

Technologie vysokotlakého lití ze slitin hliníku

René Kafka

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	René Kafka
Osobní číslo:	T19203
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Technologie vysokotlakého lití ze slitin hliníku

Zásady pro vypracování

- 1- Teoretická rešerše na dané téma
- 2- Sestavení výrobního postupu pro vysokotlaké lití z hliníkových slitin
- 3- Kvalitativní zhodnocení důležitých parametrů a diskuze navrženého postupu výroby

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

Seznam doporučené literatury:

POLMEAR, Ian, et al. *Light alloys: metallurgy of the light metals*. Butterworth-Heinemann, 2017.

NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKŠÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 217 s. ISBN 9788001060261.

BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 9788074544712.

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

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou 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 – bakalářskou 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 bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji 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 bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá technologií vysokotlakého lití odlitků ze slitin hliníku, sestavením výrobního postupu pro odlévání danou technologií a následné kvalitativní zhodnocení dílčích parametrů a diskuse navrženého postupu výroby. Teoretická část popisuje samotnou technologii vysokotlakého lití, základní rozdělení metod, metalurgii slévárenských slitin a následné zhodnocení kvality dílů a vad, které mohou při odlévání vznikat. V praktické části se řeší problematika kvality samotného odlitku, dle navrženého postupu výroby a zvolených parametrů v průběhu procesu výroby pomocí několika měření a zkoušek.

Klíčová slova: Technologie, vysokotlaké lití, slitina hliníku, výrobní postup, kvalita

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the technology of high-pressure casting of aluminum alloy castings, the assembly of a production process for casting by a given technology and the subsequent qualitative evaluation of sub-parameters and discussion of the proposed production process. The theoretical part describes the technology of high-pressure casting itself, the basic distribution of methods, the metallurgy of foundries alloys and the subsequent evaluation of the quality of parts and defects that may arise during casting. In the practical part, the issue of the quality of the casting itself is solved, according to the proposed production process and the selected parameters during the production process using several measurements and tests.

Keywords: Technology, high-pressure casting, aluminum alloy, manufacturing process, quality

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za velký přínos a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti MESIT & RÖDERS v.o.s., zejména oddělení jakosti a kvality a technologickému oddělení, za poskytnuté konzultace a materiály.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNOLOGIE VYSOKOTLAKÉHO LITÍ	11
1.1 ROZDĚLENÍ TECHNOLOGIÍ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ.....	11
1.1.1 Konvenční vysokotlaké lití	12
1.1.2 Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting	15
1.1.3 Lisování v polotuhém stavu – Semi solid processing	17
1.1.4 Lití do vakuované formy	18
2 SLÉVÁRENSKÁ VÝROBA V ČR A VE SVĚTĚ	19
2.1 ČESKÁ REPUBLIKA VE EVROPSKÉM SLÉVÁRENSTVÍ.....	19
2.2 ČESKÝ SLÉVÁRENSKÝ PRŮMYSL.....	21
3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN A JEJICH ROZDĚLENÍ	22
3.1 VLASTNOSTI HLINÍKU	22
3.2 SLITINY HLINÍKU	23
3.2.1 Rovnovážné diagramy slitin hliníku	24
3.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN	26
3.4 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN	28
3.4.1 Slévárenské vlastnosti hliníkových slitin	28
3.4.2 Slévatelnost hliníku a jeho slitin	30
3.5 ZÁKLADNÍ TYPY SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU A JEJICH POPIS	31
3.5.1 Slévárenské slitiny typu Al – Si (siluminy)	32
3.5.2 Slévárenské slitiny Al – Cu (duraly).....	33
3.5.3 Slévárenské slitiny Al – Mg (hydronaly)	33
4 HLAVNÍ POUŽITÍ SLITIN HLINÍKU	34
5 VADY ODLITKŮ	35
5.1 HLAVNÍ DRUHY VAD VYSKYTUJÍCÍCH SE U ODLITKŮ	35
6 POŽADOVANÉ VLASTNOSTI HLINÍKOVÝCH SLITIN A JEJICH ZKOUŠENÍ	37
6.1 ZJIŠŤOVÁNÍ VAD – DEFECTOSKOPIE	37
6.1.1 Metody pro zjišťování povrchových vad	37
6.1.2 Metody pro zjišťování vnitřních vad.....	38
7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
8 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	41
9 MATERIÁL HSM	42

9.1	TAVENÍ MATERIÁLU	42
9.2	TAVICÍ PECE	43
9.3	TRANSPORT HLINÍKU	44
9.4	ODPLYŇOVÁNÍ	45
9.4.1	Postup procesu odplyňování	46
9.5	INDEX HUSTOTY TAVENINY	47
9.5.1	Postup měření	47
9.5.2	Vyhodnocení měření	48
9.6	SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA	49
9.6.1	Spektrální analýza HSM	50
9.6.2	Výsledky spektrální analýzy	51
10	ODLÉVACÍ CENTRUM.....	52
10.1	STROJ PRO LITÍ ODLITKŮ A JEHO NASTAVENÍ PRO ODLITKY HSM.....	52
10.1.1	Nastavení licího stroje pro odlitky z HSM.....	53
10.1.2	Udržovací pec a dávkování kovu	55
10.2	FORMA PRO ODLITKY A JEJÍ PLNĚNÍ	56
10.2.1	Temperace formy	57
10.2.2	Chlazení formy.....	58
10.2.3	Ostřík a mazání formy.....	59
10.2.4	Detail a stav formy	60
10.3	VYJÍMÁNÍ ODLITKŮ Z FORMY	61
10.4	OHRANĚNÍ ODLITKŮ	62
10.5	FINÁLNÍ ODLITEK	63
11	KONTROLA ODLITKŮ A ZHODNOCENÍ KVALITY	64
11.1	RTG ZKOUŠKA ODLITKŮ	65
11.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA ODLITKŮ	68
11.2.1	Vyhodnocení tahové zkoušky	71
11.3	NÝTOVACÍ ZKOUŠKA ODLITKŮ	73
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	80

ÚVOD

Výroba odlitků technologií vysokotlakého lití, je jednou z technologií v oblasti slévárenství a má zde velké zastoupení, především v automobilovém průmyslu. Vysokotlaké lití také patří mezi takzvané „net shape“ technologie, jinak řečeno „na hotovo“. Vyráběné odlitky jsou totiž velmi blízké hotovým výrobkům a je zde minimální užití dokončovacích operací. Technologie vysokotlakého lití, se hodí a taktéž využívá především pro velkosériovou výrobu, díky krátkým výrobním cyklům a vysoké produktivitě výroby. Pomocí vysokotlakého lití lze vyrábět tenkostěnné odlitky složitých tvarů s vysokou kvalitou povrchu, rozměrovou přesností s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, dle odlévaného materiálu.

Kvalitu samotných odlitků metodou vysokotlakého lití ovlivňuje řada faktorů, na které ve výrobě narazíme. Počínaje samotnou konstrukcí tlakové formy, odvzdušnění dutiny formy, vstupní parametry procesu lisování, postřik, temperace až po tavení odlévané slitiny. V technologii vysokotlakého lití všechny tyto faktory a parametry mají vliv na výslednou kvalitu a jakost odlitku, ať už záporný, nebo kladný.

Především kvalitativní zhodnocení odlitků a problematikou sestavení výrobního postupu pro vysokotlaké lití z hliníkových slitin se bude zabývat tato bakalářská práce. Cílem bude sestavit výrobní postup pro kvalitní odlitky a vysokou produktivitu ve velkosériové výrobě. Obsahem práce je také popis výroby, pomocí technologie vysokotlakého lití slitin hliníku, teoretický rozbor jednotlivých operací výroby a faktorů, které ovlivňují výslednou kvalitu odlitku.

Praktická část této bakalářské práce se bude zabývat kvalitou samotného odlitku, dle navrženého postupu výroby a zvolených parametrů v průběhu procesu výroby. Kvalita odlitku se bude hodnotit pomocí několika měření a zkoušek, na jejichž základě se vyhodnotí jakost a mechanické vlastnosti daného odlitku. Z výsledků měření a zkoušek se posoudí, zda je výrobní postup optimální a parametry ovlivňující kvalitu odlitku jsou zvoleny správně.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE VYSOKOTLAKÉHO LITÍ

Výroba odlitků metodou vysokotlakého lití, patří mezi technologie „net shape“ („na hotovo“). Vyráběné odlitky jsou velmi blízké hotovým výrobkům a není proto nutné provádět další dokončovací operace. Tato metoda umožňuje odlévat odlitky se složitou geometrií, ze široké škály slitin hliníku, zinku, hořčíku, olova a mosazi. [1]

1.1 Rozdělení technologií vysokotlakého lití

Vysokotlaké lití můžeme dělit do několika skupin:

1. Konvenční vysokotlaké lití:
 - Stroje s teplou lící komorou
 - Stroje se studenou lící komorou
2. Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting:
 - Přímý squeeze casting
 - Nepřímý squeeze casting
3. Lisování v polotuhém stavu – Semi solid processing:
 - Rheocasting
 - New Rheocasting
 - Thixocasting
 - Thixomolding
 - Thixoforming
 - Vexocasting
4. Lití do vakuované formy [1] [11]

1.1.1 Konvenční vysokotlaké lití

U tohoto způsobu lití se používá kovové formy chlazené vodou, s kovovými jádry. Tekutý kov se vtlačuje pomocí pístu odlévacího stroje přes vtokovou soustavu do dutin formy. Tlak pístu je vyvozen mechanicky nebo hydraulicky. V praxi je tento způsob označován jako lití pod tlakem. Kov za působení vysokého tlaku ve formě tuhne a po vychladnutí na určitou teplotu se odlitek z formy vyjme. [9]

Vysokotlakým litím se vyrábějí převážně dekorativní a nízko i středně namáhané součásti z neželezných slitin. Více se odlévají slitiny hliníku, olova, zinku, hořčíku a mědi. Každá z těchto slitin má své přednosti a nevýhody, které se odrážejí v konstrukci formy i odlitku pro tlakové lití. [2,9]

Formy pro vysokotlaké lití jsou namáhány vysokými teplotami, změnami teplot (cyklické tepelné namáhání) a erozivním účinkem taveniny. Střídavé tepelné i mechanické namáhání vyvolává vznik trhlin na povrchu formy. Z provozního hlediska je proto důležitá životnost formy, tj. počet cyklů do jejího vyřazení. Pevná i pohyblivá část formy může být z jednoho kusu nebo vložkována, je možno používat i formu s jádry. Chlazení forem zabraňuje přehřátí a provádí se různými chladicími systémy. Nejčastěji se používá chlazení cirkulující vodou ve vložkách formy. [1,9]

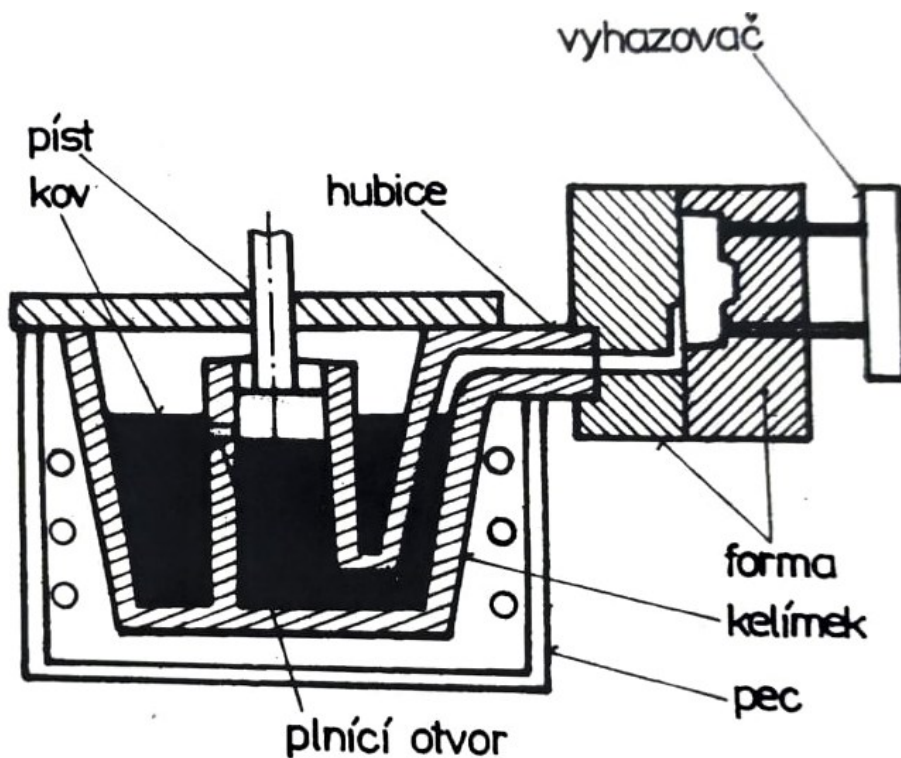
Vysokotlaké lití se provádí na speciálních strojích, které se dělí podle konstrukčního uspořádání do dvou skupin. Buď je tavící kelímek součástí lícího stroje a roztavený kov se vtlačuje do formy pístovým mechanismem nebo se kov taví mimo stroj a jeho potřebné množství pro zhotovení jednoho odlitku se před odlitím nalévá do tlakové komory. První způsob se nazývá lití na strojích s teplou (vytápěnou) komorou, druhý litím na strojích se studenou komorou. [9]

1.1.1.1 Stroje s teplou lící komorou

Tavící kelímek, který je součástí lícího stroje, je vytápěn plynem nebo elektricky. Tlak je vyvozován pístem, který v horní poloze otevírá plnicí otvor, kterým prochází roztavený kov z kelímku do tlakové komory. Plnicí otvor se uzavře při pohybu pístu směrem dolů. Po ztuhnutí odlitku se pohyblivá část formy odsune a odlitek je z ní vytlačen vyhazovacími trny (vyhazovači).

Podle orientace tlakové (plnicí) komory se tyto stroje dělí na stroje s vertikální nebo horizontální plnicí komorou a podle orientace dělicí roviny formy na stroje s vertikální nebo horizontální dělicí rovinou formy. Na strojích s teplou komorou se odlévají slitiny s nízkou tavící teplotou. Při lití je komora i píst ve stálém styku s roztaveným kovem a při odlévání slitin s vyšším bodem tání by došlo k rychlému opotřebení.

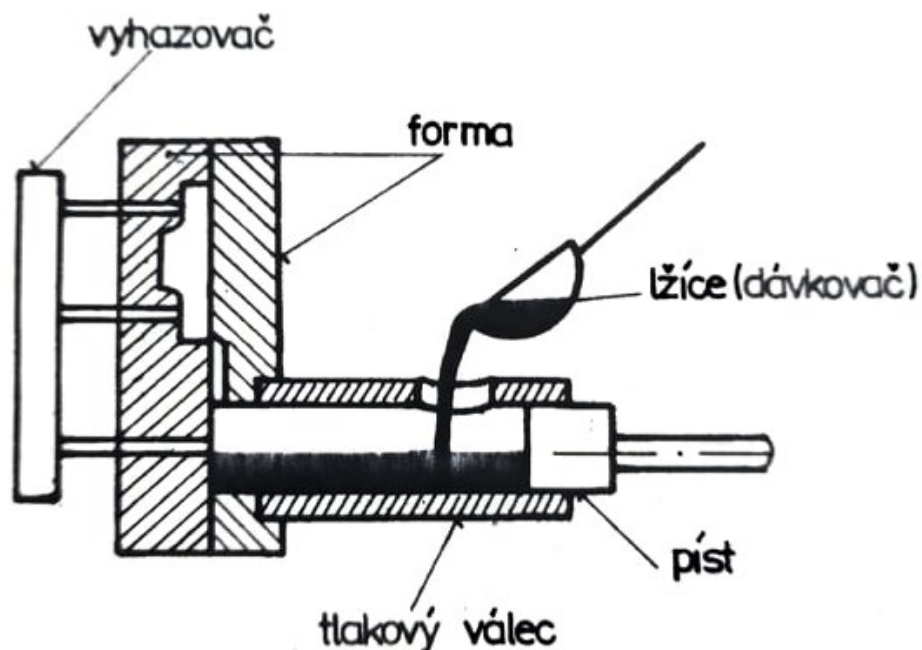
Tlak tekutého kovu může být rovněž vyvozován tlakovým vzduchem, vpouštěným do tlakové komory. Tlakové stroje se nazývají kompresorové a v současné době jsou nahrazovány tlakovými stroji se studenou lící komorou. [9]



Obrázek 1: Schéma stroje pro vysokotlaké lití s vertikální teplou plnicí komorou a vertikální dělicí rovinou formy [9]

1.1.1.2 Stroje se studenou lící komorou

Podle orientace plnicí komory a dělicí roviny formy se dělí stroje se studenou lící komorou opět na stroje s vertikální nebo horizontální plnicí komorou a s vertikální nebo horizontální dělicí rovinou formy. Převážná část dnes používaných strojů má horizontální komoru. Na obr. č. 2 je schéma stroje s horizontální tlakovou komorou a vertikální dělicí rovinou formy. Tlaková komora je tvořena plnicím válcem s vložkou z nitridované oceli. Z jedné strany je uzavřena lisovacím pístem, z druhé strany pohyblivou částí formy. Tekutý kov se nalévá lžící (dávkovačem) do tlakové komory. Do formy zatéci nemůže, protože vtokový zářez je zaústěn do horní části tlakové komory, takže hladina roztaveného kovu je níže. Při pohybu pístu se hladina kovu rychle zvedá a po dosažení úrovně vtokového zářezu je forma rychle vyplněna kovem. Po ztuhnutí odlitku se pohyblivá část formy odsune a odlitek je z ní vytlačen pomocí vyhazovačů. Přebytečný kov z komory zůstává spojen s odlitkem a zpravidla se za tepla uráží. [9]



Obrázek 2: Schéma stroje pro vysokotlaké lití s horizontální studenou plnicí komorou a vertikální dělicí rovinou [9]

U strojů se studenou vertikální komorou je plnicí komora zabudována ve vertikální vstřikovací části stroje a je oddělena od formy (spojení mezi komorou a dutinou formy zajišťuje plnicí otvor – tryska). Někdy, a to hlavně při lití slitin mědi bývá plnicí komora vytvořena přímo ve formě. [9]

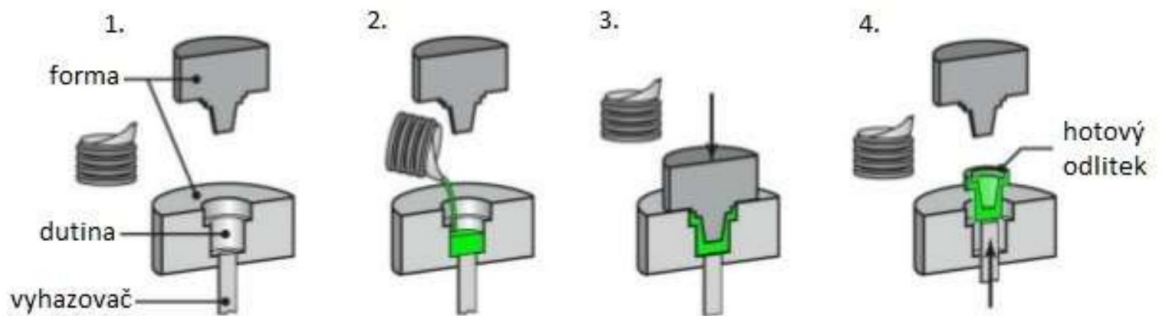
1.1.2 Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting

Squeeze casting má dvě varianty. Obě využívají vysokého tlaku při tuhnutí odlitku, jenž částečně zamezuje vzniku porozity a také přispívá k lepšímu přechodu tepla mezi odlitkem a lící formou pro dosažení vyšší rychlosti tuhnutí, která přispívá k lepším vlastnostem a vyšší produktivitě. Lití s krystalizací pod tlakem je charakterizováno použitím velkých vtokových zářezů (oproti konvenčnímu tlakovému lití) a pomalým laminárním plněním formy kovem.

