

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Židlík
Vojtěch

2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Židlík** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **459903**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace procesu výroby Al odlitku

Název bakalářské práce anglicky:

Optimization of aluminum casting production process

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod
2. Problematika nízkotlakého lití
3. Slitiny Al používané pro nízkotlaké lití
4. Analýza zadaného odlitku
5. Optimalizace výroby
6. Technologicko ekonomické zhodnocení a závěr

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: **29.04.2020**Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**
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.

29.4.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tématem optimalizace procesu výroby Al odlitku pro potravinářský průmysl a je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. V teoretické části se řeší zejména problematika metalurgie slitin neželezných kovů, a především slévárenských slitin hliníku se zaměřením na nízkotlaké lití. V praktické části se bakalářská práce zabývá optimalizací procesu výroby a snahou o dosažení lepších výsledků v oblasti finančních nákladů, produkce, nebo případně v oblasti zmetkovitosti. K simulacím a vyhodnocení optimalizací slouží simulační software MAGMASOFT.

Klíčová slova

Slitiny hliníku, AlSi10Mg, technologie nízkotlakého lití, simulace MAGMASOFT

Abstrakt

This bachelor thesis concerns process optimisation of Al cast production for food industry and it is divided into two parts, theoretical and experimental. Theoretical part deals with metallurgy of non-ferrous metal alloys problematics especially aluminum foundry alloys with a focus on low pressure casting. In practical part of the thesis handles production process optimisation and striving to achieve better results in the area of financial costs, production or eventually scrap. Simulations software MAGMASOFT is used for simulations and optimisation evaluation.

Keywords

Metal aluminium alloys, AlSi10Mg, low pressure casting, simulations MAGMASOFT

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Optimalizace procesu výroby AI odlitku** vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne.....

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. a také svému konzultantovi panu Ing. Milanu Luňákovi z firmy BENEŠ a LÁT a.s. za věcné připomínky, jejich čas, obětavost a cenné rady, které mi byly velkým přínosem během vypracování této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval firmě BENEŠ a LÁT a.s. za poskytnutí podkladů důležitých k vypracování bakalářské práce a za možnost tvořit práci pod vedením této firmy.

Seznam použitých symbolů a jednotek

Značka/symbol	Název	Jednotka
ČSN	Československá technická norma	
ČSN EN	Harmonizovaná Evropská norma	
DIN	Německá národní technická norma	
ASTM	Americká společnost pro zkoušení a materiály	
R_m	mez pevnosti	MPa
$R_{p0,2}$	mez kluzu	MPa
A	tažnost	%
c	tepelná kapacita	$\text{kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$
HB	tvrdost dle Brinella	
ČR	Česká republika	
EN AC	Evropská norma pro značení odlévaných hliníkových slitin	
Ra	drsnost	μm
ÚVN	úplné vlastní náklady	

Obsah

ÚVOD	- 9 -
1. TEORETICKÁ ČÁST	- 10 -
1.1. SLITINY NEŽELEZNÝCH KOVŮ	- 10 -
1.1.1. ROZDĚLENÍ SLITIN NEŽELEZNÝCH KOVŮ	- 10 -
1.1.2. ZNAČENÍ SLITIN NEŽELEZNÝCH KOVŮ	- 11 -
1.2. HLINÍK	- 12 -
1.2.1. VLASTNOSTI HLINÍKU.....	- 13 -
1.3. SLITINY HLINÍKU	- 13 -
1.3.1. VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU.....	- 15 -
1.3.1.1. SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU.....	- 16 -
1.3.1.2. TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU.....	- 17 -
1.3.1.3. MECHANICKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU	- 18 -
1.3.2. SILUMINY.....	- 19 -
1.3.2.1. OČKOVÁNÍ SILUMINŮ	- 21 -
1.3.2.2. MODIFIKACE SILUMINŮ	- 21 -
1.3.2.3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SILUMINŮ.....	- 22 -
1.3.2.4. DĚLENÍ SILUMINŮ DLE LEGUJÍCÍCH PRVKŮ.....	- 22 -
1.3.2.5. PŘÍSADOVÉ PRVKY A NEČISTOTY VE SLITINÁCH Al – Si.....	- 23 -
1.3.3. AlSi10Mg (EN AC – 43100)	- 25 -
1.4. TAVENÍ SLITIN HLINÍKU	- 26 -
1.5. NÍZKOTLAKÉ LITÍ.....	- 28 -
1.5.1. KONSTRUKCE FOREM	- 29 -
1.5.2. TECHNOLOGIE LITÍ.....	- 30 -
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	- 32 -
2.1. DEFINICE – PŘÍPADOVÁ STUDIE.....	- 33 -

2.2.	POPIS SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY	- 36 -
2.2.1.	FLOWCHART	- 38 -
2.3.	OPTIMALIZACE VÝROBY	- 39 -
2.3.1.	SIMULACE SE ZKRÁCENÝM ČASEM LITÍ PŘI SOUČASNÉ DVOUOTISKOVÉ FORMĚ - 39 -	
2.3.2.	SIMULACE LITÍ S NOVOU ČTYŘOTISKOVOU FORMOU	- 42 -
2.3.3.	NÁVRH NOVÉ DVOUOTISKOVÉ FORMY S ÚSPOROU ČASU PŘI APRETACI.....	- 47 -
	ZÁVĚR	- 48 -
	BIBLIOGRAFIE	- 50 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 52 -
	SEZNAM TABULEK	- 53 -

ÚVOD

Optimalizace procesu úzce souvisí s procesním řízením a pomáhá ušetřit náklady na realizaci produktu a zvýšit efektivitu výroby podniku jako celku. K optimalizaci by nemělo docházet pouze v okamžiku, kdy firma funguje, jak má, a pracovníci necítí žádnou povinnost něco měnit. V dnešní době kvalita technologií roste vysokým tempem. Je tedy potřeba sledovat aktuální trendy a snažit se svůj podnik neustále vyvíjet. Optimalizace by se měla týkat převážně kontinuální evoluce menších činností či jejich dílčích částí než velkých projektů, protože právě optimalizace drobných činností vede k postupnému zlepšování celku. Analytická část optimalizace nám popisuje stav „před“ změnou a pomáhá identifikovat nedokonalé prvky. Syntetická část se zaměřuje na stav „po“ změně a následnou realizaci zlepšení. Pro zpracování procesní optimalizace je potřeba si uvědomit všechny tyto informace.

Kořeny slévárenství sahají hluboko do historie řemeslné výroby. První známé postupy odlévání jsou datovány již do roků před naším letopočtem. Hliník se však začal prosazovat v průmyslu až v počátcích 19. století v době průmyslové revoluce a jeho historie je ve srovnání s jinými neželeznými kovy výrazně kratší. V dnešní době patří hliník a jeho slitiny k nejpoužívanějším slitinám neželezných kovů a setkat se s nimi můžeme téměř všude. Jeho největší využití nalezneme v automobilovém, leteckém, stavebním, chemickém, a také v potravinářském průmyslu, který bude v této práci nejzásadnějším.

Odlitek, kterým se bakalářská práce zabývá, slouží pro ohřívání mléka v kávovarech. Komponenta vzniklá ze zmíněného odlitku je dokonce patentována firmou, pro niž je odlitek, potažmo obrobený díl, vyráběn slévárnou. Pro efektivní výsledky je potřeba detailně poznat metalurgii hliníkových slitin a zaměřit se na konkrétní slitinu AlSi10Mg, ze které je vyráběn posuzovaný objekt, a pochopit problematiku nízkotlakého lití hliníku, což je technologie, kterou se odlitek vyrábí. Tyto znalosti by měly pomoci splnit hlavní cíle práce, které jsou:

- zvýšení produktivity při výrobě,
- snížení nákladů na výrobu jednoho kusu odlitku,
- minimalizování zmetkovitosti.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. SLITINY NEŽELEZNÝCH KOVŮ

Pojem neželezné kovy značí všechny kovy a slitiny, jejichž základní prvek je jiný kov, než železo. V periodické tabulce se nachází dohromady 55 kovových prvků, včetně polovodičů. Jedná se tedy o velmi široce a různorodě specifikovanou kategorii materiálů. Největší využití v praxi však mají neželezné kovy: hliník (Al), měď (Cu), zinek (Zn), olovo (Pb), titan (Ti), nikl (Ni) a jejich slitiny.

Ve strojírenství čisté kovy nebývají z důvodu špatných mechanických a technologických vlastností obvykle aplikovány. Slitiny neželezných kovů mají především výrazně lepší mechanické a technologické vlastnosti než kovy samotné a vhodnou kombinací, většinou dvou nebo více prvků, lze získat slitiny s velmi specifickými užitnými vlastnostmi.

Nejrozsáhlejší a nejvíce používaná je ve světě slitina hliníku, čítající téměř 90% podíl hmotnosti všech vyráběných odlitků z neželezných slitin. V poslední době začínají tvořit významnou skupinu produkce díky své nízké hmotnosti a dobrým mechanickým vlastnostem odlitky z hořčíkových slitin. Další důležitou skupinu tvoří slitiny niklu, které se díky svým výborným mechanickým vlastnostem za vysokých teplot a odolnosti proti korozi využívají v automobilovém a leteckém průmyslu. Co se týče progresivity slitin, nejvýznamnější skupinou jsou slitiny titanu díky svým mimořádným mechanickým vlastnostem. [1] [2]

1.1.1. ROZDĚLENÍ SLITIN NEŽELEZNÝCH KOVŮ

Neželezné kovy a jejich slitiny se obvykle dělí dle mnoha hledisek, nejčastěji dle základních prvků, způsobu zpracování, hustoty, tavicí teploty a dle dalších kritérií.

Jednotlivé druhy slitin rozdělujeme podle základního prvku. Prvek, který se ve slitině nachází v největším množství, tvoří až 50% obsah slitiny. Podle něj pak dělíme druhy slitin např. na slitiny hliníku, mědi, titanu apod.

Podle technologie, kterou jsou slitiny zpracovávány, dělíme slitiny neželezných kovů na slitiny slévárenské a slitiny pro tvářením. Slévárenské slitiny obvykle obsahují větší množství přísadových prvků, než slitiny pro tvářením. Jejich obvyklými vlastnostmi jsou větší tvrdost

a pevnost na úkor nižší plasticity. Kromě požadovaných užitečných vlastností musí mít slévárenská slitina také vhodné chemické složení pro dosažení ideálních slévárenských vlastností. Za normálních teplot bývá jejich struktura heterogenní. Slitiny pro tváření většinou obsahují pouze homogenní tuhý roztok základního prvku, což upřednostňuje jejich dobré plastické vlastnosti. Podle teplot tváření dělíme tyto slitiny ještě na tvářené za tepla a za studena.

Hustota je dalším parametrem pro dělení slitin na lehké neželezné kovy a těžké neželezné kovy. Pomyslná dělící rovina pro tyto skupiny se udává hustotou přibližně $4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Do skupiny lehkých kovů patří především slitiny hliníku, hořčíku, i například titanu. Skupinu těžkých slitin pak tvoří zejména slitiny mědi, niklu, zinku, olova a dalších.

Tavicí teplota dělí kovy a jejich slitiny na nízkotavitelné s tavicí teplotou do zhruba $600 \text{ }^\circ\text{C}$ jako jsou například olovo, zinek a cín. Další skupina je se střední tavicí teplotou do přibližně $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ obsahující například hliník, měď a nikl. A poslední skupina je s vysokou tavicí teplotou, kde můžeme najít například titan, chrom, vanad apod. [1]

1.1.2. ZNAČENÍ SLITIN NEŽELEZNÝCH KOVŮ

Značení slitin neželezných kovů je na našem území se provádí dvěma způsoby. V ČR je dáno normou ČSN 42 1401 a zachovává původní šestimístné číslování (druh materiálu), doplněné ev. dvoumístným číslem označujícím stav (způsob odlévání a druh tepelného zpracování). Třetí číslice 4 označuje vždy lehké slitiny, lichá čtvrtá číslice slitiny slévárenské. Poslední trojčíslí určuje slitinu podle chemického složení a z výrobního hlediska. Nové značení je možné názorně rozebrat např. u značení slitiny EN AC – 43100 a má význam následující. EN značí normu, A určuje hliník, C určuje odlitky. První z pěti číslic v pětimístném číselném označení udává skupinu slitin, zde tedy číslo 4 udává slitiny AlSi.

V dnešní době (vzhledem k oblastem průmyslu, kde slitiny Al nalézají největší uplatnění) se více používají zahraniční normy, např. DIN, ASTM apod. a zejména také označení chemickými značkami, které jsou nejnázornější. Např. nejpoužívanější slitina Al slitina ČSN 42 4339 má značení dle DIN 1725/226 a dle ASTM je to slitina s označením AlSi9Cu3. Na první pozici je značka základního prvku, na dalších místech značky přísadových prvků

v pořadí jejich obsahu. Číslice za značkou prvku značí jeho střední obsah ve slitině. Při obsahu prvku nižším než 1% se obvykle množství prvku neuvádí. [2]

1.2. HLINÍK

Hliník (značka Al, latinsky Aluminium) se řadí podle hustoty slitin neželezných kovů mezi lehké kovy a má bělavě šedou barvu. Je kujný a dobře slévateľný. Hliník je v přírodním prostředí jeden z vůbec nejrozšířenějších kovů. Samotná zemská kůra obsahuje zhruba 8% hliníku, který je vázán ve sloučeninách jako jsou bauxit, kryolit, korund, spinely atd. Základní surovinou z výše uvedených pro výrobu hliníku je bauxit. Výrobní proces hliníku je poměrně složitý a sestává se ze dvou částí:

- Výroba oxidu hlinitého z hlinitanových rud – proces sestává z mletí, chemického zpracování hlinitanových rud loužením a následného žíhání na 1200 – 1300 °C.
- Redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu, kterým je roztavený kryolit a v něm rozpuštěný oxid hlinitý, při teplotě 950 – 970 °C. [1] [3]

Výroba hliníku z primárních surovin je energeticky velmi náročná. 1 t hliníku se vyrobí se spotřebou zhruba 4 t bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a zhruba 14 MWh elektrické energie. Tento technicky čistý hliník s čistotou 99 – 99,9% Al s nízkými mechanickými vlastnostmi ($R_m < 100$ MPa, $HB < 40$) a se špatnými slévářskými vlastnostmi se při výrobě odlitků používá velmi zřídka. [3] [4]

Zásadní podíl na výrazném nárůstu výroby hliníku mělo období po 2. světové válce, kdy se začala využívat technologie odlévání do kovových forem především tlakovým litím. Tlakovým litím je v dnešní době vyráběno přibližně 50% z celkové tonáže hliníkových odlitků. Nízkotlaké a gravitační lití čítá dohromady zhruba 40%. Zdaleka ne tolik využívané je s 5% lití hliníkových slitin do pískových forem. Ostatní lití technologie pokrývají zbylých 5%. Princip výhody odlévání tkví v tom, že se jedná o jeden z nejúspornějších výrobních procesů poskytující součástkám jednoduché, ale i složité tvary. Hliník se pro odlévání svým vývojem osvědčil jako materiál pevný, trvanlivý, estetický, a také recyklovateľný. V průběhu let hliníkové aplikace rostly a dokázaly ve spoustě strojírenských odvětvích nahradit např. litiny nebo ocele a nabídnout tak průmyslu ekonomické i ekologické výhody. [1] [5]

1.2.1. VLASTNOSTI HLINÍKU

Tepelná vodivost je významnou fyzikální vlastností čistého hliníku, kdy při teplotě 20 °C dosahuje 235 W.m⁻¹.K⁻¹. Za zmínku stojí také elektrická vodivost, která pro hliník s čistotou 99,99% čítá 2,6.10⁻⁸ Ω.m, jedná se o zhruba 60% elektrické vodivosti mědi. Chemická odolnost hliníku ve vodných roztocích závisí na pH elektrolytu. V intervalu pH 4,5 – 8,5 je výborná, v zásaditém prostředí pouze omezená. Ze slévárenského hlediska je významná vysoká měrná tepelná kapacita zhruba c = 0,9 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ a vysoké skupenské teplo tání 396 kJ.kg⁻¹. Ve svém čistém kovovém stavu je hliník vysoce reaktivní. Při kontaktu se vzduchem dochází k rychlé oxidaci a vytvoření oxidační vrstvy na povrchu, jedná se o sloučeninu Al₂O₃, která je za normálních teplot tlustá cca 10 nm. Vrstva vzniká za účelem vytvoření ochranného filmu, který chrání taveninu a zabraňuje hluboké oxidaci. [1] [14]

