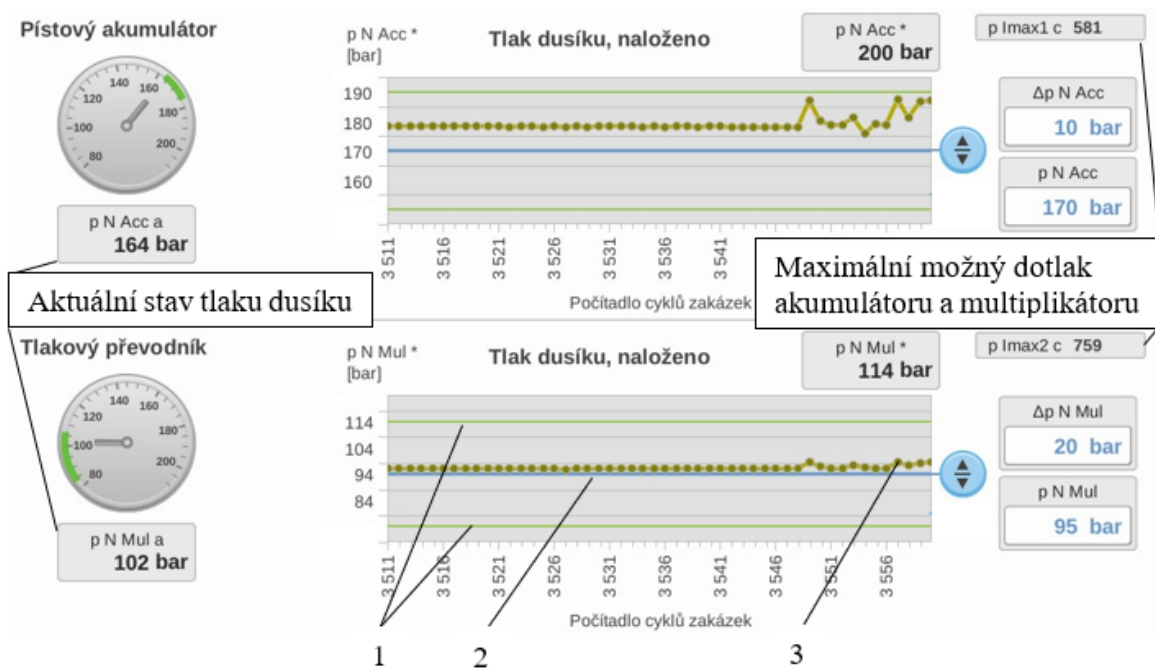


Obrázek 47: Nastavení rozměrů lící komory

Stupeň zaplnění komory je tomto případě 45 %, který byl strojně vypočítán v rámci zadaných parametrů a může být považován za optimální.

Správné nastavení tlaků v tlakových nádobách dusíku pro akumulátor a multiplikátor je jedním z nejpodstatnějších úkonů při nastavení stroje. Přímou ovlivňuje kvalitu odlitku při následovném nastavení licí křivky a dotlaků vstřikovacího pístu.

Jmenovité tlaky pro pístový akumulátor a multiplikátor, který je tlakovým převodníkem může být nastaven nezávisle na sobě. Nastavení je provedeno v závislosti na potřebné síle ve fázi plnění a fázi dotlaku. V závislosti na zadaných hodnotách se vypočtou možné rozsahy tlaku, ve kterých se musí pohybovat jmenovitá křivka fáze dotlaku (Obrázek 48).

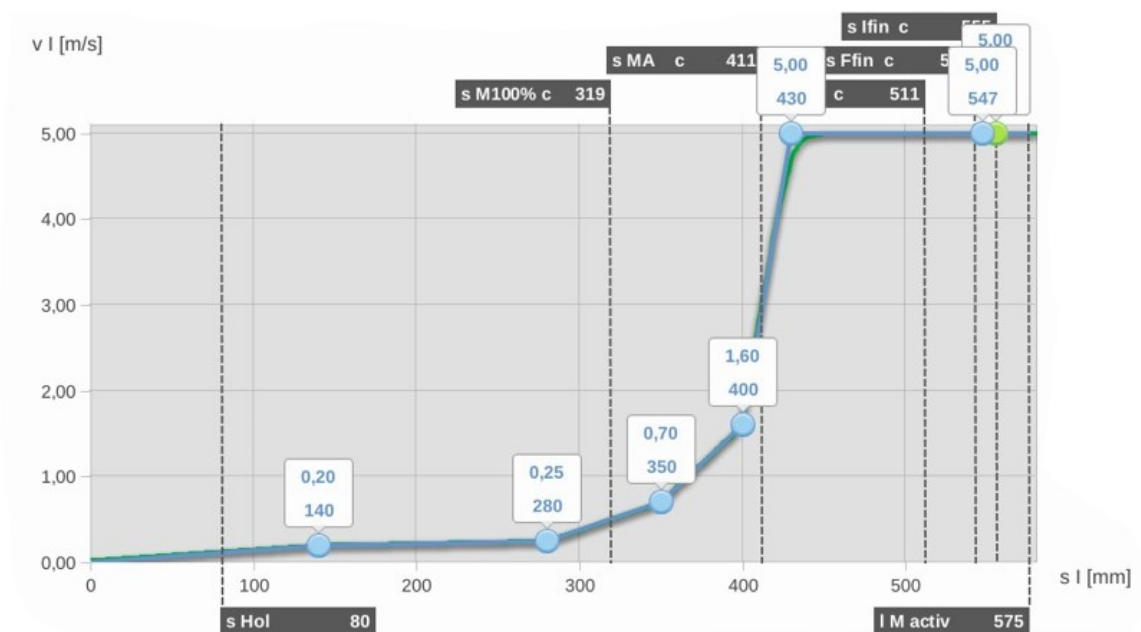


Obrázek 48: Nastavení provozních tlaků

- 1- Světle zelené čáry zobrazují dolní a horní meze tolerancí, které jsou nastaveny v rámci parametrů nastavení pro tlak dusíku v akumulátoru a multiplikátoru „p N Acc“ a „p N Mul“, a nastavení jejich rozptylu „ Δp N Acc“, které je nastaveno na hodnotu 10 barů a „ Δp N Mul“ s hodnotou 20 barů (2 MPa).
- 2- Modrá čára zobrazuje jmenovitý tlak, který byl nastaven v parametru „p N Acc“, jenž je nastaven na hodnotu 170 barů (17 MPa). a „p N Mul“ s hodnotou 95 barů (9,5 MPa), je zobrazeno posledních 50 cyklů stroje.
- 3- Tečkovaná čára zobrazuje dosažené tlaky dusíku, které byly naměřeny v provozním stavu, graf zobrazuje posledních 50 cyklů stroje.

14.2 Nastavení fáze plnění

Programováním licí křivky je určen pohyb vstřikovacího pístu v daných vzdálenostech při určených rychlostech, řídí se dle jednotlivých fází a chováním taveniny v licí komoře, které lze analyzovat testem plnění. Test plnění spočívá v experimentaci s rychlostmi a určením délek kam až vstřikovací píst zajede a přitom je zkoumána plnost odlévaných válců, ideálně se zastavením taveniny po naříznutí ve formě s minimální přítomností vzduchu. Správným nastavením licí křivky je ovlivněna jakost odlitku, především jeho vnitřní strukturu a tak i mechanické vlastnosti, samozřejmě je taktéž správná konstrukce a odvzdušnění formy.



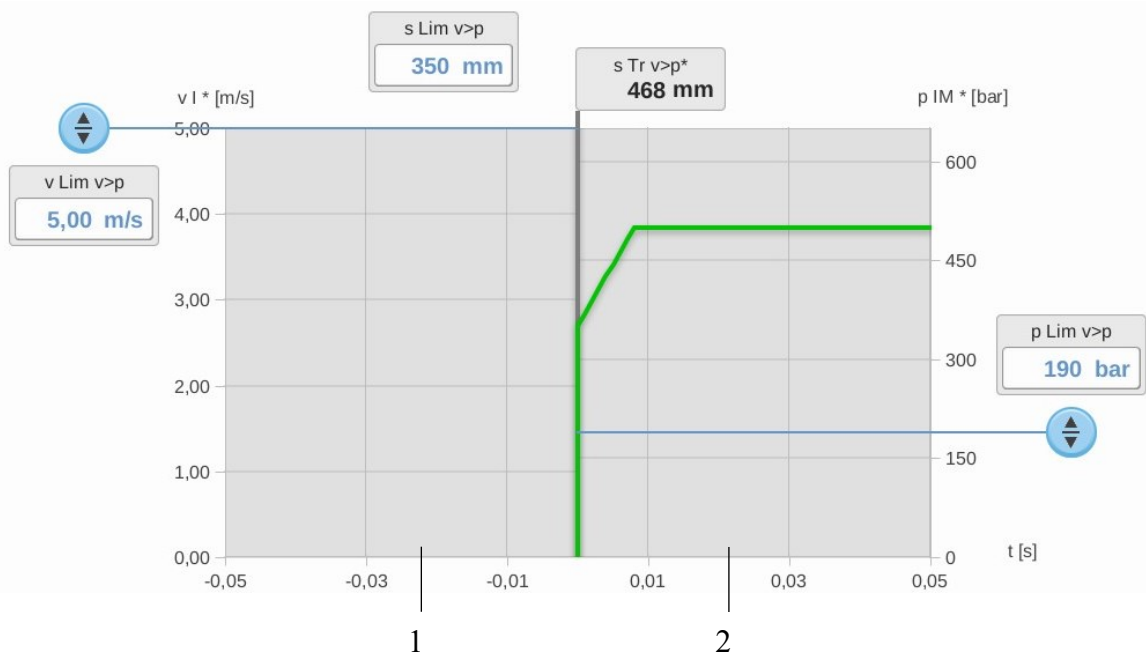
Obrázek 49: Licí křivka

Křivka se skládá z bodů s hodnotami odpovídající pro rychlost a bod dráhy. Křivka je po předešlé analýze toku taveniny a jakosti odlitku nastavena následovně (Obrázek 49). Světle zelený bod znázorňuje bod brždění, který je nastaven, jakmile je překročena rychlost lití 3 m/s, aby bylo zabráněno špičkám tlaku na konci fáze plnění a tvorbě nadměrných otřepů ve formě. Bod brždění je nastaven na 555 mm v rychlosti 5 m/s ve 100 %. Naprogramovaný bod brždění označuje bod dráhy, ve kterém je brždění ukončeno. Spuštění brždění závisí na naprogramované strmosti čela brzdného impulsu. Nastavených 100 % odpovídá maximální možné strmosti, čím by byla hodnota menší o to plošší by bylo čelo brzdného impulsu.

- s Hol – bod dráhy vstřikovacího pístu od kterého je plnicí otvor uzavřen vstřikovací pístem, konec nalévacího otvoru v mém případě 80 mm (viz. Obrázek 47)
- s M100% c – bod dráhy vstřikovacího pístu ve kterém je komora 100 % naplněna taveninou slitiny hliníku, dosažená hodnota 319 mm
- s MA c – bod dráhy vstřikovacího pístu, tavenina zabíhá do formy a dosáhla bodu v dutině formy po naříznutí odlitku, tudíž je zaplněna vtoková část a to v 411 mm dráhy vstřikovacího pístu
- s Ov c – bod dráhy vstřikovacího pístu, dutina formy je zaplněna kromě přetokových částí odlitku vstřikovací píst se nachází v 511 mm
- s Ffin c – bod dráhy vstřikovacího pístu dosáhl délky 538 mm, kdy je dutina formy kompletně vyplněna
- s lfin c – bod dráhy vstřikovacího pístu, kdy nastává dotlak v 555 mm a odlitek je zhutněn
- l M activ – aktivní délka licího pístu 575 mm, což je maximální zdvih vstřikovacího pístu, který je možné provést při uzavřené licí formě a bez kovu

Všechny tyto hodnoty jsou vypočítány strojně, a to především ze zadaných hodnot při nastavování rozměrů licí soupravy (Obrázek 47) a dalších dílčích hodnot při nastavování parametrů stroje.

Ve fázi plnění je regulována rychlost a ve fázi dotlaku regulován tlak. Pro přepnutí z regulování rychlosti na regulaci tlaku musí být určena jednoznačná kritéria. Může být nastaveno jedno nebo až tři kritéria, které musí být splněna, aby fáze dotlaku nastala, při nesplnění těchto podmínek, stroj zahlásí chybové hlášení a výroba je zastavena. Při tomto odlitku jsou nastavena přísná kritéria pro splnění fáze dotlaku, aby se zajistila co nejvyšší kvalita odlitku a docílilo se co nejlepšího zhutnění.

