

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

Tomáš Sopr



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sopr** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466638**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Faktory ovlivňující kvalitu tlakově litých odlitků

Název bakalářské práce anglicky:

The factor influence on the quality of high pressure die casting

Pokyny pro vypracování:

1. Parametry technologie tlakového lití
2. Vady tlakově litých odlitků
3. Experimentální část - vyhodnocení kvality odlitku

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

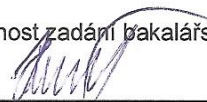
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

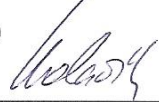
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


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


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



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Faktory ovlivňující kvalitu tlakově litých odlitků** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne

.....

Tomáš Sopr

Poděkování

Tímto děkuji panu doc. Ing. Aleši Hermanovi Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti KSM Castings a to hlavně technologickému a vývojovému oddělení za poskytnuté materiály a konzultace.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologií vysokotlakého lití odlitků ze slitin hliníku a optimalizací licích parametrů a geometrií, které ovlivňují výslednou kvalitu dílů. Teoretická část popisuje základní rozdělení metod vysokotlakého lití, konstrukci strojů a forem, metalurgii slévárenských slitin a dále se pak věnuje faktorům, které ovlivňují výslednou kvalitu dílů a vadám, které při odlévání vznikají. Experimentální část je zaměřena na optimalizaci odlitku krytu převodovky, který vyrábí pro Mercedes-Benz slévárna KSM Castings v Hrádku nad Nisou a u kterého byla zjištěna vysoká porozita. Cílem této práce je navrhnout úpravy v simulačním softwaru Magma, které by vedly ke snížení zmetkovitosti dílu. Výsledkem práce je navrhnutí úprav a zhodnocení vlivu parametrů na výslednou kvalitu odlitku.

Klíčová slova:

Tlakové lití, slitiny hliníku, optimalizace výroby tlakového odlitku, tlaková forma, vady odlitků

Abstract

This bachelor thesis deals with the technology of high pressure die casting as well with casting parameters and geometry optimization, which influence the final casting quality. The theoretical part describes the basic distribution of methods used in high pressure die casting, die and machine design, the metallurgy of alloys and also its defects that can occur on final cast product. The experimental part focuses on optimization of gearbox cover (manufactured in KSM Castings in Hrádek nad Nisou for Mercedes-Benz). On this casting was found a high amount of porosity defects. The aim of this thesis is to suggest modifications in simulation software Magma, which would lead to reduction of scrap rate on this product. The outcome is an evaluation of the impact of external factors and modification recommendation for casting parameters and geometry.

Keywords:

Pressure casting, aluminum alloys, pressure cast product optimization, hpdc die, casting defects

Obsah

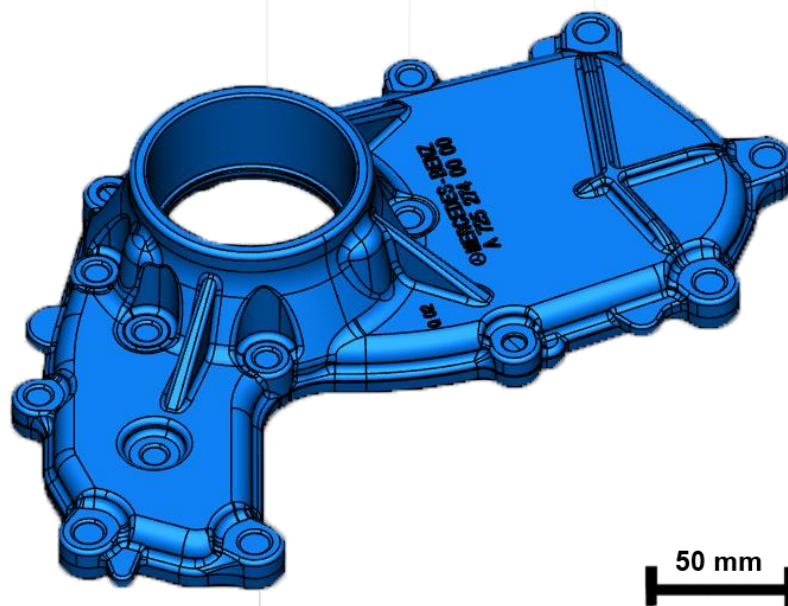
1	Úvod	8
1.1	Cíl práce.....	8
2	Parametry technologie vysokotlakého lití	9
2.1	Technologie vysokotlakého lití	9
2.1.1	Dělení vysokotlakého lití	9
2.1.2	Klasické vysokotlaké lití	9
2.1.3	Metoda Squeeze Casting (krystalizace pod tlakem).....	11
2.1.4	Odlévání v polotekutém stavu.....	12
2.1.5	Výběr stroje pro lití do formy	13
2.2	Formy pro vysokotlaké lití	13
2.2.1	Části formy	14
2.3	Licí parametry ovlivňující kvalitu	17
2.3.1	Typ slitiny	17
2.3.2	Udržování teploty pece a licí teplota.....	17
2.3.3	Rychlost pístu a dotlak	17
2.3.4	Délka cyklu	19
2.4	Metalurgie slévarenských materiálů	19
2.4.1	Požadované vlastnosti na slévané materiály	19
2.4.2	Slévárství hliníku.....	20
2.4.3	Značení slitin hliníku.....	21
3	Vady tlakově litých odlitků	22
3.1.1	Identifikace vad	23
3.1.2	Porozita.....	24
3.1.3	Trhliny	24
3.1.4	Nedolití, nezaběhnutí	24
3.1.5	Vady způsobené chybami v dělicí rovině.....	24
3.1.6	Studené spoje.....	24
3.1.7	Vady povrchu	25
3.1.8	Vady způsobené vnějšími vlivy	25
3.2	Hledání a řešení příčin ovlivňující kvalitu tlakového lití	25
3.3	Simulační numerické softwary	26
4	Experimentální část	28
4.1	Analýza stávajících problémů	29
4.2	Simulace lití.....	29
4.2.1	Vyhodnocení simulace lití.....	31
5	Závěr.....	37

Seznam ilustrací	38
Seznam tabulek	39
Přílohy	40
Příloha 1: Ishikawa diagram tlakového lití	40
Příloha 2: Parallel Cordinates pro varianty s nejlepší porozitou	41
Příloha 3: Parallel Cordinates graf pro varianty s nejlepším AE End Max.....	42
Bibliografie.....	43

1 Úvod

Technologie vysokotlakého lití patří k nejpoužívanějším technologiím odlévání hliníku. Počátky vysokotlakého lití se datují do 19. století. Nejprve byly využívány pouze stroje s teplou lící komorou, ty však nebyly tak vhodné pro odlévání kovů s vyšší teplotou tavení. V tehdejší Československu tak dochází k převratnému objevu Ing. Poláka, a to je stroj se studenou lící komorou. Postupem času se odlévání vysokotlakým litím se studenou vertikální lící komorou stává nejvyužívanější technologií pro lití hliníku. Hlavním důvodem je vysoká přesnost odlitků, a s tím související úspora času a nákladů, jelikož nejsou potřeba následné dokončovací operace. Dalšími výhodami je vysoká produktivita práce a velmi dobré mechanické vlastnosti odlitku. Naopak velkou nevýhodou této technologie jsou vysoké pořizovací náklady na stroje a nástroje. Z důvodu rychlých výrobních cyklů navíc dochází často k vadám na odlitku jako jsou pórovitost, staženiny, nedolítí a podobně. Z důvodu minimalizace nákladů a zmetkovitosti dílů je třeba sledovat a dobře stanovit lící parametry i dbát na správnou konstrukci tlakové formy. Tyto vlastnosti tuto technologii předurčují pro využití ve velkosériové výrobě, a to v automobilovém, elektronickém nebo potravinářském průmyslu.

Tyto problémy se řeší i pro odlitek krytu převodovky ve firmě KSM Casting v Hrádku nad Nisou, který vyrábí pro Mercedes-Benz. Jelikož jde o kus vyráběný ve velké sérii, je kladen důraz na co nejmenší počet zmetků z důvodu velkých finančních úspor při snížení zmetkovitosti. Mezi hlavní vady tohoto odlitku patří pórovitost.



Obrázek 1.1: Řešený odlitek krytu převodovky

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je analyzovat faktory, které mají vliv na výslednou kvalitu odlitků, a následné použití těchto teoretických poznatků pro optimalizaci lití daného dílu a návrhí úpravy parametrů pro snížení zmetkovitosti odlitku za pomoci numerické simulace v programu Magma. Optimální parametry by měli být navrženy tak, aby nebyly nákladné, ale zároveň byly dostačující pro snížení zmetkovitosti.

2 Parametry technologie vysokotlakého lití

2.1 Technologie vysokotlakého lití

Technologie vysokotlakého lití patří k přesným technologiím lití. Výrobky vzniklé touto technologií mají vysokou přesnost, vzniká čistý povrch a odlitek má dobré mechanické vlastnosti v porovnání s ostatními technologiemi slévání, proto je potřeba méně následných obráběcích operací. Odlévání za vysokého tlaku se využívá nejvíce na slitiny lehkých kovů, dominujícími jsou slitiny hliníku, zinku, mědi a hořčíku. Nároky na kvalitu povrchu a nákladnost technologie s sebou nesou vysoké požadavky na správnou volbu licích procesů a výběr vhodné technologie vysokotlakého lití. Pro snížení porozity a vyšší kvalitu výrobku je možné odlévat ve vakuu, či využívat dotlaku nebo moderních licích metod. [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7]

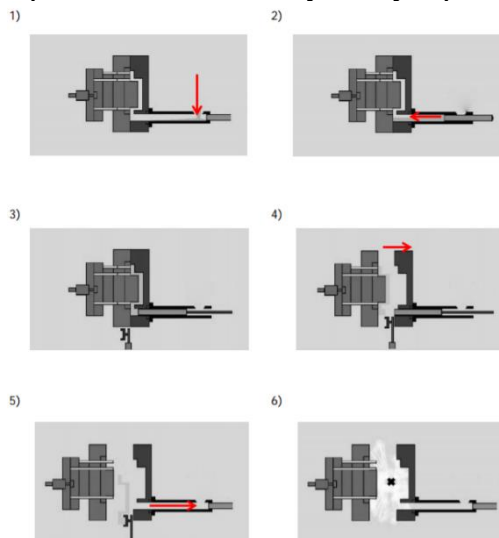
2.1.1 Dělení vysokotlakého lití

Vysokotlaké lití se dělí do několika skupin [1]

1. Klasické
 - Stroje s teplou licí komorou
 - Stroje se studenou licí komorou
2. Squeeze Casting
3. Odlévání v polotekutém stavu

Všechny výše zmíněné druhy tlakového lití mají podobný pracovní cyklus. [8]

1. Uzavření lisu a sjetí obou polovin formy k sobě
2. Vstříknutí kovu do dutiny formy
3. Tuhnutí
4. Otevření lisu a odjetí pohyblivé poloviny formy
5. Vyhození dílu
6. Vrácení vyhazovacího paketu a nástřik dutiny formy separační kapalinou



Obrázek 2.1: Schéma pracovních cyklů stroje se studenou licí komorou [8]

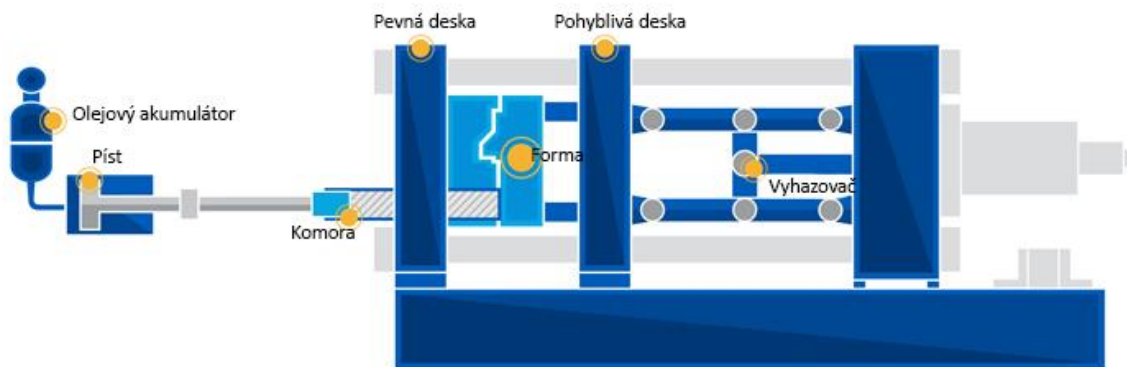
2.1.2 Klasické vysokotlaké lití

První skupinou je technologie klasického konvenčního vysokotlakého lití. Hlavními důvody, proč se tato technologie v převážné většině sléváren stále využívá, je vysoká produktivita práce, přesnost, kvalitní povrch odlitku a možnost takto odlévat i tenkostěnné profily. Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena strojů. Dále jsou popsány jednotlivé konvenční

technologie a jejich základní principy. Dnes se klade důraz primárně na celkovou automatizaci procesu, proto se využívají stroje s CNC řízením provozu. [1; 6; 9]

2.1.2.1 Stroje se studenou lící komorou

V dnešní době je lití se studenou lící komorou nejvíce využívanou vysokotlakou lící technologií. Tavní komora se nachází mimo stroj a tavenina je dávkována pomocí dávkovače (dříve lžice) do plnicí komory před píst, který se po naplnění dávkou rozjede do dolní úvratě a natlačí taveninu do formy. Ve stávajících strojích se využívá nalévacích kanálů místo lžice, z důvodu uspořené času a přesnějšího dávkování materiálu. Kanál je veden z pece přímo do komory. Poté dochází k natlačení kovu do dutiny formy. Dále je aplikován dotlak, dokud nedojde ke ztuhnutí taveniny. Poté se forma otevře a odlitek se vyhodí pomocí vyhazovačů. Proces se poté znovu opakuje

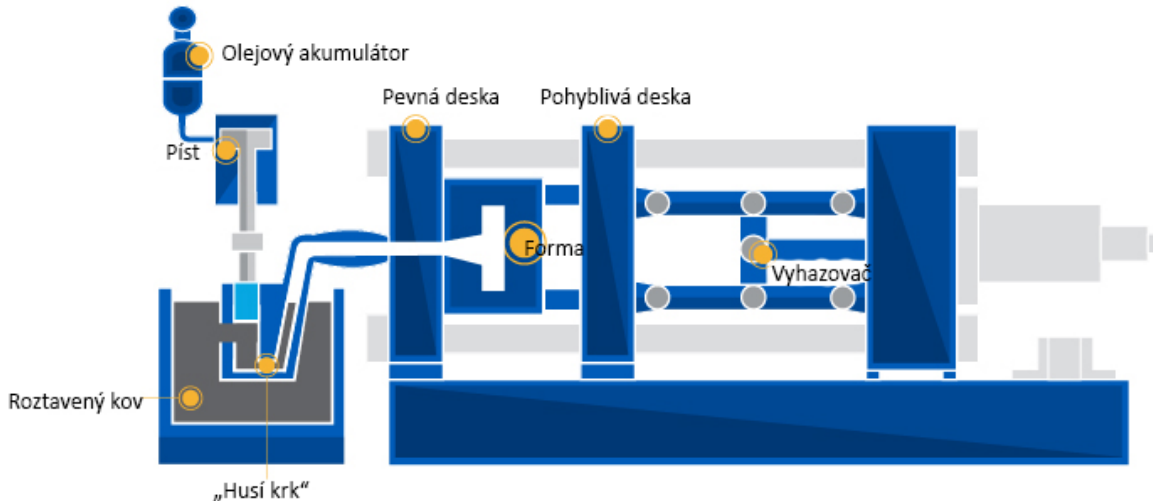


Obrázek 2.2: Schéma stroje se studenou lící komorou [10]

Hlavní výhodou této technologie je, že dochází k menšímu teplotnímu namáhání pístu a lze takto odlévat i kovy s vysokou teplotou tavení. Proces bývá však pomalejší z důvodu dávkování kovu z pece. [1; 5; 10; 11]

2.1.2.2 Stroje s teplou lící komorou

Druhým typem jsou stroje s teplou lící komorou, které se využívají pro nízkotavitelné kovy, dnes se používají hlavně zinkové slitiny. Hlavním znakem těchto strojů pro vysokotlaké lití je, že tavní pec je součástí lícího stroje. Tavný kov je tlačěn přímo z pece do formy, buď pomocí pístu, nebo pomocí tlakového vzduchu, který se využívá u novějších strojů. Píst nebo tlakový vzduch nechá otevřený otvor pro nasátí taveniny. Poté se píst začne posunovat a tím vyvíjí tlak na taveninu, která byla v plnicí komoře. Tímto pohybem píst uzavře plnicí otvor, tudíž nedochází k dalšímu plnění taveninou viz obrázek 2.3. Když se naplní forma taveninou tak píst zůstává pod tlakem, dokud nedojde ke ztuhnutí taveniny. Poté je forma otevřena a pomocí vyhazovačů je odlitek uvolněn z formy. Píst putuje do horní úvratě, tím se znovu otevře otvor pro taveninu a celý proces se opakuje.



