



# Simulační výpočty nízkotlakého lití tělesa spojky ze slitiny Al-Si

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály  
*Autor práce:* **Bc. Roman Slanina**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Machuta, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Roman Slanina**  
Osobní číslo: **S14000300**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**  
Název tématu: **Simulační výpočty nízkotlakého lití tělesa spojky ze slitiny Al-Si**  
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s technologií nízkotlakého lití do kovových forem a s parametry, které tuto technologii ovlivňují. Tyto technologie lze uplatnit pro výrobu odlitků z Al- slitin.
2. Prostudujte podklady stávající výroby tělesa spojky a shromážděte veškeré vstupní parametry procesu.
3. Seznamte se se simulačním softwarem Magma 5 a proveďte simulační výpočty technologie nízkotlakého lití odlitku tělesa spojky za pomoci tohoto softwaru.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a doporučte úpravu procesních případně technologických parametrů s ohledem na eliminaci potenciálních vad odlitku.
5. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.



Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


- [1] SLOVÁK, S., RUSÍN, K.: *Teorie slévání*, SNTL, Praha, 1990.
- [2] MACHUTA, J., NOVÁ, I.: *Slévárenské formy*, Technická univerzita v Liberci, 2014, ISBN 978-80-7494-083-5.
- [3] VETIŠKA, A. a kol.: *Teoretické základy slévárenské technologie*. 1. vyd. Praha, 1974.
- [4] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Machuta, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **31. března 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá simulačními výpočty a jejich využití při zvyšování kvality výroby tělesa hydraulické spojky ze slitiny hliníku vyráběného technologií nízkotlakého lití. Práce je rozdělena na dvě hlavní části, teoretickou a experimentální. Teoretická část popisuje základní vlastnosti slitin hliníku se zaměřením na slitinu AlSi7Mg0,3, ze které je těleso spojky vyrobeno. Dále práce popisuje základní princip technologie nízkotlakého lití. V teoretické části jsou popsány i slévárenské vady, které vznikají při výrobě danou technologií. Experimentální část je zaměřena na provedení simulačních výpočtů výroby tělesa hydraulické spojky pomocí simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Tato část obsahuje vyhodnocení výsledků simulačních výpočtů procesu lití. Následně jsou vady predikované simulačním softwarem porovnány s vadami na reálných odlitcích. V poslední části jsou navrženy varianty, které by zajistily zvýšení kvality této produkce. Pro navržené úpravy lícího procesu jsou opět provedeny simulační výpočty s jejich vyhodnocením.

### Klíčová slova

Technologie nízkotlakého lití, slitiny hliníku, vady odlitků, simulace

---

## Abstract

This thesis deals with simulation calculation and their use in improving the quality of production of the hydraulic clutch of aluminium alloy produced by low-pressure die casting technology. The thesis consists of two basic parts, theoretical and experimental. Theoretical part describes the basic properties of aluminium alloys with a focus on AlSi7Mg0,3 alloy which the clutch body is made. It also describes the basic principle of low-pressure casting technology. In the theoretical part are described castings defects, which arise during the production of technology low-pressure die casting. The experimental part is focused on the execution of simulation calculation the production of hydraulic clutch with simulation software MAGMA<sup>5</sup>. This part contains an evaluation of the results of simulation calculation casting process. The defects are predicted by the simulation software and compared with defects on real castings. In the last part are designed more variants that would ensure an increase the production quality. For the designed variants of the casting process are processed simulation calculations with their evaluation of the results.

### Key words

Low pressure die casting technology, aluminium alloys, castings defects, simulation

---

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za cenné rady a věnovaný čas při zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Milanu Luňákovi a celému technologickému oddělení firmy BENEŠ a LÁT a.s. za konzultaci a poskytnuté informace potřebné při zpracování diplomové práce. V další řadě patří mé poděkování Ing. Davidu Jelínkovi z firmy MAGMA Gießereitechnologie GmbH a dalším pracovníkům pobočky v Pardubicích.

*Diplomová práce vznikla na základě podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.*

---

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Teoretická část .....	11
2.1	Slévárenské slitiny hliníku .....	11
2.1.1	Slitiny Al-Si .....	12
2.2	Charakteristika technologie nízkotlakého lití .....	17
2.3	Slévárenské vady .....	20
2.3.1	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti .....	25
2.3.2	Vady povrchu .....	26
2.3.3	Porušení souvislosti .....	27
2.3.4	Dutiny .....	28
2.3.5	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury .....	31
2.3.6	Vady mikrostruktury .....	31
2.3.7	Vady chemického složení a vlastností odlitků .....	32
3	Experimentální část .....	33
3.1	Simulační výpočet procesu lití .....	33
3.1.1	Příprava podkladů .....	34
3.1.2	Příprava procesu lití v simulačním programu .....	39
3.2	Vyhodnocení simulace výrobního procesu .....	45
3.2.1	Vyhodnocení simulačního výpočtu plnění formy .....	45
3.2.2	Vyhodnocení simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitku .....	49
3.3	Vady reálných odlitků predikovaných simulačním výpočtem ..	54
3.4	Návrh a vyhodnocení optimalizačních variant .....	56
3.4.1	Varianta 2 .....	57
3.4.2	Varianta 3 .....	58



3.4.3	Varianta 4.....	60
4	Diskuze výsledků.....	63
5	Závěr .....	65
	Použitá literatura.....	67
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek.....	70
	Seznam příloh .....	71

## Seznam použitých zkratek

HB, HBS	tvrdost podle Brinella
t	teplota
Rm	mez pevnosti v tahu
Rp <sub>0,2</sub>	smluvní mez kluzu v tahu
A <sub>5</sub> , A <sub>50</sub>	tažnost na délce vzorku 5 mm a 50 mm
*.sat	formát souboru Standard ACIS Text
Rh <sub>0</sub>	hustota
c <sub>p</sub>	měrná tepelná kapacita
HTC	teplotně závislý koeficient přestupu tepla

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou simulačních výpočtů odlévání výrobku ze slitiny hliníku za použití technologie nízkotlakého lití.

V dnešní době význam numerických simulací výrazně roste ve všech odvětvích strojírenské výroby, včetně slévárenství. Slévárny se stále častěji přiklání k optimalizaci slévárenského procesu odlévání svých odlitků na základě výsledků simulačních výpočtů plnění forem a tuhnutí odlitků.

Odlitek, kterým se zabývá tato diplomová práce, byl vybrán na základě spolupráce s firmou BENEŠ a LÁT a.s. a jejich požadavcích na snížení procentuálního počtu vadných odlitků. Simulační výpočet obsažený v této práci je jedním z pilotních projektů řešených ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. při zavádění nového simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup> v této firmě.

Cílem této práce je provedení matematického výpočtu výroby odlitků pomocí simulačního softwaru. Výpočet musí odpovídat reálným podmínkám v této slévárně, proto bylo potřeba se důkladně seznámit s provozem ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. Následně budou navrženy a zpracovány možné kroky ke snížení zmetkovitosti vybraného odlitku. Tato práce bude sloužit i jako referenční projekt pro další simulační výpočty ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s.

Výhodou technologie nízkotlakého lití je velmi vysoké využití tekutého kovu. Oproti gravitačnímu lití je možno odlévat díly s menší tloušťkou stěny. Výhodou je minimální výskyt slévárenských vad podmíněný dobře zvládnutou technologickou částí výroby.

Odlitek řešený v této práci je součástí hydraulické spojky nákladních automobilů. Díly tohoto druhu musí splňovat nejpřísnější požadavky jak na rozměrovou přesnost, tak i na vnitřní jakost odlitku. Jedná se o funkční díl pracující se značnými tlaky hydraulické kapaliny, tudíž je požadavek na 100% těsnost odlitku. Kvůli předešlým požadavkům nesmí daný výrobek obsahovat nepřijatelné slévárenské vady.

## 2 Teoretická část

Teoretická část je rešeršní částí dané problematiky a slouží pro stanovení základních poznatků potřebných pro experimentální část této práce. Kapitola 2.1 popisuje slévárenské slitiny hliníku, které se běžně používají pro slévárenské technologie, jejich základní vlastnosti a rozdělení. Kapitola 2.1.1 se detailněji zaměřuje na slitiny Al-Si a konkrétně na slitinu AlSi7Mg0,3, ze které je vyrobený odlitek vybraný pro experimentální část této diplomové práce. Kapitola 2.2 se zabývá popisem technologie nízkotlakého lití slitin hliníku do kovových forem. V poslední kapitole teoretické části práce jsou popsány nejčastější slévárenské vady vyskytující se u odlitků ze slitin hliníku vyráběných technologií nízkotlakého lití do kovových forem.

### 2.1 Slévárenské slitiny hliníku

Hliník je kov, který patří do skupiny neželezných kovů a krystalizuje v plošně centrované krystalické mřížce. Čistý hliník má nízkou hustotu ( $2699 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), teplota tání je  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ze slévárenského hlediska je také významná poměrně vysoká měrná tepelná kapacita hliníku ( $0,9 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a vysoké skupenské teplo tání ( $395 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Důsledkem těchto vysokých hodnot je značná energetická náročnost tavení hliníkových slitin. Hliník vyrobený hutním způsobem má čistotu až 99,9 % a vždy obsahuje nečistoty z prvovýroby (Fe, Si, Cu, Mg, atd.) Takovýto čistý hliník se vyznačuje malou pevností, kdy mez pevnosti dosahuje cca 100 MPa, dále tvrdostí HB 40, špatnou obrobitelností a velmi špatnou slévatelností. Proto je vhodné pro slévárenské potřeby používat jeho slitiny. Slévárenské slitiny hliníku lze rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné. Vytvrditelné slitiny obsahují přísadové prvky, které vytváří tzv. intermetalické fáze ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ), které umožňují tepelné zpracování odlitků – vytvrzování. [1, 2, 3]

Základní typy slévárenských slitin:

- Slitiny binární: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu
- Slitiny ternární: Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Cu-Si, Al-Mg-Si
- Slitiny s dalšími přísadovými prvky: Ni, Mn, Ti, Zn, Co

Tab. 1 – Značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706 [3]

Skupina slitin	Číselné označení	Označení chemickými značkami
AlCu	EN AC-21xxx	EN AC-Al Cu <sub>4</sub>
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si <sub>2</sub> MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42xxx	EN AC-Al Si <sub>7</sub> Mg <sub>0,3(0,6)</sub>
AlSi10Mg	EN AC-43xxx	EN AC-Al Si <sub>10(9)</sub> Mg
AlSi	EN AC-44xxx	EN AC-Al Si <sub>12(11)</sub>
AlSi5Cu	EN AC-45xxx	EN AC-Al Si <sub>6(5)</sub> Cu <sub>4(3,1)</sub>
AlSi9Cu	EN AC-46xxx	EN AC-Al Si <sub>9(7,11)</sub> Cu <sub>3(2,1)</sub>
AlSi(Cu)	EN AC-47xxx	EN AC-Al Si <sub>12</sub> Cu
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si <sub>12</sub> CuNiMg
AlMg	EN AC-51xxx	EN AC-Al Mg <sub>3(5,9)</sub>
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn <sub>5</sub> Mg

### 2.1.1 Slitiny Al-Si

Tato diplomová práce se zabývá výrobou odlitku ze slitiny typu Al-Si, konkrétně EN AC-AlSi7Mg<sub>0,3</sub>. Z tohoto důvodu budou v další části této práce popsány vlastnosti a charakteristiky dané slitiny. Slitiny Al-Si neboli siluminy patří mezi nejdůležitější slévárenské slitiny hliníku.

Křemík má v hliníku velmi nízkou rozpustnost. Při eutektické teplotě je rozpustnost křemíku přibližně 1,65 % a při teplotě 300 °C je rozpustnost křemíku jen 0,22 %. Slévárenské slitiny vždy obsahují více křemíku, než je jeho maximální rozpustnost. Slévárenské slitiny tak vždy obsahují eutektikum  $\alpha(\text{Al})\text{-Si}$ . Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 % Si a eutektická teplota je 577 °C. [1, 3, 4]

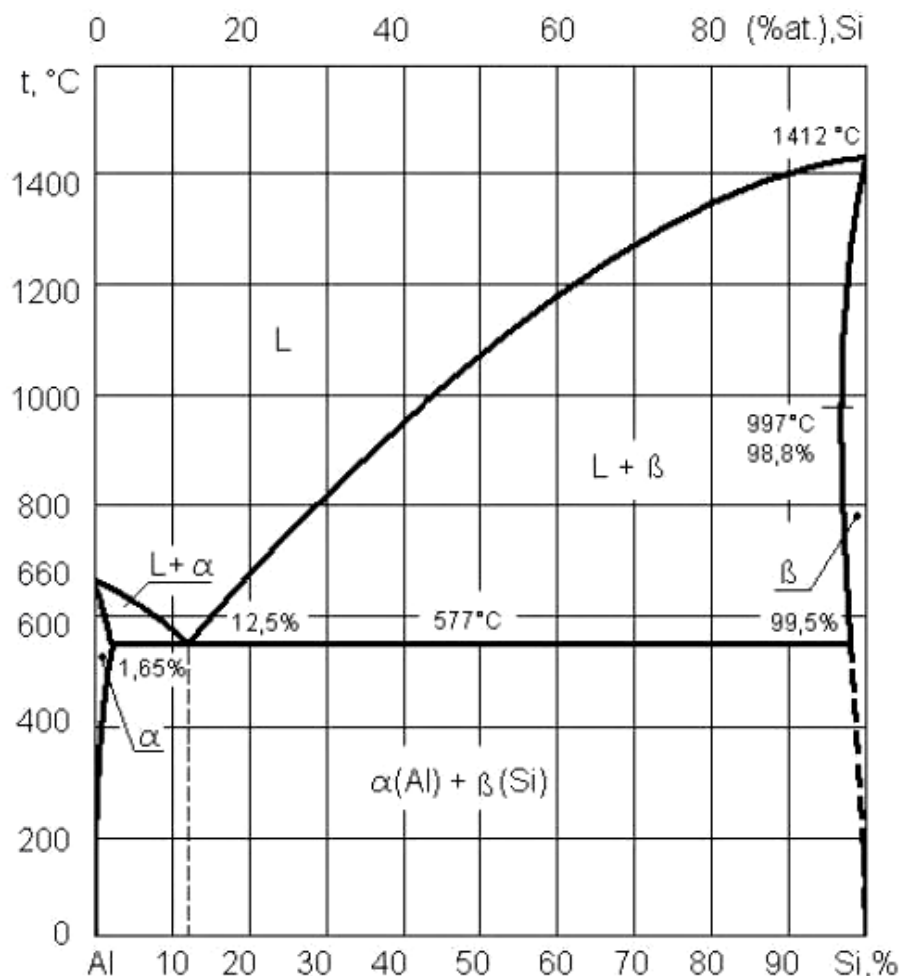
Obr. 1 znázorňuje rovnovážný diagram Al-Si podle něhož dělíme slitiny na tři druhy:

- a) Podeutektické
- b) Eutektické
- c) Nadeutektické

Podeutektické slitiny mají obsah křemíku v rozmezí 5 – 11%. Tyto slitiny se vyznačují dobrými slévárenskými vlastnostmi. [3]

Eutektické slitiny mají obsah křemíku blízko eutektickému bodu (12,5 %). Většinou mají eutektické slitiny 11,5 – 13 % obsahu křemíku. Tyto slitiny se vyznačují nejlepšími slévárenskými vlastnostmi a vysokou pevností. [3]

Nadeutektické slitiny Al-Si mají obsah křemíku vyšší než 12,5 %, většinou do 14 % Si, výjimečně se používají i slitiny s vyšším obsahem Si. Tyto slitiny mají nejvyšší tvrdost. [3]

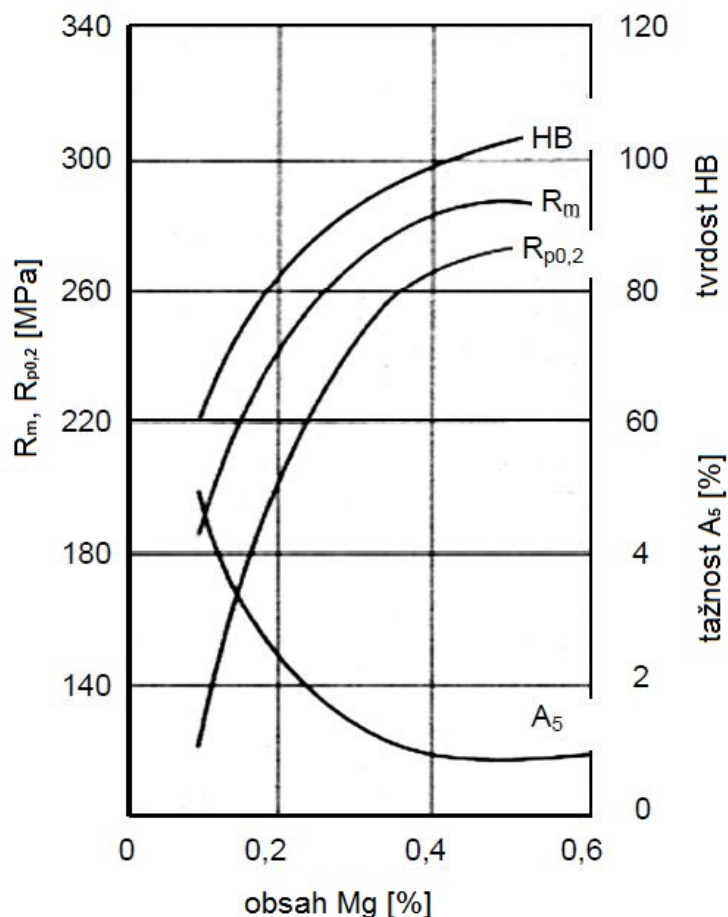


Obr. 1 – Rovnovážený diagram Al-Si [1]

### Slitiny Al-Si-Mg

Slitiny tohoto druhu jsou charakteristické obsahem hořčíku v rozmezí 0,25 – 0,70 %. Hořčík obsažený ve slitině umožňuje provádět vytvrzování za tepla, protože ve slitině vzniká intermetalická fáze  $Mg_2Si$ . V litém stavu jsou mechanické vlastnosti pouze průměrné, vysoké mechanické vlastnosti ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ , HB) se získávají následným vytvrzováním, mírně však klesá tažnost. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické slitiny a dělí se na dva typy podle obsahu křemíku  $AlSi7Mg$  a  $AlSi10(9)Mg$ . [3]

Ze slitin  $AlSiMg$  se odlévají vysoce namáhané výrobky. Na Obr. 2 je zobrazena grafická závislost obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny  $AlSi9Mg$ . Je vidět, že se vzrůstajícím obsahem hořčíku roste mez pevnosti v tahu a mez kluzu. Zvyšuje se také tvrdost slitiny, naopak výrazně klesá tažnost. [3]



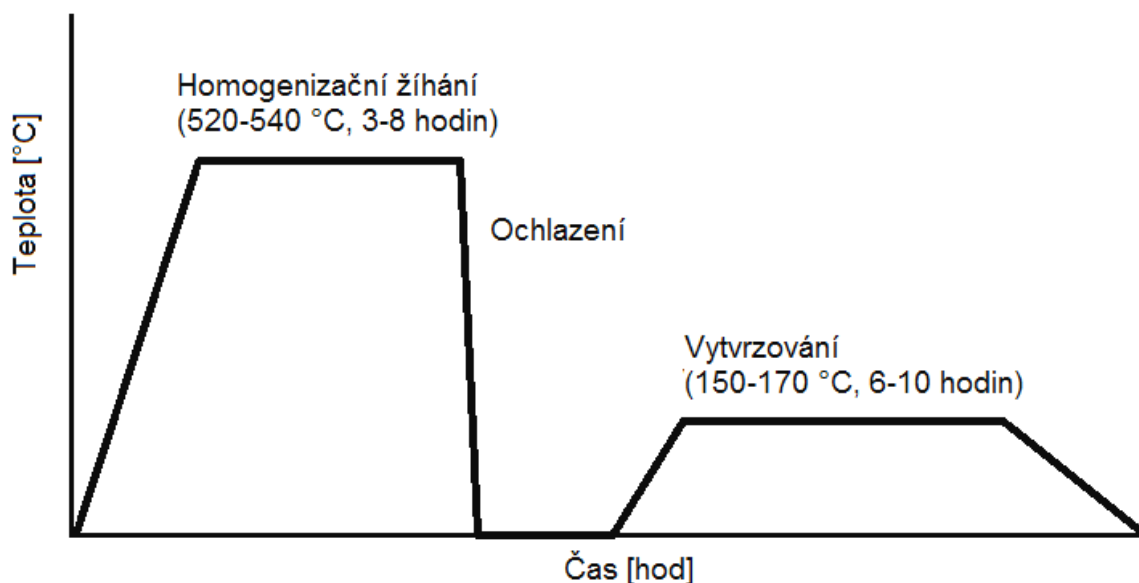
Obr. 2 – Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny  $AlSi9Mg$  po vytvrzení [3]

### **Vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3**

Slitina AlSi7Mg0,3 je vysokopevnostní slitina s dobrou tažností a houževnatostí. Vyznačuje se velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, obrobiteľnosť i svaiteľnosť. Nejčastěji se odlévá gravitačně nebo nízkotlakým způsobem, a to jak do pískových forem, tak i do kovových forem. Tato slitina patří mezi vytvrditelné slitiny. Díky vytvrzování získá svoje velmi dobré pevnostní vlastnosti. [3]

Vytvrzování je nejdůležitější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin. Pomocí vytvrzování se dosahuje zvýšení meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti. Po vytvrzení klesá tažnost slitin. Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žíhání, což je ohřev na teploty 10 – 15 °C pod eutektickou teplotou a výdrž na této teplotě po dostatečně dlouho dobu, obvykle 3 – 6 hodin. Po rozpouštěcím žíhání následuje rychlé ochlazení, nejčastěji do vodní lázně. Je dobré zajistit víření lázně, aby nedocházelo ke vzniku parního polštáře, a tím ke snížení ochlazovacího účinku. Po ochlazení odlitků následuje precipitační vytvrzování (stárnutí). Precipitační vytvrzování může probíhat za tepla (umělé stárnutí) nebo za studena (přirozené stárnutí). Vytvrzování za tepla obvykle probíhá v rozmezí teplot 140 – 180 °C po dobu 3 – 8 hodin. Při vytvrzování za studena je zvýšení mechanických vlastností dosaženo při teplotě okolí za desítky hodin (až 150 hodin). Na Obr. 3 je zobrazen příklad pracovního diagramu tepelného zpracování slitin Al-Si-Mg při vytvrzování za tepla s orientačními hodnotami teplot a časů. [3, 4]





