

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE Ú12 133



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv parametrů a podmínek výrobního procesu odlitku ze slitiny
AlSi5Cu3 na přesnost výsledků simulace

AUTOR: BC. KAROLÍNA VÝLETOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. IRENA KUBELKOVÁ PH.D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Výletová** Jméno: **Karolína** Osobní číslo: **459248**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv parametrů a podmínek výrobního procesu odlitku ze slitiny AlSi5Cu3 na přesnost výsledků simulace

Název diplomové práce anglicky:

Influence of parameters and conditions of production process of AlSi5Cu3 alloy casting on simulation results accuracy

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor současného stavu problematiky výroby jader metodou Cold-Box, technologie nízkotlakého lití a metalurgie Al-Si slitin
2. Možnosti numerických simulací nízkotlakého lití. Analýza procesu výroby vybraného odlitku a stanovení hlavních vlivů a parametrů na přesnost simulace.
3. Návrh experimentu pro verifikaci vlivu vstupních podmínek a parametrů simulačního softwaru.
4. Provedení a vyhodnocení experimentu
5. Závěrečné zhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Irena Kubelková, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Milan Luňák, BENEŠ a LÁT a.s.

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

Ing. Irena Kubelková, 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

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

ANOTAČNÍ LIST

ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na výrobu odlitku technologií nízkotlakého lití z hliníkové slitiny ve firmě Beneš a Lát a.s. Konkrétně na problematiku dílu turbodmychadlové skříně, řešení, úpravu parametrů a simulaci v programu MAGMASOFT®.

Obsahem diplomové práce je teoretický rozbor parametrů ovlivňujících jakost odlitků, vady, technologie výroby jader a jejich ošetření, technologii nízkotlakého lití, slitiny hliníku a konkrétní slitinu AlSi5Cu3 a seznámení se simulačním programem MAGMASOFT®.

V praktické části, realizované ve slévárně firmy Beneš a Lát a.s., se práce zaměřuje na zjišťování konkrétních parametrů, které přímo ovlivňují kvalitu místa odlitku s častým vznikem vad a navrhnout jejich optimalizaci a zpřesnění autentičnosti výsledků simulace programu MAGMASOFT®.

ANNOTATION

The master's thesis is focused on the production of casting by low-pressure die casting from aluminum alloy in the company Beneš a Lát a.s. Specifically on the issue of the turbocharger part, solution, parameters adjustment and simulation in the MAGMASOFT® program.

The content of the master's thesis is a theoretical analysis of parameters affecting the quality of castings, defects, technology of core production and treatment, technology of low-pressure casting, aluminum alloys and specific alloy AlSi5Cu3 and introduction to the simulation program MAGMASOFT®.

In the practical part, made in the foundry of Beneš and Lát a.s., the work focuses on identifying specific parameters that directly affect the quality of the site with frequent defects and to propose their optimization and clarify the authenticity of the simulation results MAGMASOFT®.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkotlaké lití, Cold-Box, MAGMASOFT, hliníková slitina, AlSi5Cu3

KEYWORDS

Low pressure die casting, Cold-Box, MAGMASOFT, aluminum alloy, AlSi5Cu3

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Bc. Karolína Výletová

Poděkování

Převelice bych tímto odstavcem chtěla poděkovat firmě Beneš a Lát a.s., která umožnila realizovat tento projekt a všem pracovníkům, kteří mi byli k dispozici po celou dobu práce. Jmenovitě bych chtěla poděkovat Ing. Milanu Luňákovi, který se zhostil role konzultanta, odpovědné osoby a komunikačního můstku spolupráce s firmou B&L, dále Ing. Martě Hugo, která mě ochotně provázela výrobou a pomohla mi s organizačními věcmi na poli výroby, také Bc. Karlovi Horkému a Štefanovi Kyselkovi, kteří mi poskytli všechny technické a výrobní dokumentace potřebné k diplomové práci. Samozřejmě bych chtěla nesmírně poděkovat vedoucí této práce Ing. Ireně Kubelkové Ph.D., která mě svým laskavým a přátelským přístupem motivovala ke studiu tohoto oboru, a díky které tato práce vznikla. Za gramatickou kontrolu bych chtěla poděkovat Věře Haase, a velmi bych chtěla poděkovat své rodině a blízkým, kteří měli se mnou trpělivost.

Obsah

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	4
1 ÚVOD	5
2 HLINÍK A JEHO SLITINY	7
2.1 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU	7
2.1.1 Slitiny Al-Si	8
2.1.2 Slitiny Al-Cu.....	10
2.1.3 Slitiny Al-Mg.....	10
2.2 POŽADAVKY NA KVALITU HLINÍKOVÝCH SLITIN	11
2.2.1 Čištění taveniny	12
2.2.2 Úprava taveniny.....	13
3 TECHNOLOGIE NÍZKOTLAKÉHO LITÍ	14
3.1 PRINCIP.....	14
3.2 LICÍ CYKLUS.....	15
4 FORMY, JÁDRA A DALŠÍ KOMPONENTY PRO NÍZKOTLAKÉ LITÍ	17
4.1 FORMA PRO NÍZKOTLAKÉ LITÍ	17
4.1.1 Ošetření formy	18
4.2 JÁDRA POUŽÍVANÁ PŘI NÍZKOTLAKÉM LITÍ	19
4.2.1 Konstrukce uchycovacích známek jader	20
4.2.2 Ošetření jader	20
4.2.3 Jaderníky	21
4.3 FILTRY – SÍTKA.....	21
4.3.1 Ploché filtry.....	22
4.3.2 Objemové filtry	23
5 SIMULAČNÍ SOFTWARE	24

5.1	MAGMASOFT®	24
5.2	ESI ProCAST.....	25
6	PRAKTICKÁ ČÁST.....	26
7	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	27
7.1	GE INSPECTION TECHNOLOGIES – SEIFERT X CUBE SERIES.....	27
7.2	VYSTŘELOVACÍ STROJ GIFOS.....	28
7.3	THERMIS.....	29
7.4	NÍZKOTLAKÝ LICÍ STROJ	30
8	PRÁCE V PROGRAMU MAGMASOFT®	30
8.1	POSTUP VYPRACOVÁNÍ SIMULACÍ	30
9	TECHNOLOGIE VÝROBY	35
9.1	DMYCHADLOVÁ SKŘÍŇ PRO STUDENOU ČÁST TURBODMYCHADLA	35
9.1.1	Model.....	35
9.1.2	Proces výroby	36
9.2	SLITINA ALSI5CU3.....	36
9.3	PŘÍPRAVA TAVENINY	37
9.4	FORMA	37
9.4.1	Chladicí systém	39
9.5	VÝROBA JADER A JEJICH OŠETŘENÍ	40
9.5.1	Cold-Box.....	40
9.5.2	Ošetření jader.....	40
9.6	PARAMETRY LITÍ	41
10	METALOGRAFIE	42
11	ZÁVISLOST VYSUŠENÍ A PŘEDEHŘÁTÍ JÁDRA NA KVALITĚ ODLITKU.....	44
11.1	ZKUŠEBNÍ SKUPINA	45
11.1.1	Výsledky zkušební skupiny jader	46

11.1.2	Poznatky ze zkušební skupiny	47
11.2	TESTOVACÍ SKUPINA	47
11.2.1	První sada – standardní jádra.....	48
11.2.2	Druhá sada – vysoušená jádra.....	51
11.2.1	Třetí sada – předeřtá jádra.....	55
11.2.2	Podchlazená jádra	59
12	TEPLOTA FORMY	59
13	MĚŘENÍ DIFERENCE TLAKU CHLADÍČÍHO MÉDIA VE FORMĚ	60
14	POROVNÁNÍ DAT SE SIMULACÍ	62
15	DISKUSE	68
16	ZÁVĚR	70
	CITOVANÁ LITERATURA AUTORA:	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM GRAFŮ	80
	SEZNAM PŘÍLOH	81
	PŘÍLOHY.....	82

Seznam zkratek a symbolů

R_m	mez pevnosti
T_t	teplota tání
ρ	hustota
T	teplota
c	koncentrace
$R_{p0,2}$	mez kluzu
A	tažnost
T_o :	teplota okolí
RV :	relativní vlhkost
NTL	nízkotlaké lití

1 Úvod

Odlévání je jeden z nejstarších způsobů zpracování kovů. V dnešní době neodmyslitelně patří k běžně používaným výrobním technologiím v průmyslové výrobě. Nabízí výrobu řady součástí s rozličnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Průmyslový vývoj vyžaduje zlepšování kvality odlitků, snižování ceny a zlepšení dostupnosti technologií, čímž vytváří tlak na slévárny a výzkumná zařízení, ale také je motivuje pokročit ve vývoji a umožňuje jim zlepšování technologií.

Zejména v oblastech automobilového průmyslu, letectví, nebo v medicíně jsou neželezné kovy důležitou součástí a rostou tak požadavky na vlastnosti a kvalitu výrobků. Hlavním požadavkem je snižování váhy se zachováním mechanických vlastností, čímž se stávají trendem v oblasti výzkumu materiálů. Míra využití a zpracovávání neželezných kovů se s postupujícím výzkumem globálně zvyšuje.

Pro bezproblémový výrobní proces se využívá numerických simulačních programů. Simulace objevují slabá místa ještě před započítáním reálné výroby. Díky nim jsme schopni předpokládat dopady nastavených podmínek a parametrů ovlivňujících výrobu. Je tak možnost nalézt nesrovnalosti a opravit je ještě před investicí do zařízení a vyhnout se přepracování již zrealizovaných procesů. Simulační softwary se vyvíjejí spolu s novými technologiemi. Tato práce vznikla za účelem zjištění korelace mezi výsledky simulace a reálnou výrobou.

Hlavním cílem práce bylo zjistit, jaké parametry litého procesu způsobují nepřesnost simulace a ověřit, v jaké míře korespondují výsledky simulace s praktickou výrobou.

Dílní cíle práce pak byly teoreticky rozebrat současný stav problematiky nízkotlakého lití, hliníkové slitiny, výroby jader, simulačního softwaru a další. Poté zanalyzovat výrobní proces konkrétního problematického odlitku turbodmychadlové skříňe za účelem stanovení předpokládaných hlavních vlivů způsobujících nepřesnost výsledků simulace.

Dalším **dílčím cílem** bylo navrhnout a provést experimenty ověřující předpokládané ovlivňující faktory. Nakonec provést numerickou simulaci a její výsledky ověřit na konkrétním odlitku.

Praktická část byla vypracovávána ve firmě Beneš a Lát a.s. Firma účinkuje ve strojírenském odvětví od roku 1934, díky čemuž má dlouholeté zkušenosti v oboru odlévání.

2 Hliník a jeho slitiny

Hliník (Aluminium – značka Al) je jedním z nejrozšířenějších kovů. Je hojně využívaný, nejen v průmyslu, ale i ve zdravotnictví, energetice, nebo v potravinářství. Jeho vzhled je stříbřitě bílý, vlivem vzduchu se na povrchu tvoří oxid hlinitý – Al_2O_3 . Tvoří ho kubická plošně středěná krystalová mřížka (K12) a je nealotropický. V přírodě činí 7,47 % ze všech kovů a je tím pádem nejhojněji zastoupený kov na zemi. Nejvyšší obsah hliníku má bauxit a korund.

Tabulka 1 - Čistý hliník

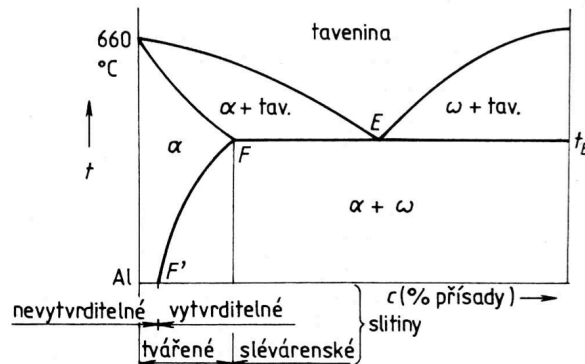
T_t :	660 °C
ρ :	2 700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
R_m :	45–95 MPa

Historie hliníku tak, jak ho známe, začala teprve v roce 1808, kdy ho objevil sir Humphrey Day a můžeme ho tedy považovat za poměrně „mladý“ kov oproti ostatním tradičně užívaným kovům. Poprvé ho izoloval dánský chemik Hans Christian Oersted až v roce 1825. V tehdejší době byla jeho separace velice nákladná a levný průmyslový způsob výroby vynalezl Henry S.C. Deville až v roce 1854. Výroba se postupem času zdokonalovala a zlevňovala a využití hliníku se kvůli jeho vlastnostem rozšiřovalo. V dnešní době je používán postup elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého, známý od roku 1886, kdy ho nezávisle na sobě představili Paul Héroult a Charles Hall. [3][5]

2.1 Slévárenské slitiny hliníku

V praktické výrobě se používají slitiny hliníku, nikoliv čistý hliník. Slitina se skládá z hliníku a doprovodných prvků, které přímo ovlivňují vlastnosti slitiny, přidaných prvků, které ovlivňují strukturu výsledné slitiny, stopových prvků, které výrazně

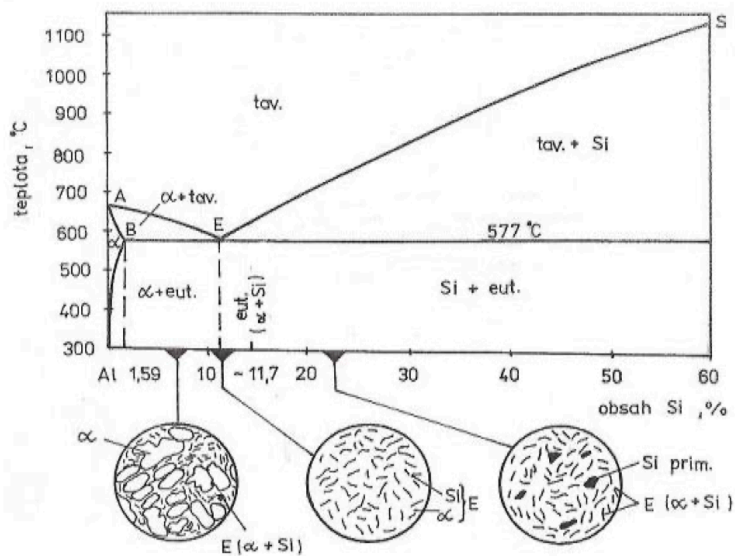
neovlivňují vlastnosti slitiny a nečistot. Používané slitiny nikdy neobsahují pouze dva prvky, vždy jich je větší počet.



Obrázek 1 - diagram Al a přísady, rozdělení [11]

2.1.1 Slitiny Al-Si

Slitiny hliníku a křemíku (tzv. siluminy) jsou nejčteněji využívané slitiny a jsou nejdůležitější ze slévárenských slitin hliníku. Mají lepší mechanické vlastnosti po odlití než po tvářeni a jsou odolné proti korozi. Slitiny mají skvělé slévárenské vlastnosti, hlavně zabíhavost, nízké procento smrštění a nízkou náchylnost na tvorbu trhlin při tunutí. Můžeme je rozdělit na podeutektické (do 10 % Si), eutektické (okolo 12 % Si) a nadeutektické (mezi 12-25 % Si).

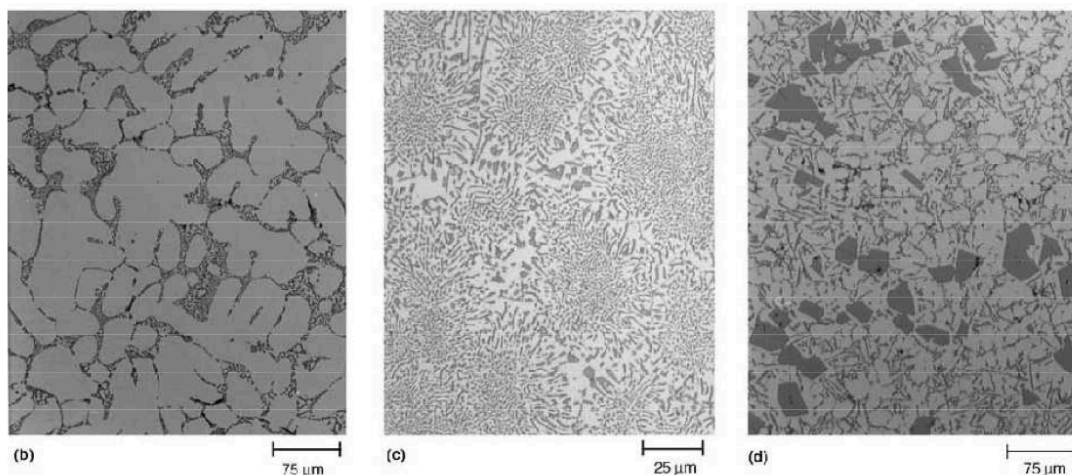


Obrázek 2 - Diagram Al-Si – a) podeutektické, b) eutektické c) nadeutektické – charakteristika struktur [12]

Podeutektické siluminy jsou dobře slévateľné, obsah křemíku mají do 12 % a je to nejpočetnější podskupina, ale náchylnější na tvorby trhlin za tepla. Strukturu tvoří síť dendritů fáze α a vyloučené eutektikum v prostoru mezi dendrity. Množství eutektika je závislé na obsahu Si v materiálu (čím vyšší obsah Si tím vyšší obsah eutektika).

Eutektické siluminy mají vysokou míru zabíhavosti (vyšší než podeutektické siluminy), dobrou tažnost a plasticitu, mají ale nižší pevnost a sklon ke staženinám. Obsah křemíku se pohybuje v okolo 12 %. Strukturu tvoří primárně eutektikum, u modifikovaných slitin se někdy vyskytují i jednotlivé krystaly primární fáze. Používají se na tenkostěnné a tvarově složitě odlitky.

Nadeutektické siluminy nejsou etablované v normách a jsou využívány ve speciálních aplikacích specializovaných výrobců. Křemíku je v těchto slitinách nad 12%. Strukturu tvoří primárně krystaly křemíku a eutektikum. Mají vysokou tvrdost, nízký koeficient teplotní roztažnosti a odolnost proti abrazivnímu opotřebením, ale jsou křehké. Křehkost je způsobena vysokou krystalizační schopností křemíku, který tvoří hrubé krystaly, proto je nutné je modifikovat. Používají se hlavně na tzv. kluzné aplikace – např. písty. [1][3][7][8][9][10][27]

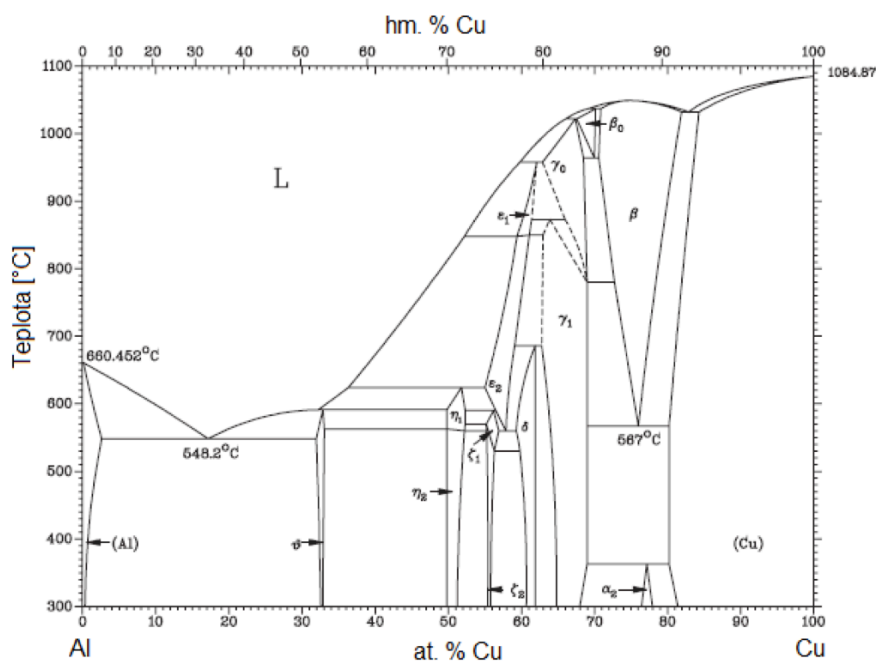


Obrázek 3 - Mikrostruktura slitin Al-Si – b) podeutektická, c) eutektická, d) nadeutektické [8]

V praktické části je zkoumaná slitina $AlSi_5Cu_3$, která je popsána v kapitole 9.1.

2.1.2 Slitiny Al-Cu

Slitiny hliníku a mědi (tzv. duraly) jsou historicky nejstarší z hliníkových slitin. Slitina obsahuje 4-5% mědi, má horší slévárenské vlastnosti – nižší zabíhavost (lze zvýšit přidávkem Si), zvýšenou pórovitost, nízkou odolnost proti korozi, jsou obtížně nálitkovatelné vzhledem k širokému intervalu tuhnutí. Mají ale vysokou pevnost, tvrdost i vyšší tažnost, a lze ji dobře tepelně zpracovávat. [27]



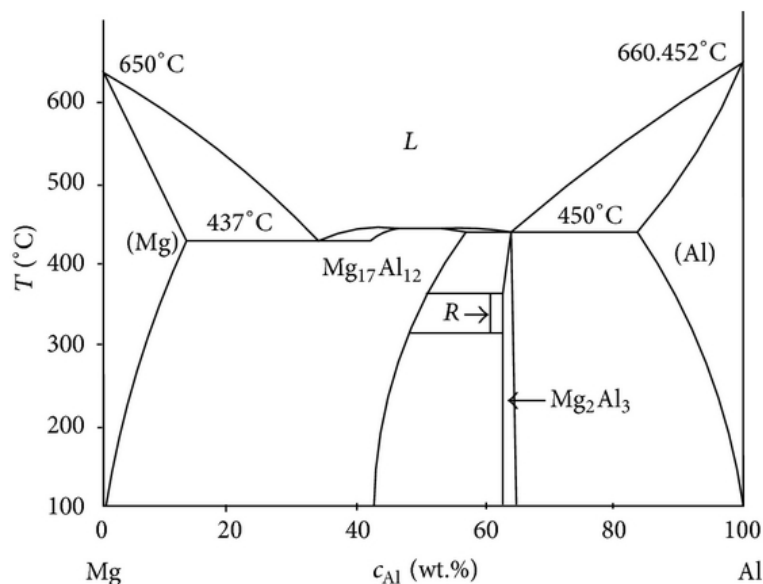
Obrázek 4 - diagram Al-Cu [1]

2.1.3 Slitiny Al-Mg

Slitiny hliníku a hořčíku (tzv. hydronalia) mají vysokou rázovou houževnatost, dobrou obrobitelnost, jsou pevné, ale mají horší slévárenské vlastnosti například horší zabíhavost a sklon k tvorbě pórů.

Slitina s vyšším obsahem hořčíku se během tavení a odlévání intenzivně oksyduje, to lze eliminovat přidávkem beryllia. Beryllium způsobuje hrubozrnnou strukturu, kterou lze upravit a zjemnit přidávkem titanu.

Pokud je ve slitině obsažen hořčík do 6 %, má dobrou korozní odolnost, při obsahu vyšším než 6 % má slitina tendenci vylučovat oxidy po hranicích zrn (interkrystalická koroze). [1] [11][27]

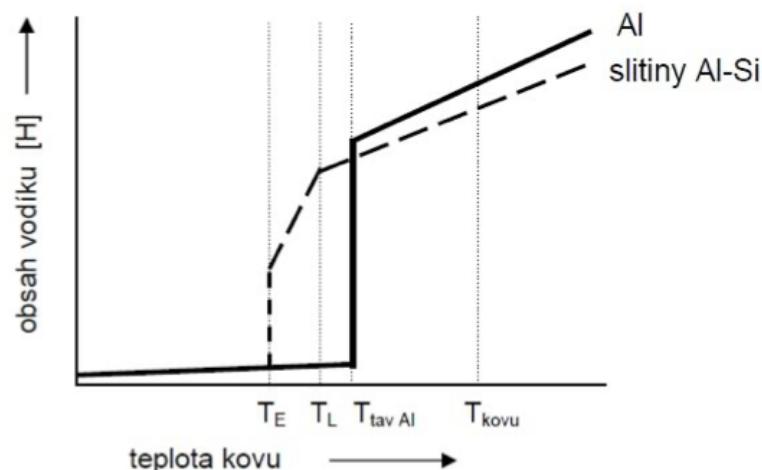
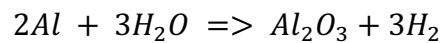


Obrázek 5 - diagram Al-Mg [22]

2.2 Požadavky na kvalitu hliníkových slitin

Stejně jako některé prvky ovlivňují strukturu pozitivně, je nutné dát pozor na prvky, které ovlivňují kov (strukturu, vlastnosti) negativně. Pověštinou vnikají do taveniny při výrobě ze vsázky nebo vyzdívky a jelikož nejsou záměrně přidávány, jsou brány jako nečistoty a jsou nežádoucí. Mezi ně patří prvky jako železo, kyslík, vodík, olovo, chrom a další. Dokonce i **křemík** má v některých případech nežádoucí význam, jelikož tvoří intermetalické fáze v mikrostrukturu slitiny a zhoršuje plastické vlastnosti slitiny podobně jako železo. Složení intermetalických fází závisí na druzích slitiny, např. Mg_2Si , nebo s železem $FeSiAl_5$.