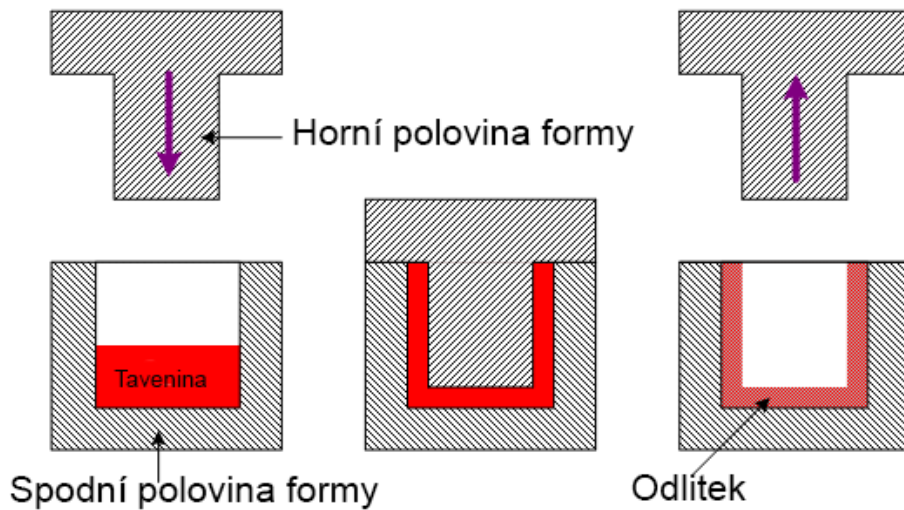
Obrázek 2.3: Schéma stroje s teplou lící komorou [12]

Výhody u strojů s teplou lící komorou jsou vyšší produktivita práce než u strojů se studenou lící komorou, pro materiály s nízkou teplotou tavení. Další výhodou je, že není potřeba tak vysokých tlaků oproti technologii se studenou lící komorou. Nevýhodou je možnost použití pouze pro nízkotavitelné kovy a také vysoké teplotní namáhání pístu, protože je neustále pod vysokou teplotou. [1; 5; 13]

2.1.3 Metoda Squeeze Casting (krystalizace pod tlakem)

Squeeze Casting je metoda tlakového lití, která využívá i výhod tváření (krystalizace pod tlakem). Jedná se o technologii lití, která se začíná využívat z důvodu zlepšení mechanických vlastností oproti klasickému vysokotlakému odlévání. Větší tvrdost a pevnost, lepší povrch. K tváření může docházet místně nebo celkově, podle toho, jak je navržena forma a kde je potřeba zpevnit odlitek. Můžeme potom odlévat odlitky složitých tvarů s např. rozdílnou tloušťkou stěn, kde by jinak docházelo k tepelným uzlům a staženinám. Principem je, že se nalije požadované množství taveniny do formy a za velkých tlaků (možno i za vakua) se uzavře. Uzavření pod vysokými tlaky, trvá až do úplného ztuhnutí taveniny. Squeeze casting můžeme rozdělit na dva typy. U prvního typu se nalije kov na jednu část formy a druhou částí se stlačí (viz obrázek 2.4). Tím dojde k tvarování kovu podle tvaru obou částí forem. Při tomto procesu se stlačuje polotuhý materiál, tudíž tento proces je z části tváření a z části odléváním. Druhý typ je v podstatě stejný jako klasické tlakové lití se studenou komorou, jen se zde využívá menších vstřikovacích rychlostí, a tudíž kov začíná tuhnout již dříve, než úplně vyplní formu. Poté je velkým dotlakem docíleno vyplnění formy polotekutým materiálem. Squeeze efektu lze využívat i lokálně, a to vyvozením tlaku na část odlitku, kde chceme mít vyšší pevnost. Tlakem se mění struktura zrna materiálu, a tak dochází ke zpevňování.

Squeeze casting



Obrázek 2.4: Princip Squeeze Castingu [14]

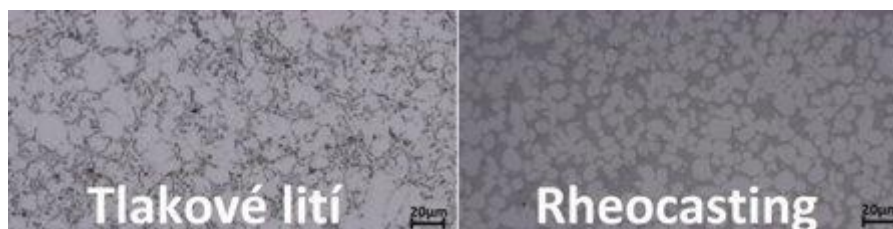
Mezi výhody této technologie patří homogenita a nízká pórovitost materiálu a vzniklá jemnozrná struktura. Nevýhodami jsou vysoké nároky na formu, energetická náročnost a delší délka cyklu. [7; 14; 15]

2.1.4 Odlévání v polotekutém stavu

Technologie lití semisolid, neboli odlévání v polotekutém stavu, je nejmodernější technologie slévání. Tato technika se podobně jako squeeze casting využívá, protože kombinuje výhody tváření a slévání. Jako výchozí surovina se používá materiál v kašovitém tvaru. Teplota se liší podle zvoleného procesu. Nižší teplota lití zaručí menší turbulentnost proudění kapaliny při lití, a tudíž méně porézní odlitek s větší homogenitou. Materiál v peci bývá promícháván pro vytvoření příznivější struktury pro užité vlastnosti (globulární struktura, více jemnozrná) viz obrázek 2.5. Probíhá tzv. rušená krystalizace. Poté se polotuhá vsázka vsadí do lisu, kde je materiál napěchován do formy a po zchlazení vyjmut. Odlévání v polotekutém stavu můžeme dále rozdělit podle druhu materiálu, respektive teploty, kterou využíváme v daném procesu. Hlavní využití nachází tato technologie v automobilovém průmyslu. Například na výrobu bloků motorů.

- Rheocasting
Materiál se nachází u teploty tuhnutí.
- Thixoforming
Materiál se nachází mezi teplotou solidu a likvidu. Je tekutější oproti Rheocastingu.

Mezi hlavní výhody patří velmi dobrá struktura materiálu a lepší materiálové charakteristiky naopak z důvodu vyšších tlaků potřebujeme lepší a zároveň nákladnější stroje a formy. Další nevýhodou je celková složitost procesu. [16; 17; 18]



Obrázek 2.5: Rozdíl struktury Rheocasting oproti konvenčnímu tlakovému lití [17]

2.1.5 Výběr stroje pro lití do formy

Určení vhodného stroje závisí na materiálu, na velikosti a tvaru odlitku a množství potřebného materiálu pro odlitek a také potřebné uzavírací a otevírací síle stroje. Uzavírací síla je síla, kterou stroj tlačí pohyblivou část formy na pevnou. Tím je zabráněno prostříku taveniny do dělicí roviny nebo i ven z formy. Vypočítá se viz vzorec č.1. Otevírací síla je vlastně dotlak násobený plochou odlitku a vypočítá se viz vzorec č.2. [19; 20]

$$F_u = \frac{F_L}{S_L} \cdot S \cdot k_0 \quad (1)$$

$$F_o = \frac{F_L}{S_L} \cdot S \quad (2)$$

F_u ... uzavírací síla [N]

F_o ... otevírací síla [N]

F_L ... lisovací síla [N]

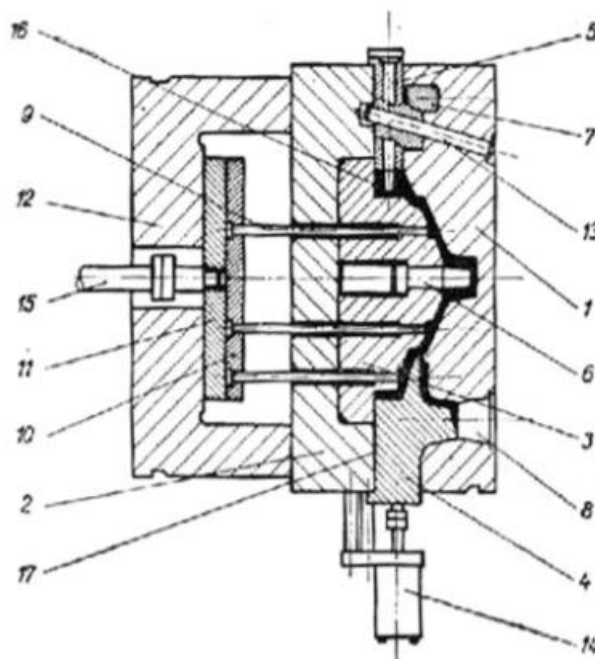
k_0 ... koeficient bezpečnosti

S ... plocha průmětu výpadu do dělicí roviny [m²]

S_L ... plocha komory [m²]

2.2 Formy pro vysokotlaké lití

Tato kapitola se bude zabývat pouze formami pro klasické konvenční vysokotlaké lití hliníkových slitin s horizontální studenou komorou. Kvalita odlitků odpovídá a úzce souvisí s kvalitou formy. Forma musí být přizpůsobena pro dané lící podmínky, aby výsledná kvalita odlitku odpovídala požadavkům. Formy jsou vysoce namáhány tlakově i teplotně, proto se musí vybírat kvalitní materiály, které tyto podmínky vydrží co nejdéle a nemusí se tolik měnit. Zároveň by měli být dobře obrobitelné, z důvodu složitých tvarů forem. Dále je požadavek na prokalitelnost a vysokou mez kluzu a mez pevnosti. Ideální materiál by měl být teplotně vodivý, aby byl schopen odvádět teplo z odlitku a zároveň by měl mít malou teplotní roztažnost, aby držel požadované rozměry odlitku a nezměnily se rozměry s ohledem na teplotu. Také by měl držet rozměrovou stálost při tepelném zpracování, které je nutné s ohledem na životnost provádět. V neposlední řadě by měl být odolný proti nalepování. Na součásti formy, které jsou méně namáhané, postačí nástrojová ocel například ČSN 419550. Na namáhané části (vyhazovače, razníky, vodící lišty, dorazy) použijeme vysokolegované materiály pro práci za tepla příkladem ČSN 419554, 419552 a další. Části formy, mimo temperační a chladicí systém, jsou popsány na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Dělení formy [19]

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 1...pevná polovina formy | 10...vodící deska vyhazovačů |
| 2...pohyblivá polovina formy | 11...opěrná deska vyhazovačů |
| 3...vložka v polovině formy | 12...upínací skříň formy |
| 4,5...jádro pohyblivé | 13...šikmý kolík |
| 6...jádro pevné | 14...hydraulický tahač jádra |
| 7...kalená opěrná vložka zámku jádra | 15...středový čep vyhazovačů |
| 8...dutina pro plnicí komoru | 16...dutina formy |
| 9...vyhazovač odlitku | 17...dělicí rovina forma |

Výroba forem je velmi náročná z důvodu nároků na přesnost a tvarovou diverzitu. Také obráběné materiály jsou velmi pevné a z toho důvodu náročné na obrábění. Výroba forem je velmi nákladná a odvíjí se od ní celková kvalita výrobku. Některé části formy jako jsou vyhazovače, vodící lišty a podobně se dají pořídit jako normalizované kusy. Horší je to s tvarovými vložkami. Jsou velmi tvarově členité, tudíž se v hojné míře využívá víceosých moderních CNC strojů. Namáhané části se dále povlakuji (PVD, CVD), z důvodu lepší odolnosti proti teplotě, otěru či erozi. Dále se některé části formy zakalují, z důvodu nároků na vyšší tvrdost. [8; 19; 20]

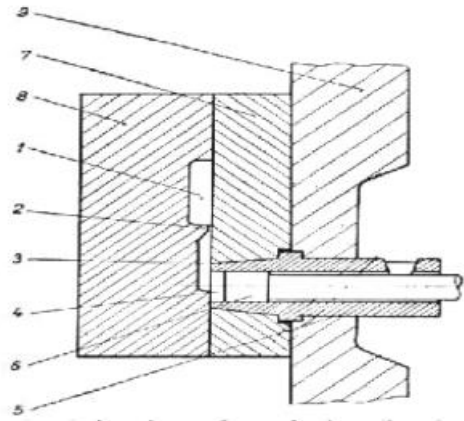
2.2.1 Části formy

Hlavními částmi formy jsou pohyblivé a pevné poloviny. Pohyblivá polovina je při uzavření formy přitisknuta na pevnou. Na pevné části je vložka, která je z odolnějšího materiálu, aby měla vyšší trvanlivost. Poté ve formě mohou být jádra, která slouží k vytvoření dutin nebo tvarových složitostí, které by bránili rozevření formy, či vytažení odlitku. Nutností pro vyjmutí ztuhlého odlitku z otevřené formy jsou vyhazovače. Slouží k vyhození odlitku z dutiny formy. [8; 19; 20]

2.2.1.1 Vtoková soustava

Forma tvoří dutinu, která se skládá ze samotného odlitku, vtokové soustavy a odvodu vzduchu. Hlavní funkcí vtokové soustavy je dovést kov z plnicí komory do tvarové dutiny pro odlitek. Mezi další funkce patří regulace tlaku a rychlosti plnění, udržování proudu kovu v pohybu a také odvodu vzduchu formy.

- 1...dutina formy
- 2...vtokové naříznutí
- 3...vtokový kanál
- 4...zbytek v plnicí komoře
- 5...plnicí komora
- 6...píst
- 7...pevná polovina formy
- 8...pohyblivá polovina formy
- 9...upínací plocha, tj. pevný třmen

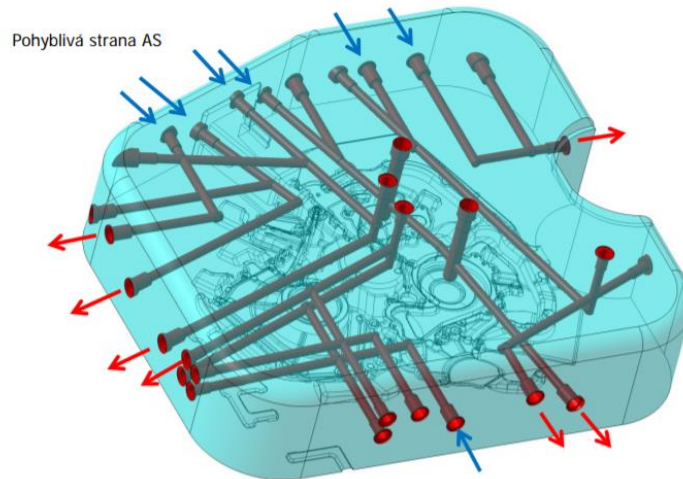


Obrázek 2.7: Konstrukce formy [19]

Požadavky na vtokovou soustavu jsou kladeny tak, aby zajistily správné vyplnění dutiny a aby nedocházelo k předčasnému opotřebení formy, a dále aby nevznikaly víry způsobující uzavírání vzduchu v tavenině a zabránilo se tak vzniku nežádoucích vad. Připojení vtokové soustavy do těla formy se navrhuje s ohledem na potřebný tlak a plnicí rychlost a čas za který je potřeba dutinu formy zaplnit. Optimální rychlost pro hliníkové slitiny se pohybuje mezi 30-40 m/s. Velikost vtokového naříznutí je navrhována pro co nejmenší rychlost proudu slitiny, při které je ještě možno dosáhnout dobrého vyplnění formy. Čím větší je totiž rychlost, tím více dochází k opotřebení formy, tvoření vírů a uzavření plynů ve formě. Také se přes větší vtokové naříznutí lépe docílí správného dotlaku. [8; 19; 20]

2.2.1.2 Temperační a chladicí systém

Jakost odlitku a trvanlivost formy velice závisí na teplotní stabilitě té které formy (viz kapitola 3), proto je nutné zajišťovat temperování a zároveň chlazení odlitku. Forma by měla vydržet okolo 120 000 cyklů [8]. Proto mají rámy formy v sobě navrtané kanálky, v kterých může proudit temperační médium (oleje) nebo chladicí médium (olej nebo voda), aby se omezilo teplotní namáhání formy, ale zároveň se dosáhlo vysoké produktivity. Příklad chladicího systému u pohyblivé části formy na obrázku 2.8.



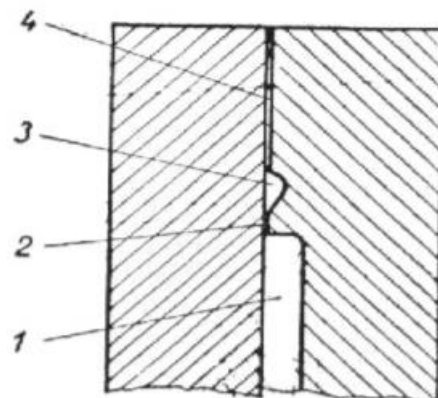
Obrázek 2.8: Temperační a chladicí systém pohyblivé strany formy [8]

Doporučená teplota temperace pro slitiny hliníku je 180-300 °C [8]. Nejvíce je potřeba temperovat funkční části forem, a hlavně místo vtoku, protože tuhne jako poslední, a čím déle tuhne, tím se prodlužuje délka cyklu. Temperační systém v určitých částech cyklu (plnění komory) funguje jako chlazení naopak v jiných částech cyklu (otevření formy) temperuje, aby měly funkční části stále stejnou teplotu. Teplota v temperačním systému se po celou dobu cyklu nemění. [8; 19; 20]

2.2.1.3 Odvzdušňovací soustava

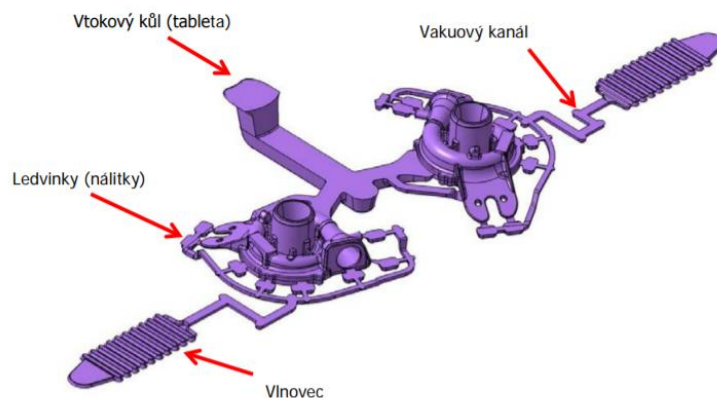
Aby při plnění nedocházelo k uzavírání vzduchu v dutině formy, musí se odvádět odvzdušňovacími kanály, které jsou většinou umístěny v dělicí rovině formy. Ty by měly v ideálním případě být zaplněny kovem až jako poslední, aby nedošlo k uzavření vzduchu v dutině. Ideálně by se tavenina neměla tříštit o stěny ani vířit, protože pak se vzduch uzavírá do taveniny a vzniká pórovitost. Průřezy kanálu se pohybují do 0,1 mm. Snažíme se, pokud to jde, tuto hodnotu nepřekračovat a spíš aplikovat větší počet kanálků.