Obr. 3 – Pracovní diagram vytvrzování slitin Al-Si-Mg za tepla [3]

Výrobky odlévané z této slitiny se používají v leteckém a raketovém průmyslu, na díly motorů, jako součástky podvozků, litá kola a další díly, které vyžadují vysoké mechanické vlastnosti. [4]

Následující tabulky ukazují chemické složení a vybrané mechanické i technologické vlastnosti slitiny EN AC- $\text{AlSi7Mg0,3}$  podle normy ČSN EN 1706

Tab. 2 – Chemické složení slitiny [5]

Chemické složení [%hm]							Obsah nečistot [%hm]
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Celkem
6,5-7,5	0,19	0,05	0,10	0,25-0,45	0,07	0,08-0,025	0,10

Tab. 3 – Mechanické vlastnosti slitiny [5]

[ $R_m$  – mez pevnosti,  $R_{p0,2}$  – smluvní mez kluzu,  $A_{50}$  – tažnost na 50 mm délky, HBS – tvrdost podle Brinella (EN 10003-1)]

Stav slitiny	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{50}$ [%]	HBS
T6	290	210	4	90
T64	250	180	8	80

Tab. 4 – Technologické vlastnosti slitiny [5]

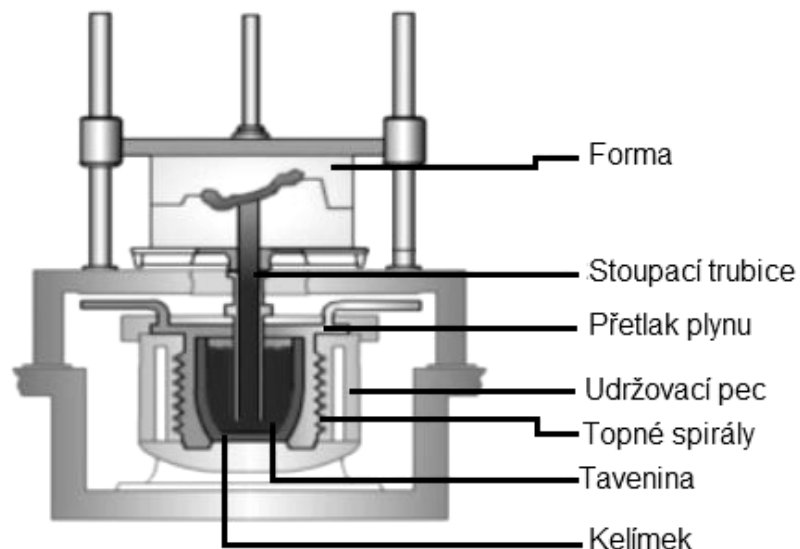
[A – výborné, B – značně dobré, C – dobré, D – nízké]

Slévárenské vlastnosti	Zabíhavost	B
	Odolnost proti vzniku trhlin	A
	Nepropustnost	B
Technologické vlastnosti	Obrobitelnost	B
	Svařitelnost	B
	Odolnost proti korozi	B
	Anodická oxidace	D

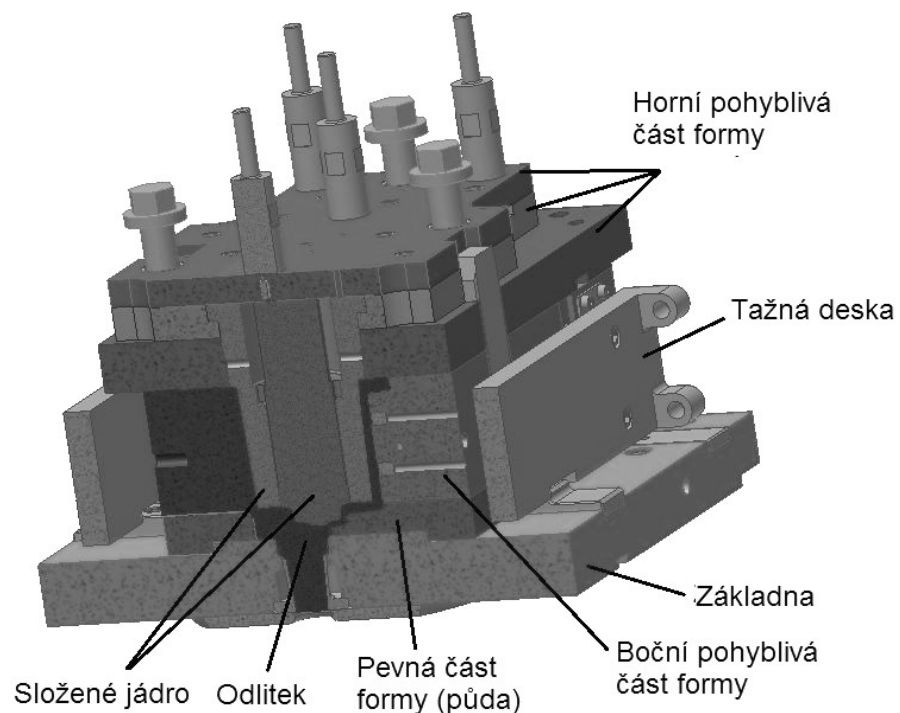
## 2.2 Charakteristika technologie nízkotlakého lití

Nízkotlaké lití do kovových forem je jednou z mnoha technologií výroby odlitků. Nízkotlaká technologie lití odlitků je charakteristická tím, že plnění dutiny slévárenské formy taveninou probíhá za působení tlaku vzduchu na hladinu taveniny v udržovací peci. Působením tlaku na hladinu taveniny je tavenina vytlačována stoupací trubicí do dutiny formy. Plnění dutiny formy probíhá klidně. Obr. 4 znázorňuje nízkotlaký stroj. Stroj se skládá z hermeticky uzavřené udržovací pece, ve které se udržuje kov v tekutém stavu (samotné tavení probíhá v tavicích pecích). Vytápění udržovací pece je zpravidla realizováno pomocí odporového vinutí. Další částí stroje

je zařízení, které nám zajistí tlakový plyn (vzduch). Z udržovací pece vede stoupací trubice, která dopravuje taveninu do dutiny formy. Forma musí být minimálně dvoudílná, kdy horní část formy je pohyblivá a spodní část formy je pevná. Dle složitosti odlitku může být forma vícedílná, popřípadě s jádry, poté jsou potřeba boční tahače a další prvky pro ovládání formy (Obr. 5). [3, 6, 7]



Obr. 4 – Schéma nízkotlakého lití [8]



Obr. 5 – Slévárenská kovová forma pro nízkotlaké lití [10]

Na Obr. 6 je vidět postup výroby odlitku nízkotlakou technologií. Na detailu 1 (Obr. 6) dochází k uzavření formy, horní část formy je pohyblivá a spodní část formy je pevná. Detaily 2 a 3 znázorňují působení tlaku na hladinu taveniny a stoupání taveniny stoupačí trubicí do dutiny formy. V detailu 4 je dutina již vyplněná a působí zde dotlak. Detail 5 zobrazuje odtlakování formy, po kterém následuje tuhnutí a chladnutí odlitku. Když odlitek zchladne na požadovanou teplotu, dochází k otevření formy a vyjmutí odlitku. Po vyjmutí odlitku a případném ošetření formy se celý proces opakuje.



Obr. 6 – Schéma výroby odlitku nízkotlakou technologií [11]

Výhodou této technologie je velmi vysoké využití tekutého kovu. Při ideální konstrukci formy a správném řízení výrobního procesu se dá dosáhnout využití kovu až 95 %, protože není potřeba nalitkovat jako při gravitačním odlévání. Oproti gravitačnímu lití je možno odlévat díly

s menší tloušťkou stěny. Výhodou je minimální výskyt slévárenských vad podmíněný dobře zvládnutou technologickou částí výroby. Nízká vnitřní porozita je dána klidným plněním dutiny formy. Vysoká kvalita odlitků umožňuje využít nízkotlakou technologii pro výrobu dílů s vysokými požadavky na bezpečnost. Odlitky vykazují vysokou přesnost, dobré mechanické vlastnosti a kvalitní povrch. S výhodou je tato technologie používána při výrobě odlitků symetrických kolem rotační osy. Typickým představitelem odlitku vyráběného technologií nízkotlakého lití jsou kola pro osobní automobily, dále se touto technologií vyrábějí např. části motorů, převodovek, vlnovody pro radiolokátory, apod. [1, 3, 6,]

## 2.3 Slévárenské vady

Slévárenské vady se vyskytují při použití všech slévárenských technologií, samozřejmě i při použití technologie nízkotlakého lití odlitků. Problematika vad odlitků je velice rozsáhlá a komplikovaná. Určování druhů vad, jejich přípustnost či nepřípustnost, určení faktorů, které vedly k jejich vzniku, nebo stanovení kroků potřebných k jejich odstranění je náročný úkol spojený s dlouhodobou praxí a znalostí dané výroby. [12, 13]

Za vadu odlitku se považuje každé nedodržení rozměrů, hmotnosti, vzhledu, struktury, celistvosti, chemického složení nebo nedodržení mechanických a fyzikálních vlastností od příslušných norem, výkresů a technických podmínek smluvených se zákazníkem. Vady odlitků dělíme na přípustné, nepřípustné a dále na odstranitelné nebo neodstranitelné. [12, 14]

Přípustná vada je taková neshoda, která je dle daných norem či technických podmínek akceptovatelná nebo ji tyto dokumenty výslovně nezakazují. Nepřípustnou vadou neodstranitelnou se rozumí odchylka od daných norem či technických podmínek, kterou nelze odstranit opravením, nebo jejíž oprava je podle daných dokumentů nepřípustná. Odstranitelnou vadou je odchylka na odlitku od daných norem či technických podmínek, kterou je dovoleno, po dohodě s odběratelem, odstranit jen speciálními úpravami a nepředpokládanými výrobními postupy. [12, 14]

Další dělení rozděluje vady na zjevné a skryté. Zjevnou vadou se rozumí taková vada, kterou lze odhalit vizuálně při prohlídce neobrobeného odlitku, nebo jednoduchými pomocnými měřidly. Skrytou vadou odlitku lze odhalit až po obrobení odlitku nebo speciálními detekčními přístroji a laboratorními zkouškami. Takovéto vady se nacházejí většinou uvnitř odlitku. [12, 14]

Při výskytu vady na odlitku je důležité správné stanovení druhu vady, od kterého pak probíhá další činnost k určení původu vady, stanovení příčin a prostředků nutných k zabránění jejího vzniku. Na základě těchto požadavků byla vytvořena národní norma vad ČSN 42 1240 vydaná v roce 1955. Na základě nových poznatků byla v pozdější době (1987) vytvořena nová klasifikace vad (viz Tab. 5), kterou se v dnešní době řídí většina sléváren. [12]

Tab. 5 – Seznam tříd, skupin a druhů vad odlitků [12]

<b>Třída vad</b>		<b>Skupina vad</b>			<b>Druh vady</b>
<i>Pořad. č.</i>	<i>Název</i>	<i>Pořad. č.</i>	<i>Název</i>	<i>Pořad. č.</i>	<i>Název</i>
<b>100</b>	<i>Vady tvaru, rozměru a hmotnosti</i>	110	Chybějící část odlitku bez lomu	111	Nezaběhnutí
				112	Nedolití
				113	Vytečený kov
				114	Špatná oprava formy
				115	Přetryskaný odlitek
				116	Omačkání, potlučení, pohmoždění
				117	Nesprávně upálený, odřezaný odlitek
		120	Chybějící část odlitku s lomem	121	Ulomené části odlitku za tepla
				122	Ulomené části odlitku za studena
				123	Vyštípnutí

		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar	131	Špatný model		
				132	Přesazení		
				133	Nevyhovující rozměry		
				134	Zborcení, deformace		
		140	Nedodržení hmotnosti odlitků				
		<b>200</b>	<i>Vady povrchu</i>	210	Přípečeniny	211	Drsný povrch
						212	Povrchové přípečeniny
						213	Hluboké přípečeniny, zapečeniny
				220	Zálupy	221	Zálupy na horní ploše formy
						222	Zálupy na dně formy
223	Zálupové síťový						
230	Nárosty			231	Vyboulení		
				232	Odření, shrnutí		
				233	Eroze		
240	Výronky						
250	Výpotky						
260	Zatekliny			261	Zatekliny způsobené netěsností formy		
				262	Prasklé jádro		
				263	Prasklá forma		
				270	Nepravidelnost povrchu odlitku	271	Pomerančová kůra
272	Zvrásnění povrchu						
273	Neštovice místní a čárové						
274	Okujení, opálení						

				275	Krupičky
				276	Ďolíčková a kanálková koroze
				277	Chemická koroze
		280	Vady povrchové ochrany odlitku		
<b>300</b>	<i>Porušení souvislosti</i>	310	Trhliny	311	Povrchové trhliny
				312	Podpovrchové trhliny
				313	Vnitřní trhliny
		320	Praskliny		
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku	331	Lom za tepla
				332	Lom za studena
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu	341	Zavaleniny
				342	Nedokonalý svar
		<b>400</b>	<i>Dutiny</i>	410	Bubliny
412	Bubliny způsobené vodíkem				
413	Bubliny způsobené dusíkem				
414	Zahlcený plyn				
415	Síťkovité bubliny				
420	Bodliny				
430	Odvařeniny			431	Odvařeniny od formy, jádra
				432	Odvařeniny od chladítek a zalévaných předmětů
				433	Odvařeniny od vměstků
440	Staženiny			441	Otevřené staženiny



				442	Vnitřní, uzavřené staženiny
				443	Řediny
				444	Staženiny od jader nebo ostrých hran formy
				445	Povrchové propadliny
				446	Plynové staženiny
<b>500</b>	<i>Makroskopické vměšky a vady makrostruktury</i>	510	Struskovitost	511	Struskovitost exogenní
				512	Sekundární struskovitost
		520	Nekovové vměšky	521	Zadroběny
				522	Rozplavený písek
				523	Rozplavený nátěr
				524	Oxidické pleny
				525	Grafitové pleny
				526	Černé skvrny
		530	Makrosegregace a vycezeniny	531	Gravitační odmíšení
				532	Makroodmíšení
				533	Stvolové vycezeniny
				534	Mezerové vycezeniny
		540	Broky		
		550	Kovové vměšky		
560	Nevyhovující lom				
<b>600</b>	<i>Vady mikrostruktury</i>	610	Mikroskopické dutiny	611	Mikrostaženiny
				612	Mikroublíny
				613	Mikrotrhlíny
		620	Vměšky		
		630	Nesprávná velikost zrna		

		640	Nesprávný obsah strukturních složek
		650	Zatvrdlina, zákalka
		660	Obrácená zákalka
		670	Oduhličení povrchu
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury
<b>700</b>	<i>Vady chemického složení a vlastností odlitku</i>	710	Nesprávné chemické složení
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností
		740	Nevyhovující homogenita odlitku

Tato práce se zabývá analýzou vad, které vznikly na odlitcích vyrobených technologií nízkotlakého lití ve firmě BENEŠ a LÁT a.s. Z tohoto důvodu jsou dále popsány jen ty vady, které jsou typické pro technologii nízkotlakého lití hliníkových slitin do kovových forem.

### 2.3.1 Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti [14]

Tato třída vad obsahuje vady, které jsou jednoduše odhalitelné vizuálně, vážením, měřením, nebo porovnáním s jakostními odlitky (etalony).

#### **Skupina 110 – Chybějící část odlitku bez zlomu**

Vada 111 – Nezaběhnutí je vada charakterizovaná neúplným vytvořením tvaru odlitku. Zpravidla se tato vada objevuje u tenkostěnných odlitků. Příčinou nezaběhnutí bývá nízká teplota lití, dlouhá doba lití, malá rychlost lití, špatná konstrukce odlitku, nevhodná vtoková soustava, špatné odvodu vzduchu formy.

Další vady patřící do skupiny 110 a vyskytující se při výrobě technologií nízkotlakého lití vznikají následnými zpracovatelskými operacemi, patří sem omačkání, potlučení, nesprávně odřezaný a obroušený odlitek.

### **Skupina 130 – Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar**

Vada 132 – Přesazení je vada charakteristická posunutím jedné části tvaru odlitku proti druhé. Vzniká tak nesprávný obrys odlitku nebo různá tloušťka stěny. Příčinou této vady je většinou nesprávné složení formy.

Vada 133 – Nevyhovující rozměry, jedná se o zvětšení nebo zmenšení rozměrů odlitku oproti výkresové dokumentaci v takovém rozsahu, že jsou překročeny tolerance dané normami nebo domluvenými technickými podmínkami. Příčinou nevyhovujících rozměrů je nesprávné složení formy, chybné zhotovení jaderníku, chyby v určení smrštění atd.

Vada 134 – Zborcení, deformace je změna tvaru rozměrů odlitku vyvolané vnitřním pnutím vzniklým při nerovnoměrném tuhnutí a chladnutí odlitku. Ke zborcení může dojít i při tepelném zpracování.

### **Skupina 140 – Nedodržení hmotnosti odlitků**

Tato skupina se již dále nerozděluje. Nedodržení hmotnosti odlitku souvisí s nedodržením rozměrů odlitku. Druhou možností je nedodržení hmotnosti odlitku v důsledku velkého výskytu vnitřních dutin (bubliny, řediny, staženiny).

## **2.3.2 Vady povrchu [14]**

Vady povrchu lze zařadit mezi zjevné vady, které jsou odhalitelné vizuálně při prohlídce neobrobeného odlitku po otryskání a očištění. Tyto vady jsou většinou odstranitelné, ale jejich odstraňování je velice pracné a nákladné.

### **Skupina 260 – Zatekliny**

Vada 261 – Zatekliny způsobené netěsností formy jsou výčnělky a výronky různého tvaru a velikosti s hladkým povrchem. Tato vada se nejčastěji vyskytuje v dělicí rovině formy a podél známek jader. Zatekliny jsou jasně viditelné a oprava není náročná.

Další dvě vady patřící do skupiny zatekliny, jsou vady způsobené prasklým jádrem nebo prasklou formou.

### 2.3.3 Porušení souvislosti [14]

#### Skupina 310 – Trhliny

Vada 311 – Povrchové trhliny jsou jasně viditelné vady odlitku charakteristické svým křivolakým a zoxidovaným povrchem. Trhliny probíhají po hranicích zrn. Povrchové trhliny vznikají zejména v tepelných uzlech odlitku. Vznik vady tohoto druhu je vyvolán tahovými a smykovými silami v závislosti na schopnosti materiálu odolávat těmto napětím.

Vada 313 – Vnitřní trhliny jsou vady, které vznikají při chladnutí z vysokých teplot, nebo vznikají za nižších teplot při tepelném zpracování. Hlavní příčinou vnitřních trhlin jsou vysoké teplotní gradienty v průřezu odlitku, čímž dochází k rychlým změnám teplot, kde následkem jsou vysoká vnitřní pnutí. Je proto nutné snižovat teplotní rozdíly odlitku v průběhu celé výroby.

#### Skupina 320 – Praskliny

Tato skupina se dále nedělí. Jedná se o rovné, nebo slabě zakřivené roztržení stěny odlitku, vzniklé za nízkých teplot. Povrch praskliny je většinou čistý a zrnitý, někdy mírně zoxidovaný. Praskliny vznikají díky vnitřnímu napětí odlitku, které je způsobené velkými rozdíly teplot v různých částech odlitku při chladnutí. Nevhodné, z hlediska vzniku prasklin, jsou veliké rozdíly tloušťky stěn odlitku.

#### Skupina 340 – Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu

Vada 341 – Zavaleniny mají tvar rýh nebo prohlubenin se zaoblenými okraji. Mohou být pouze povrchové nebo procházet celou stěnou odlitku. Tato vada vzniká přerušeným litím, kdy se odlévaný kov ochladí a zoxiduje, při následném dolití se nový kov setká s dřívějším studeným a zoxidovaným kovem a nespojí se s ním. Zavaleniny také může způsobovat malá licí rychlost ve spojení s nízkou licí teplotou. Poslední možnost vzniku zavalenin je v případě, kdy se proud kovu nevhodným způsobem rozdělí a po setkání se z důvodů ochlazení a zoxidování již nespojí.

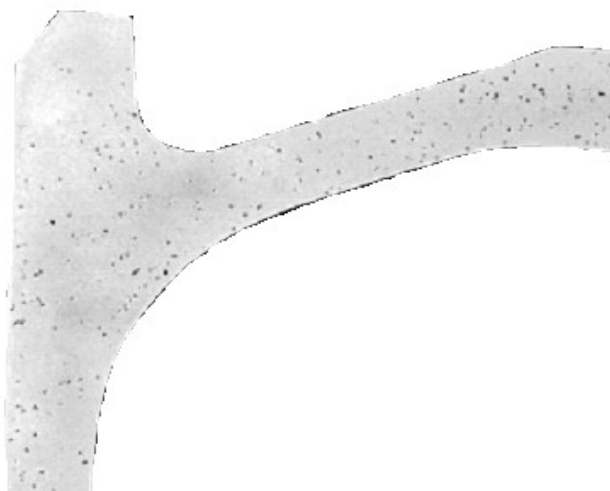
### 2.3.4 Dutiny [13, 14]

Dutiny patří mezi nejčastější vady odlitků. Jsou to vady snadno zjištělné prohlídkou odlitku nebo nedestruktivní kontrolou. Odlitky s těmito vadami jsou většinou neopravitelné. Dutiny jsou způsobovány přítomností plynů v kovech, ve formě a objemovými změnami při tuhnutí odlitku.