Další vybrané fyzikální vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v tabulce 1. Hodnoty čistého hliníku jsou pro konstrukční účely nedostačující, to je důvod rozsáhlého využívání slitin hliníku, jejichž legující prvky výrazně ovlivňují požadované vlastnosti. [10]

Tabulka č. 1 - Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [10]

Hustota	2700 kg.m ⁻³
Teplota tání	660 °C
Teplota vypařování	2520 °C
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98

1.3. SLITINY HLINÍKU

Hutní hliník s čistotou (minimálně 99%) má určující vlastnost vysokou elektrickou vodivost a využívá se např. pro výrobu vodičů rotorů asynchronních motorů. Ostatní vlastnosti čistého hliníku, jako jsou schopnost lití, mechanické vlastnosti, nebo třeba vhodnost pro tepelné zpracování jsou velmi omezené, a proto se pro výrobu odlitků používají z velké procentuální části pouze slitiny hliníku. [5]

Legury nejenže pomáhají v litém stavu dosáhnout kvalitnější slévateľnosti a lepších hodnot pevnosti a tvrdosti, ale některé legující prvky a jejich vhodné kombinace vytvářejí slitiny Al se změnou rozpustnosti a díky tomu také intermetalické vytvrditelné fáze (zejména Mg_2Si , $CuAl_2$) a umožňují podstatně zlepšovat mechanické vlastnosti těchto druhů slitin tepelným zpracováním. Jedná se o tzv. vytvrzování odlitků. [2]

Hlavní přísadové prvky jsou pro určení vlastností slitiny rozhodující. Jejich obsah bývá obvykle po obsahu základního prvku druhý nejvyšší. Ve slévářských slitinách jsou hlavními přísadovými prvky křemík, měď a hořčík. Slitiny hliníku lze rozdělit dle jejich chemického složení. Na základě hlavních přísadových prvků dělíme slitiny hliníku na:

- slitiny Al – Si, tzv. siluminy
- slitiny Al – Cu, tzv. duraly
- slitiny Al – Mg, tzv. hydronaly

Za vedlejší přísadové prvky značíme takové, které mají příznivý vliv na některé vlastnosti daného typu slitiny. Mohou například zvyšovat mechanické vlastnosti, zlepšovat obrobiteľnost, ovlivňovat strukturu kovu, jsou důležité z hlediska tepelného zpracování, nebo při kompenzaci účinku některých doprovodných prvků. Obsah vedlejších přísadových prvků bývá obvykle nižší, než obsah hlavního přísadového prvku. Vedlejších přísadových prvků může slitina obsahovat více najednou. Prvek, který nejvýznamněji ovlivňuje slitiny určitého typu, rozděluje slitiny do skupin, např. u siluminů to mohou být skupiny Al-Si-Cu, Al-Si-Mg apod. Další přísadové prvky mohou být např. Ni, Mn, Ti, Zn, Co apod.

Doprovodné prvky jsou takové prvky, které nejsou do slitin přidávány záměrně. Při překročení daných tolerancí mají za následek obvykle horší mechanické, chemické, nebo technologické vlastnosti slitiny a jsou pak považovány za nečistoty. Jejich působení nepříznivě ovlivňuje vlastnosti základního kovu, v němž jsou rozpuštěny, nebo tvoří vlastní fáze, které mají negativní vliv na vlastnosti slitiny. Zdrojem doprovodných prvků bývají zejména vsázkové suroviny, nebo se do slitiny dostávají v průběhu tavení z vyzdívky, z použitých tavících prostředků, nebo nářadí. Jedním z velkých zdrojů nečistot bývá často přetavovaný vratný materiál. Zásadním problémem u většiny doprovodných prvků je jeho obtížné odstranění ze slitiny. Technologie ve slévárnách často nedovoluje jejich odstranění a snížení obsahu na přípustnou mez je možné pouze ředěním pomocí čistých surovin. Do některých slitin jsou

záměrně přidávány i takové prvky, které mohou u jiných slitin být považovány za nečistoty. Například měď v siluminu zvyšuje pevnostní vlastnosti a zlepšuje obrobiteľnosť. Proto se pro tyto účely používá jako přísadový prvek. Na druhé straně však měď zhoršuje ve slitině korozní odolnost a její přítomnost je nepřijatelná ve slitinách pro potravinářské účely. Podle počtu přísadových prvků (kromě prvků doprovodných) se slitiny rozdělují na:

- binární – obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek
- ternární – kromě základního a hlavního přísadového prvku obsahují jeden vedlejší přísadový prvek
- vícesložkové – obsahují několik vedlejších přísadových prvků

Dle metalurgického charakteru jsou slitiny hliníku obecně děleny na vytvrditelné a nevytvrditelné. [1]

1.3.1. VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Volba chemického složení hliníkových slitin vychází z komplexního posouzení nároků na užité vlastnosti i způsob výroby odlitků. Rozhodující při výběru vhodné slitiny bývají zejména tyto tři parametry:

- technologické vlastnosti
- mechanické vlastnosti
- možnost tepelného zpracování

Technologickými vlastnostmi jsou takové vlastnosti slitin, které souvisí se způsobem výroby součástí. Mezi nejdůležitější technologické vlastnosti patří slévárenské vlastnosti, obrobiteľnosť, odolnost proti korozi, svařitelnost, těsnost, někdy také speciální vlastnosti, jako např. lešitelnost, možnost povrchové úpravy apod.

1.3.1.1. SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Pojem slévárenské vlastnosti značí takové vlastnosti slitin, které souvisí s procesem odlévání. Jsou to především:

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

Slévárenské vlastnosti jsou úzce spojené se šířkou intervalu tuhnutí dané slitiny. Nejlepšími slévárenskými vlastnostmi disponují slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, tj. s chemickým složením, které se blíží složení eutektickému. Naopak slitiny vykazující široký interval tuhnutí mívají horší slévárenské vlastnosti. Bývá u nich horší zabíhavost a zejména mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a mikrostaženin. Jejich nálitkování je málo účinné, nálitky mají krátkou dosazovací vzdálenost. Důsledkem je nehomogenní struktura a v jejím důsledku netěsnost odlitků.

Jedna z nejdůležitějších slévárenských vlastností udávající schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy je **zabíhavost**. Pokud je posuzována schopnost odlévání slitiny, je nutno rozlišovat tekutost a zabíhavost. Tekutost je fyzikální vlastnost, která charakterizuje viskozitu tekutého kovu a se zabíhavostí je spojena jen částečně. Zabíhavost závisí na šířce intervalu tuhnutí dané slitiny. Eutektické slitiny, které mají úzký interval tuhnutí, mají dobrou zabíhavost, opakem je tomu tak u slitin se širokým dvoufázovým pásmem, které mají zabíhavost špatnou. Obsažené oxidické prvky ve slitině výrazně zhoršují její zabíhavost. Při technologickém řešení tenkostěnnosti odlitku a přesnosti kopírování dutiny formy kovem, nám pomáhá tyto kritéria určit právě zabíhavost.

Další důležitou slévárenskou vlastností je **sklon ke vzniku staženin** vzniklých objemovým úbytkem kovu během tuhnutí a tendencí ke vzniku soustředěných (vnitřních a vnějších) staženin, případně rozptýlených staženin a ředin. Slitiny se sklonem ke vzniku soustředěných staženin je možno dobře nálitkovat, jejich odlitky disponují dobrou těsností. Tímto způsobem obvykle tuhnou eutektické slitiny. Narozdíl od těch se širokým dvoufázovým intervalem, které mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a obtížně se nálitkují. Jejich odlitky mají horší těsnost.

Rozpustnost plynů v tekutém stavu je charakterizována **sklonem slitin k naplynění**. Některé legury naplynění podporují, jiné naopak snižují. Stupeň naplynění taveniny určuje tvorbu plynových bublin v odlitku.

Odolnost proti vzniku trhlin a prasklin je schopnost odolávat napětí, které vzniká vlivem smršťování v oblastech teplot tuhnutí a v době ochlazování. Tato slévárenská vlastnost je velmi důležitou zvláště pro odlitky s nerovnoměrnými tloušťkami stěn, tvarově složitých, odlitků s tuhou konstrukcí a v případech, kdy je smršťování brzděno permanentní formou. [1]

1.3.1.2. TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Mezi nejzásadnější technologické vlastnosti slitin hliníku řadíme:

- obrobiteľnosť
- odolnosť proti korozi
- svařitelnost
- lešitelnost

Obrobiteľnosť je dána kombináci veľikosti obráběcích sil, charakteru třísek, kvality obrobeného povrchu a životnosti ostří obráběcích nástrojů. U slitin hliníku je typickým prvkom, který má pozitivní následky pro zlepšení obrobiteľnosti, měď. Slitiny mědi zaručují krátkou třísku a hladký obrobený povrch. Pro obrobiteľnosť je typicky nepříznivý vliv obsah železa. [1]

Odolnosť proti korozi popisuje schopnosť odolávat chemickému působení plyných, nebo kapalných prostředí. V zásadě lze korozi dělit dle probíhajících dějů na chemickou a elektrochemickou. Chemické reakce se objevují v elektricky nevodivých prostředích jako jsou např. oxidační, nebo redukční plyny a nevodné kapaliny. Elektrochemická koroze způsobuje povrchové, nebo hloubkové reakce mezi některými fázemi slitiny s korozním mediem, případně rozpouštění některých složek slitiny v korozním prostředí. Slitiny Al-Si disponují obvykle dobrou odolností proti korozi. Prvek, který výrazně zhoršuje odolnosť slitiny hliníku proti korozi, je měď. Slitiny Al – Mg mají vysokou odolnosť proti korozi. [1] [4]

Svařitelnost definuje schopnost spojování materiálu potřebnými technologiemi svařování a dosažitelnost pevnosti a kvality spojů v závislosti na užitné, estetické, pevnostní a kvalitativní požadavky.

Leštitelnost je vztahována k technologiím povrchových úprav a charakterizuje schopnost povrchového zpracování odlitků. Příkladem metody zpracování povrchu u slitiny hliníku může být třeba anodická oxidace. [1]

1.3.1.3. MECHANICKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Mechanické vlastnosti slitin hliníku se odvíjejí od druhu a vlastností základní kovové hmoty, disperzity strukturních složek, přítomnosti a tvaru intermetalických fází a v neposlední řadě od tepelného zpracování, které v této situaci hraje zásadní roli. Víme, že jemnozrnná struktura má významně pozitivní vliv na všechny mechanické, zároveň však i na technologické vlastnosti slitin. Citlivost vlastností hliníkových slitin na rychlost tuhnutí je velmi vysoká, proto se při jejich odlévání preferují takové metody, které zajišťují vysokou rychlost při ochlazování tuhnutí. Mezi nejzásadnější mechanické vlastnosti hliníkových slitin patří:

- mez pevnosti
- tažnost
- tvrdost
- mechanické vlastnosti za zvýšených teplot

Mez pevnosti nejpoužívanějších hliníkových slitin v litém stavu vykazuje hodnoty v rozmezí cca 150 – 250 MPa. Pevnostní vlastnosti můžeme velmi zlepšit vytvrzováním. Vytvrditelné slitiny obvykle obsahují hořčík, měď, nebo se může jednat o slitiny typu Al – Si – Mg, Al – Si – Cu. Použitím technologie vytvrzování můžeme dosáhnout zlepšení mezi pevnosti R_m a tvrdosti oproti litému stavu až o 30 – 50 %. U slitin Al – Si – Mg můžeme dosáhnout pevnosti až kolem 330 MPa. [1]

Tažnost dle vzorce $A = \left(\frac{L_u - L_0}{L_0} \right) \cdot 100$ [%] u standartních hliníkových slitin dosahuje hodnot ve výši 1 – 4 %. Pomocí modifikace eutektika lze dosáhnout výrazného zvýšení tažnosti slitin Al – Si. [6]

Tvrдост slitin typu Al – Si dle Brinella se v litém stavu nachází v intervalu hodnot 60 – 80 HB. Pomocí vytvrzování jsme schopni zvýšit tvrdost až na hodnoty pohybující se v okolí 100 HB. Tvrдост u slitin Al – Mg je obvykle nižší, zhruba na hranici 50 HB.

Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot u hliníkových slitin relativně rychle klesají. U slitin typu Al – Si a Al – Si – Mg dochází k výraznějšímu poklesu už při teplotách nad asi 200 °C. I vytvrzené slitiny, které mají zvýšené mechanické vlastnosti, za těchto teplot o svoje vlastnosti vcelku rychle přicházejí a pod působícím napětím dochází k tečení. Teplotní stabilitu slitin Al -Si lze zvýšit přísadou mědi, niklu, případně dalších stopových prvků. [1]

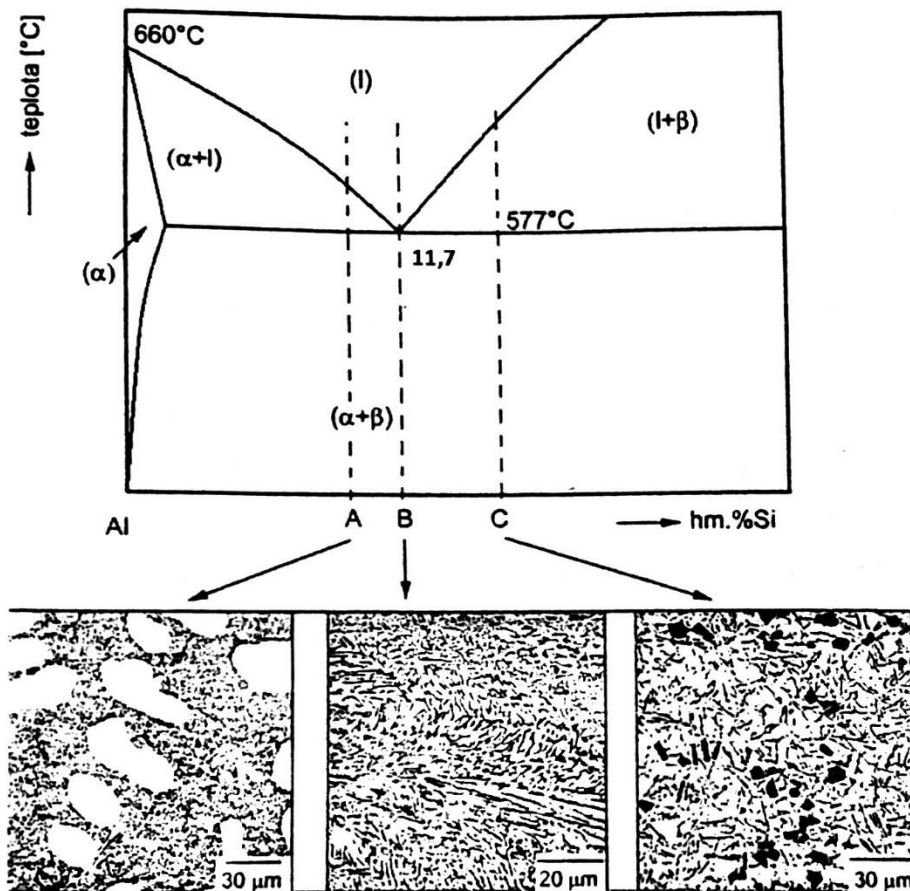
1.3.2. SILUMINY

Ze všech skupin slitin Al jsou siluminy ty vůbec nejrozšířenější. Disponují optimálními mechanickými a metalurgickými vlastnostmi. Norma ČSN EN 1706 rozlišuje celkem 29 druhů jednoduchých, nebo více komplexních slitin tohoto typu. Hliník s křemíkem tvoří rovnovážný diagram eutektického typu s eutektickým bodem při obsahu Si 11,7% a teplotě 577 °C, s omezenou vzájemnou rozpustností složek v tuhém stavu. [3] Obsah křemíku jako základní přísady je ve dvou a vícesložkových slitinách typu Al – Si vždy vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku Al. Podle rovnovážného diagramu tvoří pak hliník (fáze α) s křemíkem (fáze β) eutektický systém s omezenou rozpustností Si v Al. [2]

Siluminy lze dělit na:

- podeutektické – obsah Si do 10%
- eutektické – s obsahem Si v oblasti eutektického složení
- nadeutektické – s obsahem Si nad eutektickým složením (hranice není přesně definována, charakteristický je výskyt fáze β ve struktuře)

Na Obrázku 1 lze na rovnovážném diagramu Al – Si vidět typické strukturní složení dle obsahu Si. (A – podeutektické, B – eutektické, C – nadeutektické)



Obrázek č. 1 - Rovnovážný diagram Al - Si a typické strukturní složení dle obsahu Si [2]

Podeutektické slitiny Al – Si jsou ze siluminů ty vůbec nejrozšířenější a patří mezi ně i AlSi10Mg, která je vhodná pro lití do písku, gravitační kokilové lití a nízkotlaké lití v provedení bez tepelného zpracování, avšak lze také běžně tepelně zpracovávat. Jako u všech ostatních skupin, jsou podeutektické slitiny členěny do dalších podskupin v závislosti na rozdílném stupni legování dalšími prvky a co je ještě důležité, na odstupňování výše nežádoucích příměsí. Po metalurgické stránce tyto slitiny s nárůstem obsahu Si k eutektickému bodu zužují svůj interval tuhnutí a stoupá jejich zabíhavost. [3] Podeutektické slitiny jsou nejčastěji využívány pro středně namáhané odlitky. Nevýhodou těchto slitin bývá náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.