- 1...dutině formy
- 2...spojovací kanál
- 3...odvzdušňovací jamka
- 4...odváděcí (odvzdušňovací) kanál



Obrázek 2.9: Odvzdušňovací soustava [19]

Zvláštní metodou odvzdušňování je vakuové lití. K odvzdušňovacím kanálům je připojena vývěva a forma musí být upravena tak, aby nedocházelo k nasátí materiálu do vývěvy. To se může řešit pomocí vlnovců viz obrázek 2.10. Docílení odčerpání vzduchu z formy lze také docílit tzv. komínovým efektem, kdy vzduch přechází z dutiny formy, kde je vyšší teplota (200-280 °C) do studenější odvzdušňovací soustavy (vlnovec se chladí vodou na cca 18 °C) a tím je docíleno odčerpání vzduchu. [8; 19; 20]



Obrázek 2.10: Vtoková soustava s vlnovci [8]

2.3 Licí parametry ovlivňující kvalitu

Mimo správně navrženou formu je dalším hlavním faktorem zvolení správných parametrů lití, proto je nutné tyto parametry sledovat a také znát co který parametr ovlivňuje. Mezi nejdůležitější parametry patří:

2.3.1 Typ slitiny

Začínáme se zvolením složení slitiny. Jak je zmíněno v kapitole 2.4, každá slitina se hodí pro jinou aplikaci. Typ slitiny ve velkém množství případů volí cílový zákazník, tudíž slévárna většinou nemůže ovlivnit, jaký typ slitiny se pro daný odlitek použije. Slitinu volí zákazník podle rozměrů, členitosti odlitku a materiálových parametrů potřebných pro následné použití. Mezi hlavní vlastnosti, které se u slitin sledují, kromě materiálových parametrů, jsou zabíhavost, korozní odolnost, plastické vlastnosti, předpoklady pro vznik trhlin, pevnost, tažnost a tvrdost. [6; 21]

2.3.2 Udržování teploty pece a licí teplota

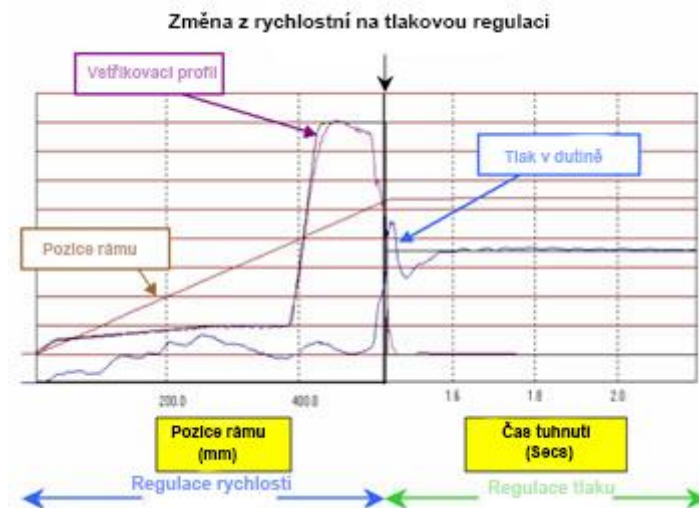
S typem slitiny souvisí licí teplota, které je nutné dosáhnout pro natavení kovu. V dnešní době se nejvíce využívají pece odporové. Teplota v peci se odvíjí od teploty tání slitiny. Volí se teplota s ohledem na rozměry formy a plnicí čas formy, avšak je nutné dávat pozor, aby se kov nenatavil příliš a nezačalo docházet k nežádoucí oxidaci a nezačala degradace slitiny. Také by teplota v peci měla být co nejvíce rovnoměrná, proto se slitina v některých pecích promíchává. Teplota taveniny v pecích se u hliníku pohybuje mezi 620-730 °C a závisí na přesném složení slitiny a ztrátách na daném výrobku. U strojů se studenou licí komorou, která se využívá u lití hliníku, se musí počítat se ztrátou teploty při dávkování kovu do komory, která se pohybuje od cca 50 °C v závislosti na způsobu dávkování. [6; 21]

Tento parametr úzce souvisí s teplotou pece. Licí teplota se odvíjí od materiálu, jeho zabíhavosti, velikosti odlitku, jeho tvarové složitosti a potřebné licí době pro naplnění dutiny. Je snaha, aby teplota byla co nejnižší, ale splňovala výše zmíněné požadavky. Licí teplotu volíme pro určité podmínky (teplotu formy, velikost odlitku), které se snažíme dodržet a vyloučit tak okolní vlivy. Proto se udržuje konstantní teplota okolí a temperuje se forma. Abychom měli stálou teplotu lití, je nutno natavený materiál udržovat v udržovacích pecích. [6; 21]

2.3.3 Rychlost pístu a dotlak

Po nalití dostatečně teplého kovu do komory se píst začne pomalu posouvat a uzavře otvor pro plnění komory. Rychlost pístu v této fázi je nízká, aby nedošlo k vystříknutí kovu z plnicího otvoru. Rychlost se pohybuje okolo 0,3 m/s. V této fázi by mělo být docíleno vytlačení vzduchu

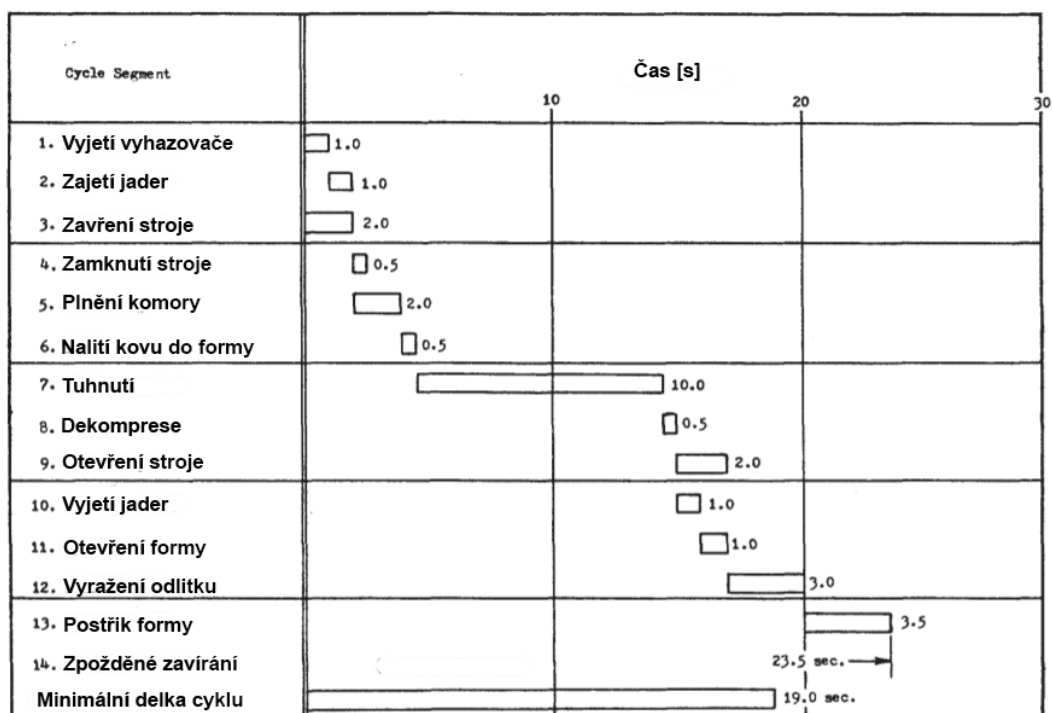
z licí komory. Poté píst přechází do fáze, kdy rychlost prudce zrychlí. Dosahuje se zde rychlosti 3-12 m/s nejčastěji ale okolo 4-5 m/s. Je-li rychlost příliš malá, může docházet k vadám jako jsou studené spoje či nedolití. Naopak je-li rychlost příliš velká, dochází k vyššímu opotřebení formy, anebo k vírům v tavenině, které mohou zapříčinit pórovitost. Na konci cyklu dochází k dotlaku, kdy se píst neposouvá pouze působí silou na tuhnoucí odlitek. To snižuje pórovitost odlitku. Tlak závisí na velikosti tablety, na kterou píst působí. Snažíme se mít větší tabletu pro lepší docílení dotlaku. Rychlost ovlivňuje délku plnění. Graf rychlosti a tlaku v závislosti na čase, kde jsou znázorněny fáze pohybu a dotlaku, je na obrázku 2.11. [6; 21]



Obrázek 2.11: Graf závislosti rychlosti a tlaku na čase při plnění formy [22]

2.3.4 Délka cyklu

Délkou cyklu je myšlen čas od uzavírání formy po znovuotevření po odlití dílu a následném nástřiku dutiny. Délka jednotlivých operací je znázorněna na obrázku 2.12. Od délky cyklu se odvíjí produktivita a čím více je proces automatizovaný, tím kratšího cyklu docílíme. [6; 21]



Obrázek 2.12: Fáze licího cyklu v závislosti na čase [25]

2.4 Metalurgie slévárenských materiálů

Materiály pro odlévání musí mít dobré slévárenské vlastnosti, ale zároveň musí splňovat nároky na požadované parametry (pevnost, tvrdost, ...). V neposlední řadě by měly tyto parametry splňovat za co nejmenší cenu, abychom mohli snížit celkové náklady. [23]

2.4.1 Požadované vlastnosti na slévané materiály

Vlastnosti slévárenských materiálů lze dělit na slévárenské a technologické. Jako první budou zmíněny vlastnosti slévárenské. U slitin pro lití se snažíme dosáhnout co nejlepších slévárenských vlastností, abychom minimalizovali vznik vad ve finálním odlitku. První vlastností je zabíhavost, která ovlivňuje, jak je materiál schopen vyplnit dutinu formy. Tuto vlastnost ovlivňuje interval tuhnutí. Pokud má slitina úzký interval tuhnutí (eutektické slitiny), má lepší zabíhavost. Naopak slitiny se širokým pásmem tuhnutí mají špatnou zabíhavost. Tato vlastnost se sleduje, protože při špatné zabíhavosti by mohlo dojít ke špatnému vyplnění formy, a tudíž vadnému odlitku. Dále se sleduje sklon k naplynění, tedy jak moc jsou plyny rozpustné v tekutém stavu. Tato vlastnost ovlivňuje porozitu materiálu. Další ze sledovaných vlastností je pak tavitelnost, tedy potřebné teplo k natavení materiálu a přechodu z pevného skupenství do tekutého při zachování chemického složení jako poslední je zmíněna odolnost proti vzniku trhlin a prasklin. Zde se jedná o vlastnost velmi důležitou u odlitků s rozdílnými tloušťkami stěn. [1; 5; 24]

Druhou skupinou jsou technologické vlastnosti. Snažíme se dosáhnout co nejlepších vlastností pro následné úpravy a použití. Jako první je zmíněna obrobitelnost, která je velmi důležitá ve fázi dokončování na finální výrobek. Pokud je materiál špatně obrobitelný, zvyšují se náklady na nástroje. Dále by měl být výrobek odolný proti korozi. Při některých aplikacích je žádoucí,

aby byl dobře svařitelný. V neposlední řadě by měl být nepropustný (pro plyn, kapalinu). To souvisí se staženinami, či vměstky, které mohou narušit nepropustnost. [1; 5; 24]

2.4.2 Slévárenství hliníku

Hliník je v čisté formě stříbrnobílý, lehký kov. Jeho hustota je 2698 kg/m^3 [25]. Patří k nejrozšířenějším prvkům v zemské kůře, kde se vyskytuje ve formě oxidu (Al_2O_3). Hliník má oproti ostatním materiálům spoustu výhod, které ho předurčují k velkému využití. Má dobrou slévatelnost, nízkou teplotu tavení, která u čistého hliníku dosahuje $660 \text{ }^\circ\text{C}$ [25]. Další výhodou je malý interval krystalizace, je odolný proti korozi a má dobrou povrchovou stabilitu a nízkou náchylnost k tvorbě trhlin. Je i dobře elektricky vodivý, dosahuje až 60% vodivosti mědi. Avšak čistý hliník se nepoužívá z důvodu nesplnění konstrukčních požadavků jako je mez pevnosti, která se pohybuje okolo 90 MPa [25]. Proto se ve většině případů využívá hliník s přísadovými prvky, které vybíráme s ohledem na požadované vlastnosti výsledného výrobku. Druhy slitin hliníku se dělí podle přísadových prvků. [1; 5; 24; 25]

Slitiny typu Al-Cu (Duraluminium) EN AC – 2XXXX

Obsah mědi se pohybuje většinou okolo 4-5 %. Měď jako příměs zvyšuje pevnost za vyšších teplot a otěruvzdornost. Naopak nevýhodou je horší slévatelnost a korozní odolnost. Jako příklad bych uvedl AlCu4MgTi (4,2-5 % Cu, 0,15-0,35 % Mg, 0,15-0,35 % Ti). Tyto slitiny se využívají hlavně na tváření, ačkoliv najdeme i využití ve slévárenství. [24; 25; 26]

Slitiny typu Al-Si (Siluminy) EN AC – 4XXXX

Obsah křemíku se pohybuje mezi 5-13 %. Aplikuje se tam, kde jsou vysoké požadavky na dobrou slévatelnost a korozní odolnost. Tyto slitiny můžeme rozdělit do tří typů: podeutektické (mají menší obsah, méně než 12 %), eutektické (okolo 12 %) a nadeutektické (více než 12 %). Příklad slitiny je AlSi12Mn (11-13 % Si, 0,1-0,4 % Mn). Tyto slitiny patří ve slévárenství k těm nejrozšířenějším. Dále můžeme tyto slitiny legovat dalšími prvky jako například mědí nebo manganem. [24; 25; 26]

Slitiny typu Al-Mg (Hydronalium) EN AC – 5XXXX

Hořčík v hliníku se aplikuje tam, kde je potřeba velmi dobrá odolnost proti korozi (např. v mořské vodě). Další výhodou je dobrá svařitelnost a taky zlepšená obrobiteľnosť materiálu. Nevýhodou je oxidace hořčíku, při tavení a horší slévatelnost slitiny. Jako příklad bych uvedl AlMg5Si1Mn (4,4-5,35 % Mg, 0,6-1,5 % Si, 0,25-0,6 % Mn). Tyto slitiny také mohou být dále legované pro lepší vlastnosti. [24; 25; 26]

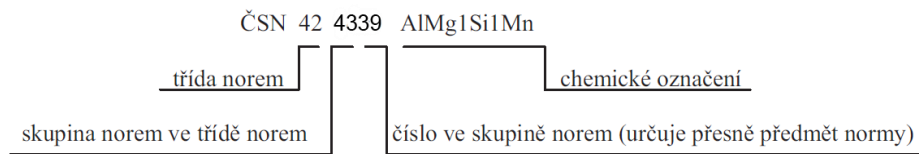
Hodnocení vybraných vlastností slitin dle ASTM (1–nejlepší, 5–nejhorší) [25]

Tabulka 2.1: Hodnocení vybraných vlastností slitin [25]

Slitina	Zabíhavost	Náchylnost ke vzniku trhlin za tepla	Korozní odolnost	Obrobiteľnosť	Povrchový vzhled a možnost povrchových úprav (eloxování)
Al-Cu	2	2	4	3	3
Al-Si	1	3	2	5	2
Al-Mg	5	5	1	1	1

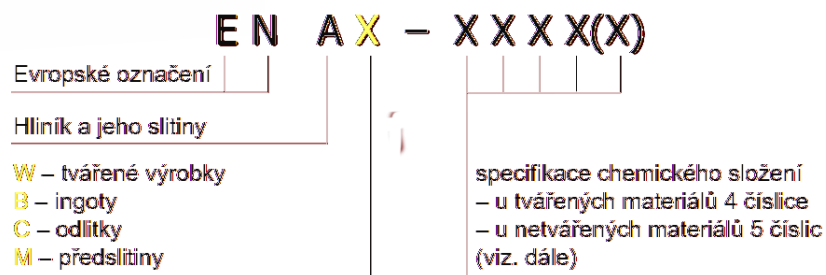
2.4.3 Značení slitin hliníku

Značit materiál můžeme podle více norem. Jako první je zmíněna česká národní norma (ČSN). Značení u ní probíhá šesti číslicemi, nebo pomocí chemického značení viz obrázek 2.13. [25]



Obrázek 2.13: ČSN norma [25]

Další norma je Evropská norma (EN). Značení probíhá viz obrázek 2.14.