Vodík do taveniny může vniknout několika způsoby, nejčastěji z vlhkosti. Ta se vyskytuje téměř všude. Jedná se třeba o vlhkost ze vsázky, kelímku nebo z okolí, která se následně rozpustí v tavenině, naváže se na hliník a rozloží se na oxidy hliníku a vodík.



Obrázek 6 - Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a jeho slitinách [18]

Při vysoké teplotě se vodík v tavenině rozpustí, ale při snižování teploty se snižuje i rozpustnost vodíku, který pak může vytvořit bubliny a póry. Existují prvky, které snižují rozpustnost vodíku jako například křemík, zinek, měď nebo mangan.

Kyslík se dostane do slitiny při tavení, z důvodu vysoké afinity s kyslíkem. Pozorovat ho, lze již na tavenině, kdy se na vrchu tvoří vrstva oxidu hlinitého – oxidická plena. Výhodou je, že tato povrchová vrstva chrání taveninu v dalším pronikání kyslíku a lze ji tedy přisuzovat ochranné vlastnosti. Pokud se dostane do slitiny, zhorší mechanické a plastické vlastnosti výsledného produktu. [18][19][20]

2.2.1 Čištění taveniny

Tavenina se může čistit několika způsoby se zaměřením na zbavení se konkrétního typu nečistoty. Pro odstranění vodíku se používá proces odplynění. Odplyňovat taveninu můžeme vakuováním, nebo probubláváním plynem.

Vakuování taveniny probíhá vysokým snížením parciálního tlaku (5kPa) nad hladinou taveniny a tím dochází k zamezení rozpustnosti vodíku v tavenině. Přesycený

roztok, který tímto vznikne, vypuzuje bubliny vodíku na hladinu taveniny a z hladiny do okolí.

Druhým způsobem, jak odstraňovat nežádoucí plyny, je **probublávání** plynu pomocí inertních, nebo aktivních plynů, které na sebe vážou vodík.

Inertní plyny jako je argon, nebo dusík, jsou vháněny do taveniny a přítomný vodík difunduje do inertního plynu, který stoupá na hladinu spolu s vodíkem.

Aktivní plyny jako je chlor, fluor, reagují s vodíkem ale i dalšími prvky, jako je třeba hořčík nebo vápník a vytvářejí chloridy a fluoridy navázaných prvků.

Pro odstranění vměstků a oxidů se tavenina **rafinuje**. Rafinace probíhá za pomoci solí. Soli se do taveniny nerozpouští, mají nižší teplotu tání, než hliník a po roztavení na sebe navážou nežádoucí prvky a vyplaví se na povrch ve formě oxidu, tím chrání taveninu proti další oxidaci a vnikáním vměstků. Před použitím se sůl musí vysušit, aby nedošlo k znehodnocení taveniny, anebo havárii. [3][18]

2.2.2 Úprava taveniny

Tavenina se musí před použitím upravit tak, aby při tuhnutí bylo dosaženo předepsané struktury a tím i požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností. Tyto úpravy se nazývají očkování a modifikace.

Očkování je metalurgický proces, ve kterém se do taveniny přidá malé množství očkovací látky, aby byl zapříčiněn vznik většího množství krystalizačních zárodků. Při ochlazování tak začínají růst krystaly na více místech. Očkovat taveninu lze pomocí očkovací soli, nebo předslitinou. Hliníkové slitiny se očkují nejčastěji titanem, bórem, fosforem, nebo vanadem.

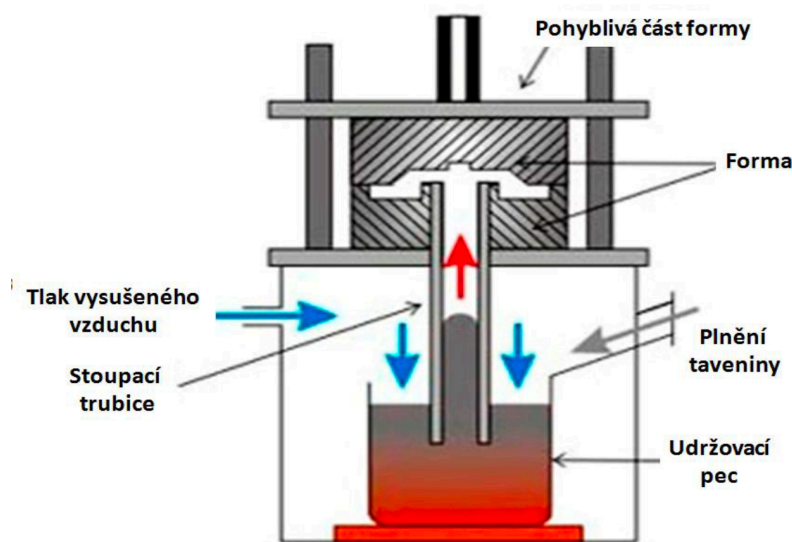
Modifikací taveniny se dosahuje jemnějších struktur a zlepšení mechanických vlastností slitin. Působí na tvar eutektika slitiny, který tak netvoří hrubé a ostré hexagonální tvary ale jemné a spojitě „větvičky“. Nejčastějším modifikátorem je antimon, sodík nebo stroncium. [3][9][27]

3 Technologie nízkotlakého lití

Nízkotlaké lití (NTL) je jednou z metod výroby přesných odlitků. Nejvíce touto metodou odlévání jsou vyráběny výrobky z lehkých materiálů jako je hliník, hořčík a jejich slitiny. Od tlakového a gravitačního lití se liší možnostmi složitostí a technologickou náročností vyráběných součástí. Nízkotlakým litím nemůžeme odlévat velmi složité a tenkostěnné odlitky na rozdíl od tlakového lití. Nejužší rozměr stěny, který se udává u technologie nízkotlakého lití je 3 mm a dosáhneme toleranční třídy 9-10. Výhodou technologie je vysoká kvalita vnitřní struktury kovu, hustota, rovnoměrné plnění formy a až 95% využití kovu.[14] [16]

3.1 Princip

Technologie NTL funguje na principu, při kterém probíhá plnění dutiny ve formě za pomoci tlaku působícího na hladinu taveniny v udržovací peci zakomponované v zařízení. Celé zařízení se skládá z udržovací (např. kelímkové) pece, formy, stoupací (plnicí) trubice a přívodu plynu (viz obrázek 8.).



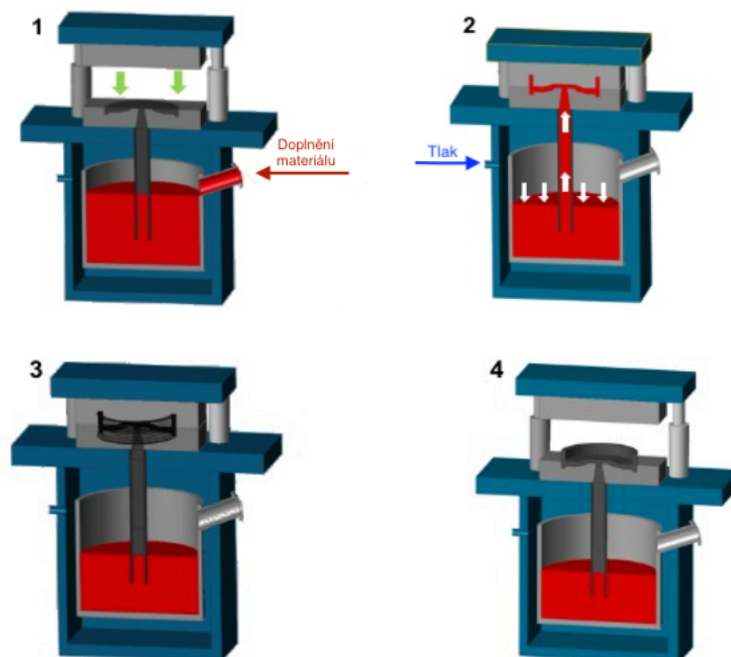
Obrázek 7 - princip nízkotlakého lití, směr práce

Tavenina v udržovací peci (hermeticky uzavřená) je pomocí přetlaku vzduchu (plynu) působícího na hladinu taveniny vytlačována keramickou trubicí do formy.

Forma se nachází nad udržovací pecí, sestavená z několika částí. Na kov v kelímku působí nízký tlak plynu a tavenina je vtlačována do formy ode dna, díky čemuž se plní rovnoměrně a kvalita odlitku je vyšší. Tlak vytlačující taveninu do formy musí překročit velikost zpětného tlaku taveniny, tlakových ztrát a odpor kontinuálního tuhnutí způsobeného ochlazením ve stoupací trubici. Tavenina tuhne vlivem odvodu tepla pomocí chladicího systému formy, nebo vlivem prostupu tepla formou. S odlitkem utuhne i několik centimetrů taveniny ve stoupací trubci, zbytek stéká znova do pece. Ohřívání a udržování taveniny v peci v tekutém stavu se uskutečňuje za pomoci elektrického odporu na vinutí topných spirál. [2][6][13]

3.2 Licí cyklus

Licím cyklem se obecně nemyslí jen samotné plnění formy taveninou. Je to opakující se proces začínající vložením pomocných komponent s následným uzavřením formy, po kterém začíná samotné plnění.



Obrázek 8 - popis postupu odlévání (1. forma se uzavírá, 2. tlak začíná působit na taveninu a stoupá trubici vzhůru do formy, 3. odlitek ve formě tuhne, 4. konečný odlitek k odběru) [17]

Na obrázku 8 je schematicky znázorněn princip a postup výroby odlitku. Přivedený tlak působí na hladinu taveniny, která stoupá trubicí do formy. Tlak nepůsobí pouze při přivádění kovu do formy, ale i při tuhnutí.

U nízkotlakého lití se používá při plnění tzv. vícestupňový cyklus. Rozdělují se dvě fáze, které se dělí dle velikosti použitého tlaku. Prvním je tlak při plnění, který činí maximálně 0,04 MPa (Tabulka 1–č. 4) a druhým je dotlak, díky kterému se předchází tvorbě staženin v tavenině a zvyšuje se s tuhnutím. Ten činí maximálně 0,1 MPa (Tabulka 1 – č. 5 a 6). Po něm následují další operace, přímo spojené se samotným odlitkem a s licím strojem, prováděné pověřeným pracovníkem, vyjmutí odlitku, ofuk formy, založení jader apod. [14] [15]

Tabulka 2 - Popis licího procesu

č.	Postup
1	Vložení pískových jader a dalších komponent
2	Očištění formy s komponentami vzduchem
3	Vložení sítka
4	Uzavření formy
5	Plnění dutiny formy taveninou
6	Dotlak
7	Tuhnutí odlitku
8	Chladnutí odlitku
9	Rozevření formy
10	Vyhození a vyjmutí odlitku
11	Vizuální kontrola odlitku
12	Vyčištění formy vzduchem
13	Možná oprava, nebo úprava parametrů

4 Formy, jádra a další komponenty pro nízkotlaké lití

Pro dosažení jakosti odlitku nezáleží pouze na navržení vtokové soustavy a taveniny, ale i na formě, jádrech a dalších komponentech jenž přímo souvisí s formou a ovlivňují čistotu dodávaného kovu a tvar výsledného výrobku.

4.1 Forma pro nízkotlaké lití

Při nízkotlakém lití se používají kovové formy, speciálně zkonstruované, aby odolali vyvíjenému tlaku taveniny. Mají specifickou a náročnou konstrukci skládající se z více dílů, která je přímo závislá na tvaru odlitku.

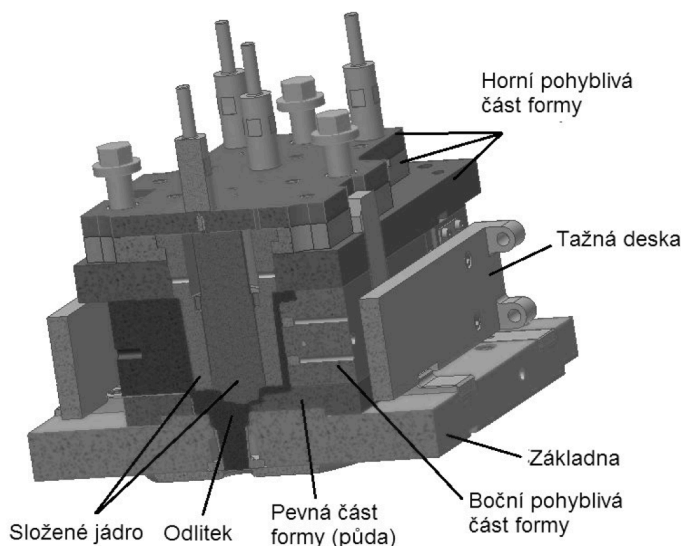
Forma je navržena tak, aby nejčlenitější část odlévaného dílu, která se následně nebude obrábět, byla umístěna na vyšších místech a tuhnula jako první. Taková konstrukce v menší míře eliminuje vnikání nečistot a vyplavenin do funkčních míst odlitku.

Jako nálitek nám slouží vtok, který tuhne jako poslední. Pro bezproblémový průběh cyklu je nutné, aby celá forma byla zaplavena taveninou ještě předtím, než začne tuhnout. Pro rychlejší tuhnutí odlitků je používán chladicí systém, který ale musí být pečlivě navrženy, aby nedocházelo k vadám vlivem rychlé změny teploty, ale aby reguloval všechny vzniklé tepelné uzly ve funkčních oblastech, které mohou mít vliv na výslednou kvalitu.

Konstrukce formy lze rozdělit na pohyblivé části a pevné části. Spodní díl je pevný a spojený trubící s udržovací pecí. Další části jsou pak pohyblivé (například horní část formy, vyhazovače).

Forma je namáhána cyklickou tepelně-mechanickou únavou (tepelné nárazy), tečením (stabilně zvýšená teplota) a mechanickým poškozováním (erozivně, kavitačně apod.) způsobovaném prouděním taveniny a tlakem. Je nutné na tuto skutečnost brát ohledy při navrhování materiálu formy.

Materiál by měl mít malý koeficient tepelné roztažnosti, aby ve formě nevznikalo a nekumulovalo se napětí a tím byla zvýšena životnost formy. Stejně tak je nutné brát v úvahu tepelnou vodivost a prostup tepla.



Obrázek 9 - Popis slévárenské kovové formy pro nízkotlaké lití [13]

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo, v tomto případě ho rovnoměrně rozložit po formě tak, aby nebyla forma namáhána nerovnoměrně. Prostup tepla zase ukazuje, jak je forma schopna zbavovat se nabytého tepla. Oba tyto koeficienty jsou důležitým parametrem, který může zvýšit životnost formy a kvalitu odlévaných dílů. Kromě fyzikálních vlastností je nutné hledět i na mechanické vlastnosti navrhovaného materiálu a jeho schopnost být zpracováván různými technologiemi jako je obrábění, nebo svařování. Tyto vlastnosti jsou důležité při výrobě a opravách formy. Umožňují levnější, méně náročnou výrobu a následné prodloužení životnosti při výskytu opotřebení.

Materiálů se využívá několik, od litin po nízkolegované ocele. Materiál musí odolat dlouhodobému teplotnímu namáhání, teplotním šokům i tečení. [13][14][15][16]

4.1.1 Ošetření formy

Ochranný postřik formy zvyšuje životnost samotné formy a kvalitu odlitku. Proudění taveniny může způsobit erozivní a kavitační poškození, tepelné šoky na

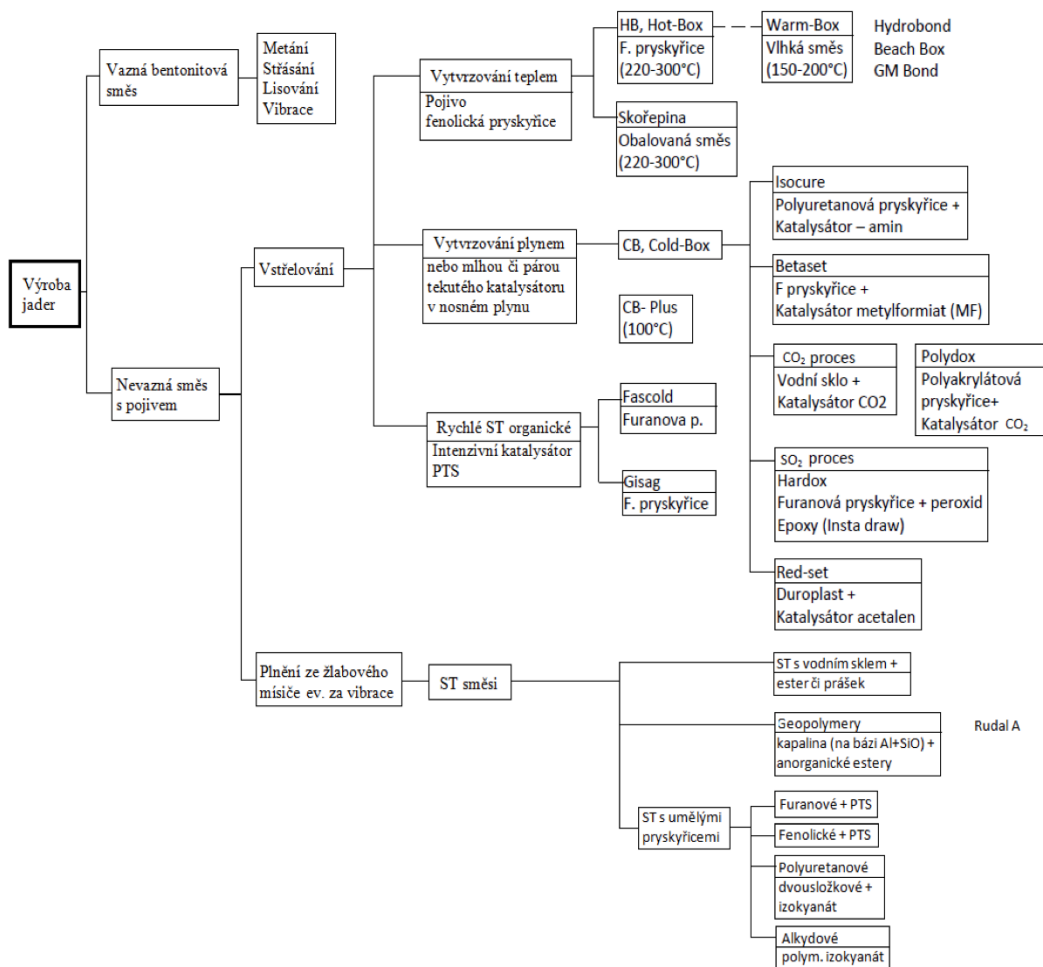
povrchové vrstvě, kterým vrstva ochranného postříku zamezuje. Dále zamezuje vnikání taveniny do mikrotrhlin formy a lepení taveniny na stěny formy. Odlitek se lépe vyjímá z formy a jeho povrch je vyšší kvality než bez ochranného nástřiku. Ovlivňuje koeficient přestupu tepla, se kterým je nutno počítat i v simulacích.

Typů nástřiku je několik, podle toho, jestli je žádoucí teplo v odlitku držet nebo odvést. Rozdělují se na vodivé, izolační a polovodivé. Vodivé se aplikují hlavně na části formy, kde vznikají teplotní uzly, které je potřeba redukovat, izolační do míst, kde je nutné, aby tavenina tuhla nejpomaleji.

4.2 Jádra používaná při nízkotlakém lití

Vzhledem ke složitosti součástí je zapotřebí užívání pískových jader pro tvorbu složitého tvaru, nebo dutin. Jádro není přímou stabilní součástí formy, ale zasazuje se do formy před zahájením odlévání. Dělí se na pravá a nepravá jádra, nebo na trvalá a netrvalá. Výhodou nízkotlakého lití oproti vysokotlakému je, že lze použít vzhledem k nižším tlakům písková jádra, které nám umožňují dosáhnout rozmanitějších a náročnějších vnitřních tvarů.

Druhů jader, pojivových systémů a technologií výroby je celá řada (viz schéma na Obrázku 10). Tato práce se soustředila na jádra vyrobená metodou Cold – Box popsanou v kapitole 12.



Obrázek 10 - Diagram výrobních metod pro písková jádra [21]

4.2.1 Konstrukce uchycovacích známek jader

Jádra musí být zkonstruována tak, aby se ani vlivem vysokého tlaku ve formě nepohnula a nerozpada. Musí mít tedy dobře zvolené rozměry známky, která zajišťuje nehybnost jádra při celém cyklu. Známkou je myšlena ta část jádra, která přímo doléhá na formu, ve které je připravené speciální lůžko k založení. Znamka nepřijde do kontaktu s kovem, protože je vyvedena mimo model. Můžeme mít svislé a vodorovné.

4.2.2 Ošetření jader

Pro kvalitnější povrch se jádra před vložením do formy často ošetřují, aby nedocházelo ke znečištění taveniny a jádro bylo odolnější. Nátěr působí jako prostřední vrstva, bariéra mezi materiálem jádra a kovem.

Ovlivňuje přestupy tepla, smáčivost a tečení okolo jádra a celkově fyzikální a chemické procesy v okolí. Slouží jako ochrana taveniny, ale i jádra, aby působením tepla nedošlo k znehodnocení jádra a tím k znehodnocení odlitku samotného. Nátěr musí být schopný stability i při tepelných šocích nebo dlouhodobém působení tepla. Dále je nutné, aby bylo možné efektivně s danou nátěrovou hmotou pracovat v procesu výroby, což zahrnuje snadnou aplikovatelnost, ale také zdravotní nezávadnost při splnění bezpečnostních předpisů. Používají se sloučeniny vodné, nebo bezvodné na bázi etanolu, nebo isopropanolu. Poslední dvě zmíněné látky jsou vysoce těkavé a jejich páry jsou těžší než vzduch, přesto je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy, jelikož vdechováním je možná intoxikace. Aktuálním trendem jsou vodou ředitelné nátěry, kvůli zdravotní a ekologické výhodnosti, ale mají mnoho nevýhod, hlavně délku odpařování vody (vysoušení), nebo snížení povrchové pevnosti jádra. [14] [28]

4.2.3 Jaderníky

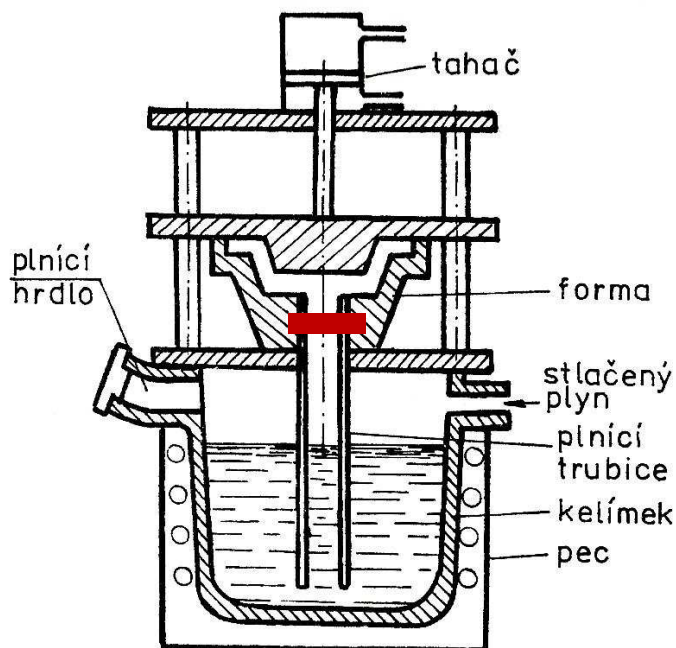
Pro konstrukci jader je sestaven výkres modelového zařízení, podle něhož je vyroben jaderník. Jaderník je nástroj, forma, v jejíž dutině se pěchují formovací směsi a vyrobí se jádro. Většinou se jaderník skládá z dvou na sebe doléhajících částí zkonstruovaných tak, aby se jádro dalo bez poškození vyjmout. Materiál jaderníku při metodě Cold-Box je závislý na velikosti výroby, pro malé a kusové výrobní linky postačí jaderníky zhotovené ze dřeva, pro sériové výroby se zhotovují z kovu.

4.3 Filtry – sítko

Do taveniny v udržovací peci se vlivem různých faktorů mohou dostat nečistoty. Ať už ze vsázky, manipulací s taveninou nebo z tavicí pece. Filtry nám plní několik funkcí, aby bylo předcházeno vadám při a po ztuhnutí.

Hlavní funkcí je zachytávání nečistot na začátku filtru, nebo pak v jeho vnitřku. Tavenina je tedy zbavena nečistot, které jsou větší než oko filtru. Další funkcí je

regulace plnění dutiny, kdy je tok taveniny usměrněn právě filtrem, který musí překonat. Také může například rozbít uskupení oxidů a bublin.