#### Skupina 410 – Bubliny

Bublínami se rozumí vady odlitku, které jsou buď otevřené, nebo uzavřené. Vyskytují se jednotlivě nebo ve shlucích.

Vada 412 – Bubliny způsobené vodíkem (Obr. 7) jsou způsobené nedostatečným odplyněním taveniny. S klesající teplotou kovu při odlévání klesá rozpustnost vodíku v kovu. Vodík se během krystalizace vylučuje ve formě bublin a plynové porózity. K omezení vzniku této vady je nutné používat suché a čistě vstupní suroviny a provádět odplynování taveniny.



Obr. 7 – Bubliny způsobené vodíkem [10]

Vada 414 – Zahlcený plyn vytváří dutiny s hladkými, zaoblenými stěnami ve tvaru zploštělých a rozměrných bublin. Tato vada se vytváří na povrchu odlitku a jsou ve většině případů otevřené. Vyskytují se jednotlivě, nebo ve shlucích. Vada bývá způsobená nevhodnou konstrukcí formy a to zejména nedostatečným odvětráním formy a jádra. Je tedy nutné zajistit, aby při odlévání byl vzduch a vznikající plyny vytlačeny tekutým kovem. Vysoká licí rychlost také přispívá k zahlcení plynů do tekutého kovu,

protože plyny nemají čas uniknout. U technologie nízkotlakého lití také může docházet k této vadě vlivem prasklé stoupací trubice. Poté vznikají uzavřené bubliny v místě vtoku (Obr. 8).



Obr. 8 – Zahlcený plyn [10]

### **Skupina 430 – Odvařeniny**

Vada 431 – Odvařeniny od formy tvoří většinou otevřené, hladké dutiny na povrchu odlitku, kdy má tato dutina zoxidovaný povrch. Odvařeniny od formy se nejčastěji vyskytují v koutech odlitku, méně pak na rovných plochách, kdy má odvařenina dolíčkovitý tvar. Další možností vzniku odvařenin je odvařenina od jádra. Příčinou takové vady je proniknutí vznikajících plynů z jádrové směsi do kovu, v důsledku nedostatečného odvzdušnění jádra.

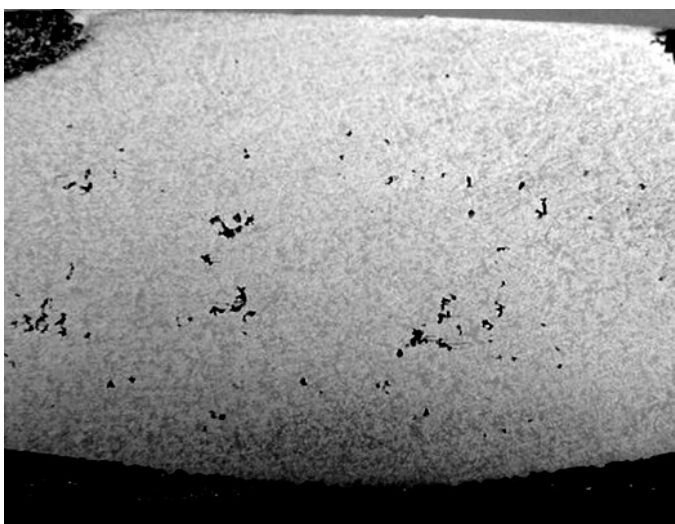
Vada 432 – Odvařeniny od chladítek vytváří otevřené nebo uzavřené dutiny. Odvařeniny vznikají od vnějších chladítek, vnitřních chladítek, zalévaných předmětů atd. Příčinou jsou vzniklé plyny, které nemají kam uniknout, proto je důležité dbát na čistotu chladítek, zalévaných předmětů apod. Povrchové odvařeniny vytváří zpravidla hladké d'olíčky, které neovlivní funkčnosti odlitku, ale zhoršují vzhled odlitku.

### **Skupina 440 – Staženiny**

Skupina těchto vad patří mezi nejčastější důvod výroby zmetkových odlitků. Staženiny jsou ovlivněny objemovým smršťováním, které je průvodním jevem při přechodu tekutého kovu do pevné krystalické fáze.

Vada 442 – Vnitřní uzavřené staženiny tvoří dutiny uvnitř odlitku. Tyto dutiny se nacházejí v místech tepelných uzlů. Mají nepravidelný tvar ovlivněný rozdílnou intenzitou odvodu tepla. Staženiny uvnitř odlitku vznikají při tuhnutí kovu a jeho objemovém smršťování. Aby nedocházelo ke vzniku této vady, je nutné dodržet zásady usměrněného tuhnutí.

Vada 443 – Řediny (Obr. 9) lze charakterizovat jako shluky drobných staženin, které se vyskytují v tepelných uzlech, nebo v tepelné ose odlitku. Řediny vznikají při konečné fázi tuhnutí. Řediny vytváří řídká místa ve stěně odlitku, z nichž mohou vycházet tenké kapiláry až na povrch. Takový odlitek je pak netěsný. Příčinou vzniku této vady je nedostatečné dosazování kovu během tuhnutí odlitku.



Obr. 9 – Řediny [10]

Vada 444 – Staženiny od jader nebo hran formy se projevují jako uzavřené dutiny způsobené smršťováním kovu při tuhnutí, soustředěné do oblasti tepelného uzlu, vytvořeného prohřátým pravým jádrem nebo ostrou hranou formy. Velikost vady se řídí velikostí zalitého jádra, jeho vlastním přehřátím a schopností odvádět teplo.

Vada 445 – Povrchové propadliny tvoří místně propadlý povrch odlitku na horní ploše konstrukčního nebo technologického uzlu nad tepelným uzlem několika stěn. Pod propadlinou se většinou nachází uzavřená staženina.

### 2.3.5 Makroskopické vměstky a vady makrostruktury [14]

#### Skupina 520 – Nekovové vměstky

Vada 523 – Odpadnutý (odloupnutý) nátěr tvoří vady otevřené (povrchové) nebo uzavřené (vnitřní dutiny) ve stěně odlitku, které jsou zcela nebo částečně vyplněné zbytky nátěrové hmoty. V některých případech se může odpadnutý nátěr projevit jako nárůst na povrchu odlitku.

Vada 524 – Oxidické pleny jsou plošné, tenké filmy oxidů, které vznikají na volném povrchu taveniny. Tyto pleny jsou následně zality vlivem turbulence kovu v povrchových vrstvách i uvnitř odlitku a způsobují nespojitost odlitku. Ulpívají na stěnách formy a značně zhoršují povrchovou i vnitřní jakost odlitku.

### 2.3.6 Vady mikrostruktury [14]

Vady této třídy jsou převážně odchylkami od norem nebo sjednaných technických podmínek, nejedná se však o vady v pravém slova smyslu. Mikroskopické dutiny, vměstky apod. jsou průvodními jevy litého stavu.

#### Skupina 610 – Mikroskopické dutiny

Tato skupina obsahuje interkrystalické a transkrystalické dutiny, pouhým okem nezjistitelné. Jedná se o dutiny s velikostí do 0,2 mm. Tyto vady mohou způsobovat propustnost stěn odlitků zkoušených tlakovou zkouškou. V praxi se pro mikroskopické dutiny často používá termín pórovitost nebo mikroporozita.

Mezi mikroskopické dutiny patří mikrostaženiny, mikrobublíny a mikrotrhlíny. Všechny tyto vady spojuje do značné míry stejný mechanismus vzniku tj. nukleace a následný růst po určitou mezní hodnotu. Liší se tvarem. Uvedené vady nemusí být vždy důvodem ke zmetkování odlitků, ale jsou velmi nebezpečné u dynamicky namáhaných odlitků.

#### Skupina 620 – Vměstky

Hodnotí se mikročistota, která neodpovídá normám a sjednaným technickým podmínkám. Pojmem mikročistota se vyjadřuje množství, velikost, tvar a rozložení vměstků různého chemického složení.



### **Skupina 630 – Nesprávná velikost zrna**

Hodnotí se velikost zrna ve vztahu k odchylkám od norem. Většinou je tato vada reprezentována příliš zhrubým zrnem, nebo nerovnoměrností velikosti zrn.

### **2.3.7 Vady chemického složení a vlastností odlitků [14]**

V této třídě vad se spíše než o vady jako takové jedná o odchylky od daných norem a sjednaných technických podmínek. Tyto vady jsou zastoupeny nejmenším podílem mezi vyrobenými zmetky (neshodnými díly).

#### **Skupina 710 – Nesprávné chemické složení**

Nesprávné chemické složení může být způsobeno nesprávným výpočtem vsázky, dobou tavby nebo nesprávným průběhem tavby materiálu. Je detekováno pomocí spektrální analýzy materiálu.

#### **Skupina 720 – Odchyly hodnot mechanických vlastností**

Nevyhovující mechanické vlastnosti jsou způsobovány nesprávným chemickým složením, nevhodným průběhem tavby nebo nesprávným tepelným zpracováním. Výsledky mechanických vlastností jsou získávány z výsledků normalizovaných zkoušek.

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části této práce bylo provedení matematických výpočtů za pomoci simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Simulován byl reálný proces odlévání tělesa spojky (Obr. 10) ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. s cílem predikovat vady na skutečných odlitcích a porovnat tyto predikované vady s vadami na reálných odlitcích. Pro porovnání predikovaných vad ze simulačního softwaru s vadami na reálných odlitcích bylo nutné provést rozbor vad těchto odlitků. Tyto rozbor byly provedeny v laboratořích Katedry strojírenských technologií TU v Liberci. Následně byl proveden návrh dalších možných variant řešení této problematiky za účelem snížení vad a díky tomu i snížení zmetkovitosti výroby. Tyto další varianty byly opět spočítány v simulačním programu MAGMA<sup>5</sup> a porovnány s výchozí variantou. Možné změny licího procesu byly poté konzultovány s technologickým oddělením firmy BENEŠ a LÁT a.s.



Obr. 10 – Odlitek tělesa spojky

#### 3.1 Simulační výpočet procesu lití

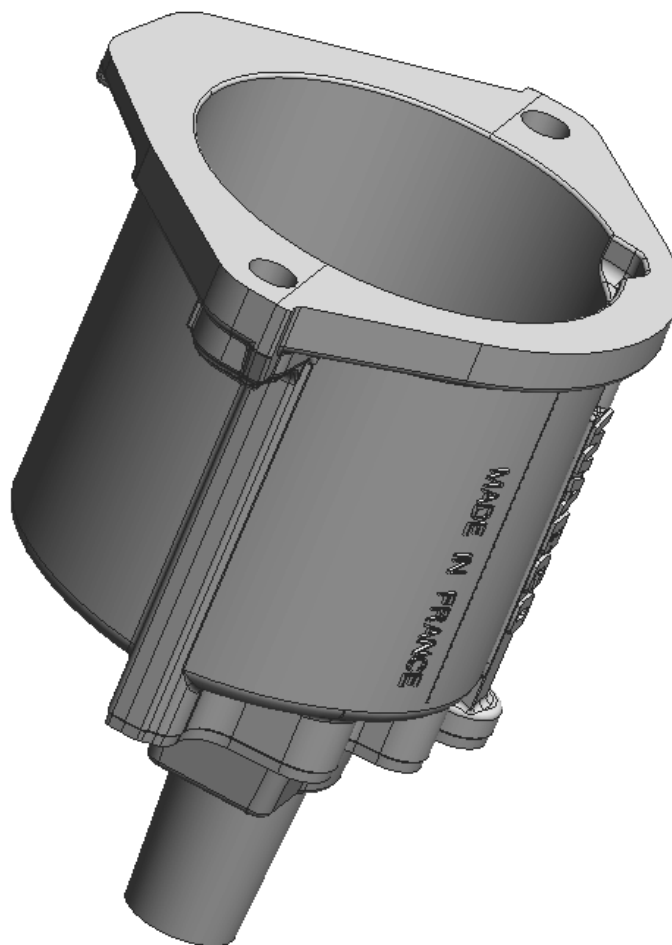
Simulační software na základě vložených dat a následném numerickém výpočtu nasimuluje požadovaný proces. Simulační výpočet odlévání

pak dává možnost virtuálního zhodnocení procesu lití. Je tedy možné daný proces vyhodnotit před samotným uvedením do výroby, a tím snížit počáteční náklady na optimalizaci procesu na minimum. Nejvýraznější úspora je na výrobních nákladech nutných pro zhotovení licí formy a případných provedených úpravách. Další možností je využití numerické simulace, jako optimalizačního nástroje již zavedeného procesu, což bylo předmětem této práce. Optimalizace může být směřována, jak na procesní parametry lití, tak i na úpravy licí formy.

V této diplomové práci byl pro simulační výpočty a vyhodnocení licího procesu použit software MAGMA<sup>5</sup>. Tento software je velice komplexní a zvládá provedení simulačních výpočtů pro většinu dnes známých technologií lití. Simulační výpočet licího procesu obsahuje plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitku, vznik struktury a dokonce i výpočet mechanických vlastností odlitku. Jakost odlitku ovlivňuje mnoho faktorů, mezi ty nejvlivnější patří použitá slitina odlitku, geometrie odlitku, materiál formy, navržená vtoková soustava, teplota formy před litím i během lití, způsob a průběh plnění odlitku, licí teplota taveniny. Tyto parametry a mnoho dalších je nutné v softwaru MAGMA<sup>5</sup> definovat, popřípadě upravit tak, aby bylo dosaženo stejných výsledků jako při reálném procesu lití.

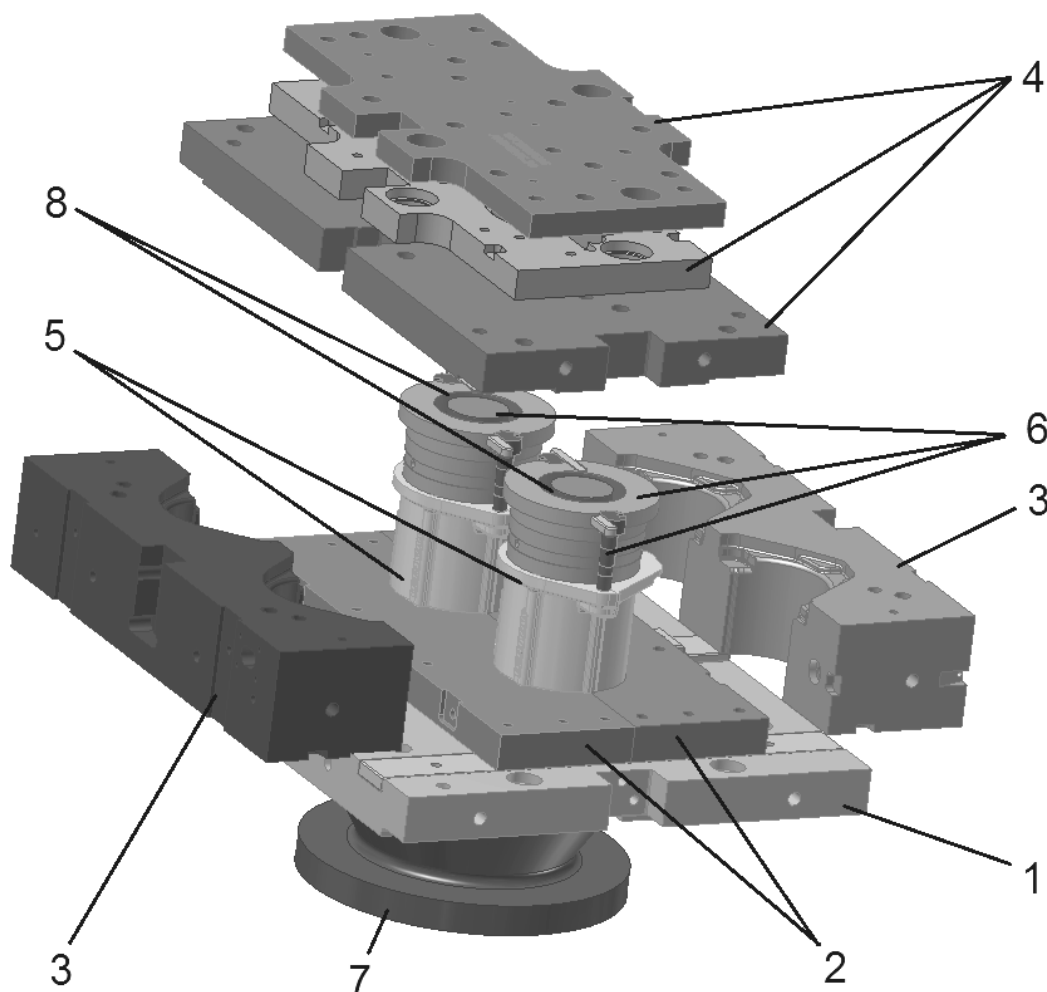
### 3.1.1 Příprava podkladů

Pro správné nastavení simulačního softwaru je potřeba zadat množství vstupních dat. Bylo nejprve nutné důkladně proniknout do výroby ve firmě BENEŠ a LÁT a.s. a následně bylo potřeba se seznámit se samotným simulačním softwarem MAGMA<sup>5</sup>. Díky četným konzultacím se zástupci slévárny BENEŠ a LÁT a.s. a absolvovanému školení ve firmě MAGMA GmbH bylo možné shromáždit veškeré potřebné informace a data pro správné nastavení softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Bylo potřeba získat geometrii odlitku s vtokovou soustavou (Obr. 11), kterou včetně kompletní formy ve formě 3D dat poskytla slévárna BENEŠ a LÁT a.s. Nebylo tak potřeba samotný odlitek modelovat v některém z 3D modelářů.



Obr. 11 – Model odlitku s vtokovou soustavou [10]

Některé části nutné pro simulační software však bylo potřeba domodelovat, např. uzavřené dutiny ve formě (uzavřený vzduch). Simulační software potřebuje mít tato místa zobrazena jako objem materiálu. Pokud by tomu tak nebylo, simulační software by tato místa nemohl nasítovat. Podobně bylo potřeba domodelovat model objemu kovu v mezikusu (Obr. 12). Další krok bylo mírné zjednodušení získaných 3D dat, ze sestavy byly odstraněny součástky pro ovládání formy, šrouby, matice, stavěcí sloupky apod. Byly tak ponechány pouze části formy, které udávají tvar odlitku, jsou masivní a mají vliv na teplotní pole formy, čímž ovlivňují vznik samotného odlitku. Získaná 3D data bylo nutné převést do formátu vhodného pro software MAGMA<sup>5</sup>, tímto formátem byl *\*.sat*. Úpravy 3D dat a jejich převedení do požadovaného formátu bylo provedeno pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2013.



1 – základna, 2 – spodní desky, 3 – boční poloviny formy, 4 – horní desky, 5 – odlitky, 6 – jádra, 7 – mezikus, 8 – uzavřený vzduch ve formě

Obr. 12 – 3D model součástí formy s odlitky použitý pro výpočet

Jak už bylo zmíněno výše, jedná se o odlitek ze slitiny hliníku (AlSi7Mg0,3) lity technologií nízkotlakého lití do kovové formy. Forma je dvojnásobná. Na Obr. 12 je zobrazen model sestavy použitý pro výpočty v softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Skládá se z pevných částí formy (1, 2), dále z pohyblivých (3, 4) a jader (6). Je zde také vidět umístění odlitků (5). Pod formou je pak umístěn tzv. mezikus (7). Mezikus je přechod mezi udržovací pecí a formou, v tomto mezikusku je udržována hladina tekutého kovu. Důvodem jeho použití je redukce oxidace taveniny díky zkrácení trajektorie tekutého kovu mezi rezervoárem taveniny a dutinou formy. Takto upravená 3D data již byla pomocí importačního modulu implementována do softwaru MAGMA<sup>5</sup>.

Další velmi důležité parametry potřebné pro simulační výpočet jsou podmínky procesu lití (teplota taveniny při lití, teplota formy, čas plnění, čas dotlaku, čas tuhnutí, plnicí tlak, tlak při fázi dotlaku, úroveň hladiny tekutého kovu v mezikusu atd.) a druhy materiálů odlitku i formy. Protože se tento odlitek již vyrábí, bylo možné všechna tato data získat a verifikovat jejich správnost přímo ve výrobě slévárny BENEŠ a LÁT a.s. Níže je k nahlédnutí ucelený soubor vstupních dat pro simulační výpočet.

 Tab. 6 – Vstupní data zadaná do SW MAGMA<sup>5</sup>

Materiál odlitku	AlSi7Mg0,3 (EN AC-42100)
Licí teplota	740 °C
Chemické složení	Hodnoty získané z dlouhodobého sledování této slitiny pomocí spektrální analýzy (Tab. 7)
Čas plnění formy	28 s
Tlak plnění formy	20 kPa
Čas dotlaku	140 s
Tlak dotlaku	26 kPa
Čas tuhnutí	140 s
Ofuk formy	5 s
Zakládání Fe sítěk do vtoků	10 s
Zavírání/otevírání formy	10 s
Vyjmutí odlitku	5 s
Celkový čas cyklu	358 s
Teplota formy a jader	350 °C
Materiál formy	TOOLOX 33
Materiál jader	X38CrMoV5-1
Vtokové sítko	Ano
Příhřev formy plynovými hořáky	Ano

Hladina taveniny	50 mm pod základní deskou
Průměr plnicí trubice	60 mm

Interním měřením ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. bylo zjištěno reálné chemické složení odlévané slitiny, toto chemické složení slitiny bylo použito i pro simulační výpočty.