Obrázek 2.14: EN Norma [27]

3 Vady tlakově litých odlitků

Za vadu odlitku se považuje odchýlení od rozměrů, hmotnosti, vzhledu, makrostruktury nebo jiné odchýlení od norem. Tyto vady je potřeba identifikovat a napravit a pokud se tak děje opakovaně, je potřeba upravit i celý lící proces. Z tohoto důvodu je nutné lící proces sledovat a snažit se optimalizovat parametry pro daný odlitek. Dále je potřeba navrhovat formu tak, aby se vadám předcházelo (bez ostrých rohů, volba vtokové soustavy, tloušťka stěn) K tomuto účelu se v dnešní době hojně využívá simulačních softwaru, protože si lze proces nasimulovat bez nutnosti spotřeby materiálu a výroby formy. Vady můžeme dělit na opravitelné a neopravitelné a na přípustné pro provoz daných výrobků nebo nikoliv. Vady se dělí a určují podle normy viz tabulka 3.1 a 3.2. [5; 28]

Tabulka 3.1: Dělení vad podle ČSN 42 1240 třídy 100-400 [28]

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu
		120	Chybějící část odlitku s lomem
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar
		140	Nedodržení hmotnosti odlitku
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny
		220	Zálupy
		230	Nárosty
		240	Výronky
		250	Výpotky
		260	Zatekliny
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku
		280	Vady povrchové ochrany odlitku
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny
		320	Praskliny
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu
400	Dutiny	410	Bubliny
		420	Bodliny
		430	Odvařeniny
		440	Staženiny

Tabulka 3.2: Dělení vad podle ČSN 42 1240 třídy 500-700 [28]

500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
		520	Nekovové vměstky
		530	Makrosegregace a vycezeniny
		540	Broky
		550	Kovové vměstky
		560	Nevyhovující lom
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny
		620	Vměstky
		630	Nesprávná velikost zrna
		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka
		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury
700	Vady chemického složení a vlastností odlitku	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku

3.1.1 Identifikace vad

Způsob identifikace vad závisí na jejich poloze (povrchové, vnitřní), velikosti a zřetelnosti. Vady povrchové a pozorovatelné pouhým okem se kontrolují na výstupních kontrolách. Takto prováděná kontrola se nazývá vizuální. Pracovníci provádějící tuto kontrolu musí být proškoleni ohledně přípustnosti vad. U vad, které jsou podpovrchové nebo nejsou na první pohled zřejmé se musí využít jiných metod. Využívá se například kontroly ultrazvukem. Touto metodou se dají zjistit i podpovrchové vady, nebo vady pouhým okem nezřetelné. Dále existuje zkouška kapilární. Ta slouží ke zviditelnění vad. Tato zkouška využívá toho, že je kapalina schopná vniknout do malých otvorů, které vady tvoří. Princip je takový, že nejprve součást ponoříme do kapaliny, poté osušíme a následně součást posypeme detekční látkou (např. prášek), která reaguje s kapalinou, která zůstala v otvorech a tím zviditelníme vady. Pro identifikaci vnitřních vad se využívá Rentgenu nebo CT (Computer Tomography). Tento způsob těží z faktu, že každá látka pohlcuje kmity jinak, tudíž na druhou stranu výrobku pronikne jiná intenzita kmitů, pokud kmity narazí na vzduch, vměstek nebo jinou látku uvnitř součásti. Vnitřní vady dále můžeme zjistit metalografickým výbrusem. Ten se udělá tak, že se část dané součásti odbrousí a tím se odkryje vada, kterou můžeme pozorovat. Možno je také provést tlakovou zkoušku těsnosti výrobku. U této metody se pozorují hodnoty tlaku kapaliny proudící danou součástí. Pokud tlak poklesává, není součást těsná. Tlakovou zkoušku je možno

dělat i v tekutině, aby se zjistilo přesné místo propustnosti. Dále se hledají chyby v daném složení slitiny pomocí chemické zkoušky. Používají se i zkoušky tvrdosti, ohybové či tahové. [28; 29]

3.1.2 Porozita

Pórovitost materiálu vzniká buď v procesu tuhnutí z důvodu smršťování a nedostatku materiálu, nebo je způsobena plyny v tavenině (vodík, zahlcený vzduch). Vodík se do materiálu může dostat z důvodu znečištěného, vlhkého nebo studeného vsázkového materiálu, nebo přes vlhké či studené slévárenské nářadí (kelímky) či vyzdívky. Dále může být špatně odplyněná tavenina nebo může být tavenina přehřátá. Póry mohou vznikat také z důvodu špatného odvzdušnění formy, kde dochází k uzavření vzduchu ve formě nebo v tavenině. Řešením je dát důraz na kontrolu suchých a přehřátých nářadí a vyzdívek. Dále je nutno hlídat optimální lící teplotu. Při velkých rozdílech v tloušťkách stěn může při chladnutí docházet k pnutí a špatnému dávkování kovu a tím může vznikat porozita. Řešením je odhalit taková místa a přidat chlazení, lokální squeeze nebo zmenšit objem kovu v daném místě úpravou tvaru odlitku. Dále může být pórovitost zapříčiněna zahlceným vzduchem či párou v odlitku. To je způsobeno špatným odvzdušněním formy nebo únikem média do formy či zbytky postříků na formě. Příčinou může být i špatné plnění formy. Řešení pro tento typ vady je kontrola a správná volba odvzdušňovacího systému formy, úprava postříku nebo úprava parametrů plnění. [28]

3.1.3 Trhliny

Trhliny jsou většinou zapříčiněny příliš vysokým napětím během smršťování odlitku. Trhliny mohou být způsobeny špatnou konstrukcí dílu např. v důsledku prudké změny tloušťek stěn nebo jejich velmi rozdílným rozměrem. V odlitku může být nevhodné teplotní pole a s tím neusměrněný průběh tuhnutí, nebo může být zvolena špatná slitina. Dále mohou trhliny a praskliny vznikat při vyjímání odlitku z formy. To je způsobeno špatnou konstrukcí (příliš ostré hrany) nebo otevření formy příliš brzy. Řešením trhlin a prasklin může být změna konstrukce za účelem snížení pnutí, vyváženějšího chladnutí nebo lepšího vyjmutí dílu z formy. Dále je také potřeba dát důraz na čas tuhnutí, aby nedošlo k předčasnému vyjmutí odlitku z formy. [28]

3.1.4 Nedolití, nezaběhnutí

Tyto vady jsou způsobeny nezaplněním dutiny formy kovem. To může být zapříčiněno nízkou lící teplotou, příliš nízkou teplotou formy, příliš dlouhým licím časem, ucpaným odvzdušněním, špatným konstrukčním řešením nebo nedostatečným dávkováním nataveného kovu. Pro zamezení této vady se musí přehřát forma, zvolit dostatečně vysoká lící teplota a zvolit správné konstrukční řešení (vtoková soustava, tloušťka stěn, odvzdušňovací soustava) [28]

3.1.5 Vady způsobené chybami v dělicí rovině

Tyto vady jsou způsobeny nesprávným sevřením obou částí formy. Buď může být forma nesprávně slícovaná, nebo může zatéct materiál do dělicích ploch. Špatně slícovaná forma je způsobena nesprávně vyrobenou formou. Tuto vadu lze opravit jenom přebroušením formy. Zatečení slitiny do dělicí roviny, může být způsobeno nečistotami v dělicí rovině, nedostatečnou uzavírací silou, moc velkou teplotou taveniny nebo deformacemi formy. Řešením je zkontrolovat dělicí rovinu a případně ji vyčistit, snížit lící teplotu, zkontrolovat uzavírací sílu a zkontrolovat geometrii formy. [28]

3.1.6 Studené spoje

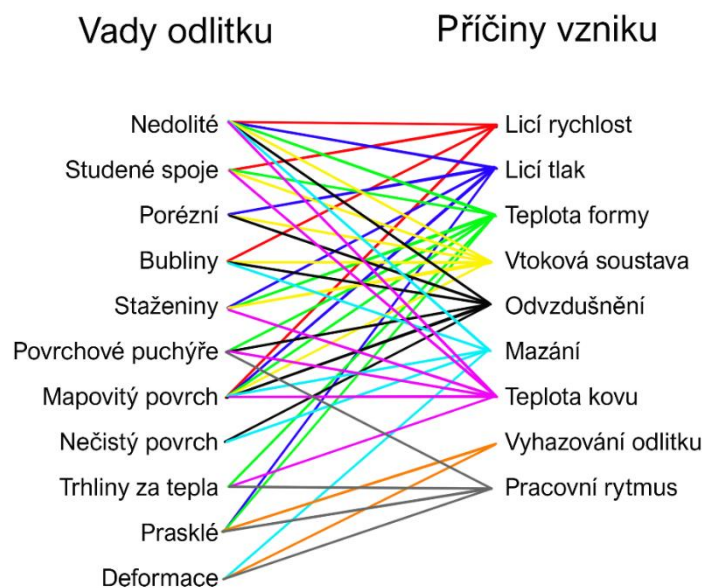
Studené spoje vznikají v důsledku příliš malé teploty taveniny nebo malé teploty formy, tudíž se při přitečení do některých částí forem materiál už nespojí a vznikne studený spoj, a tato část není tak pevná jako celistvý materiál. Tomuto jevu můžeme předejít zvýšením lící teploty nebo konstrukcí formy tak, aby se všude dostal materiál dostatečně včas, než klesne jeho teplota pod přípustnou míru. [28]

3.1.7 Vady povrchu

Mezi vady se řadí také ty, které zapříčiní nepřijatelnou podobu povrchu. Obecně pokud chceme u odlitku docílit kvalitního povrchu, využívá se rychlého plnění, v jehož důsledku vznikají vnitřní vady a stejně tak, pokud chceme kvalitní odlitek bez vnitřních vad, je to na úkor povrchového vzhledu. Mezi vady povrchu se řadí mapy na povrchu způsobené mazadly nebo separačním postříkem, zavřeniny, které jsou nejčastěji způsobené opotřebením formy nebo jádra, a také koroze, která bývá způsobena nevhodným skladováním odlitku nebo orosením při prudké změně teploty odlitku. Dále při špatném plnění formy, teplotě formy nebo kovu vznikají šupiny nebo odlupy. Může také vznikat vada, kterou nazýváme nalepování. Ta vzniká v důsledku špatného ošetření formy nebo při předčasném vyjmutí odlitku z formy a také při nevhodné technologičnosti konstrukce. [28]

3.1.8 Vady způsobené vnějšími vlivy

Tyto vady vznikají v důsledku působení vnější síly. Řadíme sem nesprávně zastřížený, upálený nebo obroušený odlitek. Příčinou takové vady bývá špatná poloha nebo seřízení nástroje, který provádí ořez. Řešením je pak seřízení stroje. Dále může docházet k nesprávné manipulaci s odlitky a v důsledku toho mohou vznikat omačkání, potlučení či pohmoždění. Jakožto preventivní opatření je nutná opatrná manipulace s odlitky. [28]

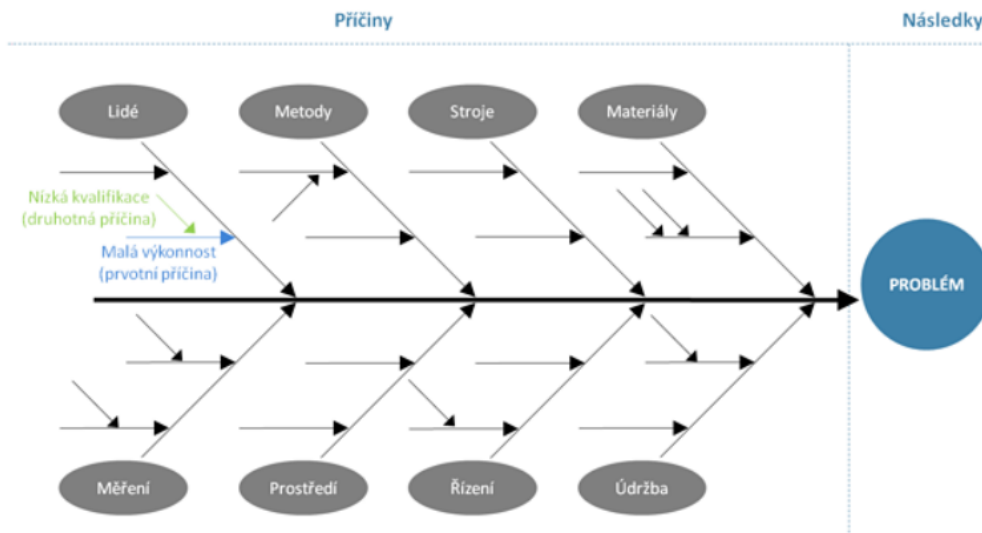


Obrázek 3.1: Saveniův diagram [30]

3.2 Hledání a řešení příčin ovlivňující kvalitu tlakového lití

Pokud chceme docílit co největší kvality odlitku a zároveň snížit zmetkovitost, vyplatí se využívat známých postupů nalezení příčiny a řešení.

K tomu můžeme využít diagram příčin a následků (Ishikawa). Tento diagram, který vynalezl Kaoru Ishikawa, slouží k nalezení nejpravděpodobnější příčiny daného problému. Základním zákonem tohoto diagramu je to, že každý problém má nějakou příčinu. Tento diagram je někdy také nazýván jako diagram rybí kosti z důvodu jeho tvaru. Hojně využití nachází v oblasti kvality. Příčiny se hledají většinou v 5-8 dimenzích viz obrázek 3.2.

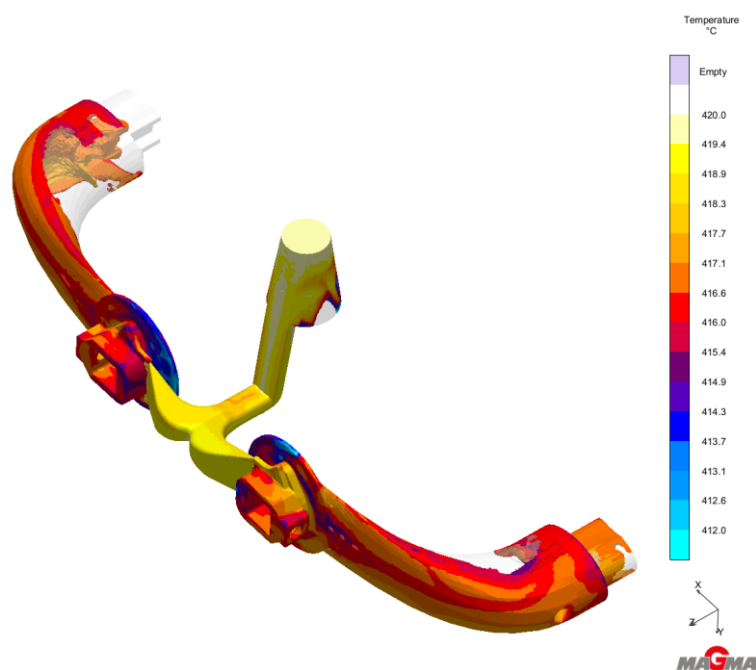


Obrázek 3.2: Ishikawův diagram [31]

Řešení je hledáno formou brainstormingu odborníků na dané téma. Každý pod danou kategorií může přidat příčinu problému. Po konci doplňování, může každý v diagramu ohodnotit příčiny váhovým koeficientem dle důležitosti. Poté se u každé příčiny sečtou váhové koeficienty a určí se příčiny, které byly hodnoceny jako nejpravděpodobnější. Tyto příčiny dále analyzujeme. Tento postup se hodí k zpětnému hledání problémů i k dopřednému hledání možných problémů. Ishikawa diagram pro tlakové lití je přiložen v příloze 1. [31; 32]

3.3 Simulační numerické softwary

Díky výkonné výpočetní technice lze s vysokou přesností nasimulovat a vyzkoušet proces lití. Optimalizováním a odhalením nedokonalostí v procesu můžeme docílit lepších mechanických charakteristik, snížení počtu vad nebo zvýšit životnost formy. Tyto softwary si po zadání vstupních parametrů vytvoří simulaci lití viz obrázek 3.3.

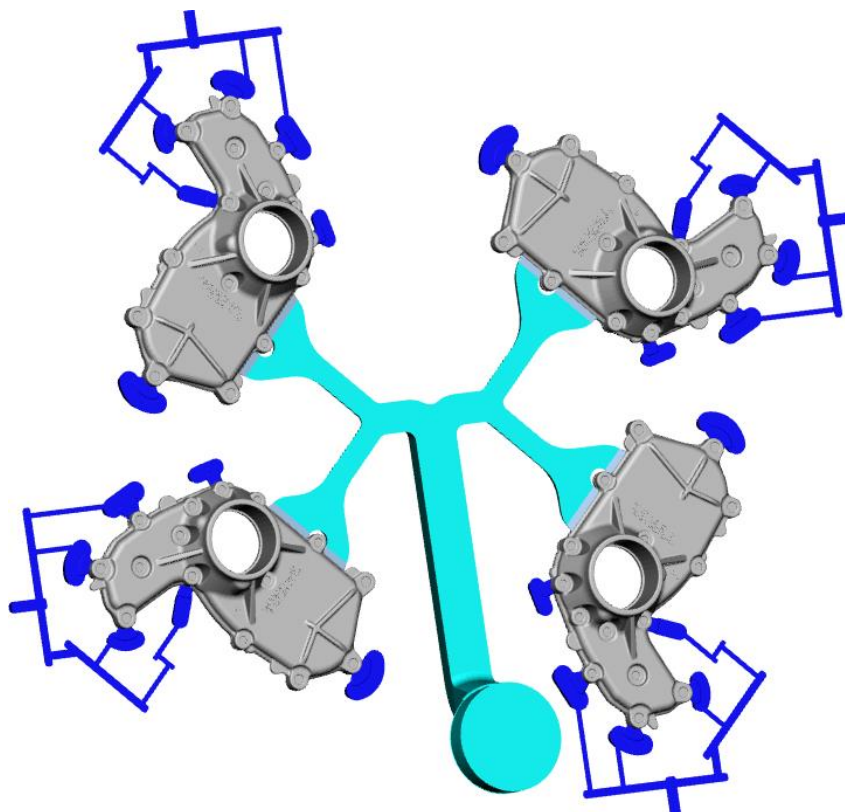


Obrázek 3.3: Simulace tlakového lití v programu Magma

Z hodnot vypočtených softwarem můžeme identifikovat místa, která by mohla být kritická. Poté můžeme zkoušet měnit a optimalizovat parametry tak, abychom docílili co nejlepší kvality daného výrobku. Jako velice produktivní možnost pro nalezení nejlepší varianty je využití automatické optimalizace simulací na základě předem zvolených úprav určitých licích parametrů či geometrií. Softwaru stačí definovat parametry, které se mohou měnit a definovat jejich proměnné hodnoty. Program potom vytvoří všechny jejich možné kombinace. Následně provede každou jednotlivou simulaci a porovná výsledky s těchto simulací podle kritérií, které jsou možné definovat uživatelem (například porozita, uzavřený vzduch v odlitku). To umožňuje porovnání velkého množství rozdílných variant a pomáhá vybrat tu neoptimálnější variantu bez nutnosti fyzicky odlévat jednotlivé díly.