Obrázek 11 - Schéma zařízení pro nízkotlaké lití se znázorněným umístěním filtru [23]

Filtr je umístěný tak, aby nezasahoval do odlitku, ale pouze do části vtoku, která se později odstraní spolu s filtrem. Sítky a filtry na odstranění nečistot při odlévání mohou být z různých materiálů a různých tvarů. Rozdělují se na objemové a ploché.

4.3.1 Ploché filtry

První skupinou jsou kovové filtry, které jsou tvořeny ocelovým materiálem a jejich oka jsou okolo 2-3 mm velká. Mohou být buď rovná, nebo různě prohnutá a lehce přesahují vtokový kanálek. Používají se na slitiny s nízkou tavící teplotou. Jejich výhodou je nízká pořizovací cena a nevýhodou, že zůstávají spojeny s odlitkem.



Obrázek 12 - Kovový filtr používaný ve slévárně Beneš a Lát a.s.

Druhou skupinou jsou tkaninové filtry, které jsou tvořeny ze žáruvzdorných tkanin. Materiálem těchto filtrů je čistá amorfni SiO_2 (97-99 %). Tyto filtry lze napustit speciálními pryskyřicemi, které sníží povrchové napětí filtru v místech. Oka mají veliká dle zvoleného materiálu, běžně 1-2 mm. [24]

4.3.2 Objemové filtry

Objemové filtry jsou používány pro důkladnou filtraci materiálu. Míra této schopnosti záleží na konstrukci filtru – na velikosti ok a také poloze (překrývání). Tento typ filtrů může být vyroben z několika materiálů, v závislosti na technologii výroby a určení.

Extrudované filtry mají úzkou tloušťku stěny díky technologii tažení z keramické hmoty. Jsou vhodné na hloubkovou filtraci taveniny. Vzhledem k malé tloušťce stěny je možné vyrobit různé tvary ok.

Keramická sítká jsou destičky různých tvarů s různě velkými kruhovými otvory a různou tloušťkou (až do 20 mm, velikost otvorů 4-10 mm). Je vhodný také kvůli usměrňování taveniny a zamezování vírů v tavenině.

Větší šířku a menší oka mají lisované filtry, které jsou v principu stejné jako keramická sítká. Mají vysokou mechanickou pevnost, ale nižší filtrační účinnost.

Poslední skupinou jsou pěnové filtry. Jsou vyrobeny z keramické pěny a tvoří strukturu houby. Oka u pěnových filtrů se překrývají, tavenina se „musí dostat“ přes všechny překážky, aby prošla filtrem, a tak se nečistoty mají větší šanci zachytit ve filtru. Jsou vhodné k hloubkové filtraci. Mohou mít větší tloušťku (mezi 12-50 mm). [24][25]

5 Simulační software

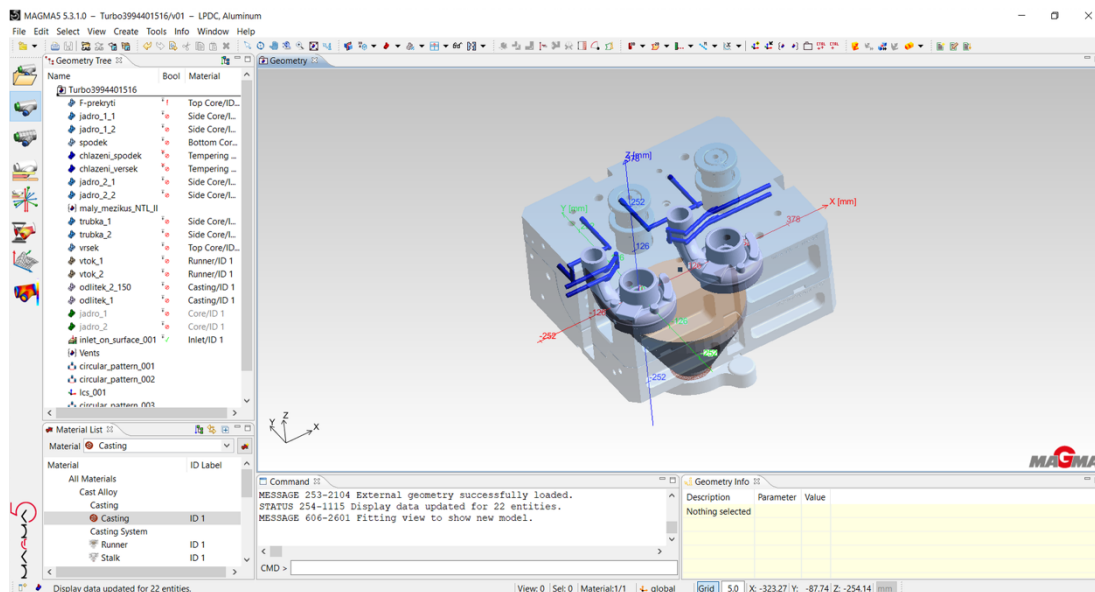
Simulační software je typ programu, který pomocí numerických výpočtů je schopen vykreslit průběh procesů v daném odvětví ještě před začátkem výroby a umožňuje nám předvídat zkratové události ve výrobě. Dále nám umožňuje analyzovat a optimalizovat již probíhající výrobní procesy a předpovídat následky provedených změn.

V kapitole 5.1 a 5.2 jsou uvedené dva nejpoužívanější simulační softwary ve slévárnách.

5.1 MAGMASOFT®

Společnost MAGMA se zabývá výrobou simulační technologie slévárenských procesů, která spojuje znalosti slévárenských procesů s vysokou odbornou erudicí v oblasti simulací, díky čemuž vytváří možnosti pro efektivnější výrobu a možnost optimalizace výrobků.

Program MAGMASOFT® je vytvořen tak, aby dokázal simulovat komplexní slévárenský proces pomocí numerické metody konečných diferencí a zahrnuje například – dynamiku tečení, tepelné toky a uzly, změny struktury, napětí materiálu, a podobně. Obsahuje velké množství doplňků, které zpřesňují a rozšiřují možnosti simulace.



Obrázek 13 - Uživatelské prostředí softwaru MAGMA

Praktická práce v programu je popsána v kapitole 9.

5.2 ESI ProCAST

Společnost ESI se zabývá simulacemi z vícero odvětví výrobních technologií, například sléváním, svařením, chováním kompozitů, ale i dalšími fyzikálními simulacemi, které jsou využívány v průmyslu.

ProCAST je simulační program vyrobený pro slévárenský průmysl, navržený pro tvorbu kompletního virtuálního výstupu. Program funguje na bázi numerického modelu metody konečných prvků. Vizualizuje chování materiálu uvnitř formy v každém kroku, které lze následně analyzovat.

6 Praktická část

Následující pasáž diplomové práce popisuje praktickou část, ve které jsou zmíněné a popsány konkrétní použité součásti, postupy a metodiky. Zabývá se vyhodnocením provedených experimentů, simulací a porovnáním simulace se samotnou výrobou turbodmychadlové skříně v praxi pro účely předjímání a konkretizace silných vlivů ve výrobě. Byla hlavně zaměřena na problematiku vlivů tvorby vad při nízkotlakém lití, jejichž projev není v simulačním programu předpokládán. Tyto vlivy jsou zejména způsobeny lidským faktorem, rychlostí procesu a přirozenými změnami v procesu.

V práci nejsou uvedeny konkrétní rozměrové parametry a některé konstrukce z důvodu utajení citlivých firemních technologických informací.

7 Použitá zařízení

K vypracování praktické části byla použita následující zařízení.

7.1 GE Inspection Technologies – Seifert x|cube series

Zařízení je určeno k nedestruktivnímu testování objektů. Pracuje s pokročilými rentgenovými a CT kontrolními systémy, které jsou navrženy tak, aby bylo skenování spolehlivější a přesnější. Systém poskytuje automatizované 2D kontroly, které jsou vhodné pro kontrolu široké škály dílů. Tento adaptabilní systém umožňuje spolehlivé, opakovatelné a efektivní rentgenové kontroly ve všech oblastech průmyslu, jako je letecký a automobilový průmysl, odlitky i aditivně vyráběné díly. Vzhledem k modernímu a technologicky pokročilému zařízení dokáže zobrazovací systém vyobrazit i nejjemnější kontrastní výstupy (dynamické detektory GE), navíc výstup můžeme následně pomocí aplikace vidět v reálném čase a modifikovat nastavení vyobrazení výstupu tak, aby byly odhaleny i skryté vady, a to bez poškození součásti. [33]



Obrázek 14 - Seifert x|cube series nedestruktivní testování odlitků

7.2 Vystřelovací stroj GIFOS

Pro výrobu jader byl použit vystřelovací jádrový stroj značky GIFOS, technologie Cold-Box.

Tabulka 3 - Technické parametry vstřelovacího stroje [34]

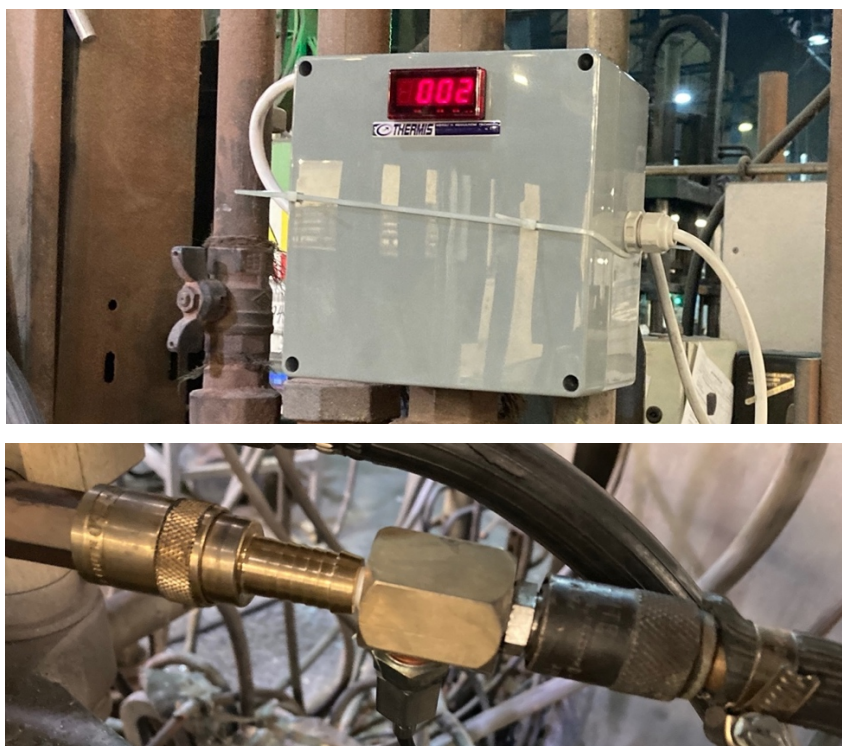
Tlak vzduchu [MPa]	0-6
Maximální šířka jaderníku [mm]	700
Hloubka jaderníku [mm]	600
Výška jaderníku [mm]	600
Objem jádra [dm ³]	16
Maximální zdvih stolu [mm]	350



Obrázek 15 - Vstřelovací stroj od značky GIFOS

7.3 THERMIS

Zařízení od firmy THERMIS bylo navrženo na míru a sloužilo pro měření tlaku kapaliny na vstupu do chladicího systému kanálu formy a následně na jeho výstupu. Byla tak měřena průchodnost chladicího systému a jeho pokles v procesu výroby. Čímž je možno předvídat celkové ucpání chladicího systému. Rozsah převodníku byl stanoven na základě zkušebního měření. Zařízení se skládá z: Zobrazovací jednotky RIA 063, T-kusu s rychlospojkami a šroubením G1/4", kapilárního systému Minimes, tlakového převodníku s keramickým snímačem THPB3.[35]



Obrázek 16 - Měřič difference tlaku od firmy THERMIS (nahore) a propojka pro měření (dole)

7.4 Nízkotlaký lící stroj

Nízkotlaký lící stroj 2. generace, jehož konstrukce byla navržena firmou Beneš a Lát a.s. Pod pecí je umístěna udržovací elektrická odporová pec pro 100–500 kg taveniny a je určena na odlévání z hliníkových slitin.



Obrázek 17 - Nízkotlaký lící stroj 2. generace

8 Práce v programu MAGMASOFT®

V kapitole 5.1 byla nastíněná podstata softwaru MAGMASOFT. Tato kapitola je věnována technické a praktické stránce a práci programu. Používaná verze v této kapitole je MAGMA⁵ (verze 5.3.1)

8.1 Postup vypracování simulací

Vypracování samotné simulace předcházelo několik kroků. Byl založen nový projekt, do kterého byla přidána geometrická data z projektu vytvořeného v modelačním programu (*formát .stl*). Při nahrávání je nutné dbát na pořadí těles. V programu platí hierarchie, ve které těleso, co bylo první nahráno do softwaru je prvním. Dalším krokem je zasiťování modelu. Zasiťování je vytvořené pomocí metody konečných diferencí. Ty se vypisují v uživatelském rozhraní jako kvádry. Velikostí

jednotlivých prvků sítě se určuje přesnost simulace a také délka výpočtové části simulací. Jemnost se nastavuje také dle funkčnosti části. Funkční části – kde je simulována tavenina – jsou zasíťované jemněji a výpočty jsou přesnější. Nevýhodou metody konečných diferencí v softwaru MAGMASOFT® je možné prolínání kvádrů, při kterém se ale každá krychle počítá jako platná jednotka. Z toho důvodu je možné, že se prodlouží doba výpočtu – ve verzi, která byla k dispozici k mé práci. V nových verzích programu je tato funkce již ošetřena.

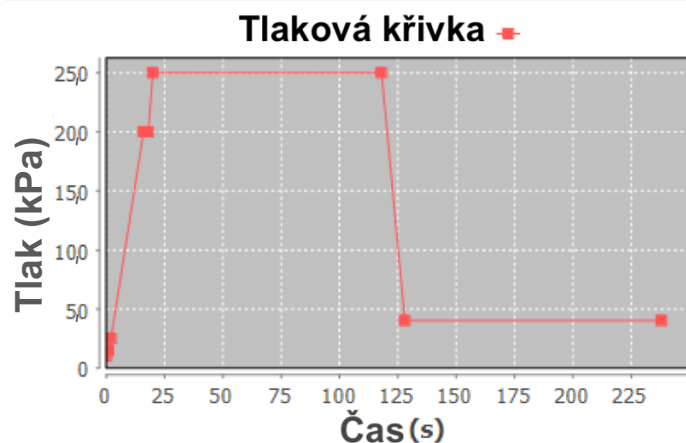
I.		II.		III.	
Odlévaný materiál:	AC 45 400 (AlSi5Cu3)	Odlévaný materiál:	AC 45 400 (AlSi5Cu3)	Odlévaný materiál:	AC 45 400 (AlSi5Cu3)
Teplota lití:	730 °C	Teplota lití:	730 °C	Teplota lití:	730 °C
Materiál formy:	11523	Materiál formy:	11523	Materiál formy:	11523
Počáteční teplota formy:	350 °C	Počáteční teplota formy:	350 °C	Počáteční teplota formy:	350 °C
Teplota pískového jádra:	30 °C	Teplota pískového jádra:	70 °C	Teplota pískového jádra:	5 °C
Postřiky/nátěry formy:	Vtok - Steiger woho + Dycote 39 Tvar spodek - DAG 193 Tvar vršek - Dycotte 39	Postřiky/nátěry formy:	Vtok - Steiger woho + Dycote 39 Tvar spodek - DAG 193 Tvar vršek - Dycotte 39	Postřiky/nátěry formy:	Vtok - Steiger woho + Dycote 39 Tvar spodek - DAG 193 Tvar vršek - Dycotte 39
Plnění (čas, tlak):	18 s, 20 kPa	Plnění (čas, tlak):	18 s, 20 kPa	Plnění (čas, tlak):	18 s, 20 kPa
Dotlak (čas, tlak):	100 s, 25 kPa	Dotlak (čas, tlak):	100 s, 25 kPa	Dotlak (čas, tlak):	100 s, 25 kPa
Tuhnutí:	120 s	Tuhnutí:	120 s	Tuhnutí:	120 s
Doba otevření formy mezi jednotlivými formami:	cca 20 s	Doba otevření formy mezi jednotlivými formami:	cca 20 s	Doba otevření formy mezi jednotlivými formami:	cca 20 s
Chlazení (medium, teplota, průtočné množství, časové spínání):	Voda t=35°C - 10-25 l/hod 35 s	Chlazení (medium, teplota, průtočné množství, časové spínání):	Voda t=35°C - 10-25 l/hod 35 s	Chlazení (medium, teplota, průtočné množství, časové spínání):	Voda t=35°C - 10-25 l/hod 35 s
Sítka ve vtoku:	ano, drát 2x2 mm	Sítka ve vtoku:	ano, drát 2x2 mm	Sítka ve vtoku:	ano, drát 2x2 mm
Typ mezikusu:	trchtýřovitý	Typ mezikusu:	trchtýřovitý	Typ mezikusu:	trchtýřovitý

Obrázek 18 - Nastavené parametry simulace - I. standardní, II. s předehřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem

Dalším krokem se definuje materiál komponent. Každá komponenta z modelu musí mít svůj nadefinovaný materiál – materiál formy, materiál jader a materiál pro model odlévaného materiálu. Také musí být nadefinován chladicí systém. Důležitým parametrem vztahujícím se k materiálu jsou přestupy tepla mezi jednotlivými modely. Zohledňují se v nich nástřiky a nátěry, které ovlivňují prostupy tepla. Koeficienty prostupu tepla nátěrů jsou stanoveny výrobcem a zadány do programu.

Po zvolení a zadání všech parametrů je nutné nastavit počet cyklů simulace. Počty cyklů jsou nastaveny pro bližší přiblížení realitě, v případě této práce na 5 cyklů numerických a 6. cyklus již s vizuálním výstupem. Dalšími parametry, které se musí nastavit jsou operace mezi cykly. Nastavuje se čas, jak dlouho je otevřená forma, vyjmutí odlitků, založení, ošetření a vyčištění formy. Stejně tak se musí nastavit tlaková křivka a časy tlaku popisující průběh plnění a dotlaky. Pokud se tento parametr

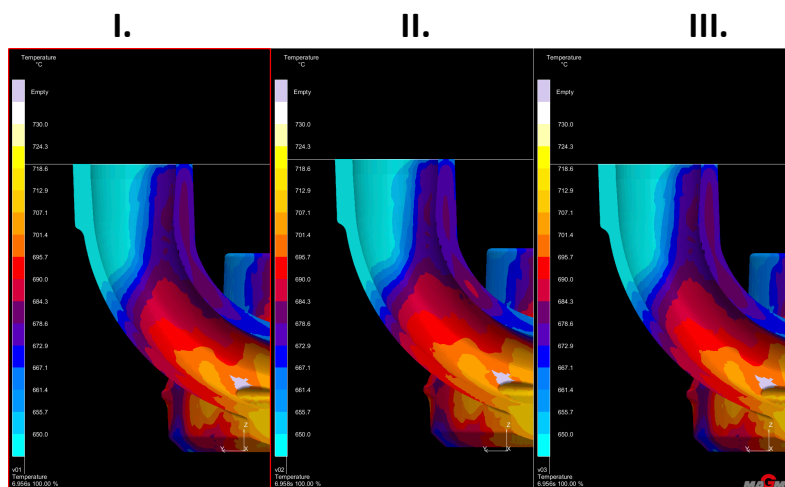
podhodnotí, nemusí odlitek tuhnout správně a mohou se vyskytovat s tím spojené vady. Důležitým parametrem, který se vztahuje k procesu a času je chlazení. V programu se nastavuje teplota chladicího média a průtok média (litry za časový úsek).



Obrázek 19 - Tlaková křivka nastavená v simulačním softwaru

Při nastavení vstupních parametrů simulace procesu se nastavuje forma výsledků, například jaké cykly mají být znázorněné, jak se má simulace ukládat a co mají vykreslovat.

Po nastavení všech parametrů se v programu zobrazí přibližná doba výpočtu. Program vykresluje postup simulace v reálném čase, a to díky postprocesingu. Po dokončení výpočtu je možné si zobrazit jakoukoliv část simulace, dále i jakýkoliv pohled nebo řez.



Obrázek 20 - Řez v simulačním programu u průběhu plnění 100% - u II. Lze vidět teplotní rozdíl

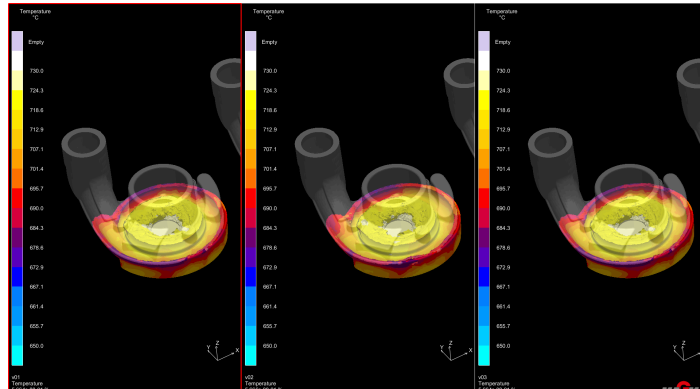
Procenta
naplnění

I.

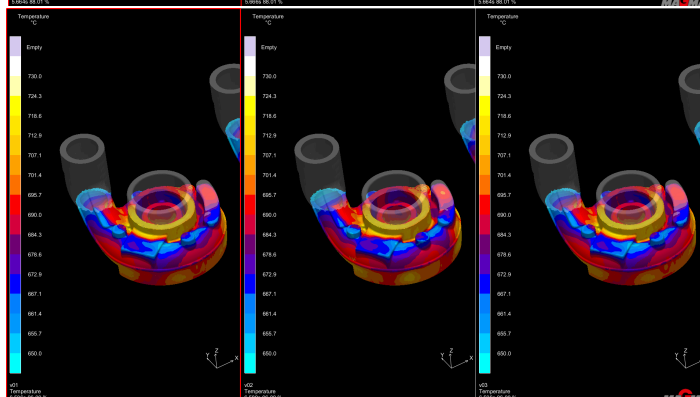
II.

III.