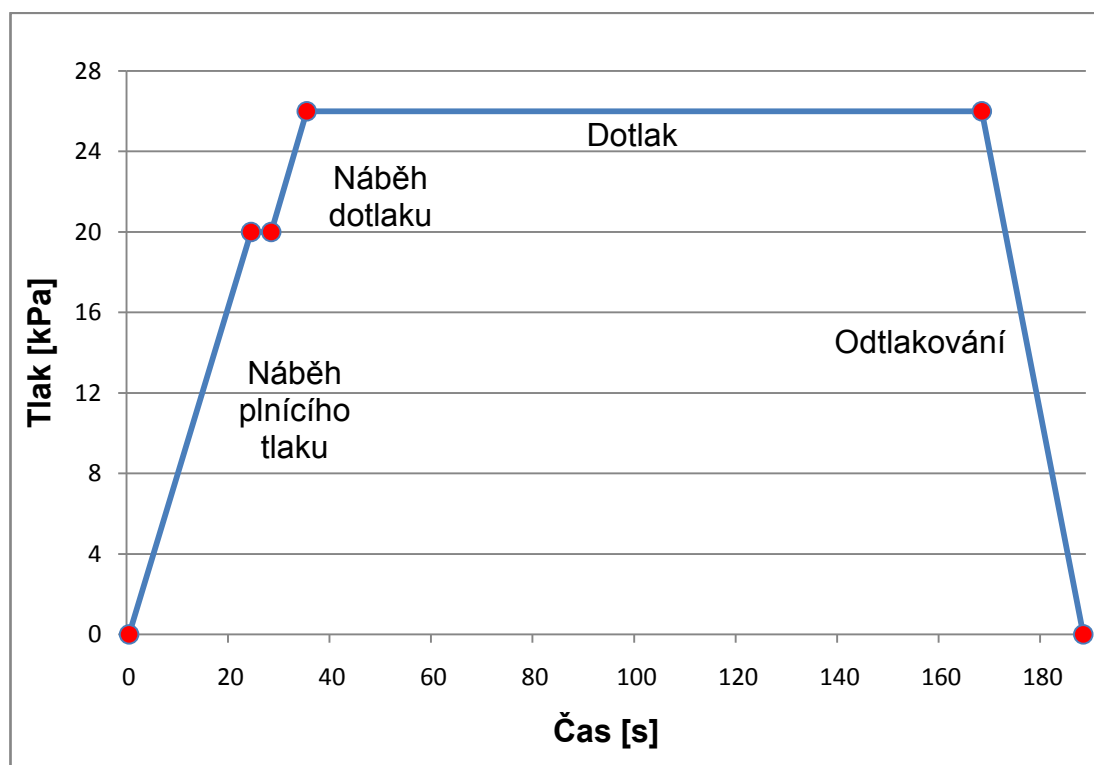
Tab. 7 – Chemické složení odlévaného materiálu [10]

Prvek	Obsah [%]	Prvek	Obsah [%]
Si	7,112	Pb	0,013
Mg	0,301	Sn	0,011
Fe	0,170	Sr	0,010
Ti	0,120	Cu	0,006
Zn	0,025	Ni	0,003
Mn	0,019	Al	92,210

Vstupní tepelně fyzikální veličiny, mezi které patří hustota, součinitel tepelné vodivosti, tepelná kapacita a viskozita budou převzaty z databáze simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup> (Příloha č. 2, Příloha č. 3)

Na základě vlastního měření při výrobě daného odlitku byla vytvořena křivka, která zobrazuje průběh pracovních tlaků během jednoho licího cyklu (Obr. 13). Křivka zobrazuje průběh tlaku vzduchu působícího na hladinu taveniny během licího procesu. Je vidět, že plnicí tlak (20 kPa) nabíhá po dobu 24 s, následuje prodleva na tomto tlaku po dobu 4 s. Poté následuje fáze dotlaku, kdy náběh na dotlak (26 kPa) trvá 7 s a výdrž na dotlaku trvá 133 s. Po fázi dotlaku dochází k odtlakování stroje, které trvá 20 s. Po odtlakování následuje fáze tuhnutí, kdy už na hladinu taveniny nepůsobí tlak vzduchu a odlitek je po dobu 140 s ponechám ve formě. Po dokončení této fáze dochází k otevření a vyjmutí odlitku z formy. Čas, po který dochází k plnění, tuhnutí a chladnutí odlitku je 328 s. Je to čas od zavření formy

do otevření formy. Celkový čas cyklu je 358 s, kdy jsou přičteny časy potřebné k otevření/uzavření formy, ošetření formy a čas pro zakládání filtračních sítěk do vtoků.



Obr. 13 – Grafická závislost průběhu pracovních tlaků během jednoho cyklu

### 3.1.2 Příprava procesu lití v simulačním programu

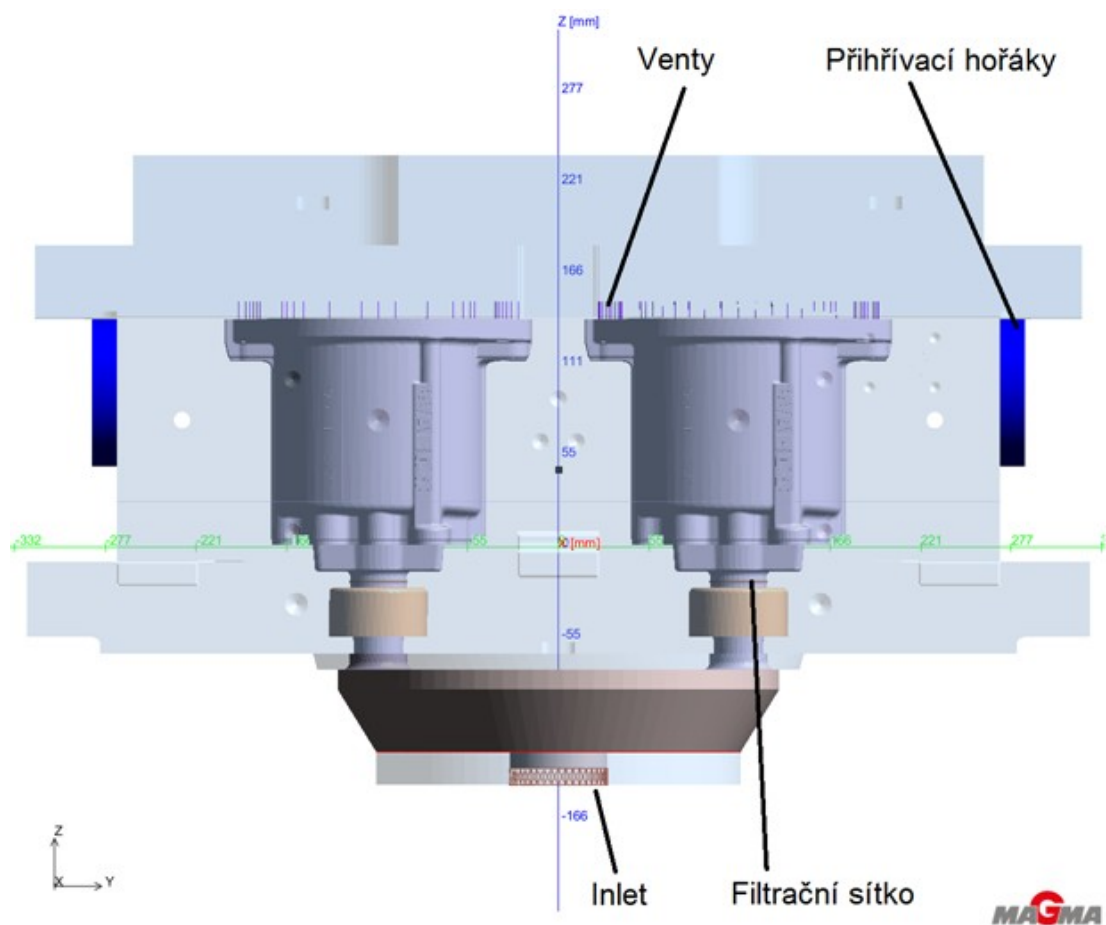
V první fázi provádění simulačních výpočtů bylo potřeba provést matematické výpočty stávajícího procesu lití a dosáhnout stejných výsledků procesu lití ze simulačního softwaru jako při reálné výrobě daného odlitku. V rámci přípravy simulačního výpočtu bylo nutné shromážděná data správně zadat do softwaru Magma<sup>5</sup>.

Nejprve byl vytvořen nový projekt, pro který bylo potřeba specifikovat technologii lití a slitinu, která se bude odlévat. V tomto případě se jedná o technologii nízkotlakého lití a slitinu hliníku. Následně se definice simulačního výpočtu prováděla v jednotlivých perspektivách.

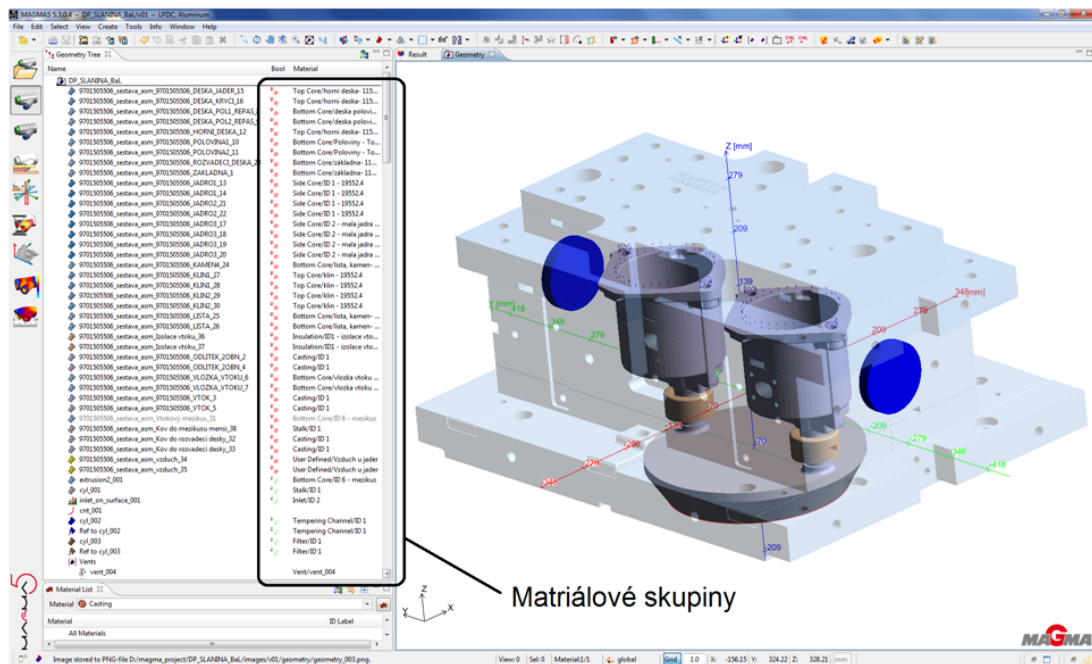


## Perspektiva GEOMETRIE

Do nového projektu byly naimportovány CAD data (viz kapitola 3.1.1). Po importu bylo nutné zkontrolovat správnou orientaci modelu. Model musí být orientovaný tak, aby kladný směr osy Z měl opačnou orientaci, než působí gravitace. Jestliže toto naimportovaný model nespĺňuje, je možné správnou orientaci provést v programu Magma<sup>5</sup>. Po správném naorientování modelu bylo potřeba domodelovat některé části tak, aby bylo možné provést co nejreálnější simulační výpočet. Ve vlastním modeláři softwaru MAGMA<sup>5</sup> tak byly přidány tzv. „venty“, které simulují odvodušnění formy, dále byly domodelovány části představující přehřívací plynové hořáky a filtrační sítko a konečně inlet, který simuluje proud kovu, v tomto případě se dá říci, že se jedná o válec s průměrem shodným s vnitřním průměrem stoupací trubice. (Obr. 14). Při vytváření inletu je potřeba nadefinovat tzv. trasovací částice, zde bylo použito 36 trasovacích částic v rozložení rectangular.



Obr. 14 – Perspektiva geometrie



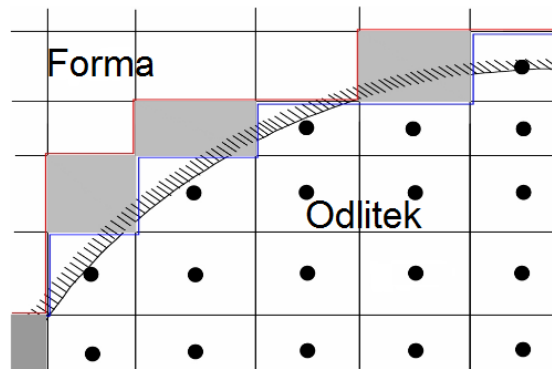
Obr. 15 – Přiřazení materiálových skupin

Každé části modelu bylo potřeba přiřadit správnou materiálovou skupinu. V tomto případě byly použity skupiny pro kovové části formy (*Top Core*, *Bottom Core* a *Side core*), pro izolace vtoků (*Insulation*), pro filtrační sítky (*Filter*), pro přehřívací hořáky (*Tempering Channel*), pro uzavřený vzduch ve formě (*User Defined*), pro objem kovu v mezikuse (*Stalk*) a pro odlitky včetně vtokové soustavy (*Casting*). Přiřazení materiálových skupin je vidět na Obr. 15. Nyní bylo zadáno vše potřebné v perspektivě geometrie a dalším krokem bylo vytvoření výpočtové sítě.

## Perspektiva VÝPOČTOVÁ SÍŤ

Při vytváření správné výpočtové sítě je nutné dbát, aby byla síť dostatečně jemná, avšak její jemnost by neměla být zbytečně velká, protože jemnost sítě ovlivňuje výpočetní čas. Proto byly použity různé hustoty výpočtové sítě. Byly vytvořeny tři skupiny s různou jemností sítě. Použitou metodou vytváření sítě byla metoda ekvidistantní buňky. Skupina *Standard*, ve které byly zahrnuty kovové části formy, měla nastavenou velikost elementů 5. Skupina *Advanced*, ve které byly zahrnuty odlitky se vtokovou soustavou, měla nastavenou velikost elementu 1,5. Poslední skupina byla použita pouze pro filtrační sítky, která jsou tenká, proto byla nastavena velikost elementu 1. Při vytváření sítě byla použita funkce Solver 5, která

zajistí, že při výpočtu plnění dutiny formy je uvažováno povrchové napětí taveniny. Solver 5 také používá matematický algoritmus pro zpřesnění nasíťované geometrie a eliminuje „kostičkový“ tvar sítě (Obr. 16). [15]



Obr. 16 – Solver 5 [15]



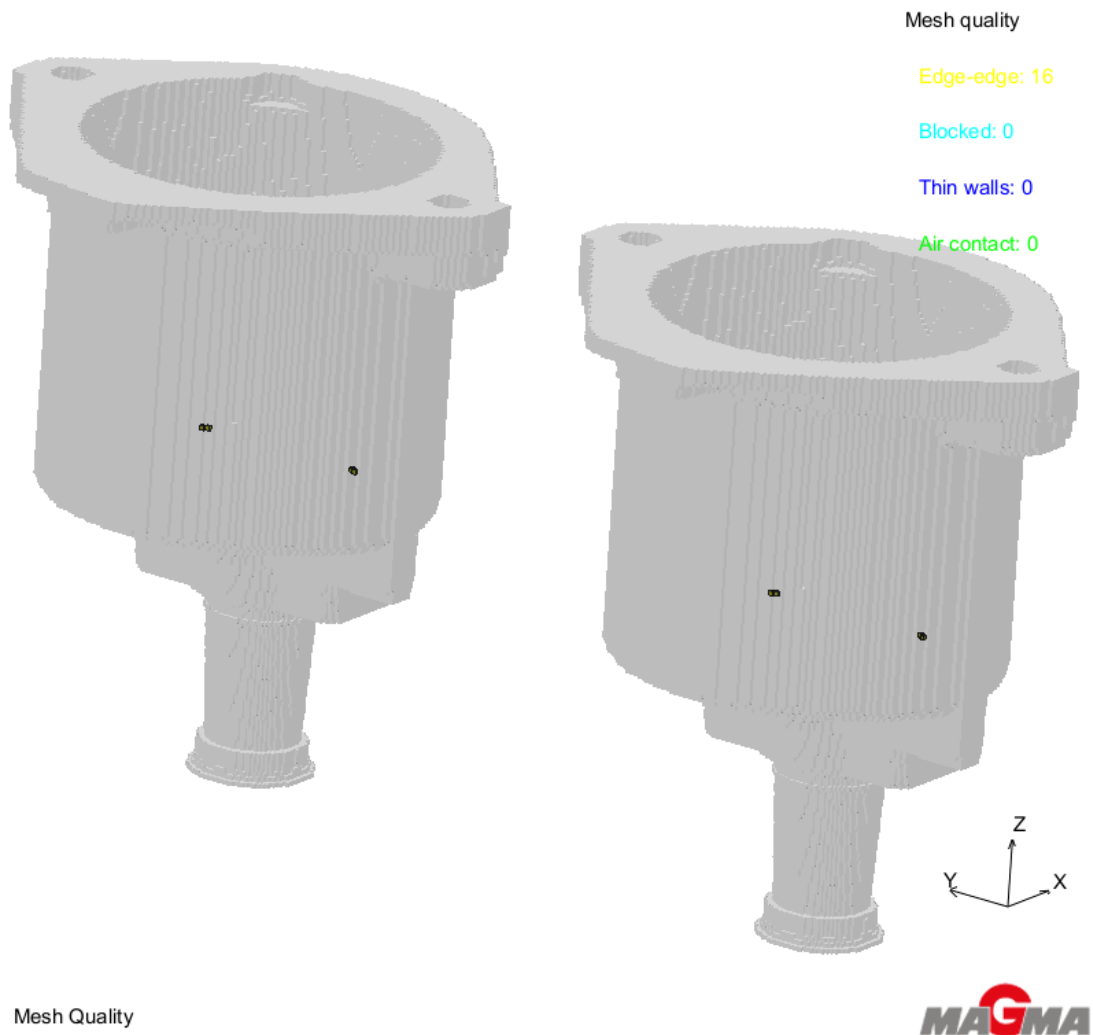
Geometry



Obr. 17 – Řez modelem odlitků s vytvořenou výpočtovou sítí

Po vytvoření sítě, bylo potřeba zkontrolovat její kvalitu. K této kontrole slouží funkce *Mesh Quality*. Funkce *Mesch Quality* zobrazuje v jakém místě a kolik elementů není nasíťováno správně. Kontrolou bylo zjištěno,

že vytvořená síť je kvalitní, pouze se objevilo 16 elementů, které se dotýkají hranou. V tomto malém množství není tato skutečnost problematická.



Obr. 18 – Kvalita výpočtové sítě (*Mesh Quality*)

### Perspektiva NASTAVENÍ SIMULACE

V této perspektivě se zadávají všechny procesní parametry, jako je konkrétní materiál formy, odlitku, koeficienty přestupu tepla, průběh lití, čas cyklu atd.

Materiály je možné vybírat z databáze programu Magma<sup>5</sup> a případně si upravit vlastnosti těchto materiálů podle vlastní potřeby. Pro odlitky byla z databáze vybrána slitina hliníku AlSi7Mg a následně bylo upraveno její chemické složení podle hodnot uvedených v Tab. 7. Spolu s materiálem odlitku byla definována i licí teplota, která byla 740 °C. U odlévaného

materiálu je také velice důležité nastavit tzv. dosazovací schopnost (*Feeding effectivity*). Hodnota dosazovací schopnosti určuje, v jakou chvíli během tuhnutí materiál ztrácí schopnost objemového dosazování a nadále je schopen dosazovat pouze mezidendriticky. Hodnota dosazovací schopnosti byla nastavena na 40 %, to znamená, že jakmile materiál dosáhne 40 % tuhé fáze, tak se mění objemové dosazování na dosazování mezidendritické. Pro formu i jádra byl z databáze vybrán materiál X38CrMoV5-1. Teplota formy i jader byla nastavena na 350 °C. Teplota plynových hořáku byla zvolena 1100 °C. Pro nasimulování uzavřeného vzduchu v dutinách formy byl zvolen materiál Air s teplotou 60 °C. [15]

Po nadefinování materiálů bylo potřeba zadat koeficienty přestupu tepla, mezi jednotlivými materiálovými skupinami. Pokud dochází ke styku části formy s odlévaným materiálem (taveninou), používá se teplotně závislý koeficient přestupu tepla. Zde byl zvolen koeficient přestupu tepla z databáze *AlSi7Mg-Perm-Coat*, závislost koeficientu přestupu tepla na teplotě je zobrazena v přílohách (Příloha č. 4). V místech, kde se dotýkají jednotlivé části formy, byla zvolena konstantní hodnota koeficientu přestupu tepla s jednotkami [ $W/m^2 \cdot K$ ]. Na rozhraní *forma - izolace vtoku* byla zvolena hodnota C400, na rozhraní *forma - přehřívací hořák* byla zvolena hodnota C1000 a v místech styku jednotlivých částí formy byla zvolena hodnota C2500. [15, 16]

V další části je potřeba nadefinovat samotný proces lití. Podle získaných dat (kapitola 3.1.1) byla zadána veškerá potřebná data, jako jsou způsob plnění (Obr. 13), čas otevření formy, ošetření formy (ofuk), doba potřebná k otevření/uzavření formy, zapnutí přehřívacích hořáků atd. (Tab. 6). Také bylo zadáno, že výpočet bude probíhat pro 4 nahřívací cykly, během kterých se ustálí teplotní pole formy a 1 produkční cyklus, který bude následně vyhodnocován.

Posledním krokem v nastavení simulace je definování požadovaných výsledků. V tomto případě byly zvoleny všechny dostupné výsledky. Tím byl správně nadefinován celý výrobní proces a následovalo spuštění samotného výpočtu.

## Perspektiva PROCES SIMULACE

Simulační výpočet procesu výroby odlitku tělesa spojky technologií nízkotlakého lití probíhal v laboratořích Katedry strojírenských technologií na TU v Liberci, kde je k dispozici licence softwaru Magma<sup>5</sup> při možnosti využití 4 výpočtových jader počítače. V rámci této diplomové práce bylo zpracováno 7 variant. Varianta 1 popisuje výchozí stav procesu lití, další varianty jsou změnové varianty (viz Příloha č. 1). Samotný výpočet jedné varianty trval přibližně 7 hodin.

## 3.2 Vyhodnocení simulace výrobního procesu

Pro vyhodnocování simulačního výpočtu slouží perspektiva nazvaná *Result Perspective*. Jsou zde všechny výsledky, které se nadefinovaly při nastavování simulace. Výsledky jsou uspořádány do tří skupin, kterými jsou výsledky plnění, výsledky tuhnutí a chladnutí a procesní křivky.