4 Experimentální část

Pro praktickou část byla vybrána optimalizace dílu ve slévárně KSM Castings v Hrádku nad Nisou, která tento díl vyrábí pro firmu Mercedes-Benz. Jedná se o díl ze slitiny AlSi9Cu3, který je určený jako krytí převodky, proto musí splňovat požadavky na těsnost dílu. Odlévá se technologií vysokotlakého lití na stroji se studenou licí komorou, konkrétně se jedná o stroj ItalPress 1450 SC. Pro vyšší produktivitu se využívá čtyřnásobná forma. U dílu dochází k následnému obrábění na styčných a funkčních plochách.



Obrázek 4.1: Model nalití

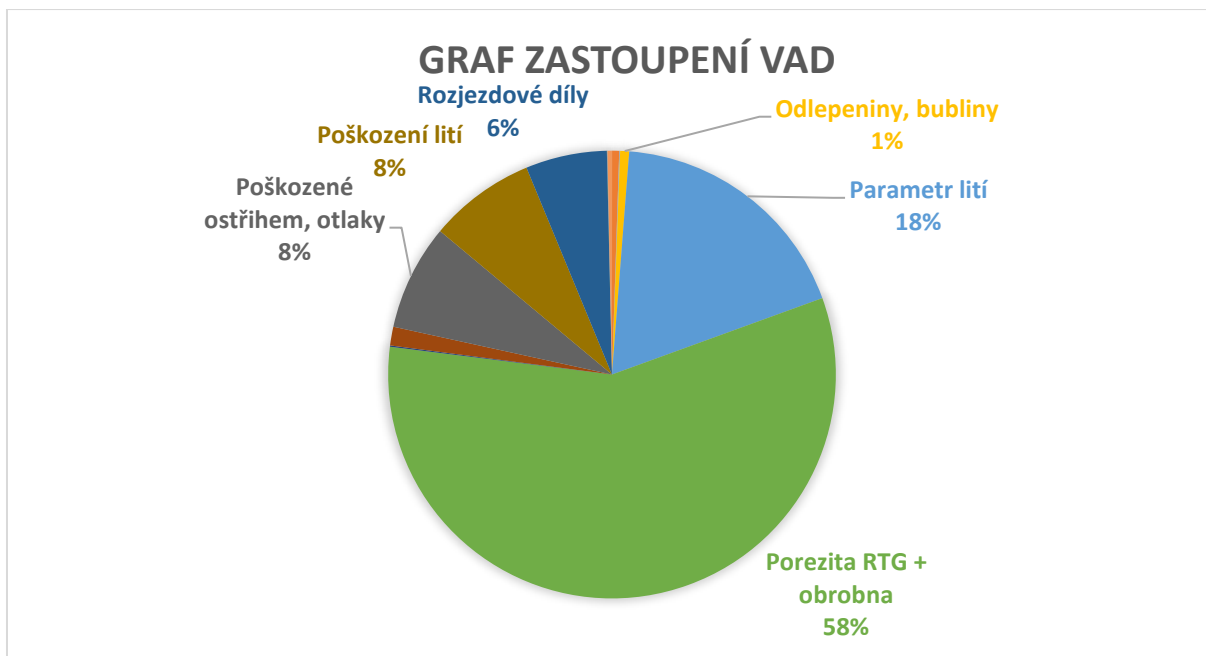
Základní informace o stávajících hodnotách dílu, stroje a formě jsou v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Základní informace o odlitku, stroji a formě

Díl	
Hmotnost obrobku	642 g
Hmotnost odlitku	670 g
Plocha v dělení	289 cm ²
Plocha naříznutí	150 mm ²
Plocha odvzdušnění	63 mm ²
Čtyřnásobná licí forma	
Plocha v dělení	1940 cm ²
Dotlak	600 bar
Potřebná uzavírací síla	8730 kN
Uzavírací síla IP 1450 SC	13 860 kN
Hmotnost nalití	600 g
Licí komora	Ø105 mm
Teplota formy	170 °C
Teplota taveniny v komoře	670 °C

4.1 Analýza stávajících problémů

Produkce u tohoto dílu čítala 1 696 375 kusů za celý rok 2018, z čehož bylo 8,3 % zmetků. Z těchto údajů vyplývá možné uspoření nákladů při optimalizaci licích parametrů a geometrií odlitku. Z grafu na obrázku 4.2 plyne, že nejvíc zastoupenou vadou je pórovitost, tudíž je nutno se na ni zaměřit jako na hlavní problém.



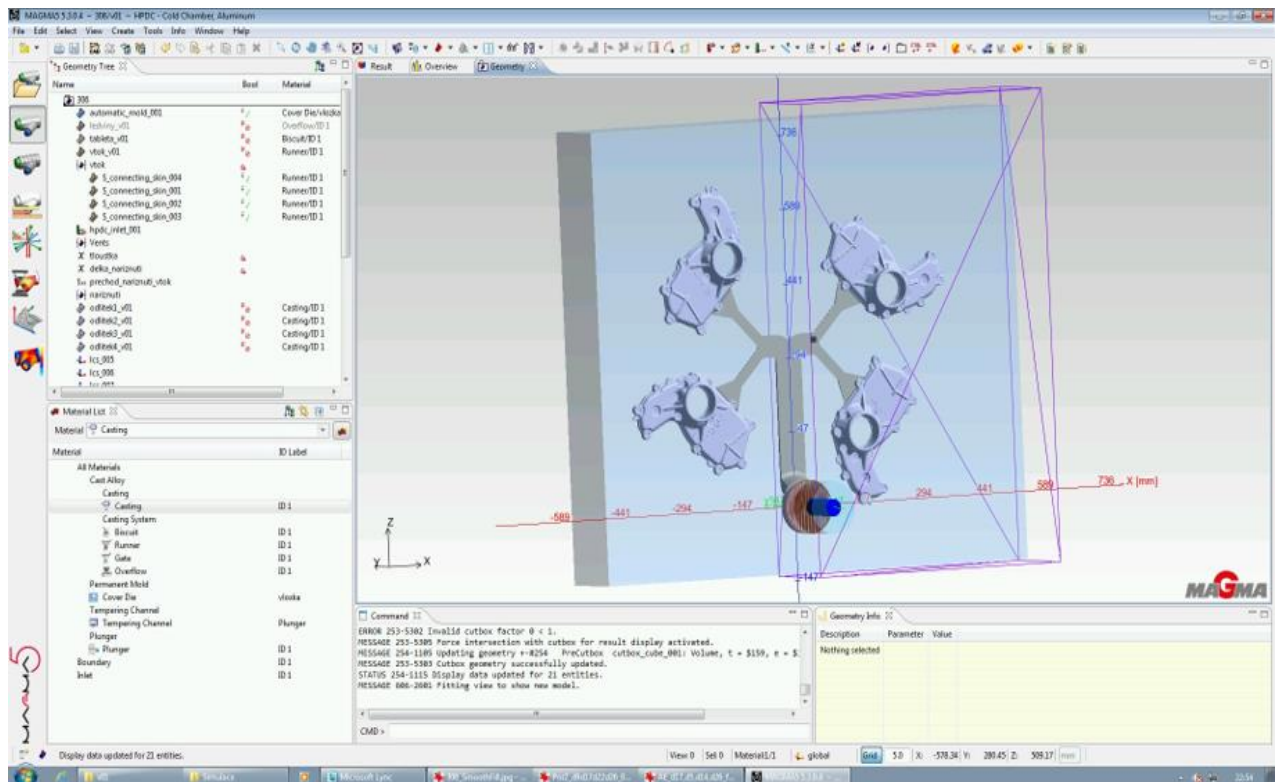
Obrázek 4.2: Graf procentuálního zastoupení vad

Ze Savenova diagramu (obrázek 3.1) plyne, že hlavními příčinami porozity jsou chybně navrhnuté odvdzdušnění nebo vtoková soustava. Na tyto příčiny je nadále nutno se zaměřit. Z důvodu již vyrobené formy a zaběhnutého procesu, bylo zvoleno optimalizování pouze vtokové soustavy, respektive nařiznutí, bodu sepnutí a druhé rychlosti.

4.2 Simulace lití

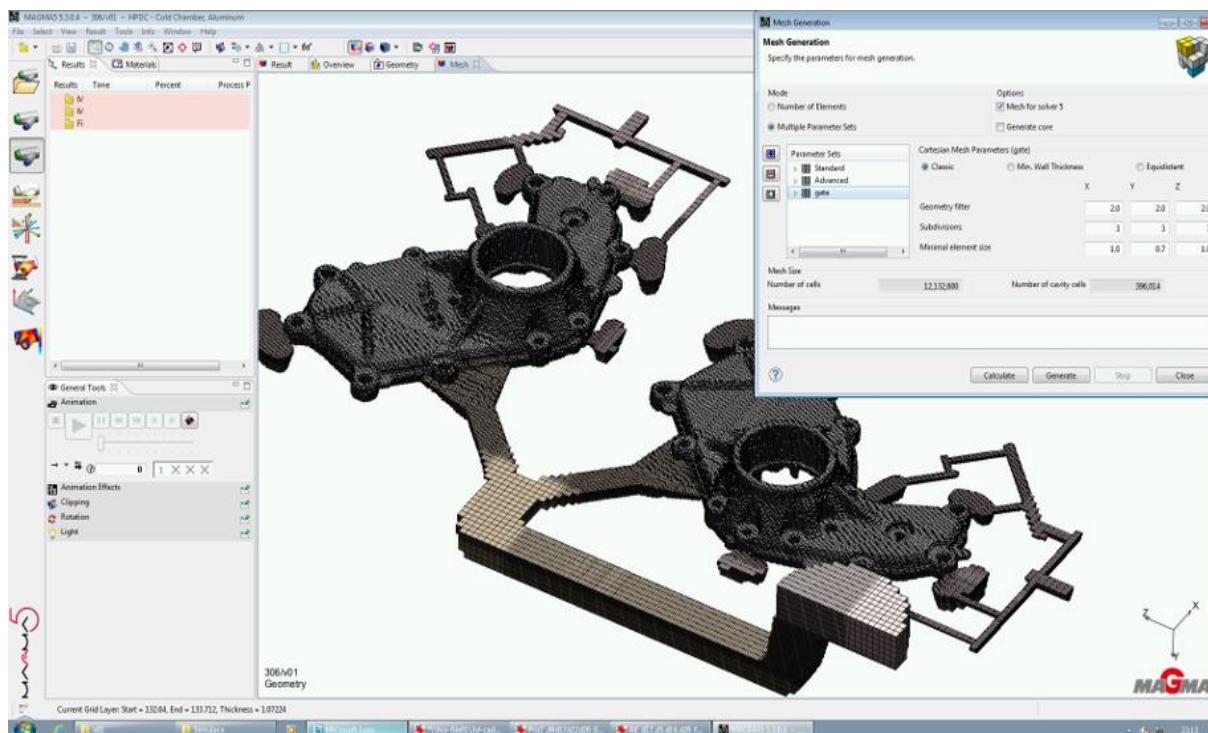
Pro hledání optimálních parametrů lití byla zvolena simulace v softwarovém programu Magma. Pro správný simulační výpočet je třeba znát podmínky lití, materiál odlitku i formy a geometrii odlitku. Slévárnou KSM Castings byl poskytnut 3D model sestavy odlitku s vtokovou soustavou, podmínky lití i možnost využít software Magma.

U optimalizace bylo počítáno pouze s polovinou formy (viz obrázek 4.3) z důvodu uspoření výpočetního času, a tak lze počítat větší množství variant za stejnou časovou dobu.



Obrázek 4.3: Výběr poloviny formy v programu Magma

Po výběru poloviny formy bylo potřeba danou část zasítovat. Hustota sítě závisí na tom, jak má být výsledek detailní, avšak čím detailnější výsledky chceme, tím déle trvá výpočetní čas. Proto se využívá různé hustoty výpočtových sítí na jednotlivých prvcích geometrie. Tudiž tam, kde předpokládáme problémovou část, zvolíme hustší síť oproti jiným částem. Nastavení velikosti jednotlivých elementů sítí se provádí pomocí zvolení velikosti v jednotlivých směrech os X, Y, Z. V tomto konkrétním případě byly elementy voleny tak, aby splňovaly podmínky, že v naříznutí a ve stěnách odlitku budou minimálně tři elementy (viz obrázek 4.4).



Obrázek 4.4: Ukázka vytvoření sítě u dílu

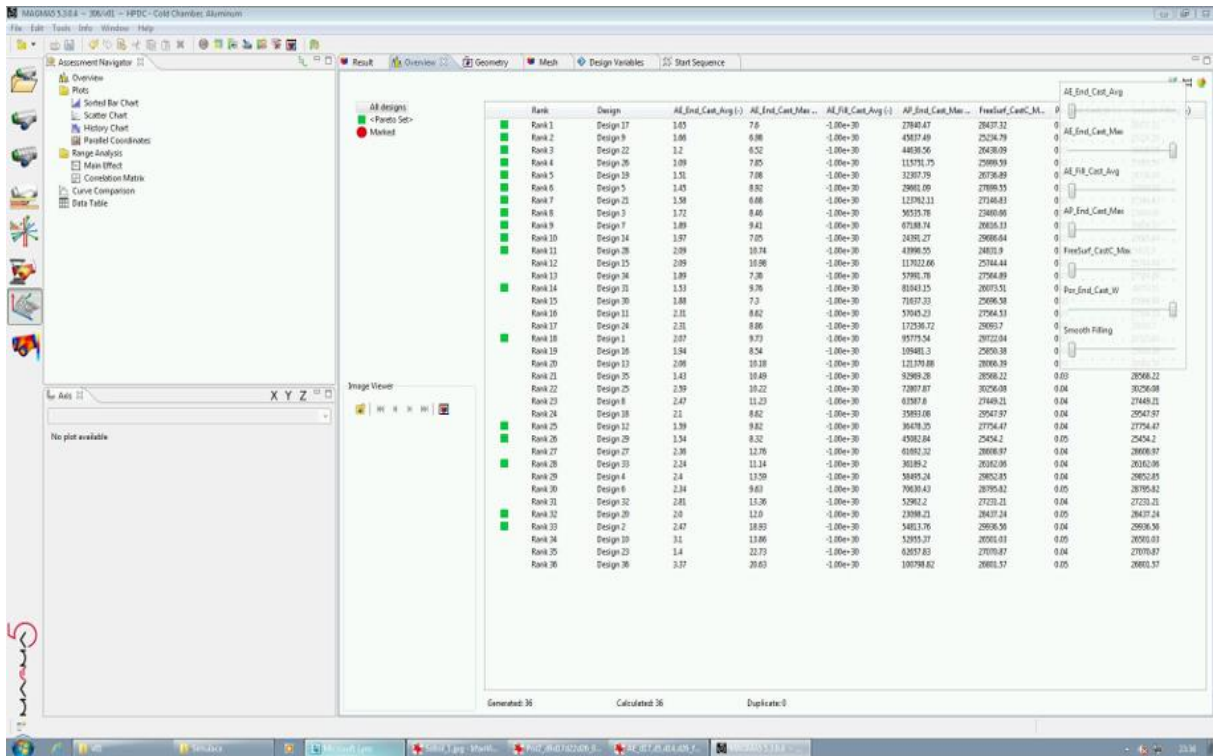
Po vytvoření sítě bylo potřeba naplánovat varianty, které má program počítat. Jak již bylo výše zmíněno, byla zvolena pouze úprava naříznutí, bodu sepnutí a druhé rychlosti. Jako proměnné parametry byly zvoleny délka naříznutí, tloušťka naříznutí, bod sepnutí a rychlost V_2 , avšak ta je v reálu dvakrát větší, protože je plněna pouze polovina formy, ale průměr tablety zůstal celý. Dále bylo využito automatické optimalizace, jak je popsáno v kapitole č.3.3. Hodnoty, které byly zadávány jsou v tabulce 4.2. Celkově takto kombinací zvolených parametrů vzniká 80 variant, avšak pro uspořádní výpočetního času bylo zvoleno počítání pouze 40 respektive 36 variant, jelikož 4 byly duplicitní.

Tabulka 4.2: Zadávané hodnoty do automatické simulace

	od	do	krok
Délka naříznutí	70	100	5
Tloušťka naříznutí	2,1	3,5	0,7
Bod sepnutí	380	410	30
Plnicí rychlost	1,1	1,6	0,5

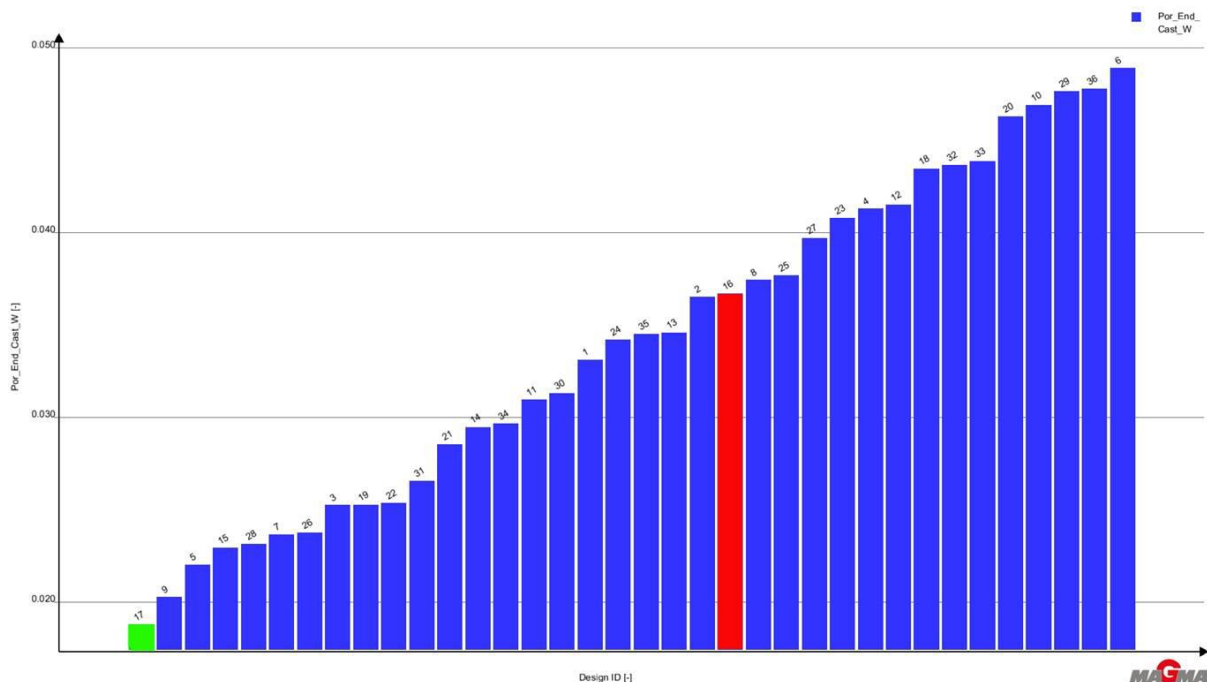
4.2.1 Vyhodnocení simulace lití

Po vypočtení jednotlivých variant pomocí programu Magma vyšly jako nejlepší návrhy ty, které jsou zobrazeny na obrázku 4.5. Jako hlavní kritéria, podle kterých se určovalo pořadí variant, bylo zvoleno množství zahlceného vzduchu a porozita na konci lití.



