

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**EDUARD
DVOŘÁK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Eduard** Osobní číslo: **408871**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Řešení odplynění jader u 3D tištěných forem

Název diplomové práce anglicky:

The solving of core degassing by 3D printed moulds

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. 3D tisk slévarenských forem (metody, systémy atd.)
3. Vliv plynů na kvalitu odlitků (popis různých systémů forem a jejich reakce s taveninou - co vše může způsobit)
4. Písková jádra - srovnání klasická forma vs. tištěná forma
5. Provedení experimentu - délka a tvar známky (odlité vs. simulace) - vyhodnocení metalografie
6. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.01.2020**

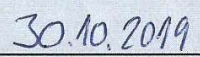

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

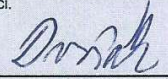

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci s názvem „Řešení odplynění jader u 3D tištěných forem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Hermana Ph.D. s využitím uvedené literatury a podkladů.

V Dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu své práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, cenné rady a veškeré praktické připomínky poskytnuté při konzultacích. Obzvláště pak děkuji za jeho trpělivost při vedení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy Modelárna LIAZ spol. s r. o. za vytištění a odlití pískové formy a za poskytnuté informace a podklady k této práci.

ABSTRAKT:

Tato diplomová práce se zabývá problematikou výroby slévárenských forem a jader za pomoci aditivních technologií. Konkrétně se zaměřuje na technologii 3D tisku pískových forem a jader pro odlévání kovů. Nejprve jsou v práci uvedeny různé metody 3D tisku pískových forem, dále pak různé systémy tiskáren od největších výrobců. V experimentální části byla navržena metoda ke zjištění závislosti vývoje plynů u 3D tištěných jader a proveden pokus o návrh řešení odvodu plynů z formy. K vyhodnocení vývoje a množství plynů v odlitku bylo použito metod metalografického zkoumání.

KLÍČOVÁ SLOVA:

aditivní technologie, 3D tisk, pískové formy a jádra, slévárství

ABSTRACT:

This diploma thesis deals with the manufacture of foundry moulds and cores using additive technologies. The 3D sand printing is a technology that is primarily used for manufacturing sand moulds and cores for metal casting. The thesis defines the different ways of 3D sand printing as well as different printer systems from the largest manufacturers. In the experimental part was proposed a method to determine the dependence of gas evolution in 3D printing cores and try to propose a solution for the removal of gases from the mold. Metallographic examination methods were used to evaluate the evolution and quantity of gases in the casting.

KEYWORDS:

additive technology, 3D sand print, sand mould and core, casting

Obsah

1	Úvod	1
2	3D tisk slévárenských forem	2
2.1	Rapid Prototyping	2
2.2	Výrobní proces technologie Rapid Prototyping.....	3
1.1.1	Preprocessing	3
1.1.2	Processing	4
1.1.3	Postprocessing	4
2.3	Metody 3D tisku slévárenských forem	4
1.1.4	Historie 3D tisku pískových forem.....	5
1.1.5	Písková 3D tiskárna	5
1.1.6	Postup 3D tisku.....	6
2.4	Laser sintering of silica sand	6
2.5	Binder-Jetting.....	7
1.1.7	ExOne	8
2.6	Porovnání tiskáren ExOne	9
2.6.1	Exerial.....	9
2.6.2	Tiskárna S-MAX.....	10
2.6.3	Tiskárna S-Print	11
2.7	Pískové materiály a pojiva.....	12
2.8	PDB (Phenol Direct Binding).....	12
2.9	Tiskárny voxelJet®.....	13
2.9.1	Tiskárna VX 4000.....	13
2.9.2	Tiskárna VX 1000.....	14
2.9.3	Tiskárna VX 200.....	15
2.10	RAM systém Viridis3D	16
2.11	Technologie ICP	18
2.11.1	Společnost Loramendi	18

2.11.2	Tiskárna voxelJet® VJET X 3D	19
2.12	Srovnání tiskáren	19
3	Vliv plynů na kvalitu odlitku	20
3.1	Vznik a pronikání plynů a par do taveniny	20
3.2	Pojiva formovacích a jádrových směsí	21
3.2.1	Pojiva I. generace	22
3.2.2	Pojiva II. generace	22
3.2.3	Pojiva III. generace	25
3.2.4	Pojiva IV. generace	26
3.3	Pojivové systémy	26
3.3.1	Furanové pojivové systémy	26
3.3.2	Fenolové pojivové systémy	26
3.3.3	Pojivový systém na bázi silikátu	26
4	Písková jádra – srovnání klasických vs. tištěných forem.....	28
5	Experimentální část	29
5.1	Návrh modelu	30
5.2	Simulace tuhnutí NovaFlow	32
5.3	Simulace Magmasoft	38
6	Tisk a odlití formy.....	45
6.1	Odlitek 1	49
6.1.1	Vzorek 4A	51
6.1.2	Vzorek 2A	53
6.1.3	Nálitek číslo 3	55
6.1.4	Nálitek č. 4	56
6.2	Odlitek 2	58
6.2.1	Vzorek 2A	60
6.2.2	Vzorek 4A	62
7	Porovnání Simulací a odlitku.....	64

7.1 Nálitek 3.....	64
8 Zhodnocení a závěr	66
9 Použitá literatura	69
10 Seznam obrázků.....	72
11 Přílohy.....	76
11.1 Příloha 1	76
11.2 Příloha 2	76
11.3 Příloha 3	76

1 Úvod

Výroba netrvalých pískových forem a jader je nedílnou součástí slévárenského průmyslu. Jednou z nejstarších metod výroby netrvalých forem a jader je pýchování modelu směsí složenou z ostřiva a pojiva. Takovou formu lze vyrobit buď ručně, nebo za pomoci automatizace. S rychlým vývojem výpočetní techniky došlo k získání nových možností pro řešení této problematiky. V dnešní době je žádáno co nejvíce zrychlit a zefektivnit výrobu. Technologie 3D tisku pískových forem tyto trendy splňuje a nabízí slévárnám možnost výroby netrvalých forem prakticky bez lidského zásahu.

3D tiskem vzniká písková forma ve speciální 3D tiskárně přímo z CAD souborů. Z toho důvodu odpadá výroba modelů a modelových zařízení. To má příznivý vliv na eliminaci vzniku chyb a nepřesností. Dochází také k výraznému zkrácení výrobních časů. Technologie tisku písku není omezena tvarovou složitostí forem a jader. Další výhodou této technologie je její přesnost. Přesnost výroby se u většiny tiskáren pohybuje okolo 0,3 mm. Tím, že dochází k přímému tisku formy, lze minimalizovat přídavky na obrábění.

Modelárna LIAZ spol. s r. o. disponuje progresivní technologií umožňující přímý tisk pískových forem a jader pro odlévání kovů. Pro tyto účely je společnost vybavena tiskárnou S-MAX od výrobce ExOne, která je určena pro 3D tisk slévárenských pískových forem a jader.

Cíle práce

Hlavním cílem této práce bylo pokusit se najít řešení odvodu plynů vzniklých jak při lití, tak při plnění, a plynů vytvořených reakcí formy s taveninou u 3D tištěných forem a jader. Dalším cílem práce bylo navrhnout experimentální metodu, pomocí níž by bylo možné vyhodnotit vývoj plynů v tištěném jádře. Dalším cílem bylo porovnání simulace vývoje a výskytu plynů s reálným odlitkem. Posledním cílem bylo pomocí metod metalografického zkoumání vyhodnotit množství plynů v odlitku.

2 3D tisk slévárenských forem

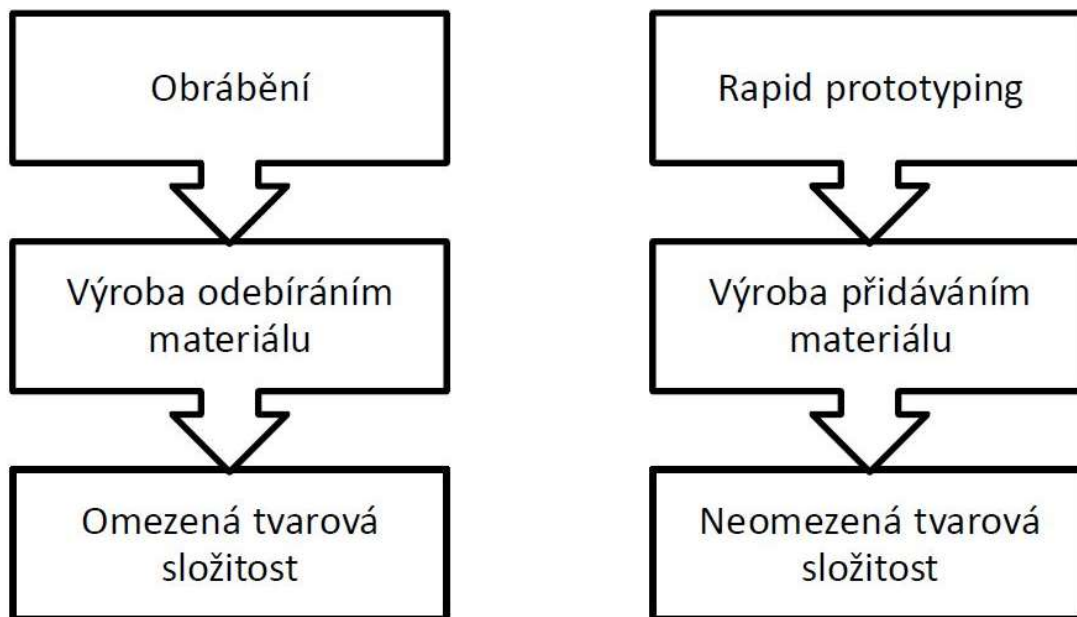
3D tisk neboli aditivní výroba patří k moderním trendům ve výrobě prototypových dílů. Pro výrobu pískových forem přináší 3D tisk nový směr, kdy prakticky odpadá příprava výroby a celá forma se zhotoví včetně vtokové soustavy a nálitků na základě vymodelovaných 3D dat bez použití modelovacího zařízení. Proces výroby probíhá ve speciální tiskárně. Touto technologií lze tisknout formy do velikosti pracovní komory. Pokud by forma přesahovala rozměry pracovní desky tiskárny, je možné formu rozdělit na menší segmenty, které se dají po vytisknutí slepit speciálními lepidly. [1]