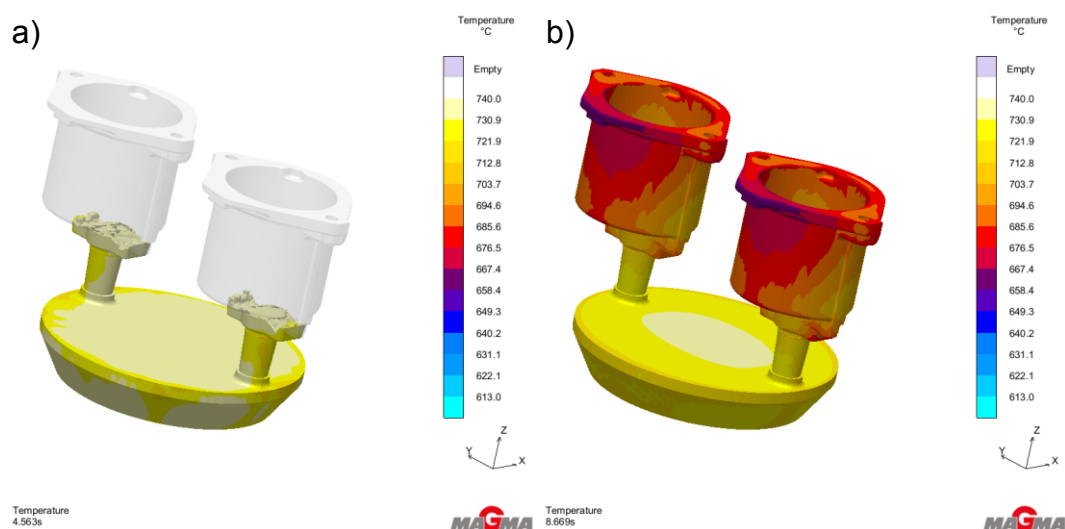
### 3.2.1 Vyhodnocení simulačního výpočtu plnění formy

Výsledků, které různými způsoby popisují plnění dutiny formy, je celá řada. Patří mezi ně teplotní pole, rychlostní pole, tlaky, uzavřený vzduch, přetlak vzduchu, stáří kovu (taveniny) atd. [15]

V této práci budou vyhodnocena pouze ta kritéria a výsledky, které jsou důležité pro vyhodnocení plnění daného odlitku danou technologií (technologie nízkotlakého lití odlitku ze slitiny hliníku do kovové formy).

Pro popis charakteru plnění je vhodné použít kritérium *Temperature*, které popisuje teplotní pole uvnitř vybrané materiálové skupiny v každém časovém intervalu během plnění. Díky tomuto kritériu bylo zjištěno, zda teplota taveniny během plnění neklesá pod teplotu likvidu a čas plnění. Plnění odlitků včetně zaplnění části mezikusu, ve kterém je udržována hladina tekutého kovu, trvá 8,7 s. Charakter plnění splňuje předpoklady, které určuje technologie nízkotlakého lití, odlitek je plněn rovnoměrně zespoda bez rozstříků taveniny, nedochází ani k nadměrnému víření taveniny. Pouze v čase 4,5 s dojde k mírnému zvlnění a zavíření taveniny v místě, kde tavenina vytéká z vtokové soustavy do vlastního odlitku, toto zvlnění hladiny taveniny, však rychle odeznívá. Následně je plnění z pohledu

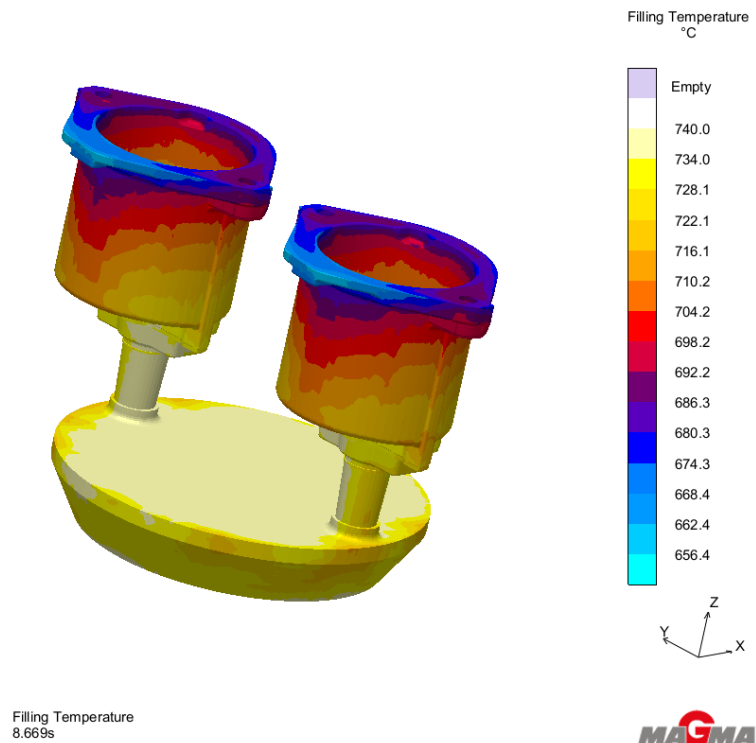
rozstříků a víření taveniny zcela bezproblémové. Z kritéria *Temperature* je také zjištěno, že teplota taveniny během procesu plnění neklesne pod teplotu likvidu (613 °C). Nejchladnější místo, na konci plnění, se nachází v horní části odlitku a dosahuje teploty přibližně 660 °C. Tato hodnota je o mnoho vyšší než teplota likvidu a proto nedochází k natuhávání taveniny před koncem plnění. Pro zobrazení výsledku z kritéria *Teplotní pole* byla použita škála v rozmezí *Teplota litého – Teplota likvidu* s jednotkami °C (Obr. 19).



a) Plnění v čase 4,5 s; b) Stav na konci plnění

Obr. 19 – Simulace plnění: *Temperature*

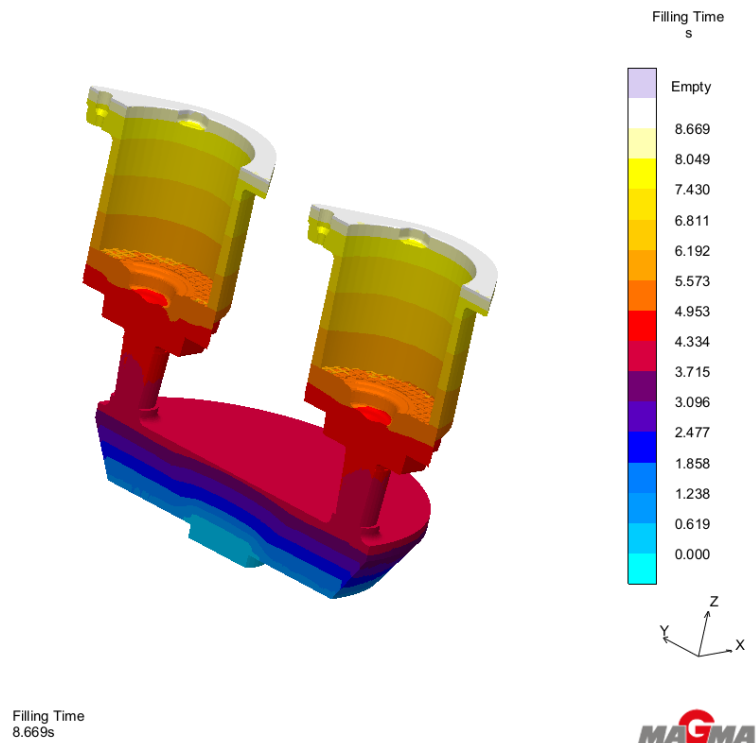
Pomocí kritéria *Filling Temperature* byla zobrazena teplota taveniny v čase, kdy hladina taveniny smočila dané místo. Při zobrazení tohoto kritéria byla použita škála *Teplota litého – Minimální teplota v zobrazeném materiálu* s jednotkami °C. Díky tomuto rozmezí byla určena nejchladnější místa při plnění. Tyto oblasti se nachází v horní části odlitku s teplotou přibližně 656 °C (Obr. 20), což odpovídá již zmíněné hodnotě při vyhodnocování výsledků z kritéria *Temperature*.



Obr. 20 – Simulace plnění: *Filling temperature*

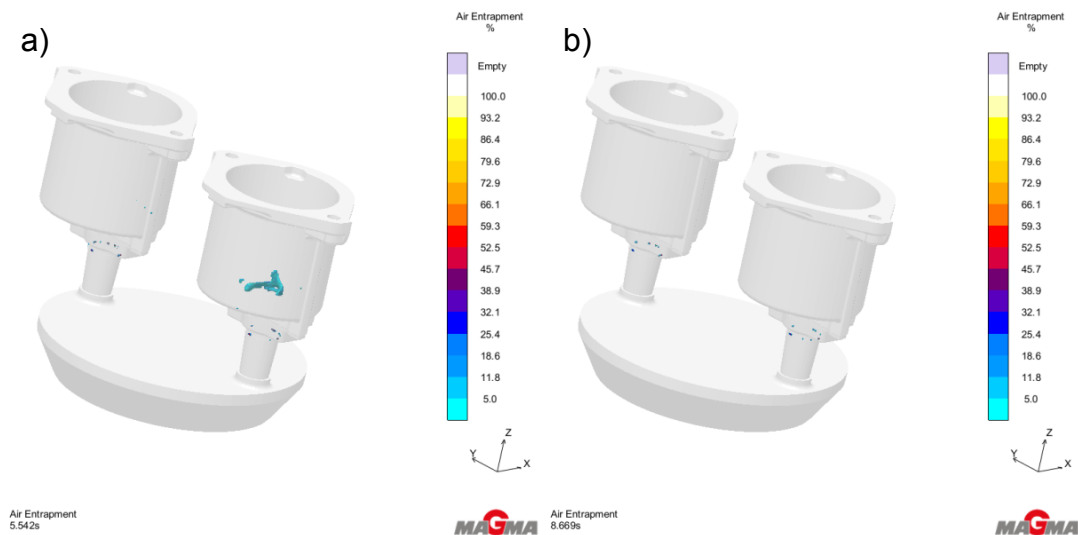
Kritériem *Filling Time* byl určen čas zaplnění jednotlivých částí formy. Z tohoto kritéria je opět jednoznačně vidět klidné a postupné plnění formy zespoda. Z výsledků je patrné, že plnění samotného odlitku nastává až v čase přibližně 4 s (Obr. 21). Do tohoto času je taveninou plněn pouze mezikus a až poté dochází k zaplnění vtokové soustavy a odlitků. Zobrazení výsledků z kritéria *Filling Time* je v rozmezí *Začátek plnění – Konec plnění* a jednotkou je sekunda.





Obr. 21 – Simulace plnění: *Filling time*

Kritériem *Air entrapment* byly zobrazeny vzduchové bubliny. Toto kritérium je progresivní a proto je možné sledovat, kdy vzduchové bubliny vznikly, jak se pohybovaly, popřípadě jestli zanikly, nebo se zachovaly. Během plnění vznikalo velmi malé množství vzduchových bublin. Tyto bubliny nakonec postupně zanikaly. Na konci plnění se v odlitku nenachází žádné vzduchové bubliny (Obr. 22). Znovu se potvrdilo, že plnění probíhalo klidně, bez nežádoucích turbulencí.



a) Vzduchové bubliny v čase 5,5 s ; b) Stav na konci plnění

Obr. 22 – Simulace plnění: *Air entrapment*

Při zhodnocení výsledků z procesu plnění, lze říci, že plnění probíhá bezproblémově. Teplota taveniny je dostatečná i na konci plnění, nedochází k žádným rozstříkům taveniny ani k nadměrnému zviření hladiny taveniny. Hlavní příčinou správného plnění je použitá technologie lití, správně navržená vtoková soustava a rychlost plnění daná tlakovou křivkou.

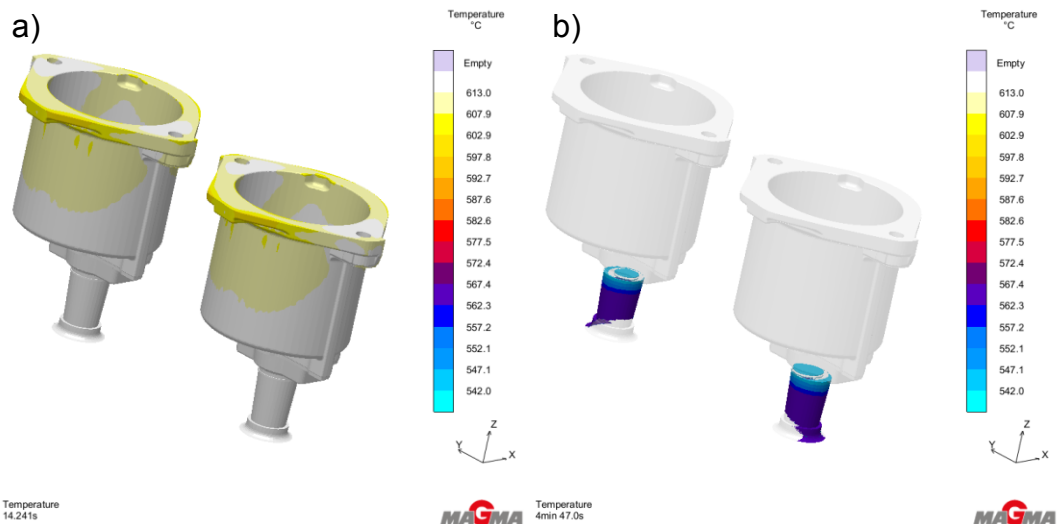
### 3.2.2 Vyhodnocení simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitku

Podobně jako pro vyhodnocování plnění je i pro vyhodnocení chladnutí a tuhnutí odlitku k dispozici množství výsledků. Mezi výsledky tuhnutí a chladnutí patří teplotní pole nebo podíl tekuté a tuhé fáze. Do jednotlivých kritérií patří vnitřní zdravotnost odlitku, objemové staženiny, teplotní uzly, teplotní gradient a čas, kdy odlitek přestává dosazovat objemově atd. [15]

Po prostudování všech výsledků byla vyhodnocena pouze kritéria, která jsou přínosná pro správné posouzení tuhnutí a chladnutí daného odlitku.

Stejně jako při vyhodnocování plnění formy je i pro tuhnutí a chladnutí odlitku k dispozici kritérium *Temperature*. Pomocí tohoto kritéria lze vizuálně zobrazit, jak odlitek chladl v čase a při použití správné teplotní škály (*Teplota likvidu – Teplota solidu [°C]*), lze určit v jaký čas části, nebo celý odlitek ztuhl. Díky dostatečně vysoké teplotě taveniny při plnění začala

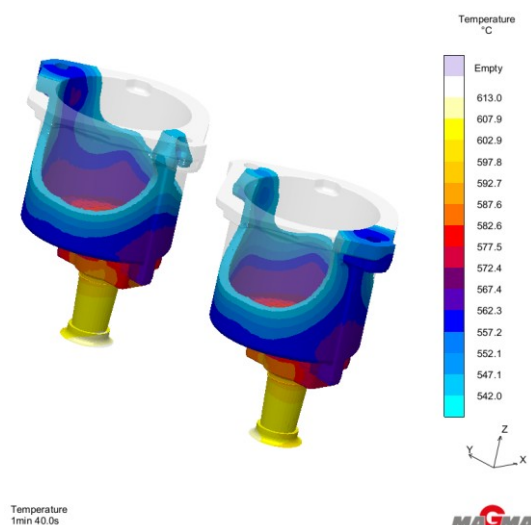
teplota odlitku klesat pod teplotu likvidu (začal místně natuhávat) až v čase 14,2 s, což je přibližně 5,6 s po skončení plnění (Obr. 23a). V čase 4:34 min. je odlitek ztuhlý až do místa, kde je umístěno filtrační sítko (Obr. 23b). V tomto čase by tedy bylo možné odlitek vyjmout z formy. To by znamenalo časovou úsporu skoro jednu minutu oproti současnému stavu.



a) První natuhávající oblasti; b) Konec tuhnutí

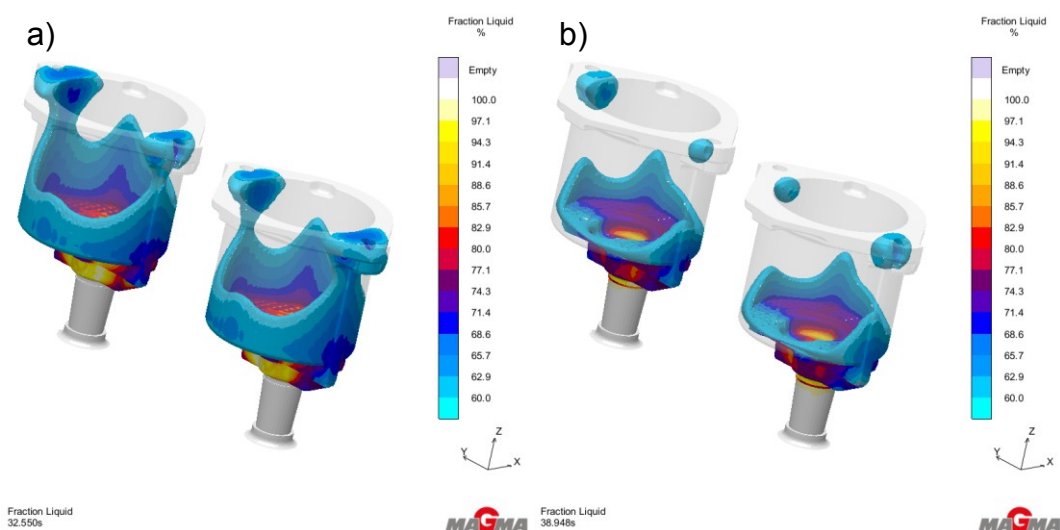
Obr. 23 – Simulace tuhnutí: *Temperature*

V čase 1:40 min. dochází k zaškrcení v oblastech pod „oušky“. „Ouška“ jsou následně úplně oddělena od zbytku ještě částečně tekuté fáze. V těchto oblastech je velké riziko vzniku vad, protože nesplňují podmínky usměrněného tuhnutí (Obr. 24)



Obr. 24 – Zaškrcení taveniny v místě „oušek“

Kritériem *Fraction liquid* opět popisuje průběh tuhnutí odlitku. Toto kritérium zobrazuje míru tekuté fáze obsažené v odlitku. Při správném nastavení škály a rentgenu korespondující s nastavenou dosazovací schopností materiálu je možné ze zobrazení odstranit oblasti s obsahem tuhé fáze více než 40 %, tyto oblasti již dosazují taveninu pouze mezidendriticky a jsou tak z hlediska dosazování nevhodná. Kritériem *Fraction liquid* byly zobrazeny charakterem podobné výsledky jako kritériem *Temperature*, ale kritické oblasti se objevují dříve. Obr. 25 zobrazuje zaškrčení v kritické oblasti pod „oušky“ již v čase přibližně 33 s. Tyto oblasti následně tuhnu neusměrněně a roste v nich veliké riziko vzniku slévárenských vad. Vady se v těchto místech na reálných odlitcích skutečně objevují (viz kapitola 3.3).

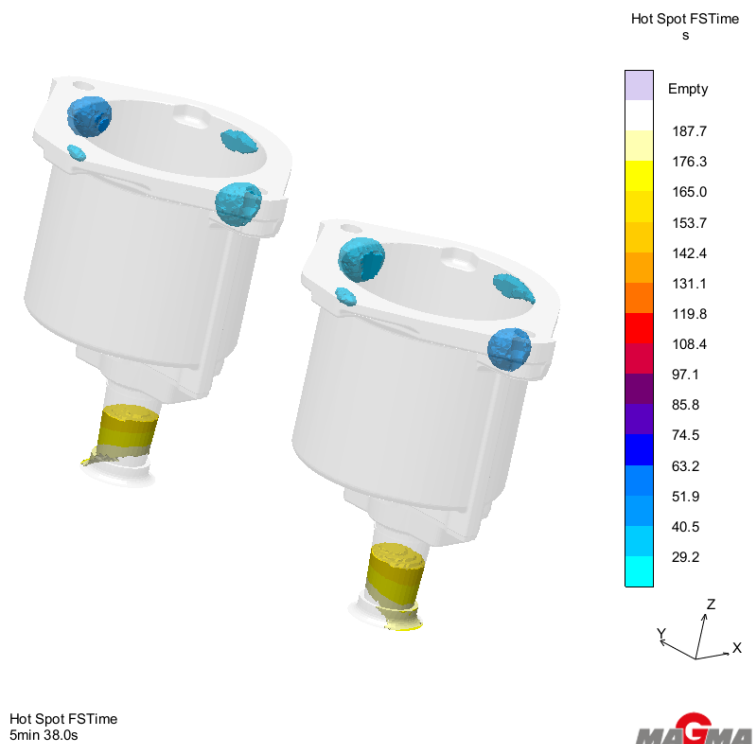


a) Počátek zaškrčení; b) Úplné oddělení od tekuté fáze

Obr. 25 – Simulace tuhnutí: *Fraction liquid*

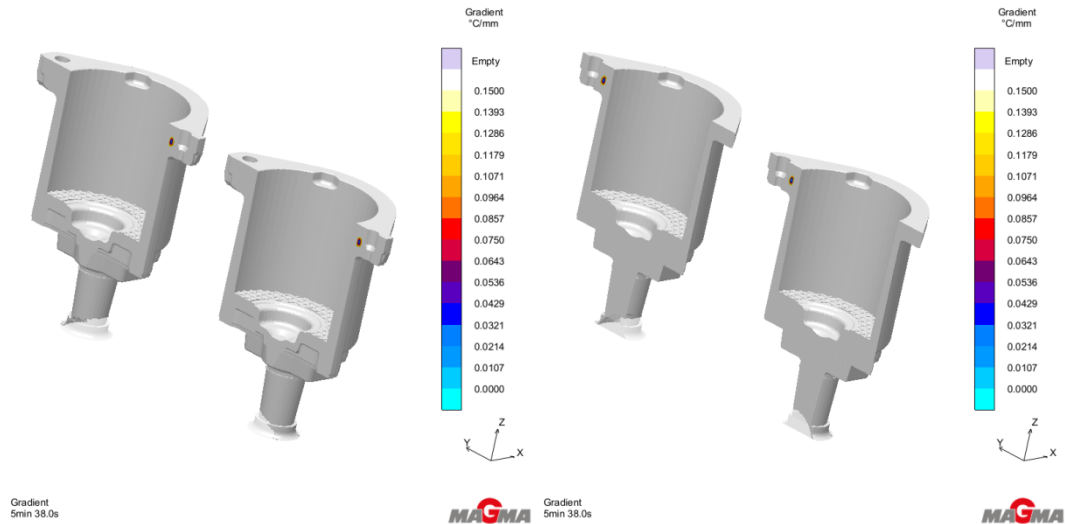
Kritériem *Hot Spot FSTime* jsou zobrazeny oblasti, jejichž časy tuhnutí jsou výrazně odlišné od jejich okolí. Pomocí těchto teplotních uzlů byly zobrazeny oblasti, kde je zbytková tavenina obklopena již částečně ztuhlým kovem. Částečně tuhý kov je opět brán s ohledem na dosazovací schopnost materiálu. Zobrazené oblasti mají méně než 40 % tuhé fáze a jsou obklopena fází (průhledná), která má více než 40 % tuhé fáze. V takto uzavřených oblastech hrozí vznik objemových staženin. Na Obr. 26 jsou vidět tepelné uzly. Tyto oblasti korespondují s oblastmi, které byly indikovány již pomocí předešlých kritérií. Pomocí kritéria *Hot Spot FSTime* jsou rychle zobrazena

kritická místa, ale nelze pomocí něj určit, jak tyto oblasti vznikaly. K tomuto účelu je tedy vhodné použít předešlé kritérium *Fraction liquid*.