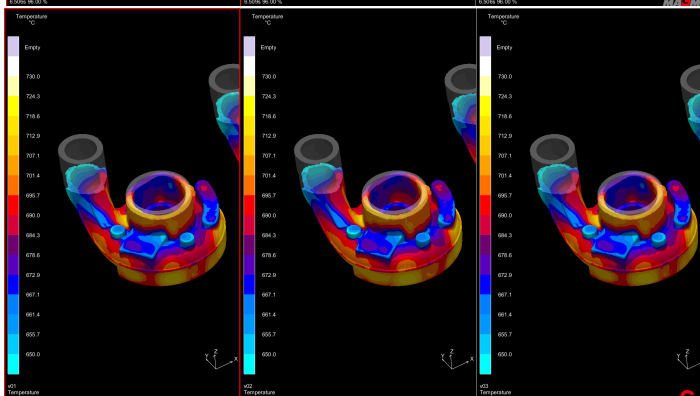
88 %



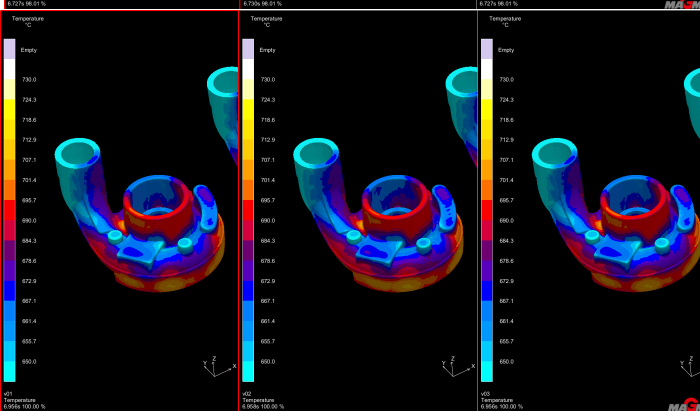
96 %



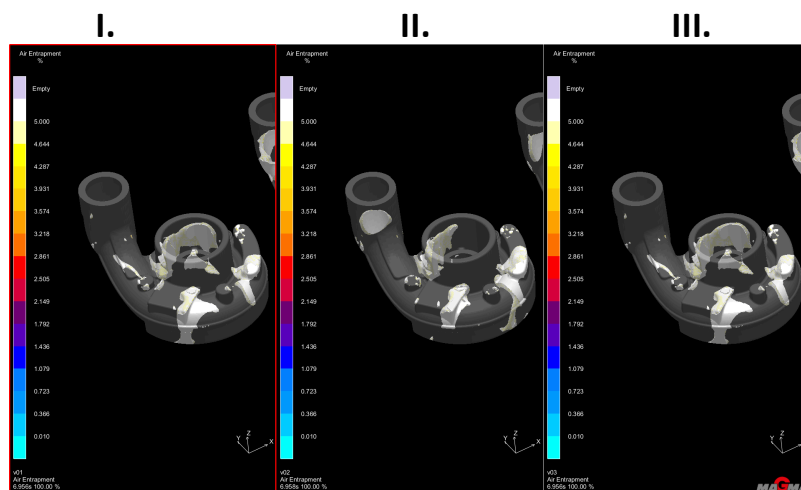
98 %



100 %



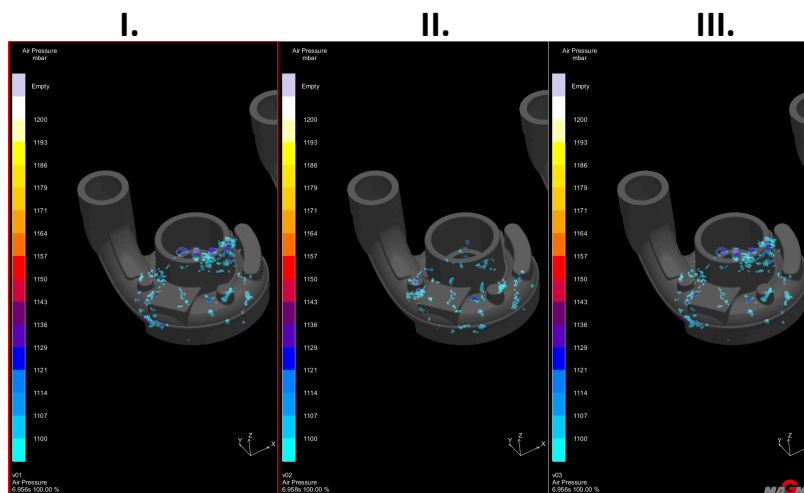
Obrázek 21 - Simulace průběhu plnění na O1: I. se standardním jádrem, II. s předehřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem



Obrázek 22 – Simulace výskytu zahlceného vzduchu: I. se standardním jádrem, II. s přehřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem

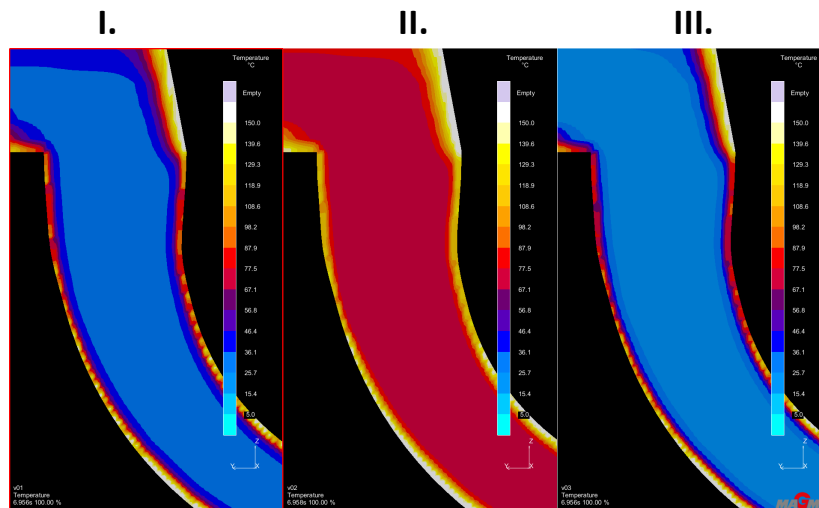
Zahlcený vzduch (Obrázek 22), který byl vypočítán simulací nám značí místa, kde je zvýšené riziko vzniku bubliny umístěné v odlitku, nebo puchýře umístěného na povrchu.

Ve výrobě znázorněná místa na simulaci často tyto vady nemají.



Obrázek 23 - Výskyt přetlaku vzduchu

Přetlak vzduchu ukazuje, kde je možný vznik vzduchových kapslí (Obrázek 23).



Obrázek 24 - Teplota jádra ve formě

9 Technologie výroby

Tato kapitola shrnuje všechna technologická témata týkající se výroby součásti.

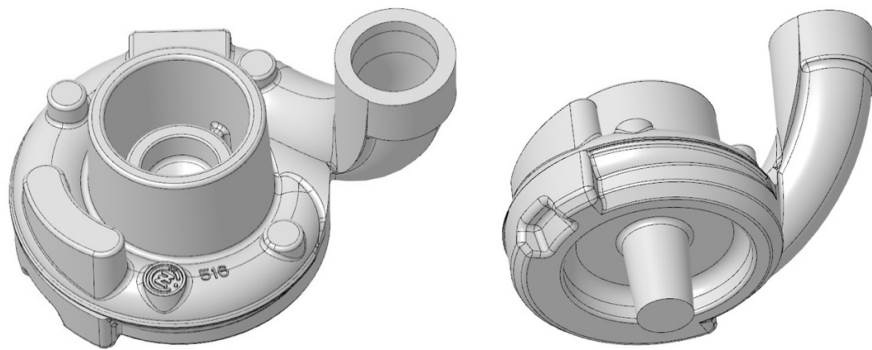
9.1 Dmychadlová skříň pro studenou část turbodmychadla

Zadaný díl turbodmychadlové skříně je výrobkem společnosti Beneš a Lát a.s. distribuovaný pro ČZ a.s.

9.1.1 Model

Pro účely výzkumu byl použit díl turbodmychadlové skříně, u kterého byly pozorovány změny struktur a vady v průběhu výroby, bez indikovatelných rozdílů v technologii.

Na této součásti je možné sledovat i mírné vlivy změn ve výrobě.



Obrázek 25 - Model turbodmychadlové skříně

9.1.2 Proces výroby

Na začátku každého procesu se forma se očistí proudem vzduchu a nanese se ochranný postřík, založí se jádra (Cold-Box), znova se forma očistí proudem vzduchu a založí se drátový filtr, následně se forma zavře a proces se spustí. Začíná plnění, následuje dotlak a tuhnutí. Forma je celý proces zahřívána na provozní teplotu min. 300 °C pomocí plynového hořáku pod formou.

Po ztuhnutí odlitku se forma otevře, odlitek se vyjme a je provedena rychlá vizuální kontrola (nahodilé měření tvrdosti – jeden kus z výrobní dávky). Při splnění vizuální kontroly je odlitek dále poslán na vytloukání jader, k čemuž je používáno pneumatické kladivo, vtoky se odstraňují pomocí stojanové vrtačky a namátkově se vybírají součásti na kontrolu prozářením. Kontrola prozářením také probíhá namátkově v intervalech po jakékoliv změně v procesu (dolévání materiálu do udržovací pece, obnova povrchové úpravy.). Vyhovující součásti jsou obrobena, otryskána a poslána zadavateli. [V1]

9.2 Slitina AlSi5Cu3

Jako materiál odlévané součásti byla zvolena slitina hliníku s obsahem křemíku a mědi, se složením popsaným v Tabulce 3. Složení slitiny je kontrolováno při každém doplnění udržovací pece.

Chemické složení AlSi5Cu3 dle normy ČSN 1706 - Hliník a slitiny hliníku – Odlitky:

Tabulka 4 - Chemické složení dle normy [26]

Prvek	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
%	4.5-6	2.6-3.6	max. 0,6	max. 0.55	max. 0.05	max. 0.1	max. 0.2	max. 0.1	max. 0.05	max. 0.25	zbytek

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti dle [29]

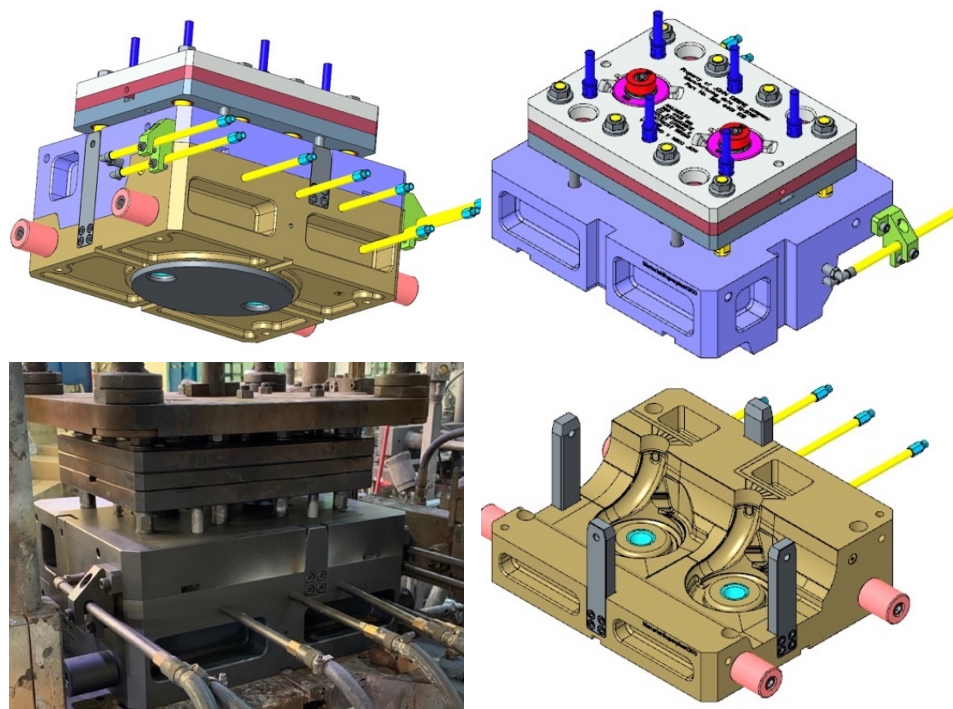
R _m :	230 MPa
R _{p0,2} :	110 MPa
A:	6%
Tvrlost:	75 HB

9.3 Příprava taveniny

Tuhá slitina má podobu ingotů a taví se na slévárenské zvyklosti „netradičně.“ Ingoty se vloží do udržovací kelímkové pece poblíž licího stroje, provádí se tavení slitiny přímo v udržovací peci vedle nízkotlakého licího stroje. Než se litina přelije do udržovací pece pod licí stroj, provede se spektroskopie a podle výsledků se provádí modifikace pomocí AlSr10 (80-180 ppm) a k očkování se používá AlTiB1 (0,12-0,14 h.m.%). Rafinace se u této taveniny neprovádí, pouze se naplňuje tabletami Begaser T200. Tavenina, která je připravena k použití a odpovídá předepsaným hodnotám se transportuje do udržovací pece pod licí stroj po 100 kg dávkách.

9.4 Forma

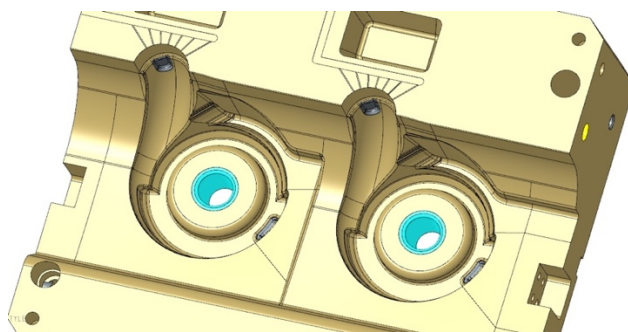
Licí forma pro součást turbodmychadlové skříně byla v minulosti několikrát přepracována z důvodu vysokého podílu vad ve výrobě. Vadovost se podařilo omezit na minimum, avšak vady se pořád náhodně objevují. Forma je dvojotisková, levý odlitek je označen O1, pravý odlitek je označen O2.



Obrázek 26 - Znáznornění licí formy, porovnání formy v modelu a reálné výrobě [31]

Forma se skládá ze dvou částí, horní pohyblivé části a dolní statické části. Je vyrobena z materiálu ČSN 11 573 – konstrukční oceli. Uvnitř formy je zakomponován chladicí systém, který je veden přes celou formu zdola nahoru, hlavně okolo míst, kde je potřeba redukovat tepelné jevy. Dále jsou ve formě vyhazovače pro snadnější vyjímání odlitků.

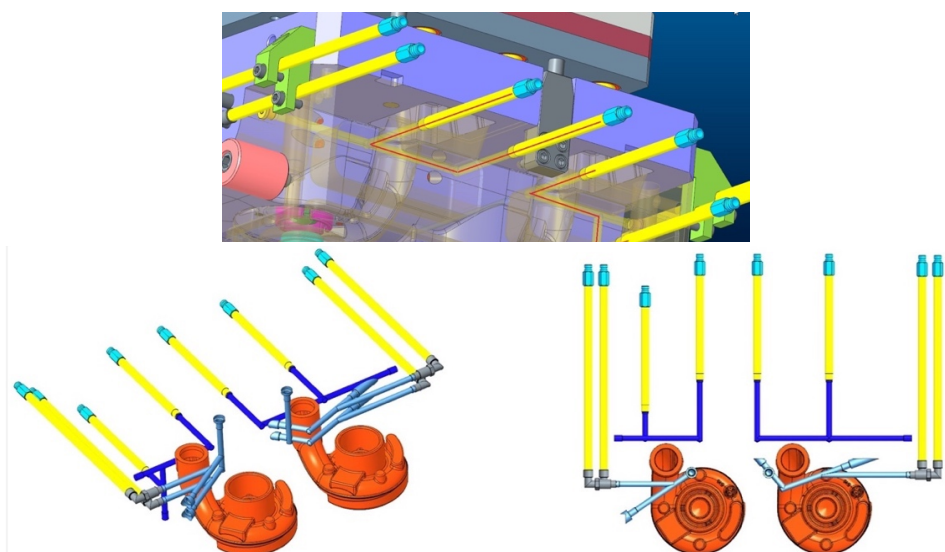
Forma se pravidelně udržuje v procesu licí dávky, na začátku se forma musí nasadit a na konci zase sejmout. Je to důležité kvůli údržbě a čištění formy a jejího systému, dále kvůli dílčím opravám.



Obrázek 27 - Porovnání dolní části formy s modelem [31]

9.4.1 Chladicí systém

Velká část praktické práce se týkala chladicího systému formy. Jak už bylo zmíněno, chladicí systém prolíná celou formu a je veden kolem náchylných částí odlitku, kde se redukují teplotní uzly. Chladicí kanály jsou ve formě rozprostřeny nerovnoměrně, a to z důvodu tvaru odlévané součásti. Chladicím médiem je voda.



Obrázek 28 – Schéma chlazení formy [31]

9.5 Výroba jader a jejich ošetření

9.5.1 Cold-Box

Metoda Cold-Box vychází z principu vytvrzování. Vytvrzování vzniká na základě chemické reakce mezi pryskyřicí a tvrdidlem. Obě látky jsou v kapalném stavu přidány do směsi s ostřivem, které je rovnoměrně promíchávané.

Důležitým aspektem je promíchání, při kterém se příměsi dostanou na každé zrno



Obrázek 29 - Jádra Cold-Box

ostřiva tak, aby se vytvořil pojivový film, díky kterému bude výsledné jádro celistvé. Vzniklá směs je následně vstřelována do jaderníku a vytvrzována pomocí profukování reaktivního plynného média – katalyzátoru.

Katalyzátorem je triethylamin (TEA), ten reaguje s vytvořeným filmem, který je přítomen po celém obvodu zrn ostřiva, příslušnou chemickou reakcí se povlak vytvrzuje.

9.5.2 Ošetření jader

K ošetření jader se používá speciální nátěrová hmota – Casting Cover 2001, určená k výrobě odlitků z litiny, nebo hliníku. Má velice dobré krycí vlastnosti, díky čemuž má i velice dobré účinky pro potlačení vad způsobených kontaktem taveniny s jádrem. Používá se zejména při výrobě jader metodou Cold-Box.

Je složena z žáruvzdorného prášku s lamelární strukturou (hliník), přísad, organického pojiva, příměsí, etylalkoholu a vody.

Aplikace směsi na jádro se provádí máčením v lihem naředěném roztoku. Jádro se nechává schnout 24 hodin a před aplikací do formy se nahromaděná látka na dotykové ploše zarovná.



Obrázek 30 - Nátěr na jádrech

9.6 Parametry lití

Pro všechny experimenty byly zadané identické vstupní parametry lití uvedené v Tabulce 6.

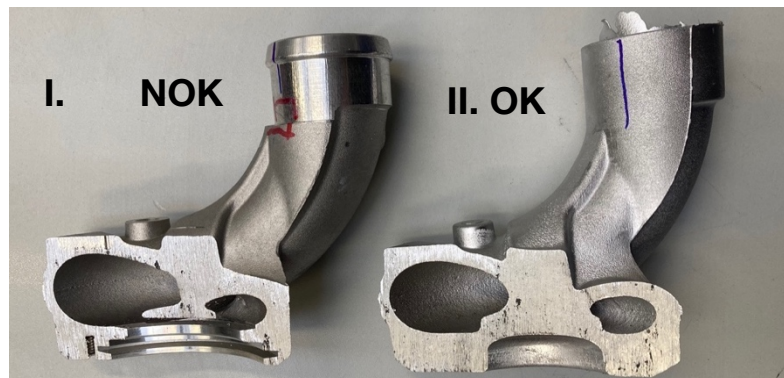
Tabulka 6 - Vstupní parametry

Plnění [s]	Dotlak [kPa]	Tuhnutí [s]	Chlazení 1,2,3 start po 10 s	Teplota formy [°C]
18	100	120	35	300
Váha odlitku [kg]	Tlak plnění1 [kPa]	Tlak plnění2 [kPa]	Tlak plnění3 [kPa]	Dotlak [kPa]
4100	20	5	5	25

10 Metalografie

Na součásti byly pozorovány defekty při kontinuální výrobě, bez specifických zásahů lidského faktoru a s vyhovujícím chemickým složením. Defekty byly rozsáhlé tak, že součásti neprošly testováním a musely být vyřazeny z dalšího procesu a zrecyklovány.

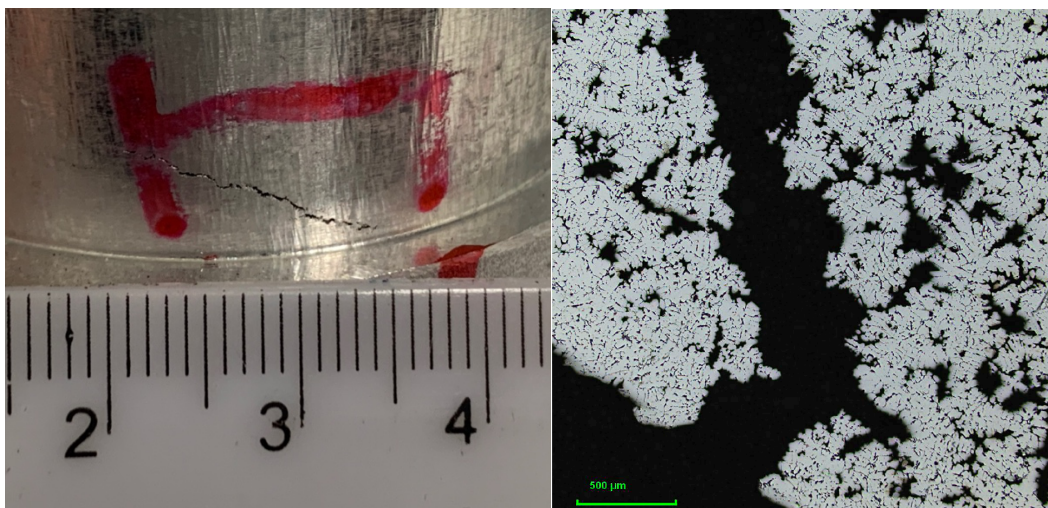
Pro kontrolu struktury byly zvoleny dvě varianty odlitku. První variantou byl odlitek s trhlinou, nevyhovující (Obrázek 31 - I. NOK), druhou variantou byl odlitek bez vady, vyhovující (Obrázek 31 - II. OK). (pozn. Oba odlitky jsou ze stejného umístění O1 ve formě.)



Obrázek 31 - Specifikace umístění vady (I. NOK - díl s vadou - červená barva, II. OK - díl bez vady - modrá barva) [30]

Je předpokládáno, že trhlina mohla vzniknout dvěma způsoby a to:

- Rozdílným časem tuhnutí taveniny u odlitku
- Rozdílnou rychlostí ochlazování



Obrázek 32 - Pozorovaná vada (levá strana), mikrostruktura pozorované vady 50x (pravá strana [30]); dendritická pórovitost: pouze NOK

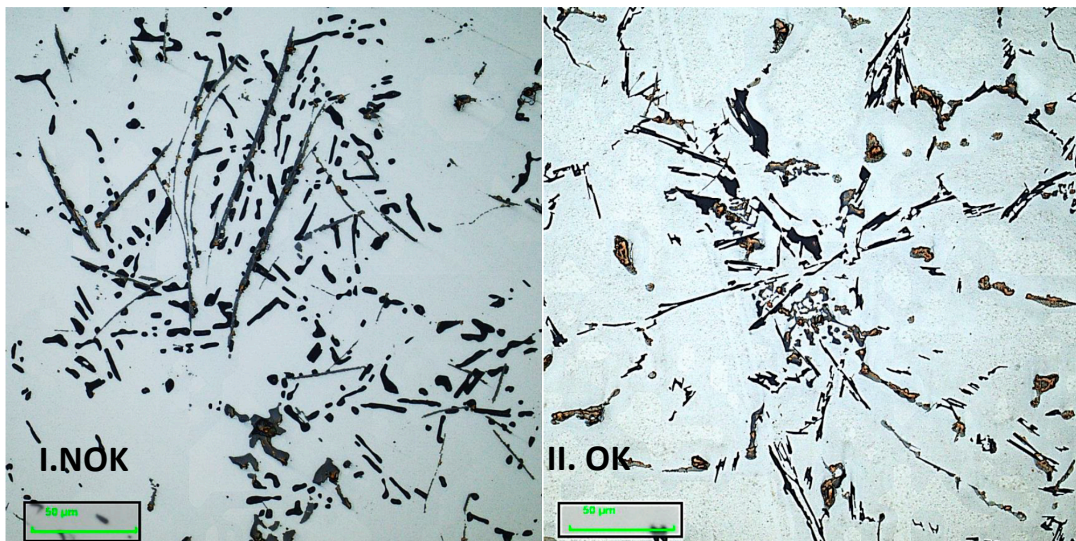
Trhlina na odlitku NOK se šířila od povrchu odlitku a dále se rozvíjela podél Si částic eutektického křemíku a intermetalických částic na rozhraní dendritů tuhého roztoku α . Ke vzniku trhliny přispěla přítomnost dendritické pórovitosti. Mechanismus šíření trhliny je běžný jev u slitiny AlSi5Cu3, jelikož má dendritickou strukturu (Obrázek 32).

Pro bližší prozkoumání byl použit konfokální laserový mikroskop Olympus LEXT OLS500. Analýza mikrostruktury byla zaměřena na hodnocení eutektických Si částí a intermetalických fází z hlediska jejich morfologie a distribuce. Laboratorní podmínky měření byly:

Tabulka 7 - Okolní podmínky pro metalografii

T_o :	$21\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$
RV:	$40\text{ \%} \pm 3\text{ \%}$

Mikrostruktura je složena z dendritů tuhého roztoku α , eutektika, které je složeno z tuhého roztoku α a eutektických částic Si ve formě $\alpha + \text{Si}$, intermetalických fází nepravidelného tvaru.



Obrázek 33 - Mikrostruktura 500x; tvar α + Si: NOK - sférický, OK - destička; intermetalická fáze: NOK - piny, OK - pouze různé tvary [30]

Mikrostruktura vzorků zobrazených na Obrázku 33 je viditelně rozdílná. Eutektický Si + α má u obou vzorků jiný tvar, u NOK vzorku jej tvoří sférické útvary, kdežto u OK vzorku má tvar destiček, dalším rozdílem je v intermetalické fázi, u NOK vzorku má tvar jehlic, u OK jsou fáze různého tvaru. [V1]

11 Závislost vysušení a předežhřátí jádra na kvalitě odlitku

Jeden z parametrů, který je možný optimalizovat je vlhkost a teplota jádra. Ty mohou výrazně ovlivňovat kvalitu výsledného odlitku. Pro ten účel byly zkoumány následující sady jader:

- Standardní jádra
- Předežhřátá jádra
- Vysoušená jádra
- Podchlazená jádra

Skupiny jader byly zvolené takové, které lze nasimulovat v simulačním programu, ale i takové, které by mohly mít vliv na odlitek, ale nasimulovat je nelze. Jako směrodatný vzorek pro měření bylo zvoleno 10 jader do každé sady, aby na každém otisku formy byl lichý počet odlitků, jelikož i rozložení ve formě může mít vliv. U všech odlitků se vytloukala jádra a byla provedena kontrola prozářením již bez jader.

11.1 Zkušební skupina

Parametry přehřátí pro zkušební skupinu jader jsme zvolili orientačně, pro zmapování možnosti provedení experimentu. Byla vybrána čtyři jádra. Testovací jádra 1 a 3 byla vložena do vysoušecí pece (Obrázek 34) a ponechána 30 minut na vysušení při 100 °C.



Obrázek 34 - Umístění přehřátých jader v peci

Jádra 2 a 4 byly ponechány v běžných výrobních podmínkách na vzduchu.