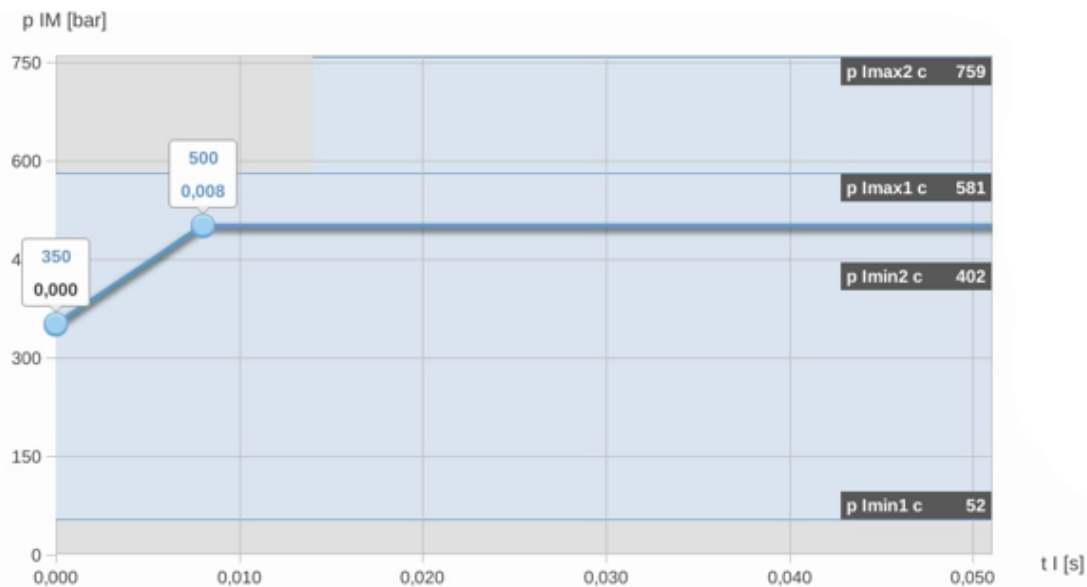


Obrázek 50: Nastavení kontrolních kritérií pro přepnutí fáze dotlaku

První část grafu (1) představuje prvních 50 ms fáze dotlaku. Druhá část grafu (2) představuje posledních 50 ms fáze plnění. Hodnota 468 mm „ $s Tr v>p^*$ “ odpovídá bodu dráhy, na kterém bylo v posledním cyklu stroje přepnuto z fáze plnění do fáze dotlaku (Obrázek 50).

- $v Lim v>p$ – je požadovaná rychlost, která musí být dosažena, aby došlo k přepnutí fáze dotlaku, zvoleno 5 m/s
- $s Lim v>p$ – je požadovaný bod dráhy, který musí být překročen aby došlo k přepnutí do fáze dotlaku, zvoleno 350 mm
- $p Lim v>p$ – je požadovaný tlak kovu, který musí být překročen, aby došlo k přepnutí do fáze dotlaku, tato hodnota je určena na 190 bar (19 MPa).

Pro nastavení fáze dotlaku musí být naprogramována licí křivka pro fázi dotlaku. V následujícím grafu je možné vidět naprogramované body křivky, které jsou vzájemně spojeny přímkami (Obrázek 51).



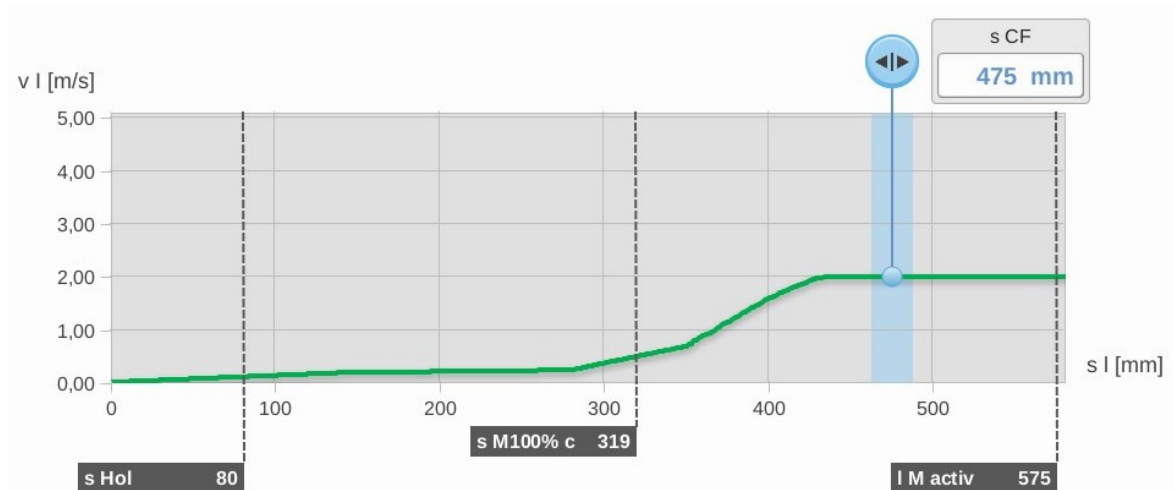
Obrázek 51: Křivka fáze dotlaku

Křivka se skládá z naprogramovaných bodů, které se tvoří za použití hodnoty pro tlak kovu a časový okamžik, kdy má daná fáze dotlaku nastat. V grafu lze vidět, že křivku tvoří pouze dva body, díky testování kvality odlitku, se tlak kovu 500 bar (50 MPa), ukázal jakožto dostačující pro dostatečné zhutnění odlitku. Taktéž nízký tlak může být použit, díky použití vakuové technologie, zařazené do procesu výroby se zapojením přes dvě větve na konstrukci formy.

Hodnoty „p lmin1 c 52“ a „p lmax1 c 581“ jsou hodnotami stanovenými z nastavení tlaku akumulátoru a odpovídají vypočtené minimální a maximální mezní hodnotě pro fázi dotlaku s pístovým akumulátorem. Mezní hodnota závisí na nastaveném jmenovitém tlaku dusíku akumulátoru „p N Acc“, rozptylu „ Δp N Acc“ a průměru vstřikovacího pístu.

Hodnoty „p lmin2 c 402“ a „p lmax2 c 759“ jsou hodnotami stanovenými z nastavení tlaku multiplikátoru a odpovídají vypočtené minimální a maximální mezní hodnotě pro fázi dotlaku s multiplikátorem. Mezní hodnota závisí na nastaveném jmenovitém tlaku dusíku akumulátoru „p N Acc“, rozptylu „ Δp N Acc“ a průměru vstřikovacího pístu.

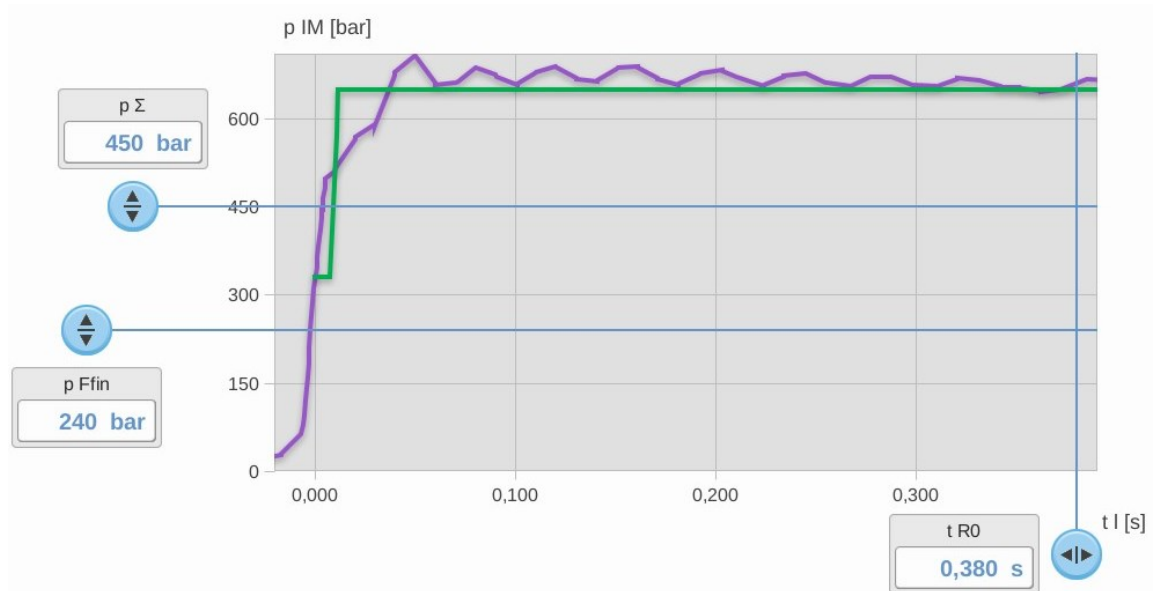
Během fáze plnění je nastaven kontrolní parametr „s CF“, který zjišťuje rychlost zprůměrovanou přes měřící úsek, který je nastaven na velikost 25 mm a hlídání parametr nastaven tak, aby byl zvolen co nejdelší úsek při nejvyšší dosažené rychlosti vstřikovacího pístu, tudíž ve vzdálenosti 475 mm (Obrázek 52).



Obrázek 52: Kontrolní body fáze plnění

- s Hol – bod dráhy vstřikovacího pístu od kterého je plnicí otvor uzavřen vstřikovací pístem, konec nalévacího otvoru v mém případě 80 mm (viz. Obrázek 47)
- s M100% c – bod dráhy vstřikovacího pístu ve kterém je komora 100 % naplněna taveninou slitiny hliníku, dosažená hodnota 319 mm (viz. Obrázek 49)
- l M activ – aktivní délka licího pístu 575 mm, což je maximální zdvih vstřikovacího pístu, který je možné provést při uzavřené licí formě a bez kovu (viz. Obrázek 49)

Během fáze dotlaku jsou nastaveny následující kontrolní parametry pro hlídání procesu „p Ffin“ a „p Σ“. Kontrolní bod „t R0“, zajišťující tlak kovu na naprogramovaném časovém okamžiku. Tyto body je nutné nastavit s maximální přesností, aby bylo správně prováděno stanovení procesních hodnot odvíjejících se od tohoto nastavení (Obrázek 53).

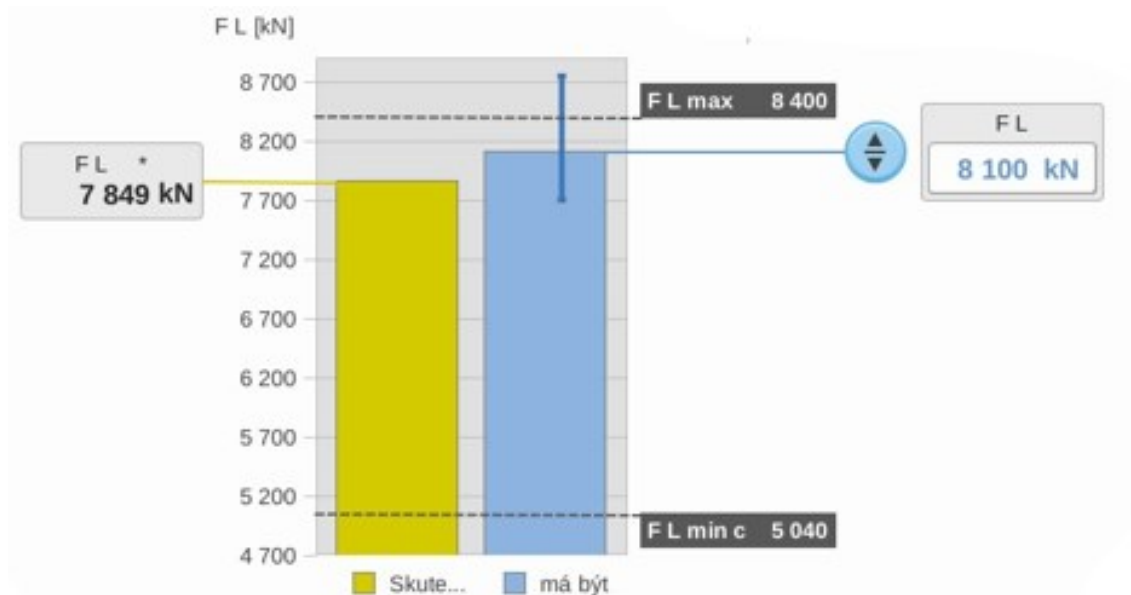


Obrázek 53: Kontrolní body fáze dotlaku

Zelená křivka grafu znázorňuje křivku jmenovitou a fialová křivka je křivkou skutečnou. „p Σ“ je hodnota tlaku kovu na kterém je ukončeno zvyšování tlaku, vychází se z průměrné hodnoty ze skutečného průběhu křivky, hodnota je stanovena na 450 bar (45 MPa). „p Ffin“ je tlak kovu, na kterém je dosažen bod dráhy pro plnou licí formu, vycházím z hodnoty „p Lim v>p“ + 50 barů (5 MPa) (Obrázek 50) a stanovují tedy na hodnotu 240 bar (24 MPa). Kontrolní bod „t R0“ je nastaven v oblasti, kdy je tlak kovu stabilní, abych zabránil velkému rozptylu mezi jednotlivými cykly tudíž v časovém okamžiku 0,38 sekund. A je to doba prodlevy, která je zahájena, jakmile bude splněno kritérium přepnutí.