Po celou dobu tuhnutí působí na odlitek vysoký tlak. Díky pomalému rovnoměrnému plnění a působení vysokého tlaku, se minimalizuje vznik plynových dutin a mikrostaženin. Odlitky vyráběné touto metodou mají vysokou vnitřní integritu. Nevýhodou této technologie je značná investiční i provozní náročnost a delší pracovní cykly. [1]

1.1.2.1 Přímý squeeze casting

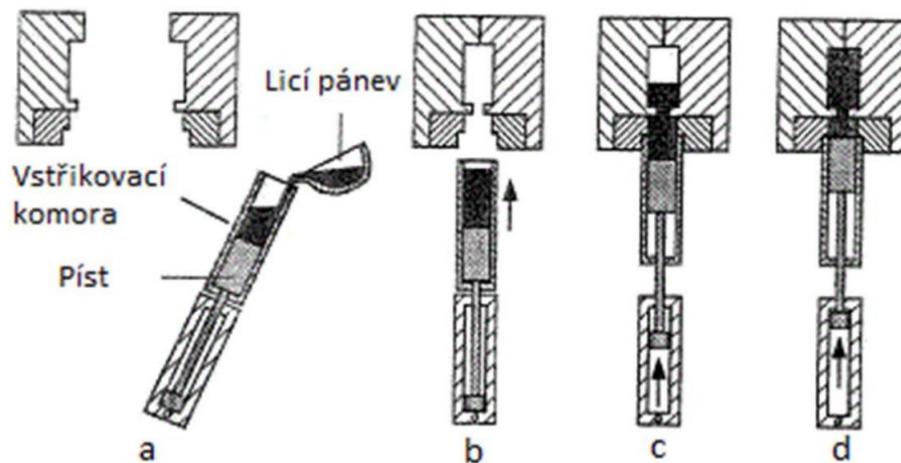
U přímého squeeze castingu se přesně odměřená dávka kovu volně nalije do spodní části kovové formy. Kov je uzavřen a stlačen horní částí formy. Po ztuhnutí se odlitek pomocí vyhazovačů vytlačí z formy. [13,7]



Obrázek 3: Odlévání, metoda přímý squeeze casting [7]

1.1.2.2 Nepřímý squeeze casting

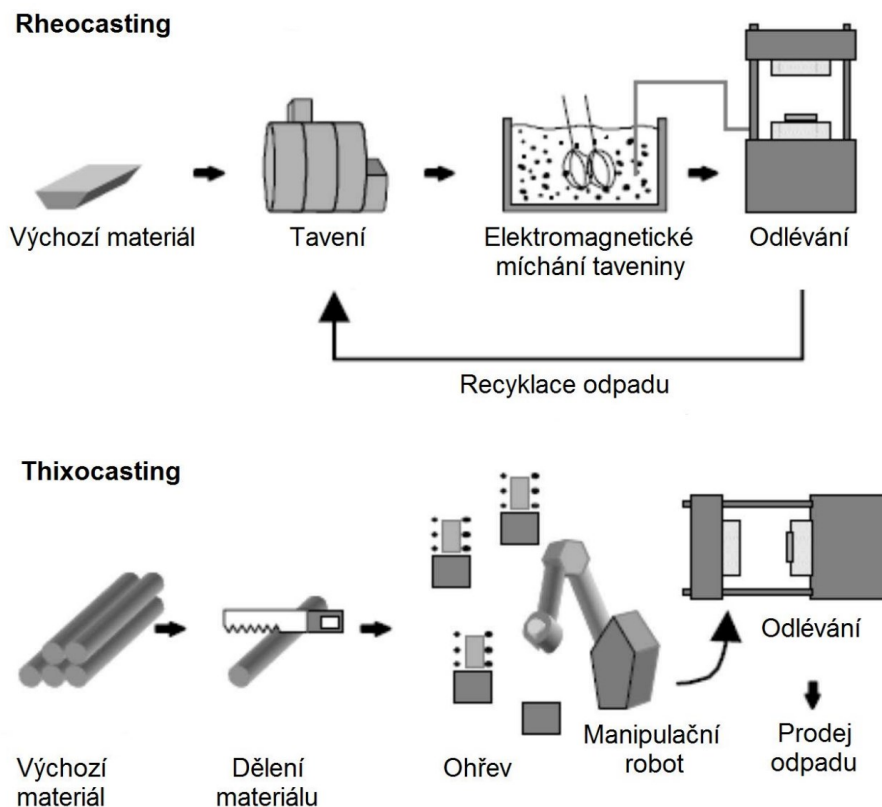
U nepřímého squeeze castingu se roztavený kov dávkuje do komory lisu pod vlastní kovovou formou. Válec se vrátí do pracovní polohy a kov se vtlačí do formy. [1,8]



Obrázek 4: Plnění formy, metoda nepřímý squeeze casting [8]

1.1.3 Lisování v polotuhém stavu – Semi solid processing

Odlévání částečně ztuhlého kovu, či častěji známého jako semi-solid casting, má spoustu výhod a je ho běžně využíváno například při vysokotlakém lití. Jelikož značná část tepla je odebrána z vsázky ještě před odlitím, kovové formy pracují za nižších teplot v porovnání s odléváním plně roztaveného kovu, což redukuje tepelný šok, který může působit trhlinky ve formě, a tudíž prodlužuje její životnost. Také chladnutí odlitku je rychlejší, což zvyšuje produktivitu. Jako další výhoda je uváděno snížení porozity, jelikož značná část kovu ztuhla ještě před odlitím, to se projevuje především nižší tvorbou bublinových řetězců, což je běžně se vyskytující problém u vysokotlakého lití za použití zcela tekutého kovu. Celkově se tak zlepšují mechanické vlastnosti odlitku. Nevýhody zpracování částečně ztuhlého kovu se pojí se zvýšením nákladů na jeho výrobu a v některých případech potřeba zvýšené regulace, aby byla vytvořena správná směs. [1,10]

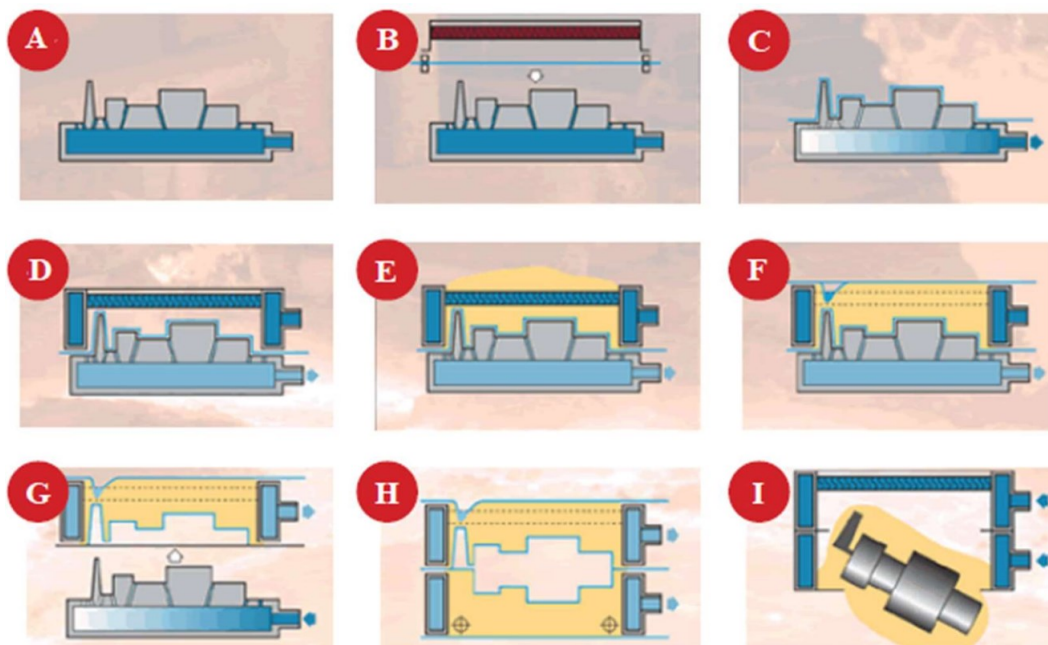


Obrázek 5: Postupy výroby Rheocasting a Thixocasting [10]

1.1.4 Lití do vakuované formy

Odlévání do vakuové formy je proces, při kterém je za potřebí pískové formy. Používá se zde suchý, volně se pohybující agregát bez pojiva, obvykle křemenný písek. Forma je vyrobena ve speciálním licím rámu zataveném na horní i dolní straně plastovou fólií. Volný písek bez pojiva je vytvrzený za působení vakua. Metoda vakuového lití se výrazně liší od ostatních metod slévání. [11,13]

Na obrázku 6A vidíme připravený model. V obrázku 6B se za pomoci ohřívače zahřívá fólie za účelem lepší tvarovatelnosti a roztažitelnosti na model. Nahřátá fólie je poté za pomoci zmiňovaného vakua přisáta na model tak aby dokonale kopírovala jeho tvar, jak je znázorněno na obrázku 6 C. Nyní je na fólii nasprejován keramický povlak, který necháme zaschnout. Jakmile povlak zaschne, formovací rám usadíme na model a nasypeme do něj suchý písek, který zhutníme za pomoci vibrací (obrázek 9 D a E). Nyní v písku vytvoříme licí jamku a přiložíme druhou plastovou fólii, tentokrát nezahřátou. Zajistíme těsnost kolem fólie a skrze stěny formovacího rámu začneme odsávat vzduch a vytvoříme vakuum (obrázek 9 F). Následně do modelu vpustíme vzduch, čímž dojde uvolnění od formy (obrázek 9 G). Na obrázku 6 H již vidíme připravenou dutinu formy a následně na obrázku 6 I již odlitek po jeho dokončení. [3,13,12]



Obrázek 6: Schéma lití do vakuové formy [12]

2 SLÉVÁRENSKÁ VÝROBA V ČR A VE SVĚTĚ

Slévárství se jako obor vyvinulo z řemeslné výroby, jejíž kořeny sahají hluboko do minulosti, postupy odlévání kovů jsou známy již z období před naším letopočtem. Avšak teprve v 19. především ve 20 století se slévárství stalo oborem, který významně zasáhl do rozvoje společnosti. Hlavním spotřebitelem odlitků je zejména automobilovým, energetický a spotřební průmysl, ale snad neexistuje obor, ve kterém by se odlitky neuplatnily. [2]

Ve druhé polovině 20 století byla v návaznosti na tradici slévárství v našich zemích vybudována mohutná výrobní základna slévárenského průmyslu. Československo bylo produkcí odlitků 1,5 mil. t/rok na jednom z předních míst ve světě v přepočtu produkce na jednoho obyvatele. Československé slévárství zaznamenalo v novodobé historii dva mezníky. Prvním byl rok 1989 s následnou privatizací a tím druhým bylo rozdělení Československa a vznik samostatných států České a Slovenské republiky v roce 1993. Díky tomu nastaly, tak jako v ostatních oblastech průmyslu, kvantitativní i kvalitativní změny. [2]

Slévárny se privatizovaly, velké podniky se členily do menších struktur, některé slévárny zanikly, vzniklo však mnoho sléváren nových. Největší nárůst nových byl zaznamenán především v oblasti odlévání slitin hliníku, byly založeny pobočky velkých zahraničních firem. Z roční produkce 1,5 milionu tun odlitků v tehdejším Československu, klesla následně výroba v České republice až na současných 350–400 tisíc tun za rok. [2]

2.1 Česká republika ve Evropském slévárství

Pokud analyzujeme dosažené výsledky a další perspektivy české a zahraniční metalurgie, určitě nelze pominout tuzemskou slévárenskou výrobu. V roce 2013 se v České republice vyrobilo celkem 408 358 t odlitků. Tato hodnota je velmi blízká roku 1993. Tehdy to bylo cca 406 000 t odlitků. Materiálová skladba je však odlišná. Ve srovnání s rokem 2012 se jedná o 5% pokles. [20]

Změna materiálového složení ve prospěch odlitků ze slitin neželezných kovů je markantní. Za cca 20 let se podíl neželezných kovů zvýšil téměř o 20 % (22 % + 4 %, oproti 6 % + 1 %). Zvyšující se konstrukční nároky u odlitků z litin avizuje rovněž 20% pokles u litiny s lupínkovým grafitem a 10% nárůst litiny s kuličkovým grafitem. Podíváme-li se na slévárenskou výrobu železných kovů v konkrétních číslech, dostáváme se na hodnotu 302 751 t odlitků, což je o zhruba 36 000 t více, než tomu bylo v roce 2010, kdy byla zaznamenána nejnižší hodnota v historii českého slévárství. [20]

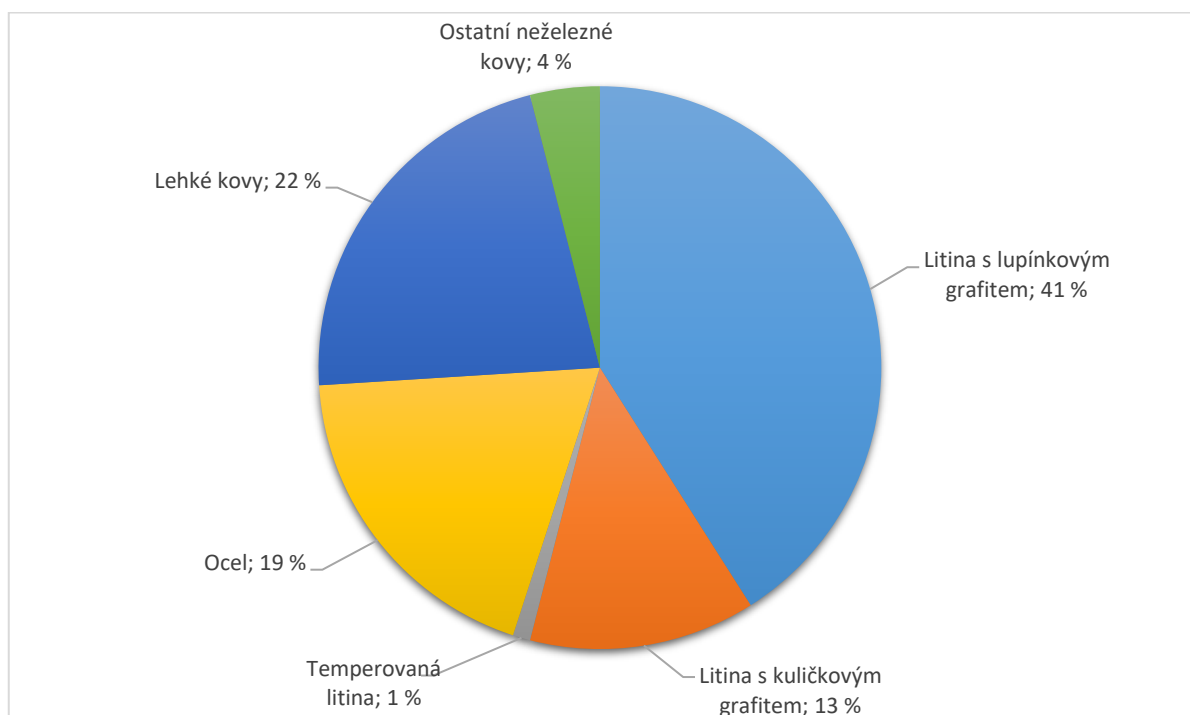
Podruhé v historii ČR se dostáváme nad hodnotu 100 000 t odlitků z neželezných kovů. Roste hlavně poptávka po odlitcích ze slitin Al, a to se zaváděním nových výrobních technologií pro automobilový průmysl. Jedná se o tlakové odlitky konstrukčních platform karoserií automobilů (dveře, podběhy, sloupky). [20]



Obrázek 7: Výroba odlitků z hliníkových slitin v ČR (tisíc tun) [21]

2.2 Český slévárenský průmysl

Český slévárenský průmysl vyrábí odlitky ze slitin železa i slitin neželezných kovů. Hmotnost odlitků se pohybuje od gramů po desítky tun. Slévárny se svým výrobním sortimentem zaměřují buď na sériovou až hromadnou výrobu pro automobilový a spotřební průmysl, nebo na výrobu kusovou pro speciální aplikace. Sériovost a nárokům na kvalitu jsou pak přizpůsobovány i používané technologie. Slévárny v ČR využívají technologie gravitačního odlévání do formovacích směsí pojených na syrovo, vodním sklem a pryskyřicemi vytvrzovanými za studena i za tepla. Do kovových forem se odlévá gravitačně i pod tlakem. Jsou rovněž zastoupeny technologie lití do skořepin, metoda spalitelného modelu aj. V ČR jsou i specializované slévárny přesného lití metodou vytavitelného modelu. [2]



Obrázek 8: Slévárenská produkce ČR dle materiálů v roce 2014 [2]

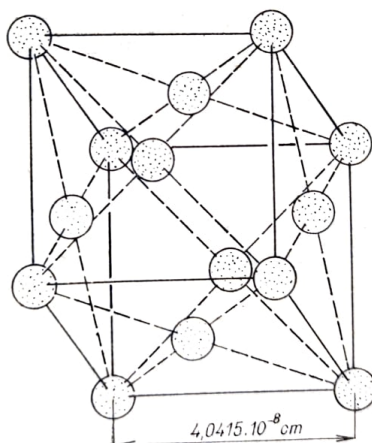
České slévárny jsou svými kapacitami i různorodostí technologií schopny splnit i ty nejnáročnější požadavky spotřebitelů. Postavení slévárny v ČR v kontextu se světovou produkcí slévárenských slitin znázorňuje obr. 5. [2]

3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN A JEJICH ROZDĚLENÍ

3.1 Vlastnosti hliníku

Čistý hliník (Al) je stříbrolesklý, lehký a na vzduchu stálý kov. Krystaluje v soustavě krychlové, krystalová mřížka je plošně centrovaná. Hliník je slabě paramagnetický, elektrická i tepelná vodivost hliníku jsou velmi dobré. [6]

Čistý hliník odolává dobře některým chemickým vlivům a působení povětrnosti, má velmi dobré vlastnosti optické, např. dobrou odrazovou schopnost paprsky všech vlnových délek, dá se velmi dobře tvářet za tepla i za studena a je velmi dobře svařitelný. Nehodí se pro výrobu odlitků pro poměrně špatnou slévatelnost, řeznými se čistý hliník obrábí hůře než jeho slitiny. [6]



Obrázek 9: Krychlová buňka hliníku [4]

Na obrázku vidíme krychlovou prostorově středěnou buňku hliníku. Elementární buňka se skládá ze 14 atomů. [4]

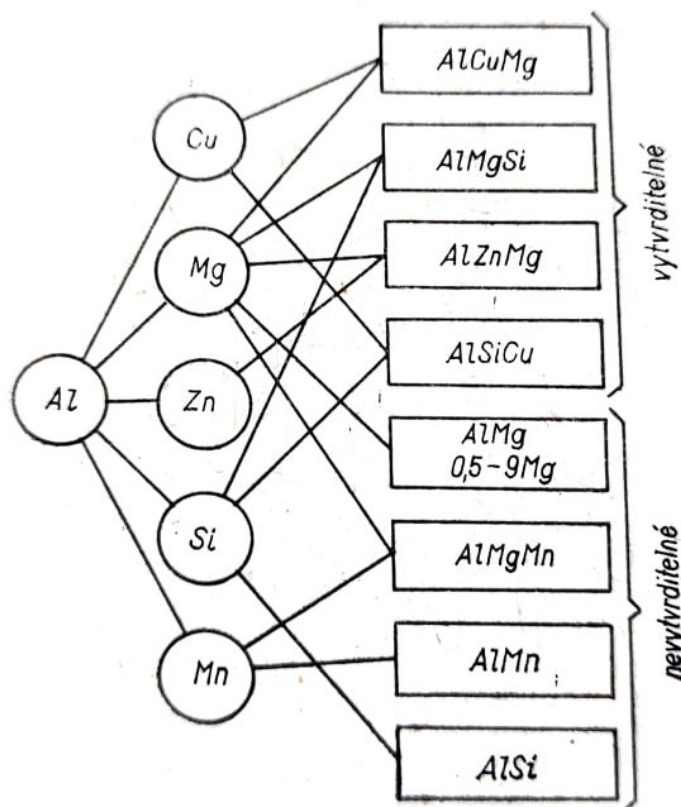
Čistý hliník má jen malou pevnost a mez pružnosti, tyto hodnoty se sice dají zvětšit tvářením polotovaru za studena, nedosahují však ani potom hodnot obvyklých u nejjednodušších ocelí, tato okolnost brání využití nízké měrné váhy a jiných dobrých vlastností čistého hliníku a jeho širšímu použití jako konstrukčního materiálu. [6]

Hliník se vyrábí elektrolýzou taveniny kysličníku hlinitého a kryolitu. Tímto způsobem se získává hliník čistoty 99,3 % až 99,8 %, pro výrobu polotovarů se používá nejčastěji hliník obsahující asi 99,5 % Al (EN AW 1050 A), ve zbytku je obsaženo nejčastěji železo, křemík, měď a zinek. V malých množstvích se v hliníku vyskytuje vanad, chrom, titan, mangan, vápník a jiné prvky. [6]

3.2 Slitiny hliníku

Přísadou různých prvků k čistému hliníku vznikají slitiny, které se svými vlastnostmi často velmi odlišují od hliníku. Nejdůležitější změnou způsobenou legováním hliníku je zlepšení mechanických nebo jiných vlastností. Zejména pevnosti a meze průtažnosti, při současném snížení tažnosti, s mechanickými vlastnostmi se mění obvykle i vlastnosti fyzikální, popřípadě chemické. Přísadou některých prvků získávají slitiny hliníku důležitou vlastnost, a to možno zlepšovat mechanické vlastnosti slitiny tepelným zpracováním. [6]

Přísadou slitinových prvků k čistém hliníku vznikají slitiny, které mají vyšší pevnost než čistý hliník. Není-li některý prvek přidáván úmyslně, je v kovu pouze nečistotou. Dosud byl vyvinut a zkoušen velký počet slitin. Z tohoto velkého počtu se však používá jen několika základních typů, jejichž přehled je uveden na obrázku 7. [4,6]

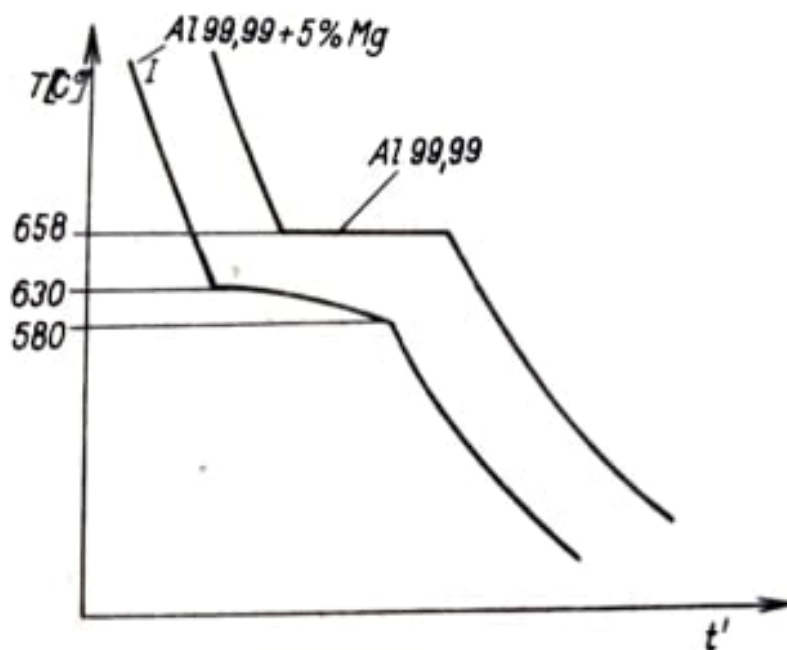


Obrázek 10: Přehled používaných slitin hliníku [4]