Eutektické slitiny Al – Si jsou charakteristické velmi úzkým intervalem tuhnutí, vysokou zabíhavostí a sklonem k soustředěným staženinám. Jejich odlitky se musí bohatě nálitkovat.

Eutektické siluminy jsou nejčastěji využívány pro tenkostěnné odlitky, s požadavky na vysokou tažnost a plasticitu na úkor pevnosti. [3] [8]

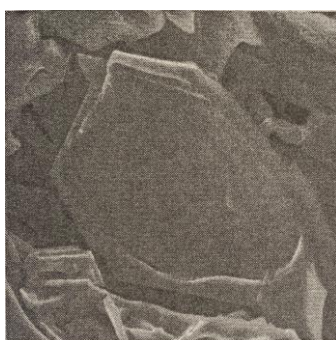
Nadeutektické slitiny nejsou nikterak ostře ohraničeny od těch eutektických. Oficiálně je nelze nalézt v národních, ani EN normách. Jedná se spíše o slitiny využívané u specializovaných výrobců, případně u speciálních aplikací. [8] Jejich strukturální charakter je předurčuje pro kluzná použití hlavně u pístů spalovacích motorů menších průměrů. Obsah Si se pohybuje kolem 20%. [3]

1.3.2.1. OČKOVÁNÍ SILUMINŮ

Účelem očkování je zjemnění zrna vnášením nukleačních zárodků, respektive látek, z nichž se nukleací zárodky tvoří. Očkování má podstatný vliv na struktury podeutektických slitin Al – Si, které mají největší podíl primární fáze. Očkují se ale i nadeutektické slitiny, kde je ovlivňována krystalizace. [2] Experimenty dokázaly, že nejúčinnější je slitiny očkovat borem, lze však využít i titan. [3]

1.3.2.2. MODIFIKACE SILUMINŮ

Modifikace je pochod, kterým je zjemňován pouze eutektický křemík. Na Obrázku č. 2 je vidět prostorový snímek, kde je v nemodifikované podobě vyloučen eutektický Si ve formě hrubých desek. Při správném provedení modifikace dojde při tuhnutí eutektika k vylučování eutektického Si ve formě tyčinek až vláken. Tato modifikace křemíku výrazně zlepší pevnost v tahu a tažnost. Chemické prvky Na, Sr a Sb jsou hlavními prvky využívané při modifikování siluminů. [3]



Obrázek č. 2 - Prostorový obraz desek nemodifikovaného křemíku u slitiny AlSi10Mg [2]

Křemík se v eutektiku vylučuje ve třech různých morfologických podobách. Podle tvaru eutektického křemíku se též nazývá i příslušné eutektikum:

- zrnité – Si tvoří polyedrická zrna, na metalografickém výbrusu se jeví jako jehlice
- lamelární – Si tvoří hrubé lamely, na metalografickém výbrusu se jeví jako jemnější jehlice
- modifikované – Si tvoří jemná vlákna, na metalografickém výbrusu se jeví jako tečky, případně jako tyčinky [2]

1.3.2.3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SILUMINŮ

Kromě běžných úprav tepelným zpracováním jako např. žíhání, či stárnutí odlitků se u slitin Al – Si provádí již o několik kapitol výše zmiňované vytvrzování. Vytvrditelné jsou takové slitiny, které mají požadované množství Mg a Cu. Pro Mg je požadovaný obsah pro vytvrzení 0,2 – 0,4%. Vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žíhání, ochlazení a stárnutí. Princip tepelného zpracování tkví v tom, že rozpouštěcím žíháním dojde k rozpuštění vytvrzovacích fází, vyloučených nepříznivě po hranicích primárních zrn, do přesyceného tuhého roztoku Al. Tento nerovnovážný stav je zachycen velmi rychlým ochlazením do vody (nejčastěji je použita voda, ale je možné použít i jiná média). Následné stárnutí, které dělíme na přirozené a umělé, způsobuje rozpad přesyceného tuhého roztoku. Dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších na tento prvek a v nich k nukleaci nové fáze. Takto vznikají koherentní precipitáty, které jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jehož mřížku poněkud deformují a vyvolávají v ní vnitřní pnutí. Tato pnutí jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. [2]

1.3.2.4. DĚLENÍ SILUMINŮ DLE LEGUJÍCÍCH PRVKŮ

Siluminy jsou dle legujících prvků děleny do dvou základních skupin

- binární siluminy = jednoduché slitiny Al – Si
- nebinární siluminy = slitiny Al – Si, které obsahují jeden nebo více vedlejších přísadových prvků

Slitiny Al -Si řadíme mezi binární slitiny. Jejich strukturu tvoří tuhý roztok α (Al) a eutektikum. Podíl eutektika nám dává informaci o procentuálním obsahu křemíku ve struktuře. Tyto slitiny disponují kvalitními slévárenskými vlastnostmi, mají vysokou zabíhavost, nízký sklon k tvorbě staženin a dobrou odolnost vůči tvoření trhlin za tepla. Hotové odlitky z těchto slitin jsou těsné vůči kapalinám a plynům a je možné u nich provádět pájení a svařování. [9] [10]

Slitiny Al – Si – Mg spadají do skupiny podeutektických slitin, kde je obvyklý výskyt hořčíku v rozmezí 0,25 – 0,45% a u některých druhů je dokonce v rozmezí 0,5 – 0,7%. [10] V litém stavu mají tyto slitiny pouze průměrné vlastnosti, vysokých mechanických vlastností dosahují až po vytvrzování, po kterém je však oproti litému stavu mírně snížená tažnost. Slitiny, které obsahují více Si (např. AlSi10Mg) disponují lepšími slévárenskými vlastnostmi a také lepší svařitelností. Jejich vlastnosti jsou vhodné pro technologii gravitačního lití do písku a kovových forem a také pro lití pod tlakem. Využití pro odlitky z těchto slitin můžeme nalézt v automobilovém, leteckém i potravinářském průmyslu pro jejich odolnost vůči vysokému namáhání. [1]

1.3.2.5. PŘÍSAĐOVÉ PRVKY A NEČISTOTY VE SLITINÁCH Al – Si

Křemík

Křemík je v siluminech základním přísadovým prvkem. Vyšší obsah Si ve slévárenských slitinách způsobuje zúžení intervalu tuhnutí a zlepšení téměř všech slévárenských a technologických vlastností. Zvyšuje zabíhavost, zmenšuje se součinitel objemového smrštění během tuhnutí a sklon ke vzniku ředin, snižuje se nebezpečí vzniku trhlin a prasklin, zlepšují se kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru, zmenšuje se tepelná roztažnost, zvyšuje se korozní odolnost. Vyšší obsah křemíku ve slitině znamená však také její vyšší cenu. [2]

Hořčík

Hořčík je velmi důležitým prvkem ve slitinách Al – Si pro vytvrzování za tepla. Většinou se ve slitině vyskytuje jeho obsah v rozmezí mezi 0,3 – 0,7%. V litém stavu ovlivňuje hořčík minimálně pevnost a snižuje tažnost. Opačně je tomu tak u vytvrzených slitin – čím vyšší je obsah Mg, tím vyšších hodnot pevnosti lze dosáhnout. Vzhledem k množství, které se do

slitin přidává, má hořčík minimální vliv na slévárenské vlastnosti, stejně tak i na korozní odolnost. [1]

Měď

Měď je považována za nejběžnější a také nejstarší přísadový prvek vyskytující se ve slitinách Al – Si. Její obsah dosahuje hodnoty až 5%. Zásadní činnost mědi pozorujeme při tuhnutí, kdy jeho interval měď značně rozšiřuje a tím může podpořit vznik ředin a trhlin. Do slitin se měď dostává především ze vsázkových surovin, převážně ze šrotu znečištěného mědí, a není možné ji běžnými metalurgickými postupy odstranit. V siluminech plní funkci zvyšování pevnosti a tvrdosti, zároveň však snižuje tažnost a zhoršuje korozní odolnost. Významně však zvyšuje obrobiteľnosť odlitků [2] [3]

Železo

Železo je obvykle ve slitinách hliníku považováno za nečistotu. Hlavním faktorem proč tomu tak je, jsou jeho nepříznivé vlivy na mechanické vlastnosti. Do slitin se dostává mnoha způsoby, nejčastěji však ze vsázkových surovin, nebo rozpouštěním železa z povrchově neošetřeného tavírenského nářadí, z kovových forem, zalitých kovových sítok apod. Rozpouštění železa v tekutém hliníku je poměrně intenzivní, není však řeč o tavení. [1] V tuhém hliníku nemá železo téměř žádnou rozpustnost a proto již při malém obsahu tvoří různé intermetalické sloučeniny. Nejméně příznivé jsou jehlicovité fáze, tvarově příznivější jsou manganem ovlivněné fáze. U běžných odlitků bývá obvykle tolerován obsah železa do 0,6%. U vysokopevných, dynamicky namáhaných odlitků je limitován pod 0,15%. Jinak je tomu u slitin určených pro odlévání pod vysokým tlakem. U těch se obsah Fe pohybuje okolo 1%, jelikož snižuje lepení kovu na formu, což způsobuje snadnější vyjímání odlitku a zároveň se zvyšuje životnost forem. [2]

Mangan

Mangan má za úkol ve slitinách Al – Si kompenzovat nepříznivý vliv železa. Obsah manganu by ve slitinách měl dosahovat hodnot zhruba ½ obsahu železa. V obvyklém množství není vliv manganu na siluminy nikterak zásadní. Díky kompenzačnímu účinku na vznik nepříznivých fází železa se zvyšují mechanické vlastnosti, zejména se snižuje křehkost slitin.

1.3.3. AlSi10Mg (EN AC – 43100)

Slitina AlSi10Mg, dle normy EN AC – 43100, [15] je typickou mírně podeutektickou slitinou s dobrými lícími vlastnostmi a je běžně využívána pro tenkostěnné odlitky se složitou geometrií. Její mechanické vlastnosti nabízí dobrou pevnost, tvrdost (až 100HB) [13], dynamické vlastnosti a může tedy být uplatněna pro součásti vystavené vysokému zatížení. Díly ze slitiny AlSi10Mg jsou vhodné pro aplikace u kterých je požadována kombinace dobrých tepelných vlastností při nízké hmotnosti. Vyniká také dobrou odolností vůči trhlinám za tepla, výbornou svařitelností a dobrou obrobiteľností. Tyto kritéria slitiny AlSi10Mg jsou hlavními důvody pro její vhodné využití v automobilovém, leteckém a také potravinářském průmyslu. [7] [10] [12]

Tabulka č. 2 - Chemické složení AlSi10Mg [11]

Legující prvek	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe
Hmotnostní zlomek [%]	zbytek	9 - 11	<0,1	0,05	0,45 – 0,6	0,05	<0,55

Tabulka č. 3 - Vlastnosti slitiny AlSi10Mg [10]

Slévárenské vlastnosti		Mechanické vlastnosti odděleně litých zk. tyčí		Mechanické a fyzikální vlastnosti	
Interval tuhnutí [°C]	cca 550-600	Pevnost v tahu Rm [MPa]	180	Měrná hmotnost [kg/m ³]	2,65
Nepropustnost	dobrá	Mez kluzu Rp _{0,2} [MPa]	90	Svařitelnost	vynikající
Zabíhavost	vynikající	Tažnost A [%]	2,5	Obrobiteľnost	dobrá
Odolnost proti trhlinám za tepla	vynikající	Tvrdost dle Brinella	55 HBS	Odolnost proti korozi	dobrá

1.4. TAVENÍ SLITIN HLINÍKU

Tavení je považováno za obecně jednu z nejnáročnějších operací, která má několik cílů:

- za minimální spotřeby energie dosáhnout potřebné teploty taveniny
- potlačit ztráty kovu a přísad tzv. propalem
- dosažení požadovaného chemického složení
- zamezit kontaminaci taveniny nežádoucími příměsi včetně plynů
- omezit nežádoucí reakce s pecní vyzdívkou a atmosférou [2]

Tavenina je připravována v pecích, do kterých jsou vkládány ingoty (slévárenské housky), nebo případně vratný materiál. Při volbě vsázkových surovin bereme v potaz dva aspekty, a to kvalita a ekonomie. Snažíme se dosáhnout určitého kompromisu mezi nimi a dosáhnout požadované kvality kovu při co nejnižších nákladech. Náklady se nevztahují pouze na cenu vsázkových surovin, ale spadají pod ně také zpracovací náklady, riziko zmetkovitosti a cena oprav odlitků. Často se vyplatí použít kvalitní, dražší a ověřené suroviny, které nám zaručí požadovanou jakost odlitků, než se vydat cestou úspor a použít levnější, ale nekvalitní vsázky. [1]

Za nejkvalitnější vsázkový materiál jsou považovány z hutí dodávané **ingoty slitin**. Jejich chemické složení bývá garantované, obsahují málo nečistot a rozpuštěných plynů. Jedná se však o ekonomicky nákladnou vsázkovou surovinu. Neméně důležitou součástí vsázky jsou **vratné materiály**, např. vtoky, nálitky, zmetky. Může se stát, že v některých případech je využití tekutého kovu při odlévání menší než 50%, a téměř vždy vratný materiál představuje značný podíl z nataveného kovu. Schopnost využití vratného materiálu je důležitým technickým aspektem každé slévárny. Vratný materiál však obsahuje větší množství vměstků, chemických nečistot a rozpuštěných plynů, je proto potřeba sledovat čistotu vratu. Další vsázkovou surovinou je **hliníkový šrot**, který tvoří především vyřazené součástky a třísky. Hliníkový šrot je nejméně spolehlivá vsázková surovina z důvodu neznámého, nebo nejistého chemického složení, vysoký obsah oxidických vměstků, možné znečištění organickými látkami apod. Do slitin s požadavkem na vysoké kvalitativní požadavky se hliníkový šrot nedoporučuje používat. [1]

Celková tepelná energie potřebná pro tavitelnost (= schopnost kovů a jejich slitin přecházet do kapalného skupenství a tvořit homogenní taveniny požadovaného složení a čistoty)

s potřebnou lící teplotou se skládá z tepla ohřevu vsázky v tuhém stavu, skupenského tepla a přehřátí. Celková entalpie slitiny je dána součtem entalpií jednotlivých prvků ve slitině. V tabulce č. 4 jsou znázorněny tepelně fyzikální vlastnosti nejdůležitějších neželezných kovů pro slitinu AlSi10Mg. [1]

Tabulka č. 4 - Tepelně - fyzikální vlastnosti některých neželezných kovů [1]

prvek	teplota tavení [°C]	střední měrné teplo [kJ/kg.K]		skupenské teplo [kJ/kg]
		tuhý stav	tekutý stav	
hliník	660	1,05	1,09	396
hořčík	650	1,17	1,32	372
křemík	1410	0,84	2,10	1411

Tavení vsázky probíhá v tavicích pecích, kde je tavenina ohřívána na lící teplotu. Po uskutečnění nezbytných metalurgických procesů se tavenina přemístí do udržovacích pecí, které mají funkci lokálních zásobníků taveniny pro jednotlivá stanoviště. Dle způsobu ohřevu taveniny hliníkových slitin dělíme pece na plamenné, nebo elektrické. Jako palivo plamenných pecí je v dnešní době využíván téměř výhradně zemní plyn. Elektrické pece dělíme na odporové a indukční. [1] [8] Důležité druhy pecí využívané v praxi se dělí dle konstrukce a způsobu tavení na:

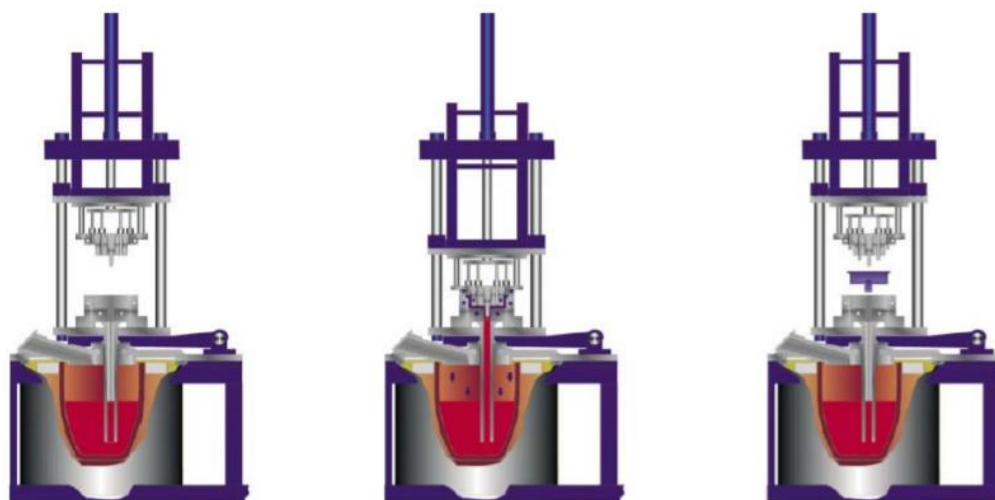
- kelímkové pece – po roztavení kovu z pece se vyjmou či vyklopí a slouží také jako transportní a lící pánve
- komorové pece – skládají se z tavicí a nístějové části; vsázka v tavicí části nepřichází do přímého styku s taveninou
- šachtové pece – založené na principu protiproudého výměníku tepla
- vanové pece – mají vanovitý tvar s poměrně malou hloubkou; často využívané jako udržovací pece
- dávkovací pece – určeny k automatickému dávkování tekutého kovu [1]

Metalurgie hliníku je závislá na jeho specifických a chemických vlastnostech. Nebezpečí představuje vznik nekovových vměstků a naplynění taveniny vodíkem. Proto jsou důležitou součástí metalurgie hliníku rafinace (= proces, při kterém je v tavenině snižováno množství vměstků) a odplynění taveniny. [8]

1.5. NÍZKOTLAKÉ LITÍ

Svémi parametry je možné nízkotlaké lití srovnat s litím do gravitačních kokil, proti kterému má ve spoustě svých vlastností navrch. Z hlediska technologických vlastností se jedná především o klidné plnění formy, které je u Al odlitek zásadní. Další nezbytnou výhodou představuje vysoká schopnost využití tekutého kovu. Oproti gravitačnímu lití, které je schopno využít kov na cca 65%, nízkotlaké lití dosahuje hodnot až 95%. [16]

Proces nízkotlakého lití je vhodný pro automatizaci, což umožňuje jednomu operátorovi obsluhovat dle náročnosti více stanišť najednou. Výhody pro operátora jsou menší fyzická námaha a také bezpečnost, kdy nehrozí riziko popálení tekutým kovem. Nízkotlaká udržovací pec představuje hermeticky uzavřený prostor, což má za následek menší energetické ztráty. [16] Odlévání je prováděno zvýšením tlaku nad hladinu kovu, to způsobuje vytlačení kovu z kelímku udržovací pece stoupací trubící vzhůru do formy. Jelikož je ústí stoupací trubice ponořeno pod vrstvu oxidů a nečistot na hladině taveniny, vstupuje do formy čistý kov bez vměstků. Nárůst tlaku reguluje rychlost stoupaní kovu tak, aby bylo plnění naprosto klidné. Jelikož působením tlaku se do tuhacího odlíku průběžně doplňuje kov, působí tak vtok současně jako nálitek. Přívod a vypouštění stlačeného vzduchu koriguje elektropneumatický proporcionální ventil. Přetlak se v peci udržuje po celou dobu tuhnutí odlitku. Po ztuhnutí se přetlak zruší a kov ze stoupací trubice samovolně vyteče zpět do kelímku pece. Po rozevření formy se odlitek vyhazovači vytlačí z pohyblivé části formy. Schéma procesu nízkotlakého lití a vzhled nízkotlakého lícího stroje je možné vidět na obrázcích 3 a 4. [1]



Obrázek č. 3 - Schéma procesu nízkotlakého lití [17]



Obrázek č. 4 - Nízkotlaký lící stroj

1.5.1. KONSTRUKCE FOREM

Konstrukce forem pro nízkotlaké lití jsou v porovnání s formami pro gravitační a vysokotlaké lití z hlediska pořizovacích nákladů na formu neekonomičtější. Jedním z důvodů je, že formy nemusí být nutně z legovaných ocelí, i přes namáhání tlakem a působení tepla během lících cyklů. Na rozdíl od zanedbatelného namáhání formy tlakem, vyvolává cyklické působení tepla ve formě střídavě vysoké napětí a jeho pokles. Funkční část formy, která je ohřátá díky kontaktu s nataveným kovem, je působením tepla roztahována více než povrch formy, který svou přítomností brání tomuto roztahování. [16]

Důležitým aspektem pro technology při navrhování a konstruování forem jsou značné zkušenosti. Samotná výroba forem není příliš odlišná od výroby kokil pro gravitační lití. Výchozím materiálem pro výrobu forem jsou obvykle tvářené materiály. Přesnost (toleranční

třída IT 8), které dosahují formy pro nízkotlaké lití, je oproti gravitačnímu lití zpravidla o 1 – 2 stupně přesnosti výše, tzn. Odlitky jsou přesnější z nízkotlakého odlévání. Rozdíl je ten, že vůle vyhazovače a odvzdušňovací štěrby může být maximálně 0,15 mm. Drsnost povrchu tvaru odlitku je předepisována Ra 6,3 a pro vtokové soustavy a nálitky Ra 12,5. Tyto drsnosti jsou velmi ovlivněny opotřebením formy a abrazivním tryskáním před každým použitím. Postřík, který po nanesení chrání vtokové soustavy a nálitky, je silně tepelně izolačně působící a je záměrem, aby se neloupal z dutiny formy. Životnost forem je závislá na členitosti a hmotnosti odlitků a také na použitém materiálu pro jejich výrobu. Optimální životnost forem u středně složitých odlitků je stanovena na cca 30 – 40 000 cyklů. [16]

1.5.2. TECHNOLOGIE LITÍ

Technologii nízkotlakého lití není možné použít pro výrobu všech druhů odlitků. Je důležité vzít v potaz, že nízkotlaké odlitky disponují převážně jedním plnicím kanálem, který je současně také jediným nálitkem. Plnicí kanál je nutné umístit ideálně do nejsilnější stěny, případně do tepelného uzlu odlitku. Vhodné konstrukční řešení odlitku pro nízkotlaké lití je takové, kdy nejvzdálenější část odlitku od plnicího kanálu je nejtenčí a směrem ke vtoku se rozšiřuje. Kov stoupající při lití vtokovým kanálem pomalu do formy, se o její stěny ochlazuje tak, že po naplnění formy tuhne od nejtenčí a nejvzdálenější stěny odlitku směrem ke vtokovému kanálu. Z důvodu vytlačování vzduchu z formy před stoupajícím kovem, je nutné do formy vhodně umístit odvzdušnění. Odvzdušnění je obdobné jako u kokilové formy s rozdílem rozměru odvzdušňovací štěrby. Ta by neměla přesáhnout hodnotu 0,15 mm. Není vyloučeno ani navržení průduchů, kdy nejúčinnější je využít dělicí rovinu. Konstruktor musí citlivě navrhovat dělení a vložkování forem, z důvodu vhodného usměrnění tuhnutí odlitku a odvodu vzduchu přes odvzdušňovací systém. [16]

Zárukou kvalitního odlitku s dobrými mechanickými vlastnostmi je tepelná vyváženost formy. Podmínkou je, aby hmotnost a povrch formy zabránily klesnutí teploty pod technologicky stanovenou úroveň. Hodnota proměnné je závislá na typu a složitosti formy, většinou se hodnota vyskytuje v intervalu 380 – 450 °C. Téměř všechny formy jsou během procesu chlazeny. Nejčastěji je využíváno chlazení vodou, ale je možné použít i chlazení vzduchem, nebo vodní mlhou. Nevýhoda použití vzduchu je malá účinnost. Chlazení formy je opět závislé

na zkušenostech technologa. Jeho vhodné využití je takové, které pomáhá usměrňovat tuhnutí odlitku. Chlazená je nejvzdálenější část formy od vtoku, a to z pravidla tak, že jsou navrtané otvory, kterými proudí voda. Jejich vzdálenost musí být 10 – 15 mm od stěny odlitku. Doporučený je návrh co nejmenších otvorů a navýšení pouze pokud je chlazení nedostatečné. Z bezpečnostních důvodů nesmí vyvrtanými otvory vniknout voda do dutiny formy, a už vůbec ne do pece. [16]

Vtokový kanál je jednou z nejdůležitějších částí nízkotlaké formy. Obvykle je navrhovaný válcový tvar vtokového kanálu, který je směrem k odlitku kuželově rozšiřován. Pro plnou funkčnost vtokového kanálu je zásadní jeho tepelná izolace. Znamená to, že materiál v něm musí tuhnout směrem od odlitku, nikoliv od jeho stěn, tím pádem je důležitá volba jeho průměru. Pokud je jeho průměr navržen příliš velký, má to za následek dlouhé chladnutí odlitku a to ovlivňuje produktivitu práce a vliv dlouhého tuhnutí zároveň způsobuje hrubší strukturu odlitku, což má za následek horší mechanické vlastnosti. U malého vtokového kanálu zase hrozí nebezpečí ztuhnutí materiálu v celém průřezu dříve než v odlitku, u kterého je poté pravděpodobný výskyt vnitřních, nebo povrchových staženin. [16]

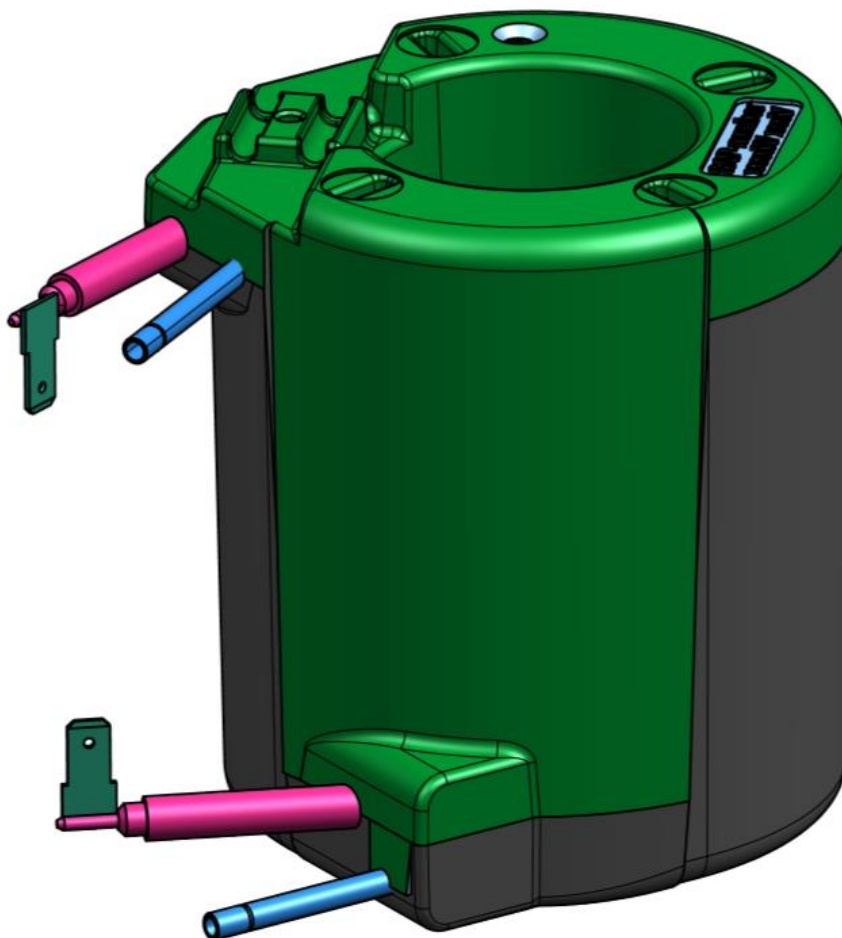
Napojení vtokového kanálu na odlitek je možné provést několika způsoby. Jak již bylo zmíněno, o nejúčinnější využití kovu se jedná v případě, kdy je kanál napojen přímo na odlitek. U konstrukčně menších odlitků je možné řešení napojení na jeden vtok více odlitků tak, že vtokový kanál je centralizovaný vůči poli odlitků. Další možností napojení při větším množství malých odlitků je společný pravítkový vtok, kde se vtokový kanál nachází v jeho středu. Nálitky jsou používány u odlitků, kde není možné dosáhnout usměrněného tuhnutí z jednoho místa. Tyto nálitky musí být uzavřené, dobře odvodušněné a především dobře tepelně izolované. A přesto je jejich praktické použití skutečně velmi málo časté. Používají se pouze tam, kde je to nezbytné, jelikož u těchto odlitků přicházíme o největší výhodu nízkotlakého lití, a to vysoké využití nataveného kovu. [16]

Pomocí pískových jader je možné vytvářet složité dutiny nízkotlakých odlitků, tak jak by nebylo možné konvenčním odformováním ocelovými částmi formy. Při použití pískových jader je důležité dbát na to, aby nebylo porušeno usměrněné tuhnutí odlitku vlivem zhoršeného odvodu tepla. Dalším nezbytným parametrem je dostatečné odvodušnění formy pro volný odchod vznikajících plynů z teplem degradujících pískových jader. [16]

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této bakalářské práce byla zadána společností BENEŠ a LÁT a.s. zaměřující se na slévání hliníku, zinku a lisování plastů se sídlem v Poříčanech.

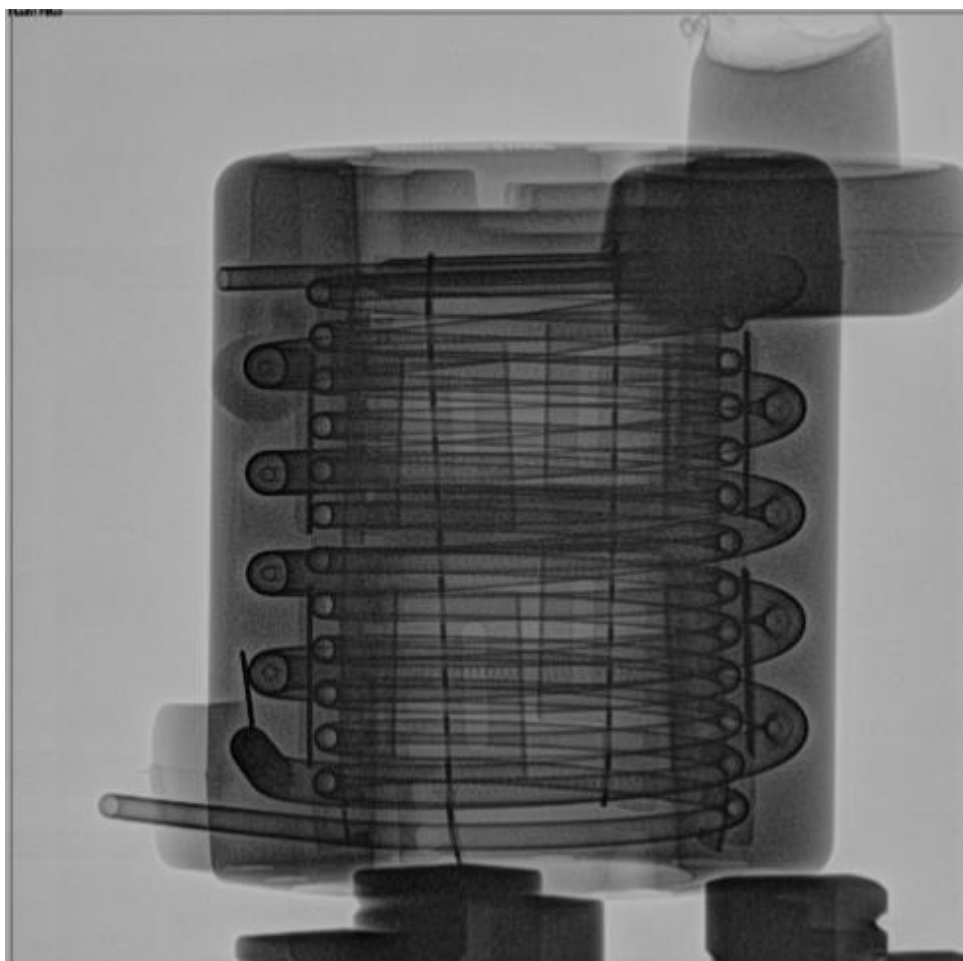
Obsahem experimentální části bylo nalezení optimalizace technologického a ekonomického řešení hliníkové součásti vyráběné technologií nízkotlakého lití za pomoci zadání vhodných parametrů do simulačního programu MAGMASOFT. Software je zaměřen na inovativní řešení při výrobě odlitků a nabízí pozorovateli virtuální vyhodnocení procesu lití. Díky těmto vlastnostem softwaru je možné si ověřit kvalitu technologického řešení ještě před zahájením výroby. Bylo provedeno více návrhů optimalizace, která měla za úkol najít nejvhodnější řešení a přinést tak společnosti snížení nákladů na výrobu produktu a zvýšit tak efektivitu výroby podniku.