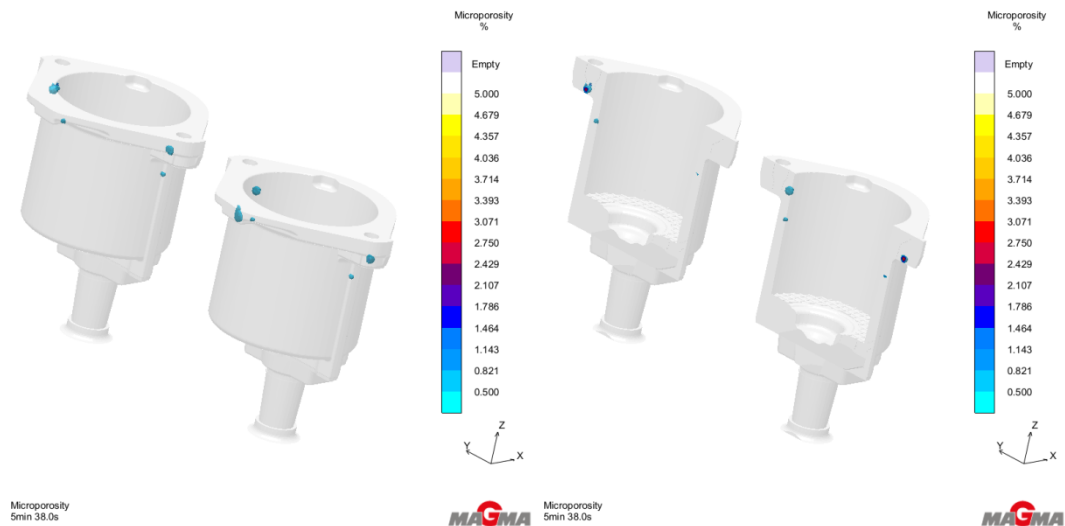
Obr. 26 – Teplotní uzly

Pomocí kritéria *Gradient* byly určeny oblasti s nízkým teplotním gradientem. V oblastech, kde je indikován nízký teplotní gradient, dochází k neusměrněnému tuhnutí. Platí závislost, že se snižujícím se teplotním gradientem roste riziku vzniku porézních oblastí. Při zpracování výsledků tedy byly odstraněny oblasti s teplotním gradientem vyšším než  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ . Na Obr. 27 jsou zobrazeny oblasti s nejnižšími hodnotami teplotního gradientu. Tyto oblasti opět potvrzují kritické oblasti vyhodnocené pomocí předešlých kritérií.



Obr. 27 – Teplotní gradient

Kritériem *Microporosity* jsou zobrazeny oblasti, ve kterých vznikají objemové staženiny po ukončení fáze tuhnutí. Ze zobrazení jsou vyjmuty hodnoty nižší než 0,5 %, které jsou nevýznamné. Hodnoty vyšší než 0,5 % již indikují možnost vzniku porézních oblastí. Obr. 28 jednoznačně ukazuje výskyt porézních oblastí, jedná se o místa, která již byla indikována nízkým teplotním gradientem. V těchto oblastech dosahuje kritérium *Microporosity* hodnot 0,5 – 5 %.



Obr. 28 – *Microporosity*

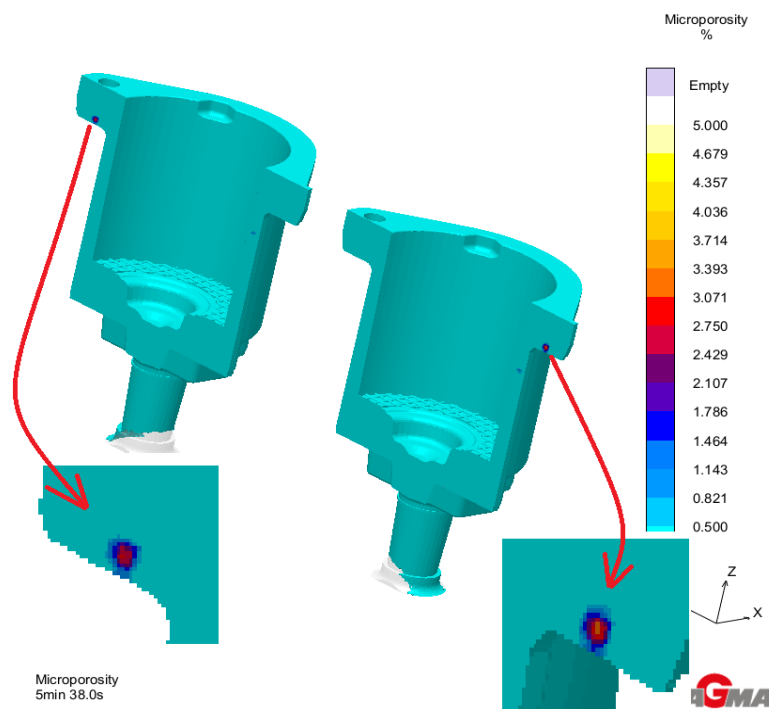
Při zhodnocení výsledků tuhnutí odlitku, lze říci, že ke vzniku vad v odlitku dochází v oblasti „oušek“. Vady vznikají na základě neusměrněného tuhnutí a špatného dosazování taveniny do těchto oblastí. Důsledkem je

vznik izolovaných, částečně tekutých oblastí, které tuhnou odděleně od zbytku odlitku a vznikají zde vnitřní objemové staženiny a řediny.

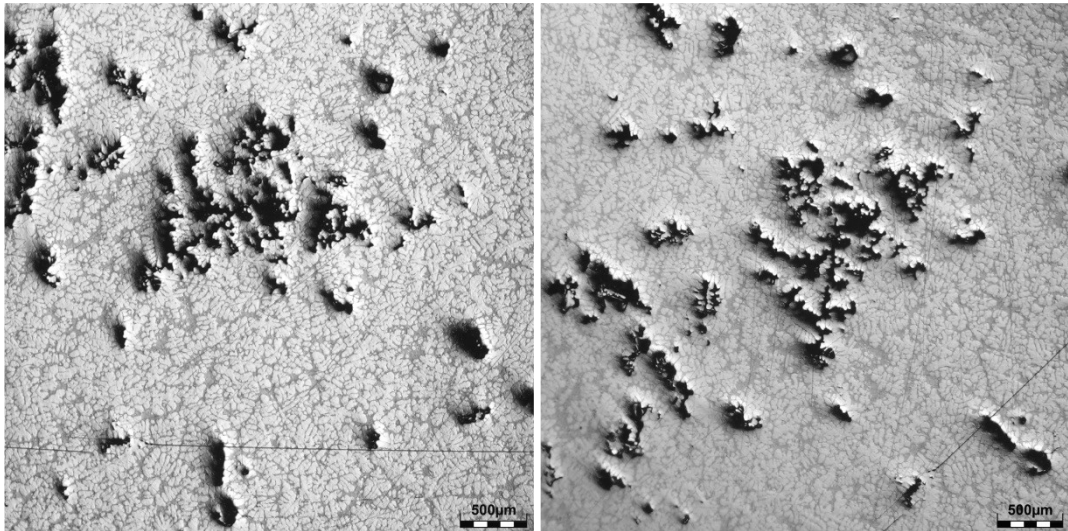
### 3.3 Vady reálných odlitků predikovaných simulačním výpočtem

Na základě simulačních výpočtů, byly provedeny rozborů predikovaných vad popsanych v kapitole 3.2.2. Z kritických oblastí byly odebrány vzorky pro účely rozborů. Vzorky byly následně zpracovány do podoby metalografických výbrusů. Vytvořené metalografické vzorky byly zkoumány pomocí opto-digitálního mikroskopu Olympus DSX500.

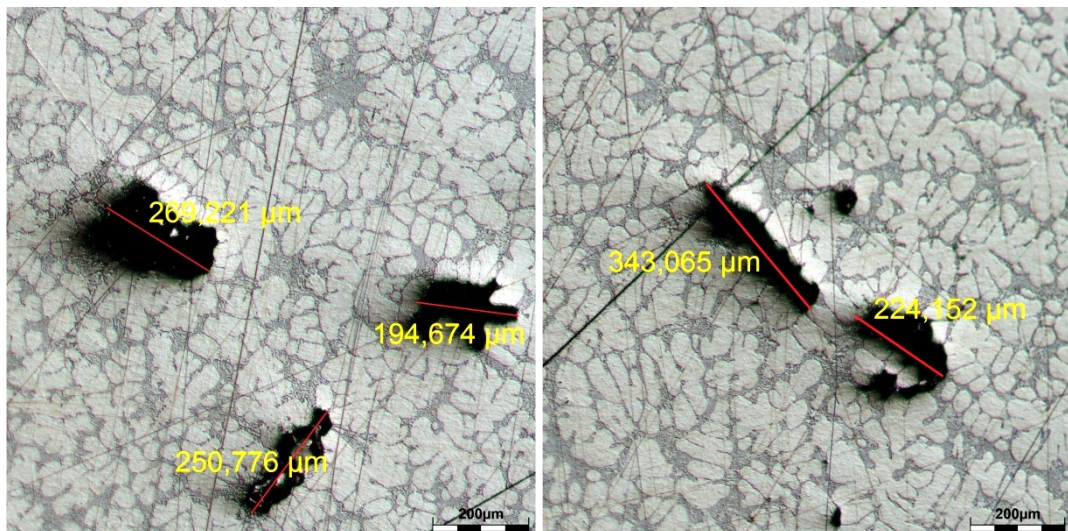
Na Obr. 30 jsou zobrazeny vady, které byly lokalizovány v oblastech, predikovaných simulačním výpočtem (Obr. 29). Jedná se o shluky vad nepravidelných tvarů a rozměrů. Obr. 31 zobrazuje detail vad s určenými rozměry těchto vad. Rozměry se pohybují v rozmezí od 150  $\mu\text{m}$  do 400  $\mu\text{m}$ . Svými rozměry, rozložením a množstvím tyto vady odpovídají vadám predikovaným v kapitole 3.2.2. Svým charakterem rozměrů, tvarů i vzniku tyto vady odpovídají vadám typu 442 – *vnitřní uzavřené staženiny* a 443 – *řediny*.



Obr. 29 – Detail zobrazení kritéria *Microporosity* v kritických oblastech



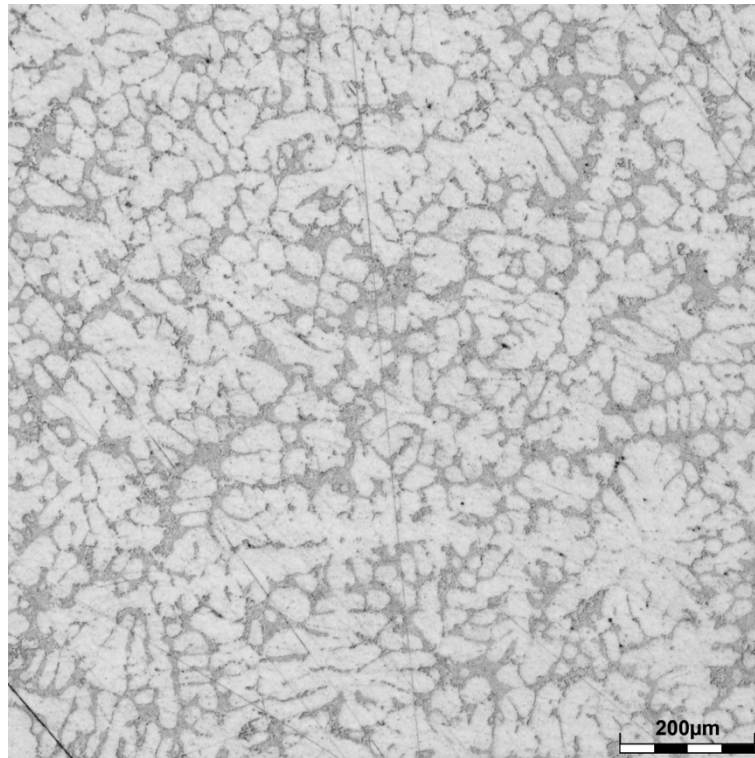
Obr. 30 – Vady lokalizované na reálném odlitku



Obr. 31 – Detail lokalizovaných slévárenských vad

Obr. 32 zobrazuje slévárenskou strukturu slitiny  $AlSi7Mg0,3$  v neleptaném stavu. Jedná se o strukturu, která neobsahuje slévárenské vady. Vzorek s touto strukturou byl odebrán z oblasti, kde nebyla simulačním softwarem predikována žádná rizika pro vznik vad.





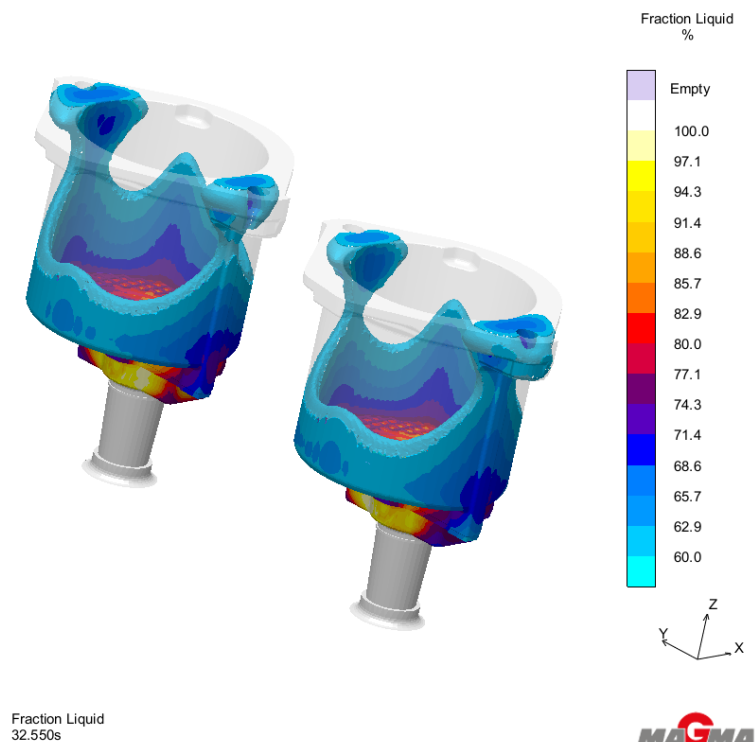
Obr. 32 – Detail slévarenské struktury slitiny AlSi7Mg0,3

### 3.4 Návrh a vyhodnocení optimalizačních variant

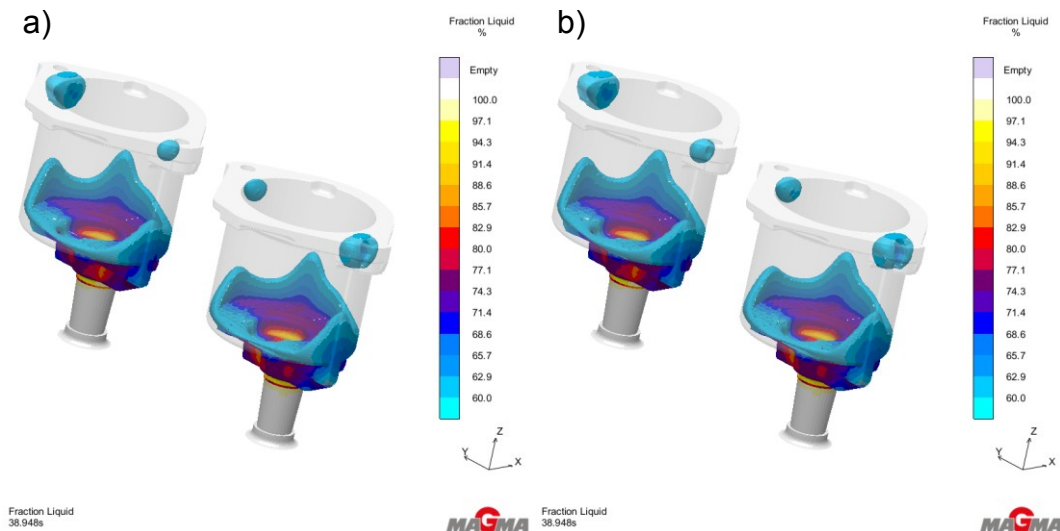
Na základě vyhodnocení simulačního výpočtu výchozí varianty byly navrženy další varianty, které by bylo možné relativně snadno a levně realizovat a zavést do výroby ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. Proto nebyly uvažovány úpravy, které by výrazným způsobem ovlivňovaly změnu tvaru odlitku. Se změnou geometrie odlitku souvisí i následná úprava licí formy, která by byla velice nákladná a musela by projít zákaznickou akceptací. Při návrhu nových variant byla snaha jednak o zlepšení jakosti odlitku a rovněž byly navrženy varianty, u kterých byly upraveny procesní parametry. Úprava procesních parametrů měla vést ke správnému nastavení těchto parametrů a zajistit úsporu z hlediska provozních nákladů. Bylo navrženo 6 změnových varianty procesu lití (Příloha č. 1). Tyto varianty byly opět numericky ověřeny a byl vyhodnocen i jejich vliv na jakost odlitku.

### 3.4.1 Varianta 2

Pro variantu 1 byla zvolena změna materiálu malých jader, která předlévají malé průchozí díry v „ouškách“ odlitku. Materiál byl změněn na wolframovou slitinu. Wolframová slitina má lepší vlastnosti ovlivňující odvod tepla (Příloha č. 5), tudíž se dá předpokládat vhodnější odvod tepla z kritických oblastí. Lepším odvodem tepla z těchto oblastí by mělo být zajištěno usměrněné tuhnutí odlitku. Pro vyhodnocení této varianty bylo použito kritérium *Fraction liquid*, díky kterému bylo sledováno tuhnutí odlitku v čase. Obr. 33 ukazuje, že opět dochází k zaškrcení kritických oblastí, které následně budou tuhnout neusměrněně. Při porovnání s variantou 1, lze sledovat určité zlepšení při tuhnutí odlitku. Zlepšení lze vidět na Obr. 34, který porovnává výchozí variantu 1 s variantou 2. Je zde zobrazeno tuhnutí v čase přibližně 39 s. Varianta 2 (wolframová jádra) ukazuje mírné zlepšení. Částečně tekuté oblasti, které jsou již oddělené od zbytku odlitku, jsou ve variantě 2 menší.



Obr. 33 – Varianta 2: *Fraction liquid*



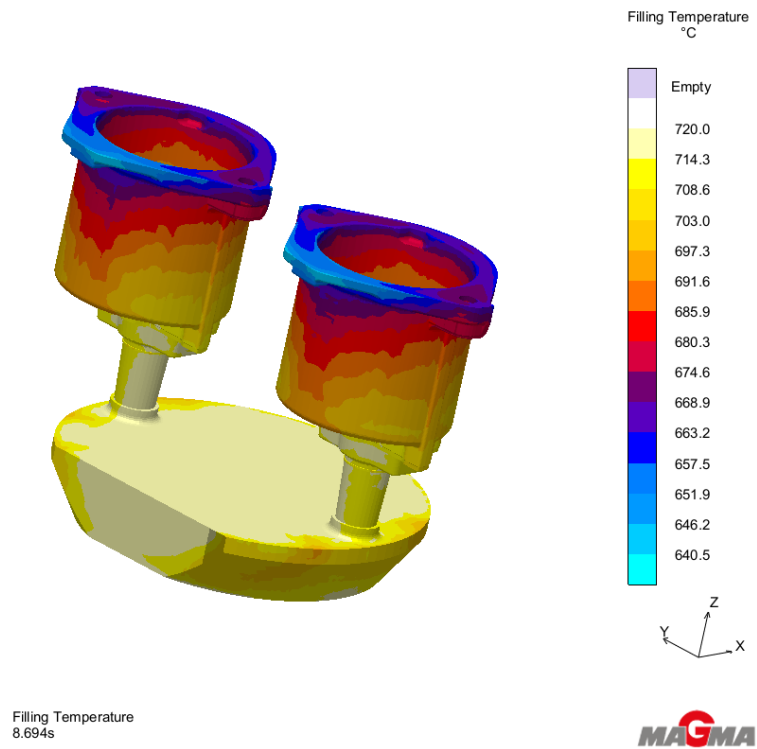
a) Varianta 2; b) Varianta 1

Obr. 34 – Porovnání variant 1 a 2: *Fraction liquid*

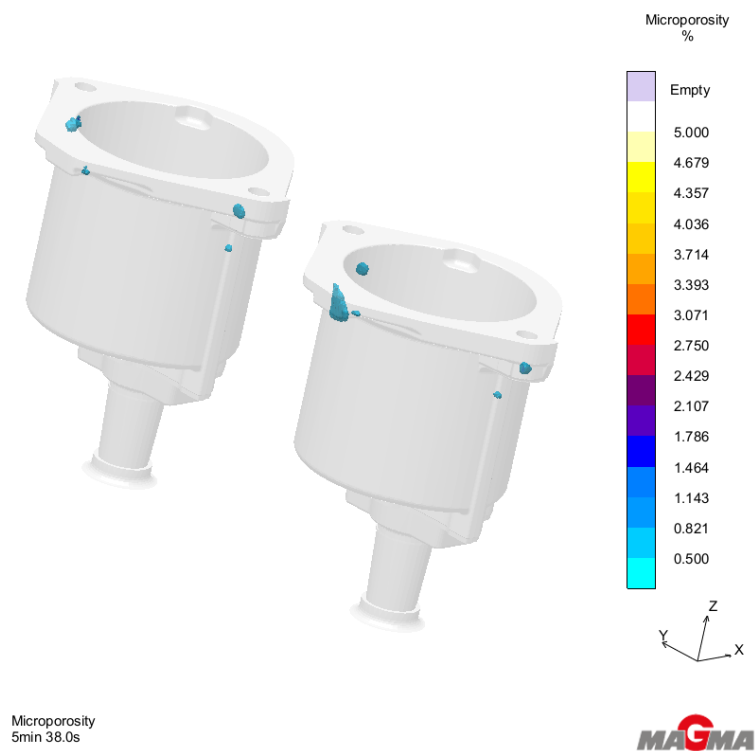
Z výsledků varianty 2 lze soudit, že k mírnému zlepšení z hlediska tuhnutí odlitku došlo. Bohužel tento problém nebyl vyřešen úplně. Další možností jak postupovat dále, by bylo zajištění aktivního chlazení wolframových jader. Tato změna však vyžaduje výraznější zásahy do slévárenské formy a operativně toto nelze provést.