Na obrázku vidíme přehled nejpoužívanějších slitin s čistým hliníkem jako základním kovem podle D. Altenpohla. Množství legujících prvků ve slitinách po tváření je 0,5 až 5 %, ve slévárenských slitinách je obvykle vyšší. [4]

3.2.1 Rovnovážné diagramy slitin hliníku

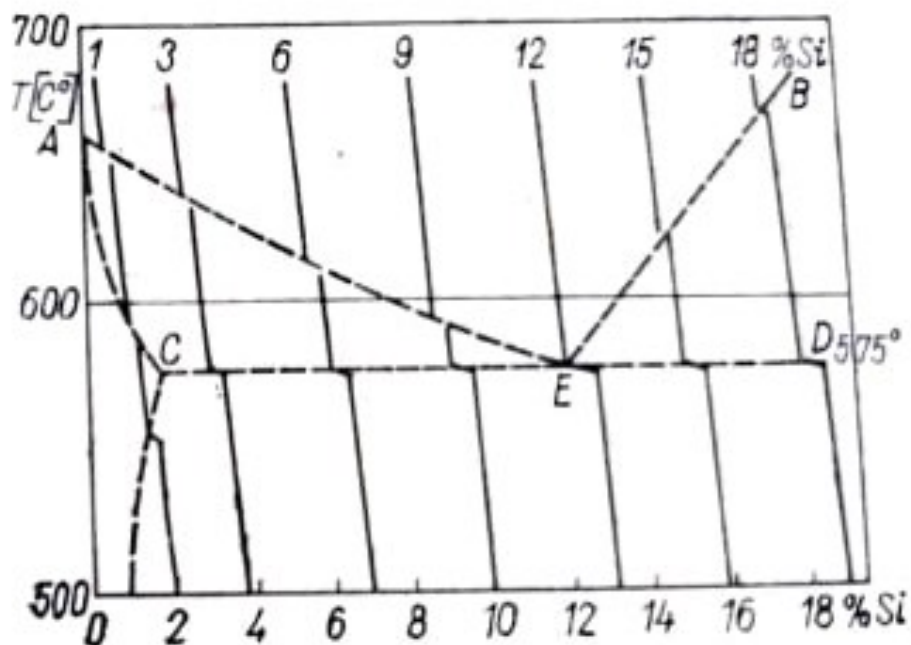
Ke znázornění rovnováhy mezi fázemi (v závislosti na teplotě) se v metalografii používá rovnovážných (stavových) diagramů, které u dvou komponentních slitin jsou zobrazovány v rovině. Rovnovážné diagramy jsou nejčastěji sestrojovány na základě křivek chladnutí. Na křivkách chladnutí, udávajících závislost mezi teplotou a časem u vzorků ze sledované slitiny, vznikají (při diskontinuálních změnách tepelného obsahu slitiny, jako začátek a konec tuhnutí, překrytálizace atd.) zlomy, udávající tyto změny. U čistého hliníku, u všech čistých kovů, u nichž nedochází k alotropické přeměně, dále u některých slitin o určité koncentraci (slitiny eutektické) jsou křivky chladnutí složeny ze tří částí, a to z částí udávajících pokles teploty tekuté fáze v závislosti na čase, z prodlevy, a z částí udávající pokles teploty tuhé fáze. Typické křivky chladnutí jsou znázorněny na obrázku 8. [4]



Obrázek 11:Křivka chladnutí Al 99,99 % a slitiny Al 99,99% s 5% Mg [4]

Hliník vysoké čistoty tuhne při 658 °C, tuhnutí slitiny mezi 630 až 580 °C. [4]

Křivky chladnutí u slitin jsou složitější. Není na nich jasně patrna prodleva, neboť slitiny krystalizují v intervalu teplot, v němž se sice uvolňuje skupenské teplo, ale ne v takovém množství, aby teplota kovu nepoklesla. Dochází sice ke zlomu křivky chladnutí, ale ten není tak výrazný jako prodleva u čistých kovů nebo eutektických slitin. Kromě toho se mohou na křivkách chladnutí slitin objevit ještě další zlomy, které souvisejí s překrystalizací slitiny. Způsob sestavení rovnovážného diagramu pomocí křivek chladnutí je uveden na obrázku 9. [4]



Obrázek 12: Křivky chladnutí slitin AlSi a stavový diagram z nich sestavený. [4]

Čára AEB = likvidus, čára ACED = solidus, E = eutektický bod (podle R. Irmanna) [4]

3.3 Mechanické vlastnosti hliníku a hliníkových slitin

Zkoušením mechanických vlastností se zjišťuje odolnost materiálu proti mechanickému zatěžování. Obvykle se zjišťují a uvádí tyto vlastnosti:

- mez pevnosti v tahu σ_{Pt}
- mez průtažnosti $\sigma_{0,2}$
- tažnost δ_5 a δ_{10}
- kontrakce ψ
- tvrdost podle Brinella HB nebo podle Vickerse HV
- vrubová houževnatost

U některých materiálů, které jsou křehké se může ještě uvádět mez pevnosti v tlaku a mez pevnosti v ohybu. Nejčastěji jsou tedy mechanické vlastnosti udávány mezi pevnosti v tahu, tažnosti, popř. mezi průtažnosti. Mez pevnosti v tahu a tažnost nemohou být (pro určité nepřesnosti plynoucí ze způsobu zkoušení) považovány za charakteristické obecné měrné veličiny. U meze pevnosti v tahu vzniká nepřesnost proto, že maximální hodnota zatížení při přetržení se dělí původním příčným průřezem zkušebního tělesa a nebere se v úvahu kontrakce průřezu, která je u tvárných materiálů, takže se nezjistí skutečná hodnota meze pevnosti v tahu. Rozdíly vznikají při porovnávání hodnot zvláště u tvárných materiálů, menší jsou rozdíly u tvrdých, málo tažných materiálů. [4]

Deformační schopnost materiálů je nutno charakterizovat tak, že k hodnotě tažnosti se uvede i příslušná kontrakce. [4]

Mez průtažnosti je relativně nejpřesnější charakteristickou mechanickou veličinou, i když její přesnost je závislá na způsobu zjišťování této hodnoty. Udává však dosti přesné skutečné napětí, kterým lze zatížit materiál, než dojde k jeho trvalé deformaci. [4]

Také tvrdost není zcela jednoznačně charakteristickou měrnou veličinou. Udává jen odpor, který materiál za definovaných podmínek klade proti vnikání cizích těles. Přesto se však zjišťování tvrdosti dosti často používá např. při stanovení jakosti odlitků a má význam technologický. Podobně jako u tvrdosti je tomu i u vrubové houževnatosti, která udává množství energie nutné k přelomení zkušebního tělesa zeslabeného vrubem, definovaným v rozměru. [4]

Typ materiálu	Stav	$\sigma_{0,2} [\frac{N}{mm^2}]$	$\sigma_{Pt} [\frac{N}{mm^2}]$	$\delta_5 [\%]$	$HB [\frac{N}{mm^2}]$
AlSi 12	1	6-8	16-24	2-6	50-60
AlSi 12 Cu	1	7-10	16-22	1-3	50-60
AlSi 12 Mg	1	8-15	15-23	1-2	50-60
	z	18-26	20-30	1-2	60-100
AlSi 5 Cu	1	9-15	15-22	0,5-2	60-70
	z	16-25	20-30	0,5-2	70-100
AlSiMg	1	9-15	14-20	0,5-3	55-65
	z	15-25	16-26	0,5-4	70-100
AlMg 3	1	8-16	14-20	2-6	50-60
AlMg 5	1	9-10	16-25	1-4	55-75
AlMgSi	1	9-15	13-20	1-4	50-60
	z	15-25	18-30	1-4	55-85
AlCu 5 Si	1	11-16	15-20	0-2	65-85
AlCu 4 Ti	1	18-22	25-35	4-10	80-100
	z	20-25	27-40	3-8	85-110

Tabulka 1: Informativní mechanické vlastnosti slévarenských hliníkových slitin [6]

Označení: 1 = lité, z = zušlechtěné [6]

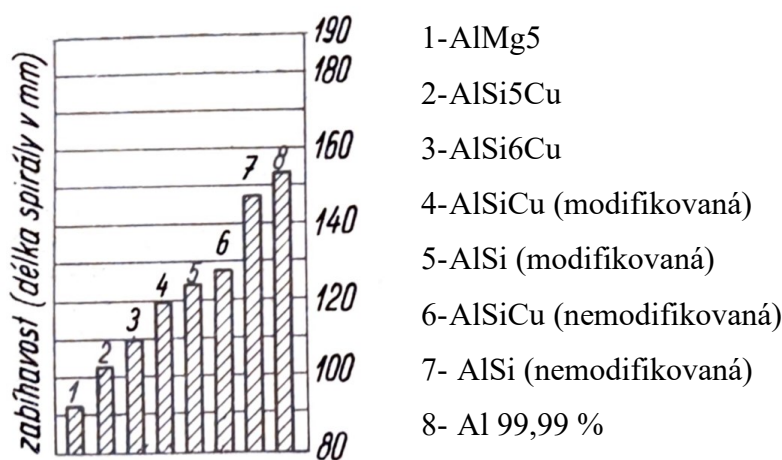
3.4 Technologické vlastnosti hliníku a hliníkových slitin

Technologickými vlastnostmi se rozumějí ty vlastnosti, které činí materiál způsobilým pro zpracování některou výrobní technologií (např. litím, lisováním, válcováním, tažením, obráběním atd.) na polotovár nebo hotový výrobek. Pro posouzení technologických vlastností nejčastěji rozhodují praktická hlediska, i když v řadě případů lze použít číselného vyjádření dané vlastnosti. [4]

3.4.1 Slévárenské vlastnosti hliníkových slitin

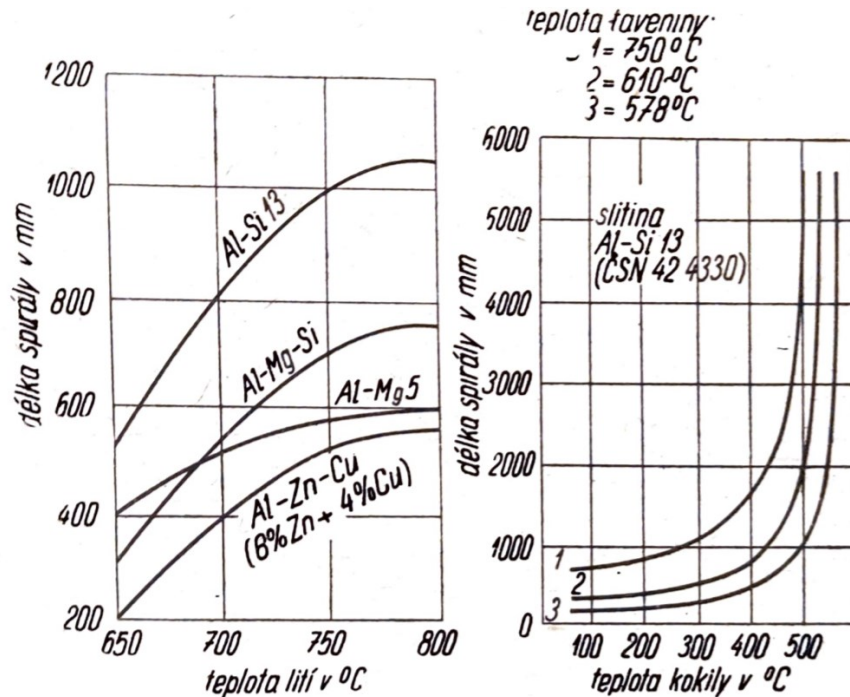
Výroba odlitků předpokládá používání slévárenských slitin s vlastnostmi, jež se souhrnně označují jako slévatelnost. Jde zejména o tyto dílčí vlastnosti: zabíhavost, malé smršťování, malý sklon k lámavosti (praskavosti) během tuhnutí, malý sklon k vzniku pnutí a trhlin během ochlazování po ztuhnutí a konečně těsnost (nepropustnost stěn pro kapaliny a plyny), a to i po třískovém obrábění odlitků. [6]

Zabíhavost (tekutost) slitiny je její schopnost vyplňovat dokonale formu. Zabíhavost slitin se zkouší několika metodami, z nichž se nejčastěji používá odlévání taveniny do kokily, v níž je vytvořena dutiny v podobě spirály. Měřítkem zabíhavosti je délka odlité spirály. Na zabíhavost určité slitiny působí více vlivů, hlavně však teplota taveniny, teplota kokily, rychlost ochlazování atd., po několikanásobném přetavení slitiny a dále po přísadě odpadů, zejména drobných, se zabíhavost zhoršuje, což souvisí s rostoucím obsahem kysličnických částic v tavenině. Tenhle problém se řeší rafinací taveniny (tj. odstranění kysličnických částic z kovu), tím lze opět zajistit kvalitní zabíhavost. [6]



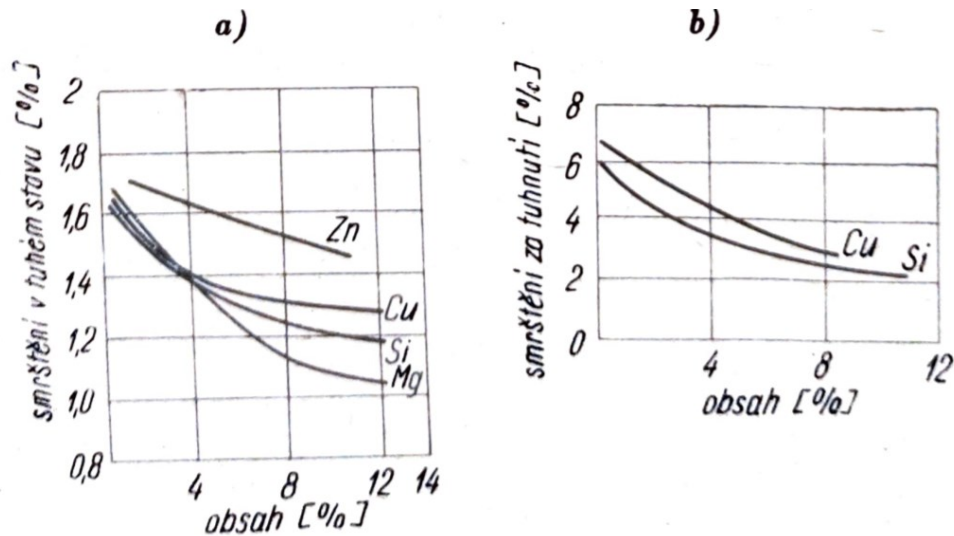
Obrázek 13: Hodnoty zabíhavosti slévárenských slitin hliníku (teplota taveniny 750 °C) [6]

Vliv lící teploty na zabíhavost je patrný z obrázku 11, z diagramu je patrné, že zvyšováním lící teploty nad 800 °C se již zabíhavost nezvětšuje. Je to způsobeno zvětšenou tvorbou kyslíčků, které zabíhavost snižují. [6]



Obrázek 14: Vliv teploty lití a teploty kokil na zabíhavost slitin hliníku [6]

Objemové smrštění je zmenšení objemu i rozměrů ztuhlého kovu nebo slitiny proti objemu taveniny. Aby měl odlitek žádané konečné rozměry, musí se použít modelu většího o míru smrštění. Objemové smrštění hliníku za tuhnutí je asi 7 %, slitin hliníku 4–5 %, podle chemického složení. Vliv různých slitinových prvků na smrštění slitin hliníku je znázorněn na obrázku 12. Objemové smrštění má však i další nepříjemné následky. Protože tuhnoucí kov zaujímá menší objem, než je objem formy vyplněné původně taveninou, tvoří se v tuhnoucí hmotě slitiny dutiny, tzv. staženiny. Některé staženiny se tvoří na povrchu, jiné uvnitř odlitku. [6]



Obrázek 15: Působení různých slitinových prvků na smršťování hliníkového materiálu [6]

- Smrštění v tuhém stavu (tzv. vnější)
- Smrštění za tuhnutí (tzv. vnitřní)

3.4.2 Slévatelnost hliníku a jeho slitin

Slévatelnost je ovlivněna řadou vlastností, z nichž nejdůležitější je měrné teplo, skupenské teplo tání, teplotní vodivost, tepelná roztažnost, teplota tavení, viskozita, způsob tuhnutí, povrchové napětí, licí teplota kovu nebo slitiny, ale i druh a teplotu formy, její tepelná vodivost a další vlastnosti. Obecně lze říci, že velmi dobrou slévatelnost vykazují ty kovové slitiny, které tuhnou při určité teplotě (ne v intervalech teplot). Této podmínce vyhovují eutektické slitiny, které jsou také nejlépe slévatelné. Jsou obvykle málo viskózní, a proto zabíhají velmi dobře do formy, dokonale ji vyplňují, a poněvadž slitina tuhne při jedné teplotě, je také smrštění malé. To je také příčinou, proč eutektické slitiny nemají sklon k praskání za tepla. Příkladem eutektických slitin jsou AlSi s obsahem 10 až 13 % Si, označované „Silumin“. S klesajícím obsahem Si se slévatelnost zhoršuje. Slitiny s velkým intervalem tuhnutí jsou pro slévarenské účely nevhodné, neboť nespĺňují podmínku dobré slévatelnosti. Mezi obtížně slévatelné slitiny patří slitiny typu AlMg s obsahem Mg 5 % a více. Vykazují nejen velký interval teplot při tuhnutí, ale především je slévatelnost zhoršena tvorbou kyslíčků na povrchu roztaveného kovu. [4]

Hliník vysoké čistoty (Al 99,9 %) je sice dobře slévatelný (tuhne při jedné teplotě, málo se smršťuje, není náchylný k praskání za tepla atd.), ale vzhledem k vysokému povrchovému napětí je jeho zabíhavost špatná. [4]

3.5 Základní typy slévárenských slitin hliníku a jejich popis

Pomocí slévárenských slitin se vyrábějí odlitky pro průmysl, přísadou vhodných dalších prvků dosáhneme slitin ve formě tuhých roztoků, avšak s omezenou rozpustností. Pomocí legujících prvků přidávaných do hliníku, se získá zvýšené hodnoty pevnosti a tvrdosti, také se zlepšuje slévateľnost ve stavu litém. Co se týče mechanických vlastností se jednotlivé typy hliníkových slitin v zásadě příliš neliší. Význam slitin hliníku je dán především jejich hustotou, která je v porovnání s oceli či litinami třetinová. [2]

Z velkého počtu vyvinutých a odzkoušených slitin se v běžné slévárenské praxi používají tyto základní typy:

- Al – Si (tzv. siluminy)
- Al – Mg (tzv. hydronaly)
- Al – Cu (tzv. duraly)

Další možné vzájemné kombinace a množství přísad vytváří řadu slitin odvozených od základních typů ty nejpoužívanější jsou:

- Al – Si – Mg
- Al – Si – Cu
- Al – Cu – Si
- Al – Mg – Si

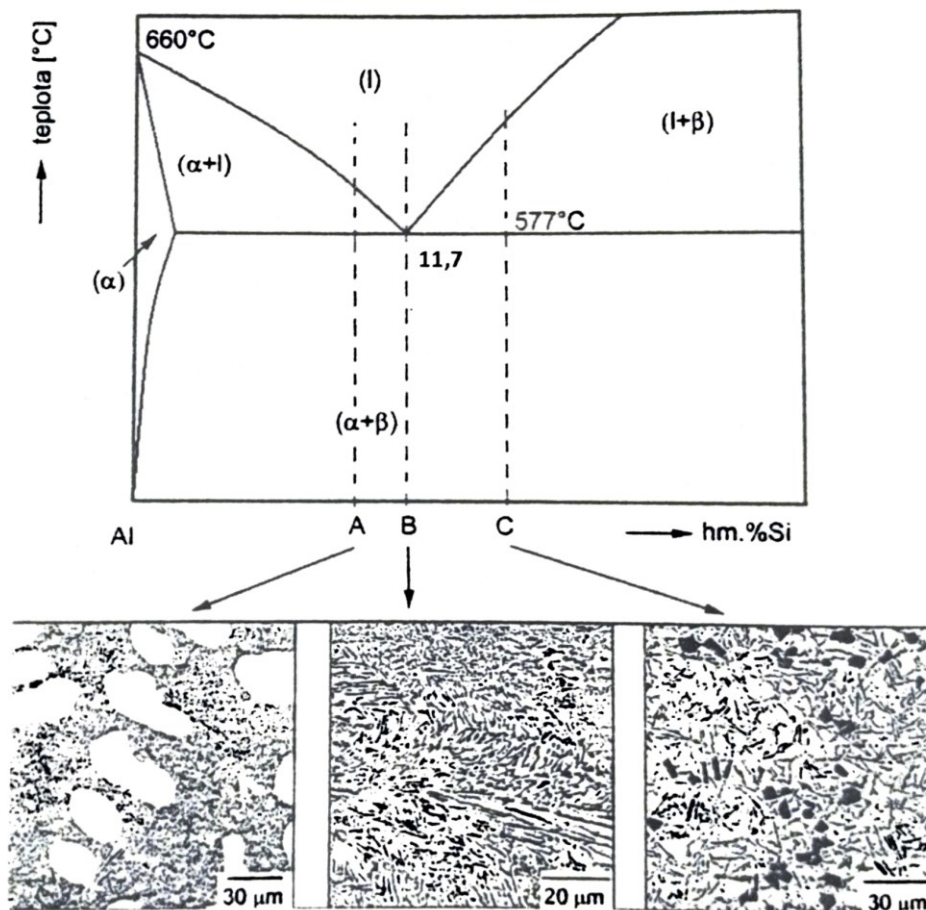
Další možné přísadovými prvky jsou Ni, Mn, Ti, Zn, Co atd. Podle metalurgického charakteru jsou slitiny hliníku děleny na vytvrditelné a nevytvrditelné. Značení slitin neželezných kovů v ČR je dáno normou ČSN EN 42 1401 a zachovává původní šestimístné číslování (druh materiálu), doplněné dvoumístným číslem, které označuje stav (způsob odlévání a druh tepelného zpracování). Třetí číslice 4 označuje vždy lehké slitiny, lichá čtvrtá číslice slitiny slévárenské. Poslední trojčíslí nám určuje slitinu podle chemického složení a z výrobního hlediska. [2]

V dnešní době se používá více zahraničních norem (EN AB apod.), kvůli oblastem průmyslu, kde slitiny Al nalézají největší uplatnění. Dalším označením může být také chemickými značkami, které je nejnázornější. [2]

Příklad: Al slitina – ČSN 42 4339, DIN 1725/226, ADC 10, AlSi9Cu3.