2.1 Rapid Prototyping

Rapid Prototyping je označení pro soubor technologií, které z počítačového 3D modelu vytváří reálný model v co nejkratším čase a ve vysoké kvalitě. Tento reálný model může sloužit buď k vizuálním účelům, nebo na něm lze ověřit funkčnost modelu, či jej podrobit zátěžovým testům. [2]

Hlavním důvodem vytvoření této technologie bylo postupné přesměrování průmyslových firem z velkosériové na malosériovou výrobu, a tím dosažení větší flexibility firmy. Tento postupný vývoj se začal projevovat celosvětově na začátku devadesátých let. Důsledkem tohoto vývoje je trend, který vyžaduje masivní použití IT technologií pro řízení celého procesu tvorby nové součásti. Od původního návrhu až po finální produkt sledují počítače průběh vývoje a umožňují řídicímu pracovníkovi kdykoliv do procesu zasáhnout a efektivně opravit případné potíže. Technologie RP se na tomto vývoji významně podílí zkrácením časů nutných pro vytvoření finálního produktu. [2]

Charakteristickým znakem RP technologie je, že tvorba modelu se neprovádí metodou ubírání materiálu (soustružení, frézování), ale pomocí postupného nanášení materiálu na sebe v tenkých vrstvách, které se k sobě pojí. Tento princip je pro všechny metody společný, avšak rozdíl mezi jednotlivými metodami tkví v rozdílných mechanických vlastnostech modelů, které jsou závislé na použitém materiálu a způsobu sestavení. Na obrázku 1 je srovnání technologií obrábění pískových forem s technologií rapid prototyping. [2], [3]



Obrázek 1 Srovnání obrábění pískových forem s metodou rapid prototyping [4]

Výhody:

- automatizovaná výroba,
- výroba složitých tvarů,
- časově úsporná metoda.

Nevýhody:

- vysoké pořizovací ceny,
- nestálost rozměrů a teploty modelu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu. [3]

2.2 Výrobní proces technologie Rapid Prototyping

Výrobní proces Rapid Prototyping (dále jen RP) dělíme na tři základní výrobní operace. Preprocessing – příprava dat, processing – zpracování dílu, postprocessing – dokončovací operace. [4]

1.1.1 Preprocessing

Navržení budoucího modelu je považováno za nejvíce časově náročnou část výroby. Základem každé metody RP je vytvoření 3D modelu pomocí CAD softwaru. Další částí je transformace 3D dat ze softwaru CAD do formátu STL nebo STP. V této operaci je

geometrický tvar modelu nahrazen trojúhelníkovými ploškami. Množství plošek se volí podle složitosti a přesnosti modelu. Při výrobě modelu se používají podpurné konstrukce, které zamezují deformaci nebo zborcení. Podpurná konstrukce však není zapotřebí u všech způsobů RP. V případě, že dochází k tištění více výrobků najednou, dochází zde k seřazení, čímž se dosáhne efektivního využití výrobního prostoru. Důležité je dbát i na vhodné natočení modelu při tisku, jelikož i tento faktor dokáže ovlivnit kvalitu výrobku. [3]

1.1.2 Processing

V tomto kroku dochází k výrobě součástí. Většina RP technologií je plně automatizována, takže není nutné jej kontrolovat. Doba processingu se odvíjí od složitosti modelu a jeho rozměrů. Čas výroby dále závisí na parametrech výrobního stroje. [3]

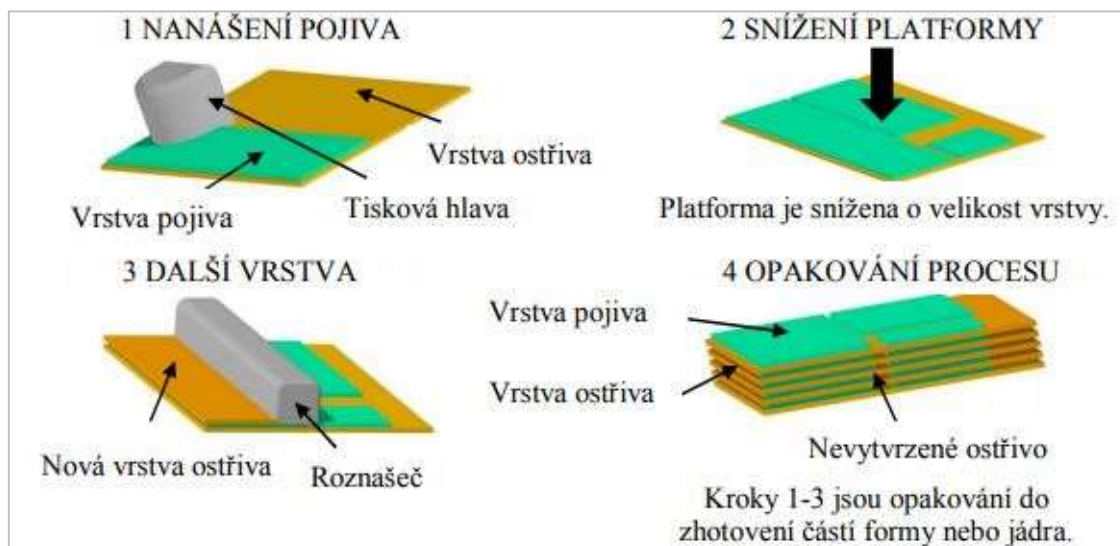
1.1.3 Postprocessing

Postprocessing je závěrečnou částí výroby. V této fázi se provádějí dokončovací operace, jako je odstranění podpurných a přebytečných struktur a odstranění přebytečného materiálu. Pro zajištění požadovaných vlastností se může forma dále upravovat, a to například nátěry. [3]

2.3 Metody 3D tisku slévárenských forem

3D tisk umožňuje výrobu pískových forem a jader ke slévárenským účelům přímo z digitálních CAD dat. Po vytvoření těchto dat je možné formu nebo jádro tisknout na speciální tiskárně. Princip 3D tisku pískových forem je vyobrazen na obrázku 2. Zdánlivě tak odpadá potřeba modelů, jaderníků a modelových zařízení. Příslibem této technologie je ušetření času, snížení možnosti vzniku chyb i nepřesností, získání větší volnosti při konstruování forem a jader, ušetření místa ve skladech modelů a modelových zařízení, snížení nákladů na údržbu modelů a modelových zařízení apod.

3D tisk pískových forem používá jako pracovní médium materiály podobné písku, včetně skutečného křemičitého písku, keramiky nebo dokonce kovových částic. Tato technologie používá tryskání pojivového polymeru k vázání částic k fyzickému 3D modelu. Toho lze využít k výrobě hotových výrobků nebo forem pro lití kovů.



Obrázek 2 Princip 3D tisku pískových forem

1.1.4 Historie 3D tisku pískových forem

Historie 3D tisku forem začíná koncem 90. let u německé společnosti Generis a MIT (Massachusetts Institute of Technology) ve Spojených státech. Společnost Generis se zaměřila na 3D tisk forem na lití kovů, zatímco společnost MIT vyvinula a patentovala technologii tryskové technologie 3DP pro kovové pojivo. Jejich práce vedla k prvním komerčně dostupným tiskárnám nabízeným v polovině roku 2000. Licenční ujednání a rozdělení společnosti Generis vedou k dnešním dvěma hlavním mistrům v technologii – voxelJet® a ExOne. [5]

1.1.5 Písková 3D tiskárna

Písková 3D tiskárna sdílí mnoho funkčních atributů jiných metod 3D tisku. Používá proces tisku po vrstvě, který umožňuje vytváření součástí se složitou vnitřní a vnější geometrií. Tyto vrstvy jsou definovány rozdělením modelů počítačových částí na tenké řezy. Částice písku jsou spojeny pojivovým „lepidlem“, které částice zpevní do 3D tvaru. Většina technologií používá 3D tisk ke zpracování pracovního materiálu. Tím může být buď laserová energie, která taví nebo slinuje materiál, nebo jen elektrické ohřívače, které roztavují plast. Oproti tomu písková 3D tiskárna nevyužívá teplo. Funguje jako inkoustová tiskárna, ale namísto inkoustu na kus papíru tiskne pojivo na vrstvu písku. Pojivové činidlo může také zahrnovat pigment pro tisk barevných dílů.