Obrázek č. 5 - Zkoumaný odlitek

2.1. DEFINICE – PŘÍPADOVÁ STUDIE

Odlitek vyráběný technologií nízkotlakého lití do kovové formy z materiálu EN AC – 43100 (viz. tabulka č. 3, strana 25) slouží v reálném prostředí jako ohřívač mléka v kávovarech. Celý díl se skládá ze dvou základních částí, a sice hliníkové slitiny a spirály, která je ve slitině zalitá. Vzájemné rozložení spirály a odlitku je názorně zobrazeno na obrázku č. 6.



Obrázek č. 6 - Rentgenový snímek odlitku

Sama „spirála“ se však ve skutečnosti skládá ze dvou různých spirál. První spirálou protéká mléko a druhá spirála ohřívá tu první za pomoci elektrického proudu, který vytváří teplo. Firma dodává zákazníkovi několik druhů spirál, které se liší výkonem elektrického proudu. Tento fakt však hraje v experimentální části zanedbatelnou roli. Spirály jsou do slévárny dodávány externí firmou a před jejím uložení do kovové formy je při očividné nepřesnosti zapotřebí zkontrolovat její geometrické vlastnosti. Kontrola se provádí přípravkem na kontrolu spirál zachyceným na obrázku č. 7. Po samotném odlití lze také provést test elektrické vodivosti, který je znázorněn na obrázku č. 8.



Obrázek č. 7 - Přípravek pro kontrolu geometrických vlastností spirály



Obrázek č. 8 - Test elektrické vodivosti

Samotný odlévací proces probíhá na autorském stroji společnosti BENEŠ a LÁT a.s. pro nízkotlaké lití značeném NTL II BaL (obrázek č. 4) a vyžaduje pečlivý postup několika operací pro dosažení kvalitního odlitku. Kokila musí být řádně očištěna drátěným kartáčem od starého postřiku a ohřáta plynovými hořáky na teplotu odparu vody postřiku. Následuje postřik a nastavení přesných parametrů procesu – plnění, dotlak, tuhnutí, čas dochlazování, zavírání a otevírání. Po dohřátí kokily na provozní teplotu je nutné vyfoukat nečistoty z kokily stlačeným vzduchem. Po těchto přípravných operacích je možné bezpečně vložit zakládací přípravky se spirálou (viz. obrázek č. 9) a spustit cyklus. V momentě, kdy cyklus skončí, odeberou se odlitky pomocí zakládacích přípravků a nechají se vychladnout na chladicí stoličce. Po vychladnutí se odmontují zakládací přípravky. Následuje optická kontrola se zaměřením především na vady obsahující porezitu, vměstky, studené spoje. Pokud tyto vady nedosahují velkých plošných rozměrů, je ve většině případů povoleno lepit je diamantem. Nepříjemnou vadou jsou však obnažené spirály. Pokud spirála není vždy obalena hliníkem, hrozí při opakovaném používání propálení spirály horkou vodou. Po optické kontrole surový odlitek o hmotnosti 1,75 kg (viz. obrázek č. 10 a)) pokračuje dále směrem k apretaci.



Obrázek č. 9 - Zakládací přípravek se spirálou

Apretace se sestává ze tří operací. Nejdříve příslušný pracovník vezme surový odlitek a odřízne nálietek, dále k pasové brusce a na ní ho odhrotuje po obvodu a na vrcholcích odlitku. Dále pomocí ruční brusky odhrotuje okolí vylézajících konců spirály. Hotový odlitek po apretaci je možné vidět na obrázku č. 10 b).



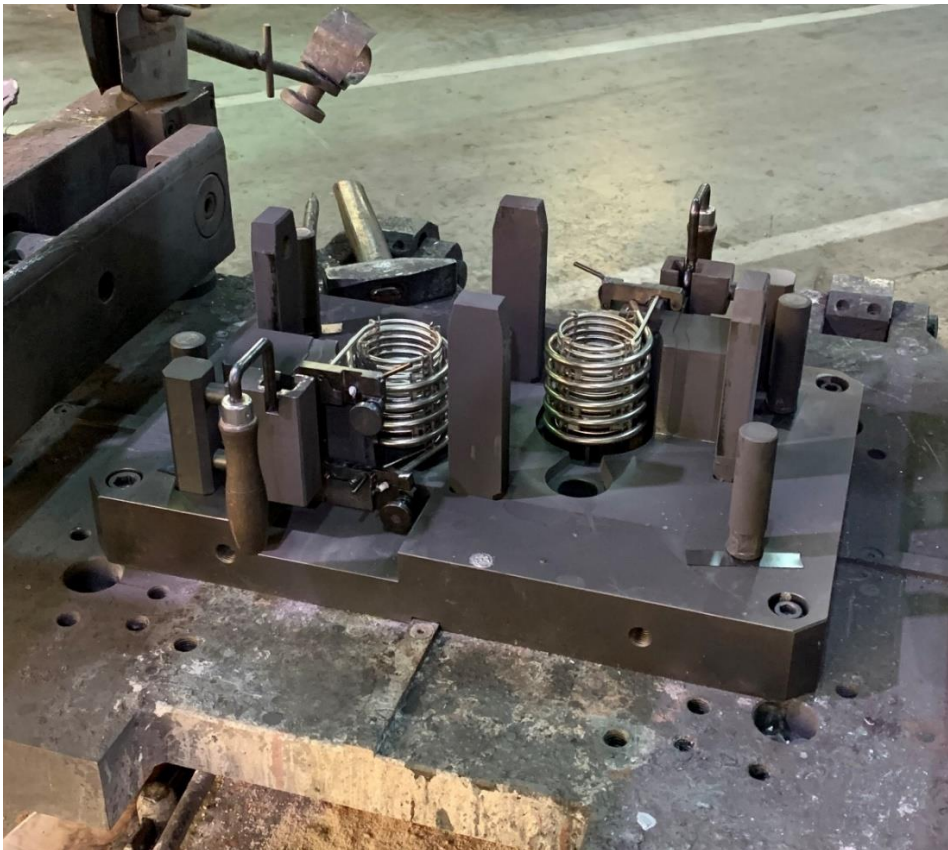
a)

b)

Obrázek č. 10 – a) Odlitek před apretací; b) Odlitek po apretaci

2.2. POPIS SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY

Při současném stavu výroby používá společnost BENEŠ a LÁT a.s. dvouotiskovou formu. Forma se základacím přípravkem a spirálou je zobrazena na obrázku č. 11. Konkrétní technologický postup včetně zadávaných parametrů odlévání zobrazuje tabulka č. 5. Náklady na výrobu jednoho kusu značíme neznámou hodnotou „x“, která je rovna 100% a od které se budou procentuálně odvíjet náklady na nové možnosti optimalizačních řešení. Hodnota „x“ je použita z důvodu ochrany zákazníka a pro naše experimentální potřeby postačí. Tato hodnota je pomyslná a nahrazuje náklady pro 1 ks odlitku.



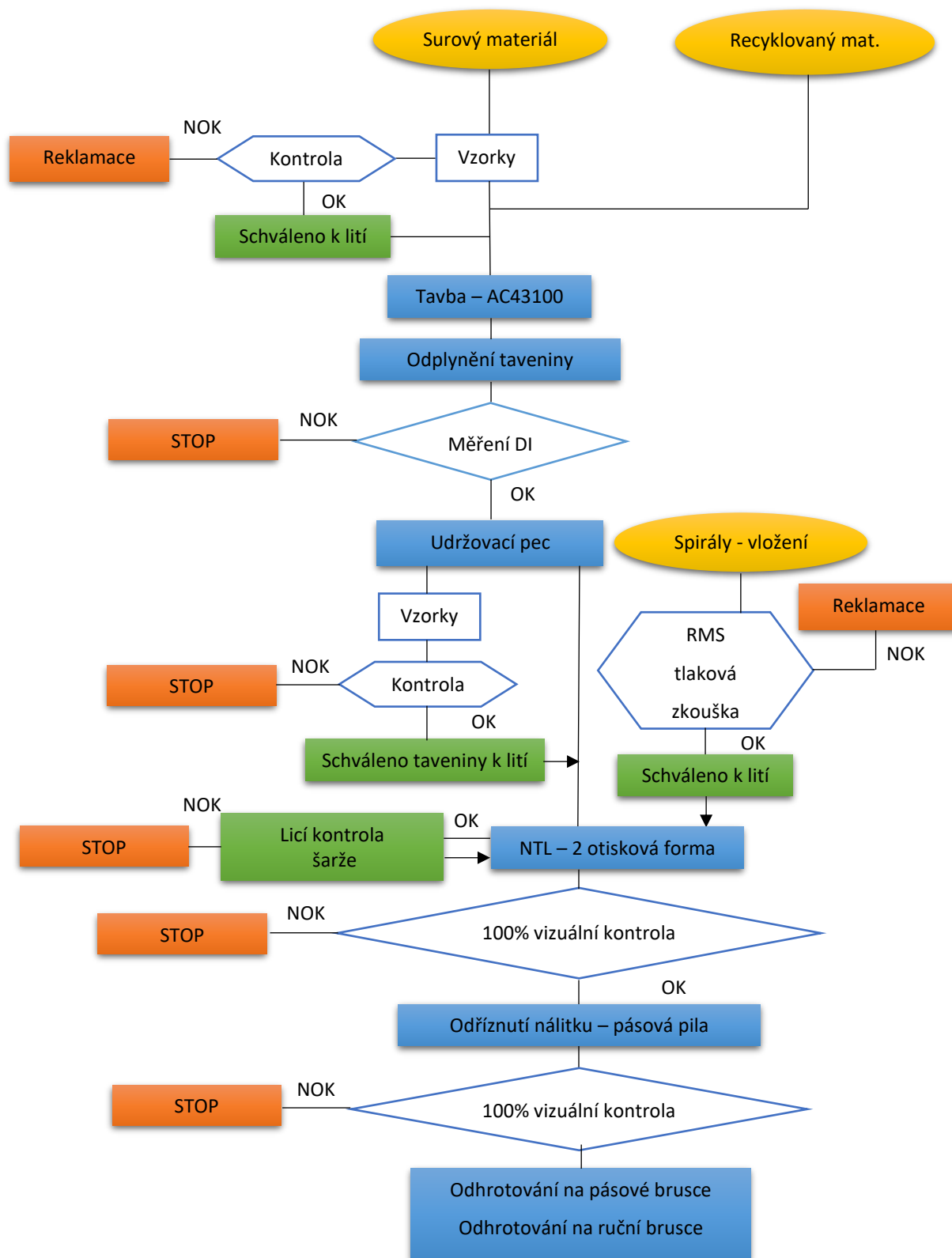
Obrázek č. 11 - Spodní část kovové formy se základacím přípravkem a spirálou

Tabulka č. 5 - Parametry procesu

Materiál	AC 43100
Teplota materiálu	740 ± 10°C
Teplota zálitků – před založením do kokily	100 – 150°C
Teplota zálitků – před spuštěním cyklu	180 – 230°C
Plnění – tlak	25 ± 5 kPa
Plnění – čas	22 ± 3 s
Dotlak – tlak	28 ± 5 kPa
Dotlak – čas	110 ± 20 s
Tuhnutí – čas	150 ± 20 s
Čas dochlazování	60 s
Ošetření formy + zasazení spirál	35 s
Celkový čas	344 s

2.2.1. FLOWCHART

Pro přehlednost stávajícího procesu výroby odlitku je přiložen flowchart diagram, neboli vývojový diagram, na kterém je graficky znázorněn jeho tok ve fabrice do bodu odhrotování.



2.3. OPTIMALIZACE VÝROBY

Při optimalizaci procesu výroby hliníkového odlitku pro potravinářský průmysl byly navrženy 3 nové varianty a sice:

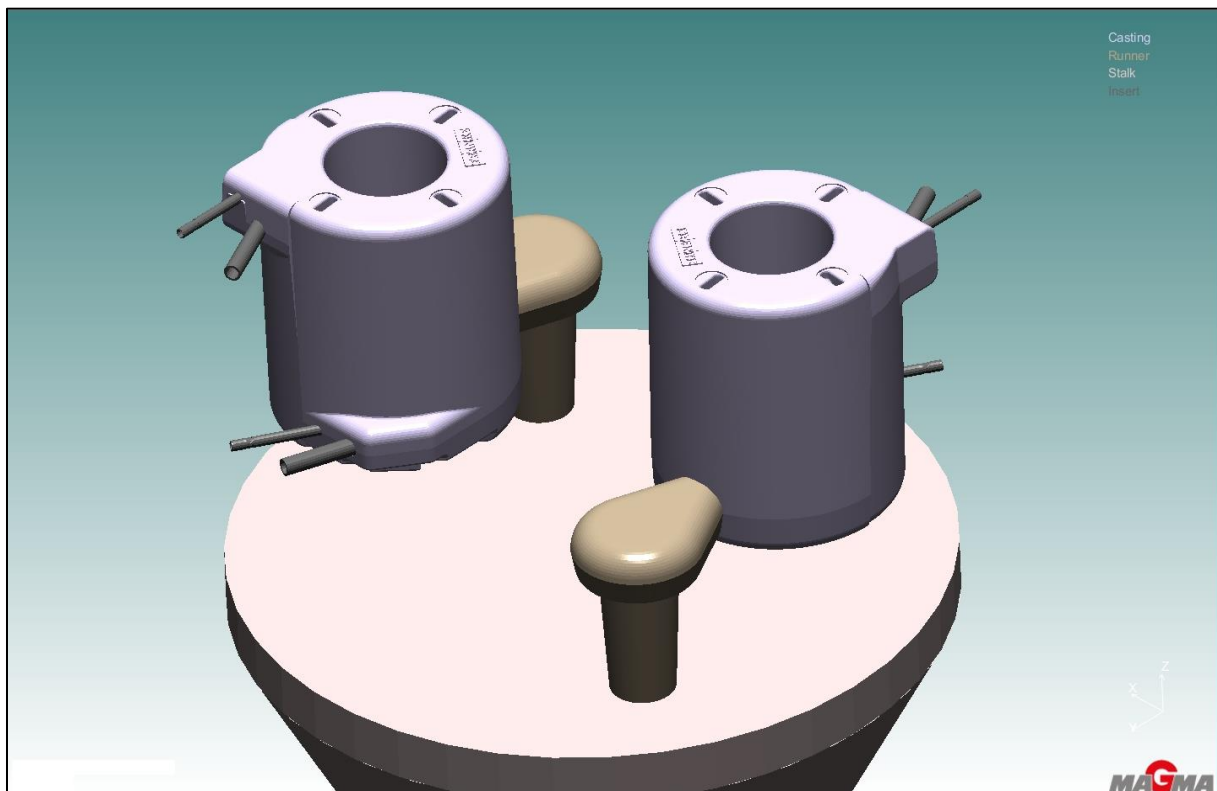
- simulace se zkráceným časem lití při současné dvouotiskové formě
- simulace lití s novou čtyřotiskovou formou
- návrh nové dvouotiskové formy s úsporou času při apretaci

Veškeré výsledky simulací budou porovnány se současným stavem výroby. Primárním měřítkem pro výsledek simulací je % změna nákladů na 1 kus odlitku.