Obrázek 35 - Odlévací proces standardních jader

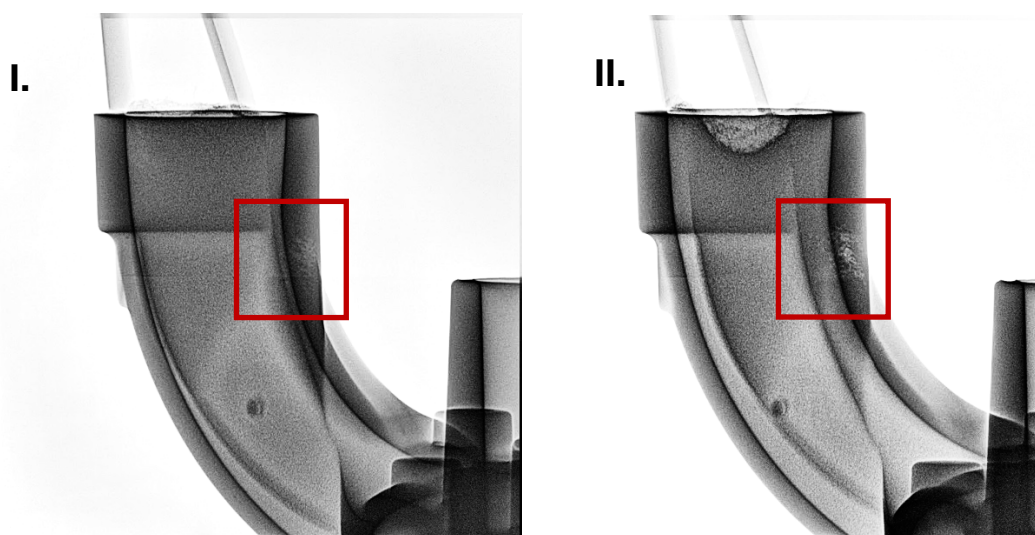
Byly odlity zkušební sady jader s následujícími parametry uvedené v Tabulce 8.

Tabulka 8 - Parametry zkušební sady (L = O1, P = O2)

Označení vzorku	Strana [1L/2P]	Čas vysoušení [min]	Teplota [°C]	Původní váha [kg]	Váha po přehřátí [kg]	Rozdíl [kg]	Teplota při odlévání [°C]
1	L	30	100	1,313	1,312	0,001	55*
2	P	-	25	1,314	-	0	30
3	P	30	100	1,331	1,329	0,002	55*
4	L	-	25	1,310	-	0	30

11.1.1 Výsledky zkušební skupiny jader

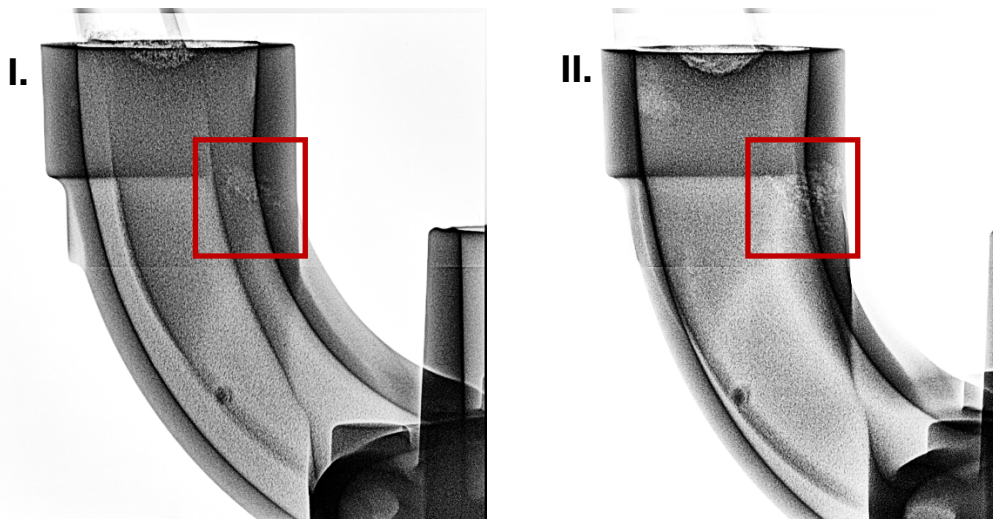
První sada jader ze zkušební skupiny nebyla nijak upravována, odlévala se těsně před přehřátými jádry.



Obrázek 36 - Standardní nepřehřátá jádra, I. O1 – č. 4, II. O2 – č. 2 (Tabulka 6) - ve výrobě se projevují vady

Lze si povšimnout na Obrázku 36, výroba byla sama o sobě defektní i přesto, že byla použita jádra bez úprav. U snímku I. O1 se vyskytuje lehká porozita v oblasti hrdla, u II. O2 je defekt viditelnější a rozsáhlejší.

Druhá sada již přehřátých jader ze zkušební skupiny byla vyndána z pece a odvezena k licímu stroji, následně odlita.



Obrázek 37 - Předehřátá jádra, I. O1, II. O2, rozsáhlá vada v oblasti hrdla

Vada (Obrázek 37) se vlivem působení tepla značně rozšířila. U I. O1 se stala intenzivnější a viditelnější, stejně tak u II. O2, kde se rozšířila dále do materiálu.

11.1.2 Poznatky ze zkušební skupiny

Pro měření je potřeba nastavit striktní podmínky a mapovat celý proces. Je nutné pro další testování nastavit výrobu tak, aby se vady ve výrobě vyskytovali ojediněle, nebo nevyskytovali vůbec a všechny tyto vlivy tvorby vad zaznamenávat. Testovací skupinu jader je nezbytné odlévat na začátku licí dávky po nasazení vyčištěné a ošetřené formy.

11.2 Testovací skupina

V testovací skupině byly zvoleny předepsané parametry pro jednotlivé skupiny tak, aby bylo možné výsledky porovnat. Skupina byla složená ze tří sad po deseti kusech – 5 x O1, 5 x O2. Testovací skupina byla pozorována první den výroby, na začátku licí dávky, tedy první den po vyčištění formy.

Všechna jádra byla vybrána z jedné dávky jader, aby nebylo možné zkreslení výsledků vlivem rozdílného povrchového ošetření nebo směsi jader. Dále byla nově doplněna a stabilizována udržovací pec tlakového licího stroje, aby měly všechny vytvořené vzorky stejné podmínky a chemické složení.

Tabulka 9 - Chemické složení slitiny z udržovací pece u druhé zkušební sady

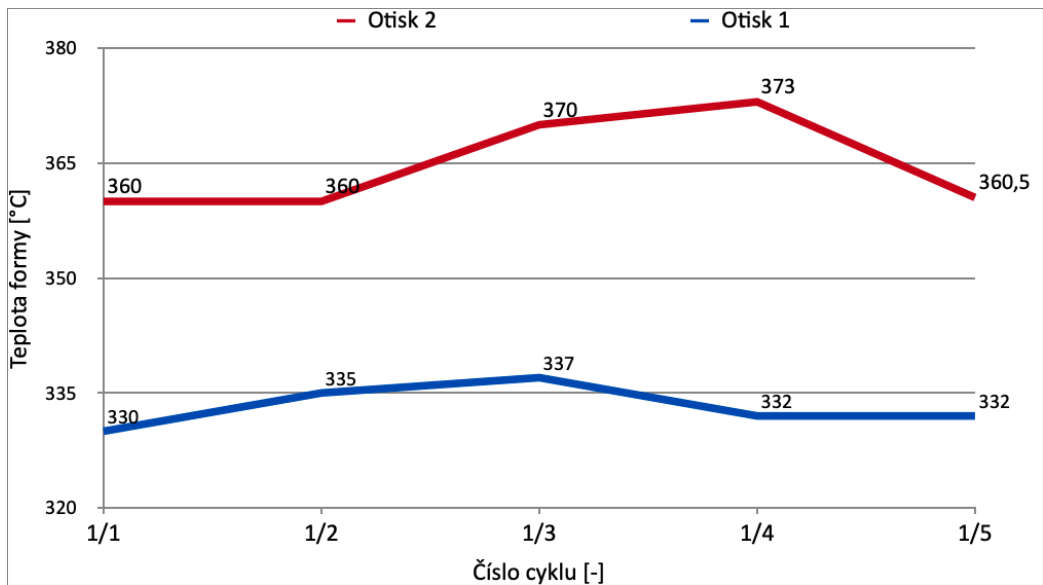
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
5,31	0,421	2,925	0,259	0,032	0,029
Ni	Zn	Ti	Ag	B	Ba
0,0093	0,067	0,118	0,0003	0,005	0,00002
Be	Bi	Ca	Cd	Co	Ga
0,00002	<0,001	<5E-05	<0,0001	3	0,01
In	Li	Mo	Na	Pb	Sn
<0,0005	<0,0001	<0,0003	<0,0001	0,004	0,0028
Sr	V	Zr	Sb	Hg	As
<0,0001	0,0083	0,0064	0,019	0,0009	0,0015
P	Ce	La	Al		
<0,0008	0,0078	0,0036	90,76		

Chemické složení AlSi5Cu3 odpovídá normě ČSN 1706 - Hliník a slitiny hliníku (viz Tabulka 4 nahoře). Odlévací tlakový stroj měl po celou dobu nastavené stejné vstupní parametry procesu (viz Tabulka 6).

Po čtyřech „rozjezdových“ cyklech a rentgenové kontrole, která vykazala stálou vnitřní strukturu odlitku se začala odlévat první sada se standardními jádry. Během odlévání byla měřena i teplota formy, kvůli možnému ovlivnění tuhnutí jádra a vzniku vad.

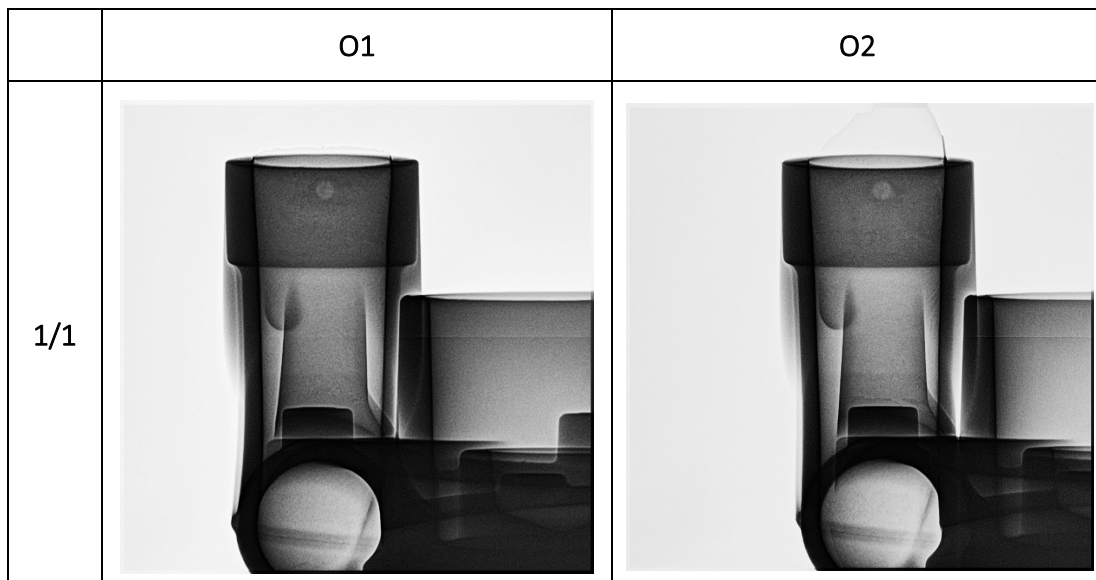
11.2.1 První sada – standardní jádra

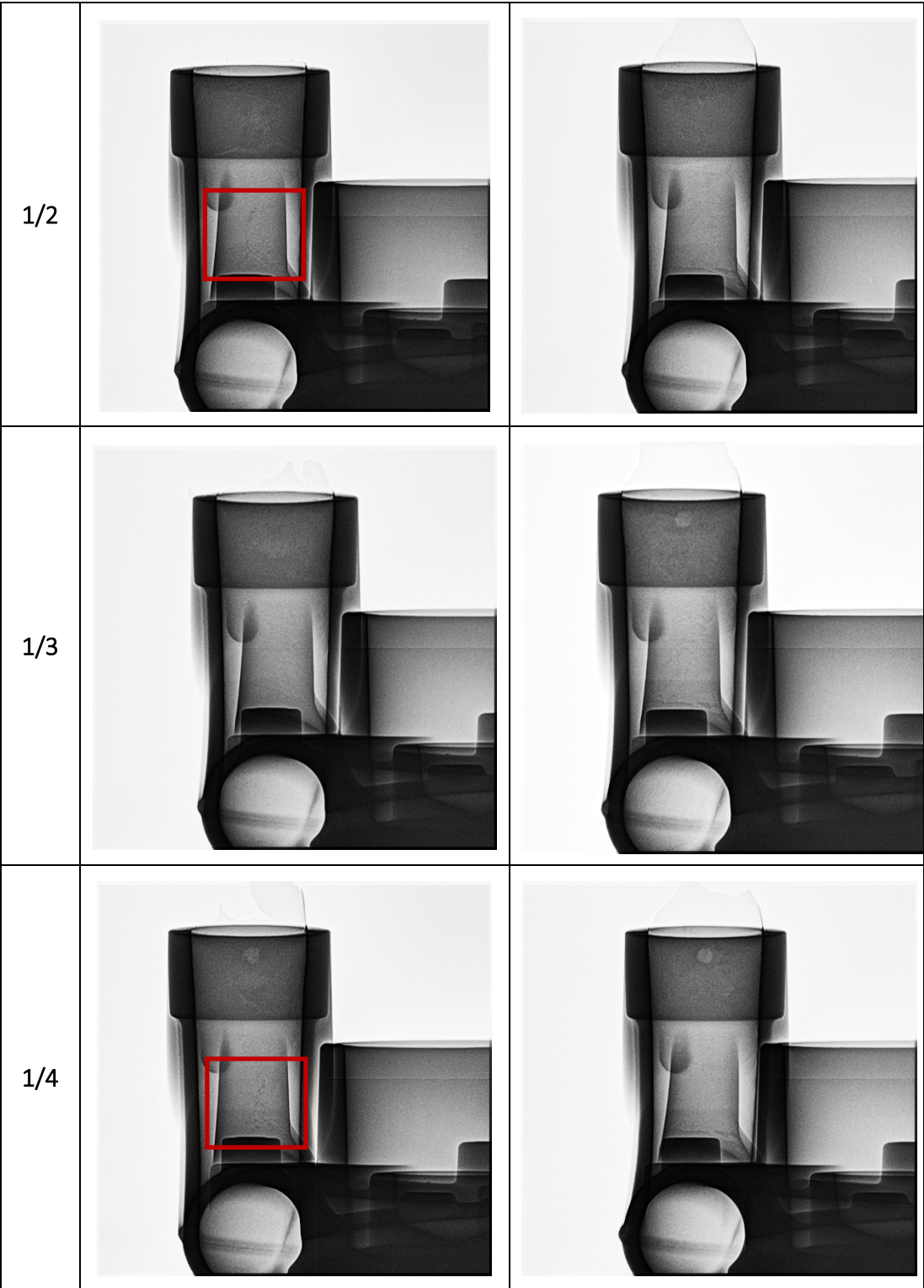
Původní teplota všech jader byla teplota okolí, která činila $30\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. V každý odlitek má přiřazenou svou teplotu formy znázorněnou v Grafu 1.

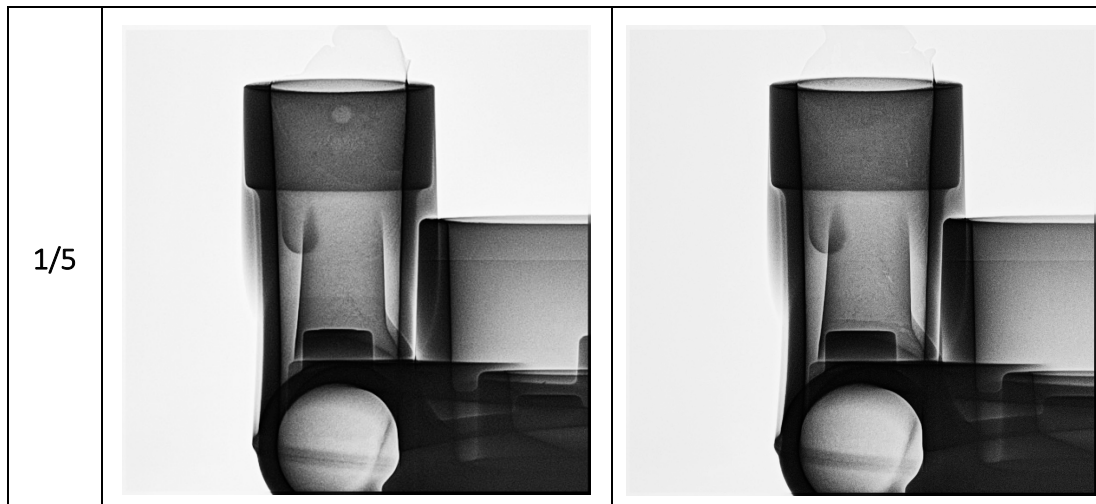


Graf 1 - Teplota formy u standardní sady jader (červená – O2, modrá – O1)

Teplota formy se měřila v návaznosti na kapitolu 11.1.2. Dávka se odlévala ihned za sebou bez přestávky, aby byl dodržen běžný pracovní zvyk. Po odlití byly odlitky řádně popsány a poslány na vytloukání.





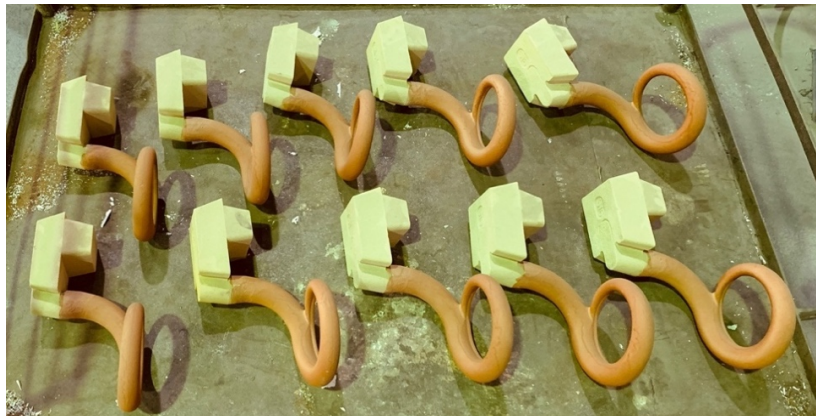


Obrázek 38 - Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (teploty dle grafu 1) – standardní jádra

Obrázek 38 zobrazuje celou dávku experimentálních odlitků s danými podmínkami. Výrobní dávka byla velice úspěšná, ale je možné si všimnout nedokonalostí na O1 (1/2,1/4), což může být způsobeno nízkou teplotou ve formě. Tato část je rozebírána v kapitole 15.3. Tyto snímky byly udělány pro možnost porovnání s ostatními dávkami a vzhledem k nízkému výskytu vad lze konstatovat dobře nastavené parametry odlévání a vyhovující složení taveniny.

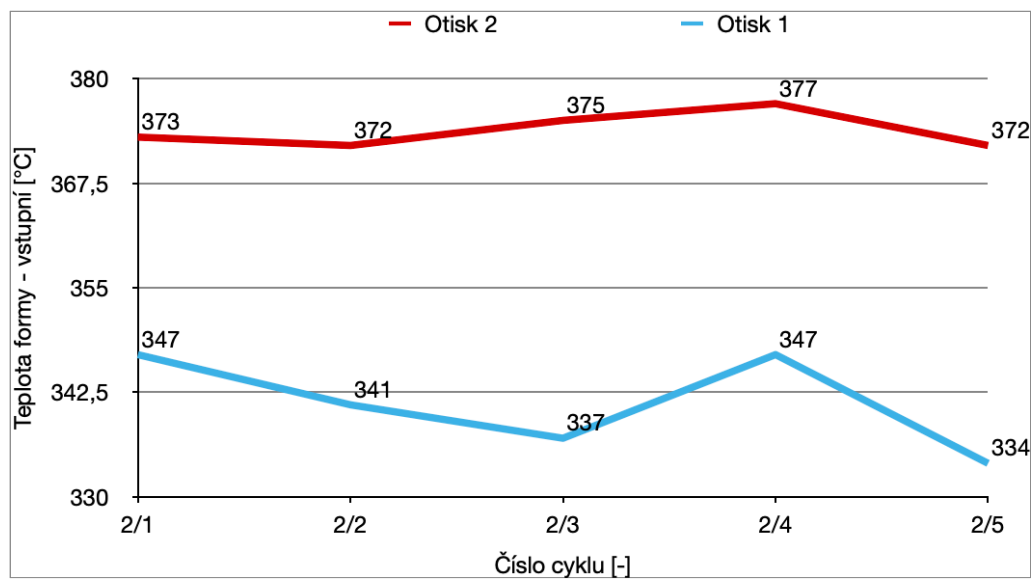
11.2.2 Druhá sada – vysoušená jádra

Z původních 30 kusů bylo 10 kusů vloženo do pece na 1 hodinu při 150 °C a následně ponecháno na vzduchu při teplotě okolí, dokud jádra nevychladla. Jádra byla vložena do pece tak, aby se nepoškodila nátěrová hmota jader. Následně byla jádra vyjmuta z pece a vložena na vozík, zase tak, aby zůstala nátěrová hmota bez defektů.





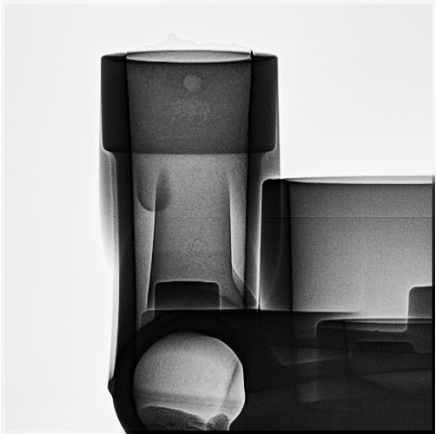
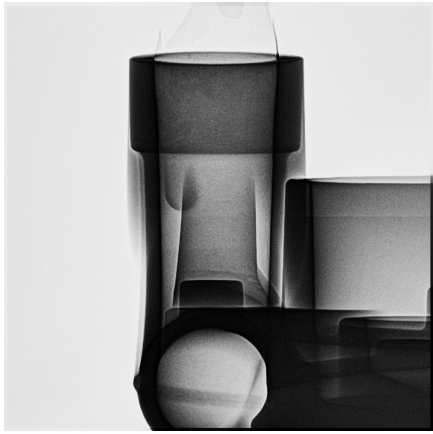
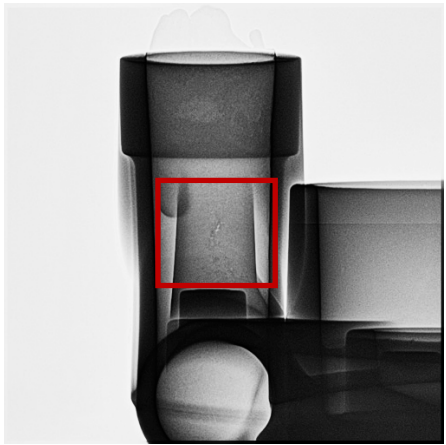
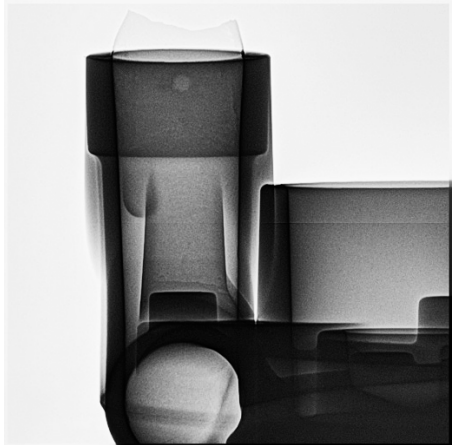
Obrázek 39 - Vysušená jádra při chladnutí

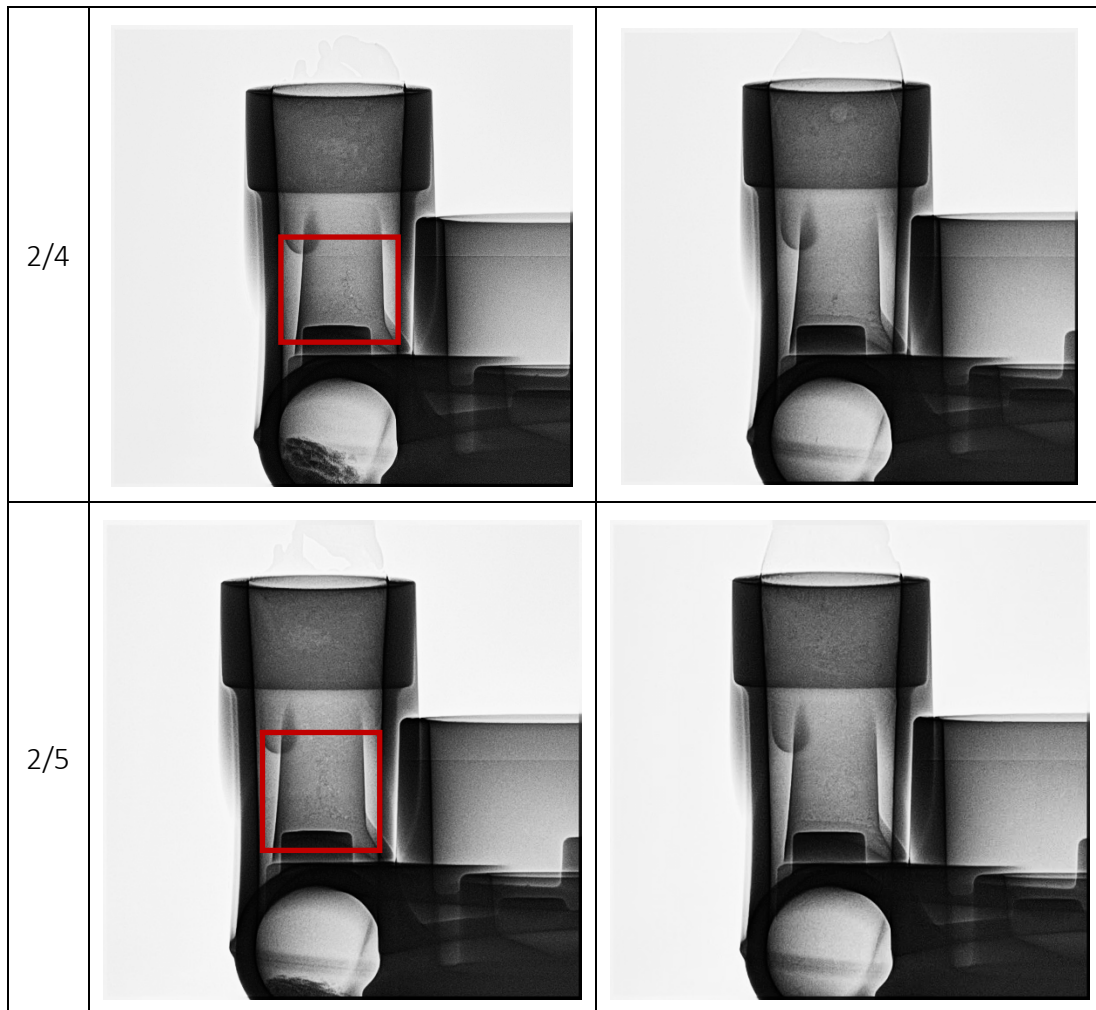
Jádra byla ponechána na vzduchu 2 hodiny, kdy se ustálila teplota, poté se začalo s poslední výrobní dávkou. Po založení jader byla měřena teplota formy ve stejném bodě, jako při ostatních sadách.