14.3 Nastavení pohybů formy

Uzavírání formy je voleno mezi dvěma režimy, a to měření anebo regulace uzavírací síly. V závislosti na tom se pak mění vizualizace grafu (Obrázek 54).

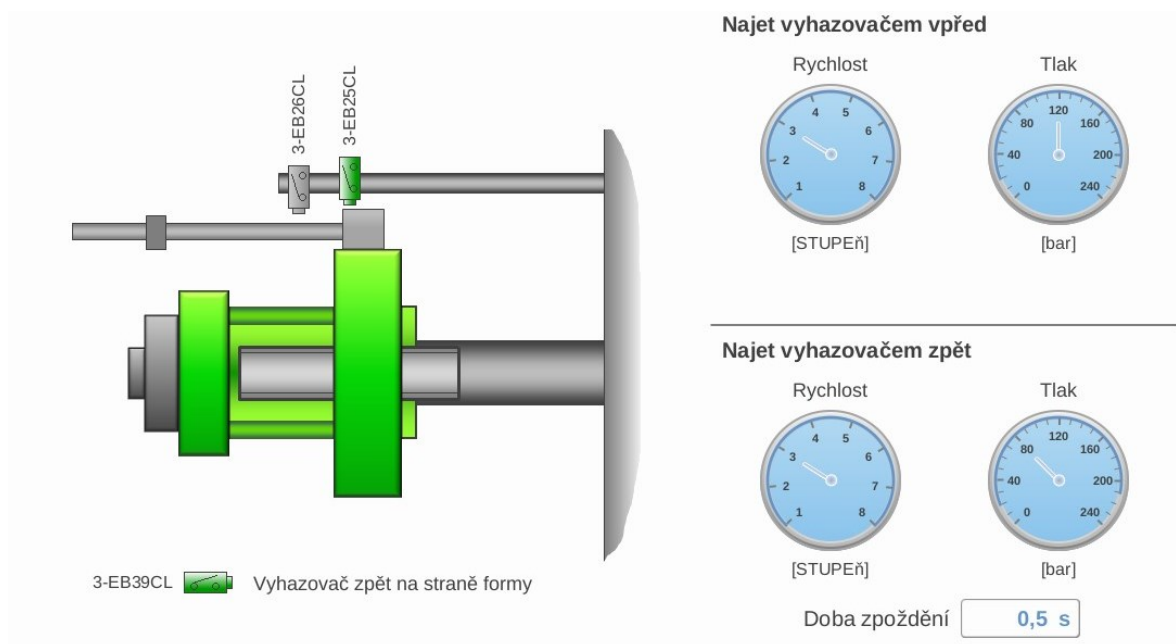


Obrázek 54: Uzavírací síla formy

- „F L *“ – je hodnota uzavírací síly naměřená při posledním cyklu stroje, měří se v pozici, kdy je licí forma uzavřena a uzavírací mechanismus kloubů je plně propnut.
- „F L“ – nastavená uzavírací síla, kterou se uzavírá licí forma, hodnotu nastavuji mezi 60 % a 100% maximální uzavírací síly stroje
- „F L max“ – maximální uzavírací síla stroje odpovídající hodnotě 8400 kN
- „F L min c“ – minimální uzavírací síla stroje odpovídající hodnotě 5040 kN

Při seřízení stroje je volen režim regulace, což znamená, že pokud se uzavírací síla mírně odchyluje od požadované hodnoty, provede se seřízení na konci aktuálního cyklu stroje. Pokud se uzavírací síla bude odchylvat výrazně od požadované hodnoty, licí forma se během cyklu otevře, seřídí a znovu zavře. Otvírací zdvih formy je nastaven na 250 mm.

Vizualizace vyhadzovače s koncovými spínači ukazující aktuální stav. Při seřizování je nutné navolit zdvih vyhadzovaču jejich rychlost a tlak při odformování odlitku a zajištění vyhadzovačů zpět. Je možno volit až mezi 8 rychlostními stupni dle vlastního uvážení, pro odformování mého odlitku jsou zvolili rychlost 3, která je dostačující. Tlak při odformování odlitku pro vyhadzovače stanovují na 120 barů (12 MPa), kvůli hlubokým tvarům ve formě, avšak ne více aby nedošlo k protlačení vyhadzovačů do tvaru odlitku nebo samotného prasknutí odlitku. Síla pro zajištění zpět je stanovena na 80 barů (8 MPa), (Obrázek 55).

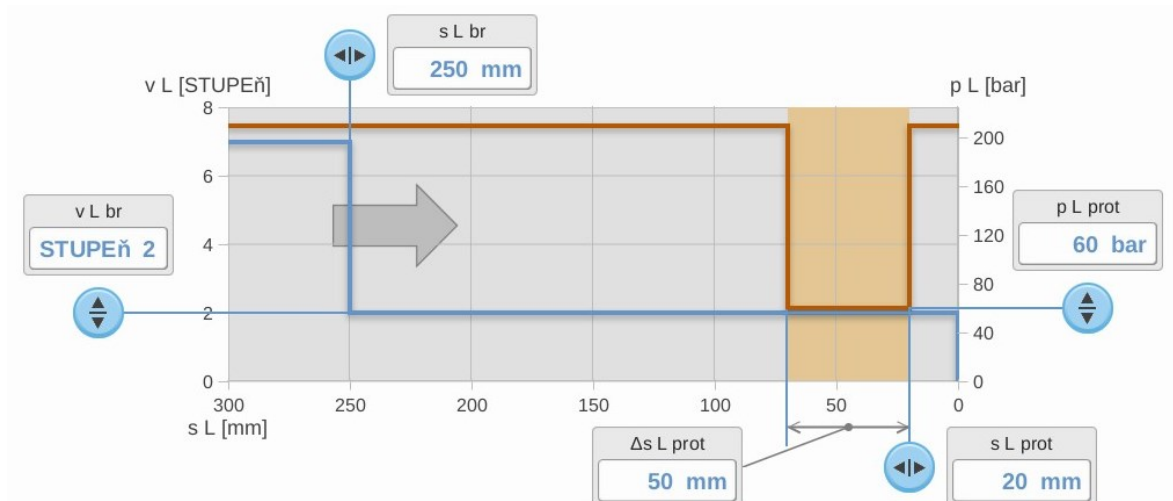


Obrázek 55: Nastavení vyhadzovacího mechanismu

Koncové spínače se řídí na digitálním vstupu za pomoci napětí. Koncový spínač má na digitálním vstupu 0 V, což znamená že koncový spínač je v pozici vyjeto. Koncový spínač má na digitálním vstupu 24 V, což znamená že koncový spínač je v pozici zajeto. Signalizace pro jednotlivé čidla koncových spínačů se mění v barevném značení šedá, mimo pozici nebo zelená na pozici (Obrázek 55).

Díky aplikaci mikro postřikové technologie, danému programu k této technologii a doby vyjímání je volena prodleva neboli doba zpoždění zajetí vyhadzovačů na 0,5 sekundy pro namazání vyhadzovačů a prevenci k jejich zadření.

Při složitější konstrukci formy je velmi vhodné nastavit ochranu formy. Jelikož se na formě, se kterou experimentují nachází jádra, uzavírána za pomoci šikmých kolíků je tedy nutností uzavírání formy vhodně naprogramovat a zvolit zavírání s bržděním. Je tedy nastaven parametr pro bod dráhy, od kterého je licí forma zavírána zredukovanou rychlostí „s L br“ na hodnotu 250 mm s rychlostním stupněm 2 „v L br“, kterou se licí forma zavírá od bodu „s L br“ (Obrázek 56).

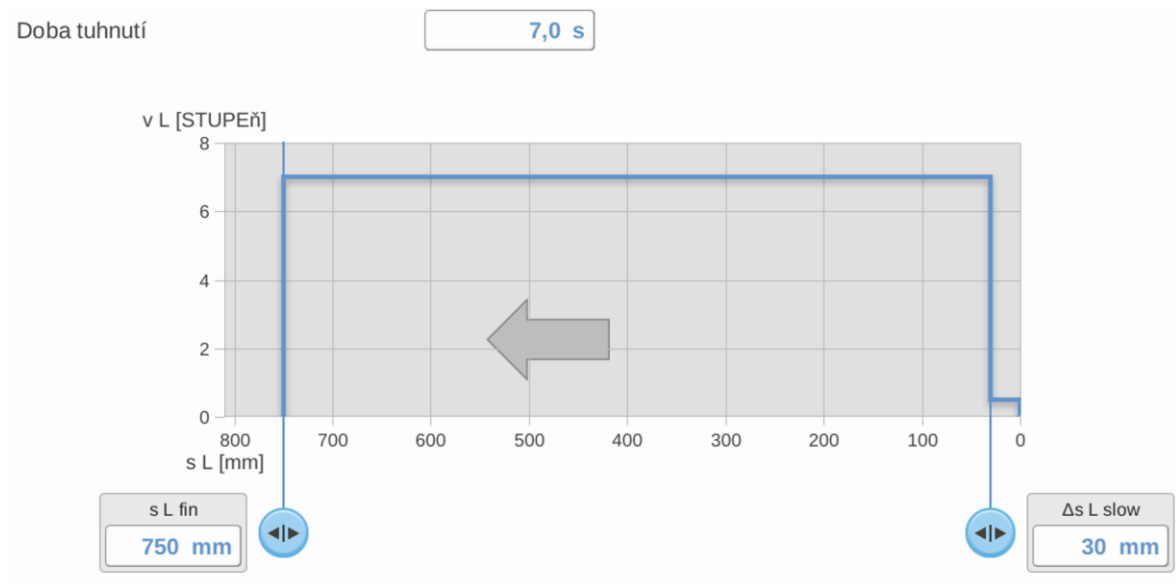


Obrázek 56 : Nastavení zavírání formy

Je nastavena elektrohydraulická ochrana formy monitorována na naprogramované dráze, která hlídá, zda se mezi polovinami formy nenachází žádné cizí těleso. Na monitorované dráze se forma zavírá pod sníženým tlakem. Přitom je monitorován čas, který je nutný pro projetí dráhy, mnou naprogramovaný parametr je 1 sekunda. Pokud čas překračuje jmenovitou hodnotu, je licí forma otevřena nebo zůstane stát na místě. Dle aktuálního naprogramování se forma otevře (Obrázek 56).

- „ $\Delta s L prot$ “ – parametrem pro nastavení dráhy, která je monitorována, nastaveno na délku 50 mm (kritická oblast při uzavírání)
- „s L prot“ – nastavení bodu dráhy od kterého dráha již není monitorována a to 20 mm
- „p L prot“ – zobrazuje zredukovaný tlak, který je aplikován na monitorovanou dráhu, tudíž 60 bar (6 MPa)

Naprogramování otevření formy je důležitým krokem při nastavování procesu lití, díky vzdálenostem, které jsou nastaveny jsou uzpůsobeny další pohyby periférií licího centra jako je programovaná dráha robota nebo ostříkového systému Wollin. Doba tuhnutí je požadovaný čas, který uplyne po konci fáze dotlaku než se forma otevře. Po testování jakosti odlitku se jako optimální čas tuhnutí pro odformování, celistvost a homogenitu odlitku ukázal po uplynutí doby 7 sekund (Obrázek 57).