2.3.1. SIMULACE SE ZKRÁCENÝM ČASEM LITÍ PŘI SOUČASNÉ DVOUOTISKOVÉ FORMĚ

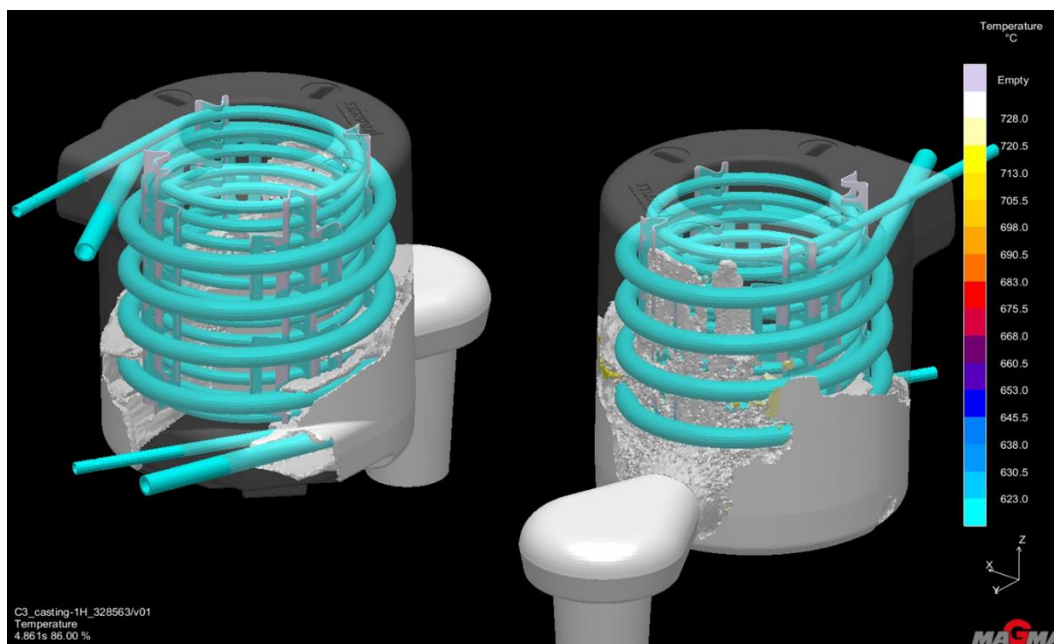
U prvního návrhu simulace pracujeme se současným stavem kovové formy a zaměřujeme se na zkrácení času lití o 1,5 minuty.

Simulace v programu MAGMASOFT je znázorněna na obrázcích níže.



Obrázek č. 12 - Rozložení odlitků ve stávající dvouotiskové formě

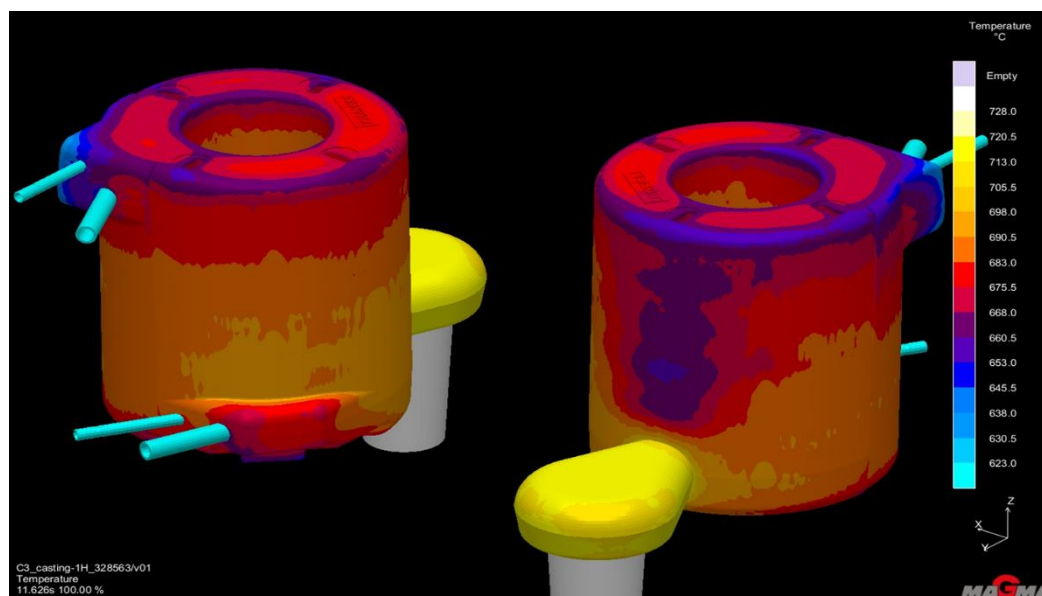
Na obrázku č. 14 ze simulace je možné nahlédnout do situace, kdy se odlitky nachází ve stavu 86% naplnění. Tavenina postupně zalévá topnou spirálu.



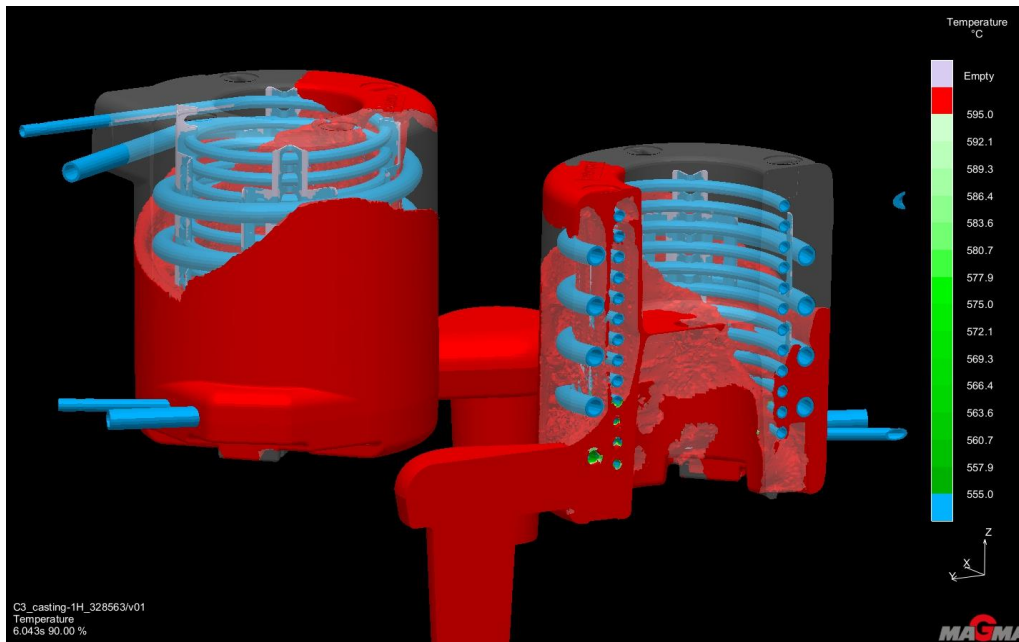
Obrázek č. 13 – Průběh plnění I.

Rozložení teplotního pole na konci plnění, teploty jsou dostatečně vysoké, nehrozí tedy vznik studených spojů viz. obrázek č. 15.

Rozložení teplotního pole – stupnice ukazuje rozmezí teplot liquidu a solidu. Zelené oblasti poukazují na oblast poklesu teploty. V tomto případě se jedná pouze o spirálu, ta se ohřála nad teplotu solidu Al, což je znázorněno na obrázku č. 16.

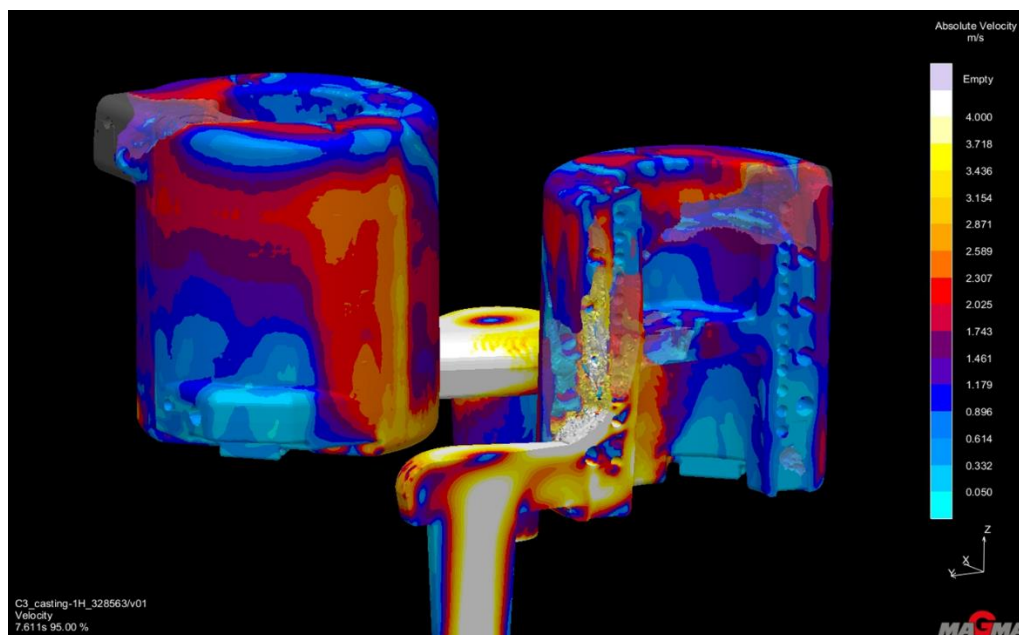


Obrázek č. 14 – Průběh plnění II.



Obrázek č. 15 - Průběh plnění III.

Na obrázku č. 16 nám simulace detailně přiblížila rychlost plnění. Zobrazení rychlostního pole taveniny při 95% naplnění nám říká, že hodnoty jsou poměrně vysoké a v případě výskytu vyšší perezity by bylo vhodné snížit plnicí tlak.



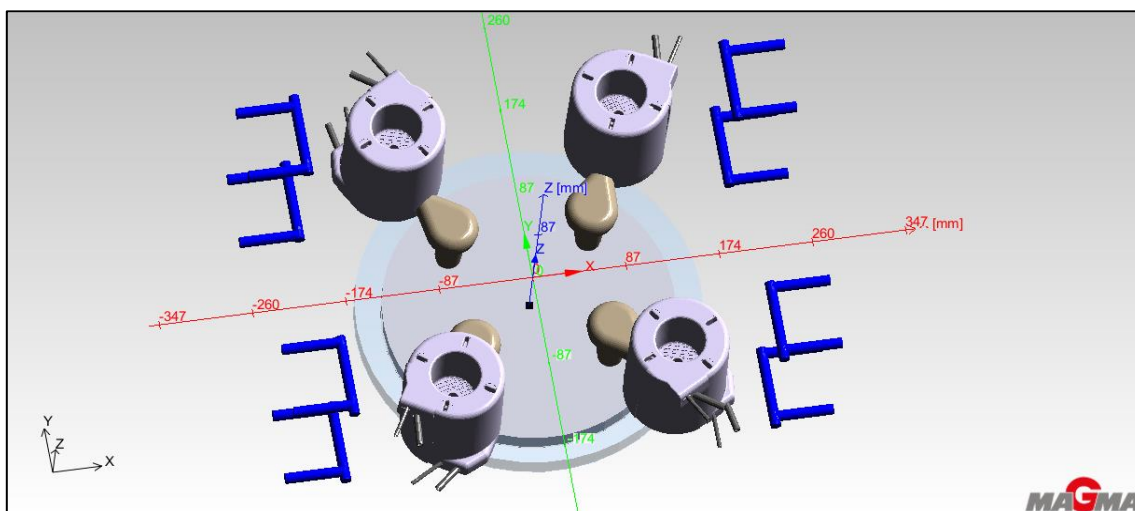
Obrázek č. 16 - Rychlost plnění

Po simulaci lze říct, že materiál se plní poměrně vysokou rychlostí a místy se kvůli tomu objevuje zahlený vzduch a přetlak vzduchu. Při tuhnutí se ve středovém prstenci vytváří teplotní uzel a v něm staženina.

2.3.2. SIMULACE LITÍ S NOVOU ČTYŘOTISKOVOU FORMOU

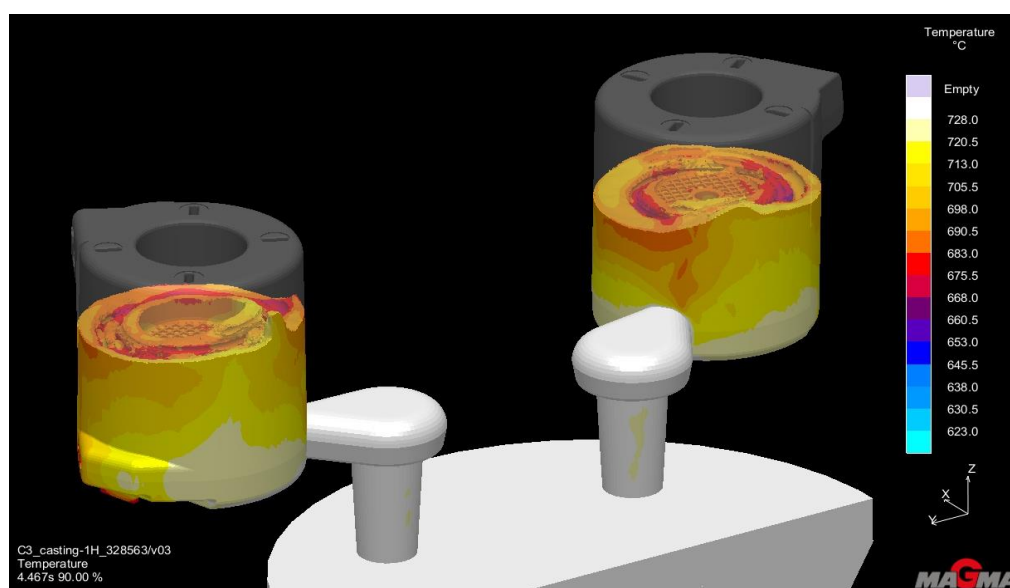
Další návrh optimalizace nabízí výrobu nové čtyřotiskové formy. Tato forma je doplněna o chlazení. Obrázky níže nabízí pohled na kvalitu technologického řešení. Díky simulačnímu programu MAGMASOFT je možné provést studii, aniž by návrh musel být uveden do reálného procesu.

Obrázek č. 17 zobrazuje čtyřotiskovou formu a její rozložení včetně chlazení.



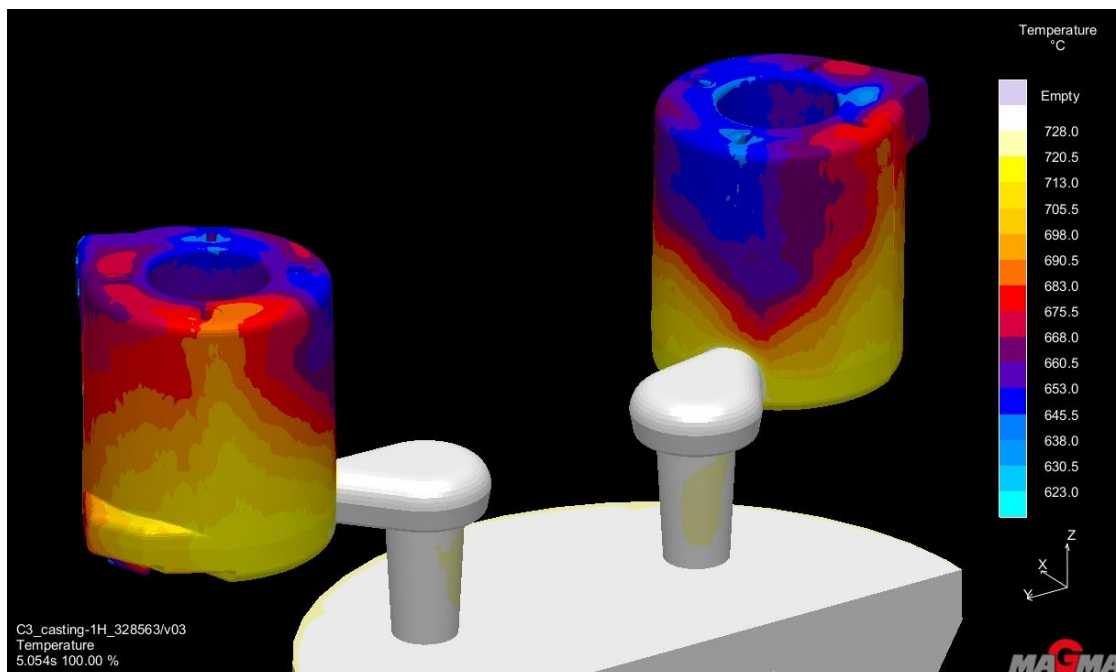
Obrázek č. 17 - Geometrie čtyřotiskové formy

Na obrázku č. 18 lze nahlédnout do situace, kdy se forma nachází v 90% plnění. Plnění je klidné, tavenina postupně zalévá topné spirály. Ze simulace je patrné, že rastrování je dobře doplněné na vršku prstence.