Obrázek 4.5: Vyhodnocení jednotlivých variant

Pro lepší srovnání daných výsledků byl použit graf, na kterém je zobrazeno porovnání jednotlivých designů v závislosti na pórovitosti odlitku. Na obrázku 4.6 je zobrazena průměrná porozita v odlitku. Na ilustraci je červeně zvýrazněna stávající varianta lití, která se na daný odlitek využívá a zeleně doporučená nejlépe vycházející varianta.

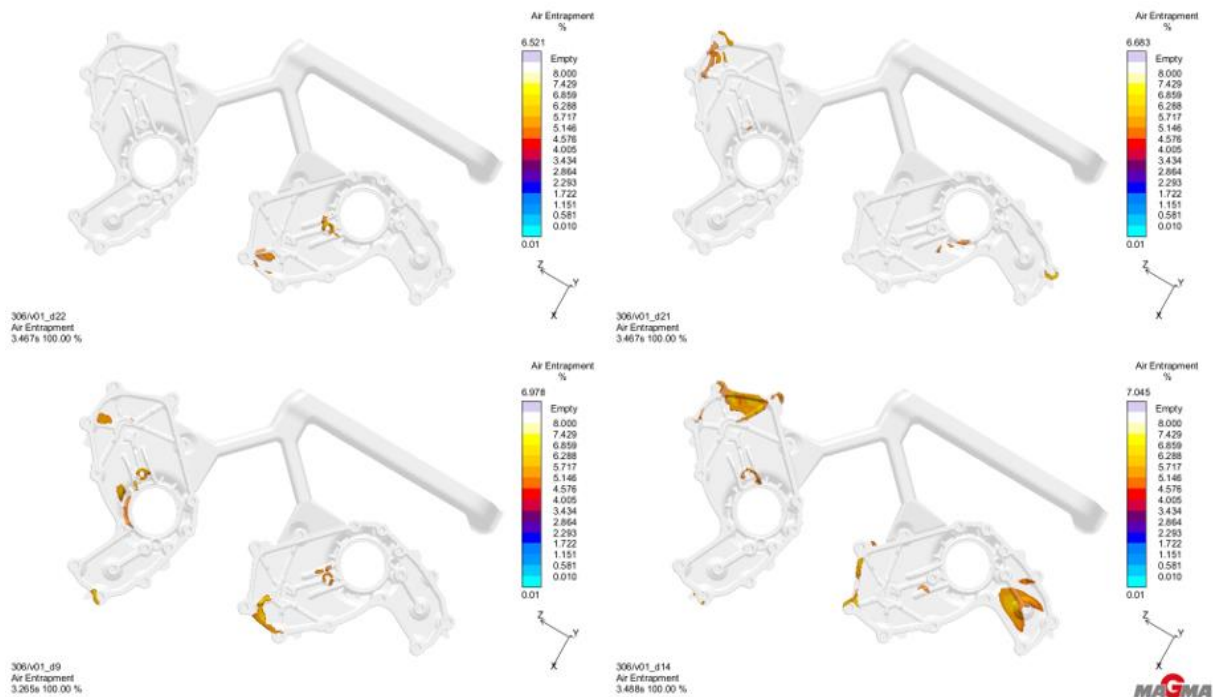


Obrázek 4.6: Graf srovnání jednotlivých designů s ohledem na porozitu v odlitku

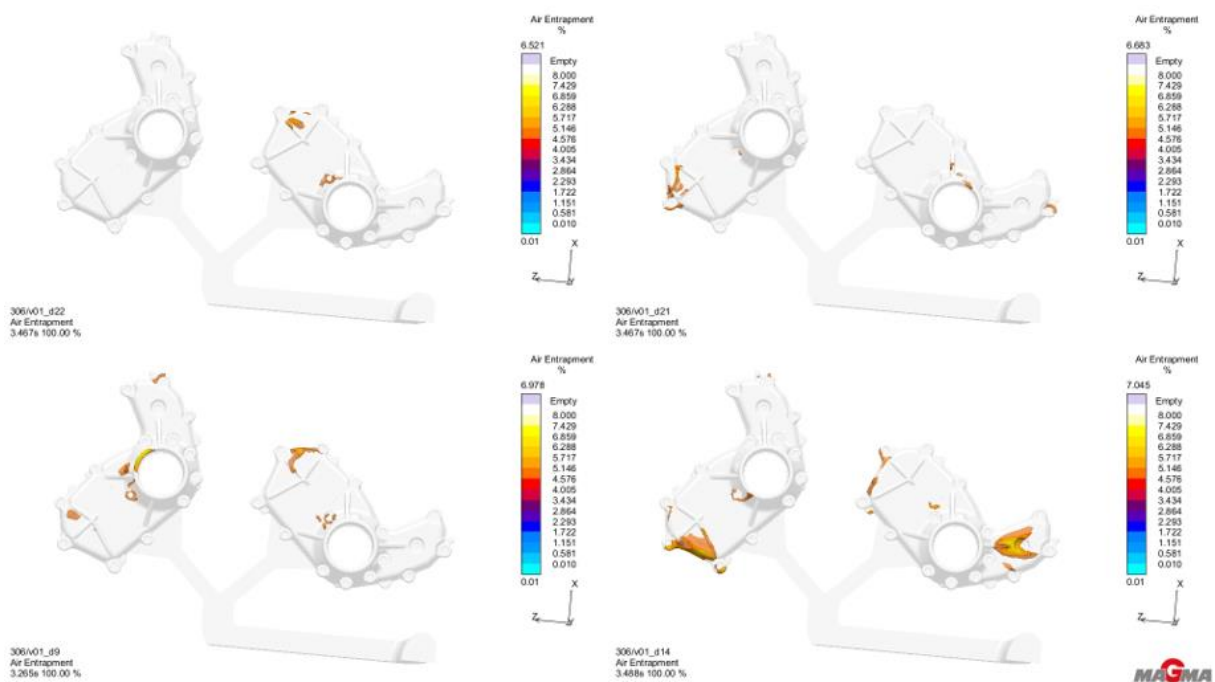
Jako další srovnání byly použity grafy „Parallel Coordinates“. Na těchto grafech jsou znázorněny vstupní parametry a jednotlivé výstupní parametry, které lze navolit. Každý jednotlivý výpočet je vždy spojen spojnící čar, které mají určitou barvu podle škály na

zvoleném hlavním parametru. Výhodou tohoto grafu je možnost rychlého srovnání jednotlivých variant. V příloze 3 je možno vidět tento graf s uzavřeným vzduchem jako hlavním parametrem a v příloze 2 graf s pórovitostí jako hlavním parametrem. Na obou grafech jsou zvýrazněné čtyři nejlepší varianty.

Pro čtyři nejlépe vycházející varianty, s ohledem na zahlcený vzduch v odlitku, byla vytvořena vizualizace rozložení zahlceného vzduchu (viz obrázky 4.7 a 4.8) a rozložení porozity (viz obrázky 4.9 a 4.10) po odlitku. Barevně jsou zobrazeny místa kde zahlcený vzduch na konci lití dosahuje více než 5 % a kde dochází k porozitě.

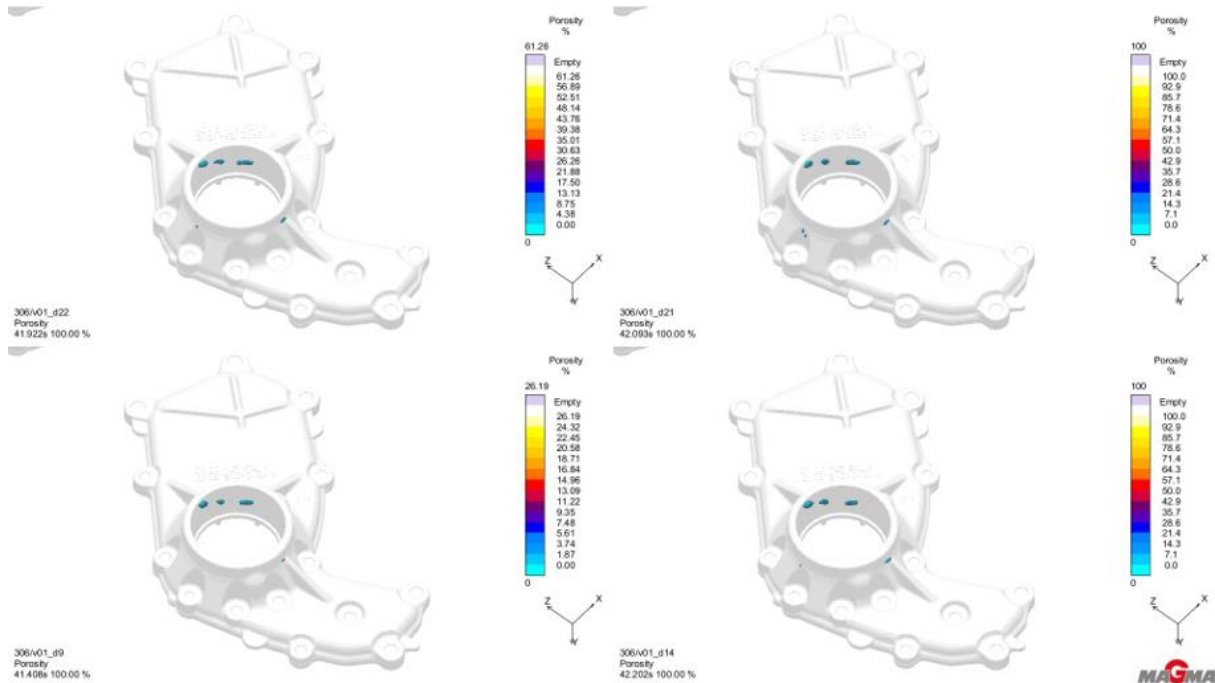


Obrázek 4.7: Rozložení zahlceného vzduchu po odlitcích s nejméně zahlceným vzduchem – spodní pohled

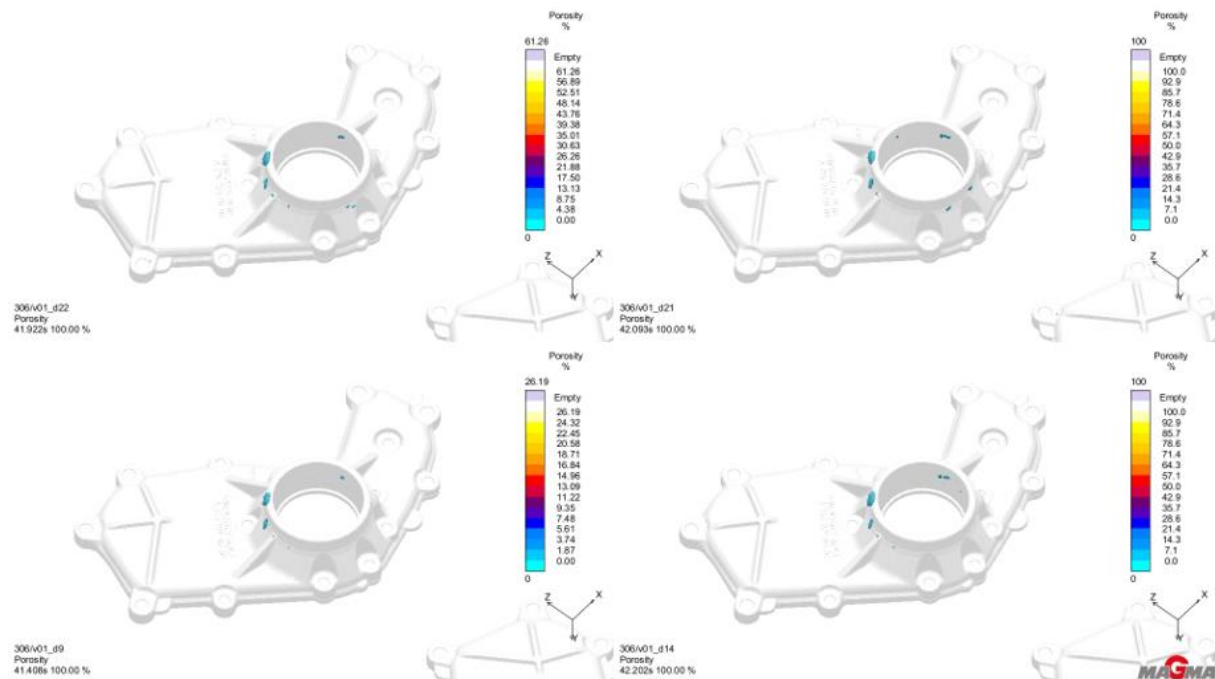


Obrázek 4.8: Rozložení zahlceného vzduchu po odlitcích s nejméně zahlceným vzduchem – vrchní pohled

Z výše uvedených obrázků vyplývá, že ze čtyř nejlepších variant vychází nejlépe varianta č.22, jelikož se v ní zahlcený vzduch vyskytuje nejméně. Vyskytuje se navíc na částech, které mají menší vliv na výslednou celkovou těsnost. Pokud tyto varianty porovnáme z hlediska porozity (obrázky 4.9 a 4.10) vychází nejlépe návrh č.9, avšak rozdíl mezi návrhem č.22 není nijak podstatný, tudíž č.22 zvítězí v celkovém měřítku.

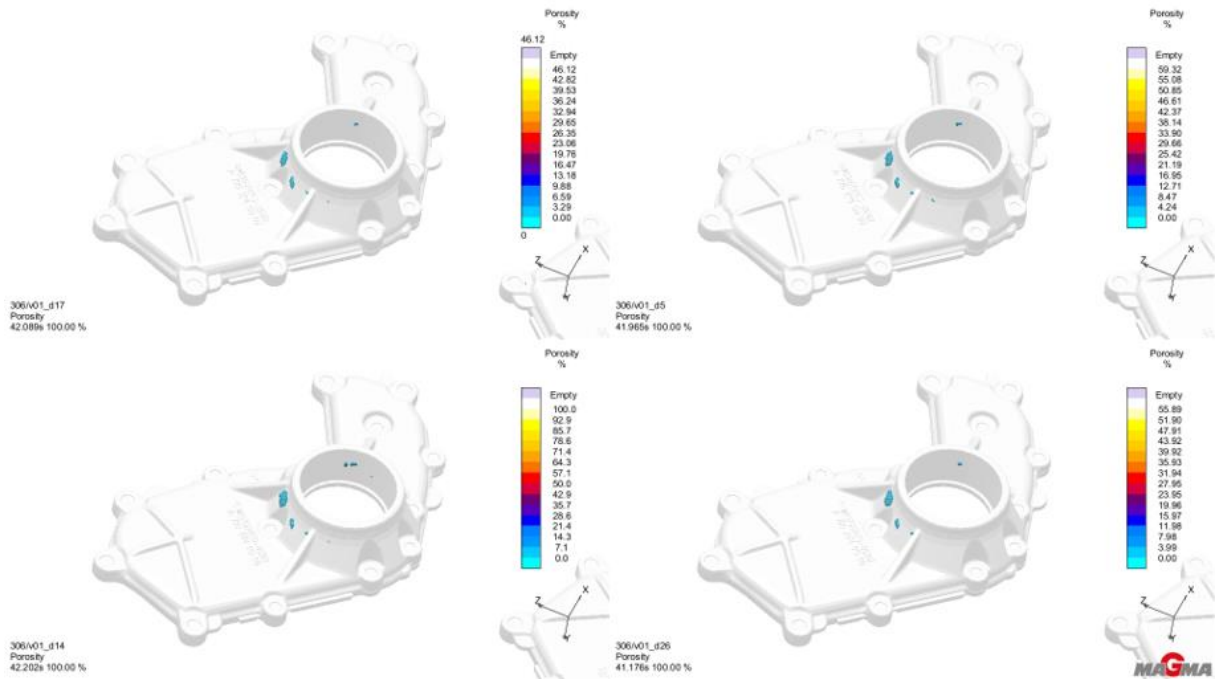


Obrázek 4.9: Rozložení porozity po odlitku pro varianty s nejméně zahlceným vzduchem – pohled č.1