Konstrukce pískové 3D tiskárny bez potřeby tepla vede k velmi důležité výhodě oproti jiným technologiím 3D tiskáren. Lze ji snadno sestavit tak, aby tvořila velmi velké části.

3D tiskárny, které ve svém procesu používají teplo, vyžadují přidanou energii a izolaci, což omezuje jejich velikost. Pískové tiskárny jsou na trhu s velikostí boxu až 4 x 2 x 1 m. I s takto velkými objemy lze tisknout rozlišení 600 DPI s tloušťkou vrstvy 0,3 mm.

1.1.6 Postup 3D tisku

3D tisk pískových forem začíná vyrovnáním první tenké vrstvy písku na platformě buildu. Tisková hlava prochází nad vrstvou písku, zatímco vytlačuje pojivo ve vzoru potřebném pro tuto vrstvu. Tento proces se opakuje až do výroby finálního dílu. V dutinách zůstává volný písek, který slouží jako podpora pro další vrstvu. Tím odpadá použití podpěr. Po nanesení finální vrstvy je veškerý sypký písek opatrně odstraněn, čímž vzniknou požadované dutiny. Další zpracování může zahrnovat čištění nebo impregnaci formy pro zvýšení pevnosti. [7], [9]

2.4 Laser sintering of silica sand

Tento systém pracuje podobně jako systém SLS. Jako materiál se používá křemenný písek, který je ve slévárenství zcela běžný. Tento písek má teplotu tání 1 600 °C. Dále ale obsahuje mnoho jiných chemických prvků, které mají teplotu tání menší. Je to vápník, hliník, hořčík a jiné. Proto může být tento písek vytvrzovaný i méně energeticky náročným laserem. Nejprve se na kovové podložce vytvrdí první vrstva, která je složena z křemenného písku a křemičitanu sodného, který zajistí dobrou přilnavost mezi pískem a podložkou. Tato vrstva má tloušťku 0,3 mm. Jelikož křemičitan sodný snadněji tuhne, je laser nastaven na nižší výkon než pro vytvrzování následujících vrstev. Další vrstva se již skládá pouze z křemenného písku. Parametry laseru se upraví a vytvrzuje se již kontura budoucí formy. Po vytvrzení celé součásti následuje nátěr křemičitanem sodným, který celou součást zpevní a zlepší její povrch. Tento vytvrzovací proces může být urychlen tuhnutím součásti v peci o teplotě 200 °C. Poté je již forma připravena k odlévání. [18]

pojiva. Když kapičky pojiva přijdou do styku s práškem, částice se spojí dohromady a vytvoří pevnou látku. Jakmile je celá první vrstva spojena s pojivovým činidlem, popojede sestava o výšku jedné vrstvy dolů a proces je opakován. Po dokončení je část zcela pokryta práškem. [10]

Po dokončení procesu tisku se nechají části zakryté pískem, který slouží jako opora součástí. Po vytvrzení se přebytečný písek odstraní stlačeným vzduchem. [5]

1.1.7 ExOne

Historie firmy začíná v roce 1999, kdy byla v rakouském Augsburgu založena firma Generis. Do roku 2003 se zabývala vývojem strojů pro výrobu netrvalých modelů a odlévání do písku. Poté se společnost rozdělila na ProMetal RCT, která se zaměřila na výrobu strojů pro tvorbu pískových forem, a voxelJet®. Odnož firmy ProMetal RCT poté začala rozvíjet trh s tiskem pískových forem a jader. V roce 2004 představila firma tiskárnu schopnou tisknout s více materiály a pojivy. V roce 2005 změnila firma název na ExOne, která v roce 2010 představila tiskárnu S-MAX, v té době největší stroj pro tisk pískových forem (rozměry pískového lože 1800 x 1000 x 700 mm). [8],[9]

V dnešní době má firma pobočky v Americe, Asii a Evropě. Zabývá se jak tiskem pískových forem a jader, tak i výrobou netrvalých modelů a prototypovou výrobou. Na obrázku 4 je zařízení od společnosti ExOne, které slouží pro tisk pískových forem. Toto zařízení používá širokou škálu materiálů, jako je křemičitý písek, keramika, nerezová ocel, bronz a sklo. ExOne je dodavatelem systému pro výrobu prototypů, systémů pro produkční výrobu a systémů pro výzkum a vzdělání. [8],[9]



Obrázek 4 Tiskárna ExOne [8]

2.6 Porovnání tiskáren ExOne

2.6.1 Exerial

Tiskárna od firmy ExOne (viz obrázek 5) je určena pro sériovou průmyslovou výrobu složitých pískových jader a forem ze souboru CAD. Tato tiskárna je vybavena dvěma pracovními boxy o selkovém objemu 3 696 litrů. Vzájemným propojením více tiskáren Exerial může vzniknout výrobní systém pro velkosériovou výrobu. [8]

Vysokou produktivitu tiskárny zaručují dva pracovní boxy a možnost průběhu několika souběžných výrobních činností.

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 2 200 x 1 200 x 700 mm
- Tloušťka vrstvy: 280–500 μm
- Rychlost tisku: 300–400 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: 100/100/100 μm
- Váha: 12 000 kg [19]



Obrázek 5 Tiskárna Exerial [8]

2.6.2 Tiskárna S-MAX

Systém S-MAX (viz obrázek 6) je vhodný pro slévárny a konstrukční kanceláře k výrobě sériových středně velkých forem a jader. Vytváří formy a jádra přímo z CAD dat, a to bez nutnosti vytvářet vlastní modelové zařízení pro jejich výrobu. To umožňuje odlít díly během několika hodin. [9]

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 1 800 x 1 000 x 700 mm
- Tloušťka vrstvy: 280–500 μm
- Rychlost tisku: 60–85 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: 100/100/100 μm
- Váha: 6 500 kg [19]



Obrázek 6 Tiskárna S-MAX [8]

2.6.3 Tiskárna S-Print

S-Print je vhodným řešením pro společnosti, které již mají svoji vlastní modelárnu. Tento systém (viz obrázek 7) se jednoduše využívá pouze pro složitá jádra, která se vyrábějí souběžně s konvenčními. Ve výsledku zkracuje čas výroby a produktivitu celého výrobního postupu. [9]

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 800 x 500 x 400 mm
- Tloušťka vrstvy: 280–500 μm
- Rychlost tisku: 16–36 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: 100/100/100 μm
- Váha: 3 500 kg [19]



Obrázek 7 Tiskárna S-Print [8]

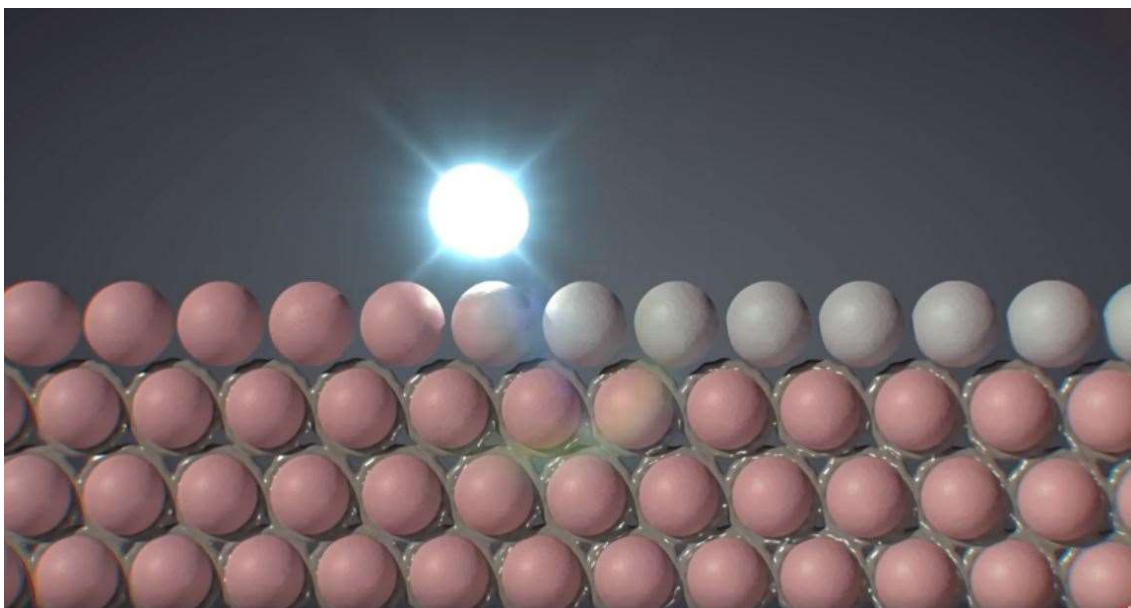
2.7 Pískové materiály a pojiva

ExOne má několik typů písků používaných při odlévání, které lze při kombinaci různých pojiv použít k tisku jader a forem pro lití železných i neželezných kovů. Kombinace pojiva a písku použitého pro odlévání lze přizpůsobit individuálním požadavkům na kvalitu odlitku. Všechny systémy od společnosti ExOne jsou schopny zvládnout různé materiály pro zpracování písku a pojiva. Jsou to materiály buď na bázi oxidu křemičitého a furanového pojiva, nebo na bázi oxidu křemičitého a fenolového pojiva. [19]