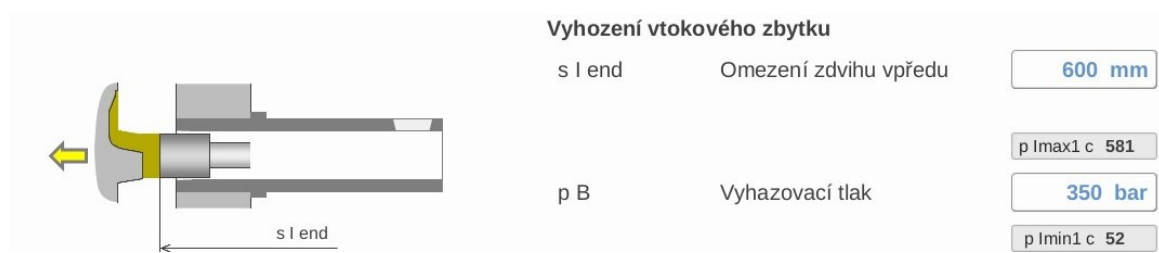
Obrázek 57: Nastavení doby tuhnutí odlitku

„s L fin“ je hodnota, která kdyby byla jakkoliv v procesu výroby změněna, mohlo by dojít ke kolizi mezi robotem pro odebrání odlitků a odlitkem nebo uzavírací jednotkou. Pokud se tedy změní otevírací zdvih, musím přizpůsobit nastavení pozic robota (Obrázek 57).

- „s L fin“ – nastavení požadovaného bodu dráhy, na kterém je otevřená licí forma a je možné vyjmout odlitek, nastavuji hodnotu 750 mm
- „ $\Delta s L$ slow“ – požadovaný bod dráhy, od kterého je licí forma otevírána zredukovanou rychlostí, zredukováná rychlost je stanovena systémem. Jako orientační hodnota je brána 1,5násobek vtokového zbytku, tudíž 30 mm

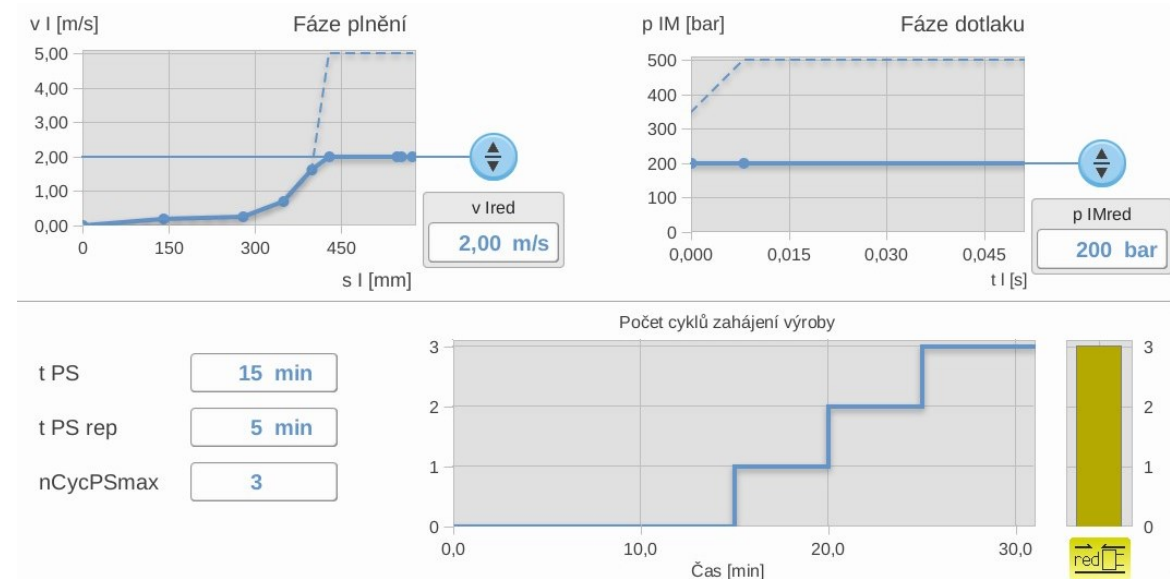
14.4 Nastavení licího pístu

Během pohybu pístu při vyhození vtokového zbytku sleduje vstřikovací píst otevírací pohyb formy a tlačí odlitek s naprogramovaným vyhazovacím tlakem „p B“, který činí 350 barů (35 MPa) proti pohyblivé polovině formy. Tento tlak je závislý na jmenovitém tlaku dusíku v akumulátoru, nastaveném rozptylu dusíku a průměru vstřikovacího pístu. V naprogramovaném bodu dráhy pro omezení zdvihu „s l end“ se vzdáleností 600 mm zůstane vstřikovací píst stát (Obrázek 58).



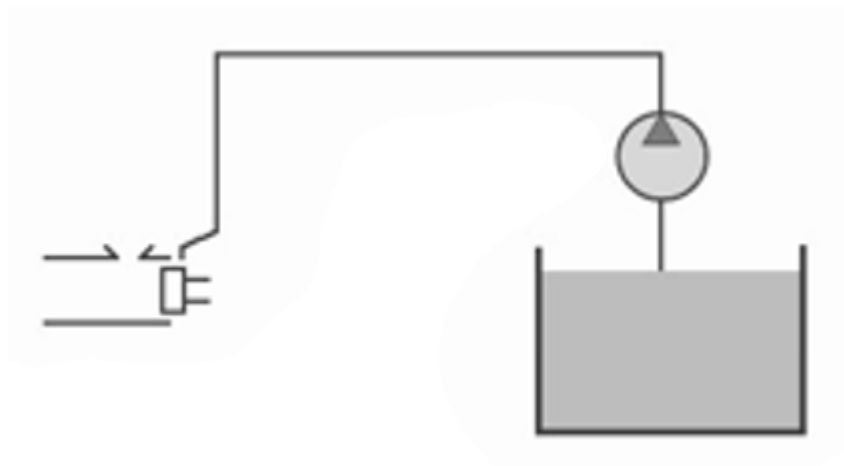
Obrázek 58: Nastavení pohybu pístu

Při zahájení výroby je nutné určit parametry pro první cykly stroje, z důvodu šetrnosti formy a uvedení provozu všech strojních periférií a jejich kontroly. Křivku lití omezují ve fázi plnění na zredukovanou rychlost „v lred“, omezení určují na 2 m/s a ve fázi dotlaku na zredukovaný tlak „p lMred“ 200 bar (20 MPa). Takto odlévané díly obdrží atribut „PS“ a jsou považovány za zmetkové. Počet takových dílu je určen na 3 cykly, stojí-li stroj déle než 15 minut. Stroj vytvoří jeden redukovaný cyklus po odstavce delších než 5 minut.



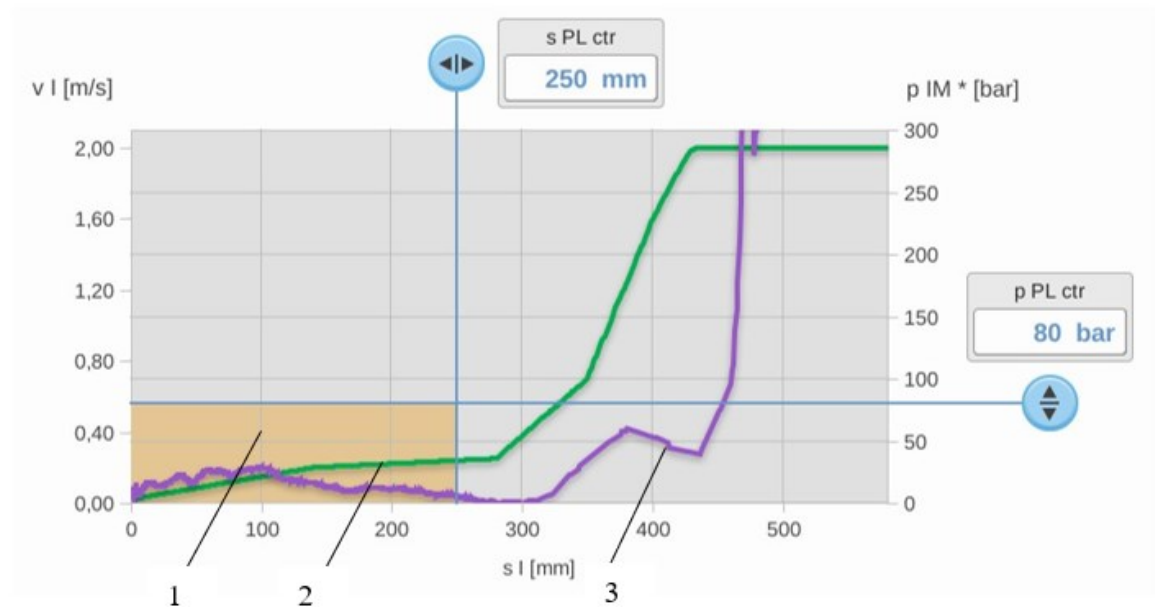
Obrázek 59: Nastavení počátku produkce

Pro mazání pístu je použito mazadlo Piston Lubricant GF 3 a díky programovému nastavení je určeno přesné mazání vstřikovacího pístu při každém licím cyklu stroje. Počet zdvihů mazání během jednoho cyklu je určeno na jeden mazací zdvih, množství maziva na jeden mazací cyklus je seřízeno manuálně pomocí šroubu na čerpadle maziva (Obrázek 60). Čas pro mazání vstřikovacího pístu je stanoven na 1 sekundu, což je minimální čas pro namazání, zároveň v případě mého experimentu je dostačující. Z důvodu vyvarování se přítomnosti mazadla v licí komoře a vtokové části odlitku, což by mohlo být příčinou vzniku porozity. Předpoklad správného mazání pístu je správné seřízení mazacího systému, vstřikovací píst i komora bez zjevných poškození a s maximální těsností.



Obrázek 60: Nastavení mazání pístu

Jeden s posledních uvedených programovaných parametrů je zvoleno hlídání dření vstřikovacího pístu. Vstřikovací píst se vlivem tření, vysokých provozních rychlostí a agresivity taveniny slitiny hliníku opotřebovává, proto je nutné hlídat průběh jeho pohybu v licí komoře. Hlídání vstřikovacího pístu spočívá v hlídání tlaku kovu během fáze plnění. Pokud tlak během monitorovaného úseku překročí naprogramovanou hodnotu „p PL ctr“ 80 bar (8 MPa), je zobrazeno chybové hlášení. „s PL ctr“ 250 mm je bod dráhy, který je zvolen tak, aby vzestupy tlaku na průřezu zářezů nebo způsobené zrychlením vstřikovacího pístu již nebyly v oblasti monitorování. Hlídání se spustí od zdvihu vstřikovacího pístu 10 mm (Obrázek 61).



Obrázek 61: Kontrolní parametry pro hlídání dření plnicího pístu

- 1 – Monitorovaný úsek, vizualizace hlídání s limity dráhy a tlaku
- 2 – Aktuální křivka lití
- 3 – Skutečná naposledy uložená křivka tlaku

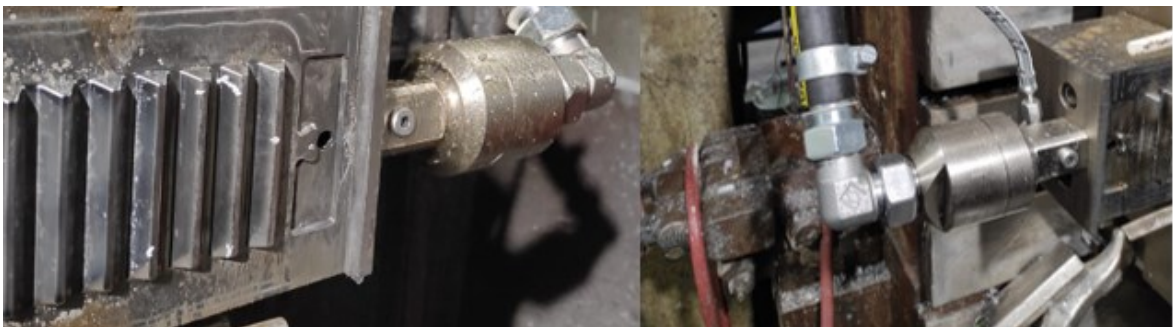
15 VYUŽITÍ VAKUOVÉHO SYSTÉMU

V procesu lití z důvodů požadavků na vysoce kvalitní vnitřní strukturu odlitku je využito vakuového systému pro vysokotlaké licí stroje. Vakuový systém se používá k odsátí vzduchu z dutiny formy předtím, než je proveden vstřík roztavené slitiny hliníku do formy. Tím se snižuje množství vzduchu zachyceného v odlitku na minimum, což vede k nižší pórovitosti (Obrázek 62). V průběhu práce jsou nainstalovány, dvě větve vakua z každé strany formy.