### 3.4.2 Varianta 3

Pro variantu 3 byl simulační výpočet proveden se změnou teplotou lití. Při vyhodnocování plnění varianty 1 bylo zjištěno, že teplota taveniny v nejchladnějším místě na konci plnění je 656 °C. Proto byla spočítána tato varianta, kde byla teplota lití nastavena o 20 °C nižší, tedy 720 °C. Po provedení výpočtů bylo opět provedeno kompletní prostudování výsledků. Z hlediska plnění nedošlo k žádnému zhoršení. Plnění opět probíhalo klidně, postupně a bez výrazného víření či rozstříků taveniny. Díky kritériu *Filling temperature* lze zjistit, že nejnižší teplota během plnění byla 640 °C. To je opět teplota s výraznou rezervou vyšší, než je teplota likvidu (613 °C). Nedochozí tak k žádnému natuhávání taveniny během plnění. Z hlediska vnitřní jakosti odlitku nedošlo k výraznému zlepšení, nebo zhoršení oproti variantě 1. Toto je vidět na Obr. 36, kde je zobrazeno kritérium *Microporosity*.



Obr. 35 – Verze 3: *Filling temperature*

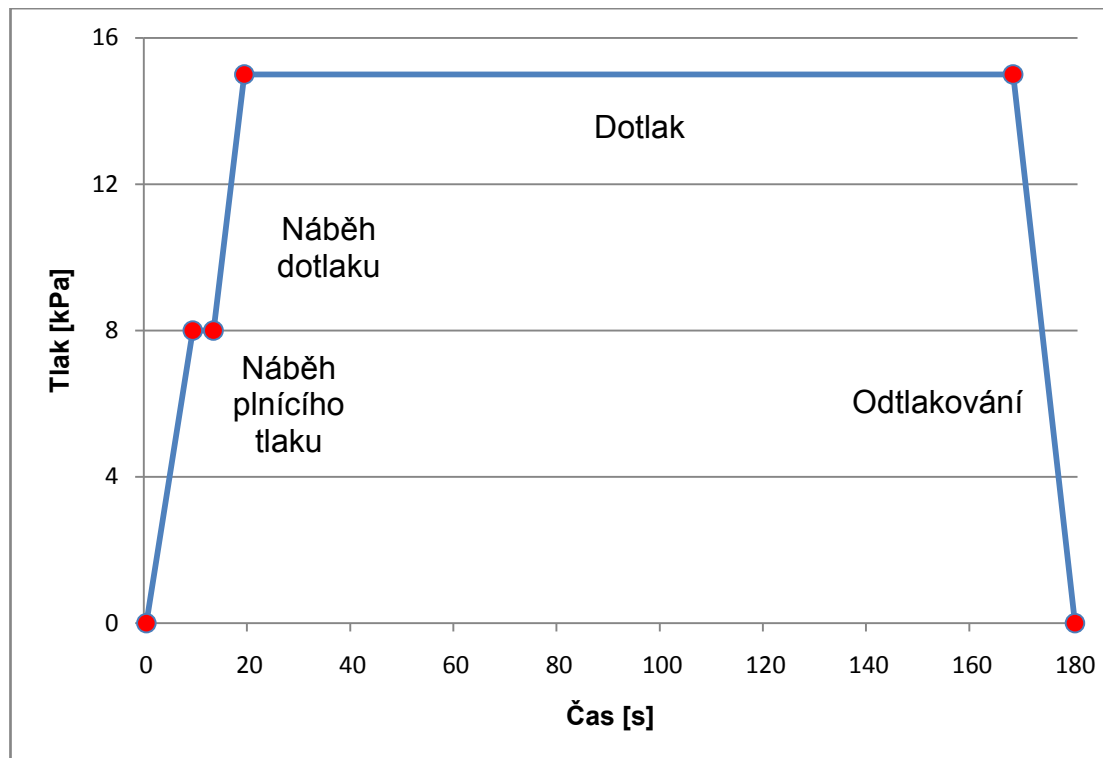


Obr. 36 – Verze 3: *Microporosity*

Snížení teploty taveniny neodstraňuje problémy s vnitřní jakostí odlitku, ale nedochází ani k žádnému zhoršení. Nižší teplota taveniny může zajistit finanční úsporu na provozních nákladech spojených s ohřevem materiálu na zbytečně vysokou teplotu. Stejně tak nabízí možnost dalšího zkrácení cyklu.

### **3.4.3 Varianta 4**

Varianta 4 byla zaměřena na správné zvolení tlakové křivky plnění a optimalizovat tak průběh plnění. Změna byla zvolena na základě vyhodnocení průběhu plnění varianty 1 (výchozí varianta) v kapitole 3.2.1. Při zhodnocení plnění varianty 1, již bylo zmíněno, že tlaková křivka není zvolena zcela ideálně. Velikost plnicího tlaku je zbytečně vysoká, stejně tak doba působení plnicího tlaku. Velikost tlaku při fázi dotlaku může být také nižší, ale čas působení dotlaku je zvolen správně. Na základě těchto výsledků byla tlaková křivka optimalizována (Obr. 37). Průběh náběhu plnicího tlaku a dotlaku byl zachován jako u varianty 1. Tyto rychlosti náběhu tlaků jsou dány konstrukcí stroje a jejich úprava není možná. Byly však změněny velikosti plnicího tlaku a tlaku fáze dotlaku. V čase 9,5 s je dokončeno plnění a velikost plnicího tlaku dosahuje 8,5 kPa. Následuje prodleva na tomto tlaku po dobu 3,5 s. Po uplynutí této prodlevy dochází k přepnutí na fázi dotlaku. Hodnota dotlaku je nastavena na 15 kPa a je ho dosaženo v čase 19 s. Následuje výdrž na dotlaku do času 168 s. Poté dojde k odtlakování.



Obr. 37 – Optimalizovaná grafická závislost průběhu pracovních tlaků během jednoho cyklu

S takto nastavenou tlakovou křivkou byl proveden simulační výpočet a vyhodnocen stejným způsobem jako předchozí varianty. Nebyly zjištěny žádné změny z hlediska plnění, tuhnutí ani vnitřní jakosti odlitku. Je tak potvrzeno, že tlaková křivka použitá ve variantě 1, není zvolena vyloženě špatně, ale hodnoty tlaků byly zbytečně vysoké a časy dlouhé. S využitím simulace lze průběh plnění optimalizovat, protože lze „nahlédnout“ do formy a vidět způsob plnění. S možností úpravy tlakové křivky úzce souvisí možnost vyjmutí odlitku z formy dříve, než tomu bylo doposud. Odlitek je možné vyjmout z formy o přibližně 50 s dříve. Toto bylo popsáno již v kapitole 3.2.2 při vyhodnocování varianty 1.

### Další varianty

Při zpracování této diplomové práce, byly vyzkoušeny další 3 varianty, které však nevedly k lepším výsledkům jakosti odlitku ani nenabízely žádnou možnou úsporu z hlediska provozních nákladů. Byla vyzkoušena varianta, která počítala s odlitkem, u kterého bylo zrušeno předlévání průchozích děr v „ouškách“ odlitku. Tato varianta nevedla ke zlepšení vnitřní jakosti odlitku

a navíc by přibyla nutnost dodatečně obrábět otvory. Byly také ověřeny varianty s přidáním či ubráním přihřívacích hořáků. Měl tak být ověřen vliv těchto hořáků na licí proces. Ukázalo se, že přidání hořáků na intenzitě přihřevu nemá výrazný vliv. Naopak jejich odebrání vedlo k výsledkům, které byly nepříjemné, protože simulační výpočet indikoval pokles jakosti odlitku.

## 4 Diskuze výsledků

Výsledky obsažené v této práci poskytují informace o predikci vad tělesa spojky odlévané ze slitiny hliníku nízkotlakou technologií ve firmě BENEŠ a LÁT a.s. Predikce vad byla provedena na základě numerického simulačního výpočtu v programu MAGMA<sup>5</sup>. Je zde obsaženo porovnání vad na reálných odlitcích s vadami predikovanými za použití simulačního výpočtu. Na základě numerické simulace je možné odhalit příčinu vzniku vad a navrhnout tak úpravy, které povedou ke zvýšení jakosti výrobků.

Příčinou vzniku vad je neusměrněné tuhnutí v horní části řešeného odlitku, vznikají tak teplotní uzly, ve kterých jsou lokalizovány vnitřní staženiny a řediny. Tato diplomová práce dále obsahuje návrh a popis optimalizačních variant, které by mohly problematiku těchto vad ovlivnit. Avšak je nutné provádět ty změny s ohledem na fakt, že změny musí být snadno realizovatelné v probíhající výrobě. Nebylo tedy možné upravovat rozměry ani tvar odlitku. Takové zásahy by znamenaly výrazné finanční náklady na výrobu, nebo úpravu formy. Navržené varianty byly opět numericky simulovány a vyhodnoceny. Po vyhodnocení a porovnání optimalizačních variant s výchozí variantou lze konstatovat, že k výraznému zlepšení jakosti nevedla ani jedna z navržených variant. Pouze varianta, která počítala se změnou materiálu malých jader, ukázala mírné zlepšení výsledků. Další zlepšení by mohlo přinést doporučené chlazení těchto malých jader.

U všech variant docházelo ke vzniku tepelných uzlů, ve kterých následně vznikaly vady vyhodnocené kritériem *Microporosity*. Kritické hodnoty tohoto kritéria jsou od 0,5 %. V odlitcích vznikaly oblasti, kde toto kritérium dosahovalo až 5 %.

Z výsledků numerické simulace však lze doporučit zkrácení licího procesu. Zkrácení licího procesu dokáže zajistit výraznou finanční úsporu. Protože je tento odlitek vyráběn ve velkých sériích (58 000 kusů/rok), to znamená 29 000 cyklů/rok, je doporučené zkrácení licího procesu o 50 s/cyklus velmi výrazné.



Výsledky ukázaly, že minimální teplota kovu na konci plnění je 656 °C. Tato teplota je dostatečně vysoko nad teplotou likvidu (613 °C). V práci je popsána a vyhodnocena varianta s nižší teplotou lití (720 °C). Z výsledků této varianty je patrné, že nedošlo ke zhoršení jakosti odlitku. Lze tak doporučit snížení lící teploty.

V jedné variantě byl pro výpočet použit upravený průběh pracovních tlaků. Výsledky simulace potvrdili, že nedojde ke zhoršení jakosti odlitku. Je tak možné tuto optimalizovanou tlakovou křivku vyzkoušet v provozu slévárny BENEŠ a LÁT a.s.

## 5 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na využití simulačního výpočtu jako nástroje pro zvýšení kvality výroby tělesa spojky ze slitiny hliníku technologií nízkotlakého lití ve firmě BENEŠ a LÁT a.s. Práce se skládá ze dvou hlavních částí, teoretické a experimentální.

Teoretická část je zaměřena na teoretické poznatky o hliníku a jeho slitinách. Dále je v teoretické části popsána technologie nízkotlakého lití. Nakonec se práce věnovala popisu slévárenských vad, které vznikají na odlitcích ze slitin hliníku vyráběných technologií nízkotlakého lití.

Experimentální část práce byla zaměřena na provedení numerické simulace výroby odlitku pomocí softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Nejprve byl proveden výpočet tak, aby odpovídal reálným podmínkám při současné výrobě tělesa spojky ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. Následovalo vyhodnocení simulačního výpočtu procesu lití, tzn. plnění, tuhnutí a chladnutí odlitku. Vady predikované simulačním výpočtem v softwaru MAGMA<sup>5</sup> byly následně porovnány s vadami reálných odlitků. Poté byly navrhnuty optimalizační kroky, které by mohly vést ke zlepšení kvality výroby. Tyto úpravy byly následně ověřeny pomocí simulačního výpočtu.

Z výsledků a poznatků získaných během zpracování této diplomové práce lze formulovat tyto závěry:

1. Technologie nízkotlakého lití velice dobře splňuje předpoklady pro kvalitní výrobu. Z podstaty jejího principu zajišťuje klidné plnění dutiny formy taveninou, dovoluje automatizaci licího procesu, a tím snižuje vliv lidského faktoru na výrobu. Při použití kovové formy je možné tuto technologii použít pro výrobu středních až velkých sérií výrobků.
2. Hlavním problémem při výrobě tělesa spojky ze slitiny hliníku ve slévárně BENEŠ a LÁT a.s. je vznik porozních oblastí.
3. Vznik porozních oblastí v odlitku je zapříčiněn neusměrněným tuhnutím a vznikem teplotních uzlů.
4. Vady reálných odlitků se shodují s vadami predikovanými pomocí numerických výpočtů řešených v této diplomové práci.

5. Z výsledků všech variant řešených v rámci této práce je možné doporučit zkrácení cyklu o 50 – 55 s a snížení teploty lití, která je nyní 740 °C. Snížením teploty lití by bylo možné opět zkrátit čas cyklu, nebo dosáhnout úspor spojených s ohřevem odlévaného materiálu. Další doporučení se vztahuje k materiálu malých jader. Jejich materiál by mohl být změněn na wolframovou slitinu, která má vyšší koeficient odvodu tepla a zajistí rychlejší ochlazování v kritických oblastech. Samotná změna materiálu na wolframovou slitinu nemusí mít dostatečný vliv. Proto je doporučeno provedení aktivního chlazení těchto jader
6. Z důvodu omezení při navrhování optimalizačních variant z hlediska možné změny geometrie odlitku, nevedly navržené optimalizace ke zvýšení jakosti odlitku.
7. Vliv chlazení malých jader a změn geometrie odlitku nebyl ověřen, protože přesahoval rozsah této diplomové práce. Nicméně může být dalším předmětem výzkumu ve firmě BENEŠ a LÁT a.s.
8. Ačkoliv nebylo v této práci ověřeno řešení, které by pomohlo zvýšit jakost daného odlitku, je tato práce pro firmu BENEŠ a LÁT a.s. přínosná. Možnost zkrácení cyklu může přinést jak časové tak finanční úspory. Jednalo se o jeden z prvních projektů řešených v této firmě pomocí simulačního softwaru MAGMA<sup>5</sup>. Byly tak ověřeny a odzkoušeny možnosti tohoto softwaru a byl správně odladěn pro slévárnu BENEŠ a LÁT a.s. To pomůže této firmě při dalším využívání tohoto softwaru.

## Použitá literatura

1. NOVÁ, Iva. *Teorie slévání 2*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-149-X.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
3. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
4. SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. *Teorie slévání*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
5. ČSN EN 1706 – *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnost*. Praha. Český normalizační úřad, 1999. 19 s. Třídící znak 42 1433.
6. *Teorie a metodika slévání a svařování: Letecká výroba*. Praha: ČVUT, 1984.
7. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
8. LPS Process. <http://www.ksmcastings.com/cz> [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.ksmcastings.com/en/lpsprocess>
9. MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-083-5.
10. Technické podklady firmy BENEŠ a LÁT a.s.
11. Low pressure die casting. <http://www.mapeng.net> [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://www.mapeng.net/news/mechanical\\_English\\_article/2012/8/mapeng\\_128171426138063.htm](http://www.mapeng.net/news/mechanical_English_article/2012/8/mapeng_128171426138063.htm)
12. ELBEL, T. 1992. Vady odlitků ze slitin železa: Klasifikace, příčiny a prevence. Brno: Matecs.
13. KOVVI, K. G., V. M. PLJACKIJ a František VESELÝ. *Vady odlitků ze slitin neželezných kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
14. NOVÁ, Iva. *Teorie slévání 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-185-5.
15. KOTAS P. a ŠPAČEK M. 2013. *Magma academy: Základní školení – Technologie nízkotlakého lití*. Pardubice 2015. MAGMA Gießereitechnologie GmbH.
16. KOTAS, Petr. *Integrated modeling of process, structures and performance in cast parts : Ph.D. thesis*. City: Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, 2011.

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Rovnovážný diagram Al-Si .....	13
Obr. 2 – Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Mg po vytvrzení .....	14
Obr. 3 – Pracovní diagram vytvrzování slitin Al-Si-Mg za tepla .....	16
Obr. 4 – Schéma nízkotlakého lití.....	18
Obr. 5 – Slévárenská kovová forma pro nízkotlaké lití.....	18
Obr. 6 – Schéma výroby odlitku nízkotlakou technologií .....	19
Obr. 7 – Bubliny způsobené vodíkem.....	28
Obr. 8 – Zahlcený plyn .....	29
Obr. 9 – Řediny .....	30
Obr. 10 – Odlitek tělesa spojky.....	33
Obr. 11 – Model odlitku s vtokovou soustavou .....	35
Obr. 12 – 3D model součástí formy s odlitky použitý pro výpočet .....	36
Obr. 13 – Grafická závislost průběhu pracovních tlaků během jednoho cyklu .....	39
Obr. 14 – Perspektiva geometrie.....	40
Obr. 15 – Přiřazení materiálových skupin.....	41
Obr. 16 – Solver 5 .....	42
Obr. 17 – Řez modelem odlitků s vytvořenou sítí .....	42
Obr. 18 – Kvalita výpočtové sítě ( <i>Mesh Quality</i> ).....	43
Obr. 19 – Simulace plnění: <i>Temperature</i> .....	46
Obr. 20 – Simulace plnění: <i>Filling temperature</i> .....	47
Obr. 21 – Simulace plnění: <i>Filling time</i> .....	48
Obr. 22 – Simulace plnění: <i>Air entrapment</i> .....	49
Obr. 23 – Simulace tuhnutí: <i>Temperature</i> .....	50

---

Obr. 24 – Zaškrcení taveniny v místě „oušek“ .....	50
Obr. 25 – Simulace tuhnutí: <i>Fraction liquid</i> .....	51
Obr. 26 – Teplotní uzly .....	52
Obr. 27 – Teplotní gradient.....	53
Obr. 28 – <i>Microporosity</i> .....	53
Obr. 29 – Detail zobrazení kritéria <i>Microporosity</i> z kritických oblastí...	54
Obr. 30 – Vady lokalizované na reálném odlitku .....	55
Obr. 31 – Detail lokalizovaných slévárenských vad.....	55
Obr. 32 – Detail slévárenské struktury slitiny AlSi7Mg0,3 .....	56
Obr. 33 – Varianta 2: <i>Fraction liquid</i> .....	57
Obr. 34 – Porovnání variant 1 a 2: <i>Fraction liquid</i> .....	58
Obr. 35 – Verze 3: <i>Filling temperature</i> .....	59
Obr. 36 – Verze 3: <i>Microporosity</i> .....	59
Obr. 37 – Optimalizovaná grafická závislost průběhu pracovních tlaků během jednoho cyklu.....	61

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706.....	12
Tab. 2 – Chemické složení slitiny .....	16
Tab. 3 – Mechanické vlastnosti slitiny .....	17
Tab. 4 – Technologické vlastnosti slitiny .....	17
Tab. 5 – Seznam tříd, skupin a druhů vad odlitků .....	21
Tab. 6 – Vstupní data zadaná do SW MAGMA <sup>5</sup> .....	37
Tab. 7 – Chemické složení odlévaného materiálu .....	38