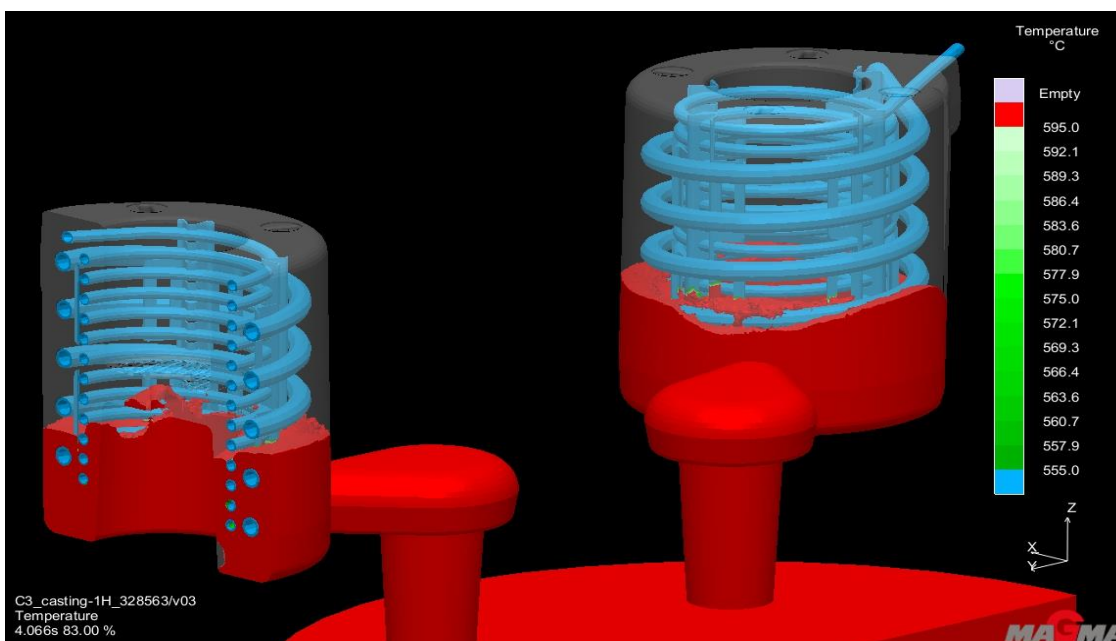
Obrázek č. 18 - Průběh plnění I.

Zkoumání výsledku simulace na konci plnění nabízí pohled na rozložení teplotního pole viz. obrázek č. 19. Teploty jsou dostatečně vysoké, nehrozí tak vznik studených spojů.



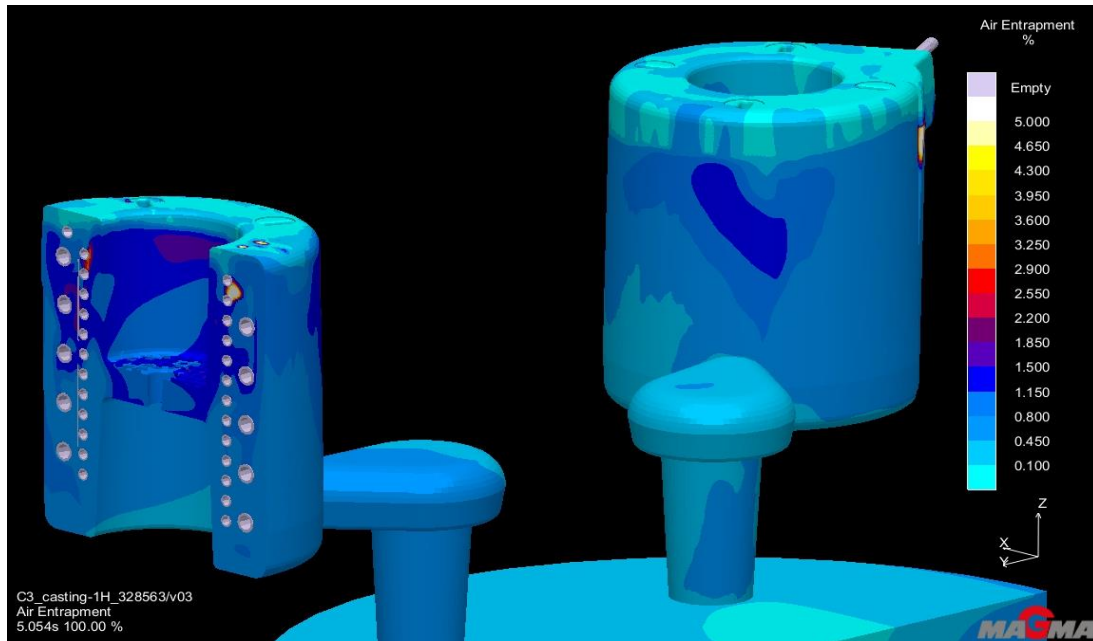
Obrázek č. 19 - Průběh plnění II.

Při pohledu na rozložení teplotního pole lze pozorovat stupnici ukazující rozmezí teplot liquidu a solidu. Zelené oblasti upozorňují na pokles teploty. Zde se stejně jako u prvního případu jedná pouze o pole působnosti kolem spirály. Ta se ohřála nad teplotu solidu Al. Názorné zobrazení je na obrázku č. 20.



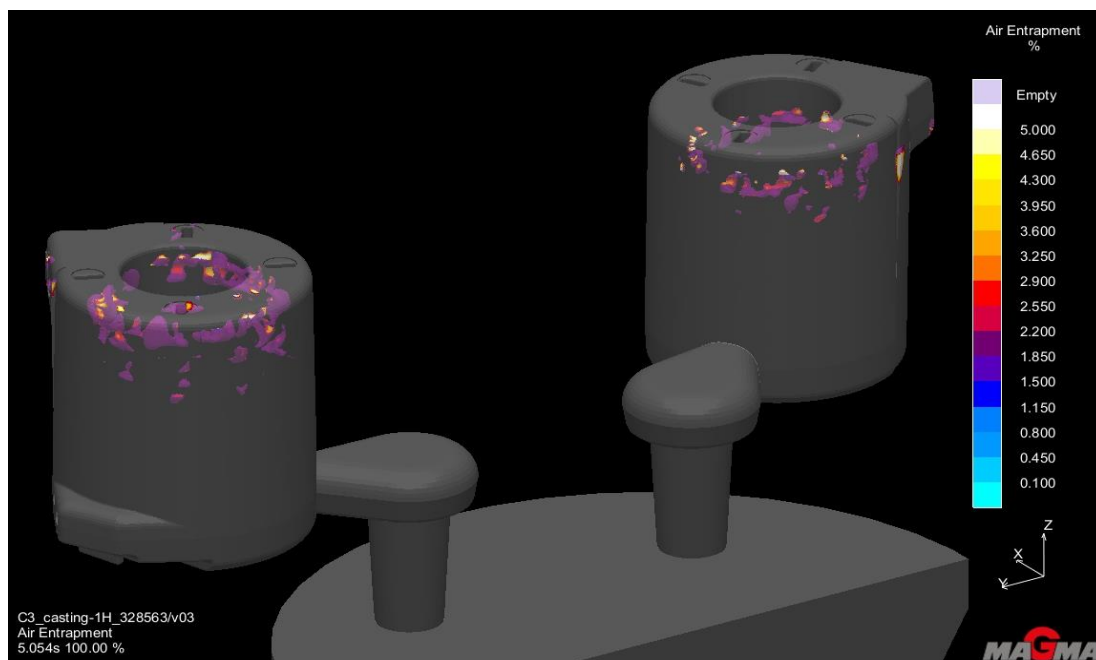
Obrázek č. 20 - Průběh plnění III.

Zajímavé výsledky simulace nám nabízí zobrazení míst se zahlceným vzduchem na obrázku č. 21. Hodnoty se pohybují na nízké stupnici. Z toho vyplývá, že drobné problémy jsou patrné v horní části odlitku kolem spirál. Nemělo by se však jednat o zásadní problém.



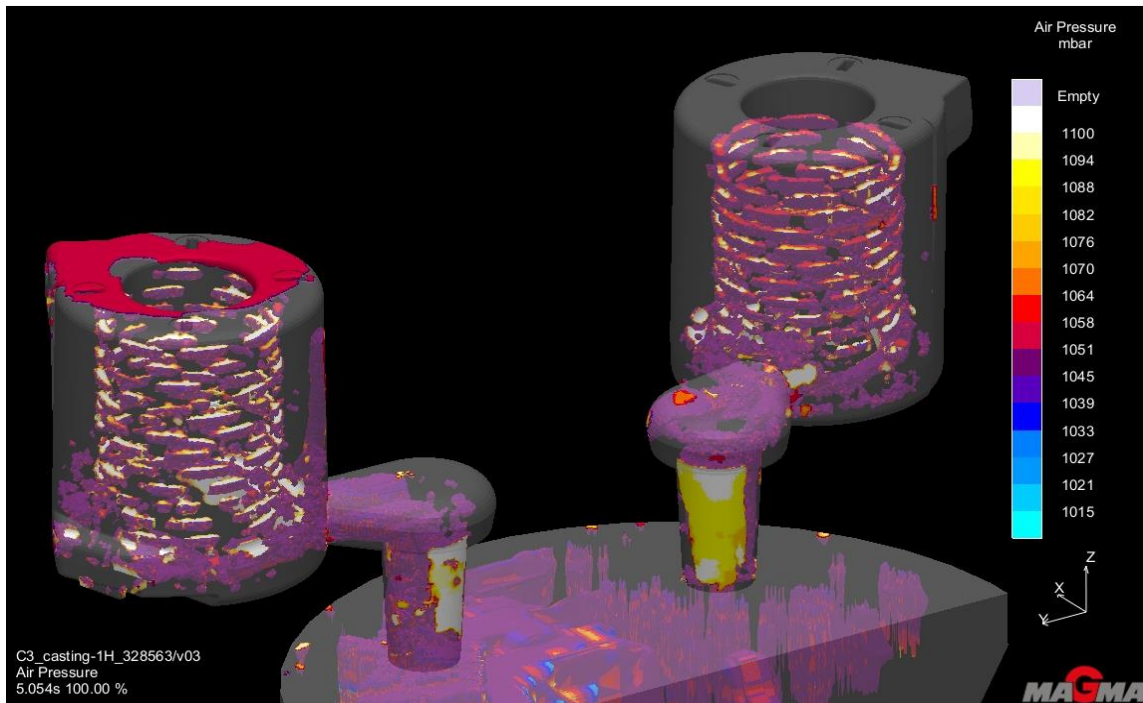
Obrázek č. 21 - Zahlčený vzduch

RTG zobrazení na obrázku č. 22 nabízí detailnější pohled na problematiku se zahlceným vzduchem. Toto by však u daného odlitku nemělo tvořit problém.



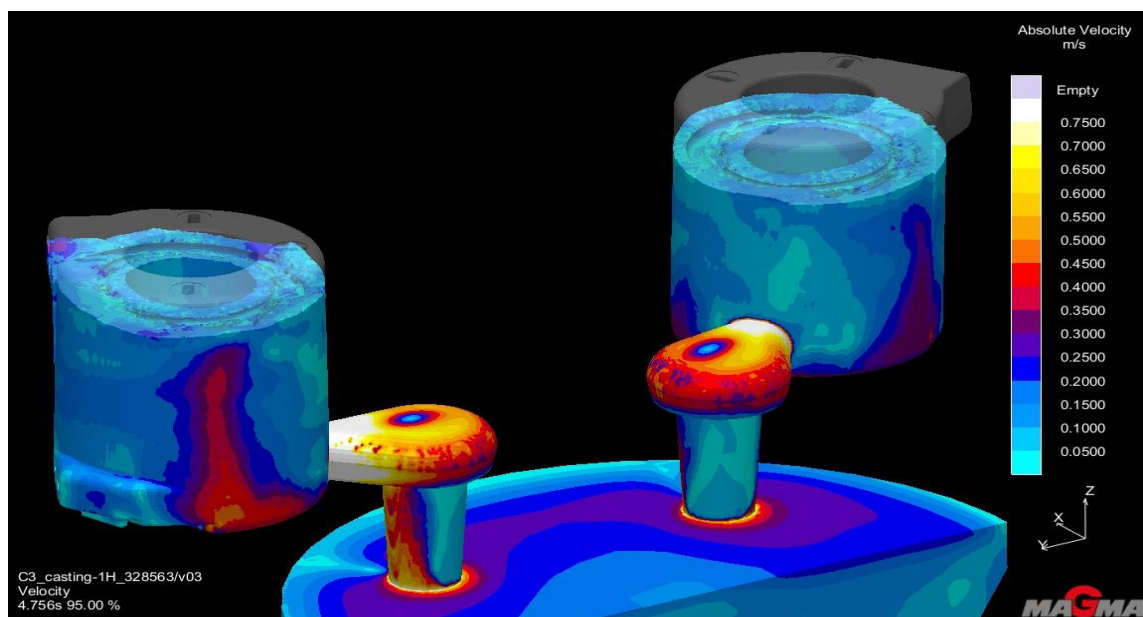
Obrázek č. 22 - Zahlčený vzduch – RTG

Další RTG snímek ze simulace se soustředí na přetlak vzduchu. Na některých místech lze nalézt vyšší hodnoty přetlaku vzduchu, nicméně ty opět nejsou u tohoto odlitku závažným problémem.



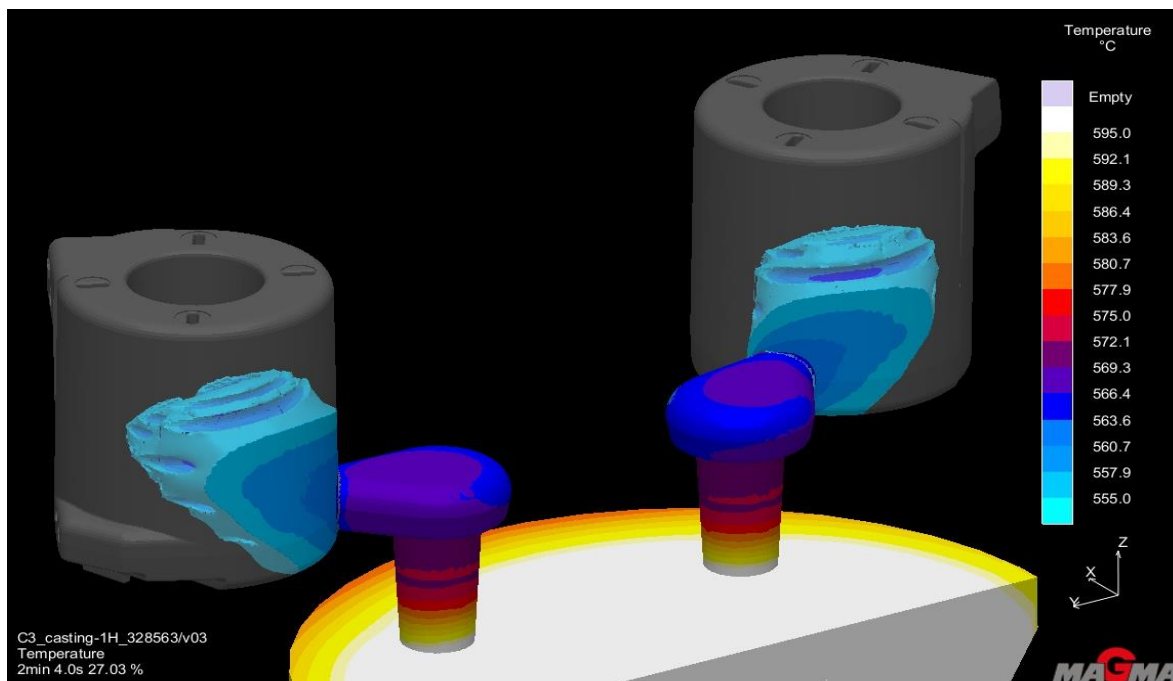
Obrázek č. 23 - Přetlak vzduchu - RTG

Zobrazení rychlostního pole taveniny na obrázku č. 24 nabízí stanovisko na 95% naplnění za 4,756 sekund. Hodnoty jsou v pořádku, uvnitř odlitku již dochází k poklesu hodnot.