3.5.1 Slévárenské slitiny typu Al – Si (siluminy)

Siluminy se vyznačují základní přísadou, kterou je křemík. Vyšší obsah křemíku, přesněji nad mezí maximální rozpustnosti se zvyšuje zabíhavost a to do hodnoty eutektické koncentrace, což je určitě příznivým účinkem ve slévárenství. Avšak vysoký obsah křemíku zhoršuje obrobiteľnosť výsledných odlitků, což ale můžeme kompenzovat modifikací mědi. V chemickém složení siluminů je vždy zastoupen mangan, který se přidává za účelem kompenzace neblahých vlivů železa, které je ve slitinách přítomno jako nečistota. Železo samotné tvoří se siluminy intermetalické fáze s nepříznivým tvarem destiček či jehlic, což je z mechanického hlediska nepříznivý vliv. Za přidání manganu vznikají tvarově příznivější intermetalické fáze, čímž se zvýší zejména tažnost. Dále u siluminů můžeme ovlivňovat technologické i mechanické vlastnosti za pomoci očkování, modifikací nebo tepelným zpracováním. [2,6]



Obrázek 16: Rovnovážný diagram Al – Si a typické strukturální složení dle obsahu Si [2]

Diagram tvoří (fázi α) hliník, (fázi β) křemík a vytváří eutektický systém s omezenou rozpustností Si v Al. [2]

3.5.2 Slévárenské slitiny Al – Cu (duraly)

Duraly jsou slévárenské slitiny, u kterých měď tvoří s hliníkem slitiny s omezenou rozpustností v tuhém roztoku α (hliník) a eutetikem. Obvyklé procento mědi v duralech je okolo 4–5 %. Normalizované slitiny Duralů obsahují také titan při koncentrací 0,3 % pro zjemnění primárních zrn a pro zvýšení pevnosti hořčík nebo mangan. Duraly patří ke slitinám hliníku označovaných jako vysokopevné, s pevností až nad 400 MPa. Tažnost a houževnatost je u duralů oproti siluminům, téměř dvojnásobná. [2]

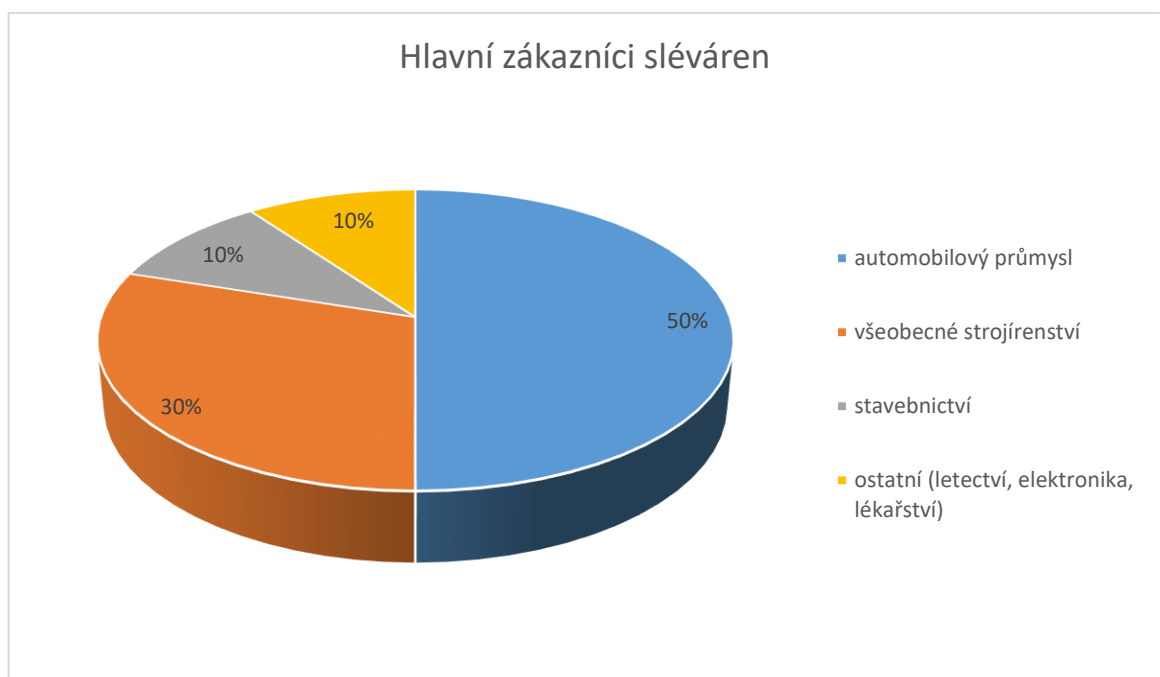
Ve slévárenství z pohledu vlastností pro slévateľnost jsou samotné duraly vyznačovány špatnými vlastnosti. Vzhledem k dlouhému intervalu tuhnutí jsou špatně nálitkovatelné. Pro zajištění kvalitní vnitřní struktury odlitku je důležité, aby tuhnutí bylo usměrněné s velkým teplotním gradientem. Proto, slévárenské vlastnosti zlepšujeme za pomoci přísad křemíku, za cenu snížení pevnostních charakteristik slitiny. [2,6]

3.5.3 Slévárenské slitiny Al – Mg (hydronaly)

Hydronaly jsou slitiny hliníku a hořčíku s maximální rozpustností 17,4 = při eutektické teplotě 450 °C. Ve slévárenství hydronaly dělíme na typy s 3,5 a 9 % hořčíku. Čím vyšší je zastoupení hořčíku, tím širší je pásmo tuhnutí, a tak jsou zhoršeny i slévárenské vlastnosti. Mechanické vlastnosti hydronaly se vyznačují vysokou pevností, která je ale stále o něco menší než u siluminů. Tažnost je vyšší, ale za zvýšených teplot (tj. nad 100 °C) se mechanické vlastnosti zhoršují. Příznivou vlastností hydronalů je vynikající obrobiteľnost a leštitelnost, snadné povrchové úpravy a vysoká odolnost proti korozi. Tyto slitiny najdou využití u odlitků, které se používají při stavbě lodí, v chemickém průmyslu, potravinářství a zejména dekorativní a povrchové účely. [2]

4 HLAVNÍ POUŽITÍ SLITIN HLINÍKU

Hlavní využití slitin hliníku ve slévárenství se nachází, jak jinak než v automobilovém průmyslu ve více jak 50 % celkové výroby, dále pak ve strojírenství a stavebnictví. Vysoká závislost na automobilovém průmyslu má zásadní vliv na tento oddíl strojírenství. Týká se různých aspektů, například ekonomie (nízké ceny) umístění firmy, norem kvality a ochrany životního prostředí, inovací atd. V automobilovém průmyslu se neustále snažíme posouvat směrem k lehčím vozidlům, a to se taky odráží na velké poptávce po hliníkových a hořčíkových hliníkových odlitcích. [5]



Obrázek 17: Graf ukazující směr produkce hliníkových slitin [5]

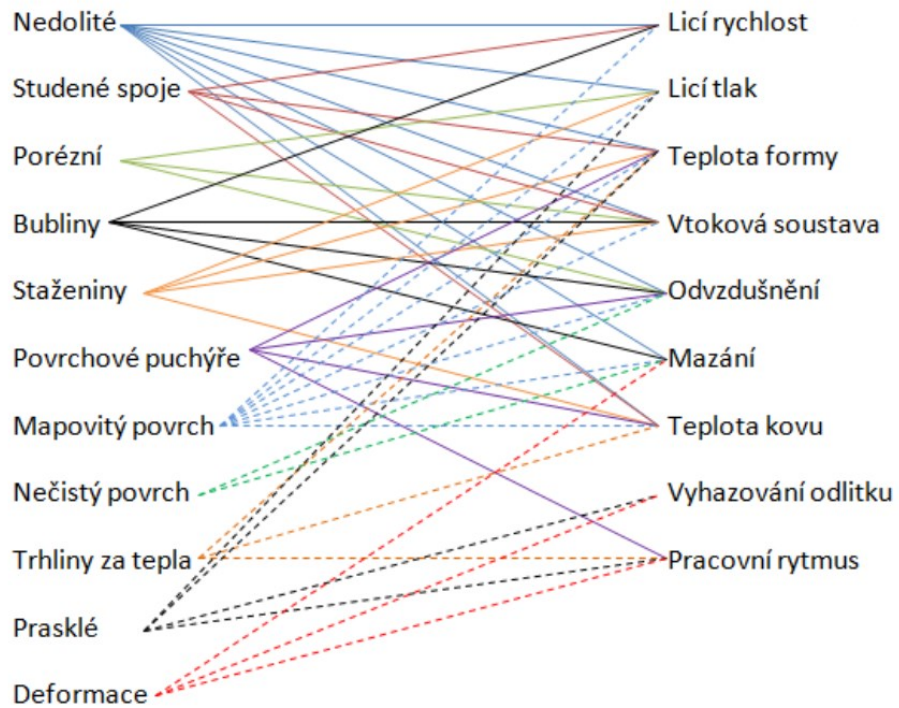
5 VADY ODLITKŮ

Vady odlitků se chápou, jako každá odchylka předem stanoveného tvaru, nedodržení rozměrů, hmotnosti, výsledné struktury, celistvosti, chemického složení nebo změny vlastností mechanických nebo technologických dle norem nebo sjednaných podmínek se zákazníkem. Vady na odlitcích mohou být zjevné a být odhaleny optickou kontrolou (pouhým okem) nebo skryté, kde je zapotřebí náročnějších zkoušek a měření. [17,18]

5.1 Hlavní druhy vad vyskytujících se u odlitků

Podle norem nebo sjednaných podmínek a vnitřních předpisů společnosti může být vada přípustná, vada nepřípustná nebo vyhodnocena jako opravitelná nebo odstranitelná. Přípustné vady jsou vady drobného rázu, které nijak neškodí technologickým, mechanickým nebo vizuálním vlastnostem odlitku, dle předepsaných norem a smluvních podmínek se zákazníkem. Vada nepřípustná je přesně uvedena dle charakteristik a její odchylka od standardní jakosti odlitku je tak velká, že se odlitek považuje za zmetek. Opravitelné vady jsou vady, kterou lze vhodným způsobem opravit za sjednaných podmínek nebo příslušnou normou, která to povoluje. Za odstranitelnou vadu považujeme tu, kterou můžeme se souhlasem zákazníka odstranit, zvláštní úpravou nebo technologickým zásahem který nebyl předem sjednán. [17,18]

Vady, které se vyskytují u odlitků litých technologií vysokotlakého lití, ovlivňuje řada faktorů. Mezi tyto faktory se řadí konstrukce lící formy, tlakový lící stroj, druh odlévané slitiny, metalurgické zpracování odlévané slitiny, technologické parametry a samozřejmě také obsluha stroje. [19]



Obrázek 18: Savenův diagram příčin vzniku vad na odlitcích při tlakovém lití [19]

6 POŽADOVANÉ VLASTNOSTI HLINÍKOVÝCH SLITIN A JEJICH ZKOUŠENÍ

Vlastnosti při volbě hliníkových slitin, pro vyhotovení odlitků zhodnocujeme v pěti hlavních kritériích. V první řadě nás zajímají slévárenské vlastnosti, kde se požaduje dobroá slévateľnosť, ktorá je ovplyvnená teplotnými intervaly krystalizácie, viskozitou a povrchovým napätím taveniny danej slitiny. Snažíme sa, aby slitina mala čo najkratšiu dobu krystalizácie a bola odolná proti vzniku trhlin za tepla. Obecně taky vyžadujeme dobré vlastnosti pro vysokotlaké lití hliníkových slitin [14,6]

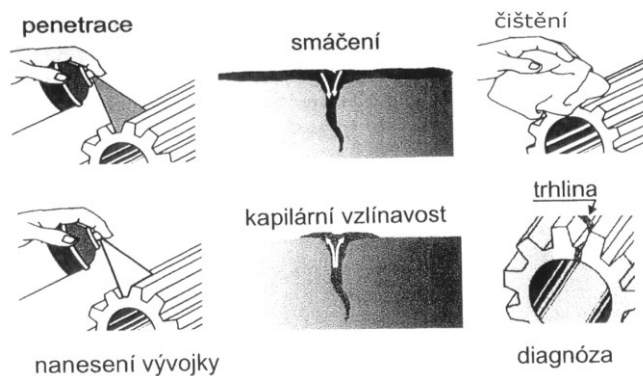
Dále požadujeme po slitině dobré mechanické a chemické vlastnosti, sledujeme pevnost, tvrdost a možnost zvýšení těchto vlastností tepelným zpracováním. Velmi důležitým aspektem je také odolnost proti korozi a možnost dalších povrchových úprav odlitků. Po samotných odlitcích se vyžaduje nepropustnost kapalin za působení tlaku a rozměrovou a teplotní stabilitu, při jejich použití. [14,6]

6.1 Zjišťování vad – defektoskopie

Zjišťování vad a kontrola odlitků je ve slévárenském procesu nedílnou součástí, zkušební metody můžeme rozdělit do dvou částí na povrchové a vnitřní zkoumání vad odlitků. [9]

6.1.1 Metody pro zjišťování povrchových vad

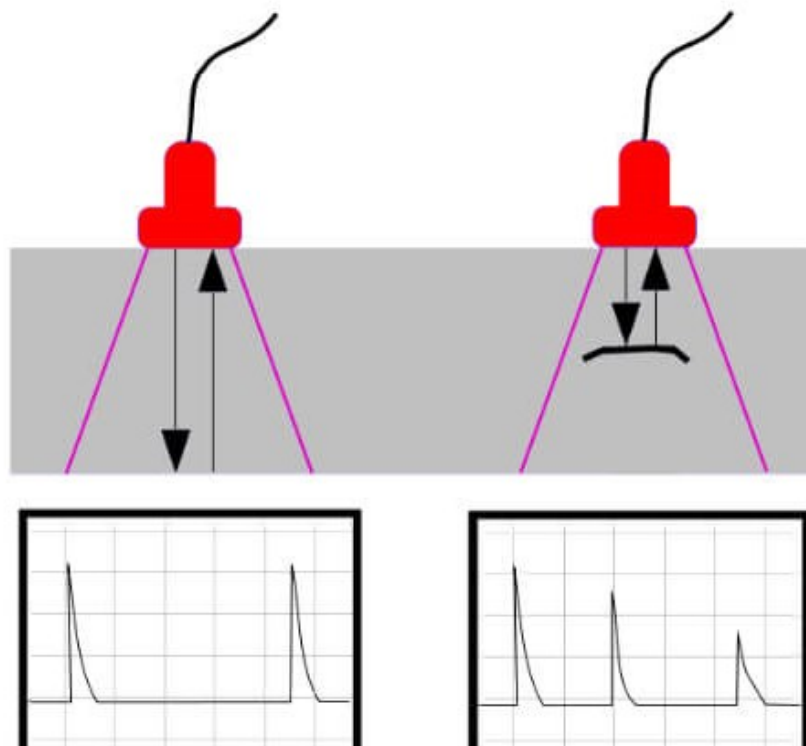
Většina povrchových vad jsou zjevné pouhým okem, proto mnohdy se využívá jen vizuální kontroly odlitků, než se přejde k náročnějším zkouškám. Nejčastější vady, které nalezneme při zkoumání povrchu jsou trhliny a praskliny na povrchu odlitku. Patří sem hlavně kapilární zkoušky a zkoušky elektromagnetické nebo indukční, které nám v řadě případů odhalí i podpovrchové vady odlitků. [9]



Obrázek 19: Kapilární zkouška [15]

6.1.2 Metody pro zjišťování vnitřních vad

Mezi nejčastější vnitřní vady patří dutiny, vměstky a vlásečnicové staženiny. Nejčastěji používané zkoušky jsou za pomoci ultrazvuku a prozařováním na RTG zařízeních. K prozařování se využívá záření γ , elektromagnetické vlnění s krátkými vlnovými délkami. Zkoušky ultrazvukem se provádí s použitím ultrazvukových vln o frekvenci 1 až 10 Mhz. Podle uspořádání přijímacích sond je používána metoda průchozí nebo odrazová. [9]



Obrázek 20: Zkouška ultrazvukem [16]

7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část, této bakalářské práce se zabývala a pojednávala o různých metodách vysokotlakého lití. Jednotlivé metody byly popsány a vysvětlena jejich podstata a rozdíly mezi nimi. Taktéž, se zkoumala výroba odlitků touto technologií u nás v České republice a ve světě.

V teoretické části se pojednávalo o vlastnostech hliníku a jeho slitin, zhodnotili se jejich výhody, nevýhody a chování při použití ve oboru slévárenství. Popsali se nejpoužívanější typy hliníkových slitin, jako jsou siluminy, duraly a hydronaly.

V posledních kapitolách písemné části, se pojednávalo o vadách, které při vybrané technologii mohou nastat a popisoval se důvod jejich vzniku. V poslední řadě došlo k popisu metod pro zjišťování vad na odlitcích, jak už vnitřních, tak povrchových.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této bakalářské práce v praktické části je sestavení výrobního postupu pro vysokotlaké lití hliníkových slitin. Výzkum bude prováděn přímo ve slévárně MESIT & RÖDERS v.o.s. Výzkum je rozdělen na několik částí, tak aby se mohly zohlednit všechny prvky a procesy dopadající na výrobu a výslednou jakost odlitku. Odlitek a materiál, se kterým se bude pracovat míří do automobilového průmyslu pro automobil značky Porsche. V první části se bude zkoumat samotné tavení slitiny hliníku a chemická struktura. V druhé části se prozkoumá výroba a strojní zařízení, jejich nastavení a dílčí parametry pro funkčnost a zaručení kvality odlitku. V poslední části se posoudí správnost nastavení a výrobních parametrů, tím že se zhodnotí jakost odlitku několika zkouškami.

9 MATERIÁL HSM

Zvolený materiál, ze kterého se budou vyrábět odlitky nese název HSM (materiál Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn). Tento materiál je jedinečný díky své tažnosti a skvělým pevnostním parametrům, které musí splňovat kvůli přísným podmínkám výroby pro automobilku Porsche. Materiál HSM je oproti dalším materiálům čistější, a to díky menšímu podílu křemíku ve své chemické struktuře. Avšak díky specifickému chemickému složení a odlišnosti od ostatních materiálů používaných ve slévárně, nese ve slévárství i značnou nevýhodu, a to horší zabíhavost ve formě na odlitky. Standardní slitiny pro zajištění dobré zabíhavosti do formy mají podíl křemíku 8-12 %, což je považována za optimum pro tlakové lití.

9.1 Tavení materiálu

U materiálu HSM je vsázka 50/50 + legující prvky, což znamená, že vsázka tvoří z 50 % nové čisté ingoty a z 50% odpadní materiál téhož označení HSM nebo chemicky vyhovující. Odpadní materiál chápeme, jako materiál po ohrazení, který je na výsledném odlitku přebytečný (vtokové soustavy, tableta, ledvinky, přetoky). Odpadní materiál, nesmí být nijak kontaminován, jako například oleji, těžkými mazadly nebo hydraulickou kapalinou, aby nezneškodil následující tavbu.



Obrázek 21: Ingoty materiálu HSM materiálu

9.2 Tavicí pece

Materiál se taví ve sklopných kelímkových pecích s rekuperačním systémem. Obsah kelímku v našem případě při tavení HSM je 300 kg materiálu taveniny. Materiál se při výkonu pece 350 kg Al/h připraví přibližně za hodinu, palivem pece je zemní plyn. Pec má řídicí systém SIMATIC S7-300, díky kterému lze nastavit všechny potřebné parametry, grafický displej s informacemi o provozních stavech, informacemi o obsluze a chybovými hlášeními s možností propojení s nadřazenými řídicími systémy, umožňuje pro každou slitinu hliníku nastavit přesně takové parametry, jaké jsou vyžadovány.



Obrázek 22:Tavicí pec Hindenlang, vsázka a tavenina

Slitina HSM se taví při teplotě 750 °C a přidává se stroncium a hořčík jako legující prvky, které zaručí požadované vlastnosti odlitku.

9.3 Transport hliníku

Transport hliníku je nedílnou součástí provozu výroby ve slévárně a zahrnuje se do celkového technologického procesu výroby. Transportace začíná na tavírně z tavicích pecí na slévárnu k odlévacím linkám do pecí udržovacích. Transport je prováděn za pomoci vysokozdvizných vozíků a přepravních pánví, které jsou předehřívány na teplotu 700 °C, aby nedošlo po zaplnění pánve taveninou k šoku a zbytečnému namáhání a přechodu teplot, jak u taveniny, tak u přepravní pánve. Plnění přepravních pánví probíhá za pomoci sklopné plošiny, kterými jsou tavicí pece vybaveny. Použití přepravních pánví je třeba naplánovat správně do cyklu výroby, dle toho, kolik a jakých slitin se zrovna odlévá, a to kvůli zbytkové krustě na stranách a dně přepravní pánve po předchozí tavenině, aby tak nedošlo k chemickému znehodnocení taveniny, jinou slitinou.