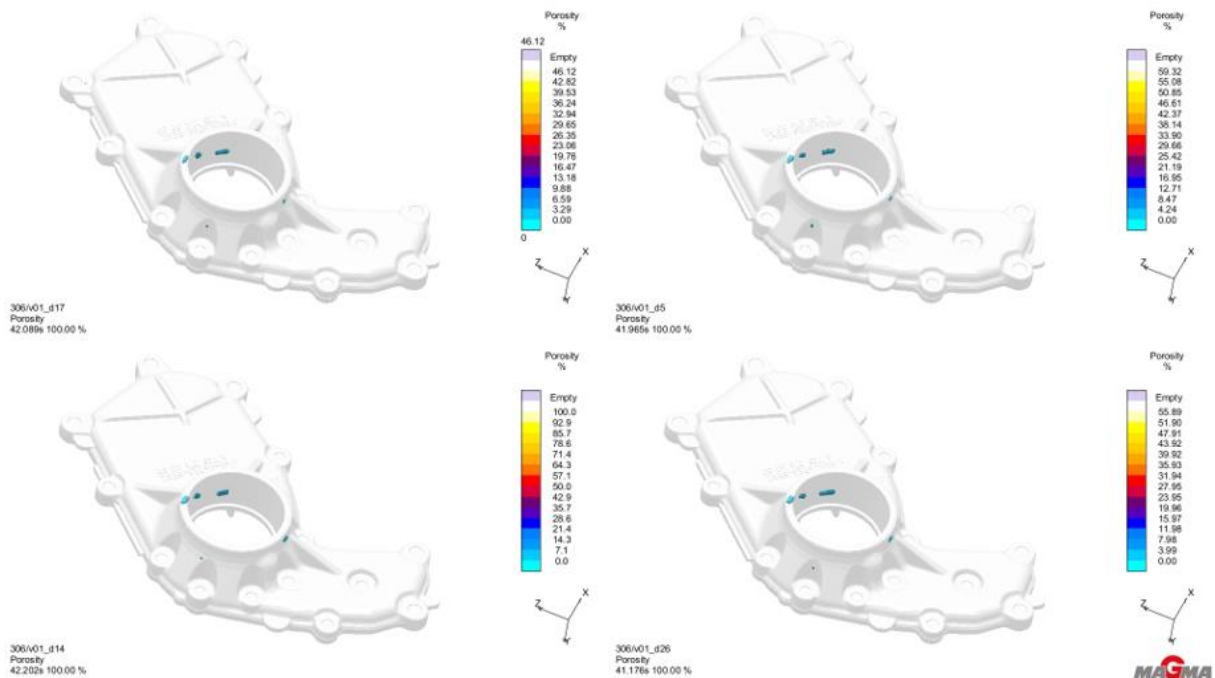


Obrázek 4.10: Rozložení porozity po odlitku pro varianty s nejméně zahlceným vzduchem – pohled č.2

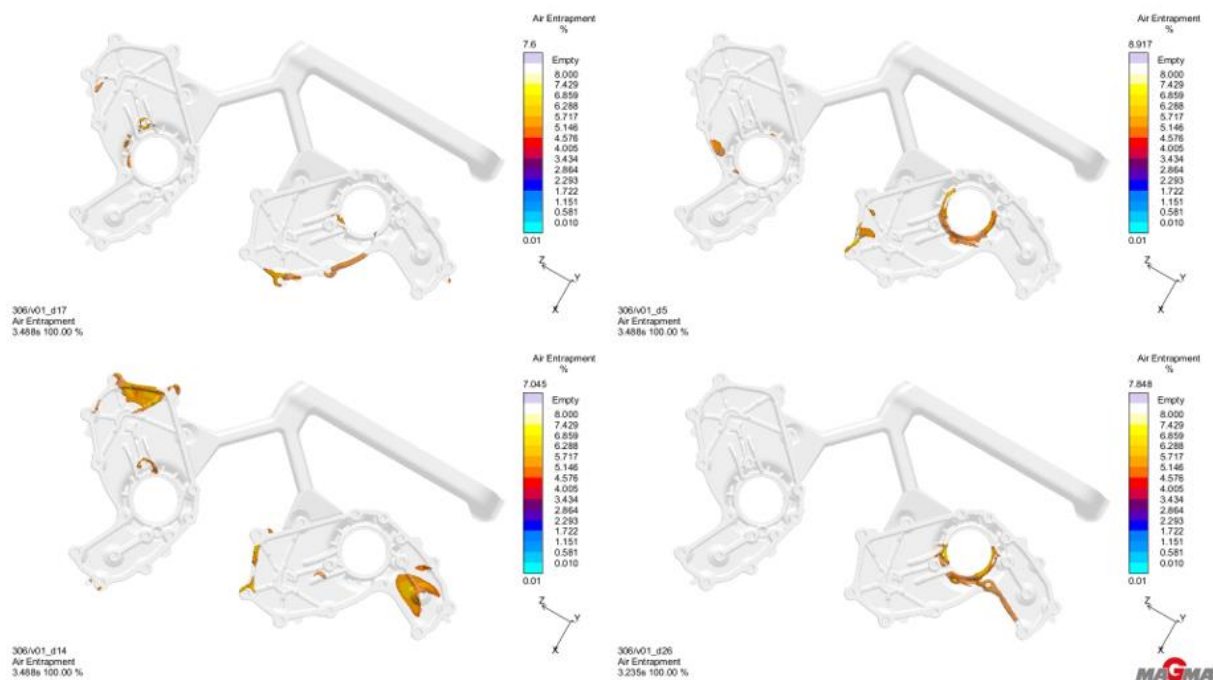
Pro varianty s ohledem na nejmenší porozitu byla také vytvořena vizualizace rozložení porozity po odlitku (viz obrázky 4.11 a 4.12) a taktéž rozložení zahlceného vzduchu (viz obrázky 4.13 a 4.14).



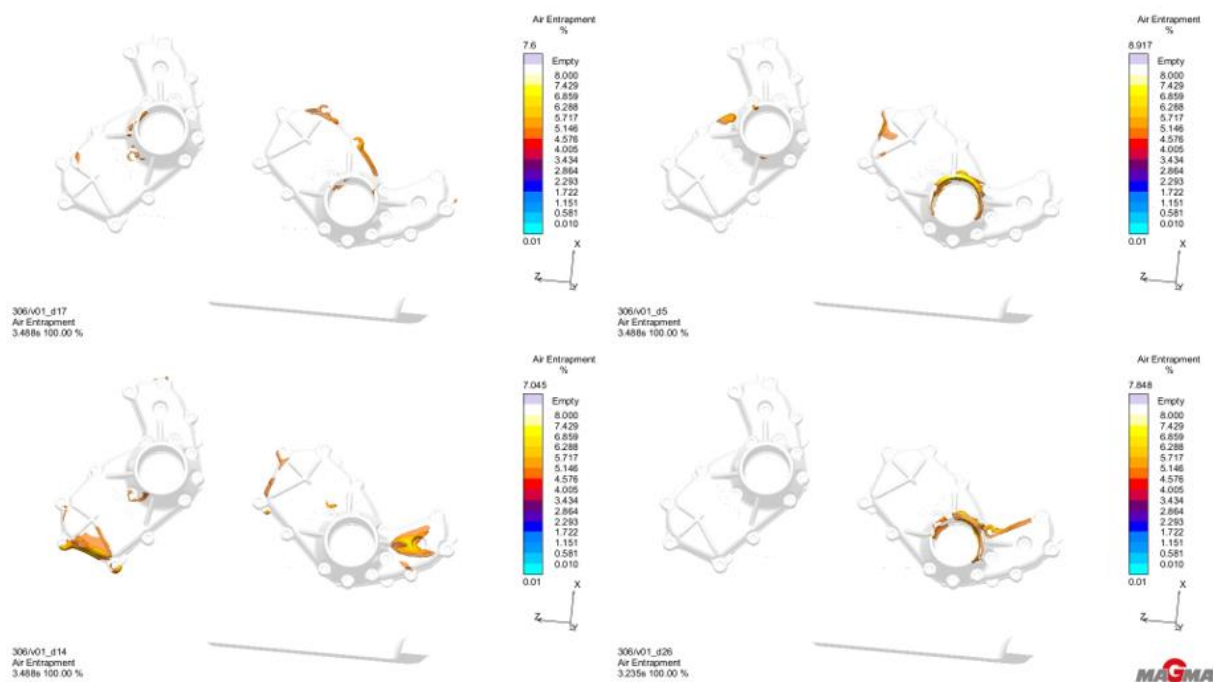
Obrázek 4.11: Rozložení porozity po odlitku pro varianty s nejmenší porozitou – pohled č.1



Obrázek 4.12: Rozložení porozity po odlitku pro varianty s nejmenší porozitou – pohled č.2



Obrázek 4.13: Rozložení zahlceného vzduchu po odlitku pro varianty s nejlepší porozitou – spodní pohled



Obrázek 4.14: Rozložení zahlceného vzduchu po odlitku pro varianty s nejlepší porozitou – horní pohled

Z výše uvedených simulací můžeme pozorovat, že ze skupiny variant s nejnižší koncovou porozitou vychází nejlépe varianta č.17, a to konkrétně z důvodu nízké koncové porozity a nízkého procenta zahlceného vzduchu v odlitku.

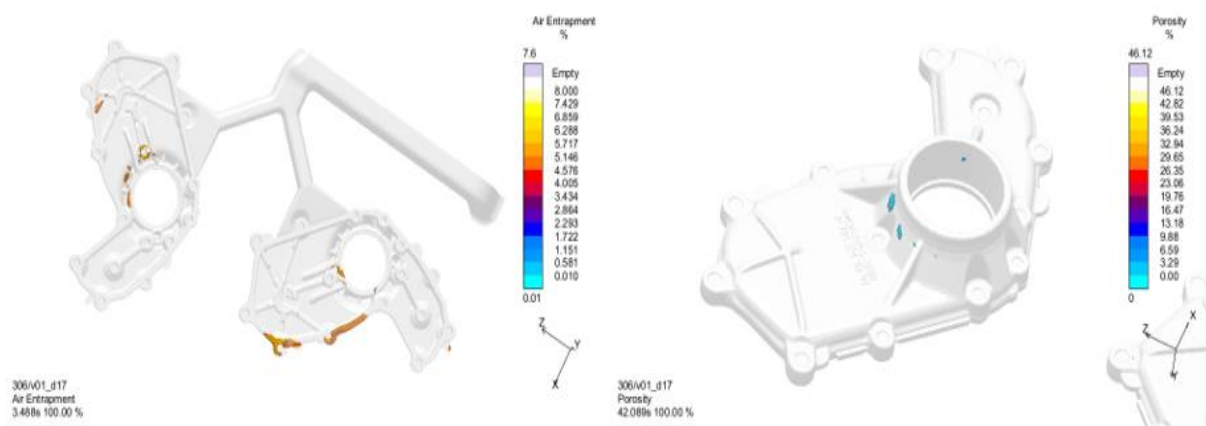
Z celkového hlediska všech vyhodnocených variant vyšla nejlépe úprava na návrh č.17 a to upravit délku nařiznutí z původních 90 mm na 100 mm, zvolit tloušťku nařiznutí z původních 3,5 mm na 2,8 mm. Bod sepnutí byl navržen posunout z hodnoty 395 mm na 410 mm a upravit plnicí rychlost V_2 na hodnotu 2,2 m/s místo hodnoty 3,2 m/s. Navržená změna parametrů by měla vést ke zmenšení pórovitosti a také nižší zmetkovitosti daného dílu.

5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na optimalizaci odlitku krytu převodovky ve firmě KSM Castings a analýzu vlivů, které ovlivňují zmetkovitost.

V teoretické části je popsáno základní rozdělení vysokotlakého lití a nové nekonvenční metody. Dále byla popsána konstrukce formy a důležitost a vliv jednotlivých jejích částí na kvalitu výsledného odlitku. Poté byly popsány hlavní licí parametry, které mají vliv na výslednou jakost výrobku. V dalších kapitolách se práce věnovala metalurgii slévárenských slitin hliníku a jejich vlastnostem. S ohledem na vyhodnocování kvality odlitku muselo být zmíněno rozdělení vad a možnosti jejich zjištění a následně prevence takových vad. V neposlední řadě byly popsány metody řízení jakosti a kvality pomocí Ishikawa diagramu, za jehož pomoci lze docílit optimalizování celého procesu. Jako poslední byly zmíněny moderní výpočetní postupy, jako je simulace lití pomocí softwarů k tomu určeným.

Experimentální část práce byla zaměřena na optimalizaci a snížení zmetkovitosti u odlitku pomocí simulačního programu Magma. Pomocí získaných dat z kontrol prováděných ve slévárně byla určena hlavní vada, která má největší vliv na celkovou zmetkovitost, kterou se ukázala být pórovitost. Bylo tedy nutné navrhnout změny, které by této vadě předcházely, zároveň bylo nutné nedělat příliš velké zásahy do formy a do celého procesu, což by bylo velmi nákladné, a proto se zvolila pouze změna obsahu naříznutí, bodu sepnutí a velikosti plnicí rychlosti, a to z důvodu možnosti lehké a nenákladné úpravy těchto parametrů a geometrií. Jako první bylo pro simulaci zvoleno vhodné zasíťování, jakožto kompromis mezi výpočetním časem a přesností výsledku. Potom pomocí funkce automatické optimalizace simulace lití bylo nakombinováno 40 variant, avšak čtyři byly duplicitní. Následně bylo vybráno 36 variant, které byly vypočteny. Osm návrhů variant, které vycházely nejlépe z hlediska uzavřeného vzduchu v odlitku a porozity, bylo simulováno v programu Magma, aby byla zjištěna potenciální místa vzniku vad a jejich vliv na těsnost odlitku. Jako nejlepší návrh byl vyhodnocen návrh č.17, a to z důvodu nejmenšího množství vad, a i jejich umístění, které by nemělo případně ovlivňovat finální těsnost odlitku (viz obrázek č.5.1)



Obrázek 5.1: Zahlcený vzduch a porozita na návrhu č.17

Konkrétně číselně byla navržena úprava délky naříznutí z 90 na 100 mm, dále úprava tloušťky naříznutí z 3,5 na 2,8 mm, bod sepnutí byl posunut z 395 na 410 mm a plnicí rychlost byla změněna z 3,2 na 2,2 m/s.

Výše zmíněná opatření by měla vést ke snížení zmetkovitosti dílu z 8,3 % pod 5 %, což by mělo ušetřit značné finanční prostředky. V produkci 1 696 375 kusů za rok to činí okolo 60 000 kusů ročně.

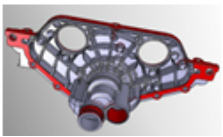
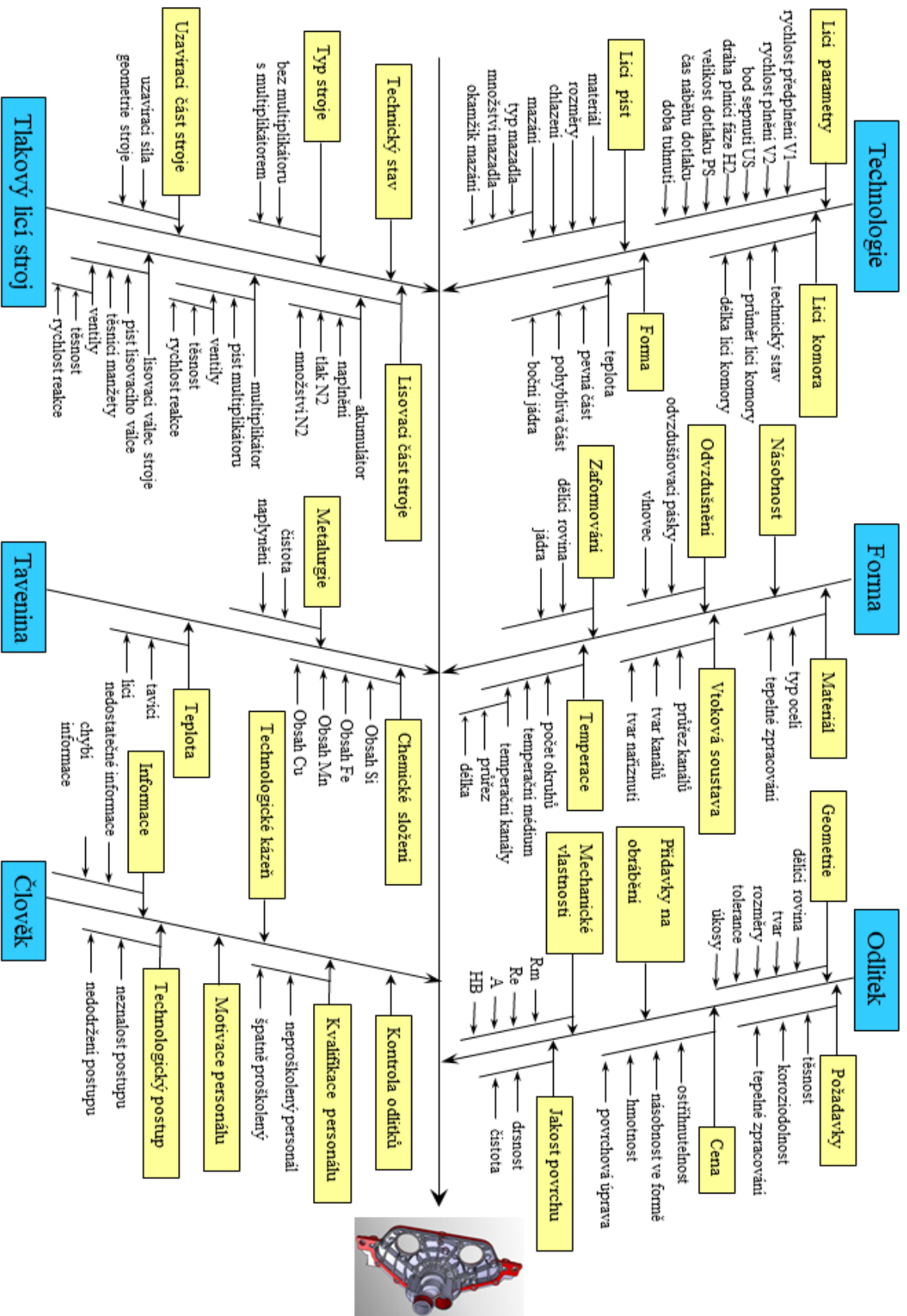
Seznam ilustrací