2.8 PDB (Phenol Direct Binding)

Phenol Direct Binding je aditivní výrobní technologie vyvinuta společností voxelJet®, založena na technologii Binder Jetting. Zatímco stroje voxelJet® dokážou tisknout vysoce kvalitní plastové díly, potenciál firmy je v krátké detailní výrobě litých pískových forem a jader. PDB pracuje s anorganickou termosetovou pryskyřicí, která umožňuje použití různých jemností křemičitého písku (GS 14, GS 19 a GS 25, s velikostí zrn 140 μm , 190 μm a 250 μm).

3D tiskárny od voxelJet® lze použít pro časově a finančně výhodnou výrobu pískových forem a jader pro lití kovů. Formy se vyrábějí nanesením ostřiva ve vrstvách smíchaného s pojivem (viz obrázek 8). Jako částicový materiál se používá křemičitý písek. [11]



Obrázek 8 Metoda PDB [11]

Metoda PDB poskytuje ve srovnání s jinými v současné době dostupnými metodami 3D tisku mnohem větší přesnost, pevnost a vysoce propracované detaily na pískových formách. Jednou z hlavních výhod procesu PDB je kromě zvýšené kvality tisků i skutečnost, že pomůže při ochraně materiálů. Protože fenolová pryskyřice nevyžaduje, aby byl křemičitý písek před zpracováním předběžně upraven, znamená to, že materiál, který není použit v procesu tisku, může být recyklován a použit při tisku budoucích produktů. PDB také umožňuje neomezené použití křemičitých písků s různými hodnotami pH a keramických materiálů. [11]

2.9 Tiskárny voxelJet®

2.9.1 Tiskárna VX 4000

Tiskárna VX 4000, která je znázorněna na obrázku 9, je největším 3D tiskovým systémem na světě pro pískové formy. S celkovou velikostí pracovního boxu 4 metry na délku, 2 metry na šířku a 1 metr na výšku může tento systém produkovat velké jednotlivé formy i četné komponenty malých sérií. [13]

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 4 000 x 2 000 x 1 000 mm
- Tloušťka vrstvy: 300 μm
- Rychlost tisku: 123 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: až 300 dpi



Obrázek 9 Tiskárna VX 4000 [30]

2.9.2 Tiskárna VX 1000

Univerzální 3D tiskový systém VX 1000 je produktivní všestranné zařízení. Od nákladově efektivní výroby středních forem, přes jádra, modely a prototypy. Tento 3D tiskový systém (viz obrázek 10) dokáže splnit širokou škálu složitých požadavků. VX 1000 je také vhodný pro malosériovou výrobu. Nepřetržité tiskové procesy zajišťují vysokou výrobní kapacitu. [11]

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 1 000 x 600 x 500 mm
- Tloušťka vrstvy: 150 300 μm
- Rychlost tisku: 65 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: až 600 dpi
- Hmotnost: 3 500 kg [11]



Obrázek 10 Tiskárna VX 1000 [30]

2.9.3 Tiskárna VX 200

Jedním z nejkompaktnějších 3D tiskových systémů voxelJet® je VX 200. Díky optimalizovaným rozměrům, které jsou viditelné na obrázku 11, lze tento tiskový systém snadno instalovat do menších prostor. To je zvláště výhodné pro výzkum a vývoj. VX 200 tiskne malé prototypy a konstrukční díly efektivně a je velmi snadno ovladatelný. Praktickou možností je, že s programem Open Source programu voxelJet® lze různé parametry stroje individuálně upravovat tak, aby se přizpůsobil proces tisku. To optimalizuje interakci mezi tiskovým systémem a materiálem pro 3D tisk. [11]

Technické parametry:

- Maximální rozměry výrobku: 300 x 200 x 150 mm
- Tloušťka vrstvy: 300 μm
- Rychlost tisku: 80 l/h
- Max. rozlišení tisku X/Y/Z: až 300 dpi
- Hmotnost: 450 kg [11]



Obrázek 11 Tiskárna VX 200 [30]

2.10 RAM systém Viridis3D

Systém robotické aditivní výroby (RAM) Veridis3D od společnosti EnvisionTEC využívá patentovanou technologii tiskové hlavy, která je připojena k robotickému ramenu od firmy ABB. Model tohoto zařízení je znázorněn na obrázku 12. Robotické rameno je poháněno softwarem Viriprint.

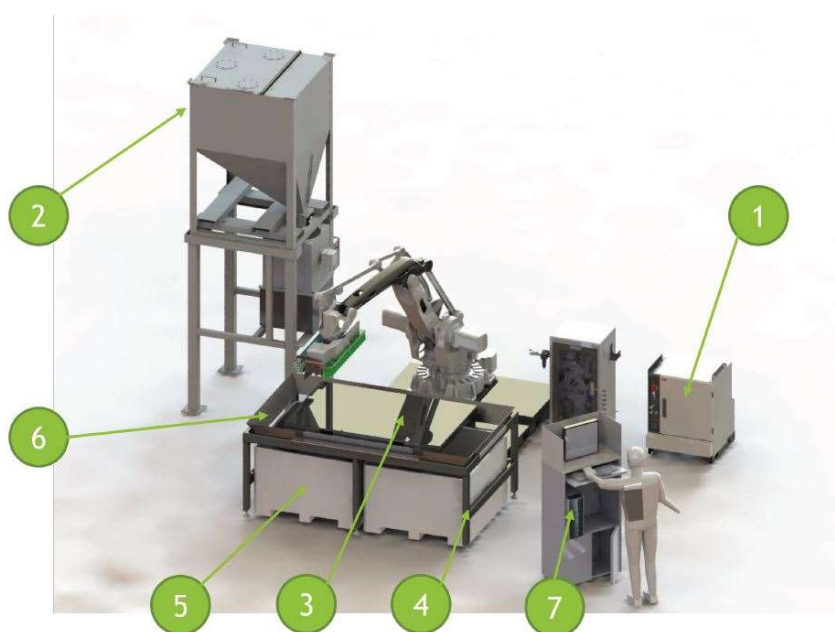
Proces tisku probíhá tak, že jsou 3D data poslána do tiskárny, kde jsou transformována na 2D obrázky jednotlivých vrstev. Písek je kladen na základní desku od spodní části k vrchní po velmi tenkých vrstvách.

Robotické rameno ukládá materiál na bázi písku vysokými rychlostmi a umožňuje výrobu vysoce rozměrných pískových forem, jader nebo modelů pro slévárenský průmysl. Maximální tisknutelné rozměry jsou 0,9 x 0,9 x 1,8 [m]. [29]

Podle společnosti EnvisionTEC používá tato technologie pro tisk pískových forem méně pískového materiálu než jiné 3D tiskárny, čímž se snižují náklady na výrobu. Podle společnosti může tato technologie snížit náklady na výrobu až o dvě třetiny oproti konkurenčním systémům. [13], [14]



Obrázek 12 3D tiskárna Virids3D [29]



Obrázek 13 Schéma zařízení Virids3D [29]

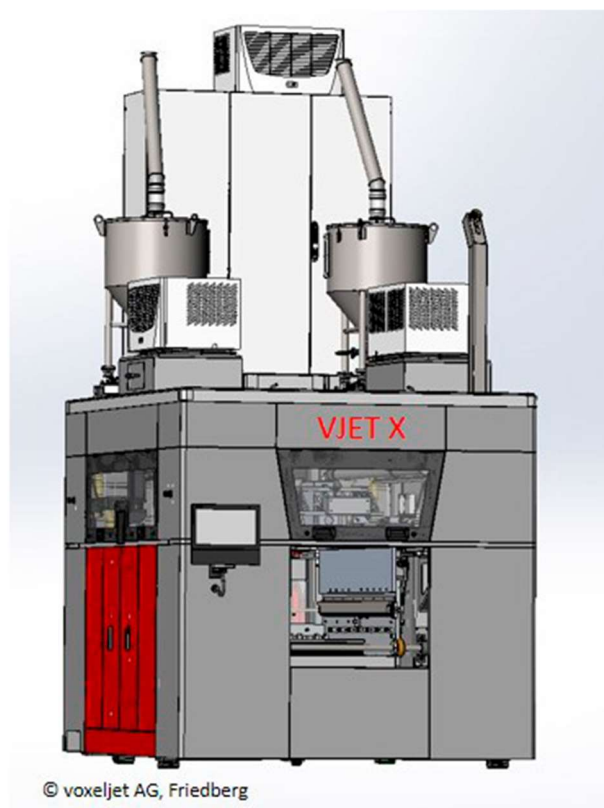
Popis obrázku 13: řídicí jednotka (1), zásobník (2), stavební deska (3), stavební stůl (4), přepradové koše (5), deflektor (6), uživatelské PC (7)