## **Seznam příloh**

**Příloha č. 1 – Tabulka experimentů**

**Příloha č. 2 – Tepelně fyzikální veličiny odlévané slitiny**

**Příloha č. 3 – Tepelně fyzikální veličiny formy**

**Příloha č. 4 – Závislost koeficientu přestupu tepla na teplotě**

**Příloha č. 5 – Tepelně fyzikální veličiny wolframové slitiny**

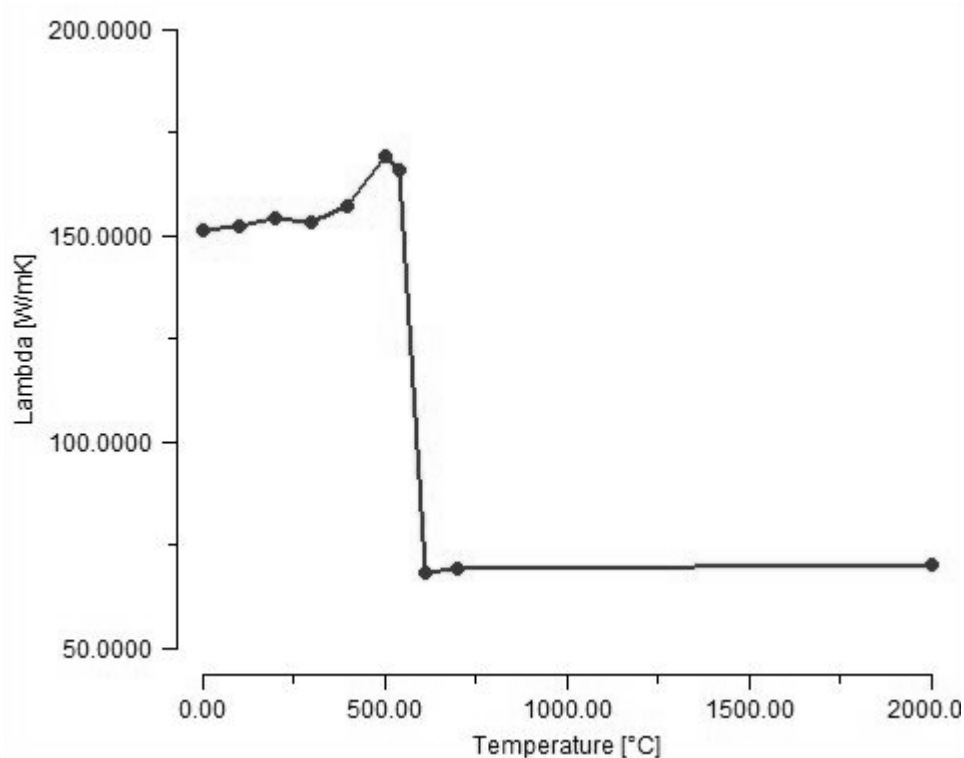


## Příloha č. 1 – Tabulka experimentů

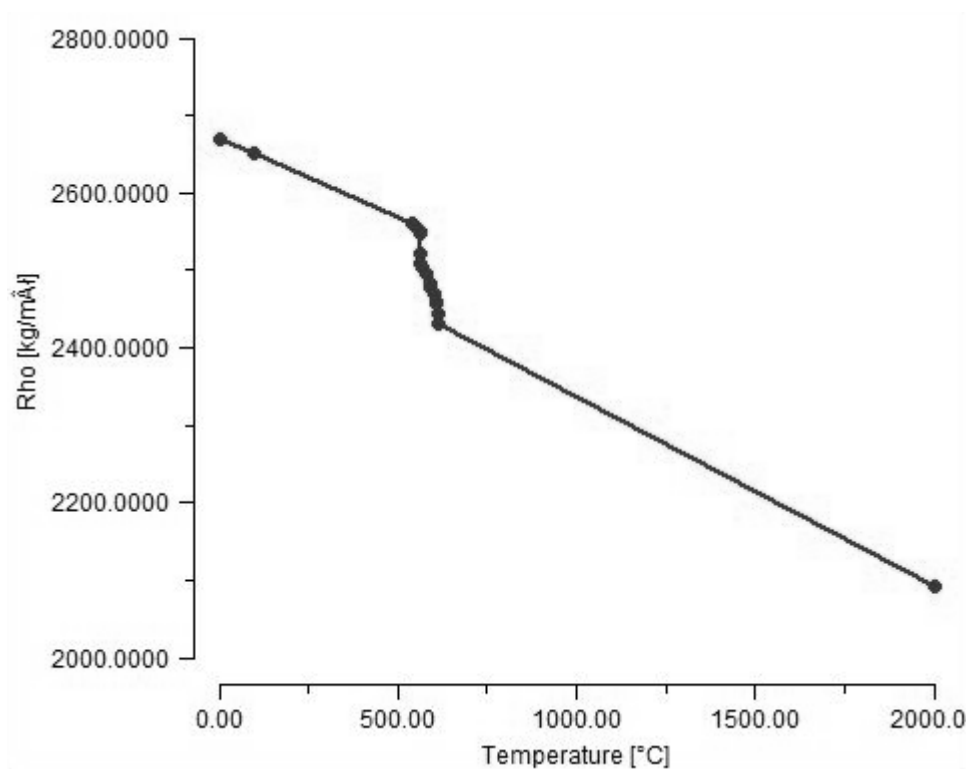
Varianta 1	Výchozí stav, popisuje aktuální stav procesu lití
Varianta 2	Změna materiálu malých jader na wolframovou slitinu
Varianta 3	Snížena teploty lití na 720 °C
Varianta 4	Optimalizace průběhu pracovních tlaků
Varianta 5	Zrušeno předlévání malých otvorů v horní části odlitku
Varianta 6	Zrušen přihřev formy hořáky během výrobního cyklu
Varianta 7	Přidány přehřívací hořáky v místech odlitků, kolmo na stávající hořáky

## Příloha č. 2 – Tepelně fyzikální veličiny odlévané slitiny

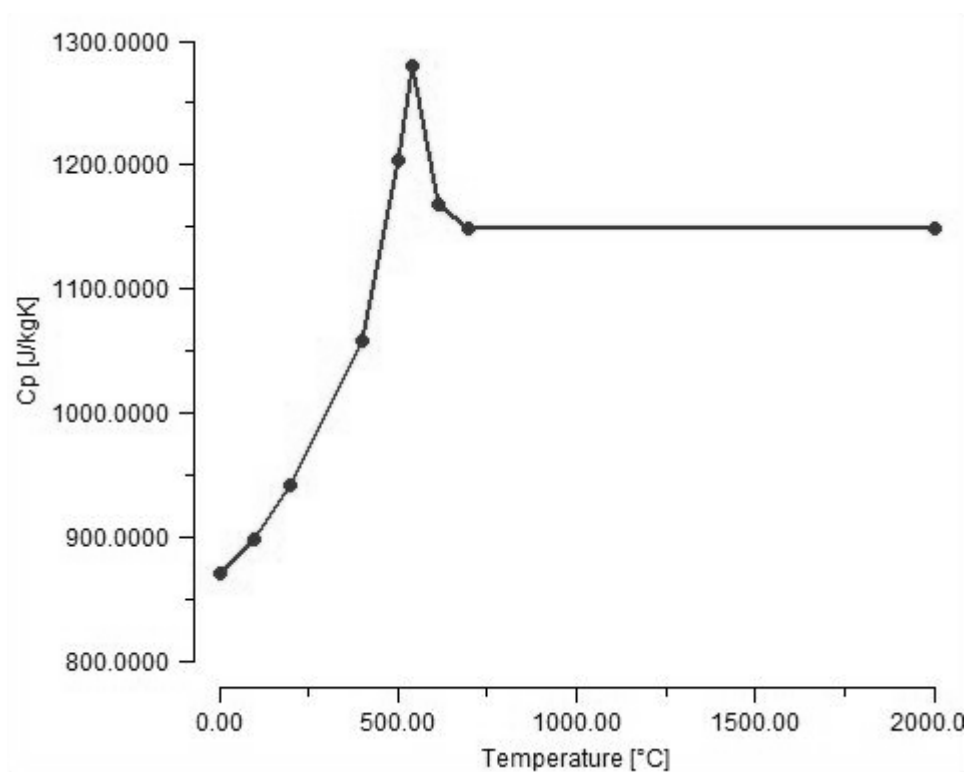
Závislost součinitele tepelné vodivosti slitiny AlSi7Mg na teplotě



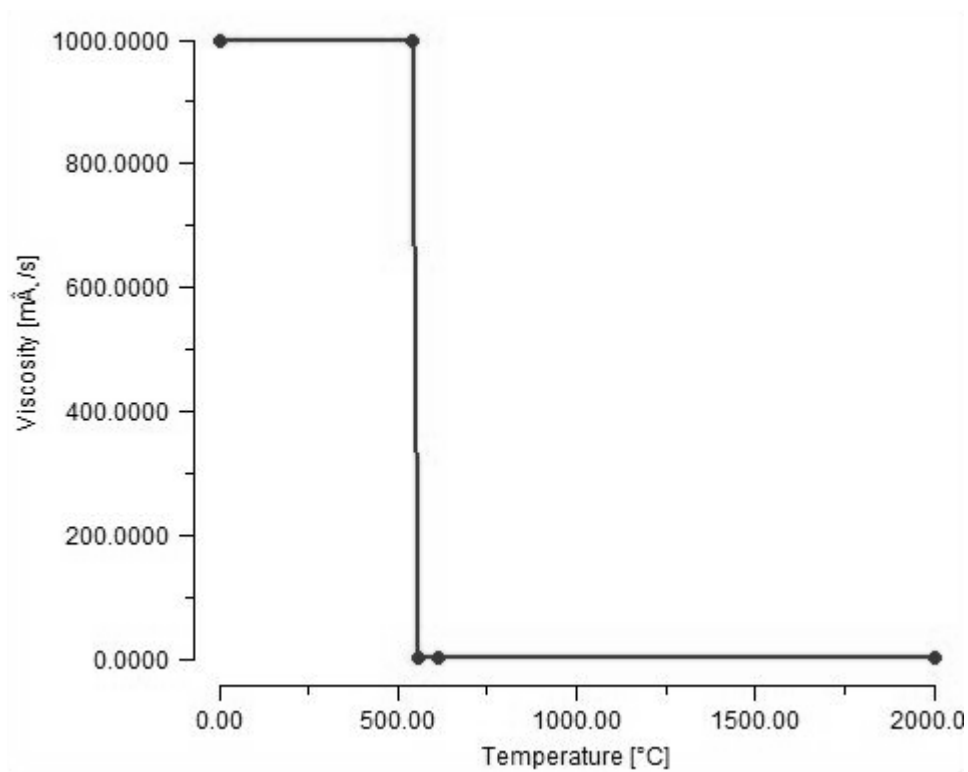
Závislost hustoty slitiny AlSi7Mg na teplotě



Závislost měrné tepelné kapacity slitiny AlSi7Mg na teplotě

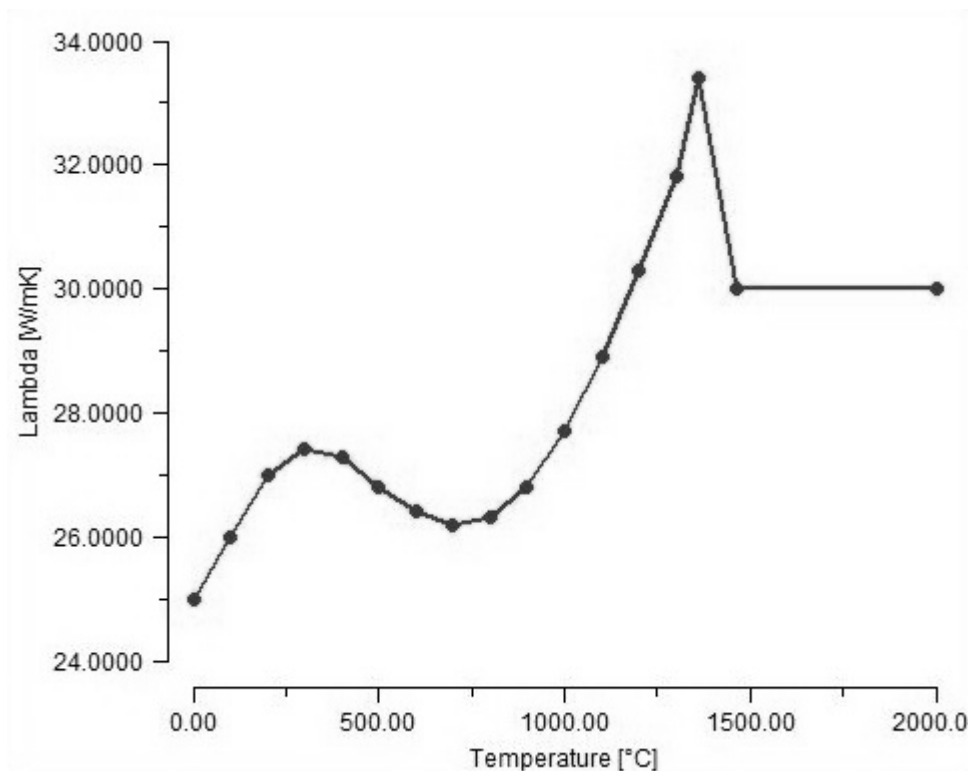


Závislost viskozity slitiny AlSi7Mg na teplotě

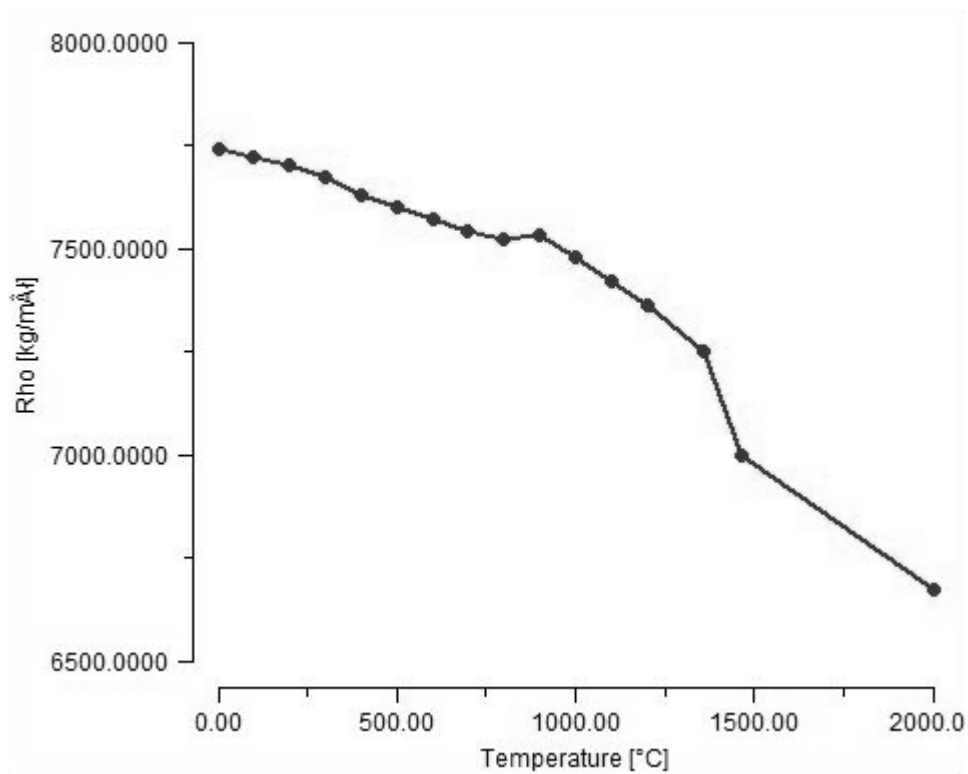


**Příloha č. 3 – Tepelně fyzikální veličiny formy**

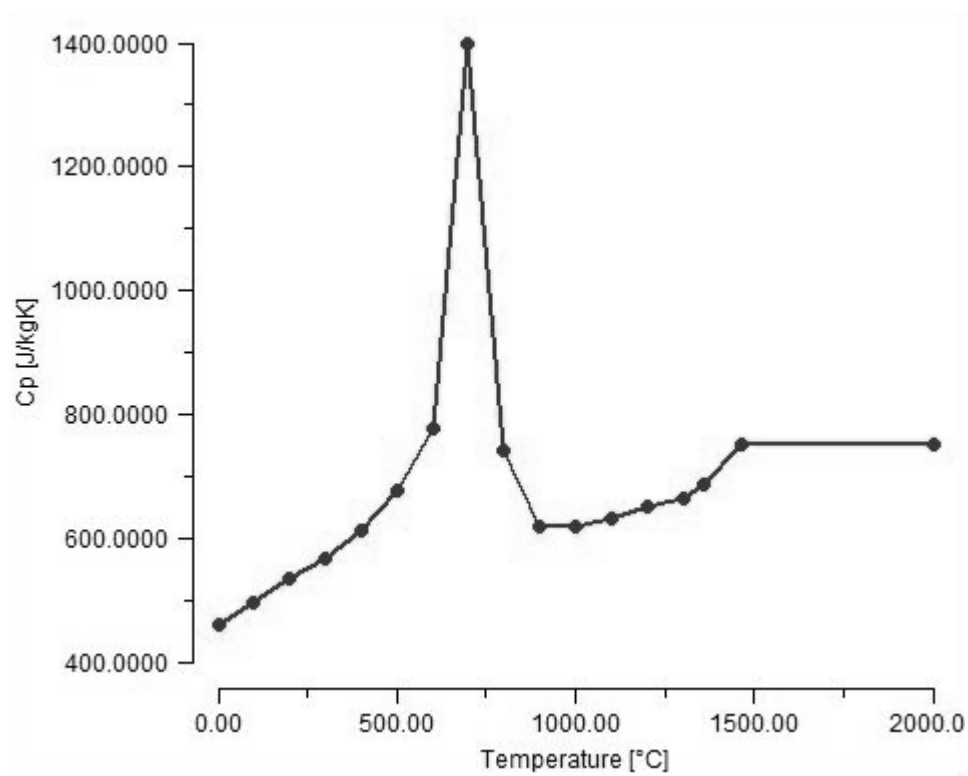
Závislost součinitele tepelné vodivosti formy na teplotě



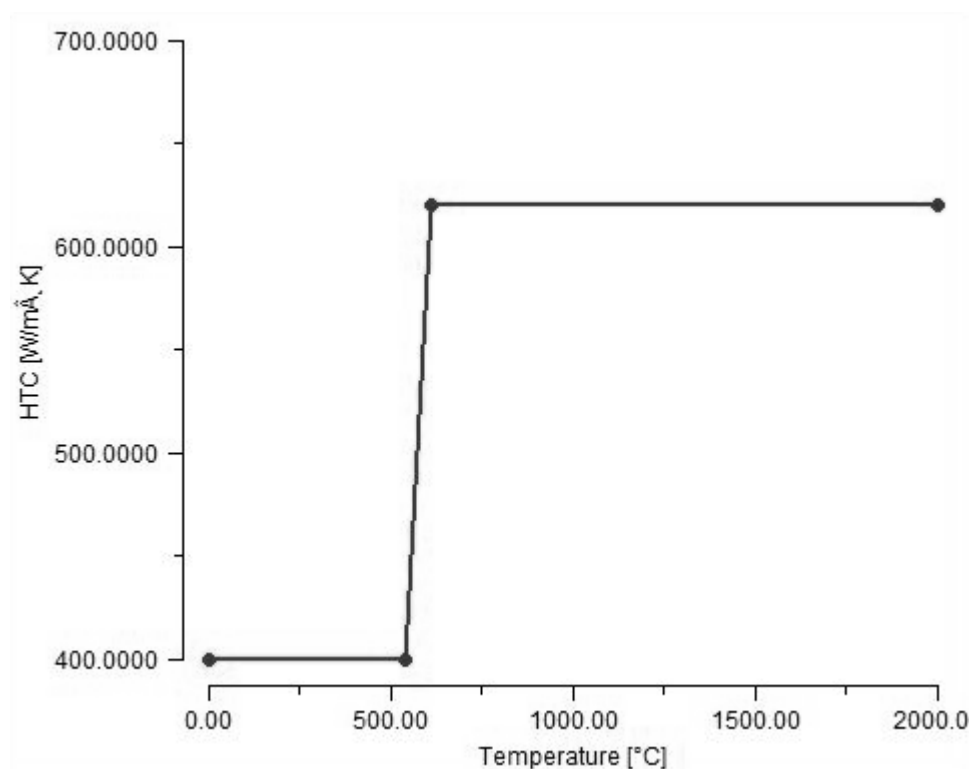
Závislost hustoty formy na teplotě



Závislost měrné tepelné kapacity formy na teplotě

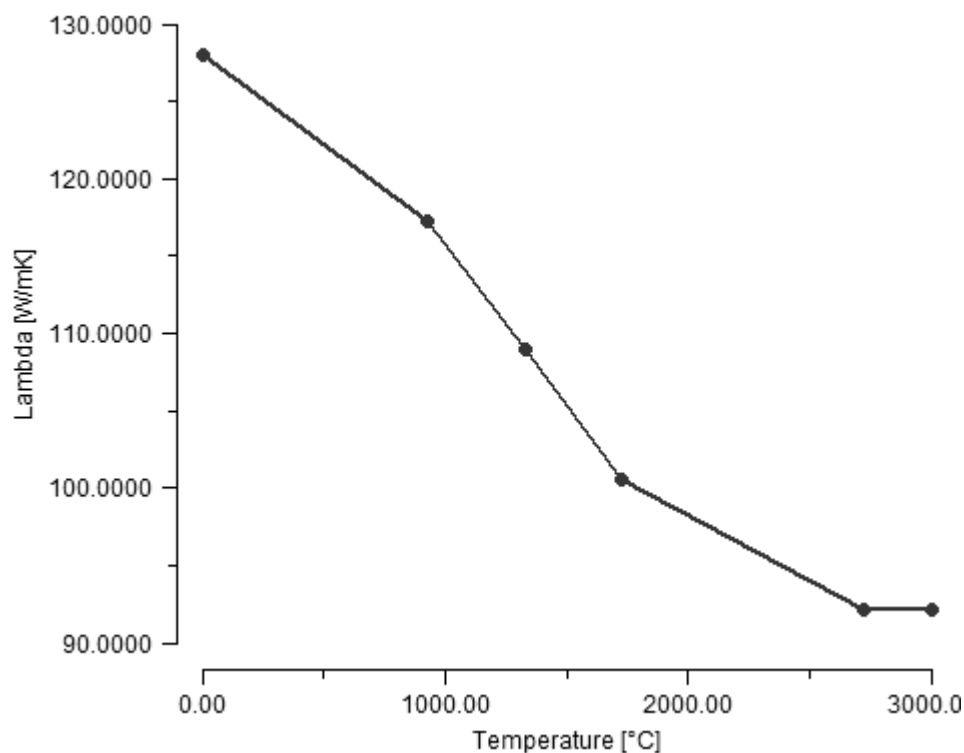


### Příloha č. 4 – Závislost koeficientu přestupu tepla na teplotě



### Příloha č. 5 – Tepelně fyzikální veličiny wolframové slitiny

Závislost součinitele tepelné vodivosti wolframové slitiny na teplotě



Závislost měrné tepelné kapacity wolframové slitiny na teplotě