Obrázek 62: Vakuový systém Fondarex

Samotný proces probíhá následovně, forma se uzavře a vakuový systém dostává signál ke kontrole profilu, kde zkontroluje volný průchodu vzduchu přes jednotlivé bloky a odsávací ústí (Obrázek 63). Jakmile je píst v pozici za nalévacím otvorem, tak vakuum dle vytvořeného programu začíná odsávat vzduch z dutiny formy a komory. Odsávání trvá do doby, než je kov po naříznutí a následně vstříkujeme do dutiny formy s minimálním obsahem vzduchu. Je zapotřebí naprogramovat správné časové intervaly a mnoho dalších nastavení systému vakua.

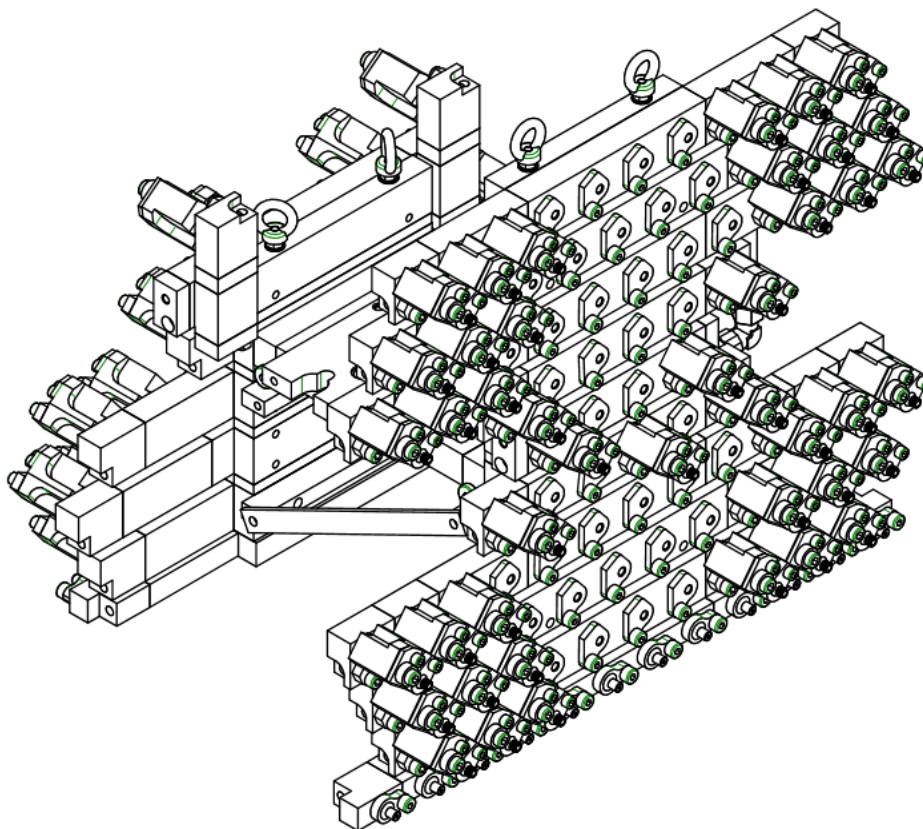


Obrázek 63: Odsávací profil

16 APLIKACE, NASTAVENÍ TECHNOLOGIE MIKRO POSTŘIKU A POROVNÁNÍ S KONVENČNÍ METODOU POSTŘIKU

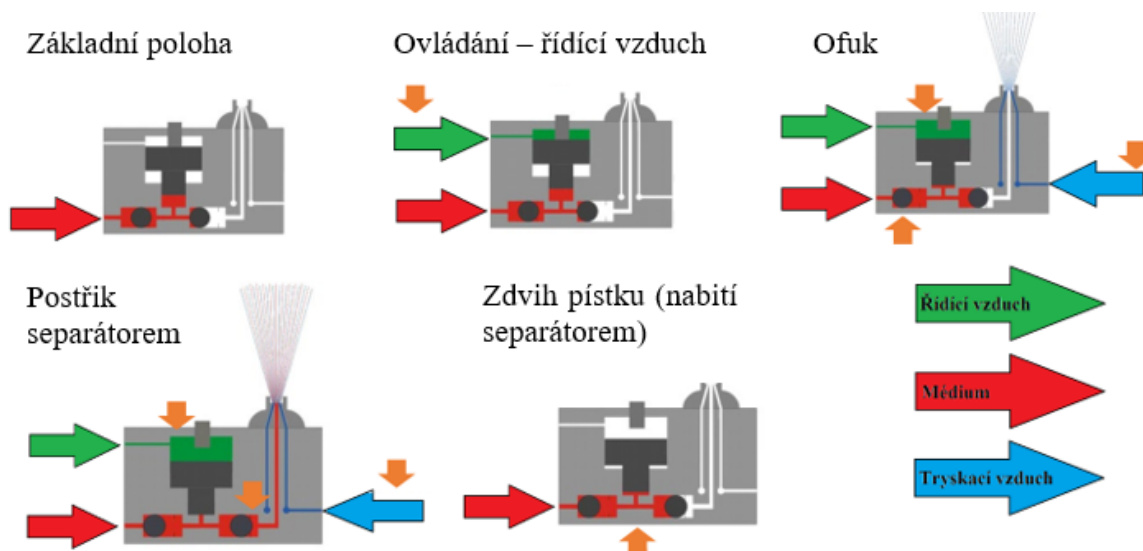
Postřikové technologie a jejich inovace je dnes při velkých kvalitativních požadavcích na odlitky připraveným vysokotlakým litím nezbytnou inovací slévárenského procesu. Pro průzkum aplikace mikro postřikové technologie mně vedla myšlenka využití high-tech technologie, snížení odpadních vod a pokus o úsporu energie při procesu lití.

Technologie mikro postřiku je vysoce účinná, přináší ekonomické, ekologické i výrobní výhody. Při sestavení mikro postřikové hlavy se v první fázi vytvoří prvotní návrh, dle konstrukce formy a umístění jednotlivých hnízd odlévané součásti. Hlava je sestavena za pomoci vrtaných desek, přes které proudí medium, mikro postřikových trysek DDV4, ucpávek a vzduchových trysek (Obrázek 64).



Obrázek 64: Návrh mikro postřikové hlavy

V průběhu prvotního zavedení mikro postřikové hlavy do výroby, dochází k nastavení DDV trysek. DDV4 trysky neboli „dosing devices ventil“ jsou speciální trysky vytvořeny pro aplikaci mikro postřikové technologie. Označení „4“ je kategorie trysek s objemem nádržky 0,076 ml. Základní princip funkce trysky je popsán níže (Obrázek 65).



Obrázek 65: Schéma funkce trysky DDV

Směrování trysek se provádí za pomoci laserového paprsku, jednotlivé trysky jsou nasměrovány na dutinu formy tak, aby byly schopny namazat všechny tvarové části formy. Každá tryska obsahuje škrťící člen, který určuje množství separátoru. Objem separátoru za jeden zdvih nesmí být příliš velký, aby nezanechával stopu na tvaru formy, ale zároveň aby byl nanos separačního prostředku dostatečný k odformování odlitků (Obrázek 66).



Obrázek 66: Nastavení a uspořádání mikro postřikové hlavy na pevnou a pohyblivou polovinu formy

Samotný lící proces vyžaduje nastavení vstupních lících tlaků média a vzduchu do okruhu systém wollin při aplikaci mikro postřikové technologie. Tlak média je seřízen na hodnotu 2,5 baru, tlak vzduchu 4 bary a řídicí tlak vzduchu 5 barů. Toto nastavení vychází z doporučení výrobce pro mikro postřikové technologie a testovaných parametrech na lícím centru (Obrázek 67).



Obrázek 67: Tlaková nádoba se separačním médiem ChemTrend HERA SL 8801

V průběhu procesu výroby po provedeném testování a ideálním nastavení mikro postřikové hlavy, byl nalezen problémový aspekt, jenž šel omezit jen částečně, a to zvýšená pozornost k čištění formy. Separátor se díky velmi složité konstrukci dutin formy usazuje a následně na povrch formy vytváří nános separátoru, který se po několika hodinovém provozu, bez zásahu čištění formy projeví na povrchu jednotlivých odlitků. Po pokusech odstranění tohoto problému, pomocí temperace a chlazení formy, opětovném seřízení a programaci postřikové technologie se nacházím u předmětu další studie. Výstupem je neideální konstrukce temperačních a chladičích okruhů formy pro použití mikro postřikové technologie. Předmětem další studie a možné vyřešení stávajícího problému je spolupráce se společností ChemTrend a vývojem nového složení separačního činidla, které by mělo popsanou problematiku odstranit.

16.1 Konvenční metoda postřiku

Konvenční metoda postřikového systému spočívá v smíšení separátoru s vodou v koncentraci 1–5 % separátoru a následně je na formu tato směsice nanášena. Míchání separátoru probíhá ve směšovači, který je za pomoci regulačních průtoků seřízen na daný poměr. Forma je tedy v procesu ostřiku zároveň chlazena, ale dochází tak k tepelným šokům formy a krácení její životnosti mnohonásobně rychleji než u použití mikro postřikové technologie.

Koncepce sestavení hlavy je velmi podobná, skládá se ze sestavy desek, trysek a ucpávek. Hlavním rozdílem je konstrukční řešení trysky, kdy mikro postřikové trysky mají vlastní zásobníky separátory, zatímco konvenční trysky zásobníky neobsahují. Dalším rozdílem je omezená regulace průtoků, u konvenční metody jsme odkázáni na několik stupňů škrtících členů, které vždy musíme demontovat a měnit při regulaci průtoků (Obrázek 68).



Obrázek 68: Nastavení a uspořádání konvenční postřikové hlavy na pevnou a pohyblivou polovinu formy

16.2 Dosažené výsledky aplikací mikro postříkové technologie

Při aplikaci mikro postříku bylo dosaženo příznivých výsledků v rámci úspor a eliminaci odpadních vod oproti metodě konvenční. Čas jednoho cyklu lití byl snížen z 52 sekund na 47 sekund. Teploty olejových ohřivačů byly sníženy a dosáhly ze spotřeby 0,65 kWh/ cyklus na spotřebu 0,15 kWh/cyklus. Spotřeba vody je u použití mikro postříku nulová, takže odpadá složitá likvidace odpadních vod. Spotřeba koncentrátu se snížila ze 7 ml/cyklus na 3,1 ml/ cyklus.

Tabulka 3:Dosažené výsledky aplikací mikro postříkové technologie

Konvenční metoda postříku		Mikro postříková technologie	
Čas cyklu	52 s	Čas cyklu	47 s
Spotřeba el. energie ohřivačů	0,65 kWh/cyklus	Spotřeba el. energie ohřivačů	0,15 kWh/cyklus
Spotřeba vody	0,35 l/cyklus	Spotřeba vody	0 l/cyklus
Spotřeba koncentrátu	7 ml/cyklus	Spotřeba koncentrátu	3,1 ml/cyklus

Životnost formy při použití konvenční metody postříku se pohybuje okolo 100–120 tis cyklů, přičemž první mikropraskliny lze pozorovat již po 10 tisících cyklech. Životnost formy s použitím mikro postříku je minimálně dvojnásobná a první mikropraskliny lze pozorovat až po cca 40 tisících cyklech. Tento enormní nárůst životnosti má na svědomí minimalizace tepelných šoků v průběhu postříku působících na materiál tvarových vložek formy (Obrázek 69).