2.11 Technologie ICP

Německý výrobce 3D tiskáren voxelJet® začal spolupracovat se španělským výrobcem Loramendi a s ASK Chemicals, globální společností vyrábějící slévárenské materiály. Cílem bylo vyvinout technologii Industrialization of Core Printing (ICP). ICP bylo údajně „první plně automatizované řešení pro výrobu 3D tištěných jader na světě.“ Bylo navrženo k výrobě vysoce složitých pískových jader pro slévárenský průmysl. Využitím aditivní výroby ICP eliminuje konstrukční omezení konvenčních stroj. [28]

2.11.1 Společnost Loramendi

Společnost Loramendi byla založena v roce 1973. V rámci výroby pískových jader, formování a lití udržuje významné zázemí v oblasti navrhování a dodávek řešení a projektů na klíč. Na základě těchto zkušeností navrhla technologii ICP jako hlavní výrobní linku, která je jak 3D, tak plně automatizovaná, což umožňuje vysokou flexibilitu výroby. Loramendi si klade za cíl zvýšit příležitosti průmyslu 4.0 pro hlavní výrobní závody a slévárny s technologií ICP. [17]



Obrázek 14 Tiskárna VJET X 3D [27]

2.11.2 Tiskárna voxelJet® VJET X 3D

Aby byl zajištěn úspěch technologie ICP, poskytla společnost voxelJet® projektu novou tiskárnu VJET X 3D (viz obrázek 14), o které se uvádí, že je více než desetkrát rychlejší než předchozí modely.

Maximální rozměry tisknutelné na tomto zařízení jsou 1 000 x 600 x 500 mm. Tím, že rychlost vrstvení je nižší než pět sekund, se tiskárna stala oproti předchozím modelům desetkrát rychlejší. Tiskárna používá anorganický pojivový systém pro nulové emise během tisku jádra, skladování a při použití pískových jader během licího procesu. [16]

2.12 Srovnání tiskáren

Model tiskárny	výrobce	max. tisknutelné rozměry [mm]	rychlost tisku [l/h]
Exerial	ExOne	2200 x 1200 x 700	300-400
S-MAX	ExOne	1800 x 1000 x 700	60-85
S-Print	ExOne	800 x 500 x 400	16-36
VX 4000	voxelJet®	4 000 x 2 000 x 1 000	123
VX 1000	voxelJet®	1 000 x 600 x 500	65
VX 200	voxelJet®	300 x 200 x 150	80
VIRIDIS 3D	EnvisionTEC	900 x 900 x 1800	600
VJET X 3D	voxelJet®	1000 x 600 x 500	10xrychlejší

Obrázek 15 Tabulka srovnání tiskáren

3 Vliv plynů na kvalitu odlitku

Plynotvornost je nepříznivá vlastnost formovacích a jádrových směsí. Čím nižší bude hodnota plynotvornosti, tím bude lepší jakost povrchu odlitku. Dochází k němu při styku taveniny o vysokých teplotách s povrchem formovací směsi. Plynotvornost se vyjadřuje v cm^3 na 1 gram směsi. Množství plynů uvolňujících se z pískové formy záleží na druhu použitého pojiva a jeho podílu ve směsi, na zrnitosti ostřiva, na jeho náklonnosti k navlhání a obsahu dalších přísad sloužících ke zlepšení vlastností formy nebo vyvolávající vytvrzovací reakce.[26], [25]

Kromě množství uvolněných plynů je důležitá kinetika jejich vývoje a čas, při kterém dochází k uvolnění plynů. Ze složek používaných na výrobu formovacích směsí vykazuje největší plynotvornost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, organické přísady a další látky. [26]

Plyny vznikající při odlévání tvoří směs, ve které převládají redukční složky (CO , H_2). Únik těchto plynů do atmosféry je doprovázen tlakem, který je závislý na jejich množství, rychlosti vývinu a odporu kladeného formovací směsí. Při vysokých hodnotách tlaku v blízkosti líce formy může dojít až k proniknutí těchto plynů do taveniny, což může po ztuhnutí vést k vytvoření dutin uvnitř odlitku. [25]

Při styku povrchu formy s taveninou dochází ke sdílení tepla a prohřívání formy. Rychlost prohřívání závisí na teplotních podmínkách na rozhraní tavenina–forma a na tepelně fyzikálních vlastnostech formovacího materiálu.

Po odlití se ve formě vytváří několik vrstev s různým stupněm vývinu plynů. Tloušťka každé vrstvy záleží na teplotě formy v daném okamžiku a hodnotách teplot rozkladu jednotlivých směsí. [22]

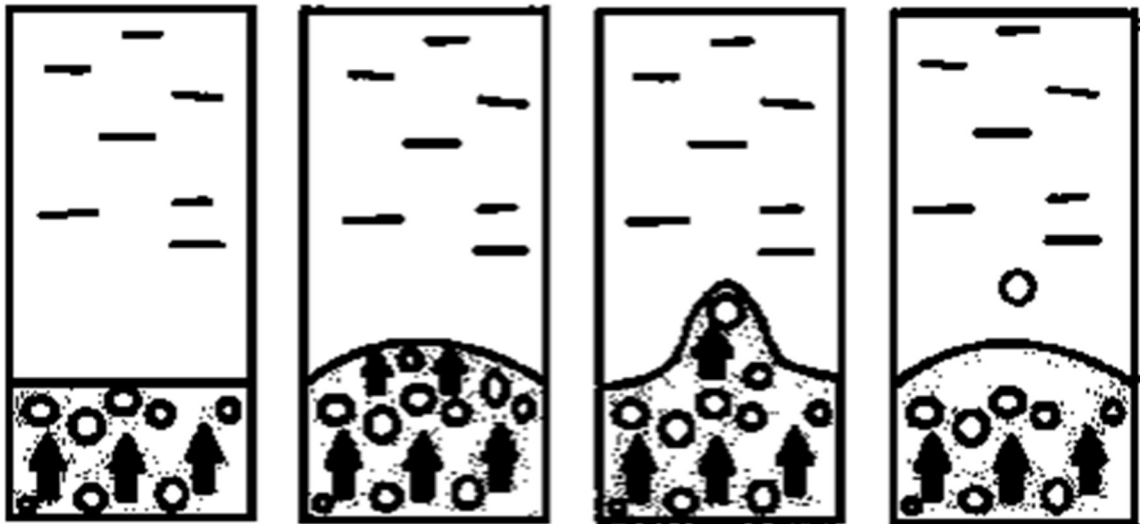
3.1 Vznik a pronikání plynů a par do taveniny

Při nevhodně nastavených energetických a tlakových podmínkách může nastat děj pronikání plynů do taveniny a s ním spojená horší jakost odlitku.

Plynové bubliny vznikají v odlitku za situace, kdy je celkový tlak plynů větší než součet dílčích tlaků. Nejvíce plynů se z formovacích a jádrových směsí vylučuje ihned po odlití,

kdy je malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak. Mechanismus pronikání plynů do taveniny znázorňuje obrázek 16. [26]

Nejprve se vyloučené plyny začnou shromažďovat u povrchu taveniny. Se zvyšujícím se tlakem začnou překonávat odpor kovu proti vniknutí a začnou prostupovat do taveniny. S ještě větším nárůstem tlaku se bublina vlivem povrchových napětí zaškrtní a v momentě překonání metalostatického tlaku se uvolní do taveniny. [26]



Obrázek 16 Grafické znázornění úniku plynů do taveniny [26]

3.2 Pojiva formovacích a jádrových směsí

Pojivo je po ostřivu druhou hlavní složkou formovací nebo jádrové směsi. Pojiva jsou látky, které ve spojení s ostřivem dávají formovacím směsím užité vlastnosti. Mají funkci „lepidla“ spojujícího částice ostřiva do požadovaného tvaru. Spojením ostřiva a pojiva se docílí pevnosti formovací směsi. [31]

Dlouholetý vývoj pojivových systémů lze rozdělit do čtyř skupin:

- pojiva I. Generace,
- pojiva II. Generace,
- pojiva III. Generace,
- pojiva IV. Generace. [31]