Graf 2 - Teplota formy u vysušených jader

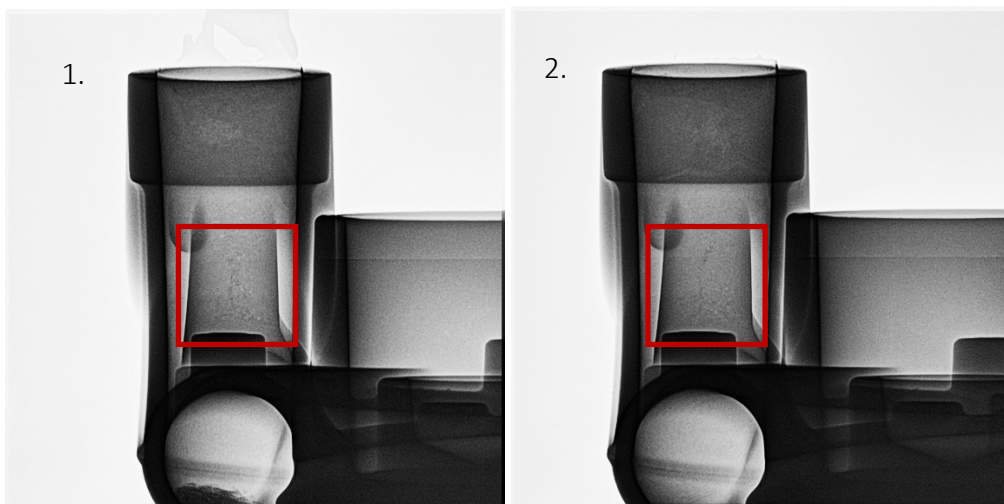
Po vyjmutí a vychladnutí byly všechny odlitky poslané k vytloukání jader a dále na prozařovací zkoušku. Výsledky zkoušky lze vidět v Obrázku 40.

	O1	O2
2/1		
2/2		
2/3		



Obrázek 40 - Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (teploty dle grafu 2) – vysušená jádra

Výsledky vysušených jader byly uspokojivé, stejně jako v případě standardních jader. Lze konstatovat, že jejich kvalita byla o trochu nižší než u standardních jader, hlavně na O1 (2/3, 2/4, 2/5).



Obrázek 41 - Porovnání podobných podmínek u vysušeného jádra (1. 2/5, 334 °C) a standardního jádra (2. 1/2, 335°C)

Porovnání O1 u vysušených a standardních jader (Obrázek 41), v cyklu s velice podobnými parametry je vidět, rozdíl změny struktury v případě vysušeného jádra a nevysušeného jádra. U vysušených jader je změna struktury rozkulená po větší délce, ale je méně patrná než u standardního jádra, kde je úzká a omezena pouze vprostřed plochy. Patrný vliv této operace je vidět.

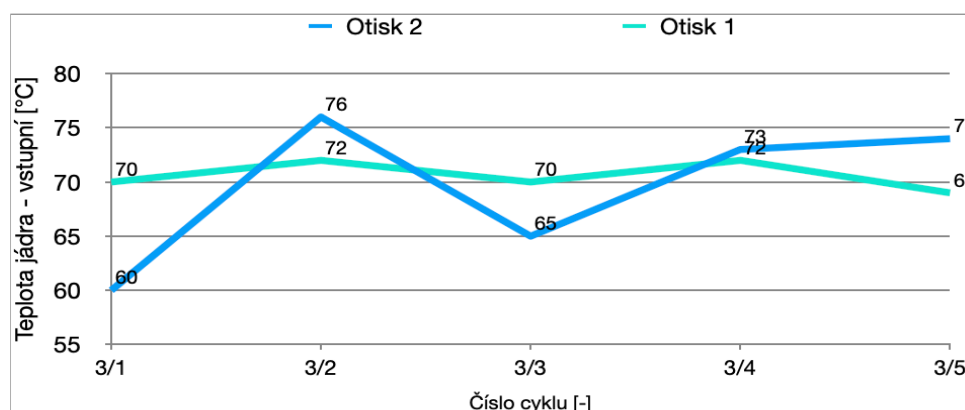
11.2.1 Třetí sada – předeřhátá jádra

Posledních 10 jader bylo vloženo k předeřhěvu do pece, do teploty 150 °C na 1 hodinu a dále do teploty 130 °C na další 1 hodinu. Stejně jako u druhé sady vysušených jader byla předeřhátá jádra do pece vložena tak, aby se nepoškodila nátěrová hmota. Poloha byla uzpůsobena, aby ošetřující nátěr byl v co nejmenším kontaktu s jinými předměty a nedocházelo tak k otírání a narušení vrstvy.



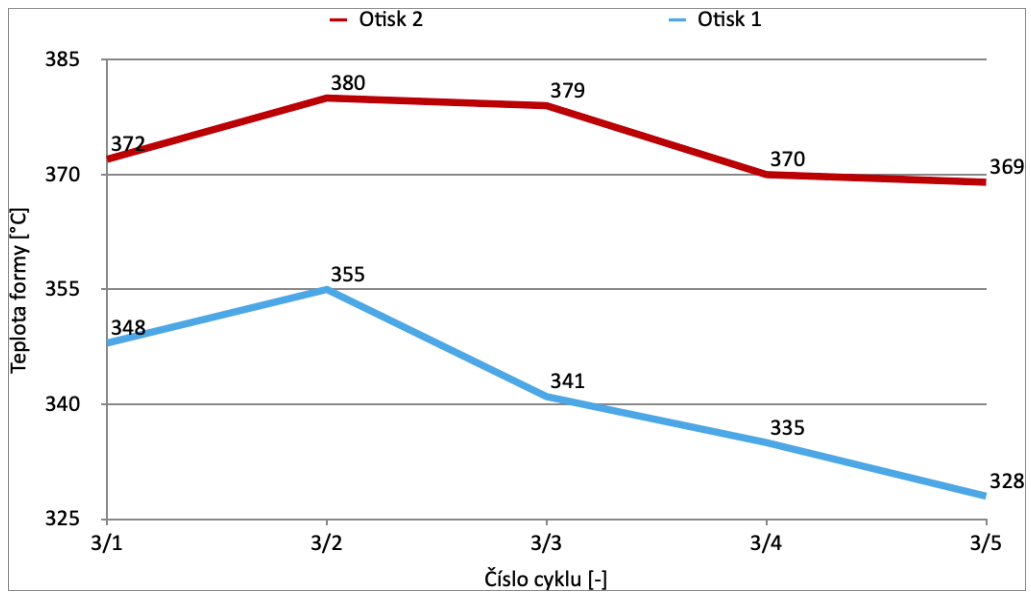
Obrázek 42 - Umístění jader v předehřívací peci

Po ohřevu byla jádra odebírána postupně po dvojicích, aby nebyly způsobeny velké rozdíly mezi jednotlivými teplotami jader. V podmínkách výroby nelze zajistit stejnou hodnotu teploty pro všechna jádra. Teplota jádra byla závislá na umístění v peci, závisela by i na manipulaci, ale v tomto případě byly nastaveny stejné podmínky v časech vyjmutí, aby všechna jádra měla stejný časový úsek mezi vyjmutím a založením.



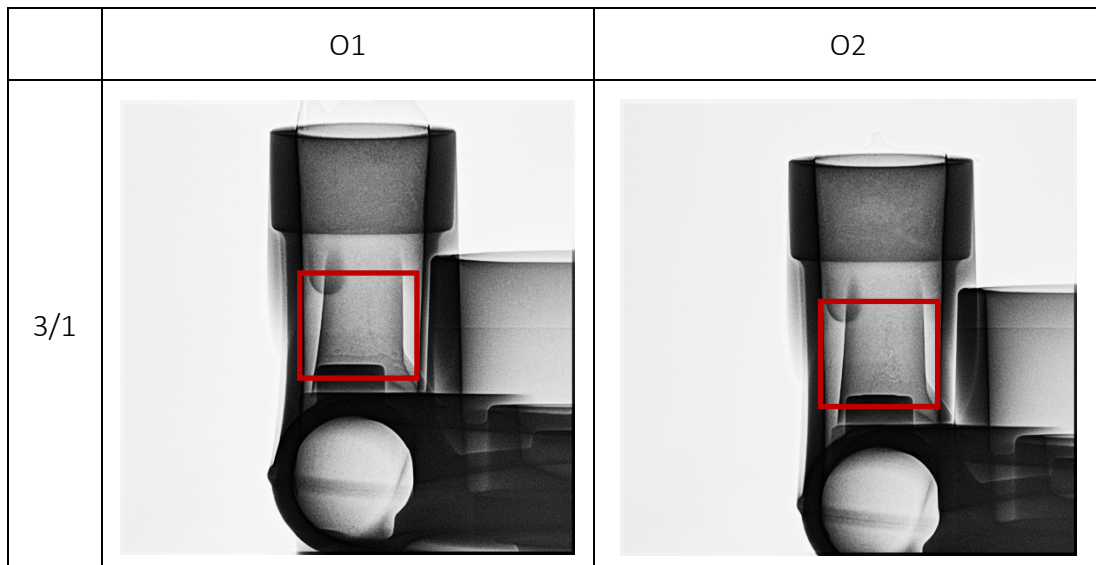
Graf 3 - Vstupní teploty předehřátých jader

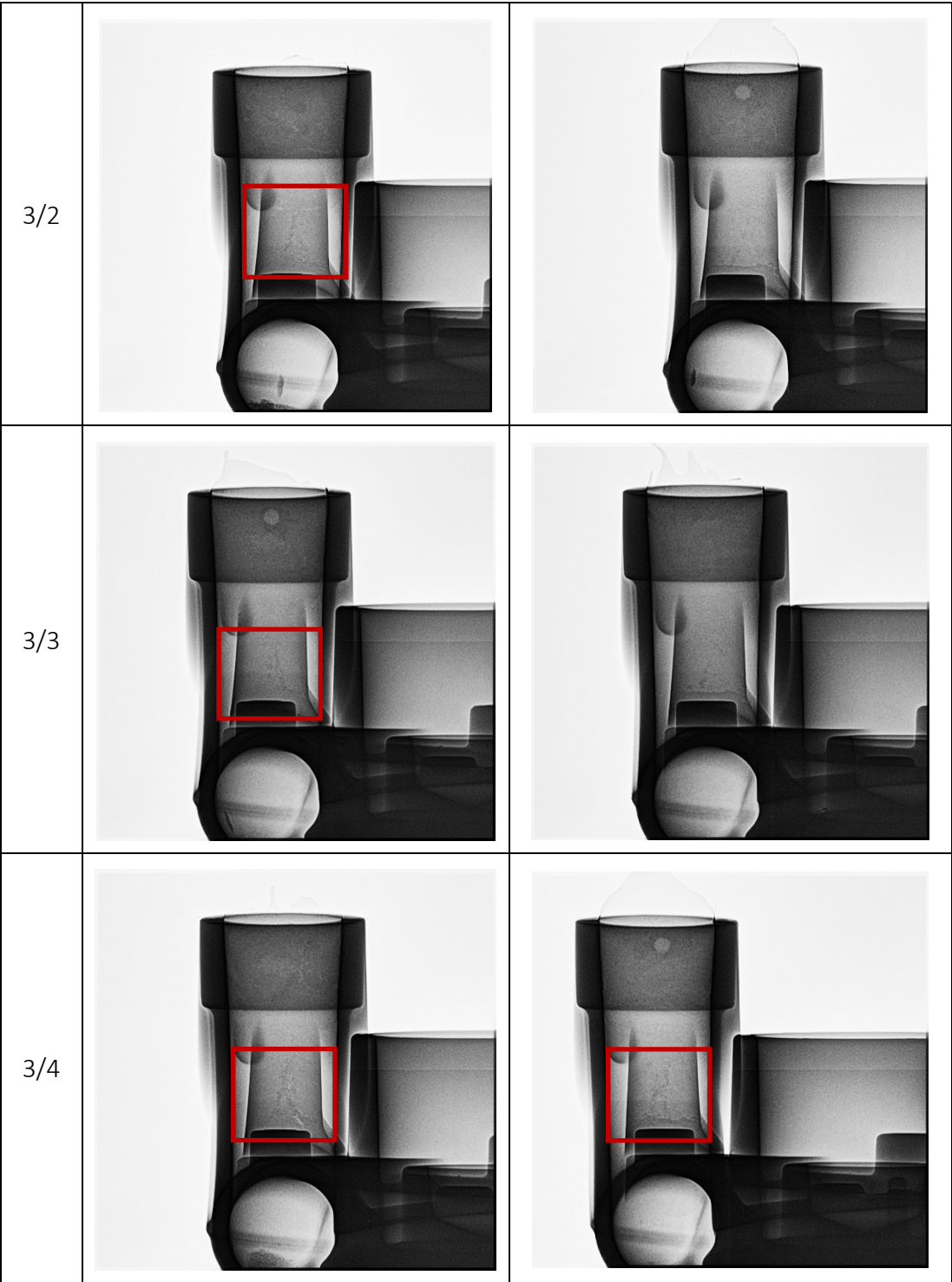
Naměřené hodnoty znázorněné v Grafu 3 byly měřené těsně před založením jádra do formy ve stejném místě, kde je měřena i teplota formy. Po založení jader byla změřena ještě teplota formy (Graf 4).

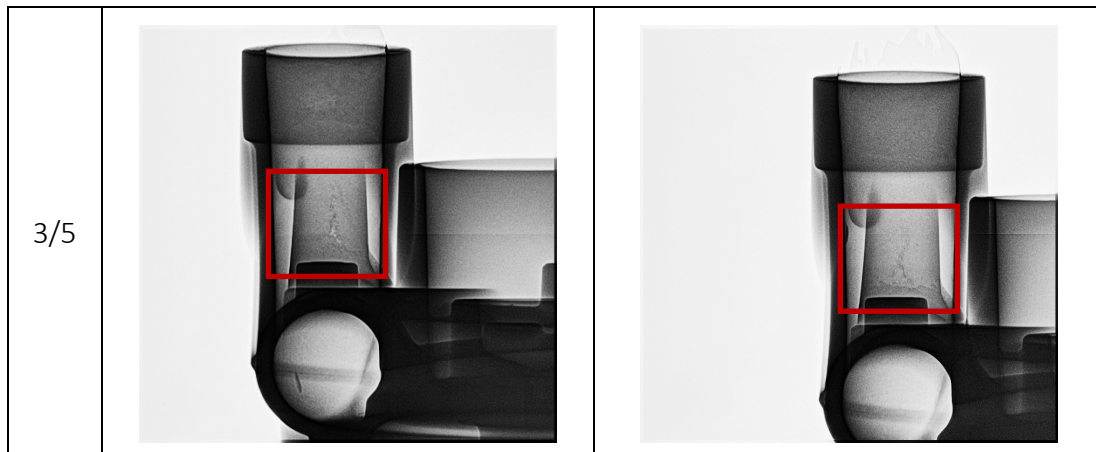


Graf 4 - Teplota formy u předeřáté sady jader (červená – O2, modrá – O1)

Po vyjmutí a vychladnutí byly všechny odlitky poslané k vytloukání jader a dále na prozařovací zkoušku. Výsledky zkoušky lze vidět viz Obrázek 43







Obrázek 43 – Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (dle grafu 3) – předeřtátá jádra

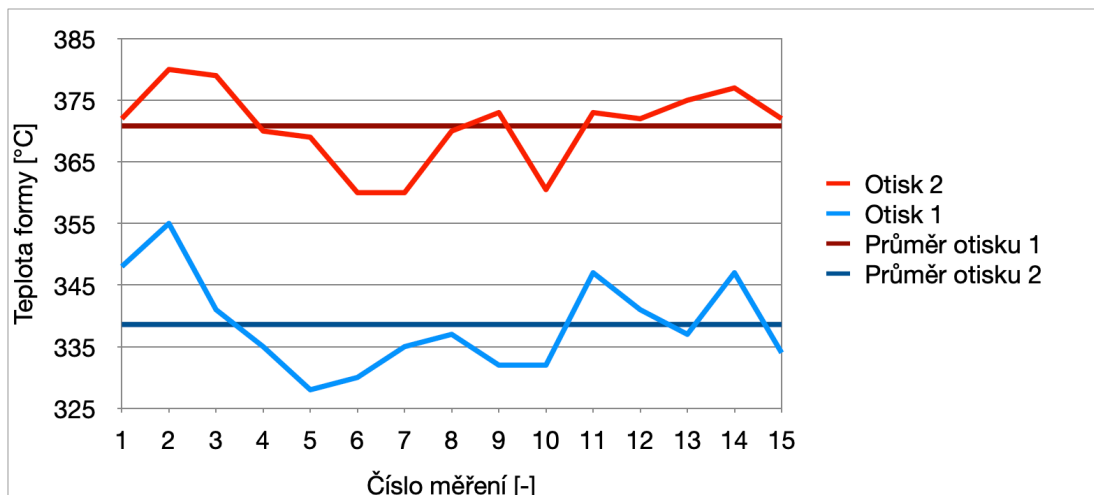
Na snímcích je vidět umocnění rozdílů pomocí vyšší teploty jader. U dílů, které mají nejnižší teplotu formy jsou výrazné chyby na O1 (3/3, 3/4, 3/5), nejvíce však na snímku 3/5, kde teplota formy na O1 dosahovala pouze 328°C. Méně výrazná změna struktury lze vidět i na O2. Lze si všimnout i spojitosti mezi teplotou formy a teplotou jádra, kdy jádro s nižší teplotou a forma s vyšší teplotou zapříčiní pouze nepatrnou změnu struktury (3/1, 3/3).

11.2.2 Podchlazená jádra

Tento experiment nebyl z důvodu bezpečnosti realizován, avšak byl modelován v simulačním softwaru, aby byla znásobena změna a bylo viditelné chování odlitku směrem na druhou stranu teplot.

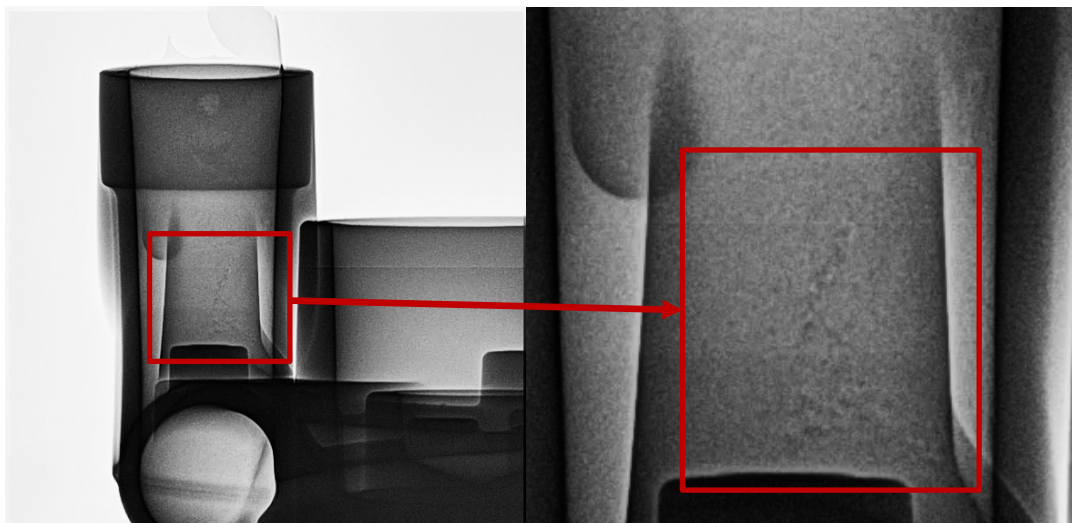
12 Teplota formy

Předpokladem získaným na základě provedených experimentů v předchozí kapitole byla nekonzistentní teplota ve formě. Tuto skutečnost nám indikovala značně zvýšená chybovost pouze otisku 1 (O1) a to ve výrobě s malým počtem výskytu vad. Vzhledem k častému umístění vady v jednom místě hrdla byla teplota formy měřena na bodovém styku této plochy. K měření se používal bezkontaktní teploměr a měřeno bylo ze vzdálenosti ± 50 mm.



Graf 5 - Naměřená teplota formy v celém procesu

Analyzováním naměřených hodnot byla zjištěna stálá variabilita teploty mezi otisky ± 25 °C. Variabilita teplot mezi minimální a maximální teplotou v měřeném místě u O1 byl 27 °C, u O2 byl 20 °C. Mezi nízkými teplotami u O1 a změnou struktury zjištěnou prozařovací kontrolou byla objevena spojitost. Při stabilním temperování formy by tato vada neměla být hlavním vlivem zmetkovitosti. [V1]

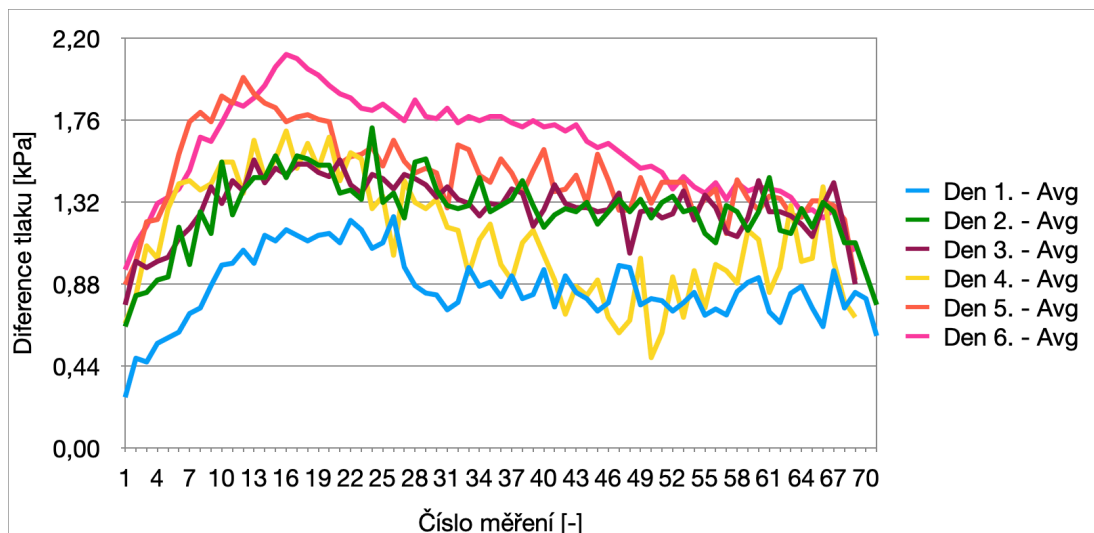


Obrázek 44 - Příklad skenu na skenovací zařízení - změna struktury, vznik vady (Graf 5- č. 9, 332°C, O1), detail

13 Měření diference tlaku chladícího média ve formě

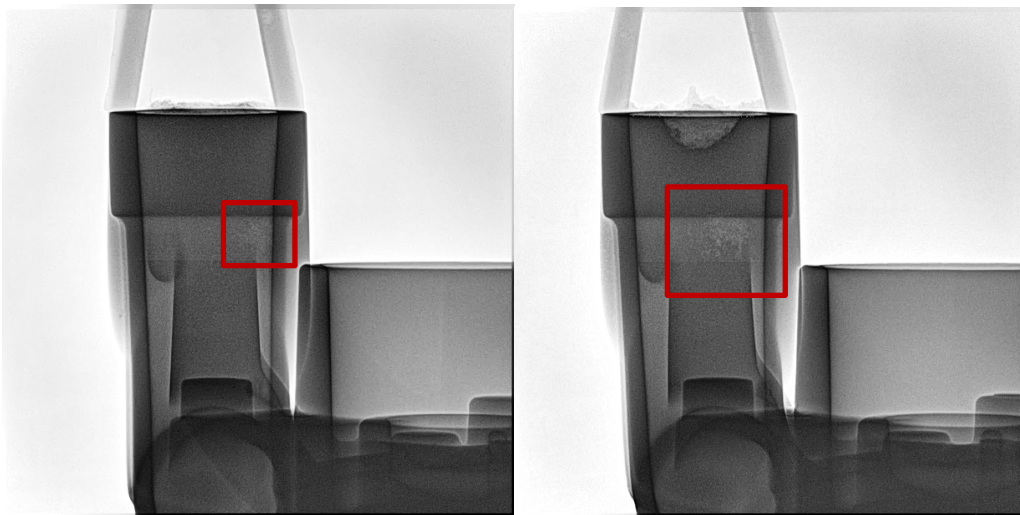
Dalším předpokladem tvorby vad byl vliv chladícího systému. Během prvních měření byla spatřena souvislost mezi délkou odlévací dávky a kvalitou odlitků.