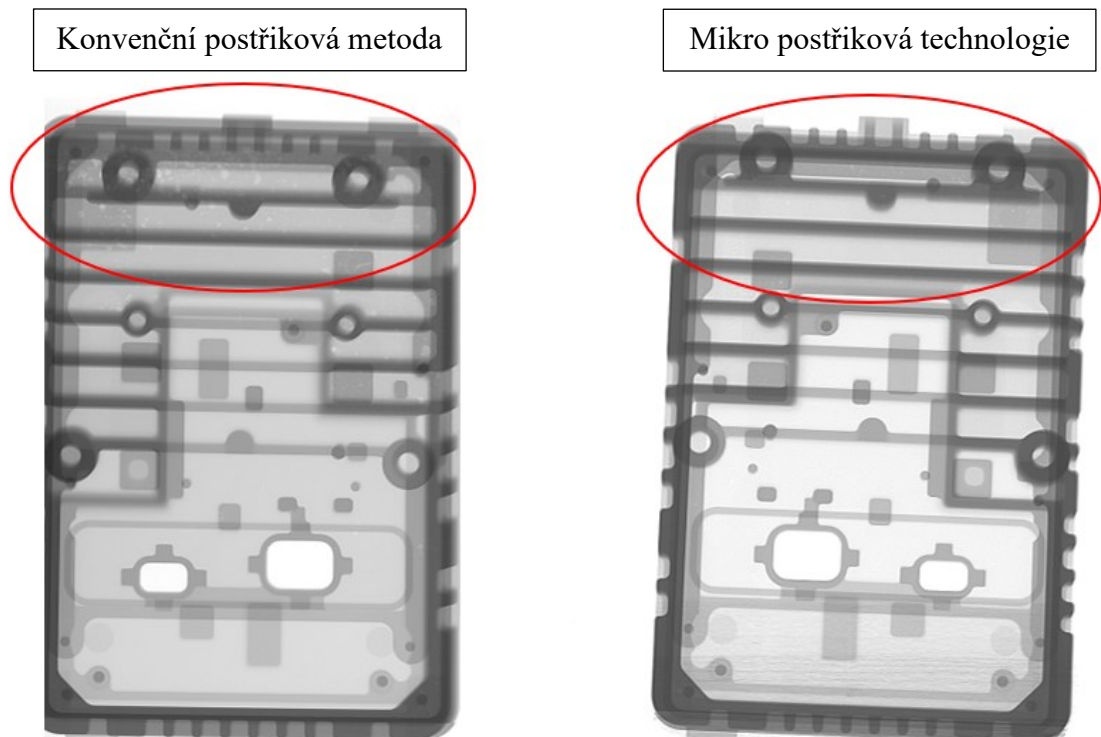
Obrázek 69: Interpretace dosažených výsledků při použití mikro postříkové technologie

17 ZHODNOCENÍ KVALITY A JAKOSTI ODLITKU

Správné nastavení licích parametrů, dodržení technologických zásad vysokotlakého lití a testování mikro postřikové technologie je ověřeno pomocí několika měření a zkoušek jakosti. Zkoušky jsou provedeny dle požadavků zákazníka, popřípadě ověřena kvalita pro experimentální účely postřikové technologie.

17.1 Rentgenová zkouška

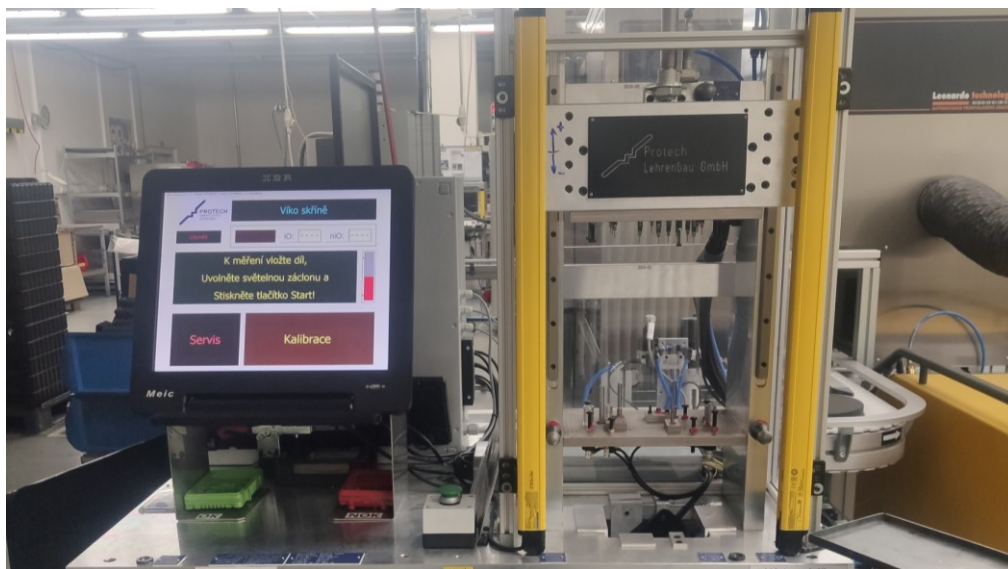
První provedenou zkouškou je zkouška na rentgenu Seifert DP 419, kdy jsou porovnány odlitky vyhotovené různými metodami postřikové technologie. Za pomoci rentgenového záření je kontrolována vnitřní pórovitost odlitku. Je zřejmé, že při stejném nastavení vysokotlakého licího centra mikro postřiková technologie dosahuje o poznání lepších výsledků vnitřní struktury odlitku (Obrázek 70).



Obrázek 70: RTG zkouška vnitřní struktury odlitku

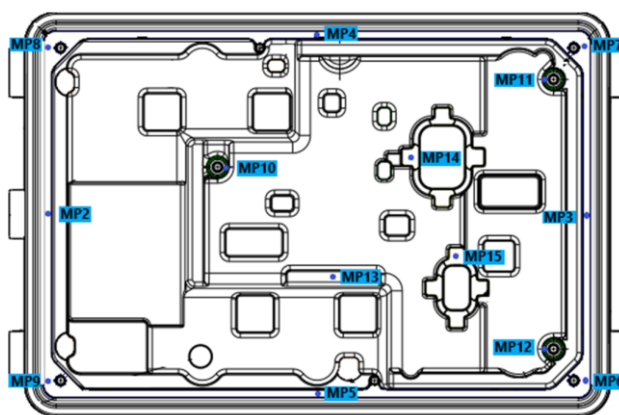
17.2 Rozměrová měření a zkouška rovinnosti

Jedním z primárních měření pro surový slévárenský odlitek je v tomto případě rovinnost za pomoci měřicího zařízení konfigurovaného přímo pro daný odlitek. Měření spočívá v uložení dílu do měřicího zařízení na ustavovací kolíky, následně měřící jednotka sjede dolů a pomocí dotyků sond proběhne měření. Poté co měřící jednotka vyjede opět nahoru, ukáže se výsledek měření s výsledkem zmetkovitého nebo kusu určeného k dalším operacím (Obrázek 71).



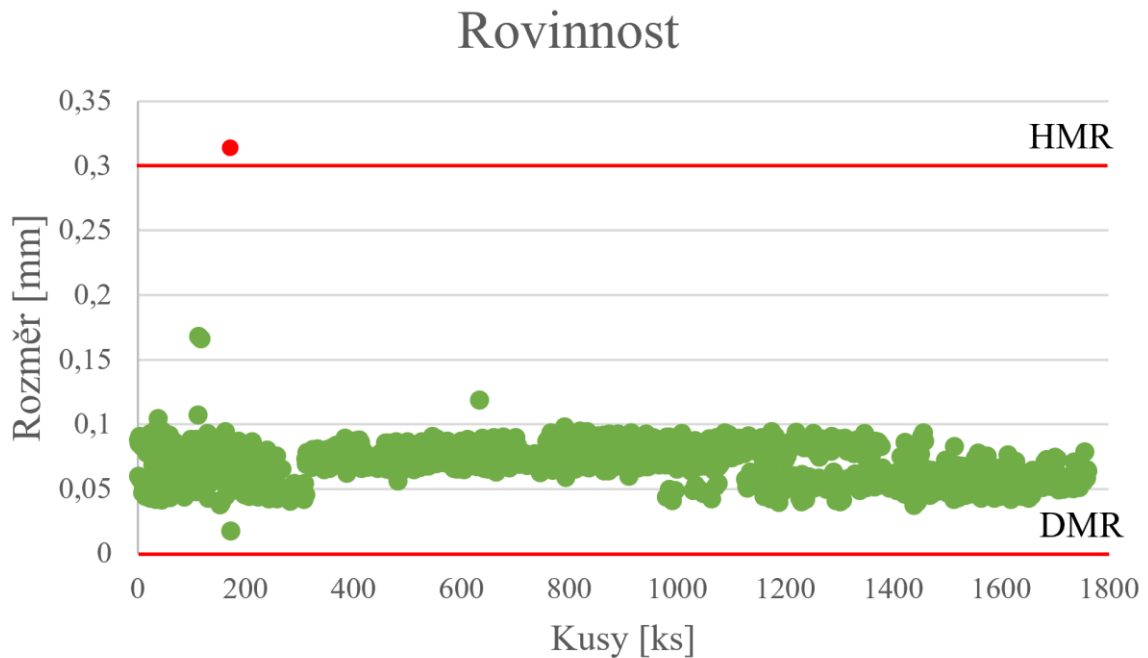
Obrázek 71: Měřicí přístroj pro odlitek

Pomocí měření jsou kontrolovány předem stanovené vlastnosti jako je rovinnost, rovnoběžnost, pozice otvorů, body ploch a jednotlivé vzdálenosti v přesně definovaných pozicích pro styky sond s odlitkem (Obrázek 72).



Obrázek 72: Místa dotyků sond

Celkem bylo v průběhu testování změřeno 1760 kusů a testováno na rovinnost. Pro měření byl nastaven horní mezní rozměr 0,3 a dolní mezní rozměr 0,001. V průběhu měření bylo dosaženo velmi příznivých výsledků, bylo vyhodnoceno 1760 kusů z toho byl 1 kus označen jako zmetkový, nacházející se mimo toleranční pole s hodnotou 0,3135 mm (Obrázek 73). Proces měření proběhl po kompletním nastavení a seřízení lícího centra, ve finální fázi všech úprav.



Obrázek 73: Finální měření rovinnosti

Maximální naměřená hodnota je 0,314 mm a minimální hodnota 0,018 mm. Průměrná hodnota uvedeného měření je 0,069 mm. Byl stanoven index C_m a C_p . C_m je schopnost stroje kolikrát se rozpětí stroje vejde do šířky tolerance, čím vyšší hodnoty je dosaženo, tím lepší stroj. Dosažená hodnota C_m a C_p je 3,27. C_p má stejný význam, ale je aplikován na proces místo stroje.

$$C_m, C_p = \frac{(HMR - DMR)}{6 \times \sigma} = \frac{(HMR - DMR)}{6 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}} = \frac{(0,3 - 0,001)}{6 \times 0,01537} = 3,27$$

Dosažená hodnota C_{mk} a C_{pk} je 1,52 a napovídá že stroj nebo proces má malý rozptyl ve vztahu k šířce tolerance a je v rámci této šířky dobře vycentrován.

$$C_{mk}, C_{pk} = \text{Min} \left(\left(\frac{(HMR - \bar{x})}{3 \times \sigma} \right), \left(\frac{(\bar{x} - DMR)}{3 \times \sigma} \right) \right) = \text{Min} \left(\frac{(0,23105; 0,06995)}{3 \times 0,01537} \right) = 1,52$$

17.3 Vzniklé komplikace v testovací fázi procesu lití

Jedním z nejčastějších problémů, které se naskytly v prvotní fázi lití, bylo zalamování velmi tenkých pinů (Obrázek 74). Hlavičky těchto pinů se zalamovaly v dutině formy a jejich odstranění bylo velmi komplikované. Problém byl vyřešen správným nastíněním postřikových trysek, optimalizací teplot formy a zhuťněním odlitku.



Obrázek 74: Zalomený pin odlitku

Dalším problémem bylo řešení odformování odlitku, kdy samotná hnízda držely v rozích jednotlivých hnízd a forma v těchto místech disponovala malým formovacím úhlem a pro nanesení mikro postřiku byli tyto stěny v zákrytu. Vyhazovače zde zanechávaly otláčeniny (Obrázek 75). Problém byl vyřešen optimalizací zdvihu vyhazovačů, přidáním a nasměrováním mikro postřikových trysek s vyšším objemem separátoru a optimalizací licích parametrů.



Obrázek 75: Protlačené vyhazovače na odlitku

18 NÁVRH OPATŘENÍ K ELIMINACI CHYB VZNIKLÝCH PŘI VÝZKUMU MIKRO POSTŘIKOVÉ TECHNOLOGIE

Při výzkumu mikro postřikové technologie bylo nalezeno mnoho výhod avšak, taktéž bylo odhaleno a pochopeno velmi úzké spojení mezi konstrukčním řešením formy temperačních kanálů a využití technologie mikro postřiků na tvarově složité odlitky.

Jestliže je mikro postřiková technologie použita na tvarově jednoduché odlitky je při správném seřizení a s optimalizací teplot formy téměř bezproblémová. Pokud se jedná o odlitky tvarově složité, kde se nachází žebrování, hluboké dutiny a mnoho geometrických úkosů, je naprosto nezbytný vhodný konstrukční návrh temperace formy již při jejím vzniku. Přestože je možno dosáhnout perfektní vnitřní struktury, vnější povrch odlitku, při nevhodném chlazení a temperaci formy nelze dosáhnout stabilní a čisté výroby s dobrou povrchovou drsností, kvůli nánosům mikro postřikového koncentrátu.

Možným řešením je využití CAE (computer aided engineering) programových prostředí a provést rozsáhlé simulace pro teplotní vlastnosti formy a taktéž provést simulaci lití taveniny do dutiny formy. Po provedení všech potřebných analýz navrhnout konstrukci temperačních kanálů, které mohou však mnohdy být velmi tvarově složité.