3.2.1 Pojiva I. generace

Pojivy I. generace jsou jílová pojiva. Propojení je výsledkem Van der Waalsových sil a sil kapilárního tlaku, které vznikají mechanickým zhušťováním směsi. Mezi částicemi pojiva působí kohezní síly a mezi částicí ostríva a pojivem působí adhezní (přilnavé) síly. Jsou to nejstarší a zároveň nejrozšířenější slévárenská pojiva. Ve světě je asi 50 % celkové produkce odlitků vyráběných pomocí forem z bentonitových směsí. Jílová pojiva jsou nejčastěji součástí přírodních směsí. Druhy jílu (aluminosilikátů) využívané ve slévárenství:

- Kaolinitický jíl ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – kaolinit) – formovací směs tvoří pojivo se šamotovým lupkem. Formy a jádra z této směsi jsou využívány pro odlévání ocelových odlitků. Směs je určena na sušení a suší se při teplotě 650 °C. Má výbornou žáruvzdornost, ale nejmenší bobtnavost ze všech jílu.
- Illitický jíl – nazývá se také slídový jíl. Je to jíl doprovázející přírodní písky. Nejvýznamnějším z této skupiny je železitý minerál zelené barvy – glaukonit. Směs s tímto pojivem je určena k sušení a používá se na rozměrné litinové odlitky z důvodu dobré žáruvzdornosti i bobtnavosti.
- Montmorillonitický jíl ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – obsahuje-li jílové pojivo více než 75 až 80 % montmorillonitu, nazývá se tento jíl bentonitem. Bentonity slouží k výrobě bentonitových směsí a dodnes patří k nejrozšířenějším jílovým pojivům. Mají 2,5krát vyšší pojivovou schopnost než kaolinitické jíly. Z toho důvodu lze připravovat směsi s minimálním množstvím pojiva (6 až 8 %) a také s minimálním množstvím vody (pod 5 %). Využívají se při strojním formování na automatických formovacích linkách pro formování na syrovo. Pojivo je ekonomicky dostupné a hygienicky nezávadné při lití i deponování. [26], [32], [31]

3.2.2 Pojiva II. generace

Tato generace pojiv je založena na chemickém způsobu pojení. V dnešní době je nejvýznamnější z hlediska rozvoje. Pojiva II. generace mají velký ekologický význam. Dají se rozdělit na samovytvrditelná a vytvrditelná zásahem zvenčí, ale mnohem běžnější je dělení podle chemické podstaty, a to na anorganická a organická. [26], [32]

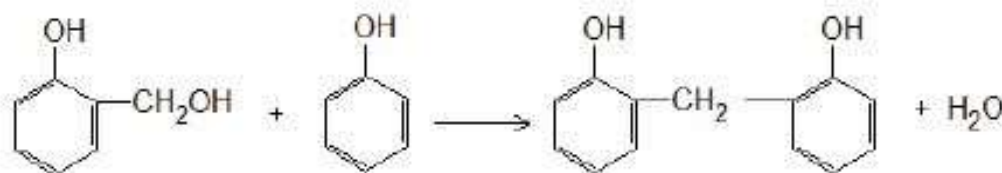
Anorganická pojiva – v současné době jsou tato pojiva na vzestupu z důvodu nepříznivých ekologických a hygienických vlastností pojiv organických. Vyznačují se také menší plynatvorností. Patří sem pojiva na bázi alkalických silikátů, geopolymérů a anorganických solí. Ve všech těchto oblastech probíhá neustálý vývoj a jejich technologické vlastnosti se přibližují organickým pojivům. [32]

Organická pojiva – rozšířila se především v oblasti jádrových směsí. Směsi vykazují obecně lepší technologické vlastnosti než směsi s anorganickými pojivy. Během procesu výroby se při použití systémů s organickými pojivy uvolňují zdraví škodlivé exhalace (fenol, benzen, toluen atd.), které mají rakovinotvorné účinky. Patří sem tři skupiny organických látek: umělé pryskyřice (fenolické, furanové, polyuretanové, alkydové, močovinové), sacharidy a oleje. [26], [32]

Pryskyřice jsou hojně využívány kvůli svým dobrým slévárenským vlastnostem. Po vytvrzení odolávají navlhání ze vzduchu a jsou nerozpustné ve vodě. Při vytvrzování dochází k obalení zrna ostřiva a vytvoření kompaktní hmotě. Jako pojiva se nejvíce používají pryskyřice: fenolformaldehydové, močovinoformaldehydové, furanové a kombinované.

Teplem tvrditelné pryskyřice – při ohřevu fenol-formaldehydové pryskyřice vznikají reakce, které zvětšují její molekulovou hmotnost. Při teplotách nižších, než je 170 °C reaguje methylová skupina s reaktivním vodíkem jiného fenolického jádra, tvoří se methylenový můstek a dochází k odštěpování vody. [26]

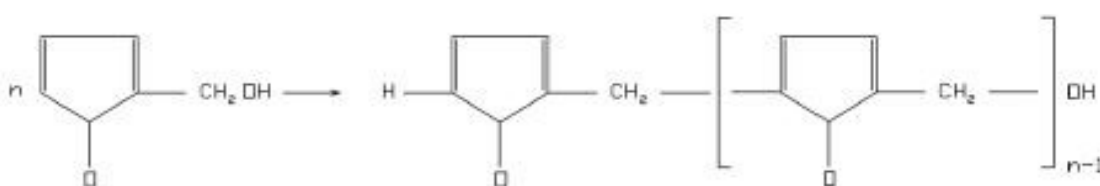
Rovnice 1 Strukturní rovnice reakce fenol-formaldehydové pryskyřice [26]



Druhá etapa tepelných reakcí začíná po překročení teploty nad 160 °C a dosahuje maxima při teplotě 200 °C. Při této etapě dochází k částečné ztrátě formaldehydu a voda se přestává odštěpovat.

Prskyřice vytvrzované za studena – tyto prskyřice mají schopnost samovolného vytvrzování derivátů furanových prskyřic v kyselém prostředí. Této schopnosti se využívá při výrobě formovacích směsí, pojených furanovými prskyřicemi. Velice rychle tvrdnou i za studena. Podmínkou je použití kyselých katalyzátorů. Tato technologie úplně vyloučila vysoušení jader a zkrátila výrobní časy. K tunutí dochází přímo v jaderníku. Tím se dosahuje vysokých přesností rozměrů. Jádra mají po odlití dobrou rozpadavost. [26]

Rovnice 2 Strukturní vzorec tvorby lineárních molekul v kyselém prostředí. [26]



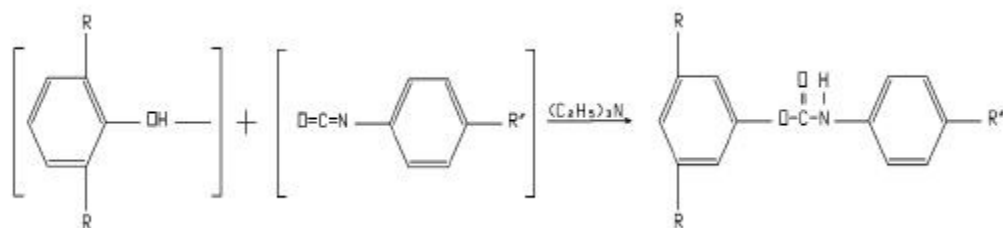
Základní složkou furanových prskyřic je fufrurylalkohol. Reakce vzniku prskyřic z furfurylu je založena na mezimolekulární kondenzaci, při níž se odštěpuje asi 18% vody. Prskyřice je tvořena řetězovými molekulami, tvořenými z furanových jader spojených methylenovými můstky.

Rychlost konverze prskyřice do netavitelného a nerozpustného stavu závisí na teplotě, aktivitě a koncentraci kyselých katalyzátorů. Proces samokondenzace lze v kterémkoliv okamžiku zastavit nebo zpomalit ochlazením nebo přidáním zásaditých látek. Proces formování musí být zajištěn kvalitním odsáváním, případně hermetizací formovací linky.

Vytvrditelné vzdušnou emulzí triethylaminu – princip polykondenzace je založen na použití dvousložkového systému, který vlivem katalyzátoru tuhne za studena při teplotě okolního prostředí. První složku tvoří fenolová prskyřice v roztoku a druhou složkou je roztok polyisokyanátu. Vlivem působení triethylaminu dochází ke spojování OH – skupiny fenolové prskyřice s NCO – skupinami polyisokyanátu a vzniká uretanová prskyřice.