Vzhledem k náchylnosti odlitku na teplotu formy, která byla řešena v kapitole 12. byl chladicí systém zvolen jako další možný vliv. Měření začalo na začátku výrobního procesu jedné dávky.



Graf 6 - Měření diference tlaku v chladícím systému v 6 denním cyklu – stoupající hodnoty jednotlivých cyklů

K měření byl použit tlakoměr od firmy Thermis, který ukazuje variabilitu tlaku v chladícím potrubí ve formě. Z Graf 6–1. den je patrný chladicí proces na začátku celé výrobní dávky, který se s množstvím cyklů posouvá vzhůru. Tato skutečnost se začala projevovat na odlitcích 5. den (červený graf). 5. den se začaly vyskytovat defekty na hrdle odlitku. Simulace nám indikovala teplotní uzly, které se vlivem horší prostupnosti chladícího media zvyšují a je zde nebezpečí tvorby vad. Mezi dnem 3. a 4. byla jednodenní odstávka, kterou může být způsoben pokles tlaku 4. den v druhé části procesu. Další měření provází zvyšování tlaku. Poslední (6.) den je výskyt vad četný.

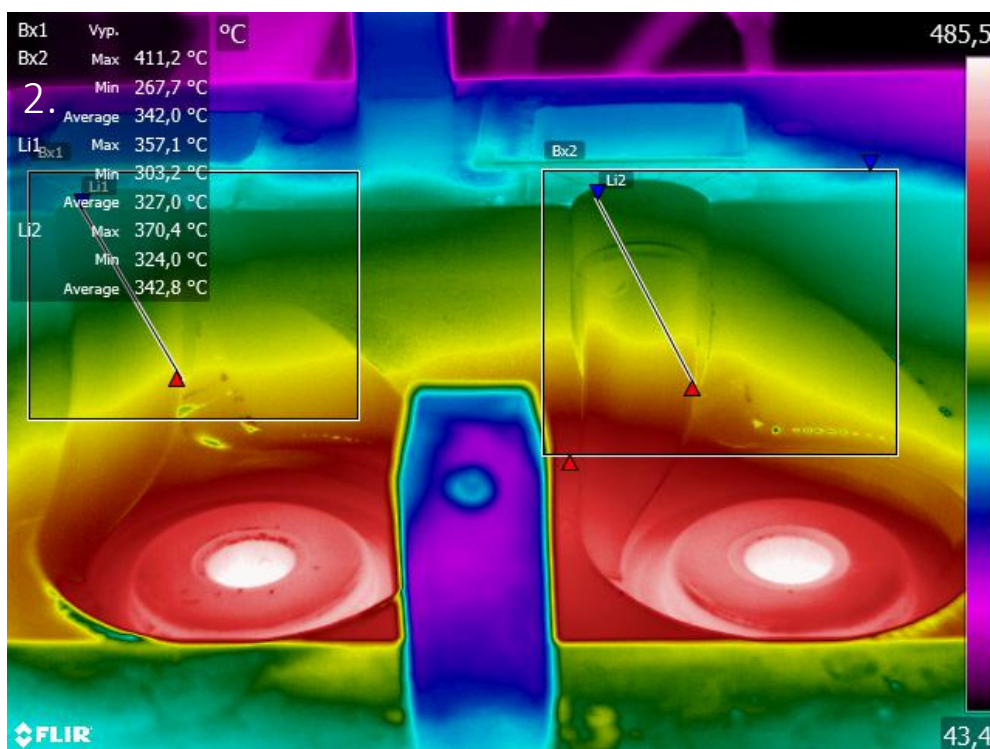
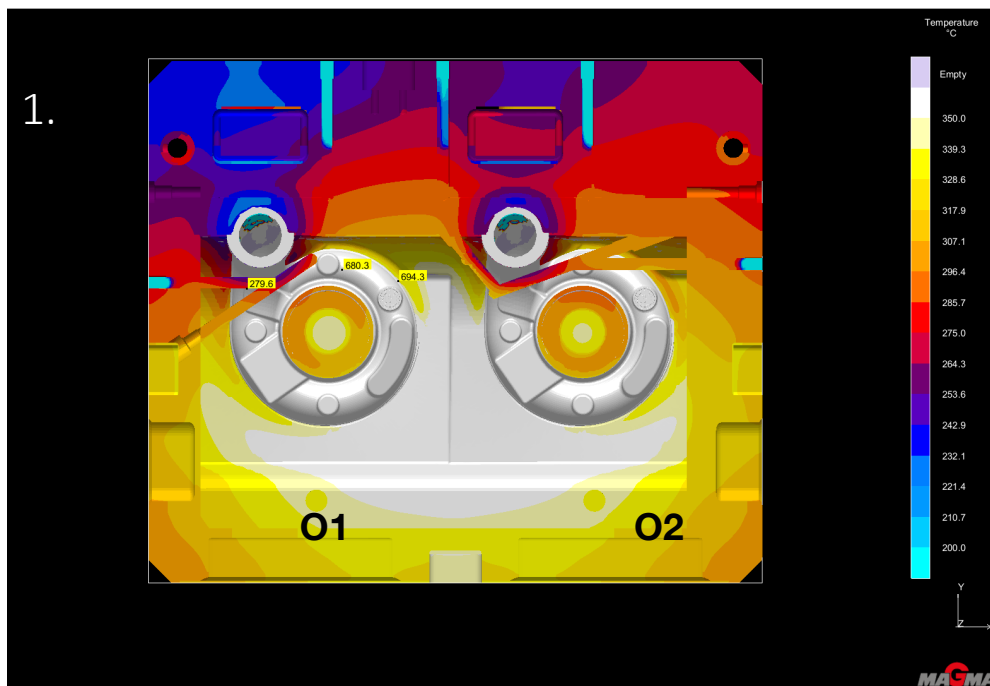


Obrázek 45 - 6. den (O1,O2) – defekty v problematické části

Obrázek 45 zobrazuje součást v posledním dnu před koncem licí dávky. Vada se vyskytuje na obou odlitcích, O1 má vadu výrazně menší. Kvůli nižší teplotě formy má O1 menší tepelný uzel (lze vidět na simulaci v kapitole 14, Obrázek 47), než O2 a při nižší intenzitě ochlazování se rozdíl teploty vyrovná běžné teplotě v okolí O2. V okolí O2 však teplota roste a zvětšuje se tak i tepelný uzel, který působí vady v kritickém místě hrdla odlitku. [V1]

14 Porovnání dat se simulací

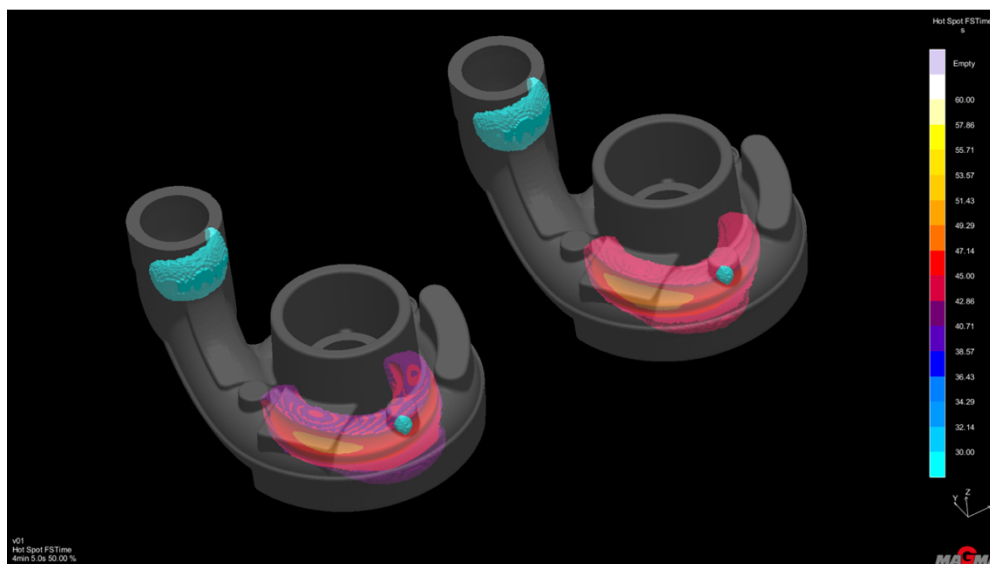
Forma se ochlazuje vlivem teploty okolí a působení chladícího systému formy. Plynový hořák pro ohřev formy je umístěn zhruba uprostřed, v simulaci je tato skutečnost zahrnuta a lze tak sledovat teplotní pole zobrazené na Obrázek 46.



Obrázek 46 – 1. Simulovaná teplota formy ve 100%, studenější forma v oblasti problémové části v oblasti O1, 2. snímek z termokamery ve výrobě

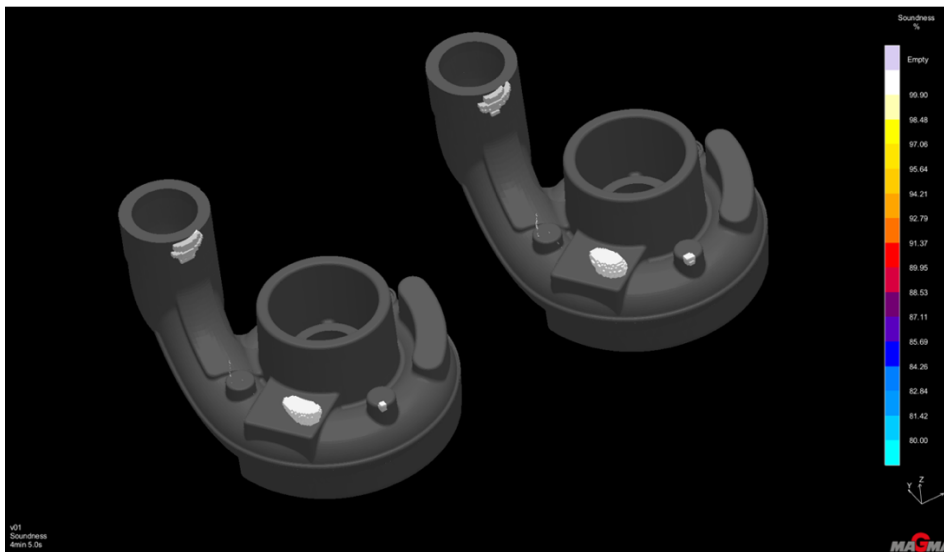
Na Obrázku 46 je možné pozorovat nekonzistentní teplotu formy (rozdíl teplot okolo O1 a O2), v oblasti hrdla součásti, kde je součást nejnáchylnější. Ta je způsobena konstrukcí chladicího systému, který je konstruován dle povahy odlitku v těsnějším

rozložení ve formě a polohou odlitku – problematické místo je blíž u stěny formy, tudíž je v tomto místě nižší teplota. Toto zjištění směřuje na možný problém u jednoho z odlitků, pokud se výrazně změní teploty formy. Lze vidět, že snímek 1. v rozložení teplot koresponduje se snímkem 2. velice přesně. Rozdíl mezi těmito dvěma snímky je v teplotách.



Obrázek 47 - Simulované teplotní uzly během tuhnutí odlitku

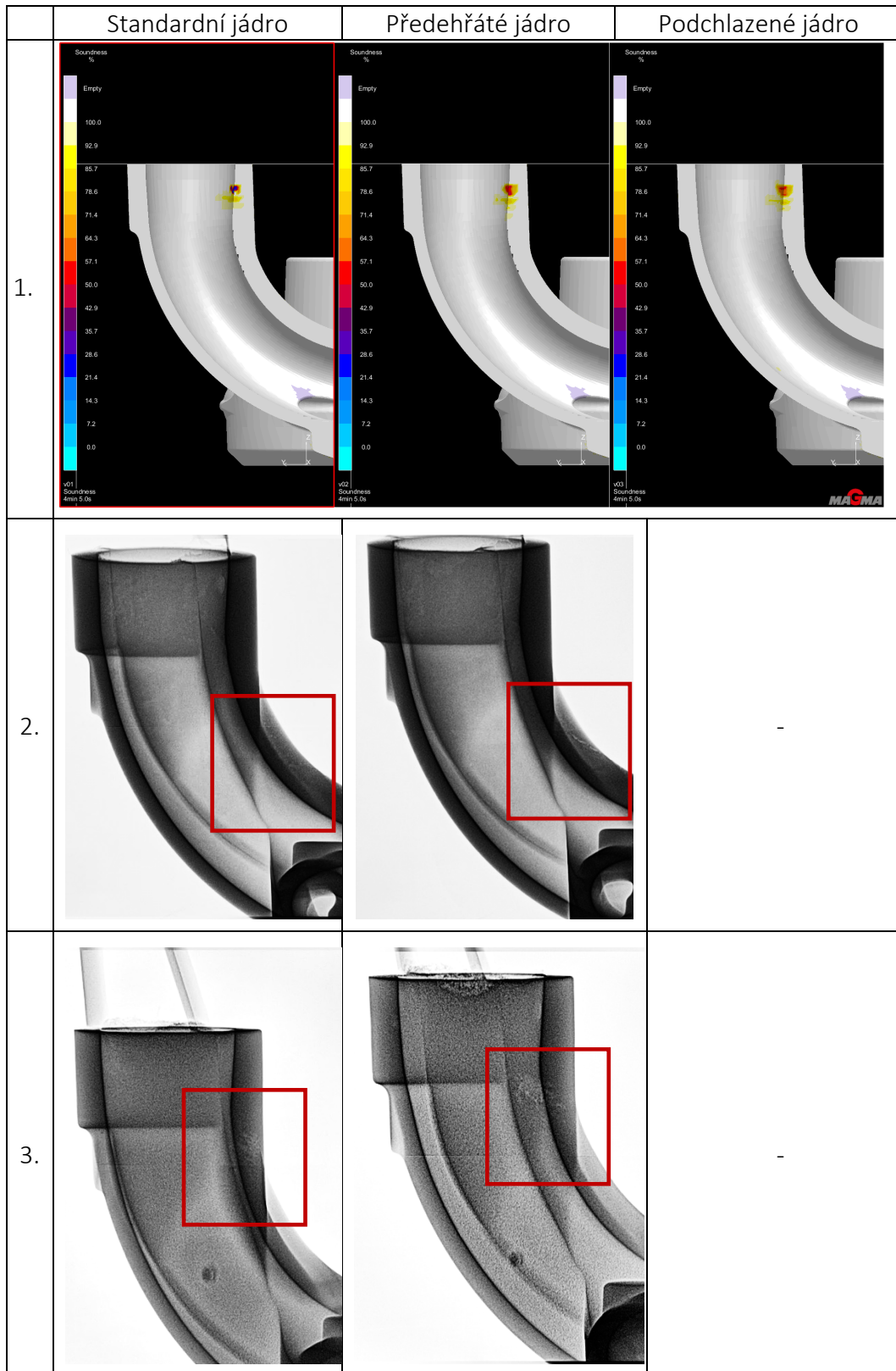
Při tuhnutí odlitku jsou zřetelně vidět tepelné uzly (Obrázek 47), v místech náchylné části dílu. Tento ukazatel detekuje místo, kde se drží teplo, v reálu je zde zesílená stěna odlitku. Okolo tepelného uzlu je veden chladicí kanál a reguluje tak intenzitu tepelného uzlu v místě častého výskytu vad. Tento chladicí systém byl několikrát přepracován kvůli této problematice, až tato verze se osvědčila ve velké části výrobní dávky.



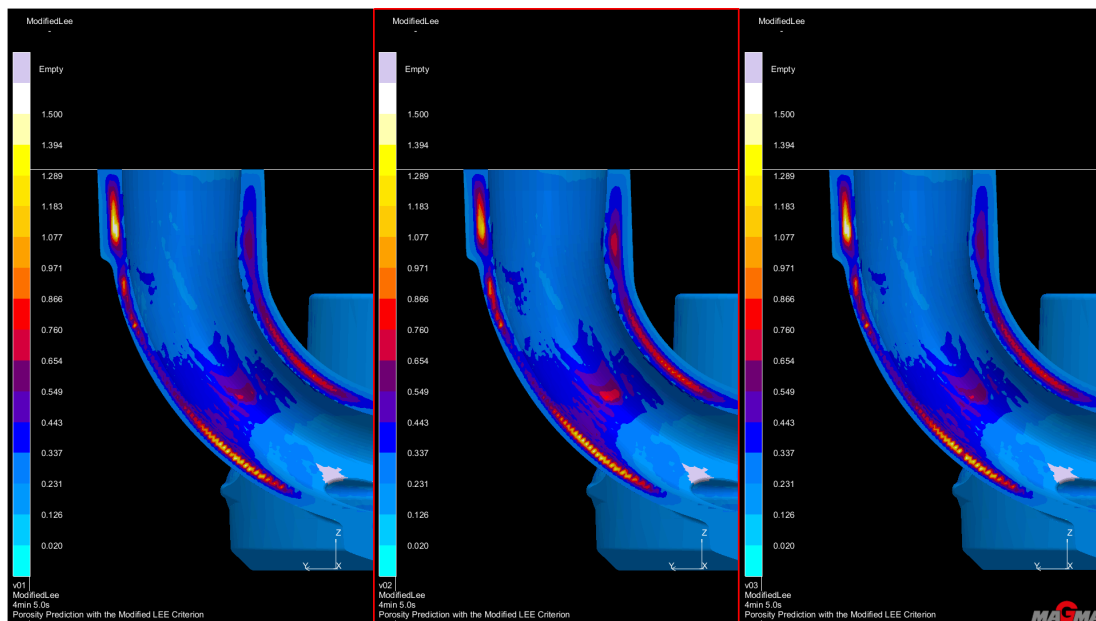
Obrázek 48 - Výskyt defektů

Simulační software MAGMASOFT indikuje staženinu (Obrázek 48) v oblasti s častým výskytem vad, nicméně kritické ložisko v simulaci je na jiném místě, než je vada běžně umístěna (pár mm níže).

Simulace zobrazená v Obrázek 49–1. níže, popsala výskyt defektu ve vnitřní části hrdla, stejně jako v Obrázku 45. V reálné výrobě se defekty v tomto místě téměř nevyskytovaly. Byly vybrány vzorky z testovací skupiny s nejvýraznější změnou struktury (1/4, 3/5) – Obrázek 49–2. a dále předeřáté a neupravené O1 ze zkušební skupiny – Obrázek 49–3. Defekty jsou umístěny jinde, než napovídá simulace. Nejmenší defekt je u standardních jader, což v tomto případě odpovídá. Ve vzorku 1/4 jsou vidět lehké náznaky změny struktury, ve vzorku 1/5 je zřetelná trhлина.



Obrázek 49 - Porovnání struktury odlitků z simulačního softwaru a v reálném procesu (Simulované podchlazení nebylo možné v praxi zkusit, viz kapitola 11.2.2) – 1. simulace, 2. Vzorky 1/4 a 3/5 z testovací sady a 3. O1 ze zkušební sady



Obrázek 50 - Mikroporozita zobrazená v simulaci

Při porovnání Obrázku 49 a 50 tak není patrné žádné řidnutí struktury v zadní části krčku, kde je indikováno v simulaci. Jediné, kde porozita může přispět tvorbě vad je v dolní části krčku.

15 Diskuse

Hlavní motivace pro vznik práce byla problematika dílu turbodmychadlové skříně. Výrobu dílu ovlivňuje mnoho faktorů, díky nimž se ve funkční části odlitku tvoří vady, přesněji porozita a trhliny. Odlitek tak v některých případech neprojde přísnou tlakovou kontrolou. Simulační software v daném případě neodhalil zásadní důvody, proč tomu tak je a proč výsledky simulace se lišily od skutečnosti.

Hlavním cílem práce bylo zjistit, jaké parametry licího procesu způsobují nepřesnost simulace a ověřit, v jaké míře korespondují výsledky simulace s praktickou výrobou. Prvním krokem, který byl udělán, bylo nasimulování procesu pro zmapování možností simulačního softwaru. Simulace byla zvolena taková, jaká se běžně používá ve výrobě a v programu, který mají standardně k dispozici ve firmě Beneš a Lát a.s. Druhým krokem byly zvoleny předpoklady ovlivňující tvorbu vad na odlitku turbodmychadlové skříně, které bylo možné nasimulovat, ale i takové, které simulace nepředpokládala. Byly naplánovány jednotlivé experimenty, jejich metodika a zahájena práce na těchto experimentech.

Simulace byly vytvořeny v programu MAGMASOFT, po metodickém sběru dat ve výrobě. Data byla následně zadána do programu. Byla získána řada údajů, která indikuje možné kritické části odlitku. Dostupná verze MAGMASOFTu má bohužel omezené možnosti zadávání vstupních parametrů, tedy simulace cyklů kopírujících výrobu není do podrobnosti realizovatelná.

Ze začátku práce se předpokládalo, že vadovost výroby ovlivňují jádra. Byl proveden experiment, ve kterém byla zvolena testovací skupina jader, u kterých byly nastaveny různé vstupní podmínky a následně byly odlity. Sada předeřátých jader byla náročnější na koordinaci kvůli zajištění, co nejpodobnějších vstupních podmínek jako byly zadány do simulace. Bohužel je velice náročné a v reálném procesu výroby nemožné hlídat přesné vstupní parametry, pro korelaci se simulací byl kladen důraz na nastavení co nejpřesnějších podmínek. Bylo zjištěno, že předeřátá jádra nejsou vhodná do této výroby a mají negativní vliv na odlévanou součást, ale umocnil se vliv nízké teploty na výskyt vad – největší vady byly zaznamenány v době, kdy teplota

formy byla nejnižší. Při porovnání standardních jader s vysoušenými byl zjištěn rozdíl ve tvaru vady – vysoušená jádra způsobují vadu více rozsáhlou, standardní mají vadu více centralizovanou, zasahuje do menší oblasti. Na základě experimentu byl pozorován vliv působící náhodný výskyt vad ve výrobě.

Z výsledků metalografie vznikl předpoklad, že trhlina se vytvoří dvěma způsoby a to: rozdílným časem tuhnutí taveniny u odlitku a rozdílnou rychlostí ochlazování

Dalším předpokladem pro vznik vady na odlitku zjištěným díky prvnímu experimentu a metalografii byla proměnlivost teploty formy (kapitola 12). Vzhledem ke konstrukci je na otisku 1 (O1) ve výrobě až o 50 stupňů méně než na otisku 2 (O2) (Graf 5), dále byla naměřena i skoková variabilita teploty na jednotlivých otiscích. Tento jev je to způsoben vlivem konstrukce chlazení. To má u O1 menší rozestupy mezi jednotlivými kanály, tudíž je okolo větší koncentrace odvodu tepla (Obrázek 28). Při poklesu teploty ve formě se vada tvoří hlavně na O1, v některých případech byla problematická O2.