K eliminaci vzniklého u stávajícího projektu, již započal vývoj nového složení separátoru pod označením ChemTrend SL 68 003.

Předmětem návrhu je taktéž využití technologie laserového sintrování k vytvoření takto komplikovaných částí vložek formy. Jedině tak bude možné využít technologii mikro postřiku v plném rozsahu, nezávisle na tvarech formy a bez dalších zásahů v průběhu výroby. Dalším možným řešením a optimalizací by bylo využití vodních ohříváčů, namísto olejových, díky jejich efektivitě.

19 ZHODNOCENÍ ENVIROMENTÁLNÍCH A TECHNICKO – EKONOMICKÝCH ASPEKTŮ

Samotné zavedené mikro postřikové technologie při vysokotlakém lití hliníkových slitin, nejen může zajistit dosažení vyšší jakosti odlitků, ale taktéž je možné dosáhnout ekonomicky příznivých aspektů. V rámci úspor a optimalizací licího cyklu je možné dosáhnout nemalých úspor v procesu výroby. V následujících tabulkách je uveden výsek z výpočtů provedených po zavedení mikro postřikové technologie.

Tabulka 4: Procesní vstupy pro výpočet úspor zavedením technologie mikro postřiku

Procesní vstupy	Počet
Násobnost formy [ks]	4
Roční výroba [ks/rok]	470 000
Počet cyklů za rok [výpočet]	117 500
Životnost formy [ks]	480 000
Zmetkovitost [%]	4

Parametry pro výpočet byly: ceny jednotlivých vstupů (stroj, energie, voda, odpady), režijní náklady, cena formy a prodloužení její životnosti o dvojnásobek, díky ztrátě tepelných šoků oproti konvenční technologii postřiku. Parametry pro výpočet byli taktéž hodnoty výrobního cyklu: cyklus stroje, normominuty, spotřeba separátoru, spotřeba vody, zmetkovitost a další.

Tabulka 5: Parametry výrobního cyklu před a po optimalizaci s použitím mikro postřikové technologie

Parametry výrobního cyklu	Před	Po
Cyklus stroje [sek.]	52	47
Normominuty [Nmin/ks]	0,866666667	0,783333333
Směšovací poměr [%]	2,50 %	100,00 %
Spotřeba separátoru (směsi) [litr]	3,8	0,003
Spotřeba vody [litr]	3,705	0
Spotřeba koncentrátu	0,095	0,003
Odpadní voda (odpad)	3,705	0
Zmetkovitost [%]	4	3,7
Životnost formy	120 000	240000

Z tabulky 6 lze vidět, že předběžný výpočet pro plánovanou výrobu 470000 kusů ročně a dodržení zmetkovitosti 4 % činí v přepočtu 4,48 milionu Kč. Při výpočtu je brána taktéž cena formy 2627066 Kč a zohledňuje se prodloužení její životnosti o dvojnásobek což tvoří vytvoření značných úspor. Další úspory tvoří optimalizace licího cyklu, úspory na energiích a vstupní vodě.

Tabulka 6: Dosažené úspory v rámci zavedení mikro postřikové technologie po prvním roce

Sledovaný parametr	Před	Po	Rozdíl
Tarif střediska/jednicová mzda	751 020,83 €	678 807,29 €	72 213,54 €
Úspora energie	62 965,25 €	56 910,90 €	6 054,35 €
Čas stroje	203 667 €	184 083 €	19 583 €
Vstupní voda	1 850,18 €	0,00 €	1 850,18 €
Odpadní voda	22,64 €	0,00 €	22,64 €
Separátor	32 594,50 €	2 756,55 €	29 837,95 €
Zmetkovitost	46 158,14 €	36 018,57 €	10 139,57 €
Životnost formy	101 833 €	50 917 €	50 917 €
Výrobní náklady na jeden kus	2,46 €	2,07 €	0,39 €
Celkové úspory 1.rok po optimalizaci	177 618,24 €		

V nynější fázi praktické části diplomové práce lze s jistotou říci, že optimalizace vysokotlakého lití a aplikace mikro postřikové technologie má smysl nejen z technického hlediska za účelem zlepšení kvality, ale i z hlediska ekonomického a environmentálního.

Environmentální výsledky aplikací mikro postřikové technologie, lze taktéž brát optimisticky, dosáhlo se nulové spotřeby odpadní vody díky aplikaci pouze 100 % koncentrátu, tudíž naprosto odpadá likvidace odpadních vod z postřikové technologie. Žádná spotřeba vody a snížení odběru elektrické energie v rámci vyhřevu formy pro konvenční metodu postřiku.

Možné je taktéž zmínit že společnost MESIT & RÖDERS v.o.s., je nositelem certifikátu ecocockpit, což je ekologický certifikát vyjadřující že společnosti splňuje přísné normy pro životní prostředí. Roční uhlíková stopa společnosti činí 8 304,8 t CO₂ ročně.

20 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce bylo nastavit licí parametry procesu výroby vysokotlakého lití tak, aby splňovaly požadavky na jakost a kvalitu vyráběných odlitků dle požadavků zákazníka. Při vysokotlakém lití, byl stanoven cíl taktéž zavést technologii mikro postřiku a nahradit tak konvenční metodu postřikové technologie a následně porovnat a sumarizovat výhody a nevýhody.

V první řadě je nutné zmínit, že bylo naprosto nezbytné pochopit jak technologii mikro postřiku ve vztahu s vysokotlakým litím, tak obohatit své znalosti v konstrukci formy a hlubšímu porozumění proudění taveniny do dutiny formy. Samotná aplikace mikro postřikové technologie vyžadovala, náročnou přípravu pro zavedení hromadné výroby. Technologie mikro postřiku je finančně náročná a pro její zavedení a instalaci bylo zapotřebí podrobných školení v oblasti technologické a konstrukční samotného odlévacího centra.

Prvotní testy a pokusy odlití produktů se zavedením mikro postřiku nedopadly dle představ, díky nevhodnému konstrukčnímu řešení temperačních kanálů ve formě, kdy docházelo k přehřátí formy a neuspokojivých výsledků u kvality odlitku. Po úpravě formy a optimalizaci postřikové hlavy se začalo s rozsáhlou experimentací licích podmínek a parametrů. Pro porovnání, v počátcích si vedla konvenční metoda postřiku o poznání lépe, avšak pouze do doby, než došlo k optimalizaci a porozumění v celém procesu.

Jako první došlo k optimalizaci teplot, kdy díky mikro postřiku bylo možné teploty na ohřev formy snížit na naprosté minimum, aby docházelo pouze k ochlazení formy mezi jednotlivými cykly licího centra. Došlo tudíž ke snížení elektrické energie na ohřivačích o 76 %. Dalším příznivým faktorem při zavedení technologie byla nulová odpadní voda z postřikové aplikace, díky využití 100 % koncentrace postřiku při mazání formy. Jedním z největších benefitů je zjištění o prodloužení životnosti formy o více než dvojnásobek, tento jev je důsledkem odstranění tepelných šoků a namáhání na povrchu formy, jak tomu bylo při užití konvenční metody postřiku.

Při finální optimalizaci licích parametrů, jenž jsou uvedeny v praktické části diplomové práce, optimalizaci mikro postřikové hlavy nastavení trysek vůči matici formy, aby došlo ve všech místech k rovnoměrnému nanesení separační vrstvy, bylo dosaženo příznivých výsledků z hlediska kvalitativního, vnitřní struktury odlitků i hlediska ekonomického.

Jsem si jist, že můj výzkum a seberozvoj v oblasti vysokotlakého lití a technologiemi jež jsou s touto oblastí spjaté bude v následujících letech pokračovat. Technologie má možnosti v mnoha směrech se rozšiřovat, ať jde o výzkum materiálů, tak konstrukci forem, teplotním šířením, prouděním taveniny nebo zavádění nových inovativních technologií.

Domnívám se, že cíle práce bylo dosaženo s velmi pozitivními finálními výsledky, což lze potvrdit, funkčním zavedením technologie mikro postřiku v hromadné výrobě, již vyrobenými prvními zakázkami s využitím této technologie a dosažení úspor za použití této aplikace.

ZÁVĚR

Jestliže vezmu v úvahu strukturu mé diplomové práce, tak v písemné části se zaměřuji na teorii o technologii vysokotlakého lití a technologie příbuzné, technologii mikro postřiků, metody vyhodnocování a prostudoval jsem vlivy na proces celé výroby. Snažil jsem se k problematice přistoupit nejen z pohledu technologického, ale i pochopit provedení procesu výroby jako celek.

Pro mě primární částí, je část praktická, taktéž experimentální, kterou jsem prováděl ve spolupráci se společností MESIT & RÖDERS v.o.s., kde se už několik let věnuji technologii vysokotlakého lití. Mým cílem byla aplikace nové technologie, která v oblasti slévárenství zatím ještě není tolik rozšířená, a to technologie mikro postřiku.

Praktická část je vypracována v určité posloupnosti, jak samotná technologie funguje ve skutečném procesu. Zmiňuji zde nejdůležitější aspekty, které mají vliv na jakost odlitku. Co se týče nastavení dílčích parametrů výroby, tak se jedná o výběr nejdůležitějších z nich. Vysokotlaké licí centra jsou velmi složité a vyžadují mnoho nastavovacích a seřizovacích činností, včetně jejich periférií.

Při experimentaci s technologií postřiku zjišťuji, kolik výhod tato technologie může mít, avšak jak zmiňuji v mé práci, úskalí s každým využitím technologií, vyžaduje nástroj uzpůsobený k ní a v dobré kondici a taky precizní nastavení. K nalezeným nedostatkům jsem navrhl inovativní návrh řešení pro konstrukci forem určených k aplikaci mikro postřiku v podobě laserového sintrování. Věřím že za pomoci této technologie, mohou být formy vyrobeny tak, aby byla technologie mikro postřiku využita v plném rozsahu.

Na konci mé práce uvádím dosažené výsledky mého snažení. Provádím taky jakostní vyhodnocení pro testovaný odlitek. V tuto chvíli mohu říci, že výroba testovaných odlitků byla schválena s aplikací mikro postřikové technologie a uvedena do provozu. Diplomová práce měla příznivý vliv na můj růst i vzdělávání v oboru vysokotlakého lití a věřím, že technologie mikro postřiku nebyla poslední novou inovativní technologií, kterou se budu snažit zavést a pochopit v koncepci vysokotlakého lití hliníkových slitin.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLONDHEIM, David, Jr. a Alex MONROE, 2021. *Macro Porosity Formation: A Study in High Pressure Die Casting* [online]. 17. duben 2021. B.m.: Springer Science and Business Media LLC. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-021-00602-x
- [2] NIU, Zhichao, Guangyu LIU, Tian LI a Shouxun JI, 2022. *Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings* [online]. květen 2022. B.m.: Elsevier BV. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117525
- [3] MALLICK, P. K. *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2010, 1 online zdroj (XII, 369 pages). Woodhead Publishing in materials. ISBN 9781613443644. Dostupné také z: <https://proxy.k.utb.cz/login?>
- [4] NATH, Jagan. *Aluminum Castings Engineering Guide*. ASM International, 2018, Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpACEG000M/aluminum-castings-engineering/aluminum-castings-engineering>
- [5] BEDNÁŘ, Bohumír. *Technologičnost konstrukce odlitků*. Ústí nad Labem: UJEP, ÚTRŮV, 2004, 101 s. Knižnice strojírenské technologie. ISBN 8070446145.
- [6] ANDRESEN, Bill. *Die Cast Engineering A Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process*. CRC Press, September 5, 2019. ISBN 9780367393564.
- [7] Bonollo, F., Gramegna, N. & Timelli, G. *High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges*. JOM 67, 901–908 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1333-8>
- [8] *Evolution Die Casting Machine* | Die Casting | Bühler Group. (n.d.). Bühler Group | Innovations for a better world. https://www.buhlergroup.com/global/en/products/evolution_die_castingmachineevolution.html
- [9] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6

- [10] *Rozvoj tlakového lití* | MM Průmyslové spektrum. (n.d.). www.mmspektrum.com. <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti>
- [11] Edosa, O.O., Tekweme, F.K. & Gupta, K. *Squeeze casting for metal alloys and composites: An overview of influence of process parameters on mechanical properties and microstructure*. *China Foundry* 20, 148–158 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41230-022-2030-1>
- [12] *Advanced Casting Methodologies: Investment Casting, Centrifugal Casting, Squeeze Casting, Metal Spinning, and Batch Casting*. (2014). P. Kapranos, C. Carney, A. Pola, M. Jolly.
- [13] Nafisi, S., Ghomashchi, R. (2016). *Thixocasting*. In: *Semi-Solid Processing of Aluminum Alloys*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40335-9_7
- [14] HUSAIN, N H; AHMAD, A H a RASHIDI, M M. *An overview of thixoforming process*. Online. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, roč. 257. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012053>. [cit. 2024-02-15].
- [15] 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>
- [16] *Advanced Casting Methodologies: Investment Casting, Centrifugal Casting, Squeeze Casting, Metal Spinning, and Batch Casting*. (2014). P. Kapranos, C. Carney, A. Pola, M. Jolly. (Original work published 2014)
- [17] *Computer aided engineering* – Wikipedie. Wikipedie, otevřená encyklopedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Computer_aided_engineering Příspěvatelé projektů Wikimedia. (2016, November 21).
- [18] *Průmyslové roboty* | KUKA AG. (n.d.). KUKA AG. <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/roboticke-systemy/prumyslove-roboty>
- [19] *Průmysl 4.0* – Wikipedie. Wikipedie, otevřená encyklopedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Prumysl_4.0 Příspěvatelé projektů Wikimedia. (2015, September 20).