V praxi děj probíhá nejprve promísením ošťřiva se dvěma kapalnými složkami, následuje vstřelení směsi do jaderníku a vytvrzení profouknutím směsi plynou emulzí triethylaminu. [26]

Rovnice 3 Rovnice chemické reakce polykondenzace [26]



3.2.3 Pojiva III. generace

Tato generace je výsledkem hledání zdravotně a ekologicky nezávadných pojiv, která jsou založena na fyzikálním principu pojení slévárenských forem. Využívají se fyzikální účinky magnetického pole, vakua a zmrazování. Dělí se podle formy, a to na magnetickou, vakuovou a zmrazenou formu. [31], [32]

Magnetická forma – jako ostřívo se používají jemné broky z magnetické oceli. Jednorázový spalitelný model je pokrytý žáruvzdorným ochranným nátěrem. Forma se vyrobí zasypáním tohoto modelu feromagnetickým zrnitým materiálem. Při lití se forma nachází v magnetickém poli. Nesmí dojít k překročení teploty, při které ostřívo ztrácí magnetické vlastnosti (u oceli je to 727 °C). Po odlití se zruší působení magnetického pole a odstraní se ostřívo. U této technologie není nutnost použití jader. Je to nejstarší technologie v této generaci, avšak dodnes není příliš používaná.

Vakuová forma (metoda V) – vakuum působící na křemenné ostřívo ve slévárenském rámu je pojivem formovací směsi. Metoda je náročná na modelové zařízení. Modelová deska i model musí mít kanálky na vysátí vzduchu. Principem je vytvoření uzavřeného neprodyšného prostoru, který je ohraničen formovacím rámem a dvěma fóliemi. Jedna fólie sleduje obrys modelu, druhá uzavírá rám shora. Tento prostor je následně zaplněn ostřivem. Dále se z tohoto prostoru odsaje vzduch vývěvou. Forma se udržuje ve stálém tvaru působením přtlaku atmosférického vzduchu na fólie. Odlitím fólie shoří, zruší se vakuum a odlitek i ostřívo se vysypou z rámu. [32]

Zmrazená forma – používá se ostřívo obsahující vodu. To se zaformuje běžným způsobem a zmrazí kapalným dusíkem. Pojivem je tedy led. Při odlití a tuhnutí odlitku se musí dbát na to, aby se forma neohřála na teplotu, při které ztrácí pevnost. Forma má vysoký ochlazovací účinek, který je výhodný pro pevnost a tvrdost odlitku.

3.2.4 Pojiva IV. generace

Do této generace by měla patřit pojiva budoucnosti, která budou svým složením podobná živým organismům (biogenní pojiva). Znamená to tedy, že lze vyvinout i organická pojiva, která budou zdravotně nezávadná a šetrná k životnímu prostředí. V současné době se již takové pojivo vyrábí pod názvem GMBOND®. Toto pojivo je na bázi proteinů (bílkovin). Pojivo je ve formě prášku, který se rozpustí ve vodě, nabalí se na zrna ostřiva a po následném vysušení se vytvoří biopolymerové vazby. Je rozpustné ve vodě, biologicky odbouratelné a netoxické. [32]

3.3 Pojivové systémy

3.3.1 Furanové pojivové systémy

Furanové pojivo je typ pojiva bez tepelného vytvrzování, tj. samotuhnoucí pojivo. K jeho vytvrzení je zapotřebí aktivátor, kterým bývá roztok kyseliny arylsulfonové. Furanové samotuhnoucí směsi jsou běžně využívány i v konvenčních slévárenských metodách, takže nejsou nutná žádná přizpůsobení slévárny. Pevnost forem se pohybuje kolem 2,3 MPa. Výhodou furanových pojiv je možnost odlévat téměř ihned po očištění forem od nespojeného písku, k čemuž dochází přibližně 3 hodiny po dokončení tisku.[9]

3.3.2 Fenolové pojivové systémy

Fenolová pojiva jsou uzpůsobena pro odlévání kovů s vysokou teplotou tavení. Díky tomu lze dosáhnout lepšího zatékání kovu do úzkých částí formy. Odlitky tedy mohou mít velmi tenkou stěnu. Na rozdíl od furanových pojiv je nutné tepelné vytvrzení po tisku. To lze snadno provést v zařízení fungujícím obdobně jako mikrovlnná trouba. Firma voxelJet® také nově vytvrzuje formy pomocí zdroje infračerveného záření umístěného na šnekovém dopravníku. Pevnost forem po vytvrzení je 2,5–5 MPa a závisí na použitém písku.[27]

3.3.3 Pojivový systém na bázi silikátu

Pojivo na bázi silikátu bylo vytvořeno jakožto ekologicky přijatelnější pojivo, jelikož při jeho výrobě a následné manipulaci nevznikají nežádoucí emise ani zápach. Na rozdíl od

furanových a fenolových pojiv se jedná o anorganické pojivo, konkrétně o křemičitan sodný (vodní sklo), který je v práškové formě smíchán s pískem a poté pomocí šnekového dopravníku nanesen na suchou směs. Poté je tryskami nanesená voda o upravené viskozitě a povrchovém napětí. Při kontaktu vody s křemičitanem sodným dojde k rozpuštění vodního skla, které je schopno obalit okolní zrna písku. Vytvoří se pojivové můstky a po následném ohřevu dojde k vypaření vody a vytvrzení formy. Takto vytvořené formy jsou vhodné pro lehké kovy. [26]

4 Písková jádra – srovnání klasických vs. tištěných forem

Konvenční výroba jader

Prvním základním nástrojem sloužícím k výrobě jader je jaderník, který dle způsobu výroby může být použit pro ruční nebo strojní výrobu. Ruční způsob výroby se uplatňuje převážně u malých sléváren a při výrobě jader pro jeden vyráběný odlitek.

Při výrobě složitějších tvarů jader se jádro rozdělí na elementy, které jdou jednodušeji vyrobit, a následně se lepí pomocí speciálního lepidla. Při výrobě dlouhých jader malých průměrů se využívá ke zvýšení pevnosti výztuha a ocelový drát.

Výroba jader pomocí 3D tisku

Aditivní metodou lze vyrobit písková jádra. Materiál je systematicky nanášen a vrstven až do konečné podoby jádra. Proces nanášení vrstev vychází přímo z CAD návrhu. Není potřeba vyrábět modely a formy. Jádro je vytvořeno prakticky bez zásahu lidské ruky. 3D tisk umožňuje výrobu prototypových odlitků v bezkonkurenčním čase, jelikož dochází pouze k tisku jádra a práce spojené s výrobou jaderníků odpadají.

Dalším kladem této technologie je možnost tisknout jakýkoliv tvar, díky čemuž odpadá výroba jednodušších částí jader po částech a následné lepení v jeden celek. U velkých jader lze vytvrzovat pouze povrchovou skořepinu, čímž se usnadní vytloukání jader po odlití.

Pro výrobu jádra, které bude použito v praktické části, je výhodnější použití metody 3D tisku. Kdyby se toto jádro vyrábělo konvenčním způsobem, muselo by se vyrobit více jaderníků s tvary jednotlivých částí jádra, které by následně musely být zkompleťovány pomocí lepení. Výroba tohoto jádra by byla oproti vytištění velice pracná a časově náročná.

5 Experimentální část

Experimentální část byla vypracována ve spolupráci se společností Modelárna LIAZ spol. s. r. o., která sídlí v Liberci. Hlavní činností této firmy je vývoj, konstrukce a výroba dílů, nástrojů a přípravků pro automobilový, energetický a letecký průmysl. Firma disponuje 3D tiskárnou s progresivní technologií sandprint, tedy technologií 3D tisku pískových forem a jader pro odlévání kovů.

Náplní experimentální části bylo navrhnout a vymodelovat zkušební model odlitku s jádrem malého průměru. Cílem bylo zjistit závislost vývoje plynů na objemu jádra. V praxi je problém s výskytem plynů u rozměrných jader. Z ekonomických důvodů byl pro tento experiment navržen zkušební model, který by zajistil velkou plochu jádra, aby docházelo k co největšímu uvolnění plynů do odlitků. Z tohoto důvodu byl navržen odlitek tvaru topného tělesa s vnitřní dutinou, která prochází skrz celý odlitek (viz obrázek 17). Toto jádro bylo navrženo relativně dlouhé a malého průměru, aby plocha jádra byla co nejvyšší. Tvar jádra je typický pro výrobu 3D tiskem, konvenčními způsoby by byla výroba složitá (viz kapitola 4).