OBRÁZEK 1.1: ŘEŠENÝ ODLITEK KRYTU PŘEVODOVKY.....	8
OBRÁZEK 2.1: SCHÉMA PRACOVNÍCH CYKLŮ STROJE SE STUDENOU LICÍ KOMOROU	9
OBRÁZEK 2.2: SCHÉMA STROJE SE STUDENOU LICÍ KOMOROU	10
OBRÁZEK 2.3: SCHÉMA STROJE S TEPLOU LICÍ KOMOROU	11
OBRÁZEK 2.4: PRINCIP SQUEEZE CASTINGU	12
OBRÁZEK 2.5: ROZDÍL STRUKTURY RHEOCASTING OPROTI KONVENČNÍMU TAKOVÉMU LITÍ.....	12
OBRÁZEK 2.6: DĚLENÍ FORMY	14
OBRÁZEK 2.7: KONSTRUKCE FORMY	15
OBRÁZEK 2.8: TEMPERAČNÍ A CHLADÍCÍ SYSTÉM POHYBLIVÉ STRANY FORMY	16
OBRÁZEK 2.9: ODVZDUŠŇOVACÍ SOUSTAVA	16
OBRÁZEK 2.10: VTKOVÁ SOUSTAVA S VLNOVCI.....	17
OBRÁZEK 2.11:GRAF ZÁVISLOSTI RYCHLOSTI A TLAKU NA ČASE PŘI PLNĚNÍ FORMY	18
OBRÁZEK 2.12: FÁZE LICÍHO CYKLU V ZÁVISLOSTI NA ČASE	19
OBRÁZEK 2.13: ČSN NORMA.....	21
OBRÁZEK 2.14: EN NORMA	21
OBRÁZEK 3.1 SAVENŮV DIAGRAM	25
OBRÁZEK 3.2: ISHIKAWŮV DIAGRAM	26
OBRÁZEK 3.3: SIMULACE TLAKOVÉHO LITÍ V PROGRAMU MAGMA	26
OBRÁZEK 4.1: MODEL NALITÍ.....	28
OBRÁZEK 4.2: GRAF PROCENTUÁLNÍHO ZASTOUPENÍ VAD	29
OBRÁZEK 4.3: VÝBĚR POLOVINY FORMY V PROGRAMU MAGMA.....	30
OBRÁZEK 4.4: UKÁZKA VYTVOŘENÍ SÍTĚ U DÍLU	31
OBRÁZEK 4.5: VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT	32
OBRÁZEK 4.6: GRAF SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH DESIGNŮ S OHLEDEM NA POROZITU V ODLITKU	32
OBRÁZEK 4.7: ROZLOŽENÍ ZAHLCENÉHO VZDUCHU PO ODLITCÍCH S NEJMÉNĚ ZAHLCENÝM VZDUCHEM – SPODNÍ POHLED	33
OBRÁZEK 4.8: ROZLOŽENÍ ZAHLCENÉHO VZDUCHU PO ODLITCÍCH S NEJMÉNĚ ZAHLCENÝM VZDUCHEM – VRCHNÍ POHLED	33
OBRÁZEK 4.9:ROZLOŽENÍ POROZITY PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJMÉNĚ ZAHLCENÝM VZDUCHEM – POHLED Č.1	34
OBRÁZEK 4.10:ROZLOŽENÍ POROZITY PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJMÉNĚ ZAHLCENÝM VZDUCHEM – POHLED Č.2	34
OBRÁZEK 4.11:ROZLOŽENÍ POROZITY PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJMENŠÍ POROZITOU – POHLED Č.1	35
OBRÁZEK 4.12:ROZLOŽENÍ POROZITY PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJMENŠÍ POROZITOU – POHLED Č.2	35
OBRÁZEK 4.13: ROZLOŽENÍ ZAHLCENÉHO VZDUCHU PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJLEPŠÍ POROZITOU – SPODNÍ POHLED	36
OBRÁZEK 4.14:ROZLOŽENÍ ZAHLCENÉHO VZDUCHU PO ODLITKU PRO VARIANTY S NEJLEPŠÍ POROZITOU – HORNÍ POHLED	36
OBRÁZEK 5.1: ZAHLCENÝ VZDUCH A POROZITA NA NÁVRHU Č.17	37

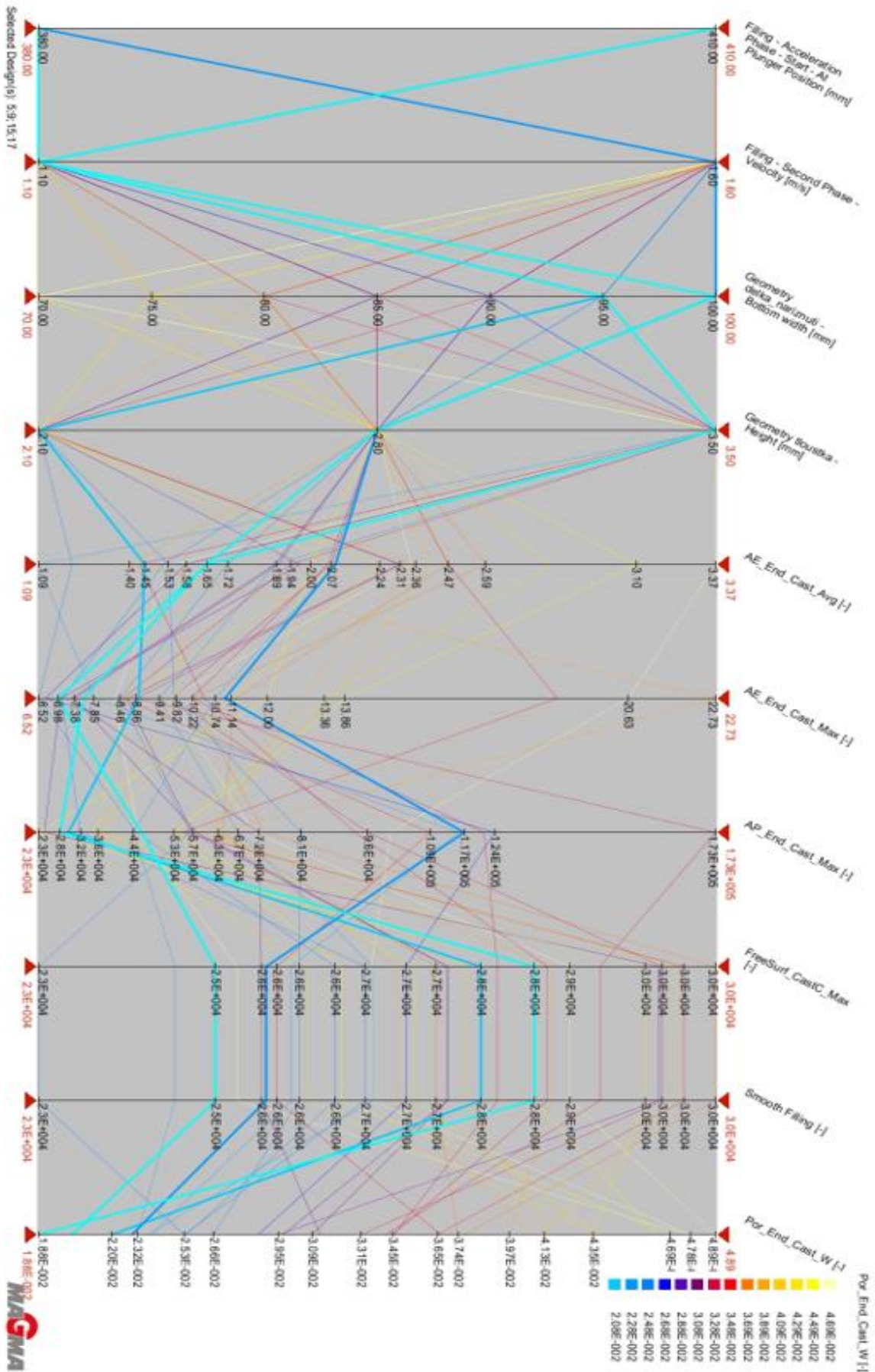
Seznam tabulek

TABULKA 2.1: HODNOCENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN	20
TABULKA 3.1: DĚLENÍ VAD PODLE ČSN 42 1240 TŘÍDY 100-400	22
TABULKA 3.2: DĚLENÍ VAD PODLE ČSN 42 1240 TŘÍDY 500-700	23
TABULKA 4.1: ZÁKLADNÍ INFORMACE O ODLITKU, STROJI A FORMĚ	28
TABULKA 4.2: ZADÁVANÉ HODNOTY DO AUTOMATICKÉ SIMULACE.....	31

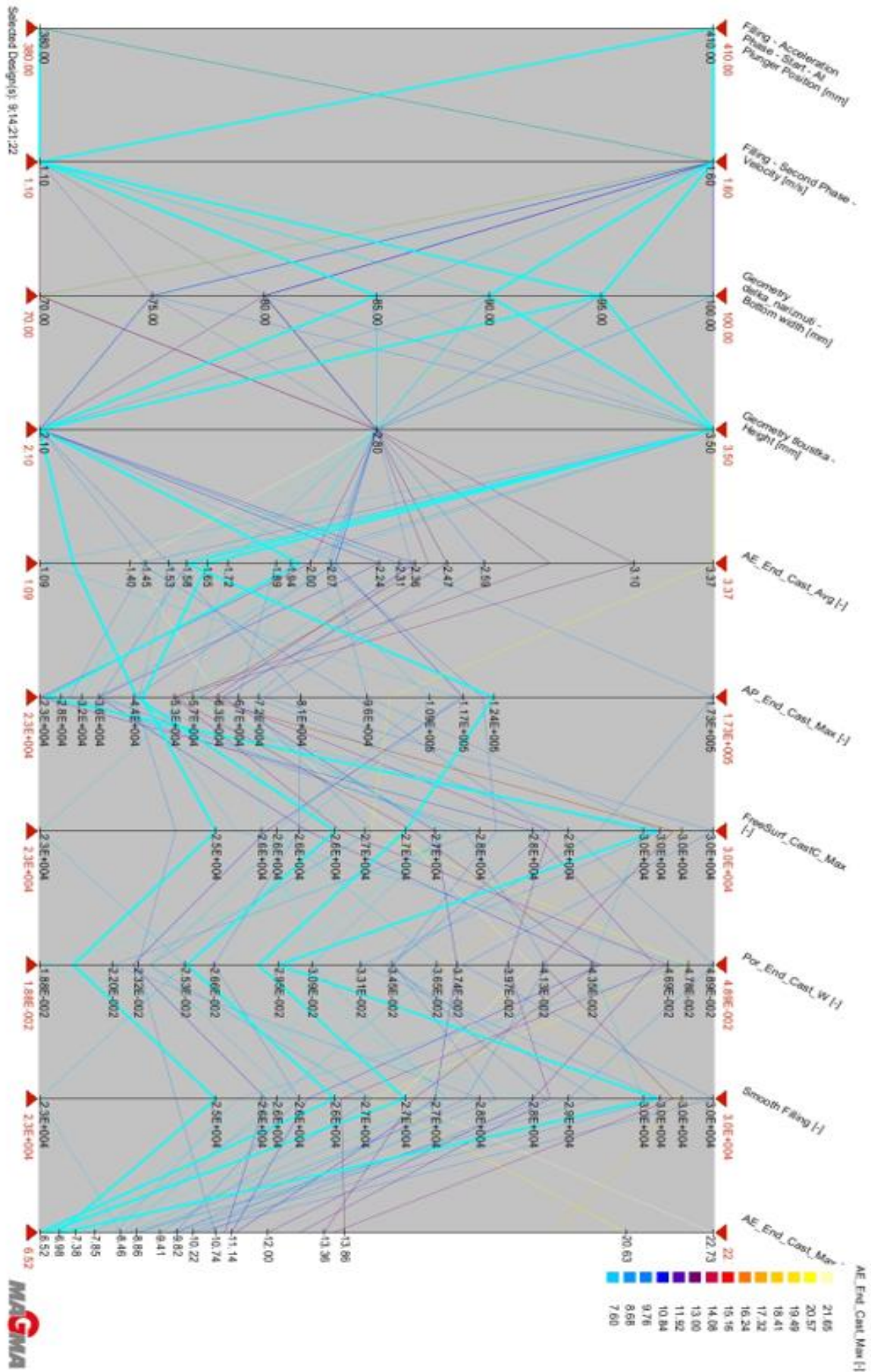
Ishikawův diagram – tlakové lití



Příloha 2: Parallel Coordinates pro varianty s nejlepší porozitou



Příloha 3: Parallel Coordinates graf pro varianty s nejlepším AE End Max



Bibliografie

- [1] VALECKÝ, Jindřich. *Lití kovů pod tlakem*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada strojír. lit.
- [2] NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. Rozvoj tlakového lití. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti.html>
- [3] BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-491-0.
- [4] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAHRADNÍK, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. *Technologie slévání, tváření a svařování*. První. Praha: Editační středisko ČVUT, 1982.
- [5] STREET, Arthur. *The diecasting book*. 2nd ed. Redhill: Portcullis Press, 1986. ISBN 0-86108-235-4.
- [6] JOLLY, M. Castings. *Comprehensive Structural Integrity* [online]. Elsevier, 2003, s. 377-466 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1016/B0-08-043749-4/01070-3. ISBN 9780080437491. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0080437494010703>
- [7] KUPEC, Lukáš a Aleš HERMAN. *Analýza licího cyklu technologie lití pod tlakem* [online]. In: . Praha, b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/history/2008/sbornik/Papers/S3/Kupec_Lukas_12133.pdf
- [8] HYNEK, Martin, Miroslav GRACH a Jiří BENDA. *Tlakové lití hliníku* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf
- [9] *Slévárny: časopis pro slévárenský průmysl*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 2018. ISSN 0037-6825.
- [10] Cold Chamber Die Casting. In: *Dynacast* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/cold-chamber-die-casting>
- [11] Cold Chamber Die Casting. In: *The Library of Manufacturing* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://thelibraryofmanufacturing.com/cold_chamber_diecasting.html
- [12] Hot Chamber Die Casting. In: *Dynacast* [online]. Dynacast, b.r. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/hot-chamber-die-casting>
- [13] Hot Chamber Die Casting. In: *The Library of Manufacturing* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://thelibraryofmanufacturing.com/hot_chamber_diecasting.html
- [14] KOPELIOVICH, Dmitri. Squeeze Casting. In: *Subtech: Dr. Dmitri Kopeliovich* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=squeeze_casting

- [15] HERMAN, Aleš. *Squeeze Casting - Jedná se o novou technologii?* [online]. In: . Hradec nad Moravicí, 2003, s. 8 [cit. 2019-03-13].
- [16] GOVENDER, G., H. MÖLLER a O.F.R.A. DAMM. Semisolid Processes. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, s. 109-134 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00516-1. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321005161>
- [17] BRYKSI, Vlastimil. Rheocasting otevírá nové možnosti tlakově litých odlitků. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. MM průmyslové spektrum, 2014 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rheocasting-otevira-nove-moznosti-tlakove-litych-odlitku.html>
- [18] MIDSON, Stephen a Andrew JACKSON. A comparison of Rhixocasting and Rheocasting. *Iftabira* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://www.iftabira.org/pdfs/22%20S.Midson_1360087497.pdf
- [19] Konstrukce formy pro tlakové lití. *Ústav strojírenské technologie ČVUT* [online]. Praha: Fakulta strojírenská ČVUT, b.r. [cit. 2019-03-13].
- [20] BUTLER, W.A., G. TIMELLI, E. BATTAGLIA a F. BONOLLO. Die Casting (Permanent Mold). *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. Elsevier, 2016 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.03555-4. ISBN 9780128035818. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818035554>
- [21] HERMAN, E.A. *Die Casting Process Control* [online]. Arlington Heights: NADCA, 2012 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.diecasting.org/education/online/courses/publications/e410.pdf>
- [22] BRANDEN, Jack. Cycle and Monitor Press: Process Monitoring. *Copper Development Association Inc.* [online]. Valley View, Ohio, USA, b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/education/motor-rotor/production/proc11/process_11_116.html
- [23] Aluminium Die Casting. *Dynacast* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/aluminum-die-casting>
- [24] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [25] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [26] Primary Aluminium: Alloys for Pressure Die Casting. *Rheinfelden Alloy* [online]. RHEINFELDEN ALLOYS, 2016, **2016**, 72 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://rheinfelden-alloys.eu/wp-content/uploads/2017/01/Handbook-Die-Casting-Aluminium-Alloys_RHEINFELDEN-ALLOYS_2016_EN.pdf
- [27] PODRÁBSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ a Karel NĚMEC. Neželezné kovy a jejich slitiny. In: *Slide Share* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2894537/>

- [28] *Katalog vad odlitků ze slitin hliníku*. Vydání 1. Praha: Česká slévárenská společnost, z.s., 2018. ISBN isbn978-80-02-02817-8.
- [29] BRUNKE, Oliver a Daniel STRÍČEK. Analýza defektů a měření rozměrů s CT v μm přesnosti. In: *DPS* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: DPS, GE Measurement & Control, 2012 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:11950/analyza-defektu-a-mereni-rozmeru-s-ct-v-m-presnosti>
- [30] KRŇÁVEK, Václav a František STRÍTECKÝ. *Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad*. Slévarenství 2007, 2007.
- [31] Ishikawův diagram. *ManagmentMania.com* [online]. Wilmington (DE) 2011-2019, 2015 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/ishikawuv-diagram>
- [32] Ishikawa diagram. In: *Vlastní Cesta* [online]. 2012 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.vlastnicesta.cz/metody/ishikawa-diagram-1/>