- [20] *High Pressure Die Casting*. (n.d.). Dolin Aluminum Casting. <https://www.dolincasting.com/services/high-pressure-die-casting>
- [21] *ESM Die Spraying Machines* - Wollin GmbH. (n.d.). Home - Wollin GmbH. <https://www.wollin.de/en/products/die-spraying/esm-die-spraying-machines.html>
- [22] Gulin Idil Sonmezturk Bolatan, Sitki Gozlu, Lutfihak Alpkan, Selim Zaim, *The Impact of Technology Transfer Performance on Total Quality Management and Quality Performance*, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 235, 2016, Pages 746-755, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.076>.
- [23] Kotadia, H.R., Qian, M. & Das, A. *Solidification of Aluminium Alloys Under Ultrasonication: An Overview*. Trans Indian Inst Met 71, 2681–2686 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1446-1>
- [24] *Solidification Of Alloys*. (n.d.). Aluminium Die Casting. <https://aluminiumfoundry.blogspot.com/2012/01/solidification-of-alloys.html>
- [25] Pelton, A.D., Eriksson, G. & Bale, C.W. *Scheil–Gulliver Constituent Diagrams*. Metall Mater Trans A 48, 3113–3129 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4059-0>
- [26] *Chvorinovo pravilo* – Wikipedia. Wikipedia. https://bs.wikipedia.org/wiki/Chvorinovo_pravilo Contributors to Wikimedia projects. (2007, August 16).
- [27] Arunkumar, K., Bakshi, S., Phanikumar, G. et al. *Study of Flow and Heat Transfer in High Pressure Die Casting Cooling Channel*. Metall Mater Trans B 54, 1665–1674 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02785-6>
- [28] Zhang, Xb., Chen, W. & Zhang, Lf. *A coupled model on fluid flow, heat transfer and solidification in continuous casting mold*. China Foundry 14, 416–420 (2017). <https://doi.org/10.1007/s41230-017-7171-2>
- [29] Muttaqin, B. I. A. (2019). Telaah Kajian dan Literature Review *Design of Experiment (DoE)*. Journal of Advances in Information and Industrial Technology, 1(1), 33–40. <https://doi.org/10.52435/jaiit.v1i1.10>
- [30] Beg, S. (Ed.). (2021). *Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4717-5>

- [31] Group, A. I. A., Corporation, C., Company, F. M., & Corporation, G. M. (Eds.). (2005). *Statistical process control (SPC): Reference manual*. (2nd ed.). Automotive Industry Action Group.
- [32] Anwar, sohail, and william j. rothwell. "a study of the implementation of statistical process control (spc)/statistical quality control (sqc) methods in the selected manufacturing organizations of pennsylvania." *Journal of the Pennsylvania Academy of Science*, vol. 69, no. 1, 1995, pp. 26–30. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/44149029>. Accessed 16 Feb. 2024.
- [33] *Why Is It Always Better to Perform a Design of Experiments (DOE) Rather than Change One Factor at a Time?* (n.d.). Minitab Blog. <https://blog.minitab.com/en/applying-statistics-in-quality-projects/why-is-it-always-better-to-perform-a-design-of-experiments-doe-rather-than-change-one-factor-at-a-time>
- [34] Regulační diagram – Wikipedie. Wikipedie, otevřená encyklopedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Regulační_diagram Příspěvatelé projektů Wikimedia. (2011, January 29).
- [35] DMAIC – Model řízení Six Sigma projektu. (n.d.). Svět produktivity. <https://www.svetproduktivity.cz/slovník/DMAIC-Model-řízení-Six-Sigma-projektu.htm>
- [36] *Quality Function Deployment*. (n.d.). Certifikace Manažerských Systémů | CeMS. <https://www.cems-cz.com/blog/242-quality-function-deployment>
- [37] Huang, J., Mao, LX., Liu, HC. et al. *Quality function deployment improvement: A bibliometric analysis and literature review*. *Qual Quant* 56, 1347–1366 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11135-021-01179-7>
- [38] HASCO Shop. (n.d.). HASCO Shop. <https://www.hasco.com/cs/>
- [39] Suthar, J., Persis, J. and Gupta, R. (2023), "Critical parameters influencing the quality of metal castings: a systematic literature review", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 40 No. 1, pp. 53-82. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2020-0368>

- [40] *Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition* (10th ed.). (2018). William D. Callister Jr., David G. Rethwisch. <https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering:+An+Introduction,+10th+Edition-p-9781119405498>
- [41] *Separální prostředky*. Online. ChemTrend. 2024. Dostupné z: <https://cz.chemtrend.com/vyrobky/separacni-prostredky/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HPDC – vysokotlaké lití pod tlakem (High pressure die casting)

CFD – výpočetní dynamika tekutin (Computational fluid dynamics)

FEA – metoda konečných prvků (Finite element analysis)

IoT – internet věcí (Internet of things)

CMM –souřadnicově měřící přístroje (Coordinate measuring machine)

HERA – mazadlo pro mikro postříkovou technologii (High efficiency release agent)

SPC – statistické řízení procesu (Statistical process control)

CFD – numerická metoda k simulaci proudění tekutin (Computational fluid dynamics)

DOE – Návrh experimentu (Design of experiment)

RSM – Metoda plochy odezvy (Response surface method)

QFD – Nasazení funkce kvality (Quality function deployment)

C_{liq} – koncentrace prvku v tekuté fázi po solidifikaci

C_{Ts} – počáteční koncentrace prvku ve slitině

v_i – objemový zlomek krystalizující fáze obsahující prvek

L_i – lineární zlomek krystalizující fáze obsahující prvek

β_i – distribuční koeficient prvků mezi krystalizující fází a tekutou fází

t – doba tuhnutí odlitku

k – empirická konstanta

V – objem odlitku

m – empirický exponent, který může být různý pro různé materiály a procesy lití

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Tlakový licí stroj Bühler [8].....	13
Obrázek 2: Schéma lití ve studené komoře [1,9].....	14
Obrázek 3: Schéma lití v horké komoře [9].....	15
Obrázek 4: Schéma squeeze castingu [12]	16
Obrázek 5: Schéma Thixocastingu [14].....	18
Obrázek 6: Schéma vysokotlakého licího stroje [15]	20
Obrázek 7: Průmyslový robot Titan KR 1000 KUKA [18].....	24
Obrázek 8: Průběh průmyslové revoluce 4.0 [19]	25
Obrázek 9: Schéma licí jednotky [21]	26
Obrázek 10: Plnění komory kovem [21].....	27
Obrázek 11: Plnění dutiny formy [21].....	28
Obrázek 12: Odformování odlitku [21]	29
Obrázek 13: Schématický výkres vyhazovacího kolíku [38]	31
Obrázek 14: Mikro-postřiková hlava [21]	33
Obrázek 15: Postřiková jednotka Wollin ESM3 [21].....	34
Obrázek 16: Vizualizace mikro postřiku za pomoci trysek DDV [21].....	36
Obrázek 17: Graf křivky ochlazování binárních slitin v pevném roztoku [24]	39
Obrázek 18: Fázový diagram pro slitinový systém [24].....	40
Obrázek 19: Schéma Design of Experiments [33].....	47
Obrázek 20: Regulační diagram [34].....	48
Obrázek 21: Grafické znázornění Six Sigma [35]	49
Obrázek 22: Fáze tvorby QFD [36]	51
Obrázek 23: Vyráběný odlitek.....	57
Obrázek 24: Ingoty Trimal 37 AlSi9Mn.....	58
Obrázek 25: Sklopná kelímková pec s rekuperačním systémem.....	60
Obrázek 26: Odplynění a čištění taveniny, přístroj FOSECO FDU Mark 100 MTS 1500 .	61
Obrázek 27: Měření indexu hustoty taveniny.....	62
Obrázek 28: Jiskrový spektrometr Q4 Tasman.....	62
Obrázek 29: Výsledek spektrální analýzy slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)	63
Obrázek 30: Tlakový licí stroj Bühler 84 D	64
Obrázek 31: Ovládací systém stroje Bühler systém DataView	64
Obrázek 32: Montáž držáku licí komory a distanční desky.....	65
Obrázek 33: Výměna distanční trubky	66
Obrázek 34: Upnutí licí formy.....	67

Obrázek 35: Upínání formy	68
Obrázek 36: Mechanické nastavení zdvihu vyhazovačů	69
Obrázek 37: Prvotní plán zapojení temperačních a chladících okruhů formy.....	70
Obrázek 38: Zapojení temperačních a chladících okruhů pevné části formy.....	71
Obrázek 39: Zapojení temperačních a chladících okruhů pohyblivé části formy	72
Obrázek 40: Teplotní snímky kamery po ostříkovacím cyklu za použití mikro postříkové technologie.....	73
Obrázek 41: Zapojení chladících okruhů stroje.....	74
Obrázek 42: Temperační zařízení TOOL TEMP TT 388.....	74
Obrázek 43: Montáž vstřikovacího pístu	75
Obrázek 44: Umístění vstřikovacího pístu do komory	76
Obrázek 45: Nastavení mazání pístu	76
Obrázek 46: Hmotnost a plochy odlitku	77
Obrázek 47: Nastavení rozměrů licí komory	78
Obrázek 48: Nastavení provozních tlaků.....	79
Obrázek 49: Licí křivka	80
Obrázek 50: Nastavení kontrolních kritérií pro přepnutí fáze dotlaku	82
Obrázek 51: Křivka fáze dotlaku	83
Obrázek 52: Kontrolní body fáze plnění.....	84
Obrázek 53: Kontrolní body fáze dotlaku.....	85
Obrázek 54: Uzavírací síla formy	86
Obrázek 55: Nastavení vyhazovacího mechanismu	87
Obrázek 56 : Nastavení zavírání formy	88
Obrázek 57: Nastavení doby tuhnutí odlitku	89
Obrázek 58: Nastavení pohybu pístu	90
Obrázek 59: Nastavení počátku produkce	90
Obrázek 60: Nastavení mazání pístu	91
Obrázek 61: Kontrolní parametry pro hlídání dření plnicího pístu	92
Obrázek 62: Vakuový systém Fondarex	93
Obrázek 63: Odsávací profil	93
Obrázek 64: Návrh mikro postříkové hlavy	94
Obrázek 65: Schéma funkce trysky DDV.....	95
Obrázek 66: Nastavení a uspořádání mikro postříkové hlavy na pevnou a pohyblivou polovinu formy	95
Obrázek 67: Tlaková nádoba se separačním médiem ChemTrend HERA SL 8801	96

Obrázek 68: Nastavení a uspořádání konvenční postřikové hlavy na pevnou a pohyblivou polovinu formy	97
Obrázek 69: Interpretace dosažených výsledků při použití mikro postřikové technologie .	98
Obrázek 70: RTG zkouška vnitřní struktury odlitku	99
Obrázek 71: Měřicí přístroj pro odlitek	100
Obrázek 72: Místa dotyků sond	100
Obrázek 73: Finální měření rovinnosti	101
Obrázek 74: Zalomený pin odlitku	102
Obrázek 75: Protlačené vyhazovače na odlitku	102

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Chemické složení slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn)	59
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti slitiny Trimal 37 (AlSi9Mn).....	59
Tabulka 3: Dosažené výsledky aplikací mikro postřikové technologie	98
Tabulka 4: Procesní vstupy pro výpočet úspor zavedením technologie mikro postřiku ...	104
Tabulka 5: Parametry výrobního cyklu před a po optimalizaci s použitím mikro postřikové technologie.....	104
Tabulka 6: Dosažené úspory v rámci zavedení mikro postřikové technologie po prvním roce	105