Obrázek 23: Předehřev přepravní pánve a plnění taveninou

9.4 Odplyňování

Odplyňovací zařízení, pomáhá zlepšit kvalitu taveniny a následného odlitku. Podílí se na odstraňování vměstků a alkalických kovů z roztaveného hliníku, čímž přispívá ke zvyšování kvality konečného kovového odlitku. Přítomnost vměstků může mít za následek snížení zabíhavosti, zvýšení poréznosti, ztrátu mechanických vlastností a nedostatečnou kvalitu povrchu.

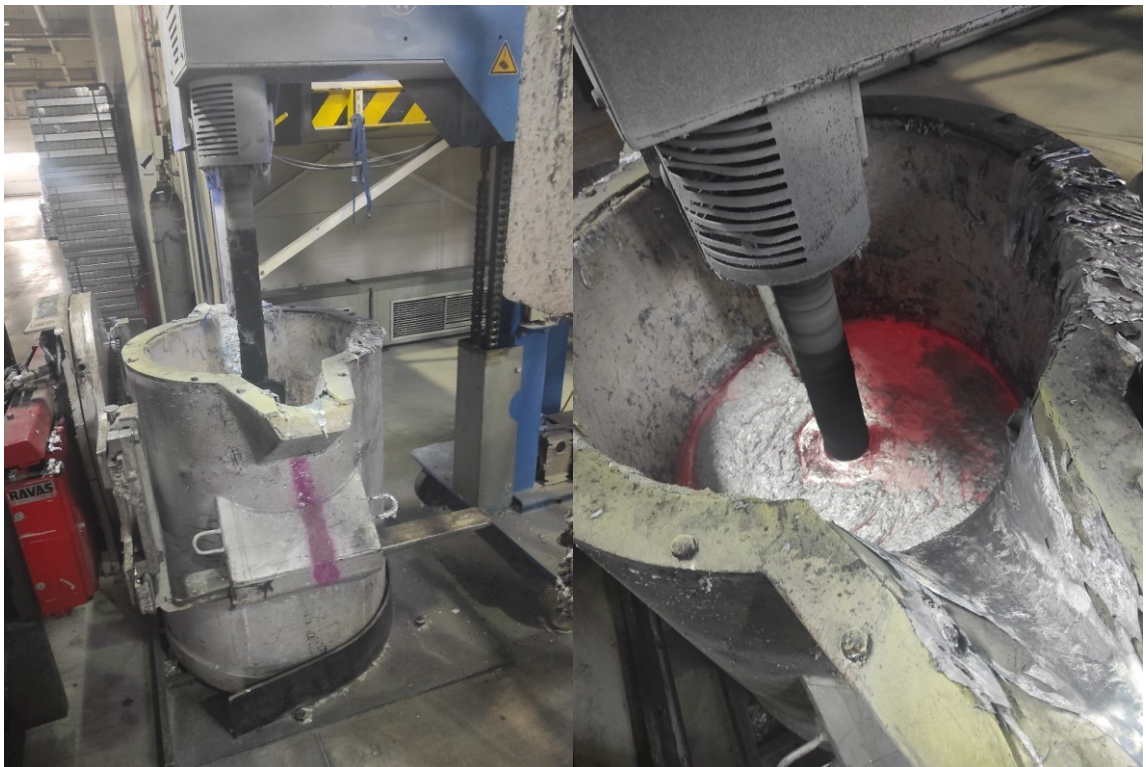
Při provádění postupu odplyňování do hliníkových tavenin, se vhání inertní plyny prostřednictvím čerpadel, jejichž účinkem je vypuzován vodík, který by jinak způsoboval následnou pórovitost odlitků. Plyny jsou rozptylovány prostřednictvím rotorů ode dna přepravní pánve, aby byla zajištěna maximální účinnost postupu. Odplyňování nám rovněž usnadňuje vyplavování dalších nečistot, jako například oxidů, na povrch taveniny, kde se pak tyto nečistoty odstraňují pomocí stahovacích a stíracích zařízení.



Obrázek 24: Odplyňovací přístroj FOSECO FDU Mark 100 MTS 1500

9.4.1 Postup procesu odplyňování

Na začátku procesu se najede přepravní pánví na místo pod rotor, tak aby byla pánev v ose rotoru. Program u materiálu HSM je nastaven na 10 minut odplyňování, což je předpokládaná doba, která se považuje za dostatečnou k účinnému odplynění taveniny. Tedy tavenina HSM je odplyňována do indexu 2 bez použití rafinační soli. Hloubku ponoření rotoru taveniny se nastaví dle množství taveniny v přepravní pánví, v našem případě pro 300 kg taveniny, tudíž 400 mm do hloubky. Po nastavení přepravní pánve, rotoru a programu, se zapne automatický režim stroje a vyčká se. Po dokončení procesu se posbírají nečistoty a strusku z povrchu taveniny za pomoci slévárenských naběraček.



Obrázek 25: Umístění pánve pod rotor odplyňovacího zařízení a vyplavené nečistoty

9.5 Index hustoty taveniny

Jednou z prvních zkoušek, která se v naší praktické části provádí, je měření indexu hustoty taveniny, které se používá abychom zjistili kolik máme v tavenině vzduchu. Index toku taveniny je měřitelná jednotka naplnění.

9.5.1 Postup měření

Opatří se dva vzorky pro měření. Po odplynění taveniny se vnoří naběračka do taveniny a s ponořeným naběradlem se míchá po dobu 20 sekund, poté se rozežene povrch taveniny a nabere se asi tři čtvrtiny naběračky. Nejprve se naleje materiál do kelímku pro vakuové tuhnutí a hned poté do kelímku pro atmosférické tuhnutí. Po 10 vteřinách se ve stejném pořadí vyklepou, tím se splní předeřhev kelímků. Nyní se nalije do šálek materiál, nejprve pro vakuové tuhnutí při 90 % vakuu, zaklopí se vakuový kryt poklicí a zapne se vakuová pumpa, hned poté se nalije šálek pro normální tuhnutí za atmosférických podmínek. Cyklus se nechá běžet 4 minuty, pro dostatečné nasbírání dat, poté se oba kelímky vyklepnou a vzorky se ochladí ve vodě.



Obrázek 26: Postup měření indexu hustoty taveniny

9.5.2 Vyhodnocení měření

Zásobníky váhy se naplní vodou, tak aby byli vzorky plně ponořeny, váhy se zapnou a vynulují. Vakuový vzorek se položí na vážící plošinu a vyčká se na ustálení hodnot na displeji váhy, hodnoty se uloží do přístroje FORMATIC Handy. Nyní se vytáhne spouštěcí košík ze zásobníku s vodou a vloží se do něj vakuový vzorek. Vzorek se spustí pod hladinu a opět se zapíší hodnoty pro vakuum s vodou. Tento proces se opakuje i pro atmosférický vzorek, tedy hmotnost na vzduchu a hmotnost ve vodě. Tím se získá čtyř rozdílných souborů dat, které za pomoci přístroje FORMATIC Handy, určí index hustoty taveniny takzvaný Dechteindex.

Měřicí protokol		
Jméno obsluhy		
Název materiálu	HSM	
Poznámka		
Pec	P1	
Číslo tavby	7/3	
Číslo slitiny		
Slitinová skupina		
Měření		
Hmotnost na vzduchu [g]	Vakuum	Atm. tlak
	58,16	64,01
Hmotnost ve vodě [g]	35,58	39,58
Hustota [g/cm ³]	2,575730735	2,620139173
DI - index hustoty [%]	1,69	
DI - index hustoty - tolerance	v toleranci	
Pořadové číslo měření		
Datum měření	29. března 2022	
Čas měření	8:44:00	

Obrázek 27: Automatické vyhodnocení indexu z naměřených hodnot

Z naměřených dat vidíme, že hustota taveniny vakuovaného vzorku je $2,57 \text{ g/cm}^3$ a vzorku měřeného za atmosférických podmínek $2,62 \text{ g/cm}^3$, z čehož usuzujeme, že odplyňovací proces byl proveden úspěšně a dle naměřených hodnot porovnávaných s normou pro danou slitinu se nachází v toleranci.

9.6 Spektrální analýza

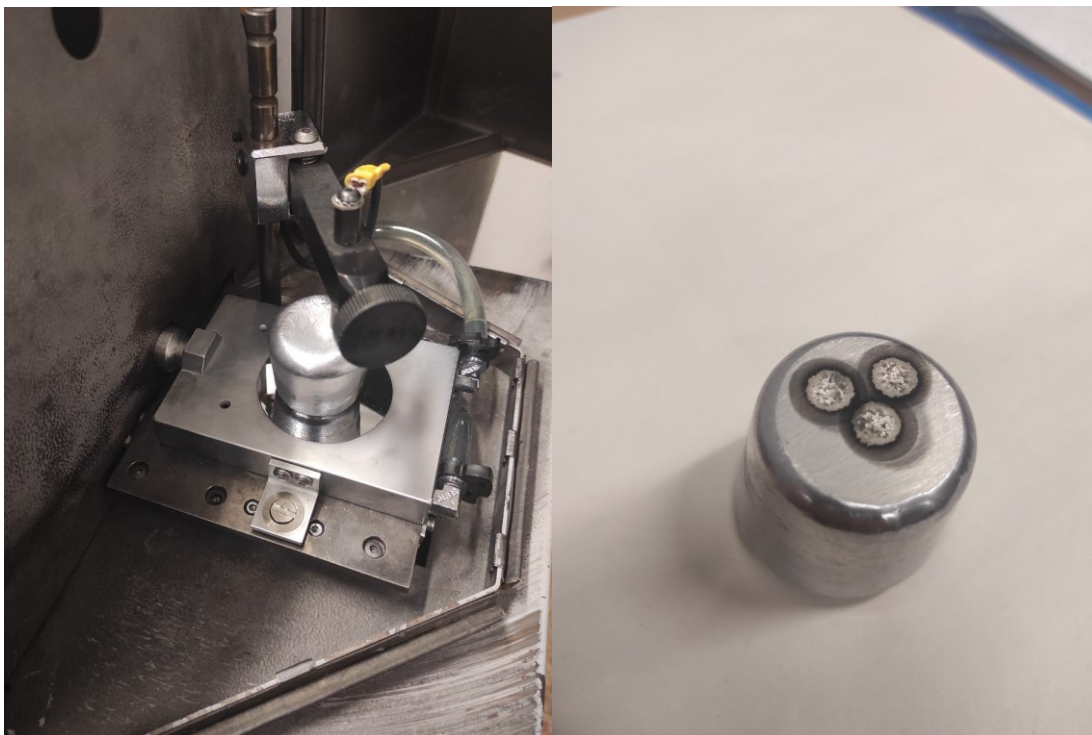
Spektrální analýza v tomto případě přesněji využita optická emisní spektrometrie, jenž je založena na registrování fotonů vzniklých valenčních elektronů z vyšších energetických stavů na stavy nižší. Měří se záření emitované atomy nebo ionty v excitovaném stavu, které vzniká jejich zářivou deexcitací. Následné emisní spektrum má čárový charakter. Při příslušných vlnových délkách se zaznamenávají spektrální čáry odpovídající jednotlivým přechodům. Daná poloha čar pak ve spektru udává prvky přítomné ve vzorku. Intenzita jednotlivých čar udává koncentraci prvku v daném vzorku.



Obrázek 28: Analyzátor kovů ARL 3460 vícekanálový optický emisní spektrometr

9.6.1 Spektrální analýza HSM

Významným a důležitým procesem u lití odlitků v automobilovém průmyslu je správně analyzovat a zkontrolovat si tak výsledné chemické složení budoucího odlitku, a tak zaručit jeho budoucí vlastnosti jak technologické, tak mechanické. Proto mým dalším experimentálním měřením je spektrální analýza materiálu HSM. Pro výzkum jsem analyzoval dva vzorky, jeden z tavicí pece na začátku výroby ihned po vytavení materiálu při teplotě 767 °C a druhý o tři hodiny později z udržovací pece po odplynění a při udržovací teplotě 720 °C. Nutno podotknout, že zkušební vzorek musí být vždy dokonale obroušen na vyjiskřovací ploše, aby se strhla oxidační vrstva na vzorku a předešlo se tak zkreslenému naměření dat. U samotného procesu zkoušky je vzorek, u kterého již známe chemické složení díky tomu, že víme, co se taví za materiál a jaké legující prvky se přidávají, což se nazývá kalibrační standard. Spektrální analýza ověří správnost zastoupení požadovaných prvků ve slitině. Spektrometr používá při jiskření plazmu v čistém prostředí za použití argonu. V průběhu zkoušky sw vytvoří tři jiskry, neboli tři měřená místa na zkušebním vzorku, následně je ze tří měření vyhotoven průměr, a to jsou procentuální výsledky zastupující dané prvky ve slitině HSM. Ohnisková vzdálenost u spektrometru je jeden metr a šířka primární štěrbinu 20 mikrometrů. Stožan na vzorky je proplachovaný argonem a chlazený vodou se samostatným chladícím systémem.



Obrázek 29: Zkušební vzorek

9.6.2 Výsledky spektrální analýzy

```
3/29/2022 6:37:22 AM Sample: P1-71/3 HSM SM
Quality: QHSM-VK Task: HSM

Run  Si    Fe7    Cu     Mn5     Mg     Zn4     Ti4     Cr4     Ni6     Pb6     Sn5     Na1     Ca2     Sr
    Cd3    Sb5    P1     Li3     B2     Zr3     AL%
Avg  2.024  0.120  0.002  0.604  5.783  0.003  0.071  0.001  0.004  0.002  0.002  0.001  0.000  (-0.0
    0.000  0.004  0.002  (-0.000  0.001  0.001  91.376
```

Obrázek 30: Výsledky spektrální analýzy ze vzorku odebraného z tavicí pece

```
3/29/2022 9:36:56 AM Sample: TEST HSM SM
Quality: QHSM-VK Task: HSM

Run  Si    Fe7    Cu     Mn5     Mg     Zn4     Ti4     Cr4     Ni6     Pb6     Sn5     Na1     Ca2     Sr
    Cd3    Sb5    P1     Li3     B2     Zr3     AL%
Avg  2.132  0.128  0.008  0.620  5.956  0.003  0.067  0.005  0.004  0.002  0.002  0.005  0.001  (-0.0
    0.000  0.003  0.002  (-0.000  0.001  0.001  91.060
```

Obrázek 31: Výsledky spektrální analýzy ze vzorku odebraného z udržovací pece

Z naměřených dat můžeme vidět jen nepatrné rozdíly ve výsledné struktuře slitiny. Tyto rozdíly mohou být způsobeny například vypálením některých prvků z taveniny, ztráty při odplyňování, nebo díky nečistotám v přepravní pánvi, nebo samotné udržovací pece po předešlé tavbě. Spektrální analýza podle předepsaného požadovaného složení od zákazníka a dalších protokolů dopadla příznivě, tudíž tavba je po úspěšné kontrole a výroba odlitků může být zahájena.

Werkstoff		Magsimal 59 - AlMg5Si2Mn	
Farbgruppe		Violett	
Kurzzeichen		HSM	
Werkstoffnummer			
DIN/EN-Nr		1676	
Aluminium in Masseln			
Zusammensetzung		VK	Hausnorm Anlieferung
	Si	1,8-2,6	1,8-2,2
	Fe	max. 0,2	max. 0,2
	Cu	max. 0,05	max. 0,05
	Mn	0,5-0,8	0,5-0,8
	Mg	5.0-6.0	5.5-6.0
	Cr		
	Ni		
	Zn	max.0,07	max.0,07
	Pb		
	Sn		
	Ti	max.0,20	max.0,20
	Zr	/	/
	Na	/	/
	Ca		
sonstige	einzel	Be max.0,0	Be max.0,004
sonstige	gesamt	max. 0,2	max. 0,2

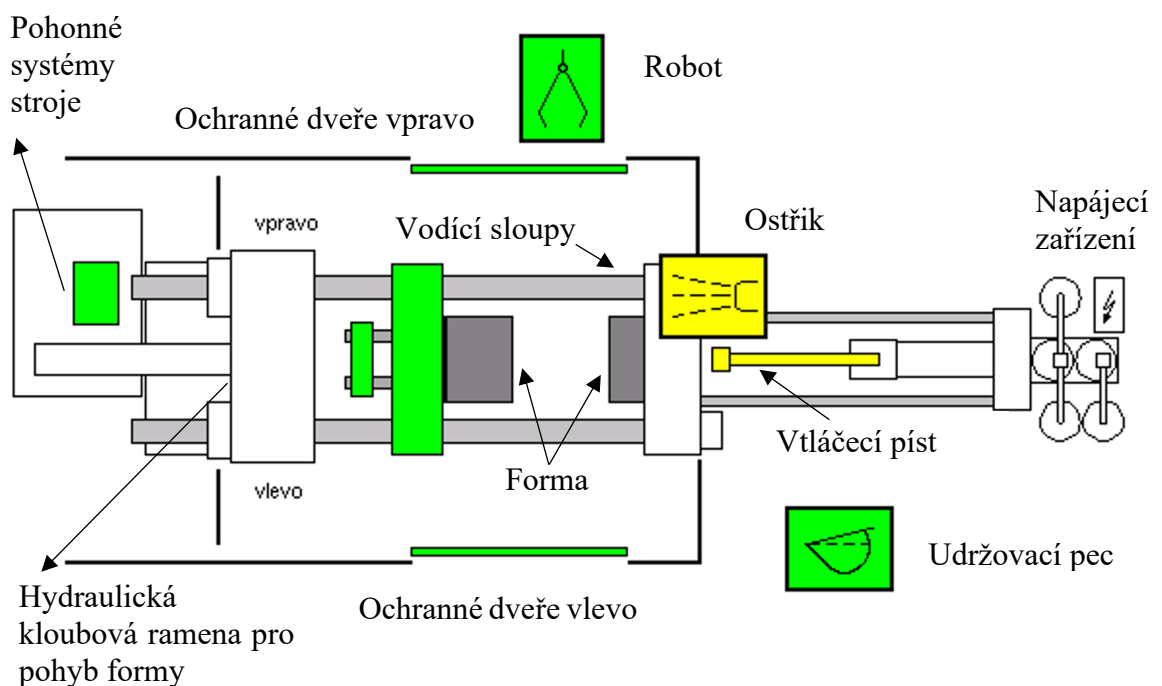
Obrázek 32: Předepsaná norma daných prvků pro HSM Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn

10 ODLÉVACÍ CENTRUM

Kromě toho, že technologie vysokotlakého lití vyžaduje formu určenou pro samotný odlitek a stroj, ve kterém je forma upnuta a je voděna přes vodící sloupy pohony, tak se zde nachází spousta dalších strojních zařízení, které tvoří samotné odlévací centrum. Odlévací centrum se skládá, ze samotné odlévací jednotky, kterou tvoří forma a stroj, ve kterém je forma upnuta a poháněna přes vodící sloupy a hydraulická ramena. Mazací a chladicí část, kterou tvoří ostřík, který jezdí v ochranném krytu v prostoru nad formou, dle daného programu. Dávkovací část, která je tvořena udržovací pecí naběračkou a dávkovací korýtkem. Temperanční část, zajišťující teplotu pevné a pohyblivé části formy médii. Ochrannou část, ve které se nalézá automatický robot, naprogramovaný na vyjímání odlitků z formy. A ve finále pak střížný nástroj pro ostřížení přetoku na odlitcích. Dále pak několik kamerových, kontrolních zařízení, chladicí vana a další drobné strojní zařízení.

10.1 Stroj pro lití odlitků a jeho nastavení pro odlitky HSM

Každý jednotlivý odlévací stroj, každá forma a každá slitina hliníku vyžaduje své unikátní nastavení parametrů, ať už strojních nebo technologických. V této kapitole se podíváme a zhodnotíme vhodné nastavení parametrů pro odlévání odlitků z materiálu HSM. A popíšeme jednotlivé operace, které se v průběhu lití odlitků dějí a jaké zařízení je zapotřebí pro vyhotovení samotných odlitků.



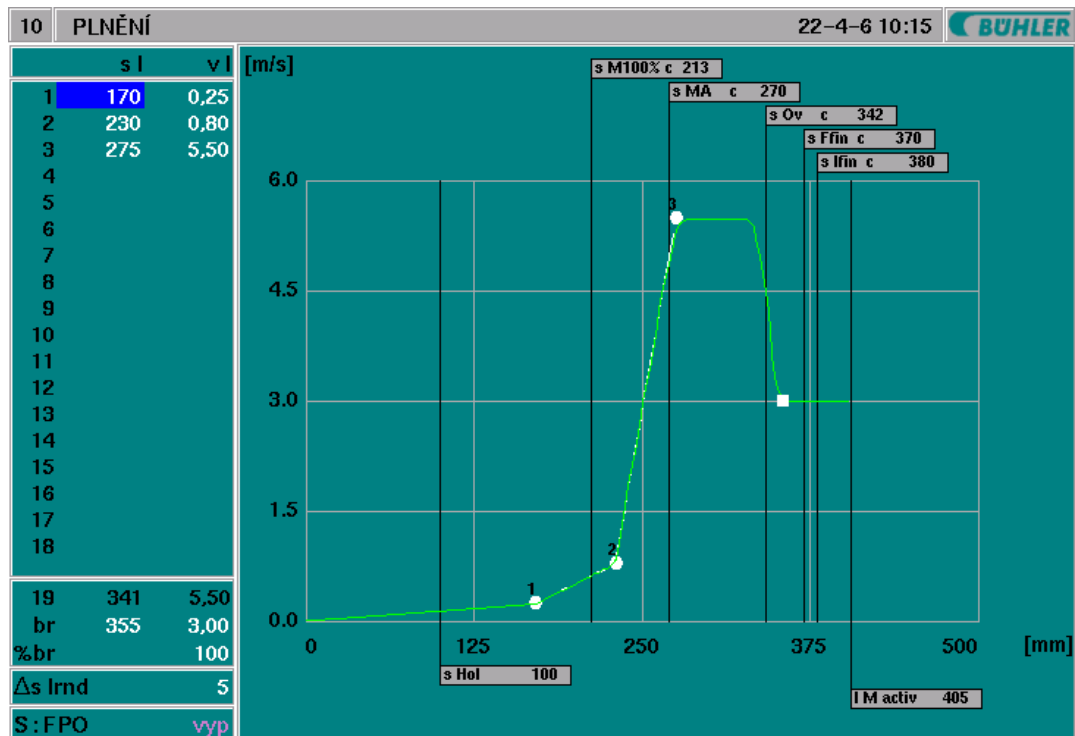
Obrázek 33: Schéma stroje pro vysokotlaké lití odlitků

10.1.1 Nastavení licího stroje pro odlitky z HSM

Před začátkem samotné výroby je nutné stroj správně seřídít a zkonfigurovat, a to za pomoci řídicích programů a ovládacích panelů stroje. U litiny HSM bylo obzvláště důležité precizní seřízení stroje, díky horší materiálové zabíhavosti do formy a obtížnější slévateľnosti. Každé zařízení odlévacího centra má specifické vlastní nastavení, ať už v případě robota, udržovací pece, formy nebo plnicího pístu. V této problematice, jsem se zaměřil na samotné plnění formy.