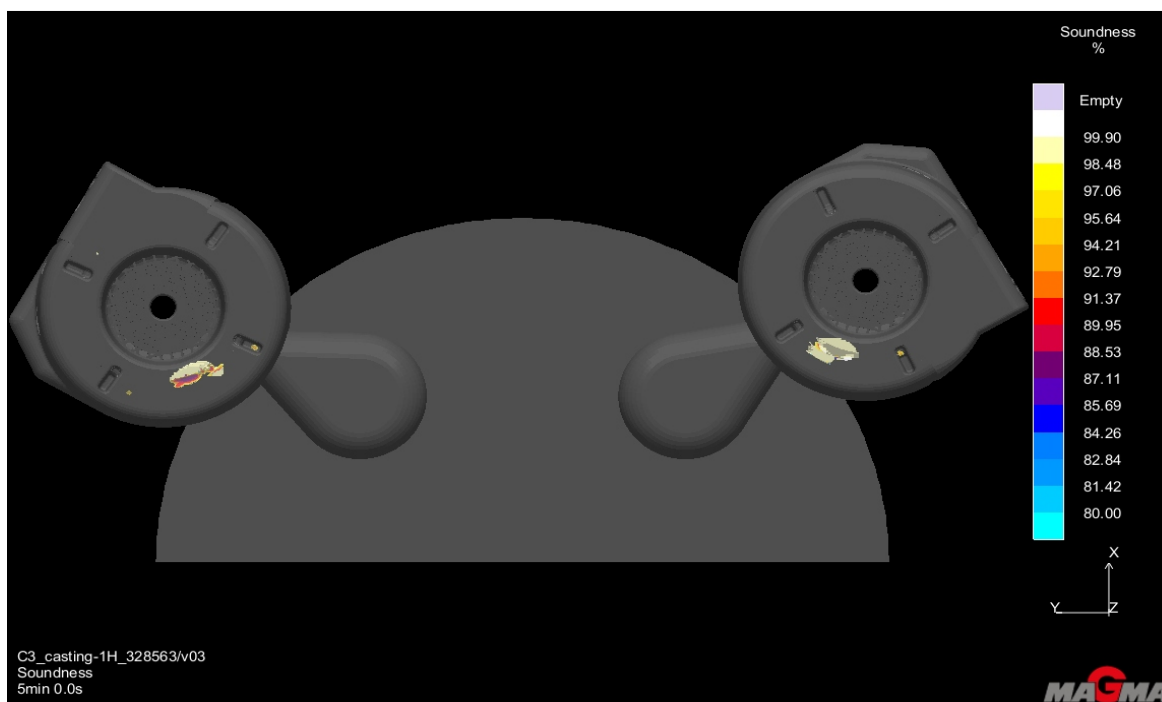
Obrázek č. 24 - Rychlost plnění

Při náhledu na teploty tuhnutí po 204 sekundách lze konstatovat, že žebrování na prstýnku více prochladi střed odlitku a uzel se přesunuje směrem ke vtoku viz. obrázek č. 25.



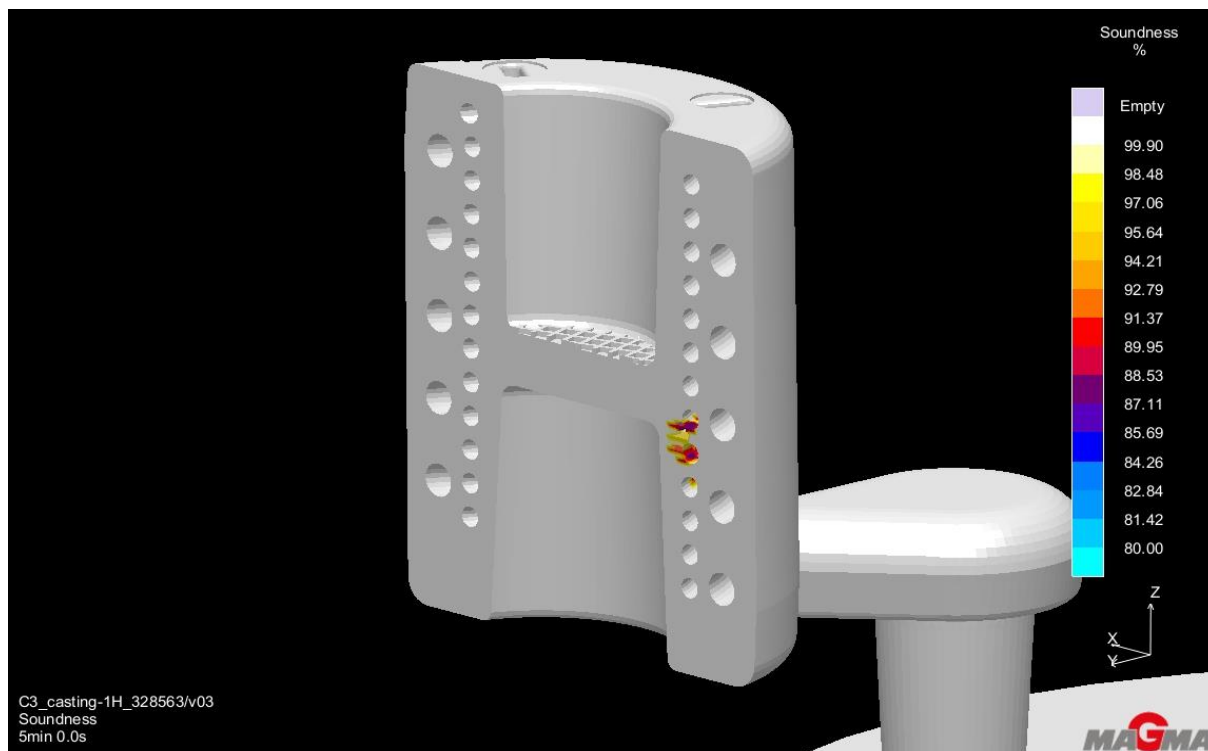
Obrázek č. 25 - Průběh tuhnutí

RTG snímky z horní perspektivy na obrázku č. 26 odhalily místa s výskytem staženin.



Obrázek č. 26 - Staženiny - RTG

V této problematice je průkaznější řez odlitkem. Z tohoto pohledu lze vyvodit závěr, že staženina se z prostoru středového prstýnku přesunula do stěny odlitku směrem ke vtoku. Zde by neměla ničemu vadit, jak znázorňuje obrázek č. 27.



Obrázek č. 27 - Staženiny - řez

Z provedené simulace lze vyvodit závěr s pozitivním stanoviskem. Plnění je v pořádku, nikde se nevyskytují žádné problémy s teplotou ani vzduchy. Rastrování na středovém prstýnku je dobré, usměrňuje tak tuhnutí. Staženiny se objevují ve svislé stěně a jejich rozsáhlost dosahuje nepatrných rozměrů. Lze tedy říct, že jsou nezjistitelné. Je pravděpodobné, že oproti stávajícímu stavu výroby se mírně zvýší celkový čas lití a to především kvůli většímu počtu zakládání spirál a možnému delšímu tuhnutí při dotlaku. Není problém tuto formu nabídnout zákazníkovi.

2.3.3. NÁVRH NOVÉ DVOUOTISKOVÉ FORMY S ÚSPOROU ČASU PŘI APRETACI

Poslední možností optimalizace je návrh nové dvouotiskové formy s úsporou času při apretaci. V první fázi je na plánu snížit čas apetace na pásové brusce o 0,25 min/ks. Na ruční brusce lze operaci urychlit dokonce o 0,35 min/ks. Nelze opomenout novou formu, která by k tomuto procesu měla výrazně přispět a ulehčit tak operace při apretaci.

ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo hluboce proniknout do problematiky nízkotlakého lití a simulačního programu MAGMASOFT pro optimalizaci procesu výroby hliníkového odlitku pro potravinářský průmysl. Práce se sestávala ze dvou hlavních částí, teoretické a experimentální. Experimentální část proběhla ve firmě BENEŠ a LÁT a.s. Výsledky optimalizace byly porovnány se současnou výrobou.

Před samotným experimentem bylo potřeba nahlédnout do současného stavu výroby, a především díky flowchart diagramu bylo možné si ujasnit, co všechno technologický postup obnáší. Samotný experiment proběhl po správné korekci vstupních hodnot v simulačním programu MAGMASOFT. Navrženy byly tři možnosti optimalizace. Po zadání vhodných parametrů následovalo posouzení simulovaného procesu lití jako například průběh a rychlost plnění, tuhnutí a výskyt staženin. Přehledné výsledky znázorňuje tabulka č. 6.

Tabulka č. 6 - Porovnání výsledků experimentu

varianta	čas lití	čas apretace	úspora nákladů na 1 ks v %
současný stav	X	X	X
zkrácený čas lití	kratší o 1,5 min	stejný	13,7 %
nová 4 otisková forma	stejný	stejný	16,67 %
nová 2 otisková forma	stejný	kratší o 1 min	2,07 %

Ze získaných výsledků lze vyvodit následující závěry:

- 1) Výsledky prvního návrhu na simulaci se zkráceným časem lití při současné dvouotiskové formě dosáhly kladných čísel. Čas lití se zkrátil o 1,5 minuty na jeden cyklus, což odpovídá zkrácení licího cyklu o 25%. Oproti stávajícímu času licího cyklu je toto výrazné snížení časové výrobní náročnosti v přepočtu na ÚVN (úplných vlastních nákladů). Čas lití je jednou z nejdůležitějších částí nákladů na celkové náklady, čímž samozřejmě ovlivňuje nabízenou cenu zákazníkovi. V ÚVN jsou rozpuštěny náklady na mzdy, správní režie, veškeré vstupující materiály (nakupovaná slitina, nakupovaný zálittek, i všechny potřeby pro metalurgické ošetření taveniny apod.), dále jsou zde

zahrnuty i odpisy výrobních strojů. Celkový výsledek je úspora nákladů o 13,7% na jeden kus.

- 2) Změna koncepce NTL formy z dvouotiskové na čtyřotiskovou znamená poloviční výrobní čas vztažený na výrobu jednoho kusu. Při vyčíslení ÚVN se však nejedná o očekávaných 50%. Důvodem jsou již výše zmiňované ÚVN do kterých vstupuje mnoho dalších parametrů a výsledek simulace nové čtyřotiskové formy je tedy snížení nákladů na jeden kus o 16,76%.
- 3) Úspora na apretaci je poměrně nízká, jelikož náklady na výrobní operace spojené s apretací (odřezem, broušením apod.) jsou v porovnání s odléváním a vstupujícím materiálem nízké. Zkrácení času těchto operací má vliv na minimalizaci nadbytečných otřepů a zástříků, které jsou způsobeny opotřebením a stářím formy. Předpoklad tedy je, že nová forma produkuje vizuálně kvalitní odlitky bez zjevných otřepů, zástříků a dalších nedokonalostí. Výsledek experimentu této varianty dosáhl snížení nákladů o 2,07% na jeden kus odlitku.

Po zhodnocení výsledků simulací se dospělo k závěru, že jako nejvhodnější varianta optimalizace procesu výroby hliníkového odlitku pro potravinářský průmysl se jeví nová čtyřotisková forma, která by dokázala snížit náklady o 16,76% na jeden kus.

BIBLIOGRAFIE

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *TEORIE SLÉVÁNÍ*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [3] NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. *SLÉVÁRENSKÉ SLITINY NEŽELEZNÝCH KOVŮ*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [4] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02935-0.
- [5] NATH, Jagan. *Aluminum Castings Engineering Guide* [online]. Ohio: ASM International, 2018 [cit. 2020-03-12]. ISBN 978-1-62708-206-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpACEG000M/cid:kt011QEG41/viewerType:khtml//root_slug:front-matter/url_slug:front-matter?kpromoter=federation&b-toc-cid=kpACEG000M&b-toc-root-slug=&b-toc-url-slug=front-matter&b-toc-title=Aluminum%20Castings%20Engineering%20Guide&page=last&view=collapsed&zoom=1
- [6] SOBOTOVÁ, Jana a kolektiv. *Nauka o materiálu I a II. cvičení*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [7] Aluminium (AlSi10Mg). ZARE [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.zare.it/en/materials/aluminium-alsi10mg> [8] rozdělení Al-Si
- [8] BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Metalurgie slitin Al* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/129/Slitiny-Al.pdf>
- [9] BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Studium modifikačního účinku různých typů čidel na bázi stroncia ve slitinách Al-Si*. Praha, 2011. Doktorská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [10] ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti*. 2004.
- [11] VONCINA, M.; MRVAR, P.; MEDVED, J. *Thermodynamic analysis of AlSi10Mg alloy*. Materials and Geoenvironment, 2005, 52.3: 621.
- [12] LI, Wei, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 663: 116-125.

[13] KEMPEN, K., L. THIJIS, E. YASA, M. BADROSSAMAY, W. VERHEECKE a J.-P. KRUTH. *PROCESS OPTIMIZATION AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS FOR SELECTIVE LASER MELTING OF AlSi10Mg* [online]. 17.8.2011 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-37-Kempen.pdf>

[14] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. České vysoké učení technické v Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1507-6.

[15] *GRAVITAČNÍ A NÍZKOTLAKÉ ODLÉVÁNÍ SLITIN HLINÍKU* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.benesalat.cz/wp-content/uploads/2020/03/BL-Technolisty-A4-2020_2_CZ-1.pdf

[16] HANÁK, Karel. *Nízkotlaké lití hliníkových slitin*. Týnec nad Sázavou, 1982

[17] HERMAN, Aleš. *ZÁKLADY TECHNOLOGIE I: SLÉVÁNÍ* [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/145/ZTI-Slevani-2.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek č. 1** - Rovnovážný diagram Al - Si a typické strukturní složení dle obsahu Si [2]
- Obrázek č. 2** - Prostorový obraz desek nemodifikovaného křemíku u slitiny AlSi10Mg [2]
- Obrázek č. 3** - Schéma procesu nízkotlakého lití [17]
- Obrázek č. 4** - Nízkotlaký licí stroj
- Obrázek č. 5** - Zkoumaný odlitek
- Obrázek č. 6** - Rentgenový snímek odlitku
- Obrázek č. 7** - Přípravek pro kontrolu geometrických vlastností spirály
- Obrázek č. 8** - Test elektrické vodivosti
- Obrázek č. 9** – Zakládací přípravek se spirálou
- Obrázek č. 10** – a) Odlitek před apretací; b) Odlitek po apretaci
- Obrázek č. 11** - Spodní část kovové formy se zakládacím přípravkem a spirálou
- Obrázek č. 12** - Rozložení odlitků ve stávající dvouotiskové formě
- Obrázek č. 13** – Průběh plnění I.
- Obrázek č. 14** – Průběh plnění II.
- Obrázek č. 15** - Průběh plnění III.
- Obrázek č. 16** - Rychlost plnění
- Obrázek č. 17** - Geometrie čtyřotiskové formy
- Obrázek č. 18** - Průběh plnění I.
- Obrázek č. 19** - Průběh plnění II.
- Obrázek č. 20** - Průběh plnění III.
- Obrázek č. 21** - Zahlcený vzduch
- Obrázek č. 22** - Zahlcený vzduch – RTG
- Obrázek č. 23** - Přetlak vzduchu - RTG
- Obrázek č. 24** - Rychlost plnění
- Obrázek č. 25** - Průběh tuhnutí
- Obrázek č. 26** - Staženiny - RTG
- Obrázek č. 27** - Staženiny - řez

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 - Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [10]

Tabulka č. 2 - Chemické složení AlSi10Mg [11]

Tabulka č. 3 - Vlastnosti slitiny AlSi10Mg [10]

Tabulka č. 4 - Tepelně - fyzikální vlastnosti některých neželezných kovů [1]

Tabulka č. 5 - Parametry procesu

Tabulka č. 6 - Porovnání výsledků experimentu