Na základě pozorování výroby a pečlivého prostudování technické dokumentace a zmapování prvního předpokladu nerovnoměrné teploty formy byly vyhodnoceny jako další předpoklady změny v chladícím systému. Do softwaru MAGMASOFT se zadávají jako parametry chlazení – teplota, průtok za hodinu a čas (Obrázek 18), po který je chlazení aktivní. V reálném procesu je ale proudění kapaliny ovlivňováno usazeninami v potrubí a není konstantní – pulzuje, jak lze vidět na Graf 6. Pomocí zařízení, které měří rozdíly tlaků na začátku a na konci systému se podařilo zmapovat postupné ucpávání potrubí. Měření probíhalo 6 dní, vady se začaly projevovaly 5. den. Vady způsobené nedostatečným chlazením byly nejrozsáhlejší a projevovaly se nejvíce na O2. Vzhledem k nerovnoměrné teplotě formy bylo O1 méně náchylné, protože při snížení odvodu tepla se teplota v okolí O1 vyrovnala na úroveň O2, ale teplota v okolí O2 rostla.

16 Závěr

Diplomová práce se zabývala zjišťováním ovlivňujících parametrů lícího procesu způsobují nepřesnost simulace a ověřením, v jaké míře výsledky simulace korespondují s praktickou výrobou.

V práci byla zkoumána problematika přesnosti simulace, přičemž výsledky simulace byly ověřovány na konkrétním dílu turbodmychadlové skříně v reálném procesu výroby.

Začátek práce je věnován teoretické rešerši, která rozebírá problematiku nízkotlakého lití, hliníkové slitiny, výroby jader, simulačního softwaru a dalších, jako podklad pro experimenty v praktické části. Dílčí cíl práce byl tímto splněn.

Na základě metalografické analýzy bylo zjištěno, že trhlina odlitku byla způsobena dvěma vlivy, a to rozdílným časem tuhnutí taveniny u odlitku a rozdílnou rychlostí ochlazování v kritickém místě dílu. Výsledek metalografie tak poukázal, že jedním z důvodů nepřesných výsledků simulace jsou nezohledněné vlivy teploty formy. Dílčí cíl práce byl tímto splněn.

Dalším dílčím cílem bylo navrhnout a provést experimenty ověřující předpokládané ovlivňující faktory. Nakonec provést numerickou simulaci a její výsledky ověřit na konkrétním odlitku. Dílčí cíl byl splněn.

Na základě provedených experimentů lze vyvodit tyto závěry:

- Simulace spolehlivě dokáže upozornit na riziková místa v lícím procesu
- Simulace nedokáže upozornit na konkrétní vlivy během lití, ale spolehlivě upozorní na přibližné místo rizika výskytu vady
- Nedokáže spolehlivě určit velikost vady, přesné umístění a příčinu jejího vzniku
- Jedním z faktorů, které simulace nedokáže predikovat je proměnlivý (skokový) vliv teploty formy v čase, způsobený nehomogenním prohříváním formy
- Simulační software nedokáže zohlednit vliv prohřívání formy v čase způsobené usazováním sedimentů v chladících kanálech

Ze zvolených předpokladů se jako nejvíce ovlivňující faktor pro vznik vad odlitku ukázal chladicí systém. Hlavně tedy prostupnost chladících kanálů, ale také konstrukce chladicího systému formy a její vliv na nehomogenitu teploty ve formě. Paradoxně, oba předpoklady (prostupnost chladících kanálů, teplota formy) ovlivňují formu negativně v jiných úsecích výroby a vzájemně zpomalují své negativní efekty. Vliv teploty a vlhkosti jader se nepotvrdil jako jev, který by v této konkrétní výrobě problematický, ani jev, který by zlepšil kvalitu odlitků. Se změnou vlhkosti a teploty se kvalita odlitků ještě zhoršila. Pro jiné odlitky by mohly být tyto poznatky směrodatné a způsobovat nepřesnosti ve výrobě.

Všechny cíle práce byly splněny.

Citovaná literatura autora:

- [V1] VÝLETOVÁ, Karolína, KUBELKOVÁ, Irena. *Influence of parameters and conditions of the production process of aluminum alloy casting on the accuracy of simulation results*. In: Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2021. Kouty, s. 8.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠTIPL, Pavel. *Technologie lití vysokotlakých odlitků a vlivy působící na jejich kvalitu*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85172. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír ROUČKA, CSc.
- [2] HAVEL, Jiří. *TLAKOVĚ LITÉ ODLITKY Z AL SLITIN PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL*. Brno, 2010. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28313. VUT v Brně.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, Dana prof. a Richard PASTIRČÁK. *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. 1. Žilina: EDIS - Vydavateľské centrum ŽU, 2018, 167 s. ISBN 978-80-554-1463-8.
- [4] VÁCLAV, Štrobach. *Vliv teplotních režimů formy na jakost vysokotlakých odlitků*. Liberec, 2011. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [5] *Hliník, chemický prvek Al, popis a vlastnosti* [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [6] NOVÁKOVÁ, Iva. *Technologie I.: Přednáška 6*. Liberec. Technická univerzita v Liberci.
- [7] STUNOVÁ, Barbora Bryksí. *Metalurgie slitin Al*. Praha. Dostupné také z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/129/Slitiny-Al.pdf>. Učební text.

- [8] ROLEČEK, Jakub. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53419. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Juliš Ph.D.
- [9] JANOŠŤÁK, Jan. *Vliv modifikace a očkování na strukturu a mechanické vlastnosti slitin hliníku*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86092. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka Ph.D.
- [10] LAŠTOVICA, Petr. *Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství*. Liberec, 2012. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Markéta Říhová.
- [11] SLAVÍČEK, Jiří. *HLINÍK A JEHO SLITINY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU*. Brno, 2011. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38353. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [12] BENEŠ, Libor. *Slitiny hliníku*. Dostupné také z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/PDF_01-Slitiny%20Al.pdf
- [13] SLANINA, Roman. *Simulační výpočty nízkotlakého lití tělesa spojky ze slitiny Al-Si*. Liberec, 2016. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/20632/DP+-+Roman+Slanina.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jiří Machuta, Ph.D.
- [14] HAŠKOVÁ, Irena. *Cold-box jádra aplikovaná na technologii nízkotlakého lití*. Praha, 2011. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Barbora Bryksí Stunová.

- [15] BOUBÍN, Jan. *Hodnocení odolnosti ochranného nástřiku kovové formy při nízkotlakém lití*. Liberec, 2020. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/158263/dimlovova_prace_2020_Jan_Boubin_stag.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [16] HERMAN, Aleš. *Základy Technologie I.: Slévání* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Dostupné také z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/145/ZTI-Slevani-2.pdf>
- [17] LANGNAU, Leslie, SOLINA, Martin, FERNANDEZ, Pablo. *Five Steps to Optimize Casting and Eliminate Defects* [online]. 2016, s. 43 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/DesignWorldOnline/five-steps-to-optimize-casting-and-eliminate-defects>
- [18] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [19] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [20] ZVÁROVÁ, Markéta. *Analýza kvality vstupního materiálu*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, Ph.D.
- [21] KATRŇÁK, Jiří. *Výroba pískových forem a jader pro odlévání*. Brno, 2016. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126406. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Vítězslav Pernica.
- [22] OLIVA, Ai. *Diagram Al-Mg*. ResearchGate [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Ai-Oliva/publication/258388340/figure/fig1/AS:329915514802182@1455669396559/Phase-diagram-of-the-bulk-Al-Cu-alloy.png>

- [23] HRUBOŇ, Jiří. *Výroba odlitku metodou odstředivého lití*. 2011. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/45860880-Vyroba-odlitku-metodou-odstrediveho-liti-jiri-hrubon.html>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Josef Hrdina.
- [24] BOČEK, Vítězslav. *Možnost použití filtrace u technologie vytrvatelného modelu*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [25] BECHNÝ, Lubomír, VRÁBEL, Stanislav. *Filtrácia materiálov na odliatky*. EDIS, 2000, 209 s. ISBN 80-7100-672-6. SK.
- [26] ENAC-ALSi5Cu3 (ENAC-45400). *European Steel and Alloy Grades/Numbers SteelNumber*[online]. [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1242
- [27] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [28] TOMEK, Ladislav, Ivo STACHOVEC a Jana TOMKOVÁ. *Vliv interakcí kov-písková forma na povrchovou vrstvu odlitků*. Brno, 38 s. [Http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-sylabus.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/formovaci-materialy-a-ekologie/studijni-sylabus.pdf).
- [29] KŘEČEK, Michal. *Racionalizace výroby odlitku turbodmyhadla*. Praha, 2016. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/212420094-Ceske-vysoke-uceni-technicke-v-praze-diplomova-prace.html>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman, Ph.D.
- [30] SVOBODOVÁ, Jaroslava. *Porovnání slitin dvou odlitků – turbo*. Vědeckotechnický park, FSI Univerzita J. E. Purkyně. Ústí nad Labem, 2021, 9 s. Objednávka, soukromé.
- [31] KYSELKA, Štefan. BENEŠ A LÁT A.S. *Modely formy a součástí*.

- [32] JELÍNEK, David. *Racionalizace výroby odlitku tělesa koníku*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Aleš Herman Ph.D.
- [33] GE INSPECTION TECHNOLOGIES. Seifert x|cube series: *Versatile 2D and 3D X-ray system built for speed*. Germany.
- [34] GIFOS. *Vstřelovací stroj na výrobu jader metodou COLD BOX: VSTŘELOVACÍ STROJ VGi 12.7 - Návod*. Brno.
- [35] STUPKA, René. *Sestava měřicího bodu: THERMIS*. Brno.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - diagram Al a přísady, rozdělení [11]	8
Obrázek 2 - Diagram Al-Si – a) podeutektické, b) eutektické c) nadeutektické – charakteristika struktur [12]	8
Obrázek 3 - Mikrostruktura slitin Al-Si – b) podeutektická, c) eutektická, d) nadeutektické [8]	9
Obrázek 4 - diagram Al-Cu [1]	10
Obrázek 5 - diagram Al-Mg [22]	11
Obrázek 6 - Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a jeho slitinách [18]	12
Obrázek 7 - princip nízkotlakého lití, směr práce	14
Obrázek 8 - popis postupu odlévání (1. forma se uzavírá, 2. tlak začíná působit na taveninu a stoupá trubicí vzhůru do formy, 3. odlitek ve formě tuhne, 4. konečný odlitek k odběru) [17]	15
Obrázek 9 - Popis slévárenské kovové formy pro nízkotlaké lití [13]	18
Obrázek 10 - Diagram výrobních metod pro písková jádra [21]	20
Obrázek 11 - Schéma zařízení pro nízkotlaké lití se znázorněným umístěním filtru [23]	22
Obrázek 12 - Kovový filtr používaný ve slévárně Beneš a Lát a.s.	23
Obrázek 13 - Uživatelské prostředí softwaru MAGMA	25
Obrázek 14 - Seifert x cube series nedestruktivní testování odlitků	27
Obrázek 15 - Vstřelovací stroj od značky GIFOS	28
Obrázek 16 - Měřič difference tlaku od firmy THERMIS (nahore) a propojka pro měření (dole)	29
Obrázek 17 - Nízkotlaký licí stroj 2. generace	30

Obrázek 18 - Nastavené parametry simulace - I. standardní, II. s předeřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem	31
Obrázek 19 - Tlaková křivka nastavená v simulačním softwaru.....	32
Obrázek 20 - Řez v simulačním programu u průběhu plnění 100% - u II. Lze vidět teplotní rozdíl.....	32
Obrázek 21 - Simulace průběhu plnění na O1: I. se standardním jádrem, II. s předeřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem.....	33
Obrázek 22 – Simulace výskytu zahlceného vzduchu: I. se standardním jádrem, II. s předeřátým jádrem, III. s podchlazeným jádrem	34
Obrázek 23 - Výskyt přetlaku vzduchu.....	34
Obrázek 24 - Teplota jádra ve formě.....	35
Obrázek 25 - Model turbodmychadlové skříně.....	36
Obrázek 26 - Znázornění licí formy, porovnání formy v modelu a reálné výrobě [31]	38
Obrázek 27 - Porovnání dolní části formy s modelem [31].....	39
Obrázek 28 – Schéma chlazení formy [31]	39
Obrázek 29 - Jádra Cold-Box.....	40
Obrázek 30 - Nátěr na jádrech.....	41
Obrázek 31 - Specifikace umístění vady (I. NOK - díl s vadou - červená barva, II. OK - díl bez vady - modrá barva) [30].....	42
Obrázek 32 - Pozorovaná vada (levá strana), mikrostruktura pozorované vady 50x (pravá strana [30]); dendritická pórovitost: pouze NOK.....	43
Obrázek 33 - Mikrostruktura 500x; tvar α + Si: NOK - sférický, OK - destička; intermetalická fáze: NOK - piny, OK - pouze různé tvary [30]	44
Obrázek 34 - Umístění předeřátých jader v peci.....	45
Obrázek 35 - Odlévací proces standardních jader.....	45

Obrázek 36 - Standardní nepředehřátá jádra, I. O1 – č. 4, II. O2 – č. 2 (Tabulka 6) - ve výrobě se projevují vady	46
Obrázek 37 - Předehřátá jádra, I. O1, II. O2, rozsáhlá vada v oblasti hrdla	47
Obrázek 38 - Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (teploty dle grafu 1) – standardní jádra	51
Obrázek 39 - Vysušená jádra při chladnutí	52
Obrázek 40 - Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (teploty dle grafu 2) – vysušená jádra	54
Obrázek 41 - Porovnání podobných podmínek u vysušeného jádra (1. 2/5, 334 °C) a standardního jádra (2. 1/2, 335°C)	55
Obrázek 42 - Umístění jader v předehřívací peci	56
Obrázek 43 – Zobrazení výsledků z prozařovací zkoušky (dle grafu 3) – předehřátá jádra	59
Obrázek 44 - Příklad skenu na skenovacím zařízení - změna struktury, vznik vady (Graf 5- č. 9, 332°C, O1), detail	60
Obrázek 45 - 6. den (O1,O2) – defekty v problematické části	62
Obrázek 46 – 1. Simulovaná teplota formy ve 100%, studenější forma v oblasti problémové části v oblasti O1, 2. snímek z termokamery ve výrobě	63
Obrázek 47 - Simulované teplotní uzly během tuhnutí odlitku	64
Obrázek 48 - Výskyt defektů	65
Obrázek 49 - Porovnání struktury odlitků z simulačního softwaru a v reálném procesu (Simulované podchlazení nebylo možné v praxi zkusit, viz kapitola 11.2.2) – 1. simulace, 2. Vzorky 1/4 a 3/5 z testovací sady a 3. O1 ze zkušební sady	66
Obrázek 50 - Mikroporozita zobrazená v simulaci	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Čistý hliník.....	7
Tabulka 2 - Popis licího procesu.....	16
Tabulka 3 - Technické parametry vstřelovacího stroje [34]	28
Tabulka 4 - Chemické složení dle normy [26]	37
Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti dle [29]	37
Tabulka 6 - Vstupní parametry.....	41
Tabulka 7 - Okolní podmínky pro metalografii	43
Tabulka 8 - Parametry zkušební sady (L = O1, P = O2)	46
Tabulka 9 - Chemické složení slitiny z udržovací pece u druhé zkušební sady	48

Seznam grafů

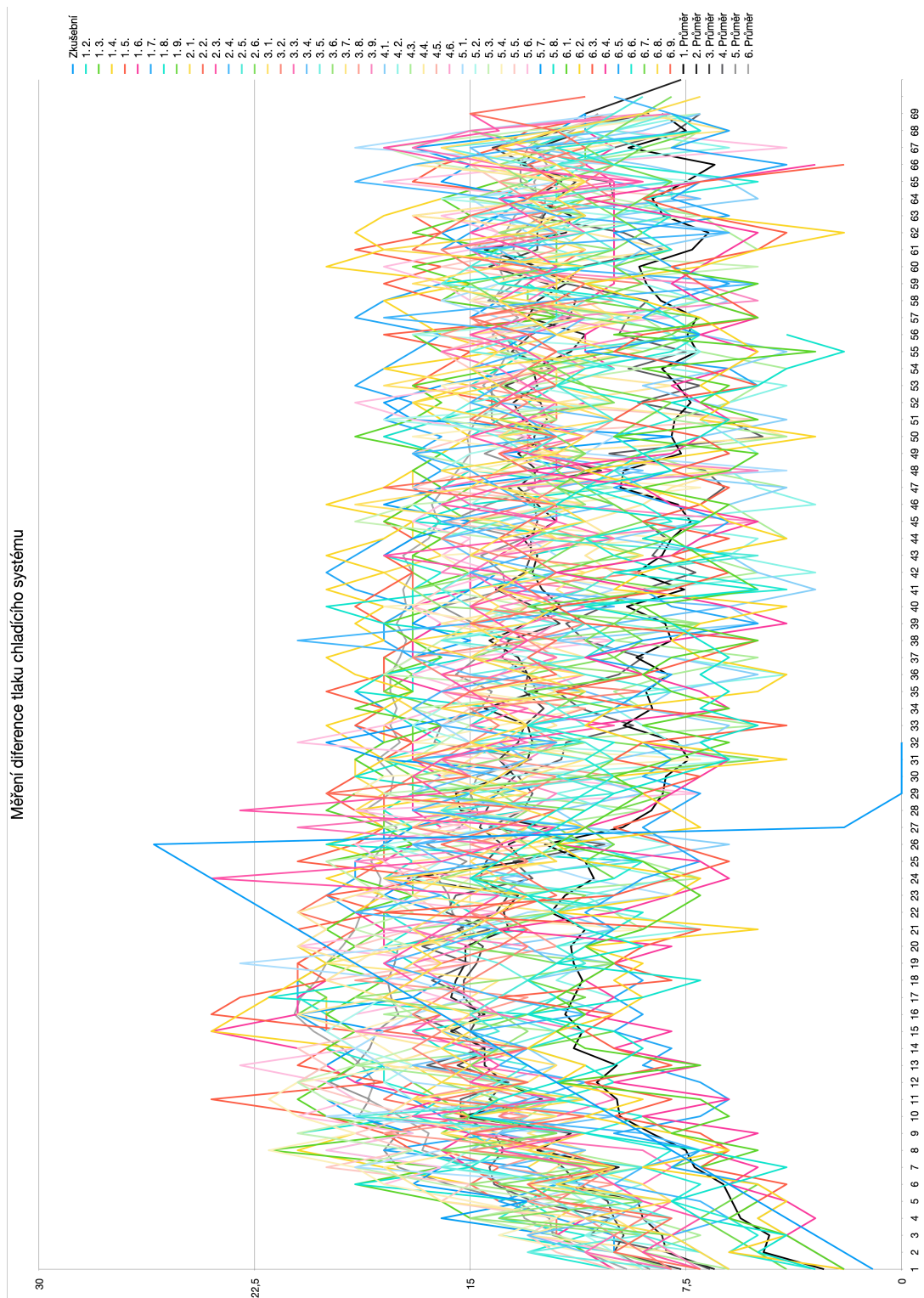
Graf 1 - Teplota formy u standardní sady jader (červená – O2, modrá – O1)	49
Graf 2 - Teplota formy u vysoušených jader	52
Graf 3 - Vstupní teploty předehřátých jader	56
Graf 4 - Teplota formy u předehřáté sady jader (červená – O2, modrá – O1)	57
Graf 5 - Naměřená teplota formy v celém procesu	60
Graf 6 - Měření diference tlaku v chladícím systému v 6 denním cyklu – stoupající hodnoty jednotlivých cyklů.....	61

Seznam příloh

Příloha 1. Graf měření difference tlaků.....	81
Příloha 2. Parametry vstřelovacího stroje na výrobu jader Cold-Box.....	82
Příloha 3. Technická specifikace prozařovacího stroje Seifert x cube.....	83
Příloha 4. Testovací skupiny jader.....	84
Příloha 5. Udržovací pec.....	84
Příloha 6. Nízkotlaká licí pec 2. generace bez nasazené formy.....	85

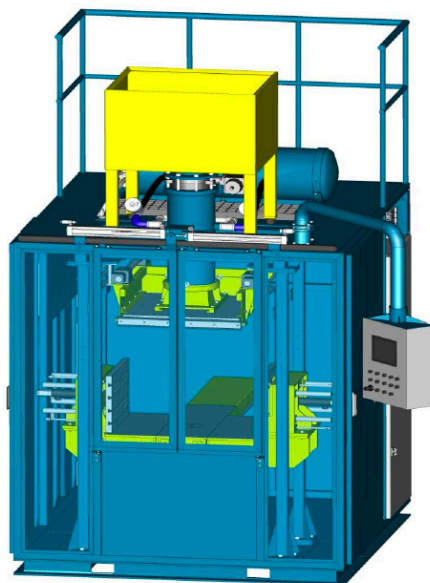
Přílohy

Příloha 1. Graf měření difference tlaků



VSTŘELOVACÍ STROJ

VGi 12.7



Základní technická data		
Ukazatel	Jednotka	Hodnota
Elektrická instalace	-	400/230V/50Hz/PE/N
Tlak vzduchu	MPa	0-6
Hodnota hluku	dB(A)	do 70
Vnější rozměr stroje š x h x v	mm	1700x1800x2800
Maximální šířka jaderníku	mm	700
Hloubka jaderníku	mm	600
Výška jaderníku	mm	600
Rozměr vstřelovací hlavy	mm	600x500
Vytvrzovací desky	mm	600x600
Objem jádra	dm ³	16
Max. zdvih stolu	mm	350
Hmotnost	kg	2250
Příkon /s integrovaným vyvíječem	kW	0,5/2,5

Příloha 3. Technická specifikace prozařovacího stroje Seifert x|cube

General specifications.

Seifert x cube	Compact			XL	
Energy (max.)	160 kV	225 kV	320 kV	160 kV	225 kV
Max. sample size (Ø x height in mm)	600 x 900 **	600 x 900 **	600 x 900 **	800 x 1500**	800 x 1500**
Max. loading part height (mm)	1150	1150	930	1585	1585
Max. sample weight	150 kg *	150 kg *	300 kg *	100 kg *	100 kg *
Cabinet dimensions (L x W x H in mm)	2650 x 2155 x 2360	2650 x 2155 x 2360	2540 x 2230 x 2400	2850 x 2155 x 2885	2850 x 2155 x 2885
Cabinet weight approx.	5350 kg	5350 kg	10.500 kg	6600 kg	6600 kg
Control panel weight approx.	350 kg				
Manipulation Travel					
Max. horizontal motion across the X-ray beam	650 mm		660 mm	850 mm	
Max. external loading/unloading position	90 mm		150 mm	90 mm	
Max. horizontal motion magnification axis	850 mm		620 mm	1050 mm	
Focus detector distance (FDD), depends on detector tyape	800-1000 mm		800-1150 mm	1000 - 1200 mm	
Max. vertical motion	900 mm		950 mm	1500 mm	
Max. tilt of the C arm	± 45°				
Max. sample rotation	n x 360°				
2D software	Integrated image optimization system VISTAPLUS supports live image display and real-time capabilities with dedicated detectors				
System control	x touch panel operation allows for fast and easy set-up of inspection routines by teach-and-learn procedures				
Control / Drives	Hardware PLC for PC independent/Fanuc servo drives				
Detector options	Selection of various digital flat panel detectors, including temperature-stabilized highly dynamic GE DXR 250RT digital detector for real-time inspection and very fast CT scans, the GE DXR 500 L detector for particularly high-resolution applications, and the DXR 250 for a large active area				
FlashFilters™ option	Proprietary live image optimization technology for easier visual defect detection in castings or weldings				
Tube options	Various mini and macro focuses, as well as various high-power X-ray tubes				
Software options	EZ Compare with ASTM reference image catalogue, semi-ADR for semi automatic defect recognition (pass/fail final decision by operator), Rhythm Export Module with DICONDE file export to GE Rhythm Platform, and automatic ASTM image quality evaluation				
Computed tomography add-on	CT package contains all the required hardware and software components for combined 2D/3D operation with GE detectors				
CT scan range	Max. 160 mm Ø x 160 mm height at DXR 250RT 8"x8" detector				
Min. voxel size	Up to 100 µm, depending on the sample size and detector pixel pitch				
Connection values / capacity	3N PE 400/230V 50/60 Hz, 35 A (160+225 kV), 50 A (320 kV), TN-S or TN-CS network / up to approx. 16 kVA***				
Earthing	Separate earthing for X-ray device and high-voltage generator (< 2 Ω) with at least 6 mm²				
Means of transport	Complete X-ray protection cabinet with fork lift truck / Control panel (on pallet) with fork lift truck				
Ambient conditions (in accordance with IEC 60 601-1)	Ambient temperature +10° C to +40° C, air pressure 700 hPa to 1060 hPa humidity during operation 25 to 85% non-condensing				
Compliant with national and international standards	ISO 9001; VDE 0100; UVV; DIN EN 60204 (VDE 0113); VBG; German Radiation Control Act (RöV) of 1987 (with amendments in the current version); DIN EN ISO 13849-1; CFR 1020.40; DIN 54113-1				
Radiation protection	The radiation safety cabinet is a full protective installation without type approval according to the German RöV. French NFC 74 100 and the US Performance Standard 21 CFR Subchapter J are coming soon. For operation, other official licenses may be necessary.				

Příloha 4. Testovací skupiny jader



Příloha 5. Udržovací pec



Příloha 6. Nízkotlaká lící pec 2. generace bez nasazené formy