Odlévací centrum je seříděno a nastaveno, tak aby se dosáhlo co nejvyšší jakosti odlitku, za co možnou nejkratší dobu. Celková doba jednoho cyklu je 48,4 sekundy. Všechny strojní a technologické procesy jsou nastaveny bez jakýchkoliv prodlev, které nejsou vyžadovány. Některé z procesů jsou nastaveny tak aby se částečně prolínaly, například najetí ostríku nad formu při vyjímání odlitku robotem.

Uzavírací síla formy u odlitků HSM je 5000 kN, používá se jednonásobná forma s plochou v dělicí rovině 870 cm². Hmotnost vsázky je nastavena na 1390 gramů, hmotnost od nařiznutí odlitku je 730 gramů a hmotnost přetoků je 220 gramů. Hmotnost výsledného odlitku je 510 gramů. Vyhazovače formy působí na odlitek tlakem 120 barů a vrací se do formy za použití 80 barů.



Obrázek 34: Diagram plnění formy z obrazovky licího stroje

s Hol – start plnicího cyklu

s M100% c 213 – plná komora licího stroje

s Ma c 270 – naplnění po naříznutí

s Ov c 342 – kov se nachází před přetokovými částmi odlitku (odlitek je plný)

s Ffin c 370 – vyplněná dutina formy

s lfin c 380 – dotlak, úplné vyplnění formy a zhutnění odlitku

IM activ 405 – komora je aktivní (vytvořila se tableta pro vyjmutí odlitku robotem)

Na obrázku vidíme diagram v závislosti rychlosti plnicího pístu na dráze. Můžeme si povšimnout bodů zvýrazněných na křivce plnění. Bod jedna říká, že píst má nízkou rychlost, kov v komoře má již ustálenou hladinu a píst se nyní pohybuje po naříznutí (část odlitku které tvoří vtokové kanály, které se následně ohraní a jsou odpadním materiálem). Bod dva nám poukazuje na dolití odlitku, za prudkého nárustu rychlosti. Bod 3 znázorňuje dotlak.

10.1.2 Udržovací pec a dávkování kovu

Roztavená slitina hliníku HSM je u stroje uchovávána v udržovací kelímkové elektrické peci při teplotě 720 °C. Transport do korytka odlévacího stroje má na starost keramická naběrací lžice, připevněna na robotickém rameni, která se řídí programem, který určuje její trajektorii, hloubku nabírání v tavenině, čas okapání taveniny, a rychlost a místo samotného vytlití dávky taveniny. Nabírací lžice je opatřena elektrodami, které kontrolují, ponor do taveniny a zároveň úroveň hladiny roztavené slitiny hliníku v samotné udržovací peci.



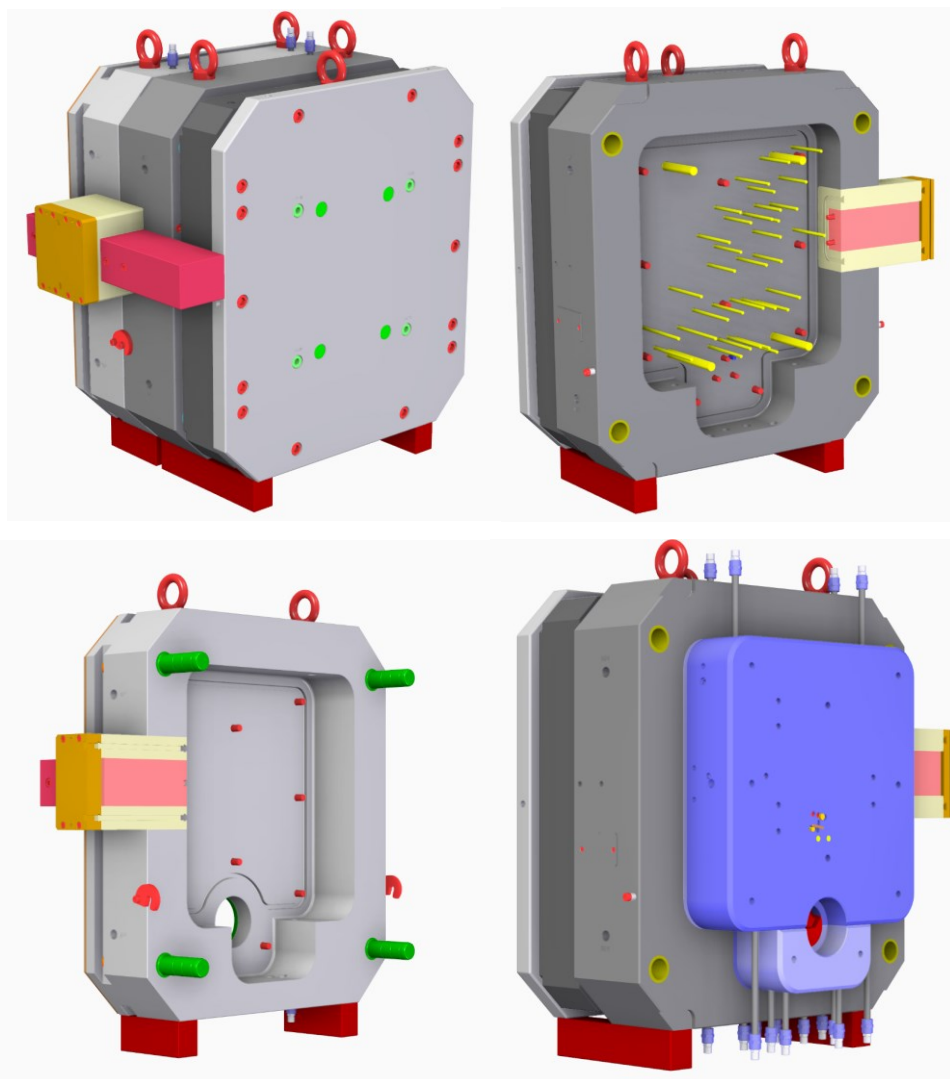
Obrázek 35: Dávkování taveniny keramickou naběračkou z udržovací pece

Nabírací lžice je naprogramována, aby transportovala 1390 gramů taveniny do odlévací komory, což je naše celková vsázka do licího stroje. Po nalití taveniny do dávkovací komory přichází na řadu vlačovací píst o průměru 60 milimetrů, který je mazán speciálním mazivem (THEILINGER). Píst za pomoci vysokých tlaků a velkých dosažených rychlostí vtlačí taveninu přes licí komoru o délce 405 milimetrů do dutiny formy. Rychlost pístu se po celou dobu jeho trajektorie zvyšuje, a dosahuje finální rychlosti až 5,5 m/s.

10.2 Forma pro odlitky a její plnění

Před začátkem plnění v dutině formy začíná působit vakuum, které se zde úmyslně za pomoci vakuovacího stroje vytváří, pro dosažení lepší vnitřní struktury odlitků bez poréznych vad. Tím, že se z formy odstraní vzduch, tak se zaručí lepší plnění dutiny formy včetně přetokových částí, tak se zlepší i mechanické vlastnosti výsledného odlitku. Při použití vakua se technologie nazývá vysokotlaké lití výroby podtlakem.

Forma je rozdělena na dvě hlavní části, pohyblivou část formy a pevnou část formy. Pevná část formy je upnuta na straně pístu u dávkovací komory. Pohyblivá část formy je upnuta na straně hydraulických ramen, a tvoří tak funkci, pro vyjímání odlitků, mazání a chlazení formy, a pro samotné seřizování. Na pohyblivé části formy nám po odlití taktéž zůstává odlitek, který je následně vyjmut robotem za pomoci prizmatických vyhazovačů.



Obrázek 36: 3D model formy

10.2.1 Temperace formy

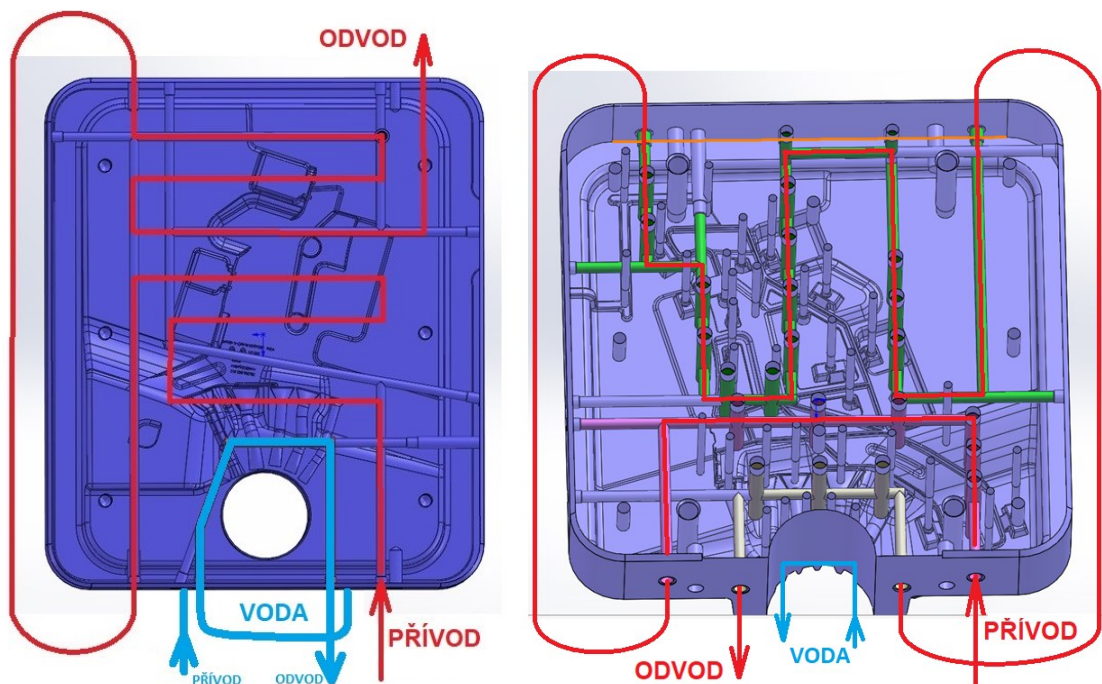
Forma je vyhřívána za pomoci proudícího média oleje, který proudí ve vyfrézovaných kanálcích uvnitř formy a stará se tak o temperaci forem. Temperace je u forem nezbytně důležitá, pomocí temperace předcházíme k tepelným šokům v tavenině v dutině formy a následně materiálu, které by mohli tak nastat. Při špatné temperaci formy, by mohlo dojít i k samotnému poškození formy. Temperují se tři okruhy ve formě, pohyblivá část formy se temperuje stejně jako pevná část formy na 230 °C a jádra ve formě se temperují na teplotu 170 °C. Tyto teploty zaručí bezproblémový teplotní přechod taveniny do formy a následné tuhnutí odlitku. Forma se temperuje vždy v rozmezí 190–250 °C z důvodů, aby bylo ostříkové zařízení schopno vytvořit ochranný film, při vyšších teplotách by se voda s chemickým koncentrátem z ostříku ihned vypařila a forma by nebyla připravena na další cyklus, naopak při nižších teplotách by voda s chemickým po stěnách formy jen ztekla.



Obrázek 37: Temperační zařízení TOOL - TEMP TT-388

10.2.2 Chlazení formy

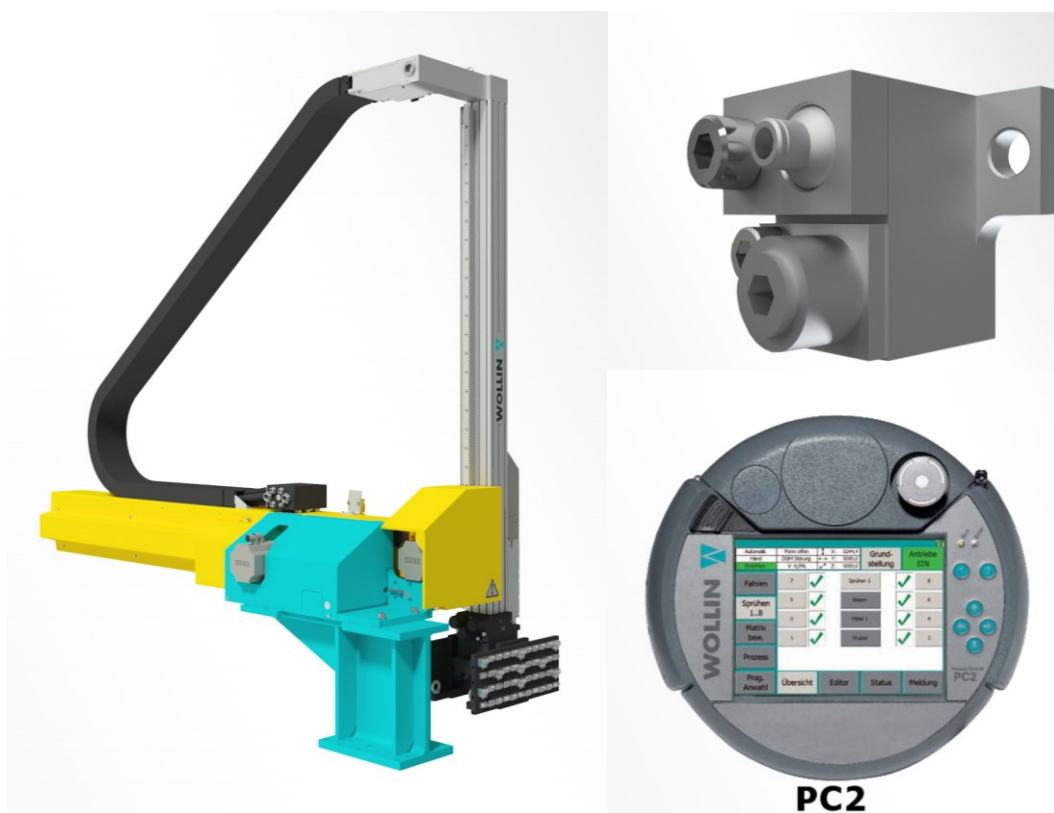
Chlazení ve formě může přivádět k otázce, proč se forma chladí, když ji zároveň úmyslně ohřívána na teplotu 230 °C. V průběhu výroby se totiž forma a její části zahřívají samotnou taveninou, pokud by se teplota formy nechala vystoupat příliš vysoko, riskovalo by se tak špatné tuhnutí odlitků, nebo borcení samotných tvarů odlitků. Znesnadnilo by se taky robotické vyjímání odlitků, ale díky správnému návrhu temperačních a chladících okruhů ve formě, se zajistí plynulý proces lití odlitků a předejde se tak následným vadám, nebo technologickým chybám v procesu výroby. Pro chlazení formy se použije jako temperační medium voda. Chladí se hlavně v oblasti kolem licí komory, kde taky dochází k vtlačení taveniny do dutiny formy za pomoci pístu, tím se odvádí částečně i teplo vzniklé třením v oblastech trajektorie pístu.



Obrázek 38: Schéma zapojení temperačních a chladících okruhů formy

10.2.3 Ostřík a mazání formy

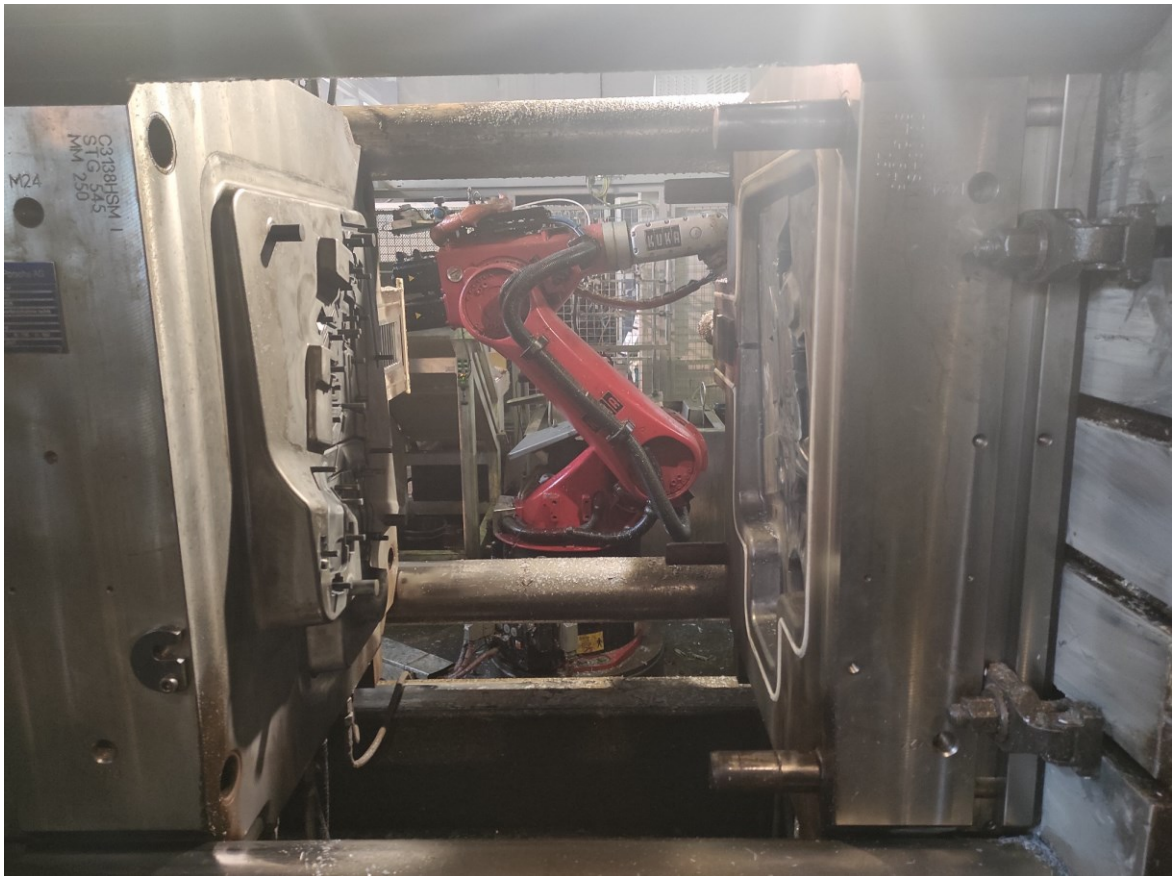
Za pomoci ostříku se zajišťuje ve formě mazání, pro snazší vyjímání odlitků a taky, se tvoří ochranný film na formě. Tento proces probíhá v každém cyklu stroje, takže po každém zaplnění dutiny formy a následném vyjmutí odlitku. Ostřík formu taky částečně chladí mezi jednotlivými cykly a připraví tak na další cyklus lití. Ostřík tvoří pohyblivé rameno, na kterém jsou umístěny dvě masky mířící na obě strany formy, speciálně sestavená pro pohyblivou stranu formy a pro pevnou stranu formy. Speciální nastavení masky ostříku zaručuje, mazání a chlazení přesně těch míst formy, které je zapotřebí k zaručení, správného vyjímání odlitků, vyvarování se strukturálním vadám a ochrany formy. Ostřík zároveň slouží, jako očištění formy mezi jednotlivými cykly, aby byl povrch dutiny formy dokonale čistý pro další odlitek. Ostříky se pohybuje ve dvou osách, a to horizontálním a vertikálním směrem, celé zařízení je umístěno nad licím strojem a formou v ochranné prostoru. Pohyb a funkce ostřík se řídí za pomoci programu v automatickém režimu. Médium ostříku formy tvoří voda a ISOLAT TT-77, tlak média na formu tvoří asi 3 bary.



Obrázek 39: Ostřík – PSM4F Vertical 2500 Horizontal 2500 a PC 2Smart Control

10.2.4 Detail a stav formy

Forma je vybavena taky několika těsněními zaručující dokonalé vakuuum, přetokovými částmi, k správnému zaplnění a zabíhání materiálu do všech částí formy. Stav formy, se kterou jsem laboroval, je dobrá což znamená, že formou již prošly nějaké série v řádu tisíc odlitků a její životnost, před větším zásahem je ještě několik dalších tisíc odlitků, po každé sérii, například tři tisíce odlitků je forma důkladně vyčištěna a rozebrána k seřízení všech její komponent a následně znovu uvedena do výroby.

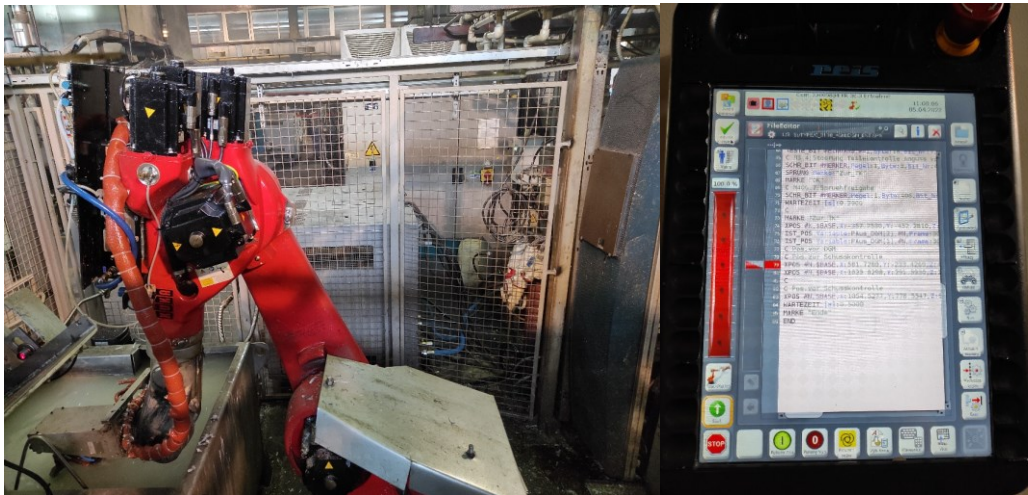


Obrázek 40: Detail formy a upnutí ve stroji

10.3 Vyjímání odlitků z formy

Vyjímání odlitků z formy je v podstatně poslední fázi lití, kdy čelisti robota uchopí odlitek za tabletu (je to část odlitku, která je ústím vtokové soustavy, vytvořená válcovou plochou lící komory a pístu, která slouží právě k vyjímání odlitků z formy). Robot po vytažení odlitku z formy odlitek dostane do pozice před kontrolní kamery, které slouží ke kontrole celistvosti odlitku, jestliže by odlitek nebyl úplný, stroj se ihned zastaví a zahlásí chybové hlášení (neúplný odlitek, zkontrolujte dutinu formy). Po kontrolním stanovišti s kamerami robot odlitek ponoří do chladicí vany s vodou a koncentrátem, který odlitek zchladí a umožní tak následnou manipulaci personálu v ochranných rukavicích s daným odlitkem. Po zchlazení robot odlitek vloží buď do ohraňovacího lisu, nebo na odkládací prostor v oblasti ohraňovacího lisu a následně pracovník odlitek vloží do ohraňovacího lisu manuálně, záleží na typu pracoviště. V našem případě se jedná o manuální zakládání odlitků do ohraňovacího lisu, takže je zapotřebí lidského faktoru, pro založení odlitku do řezu a následní vyjmutí a uložení do přepravní bedny.

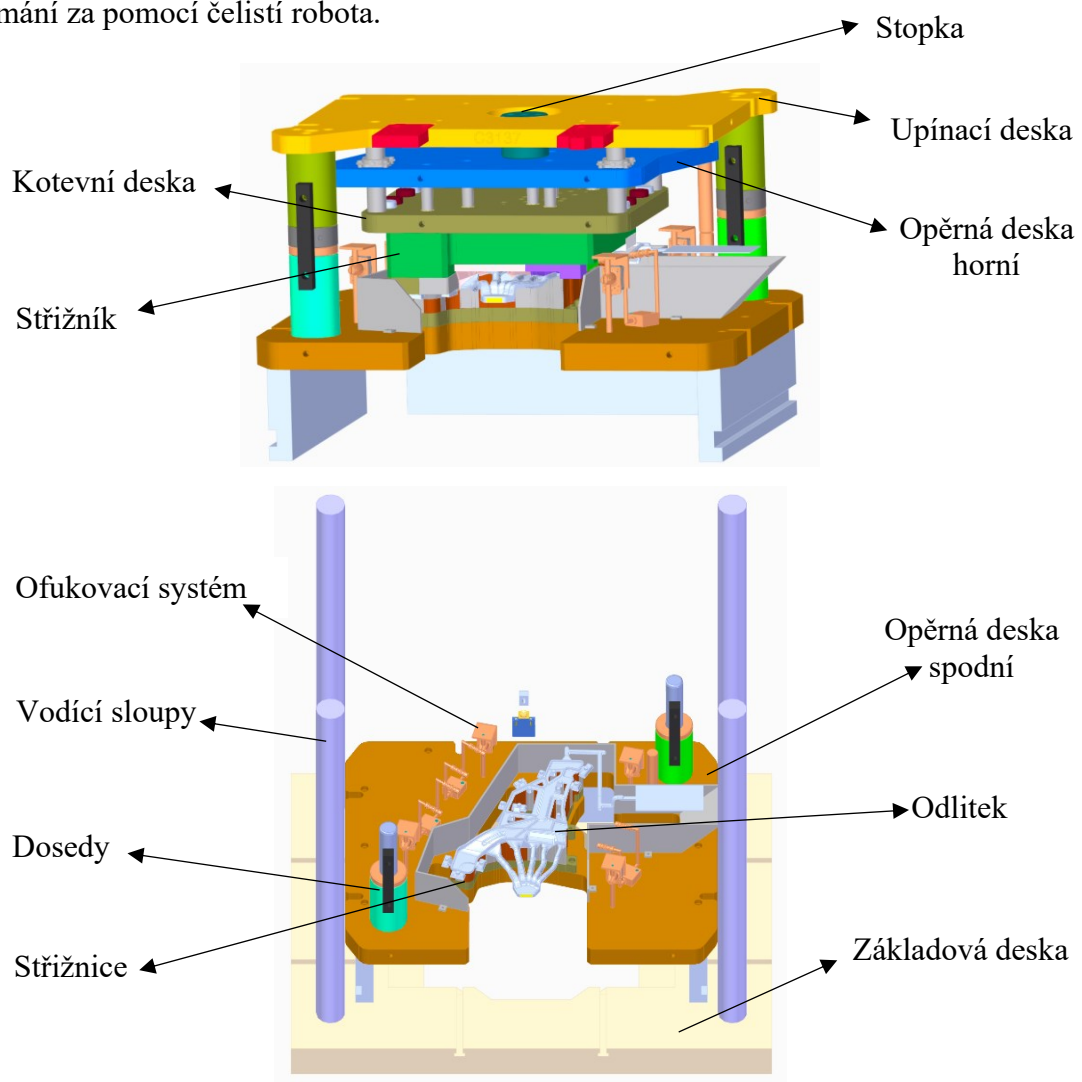
Robot se po celou dobu řídí programem, který má pro každou formu a odlitek unikátní. Pokud nepotřebujeme robota seřizovat nebo vytvářet nový program, robot je po celou dobu výroby v plně automatickém režimu.



Obrázek 41: Robotické pracoviště, pozice chlazení odlitku, ovládací panel s programem robota

10.4 Ohraňení odlitků

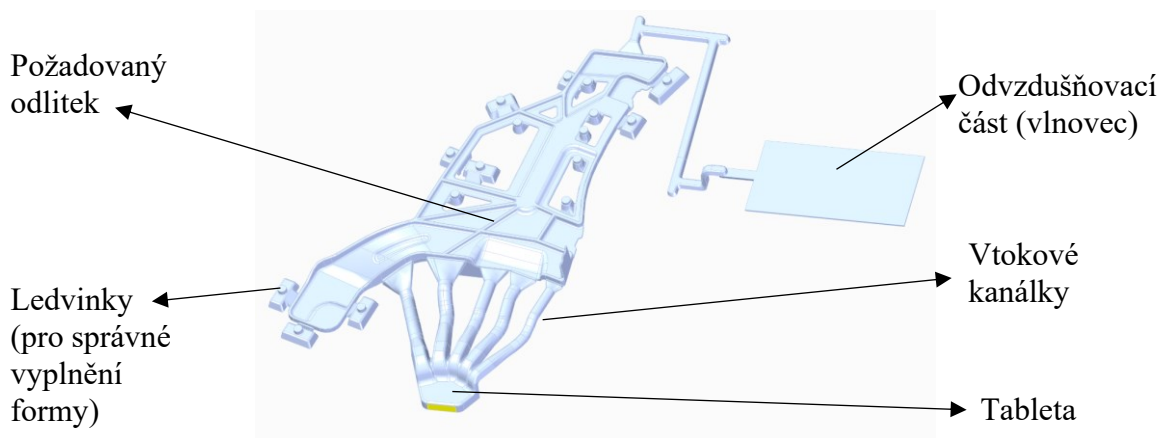
Ohraňení odlitků za pomoci ohraňovacího lisu odděluje odlitek a přetokové části, jako jsou „ledvinky“, odvzdušňovací přetoky, nebo vtokové proudy s tabletou. Všechny odpadní části odlitku po ohraňení propadnou do přepravní bedny, umístěné pod ohraňovacím lisem a následně jsou odpadní zbytky znovu roztaveny a použity k další výrobě, což je ekonomicky velmi výhodné. U odlitků, je použit ohraňovací lis, do kterého jsou odlitky vkládány ručně personálem, a to kvůli jejich tvaru a danému pracovišti. Ohraňovací lis je vybaven vzdušným ofukovacím systémem, který za pomoci proudění vzduchu čistí střížné části lisu, personál následně pro kontrolu, ještě následně tlakovou vzduchovou pistolí ofoukne celý řez. Odlitky vyžadují přesné založení do ohraňovacího lisu, aby nedošlo ke křivení odlitků. Ohraňením odlitků se odstraní přetokové části o hmotnosti 220 gramů a tabletu s vtokovými kanály přibližně od hmotnosti 250–300 gramů, záleží na velikosti tablety, která je nastavena pro vyjímání za pomoci čelistí robota.



Obrázek 43: Ohraňovací lis a založení odlitku do řezu

10.5 Finální odlitek

Po úspěšném zvládnutí a správném nastavení všech technologických procesů, je zhotoven odlitek pro německou automobilku Porsche, odlitek se umístí následně pod světlometry automobilů Porsche. Odlitek ve finále váží 510 gramů, a je slitinou hliníku HSM Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn, která je mnohem houževnatější od ostatních slitin hliníku. Odlitek se vyrábí ve dvou sériích, a to pro pravé a levé světlometry automobilů Porsche. Odlitek je nyní připraven, podrobit se finálním kontrolám a zkouškám, které jsou nutné pro zhodnocení kvality odlitků.



Obrázek 44: Odlitek včetně přetokových a vtokových částí



Obrázek 45: Finální odlitek po oříznutí

11 KONTROLA ODLITKŮ A ZHODNOCENÍ KVALITY

U odlitků pro automobilku Porsche, jsou vyžadovány kontroly vnitřní struktury za pomoci RTG a následné podrobení materiálu tahové zkoušce a zkoušce, kdy se odlitek nýtuje. Zkoušky byly prováděny na půdě firmy, kde probíhala i moje praktická část bakalářské práce, a hodnotil jsem kvalitu odlitků, dle požadavků zákazníka a předpisů firmy.



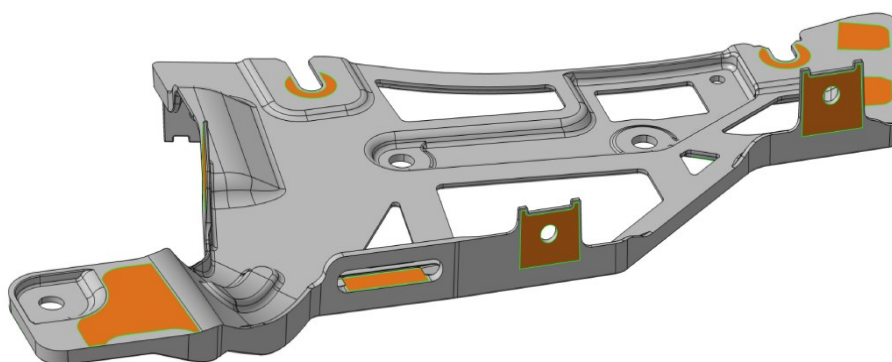
Obrázek 46: Umístění odlitku v automobilu

11.1 RTG zkouška odlitků

Rentgenová zkouška se prováděla na rentgenu Seifert DP 419. Odlitek se upne do prostoru rentgenového pole, a následně se zajistí bezpečnostní dvířka a zapne se rentgen. Nastaví se intenzita záření a pomocí manipulačních pedálů a joysticku se nastaví vhodná poloha pro kontrolu odlitku. Odlitky se hodnotí podle předepsaných parametrů ve vybraných zónách na odlitku, které vyžadují perfektní vnitřní strukturu.

Požadavky	RTG zkouška dle PTL 7501				Zkouška povrchu dle PTL 7501	
Kritéria hodnocení	max. vada			max. součet vad na plochu	max. vada	
Druh vady	Vlasová	Vlasová	Pór	Vlasová, Pór	Trhliny	Otevřené póry
Vztažná jednotka	Délka	Plocha L×B	Průměr	Podíl na ploše	Délka	
Jednotka	mm	mm ²	mm	%	mm	
Zóna	2	1	1	1	nepřípustné	nepřípustné

Tabulka 2: Požadavky na odlitek – RTG zkouškou

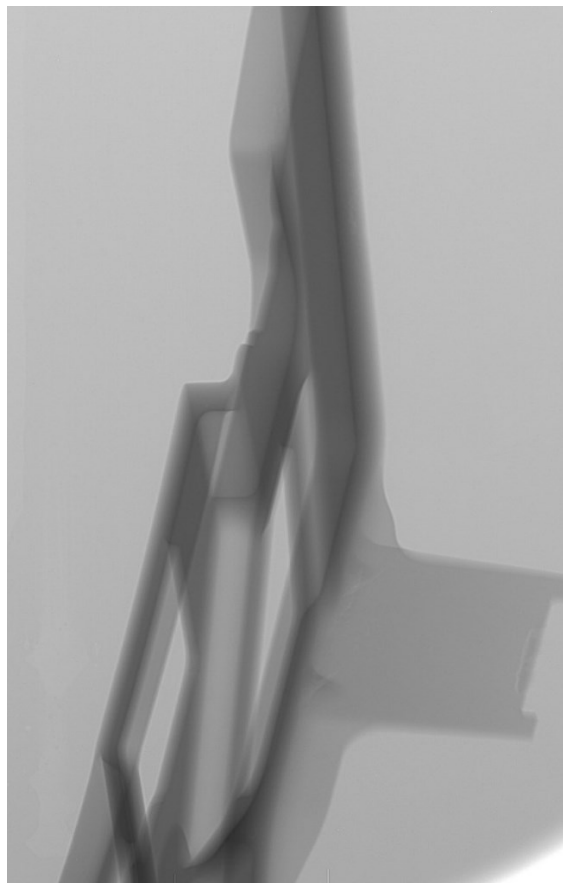


Obrázek 47: Hlavní kontrolované zóny na odlitku

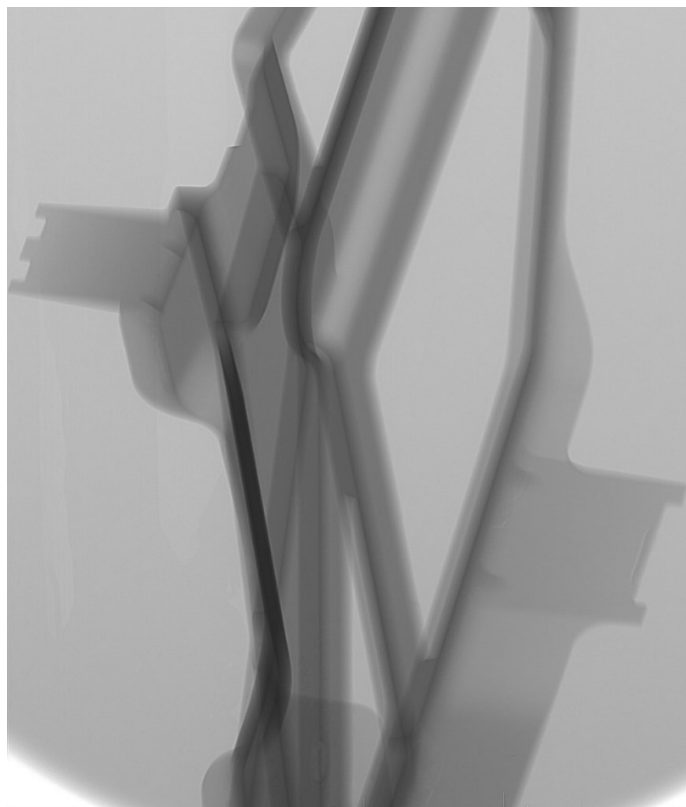


Obrázek 48: Rentgen Seifert DP 419

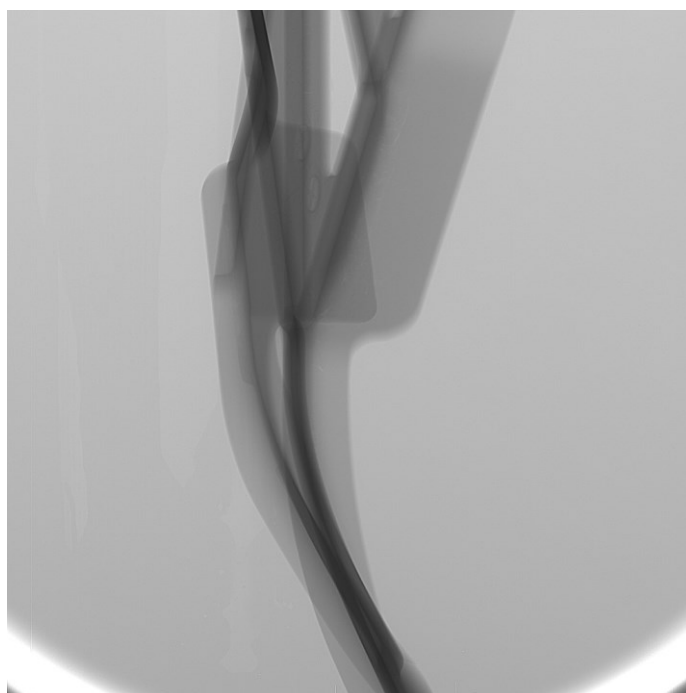
Jestliže se podíváme na snímky RTG na následujících stranách, můžeme posoudit, že odlitek vyhovuje kritériím a požadavkům na vnitřní strukturu. Odlitek nemá větší shluky pórů, ani vlásečnicových vad. Místa, kde se nějaké vady nachází na obrázcích vidíme jako světlá místa, která po prozáření ukazují určité nedostatky vzniklé v průběhu výroby, například špatných odvzdušněním formy, špatným tuhnutím taveniny ve formě, nebo špatným chlazením formy.



Obrázek 49: RTG snímek 1



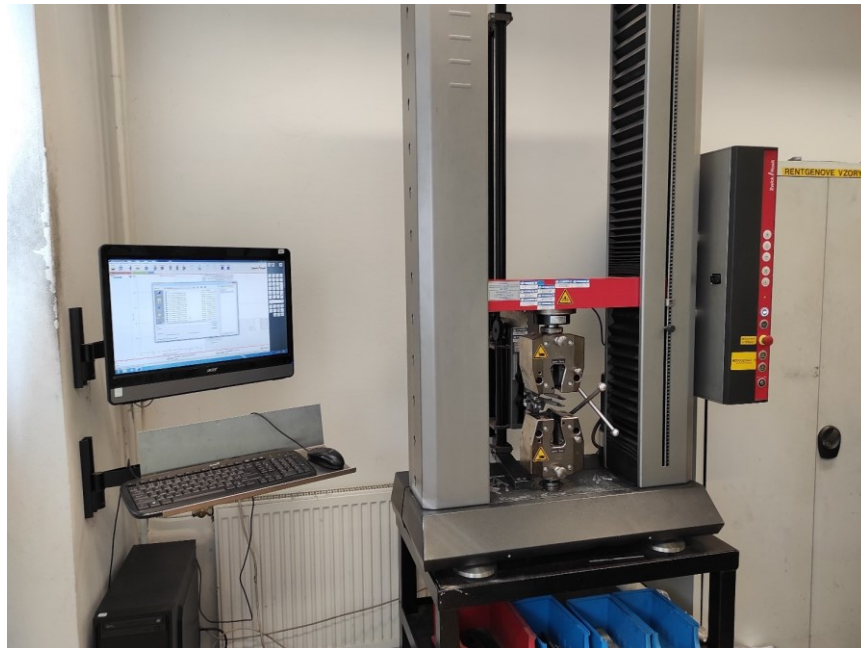
Obrázek 50: RTG snímek 2



Obrázek 51: RTG snímek 3

11.2 Tahová zkouška odlitků

Další zkouškou, která byla provedena v rámci zhodnocení kvality odlitku byla zkouška materiálu tahem, která je rovněž požadavkem procesu výroby. Tahovou zkouška se provedla v jedné z kontrolních laboratoří na půdě firmy.



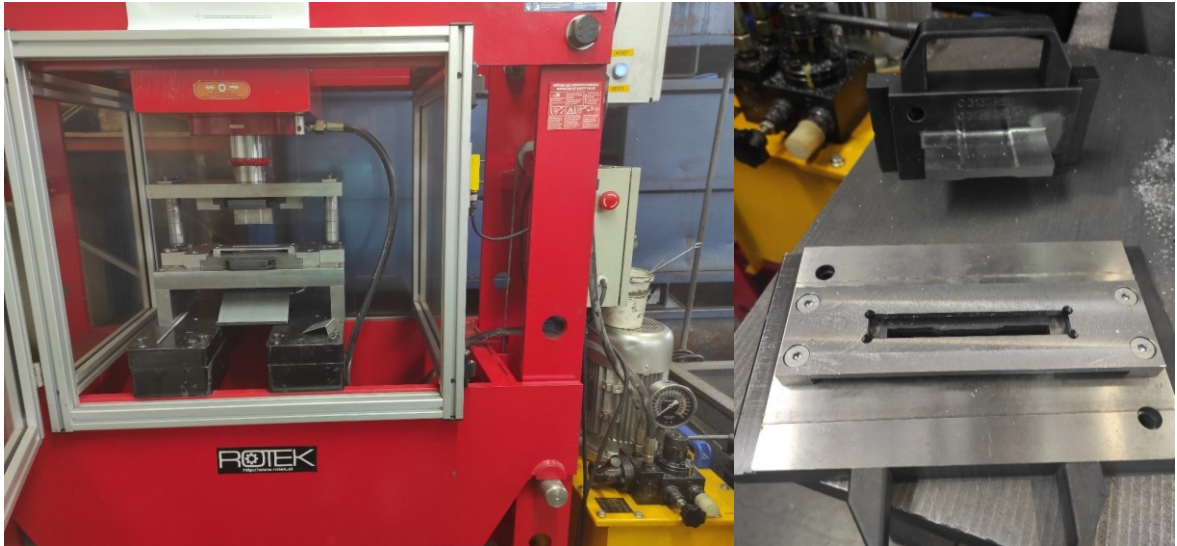
Obrázek 52: Přístroj pro tahové zkoušky ProLine Fmax 5-100 kN

Před samotným začátkem tahové zkoušky se musí opatřit zkušební tyčinky. Vybral jsem si celkem čtyři odlitky, dva, které vyhovují RTG zkoušce a další dva nikoli. Z odlitku byly z dané části nařezány pásky na kmitací pile za pomoci plátku na ocel.



Obrázek 53: Řezání zkušebních vzorků

Nyní se z části odlitků razníkem na výrobu zkušebních tyčinek za pomoci matric (střižník, střižnice) pro dané odlitky, opatří dostatečné množství zkušebních tyčinek pro vykonání tahové zkoušky a následné porovnání výsledků.



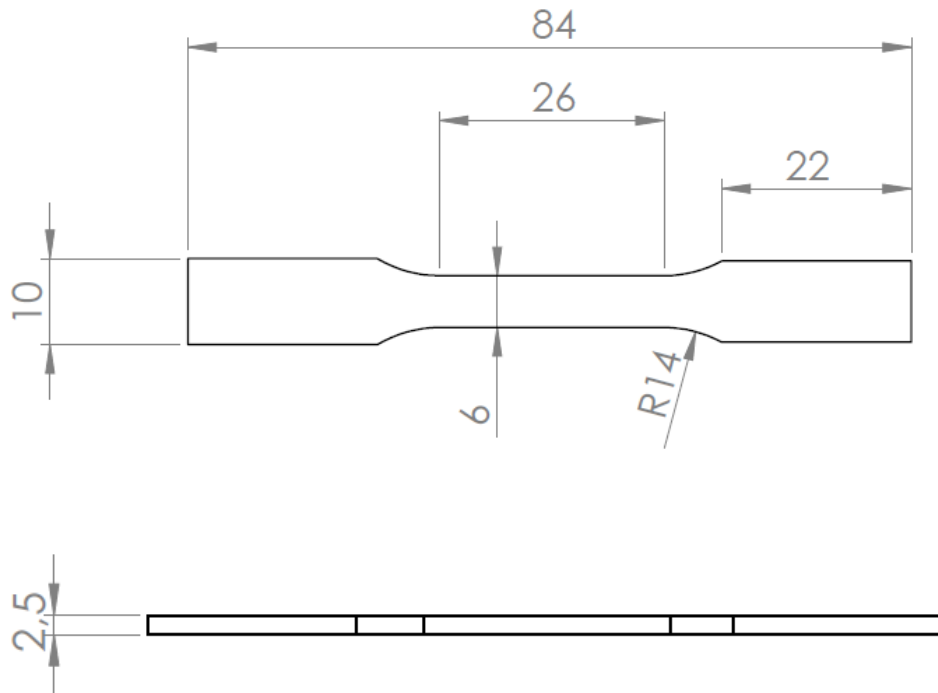
Obrázek 54: Razník a matrice na výrobu zkušebních tyčinek

Zkušební tyčinky se po jejich vyražení obrousí na bočních plochách, kde dochází ke styku s průtahoměry, aby nebyla zkouška ovlivněna nedostatky povrchu zkušebních tyčinek.



Obrázek 55: Laboratorní broušící zařízení pro výrobu zkušebních tyčinek

Zkušební tyčinky byly vyrobeny dle normy pro zkoušení slitiny hliníku HSM.



Obrázek 56: Rozměry zkušební tyčinky

Po obstarání zkušebních tyčinek se přechází k samotné tahové zkoušce. Bude provedeno celkem čtyř měření a z nich následné vyhodnocení, kvality a správnosti odlitků. Zkušební tyčinka se upne do spodních a horních čelistí za pomoci pák a přístroj se nechá zkalibrovat. Do programu se vloží vstupní parametry, jako je tloušťka vzorku, šířka vzorku, zkoušená délka, měřená délka a vzdálenost přípravků ve výchozí pozici. Po správném upnutí a nastavení měřících parametrů se provede zkouška a zkušební tyčinka se přetrhne.

11.2.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

Vstupní parametry pro tahovou zkoušku:

Zkoušená délka: 27 mm

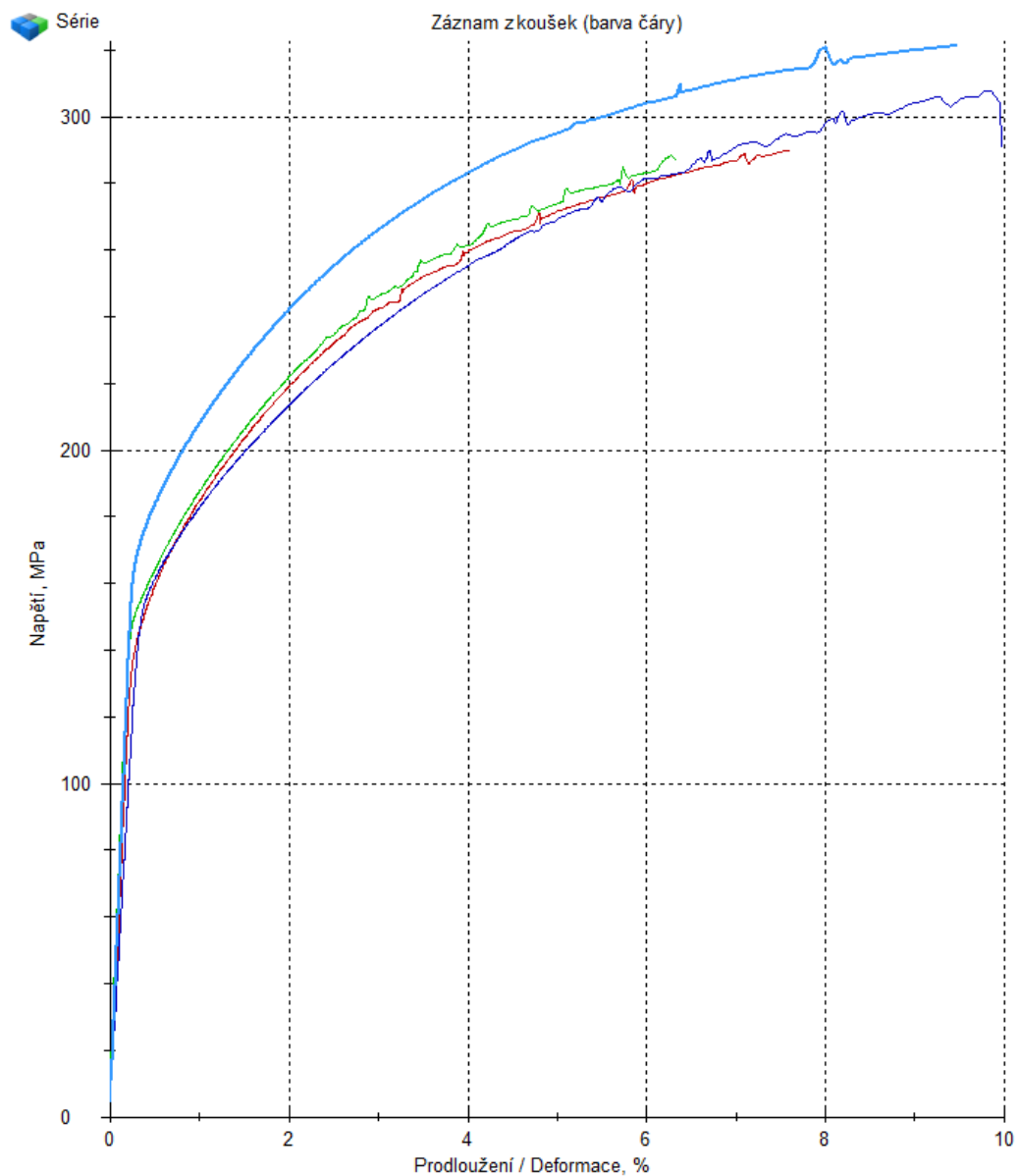
Měřená délka: 20 mm

Vzdálenost přípravku ve výchozí pozici: 70 mm

č.měření	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]
max	-	-	-	-	-	-
min	160	280	8,0	-	-	-
1	156	290	7,1	2,44	6,11	14,91
2	160	288	5,9	2,44	6,03	14,71
3	164	308	9,3	2,44	6,03	14,71
4	182	321	9,0	2,44	6,03	14,71

Tabulka 3: Výsledky tahové zkoušky

Z výsledků tahové zkoušky můžeme vyčíst, že pouze dva zkušební vzorky prošly tahovou zkouškou, dle požadavků na danou slitin. Zkušební tyčinka 1 a 2 byla, vyhotovena z odlitků, které neprošly RTG zkouškou, nyní tedy můžeme názorně vidět, jak vnitřní struktura odlitků ovlivňuje výslednou kvalitu a mechanické vlastnosti materiálu. Zkušební vzorky 3 a 4 byly vyhotoveny z odlitků, které RTG zkouškou prošly a nyní i dosáhly dobrých výsledků u zkoušky tahem.



Obrázek 57: Graf s průběhy zkoušek daných zkušebních tělísek

Legenda:

- Zkušební tyčinka 1 **červená** křivka
- Zkušební tyčinka 2 **zelená** křivka
- Zkušební tyčinka 3 **fialová** křivka
- Zkušební tyčinka 4 **modrá** křivka

11.3 Nýtovací zkouška odlitků

Zkouška nýtováním se provádí, kvůli požadavkům zákazníka, který, bude na určitých místech odlitek ve finále při montáži nýtovat. U nýtovací zkoušky je zkoumáno na materiálu jeho chování, tvorbu prasklin, zakřivení kolem nýtů a průchod nýtu materiálem. Jakékoliv selhání materiálu v oblasti nýtu se považuje za nepřipustné.

K vyhotovení zkoušky je použito zkušebních plechových pásek obdélníkového tvaru, které se za pomoci nýtovací pistole a nýtů přinýtují k odlitku na předepsaných místech. V průběhu zkoušky se pozorovalo chování materiálu odlitku, které bylo příznivé. Na odlitku nevznikly, žádné praskliny, ani větší zakřivení kolem nýtů, průchod nýtu materiálem byl pozvolný a bez většího odporu. Výsledky nýtovací zkoušky jsou tedy příznivé.



Obrázek 58: Nýtovací zkouška

ZÁVĚR

V písemné části bakalářské práce se pojednávalo a studovalo jak samotné technologie lití, tak i samotný hliník a jeho slitiny. Byli provedeny studie o slitinách hliníku a snažili jsem se pochopit jeho chování, rozdíly a výhody jednotlivých slitin při lití a výsledných dosažených vlastnostech.

Hlavní část bakalářské práce, a to část praktickou jsem vykonával na půdě MESIT & RÖDERS v.o.s.. Čerpal jsem ze zkušeností předešlých let působení v rámci brigádnické činnosti ve slévárně a jejich laboratořích. V praktické části byl popsán postup výroby odlitků, tavení samotného materiálu HSM Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn a následné kvalitativní zhodnocení jakosti odlitků, nastavenou technologií a způsobem výroby.

Byl zde popsán celý tavící proces pro materiál HSM Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn, a zkoumáno jeho chování a rozdílnost od ostatních slitin. U materiálu bylo provedeno taky několik měření a specifické technologické kroky, jako například odplyňování taveniny slitiny hliníku.

Odlitky, které se odlévaly byly určeny pro automobilku Porsche a kladl se zde velký důraz na vnitřní strukturu, houževnatost a pevnost materiálu, která byla dosažena za použití speciální slitiny navzdory horší zabíhavosti materiálu do formy, která se kompenzovala, upraveným licím nastavením na rozdíl od ostatních slitin materiálu.

Pracoval jsem s jednotlivými strojními zařízeními a programy odlévacího centra. Snažil jsem se pochopit jejich funkce, vlivy a dopady na výsledný odlitek a najít optimální nastavení, které by nám zařídilo nejlepší jakost odlitku a optimální výrobu. Laboroval jsem s formou na odlitky pro Porsche a hledal optimální nastavení pro odlévaný materiál a chod formy v odlévacím centru. Taktéž jsem ve finální části pracoval s 3D modely samotných odlitků, ale i ohraňovacího lisu nebo 3D modelem formy, což mi umožnilo rozšíření pohledu na celou problematiku.

Výsledné zkoušky jakosti odlitků dopadly příznivě a výroba tak mohla být uvolněna k exportu k zákazníkovi. Samotná práce měla velmi obohacující vliv na mé vzdělávání v oboru slévárenství a možnou budoucí kariéru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CAMPBELL, John. Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011, 1 online zdroj (xxxi, 1130 p.). ISBN 9781856178099.
- [2] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 217 s. ISBN 9788001060261.
- [3] NOVÁKOVÁ, Iva. *Výroba odlitků ze slitin hliníku*. In: Katedry strojírenské technologie TUL [online]. 2010 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf
- [4] SEDLÁČEK, Vladimír a Vladimír KOMÁREK, ed. *Příručka o hliníku*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1969, 707, [1 přelož.] s. Řada strojírenské literatury.
- [5] CHRÁST, Jaroslav a Jan HOREJŠ, 2006. *Slévárenská zařízení*. 3., upr. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-720-4456-7.
- [6] CHVOJKA, Jiří a Miroslav BRZOBOHATÝ, 1961. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. 3., upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Řada hutnické literatury. ISBN 80-720-4456-7.
- [7] DURAIRAJU, S. R., A. NAVEENKUMAR, S. PREM KUMAR a V. LOGESHWAR. A Review on Material Processing of Aluminium Metal Matrix Composites. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research* [online]. 2016, 6(5), 26-34 [cit. 2022-04-02]. ISSN 2249-9954. Dostupné z: <https://rpublication.com/ijst/2016/oct16/3.pdf>
- [8] GHOMASHCHI, M.r a A VIKHROV. *Squeeze casting: an overview*. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2000, 101(1), 1-9 [cit. 2022-04-06]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00291-5. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013699002915>
- [9] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ, 2006. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita. ISBN 80-704-3491-0.
- [10] BRYKSÍ, Vlastimil a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Studium mechanických vlastností odlitků litých technologií rheocasting*. 2013.

- [11] ASM INTERNATIONAL. *Casting Design and Performance*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2009, 264 s. ISBN 978-087-1707-246.
- [12] V-PROCESS CASTING. HARMONY V-PROCESS ALUMINIUM CASTING [online]. 251 Perry Highway Harmony: Harmony Castings, LLC. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.harmonycastings.com/v-process-casting/>
- [13] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design. First edition*. Oxford: Butterworth Heinemann, 2011, 1130 s. ISBN 1856178099.
- [14] *Properties of Aluminum. Research Gate* [online]. Switzerland: Creative Commons Attribution, 2017 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319388984_Evaluating_the_Tensile_Properties_of_Aluminum_Foundry_Alloys_through_Reference_Castings-A_Review
- [15] *Properties of Aluminum. Mendelu* [online]. Brno: Mendelova univerzita, 2015 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6385&typ=html
- [16] *Ultrazvuková kontrola. Weldinspect* [online]. Pňovice: Weldinspect, 2020 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.weldinspect.cz/ultrazvukova-kontrola>
- [17] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3584-6.
- [18] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [19] KRŇÁVEK, Václav a František STRÍTECKÝ. *Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad*. Slévárství. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2007, roč. LV(2-3), s. 81-86. ISSN 0037-6825.
- [20] *Jak si vede česká a zahraniční slévárenská výroba*. Technický deník [online]. Praha: Vydává Business Media CZ, 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/jak-si-vede-ceska-a-zahranicni-slevarenska-vyroba_31154.html
- [21] *Časopis slévárství. SVAZ SLÉVÁREN* [online]. Brno: SVAZ SLÉVÁREN 2020, 2018 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.svazslevaren.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ_{Pt}	mez pevnosti v tahu
$\sigma_{0,2}$	mez průtažnosti
δ_5	tažnost 5 %
δ_{10}	tažnost 10 %
ψ	kontrakce
HB	tvrdost podle Brinella
HV	tvrdost podle Vickerse
RTG	rentgenové záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schéma stroje pro vysokotlaké lití s vertikální teplou plnicí komorou a vertikální dělicí rovinou formy [9].....	13
Obrázek 2: Schéma stroje pro vysokotlaké lití s horizontální studenou plnicí komorou a vertikální dělicí rovinou [9]	14
Obrázek 3: Odlévání, metoda přímý squeeze casting [7]	16
Obrázek 4: Plnění formy, metoda nepřímý squeeze casting [8]	16
Obrázek 5: Postupy výroby Rheocasting a Thixocasting [10]	17
Obrázek 6: Schéma lití do vakuové formy [12].....	18
Obrázek 8: Výroba odlitků z hliníkových slitin v ČR (tisíc tun) [21]	20
Obrázek 9: Slévárenská produkce ČR dle materiálů v roce 2014 [2].....	21
Obrázek 10: Krychlová buňka hliníku [4]	22
Obrázek 11: Přehled používaných slitin hliníku [4]	23
Obrázek 12:Křivka chladnutí Al 99,99 % a slitiny Al 99,99% s 5% Mg [4]	24
Obrázek 13: Křivky chladnutí slitin AlSi a stavový diagram z nich sestavený. [4]	25
Obrázek 14: Hodnoty zabíhavosti slévárenských slitin hliníku (teplota taveniny 750 °C) [6]	28
Obrázek 15: Vliv teploty lití a teploty kokil na zabíhavost slitin hliníku [6]	29
Obrázek 16: Působení různých slitinových prvků na smršťování hliníkového materiálu [6]	30
Obrázek 17: Rovnovážený diagram Al – Si a typické strukturní složení dle obsahu Si [2] .	32
Obrázek 18: Graf ukazující směr produkce hliníkových slitin [5]	34
Obrázek 19: Savenův diagram příčin vzniku vad na odlitcích při tlakovém lití [19].....	36
Obrázek 20: Kapilární zkouška [15]	37
Obrázek 21: Zkouška ultrazvukem [16]	38
Obrázek 22: Ingoty materiálu HSM materiálu	42
Obrázek 23:Tavící pec Hindenlang, vsázka a tavenina	43
Obrázek 24: Předehřev přepravní pánve a plnění taveninou	44
Obrázek 25: Odplyňovací přístroj FOSECO FDU Mark 100 MTS 1500	45
Obrázek 26: Umístění pánve pod rotor odplyňovacího zařízení a vyplavené nečistoty	46
Obrázek 27: Postup měření indexu hustoty taveniny	47
Obrázek 28: Automatické vyhodnocení indexu z naměřených hodnot	48
Obrázek 29: Analyzátor kovů ARL 3460 vícekanálový optický emisní spektrometr	49
Obrázek 30: Zkušební vzorek	50
Obrázek 31: Výsledky spektrální analýzy ze vzorku odebraného z tavící pece	51
Obrázek 32: Výsledky spektrální analýzy ze vzorku odebraného z udržovací pece	51

Obrázek 33: Předepsaná norma daných prvků pro HSM Magsimal 59 – AlMg5Si2Mn.....	51
Obrázek 34: Schéma stroje pro vysokotlaké lití odlitků.....	52
Obrázek 35: Diagram plnění formy z obrazovky licího stroje	54
Obrázek 36: Dávkování taveniny keramickou naběračkou z udržovací pece	55
Obrázek 37: 3D model formy	56
Obrázek 38: Temperační zařízení TOOL - TEMP TT-388	57
Obrázek 39: Schéma zapojení temperačních a chladících okruhů formy.....	58
Obrázek 40: Ostřík – PSM4F Vertical 2500 Horizontal 2500 a PC 2Smart Control	59
Obrázek 41: Detail formy a upnutí ve stroji	60
Obrázek 42: Robotické pracoviště, pozice chlazení odlitku, ovládací panel s programem robota	61
Obrázek 43: Robotické pracoviště, pozice vyjímání odlitku a pozice chlazení odlitku, ovládací panel s programem robota a „skluzavka“	61
Obrázek 44: Ohraňovací lis a založení odlitku do řezu	62
Obrázek 45: Odlitek včetně přetokových a vtokových částí	63
Obrázek 46: Finální odlitek po oříznutí.....	63
Obrázek 47: Umístění odlitku v automobilu.....	64
Obrázek 48: Hlavní kontrolované zóny na odlitku.....	65
Obrázek 49: Rentgen Seifert DP 419.....	66
Obrázek 50: RTG snímek 1	66
Obrázek 51: RTG snímek 2	67
Obrázek 52: RTG snímek 3	67
Obrázek 53: Příklad pro tahové zkoušky ProLine Fmax 5-100 kN	68
Obrázek 54: Řezání zkušebních vzorků.....	68
Obrázek 55: Razník a matrice na výrobu zkušebních tyčinek.....	69
Obrázek 56: Laboratorní broušící zařízení pro výrobu zkušebních tyčinek.....	69
Obrázek 57: Rozměry zkušební tyčinky	70
Obrázek 58: Graf s průběhy zkoušek daných zkušebních tělísek.....	72
Obrázek 59: Nýtovací zkouška	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Informativní mechanické vlastnosti slévárenských hliníkových slitin [6]	27
Tabulka 2: Požadavky na odlitek – RTG zkouškou	65
Tabulka 3: Výsledky tahové zkoušky	71