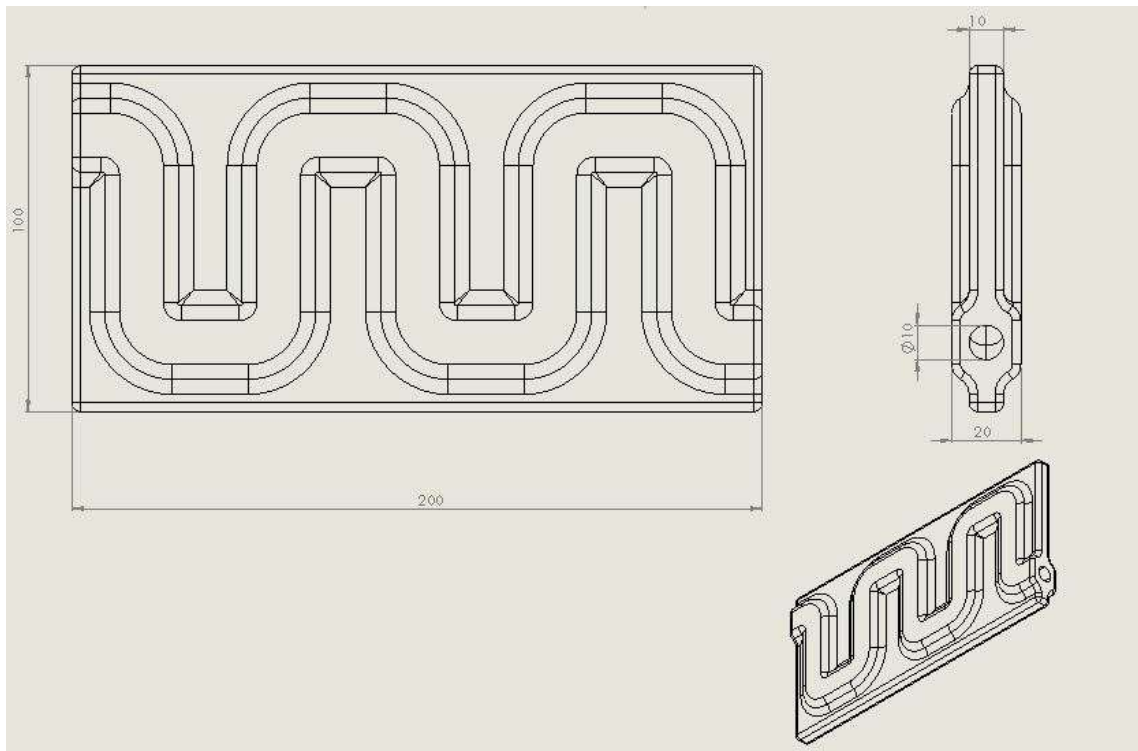
Pro vytvořený model odlitku byla navržena vtoková soustava s nálitky, na které byla následně provedena simulace tuhnutí. Po vyhodnocení simulace musely být optimalizovány tvary a velikosti nálitků. Během optimalizace tvaru bylo vytvořeno několik variant. Pro tuto práci byla vybrána již optimalizovaná varianta. K tomuto účelu byl použit program NovaFlow od společnosti Novacast, kterým je vybavena počítačová učebna v ústavu Strojírenské technologie.

Po optimalizaci byla vymodelována forma a jádro. Tato soustava byla fyzicky vytištěna ve společnosti Modelárna LIAZ spol. s. r. o. Celkově byly vytištěny 3 kusy forem. Pro experimentální část byly odlity dvě formy, aby bylo možné výsledky mezi sebou porovnat. Odlévaným materiálem byla hliníková slitina AlSi10Mg0,4. Po odlití byly na odlitku posuzovány vady. Pro zjištění výskytu plynů v odlitku byly vyhotoveny metalografické výbrusy.

Pro zjištění výskytu plynů ve formě a jádře byla provedena simulace v programu Magmasoft, který nabízí modul pro analýzu vývoje plynů. Tímto modulem program NovaFlow nedisponuje. Po získání výsledků simulace byly obě simulace porovnány a následně i srovnány s odlitkem.

5.1 Návrh modelu

Pro provedení experimentu byl vytvořen model odlitku připomínající topné těleso. Velikost odlitku je 100 x 200 x 20 mm. Tato velikost byla zvolena z ekonomických důvodů. Tvar tohoto odlitku byl navržen tak, aby vnitřní jádro mělo co největší styčnou plochu. Tvar jádra je relativně komplikovaný, proto je určený pro tento způsob výroby.



Obrázek 17 Rozměry odlitku

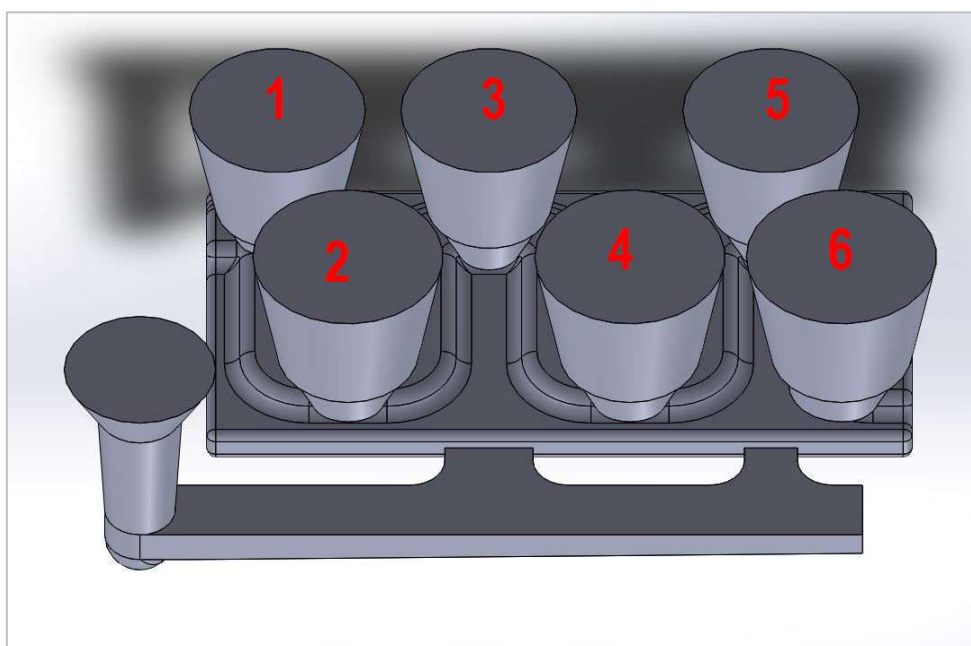
Tento odlitek (viz obrázek 17) byl navržen s vnitřní dutinou, kterou při odlévání vytvoří jádro o průměru 10 mm a délce 540 mm. Jádro je opatřené známkami (viz obrázek 18) pro usazení do formy. Znamky jsou čtvercového průřezu 10 x 10 mm, aby se zamezilo protočení jádra ve formě při odlévání. Délka známky je 25 mm.



Obrázek 18 Jádno

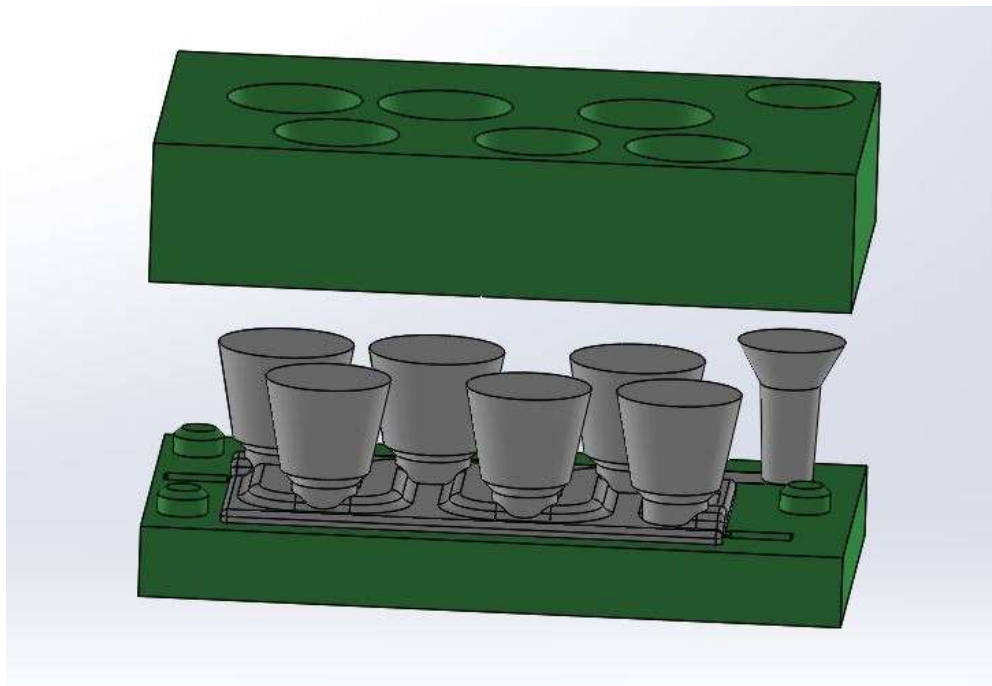
Na odlitek bylo navrženo 6 náliček, které slouží k usměrnění tuhnutí kovu a k doplňování kovu při tuhnutí. Dále byla navržena vtoková soustava se dvěma zářezy o obdélníkovém průřezu 25 x 5 mm. Pro lepší orientaci byly náličky očíslovány (viz obrázek 19).

V rámci první fáze bylo nutné udělat optimalizaci modelu. Z pohledu tuhnutí je tento model relativně složitý, proto byla vytvořena první simulace, na základě které byla určena místa možného vzniku potenciálních vad. Výchozí varianta měla pouze tři náličky rozmístěné rovnoměrně na modelu. U této varianty nebylo dosaženo ideálního tuhnutí. V tělese odlitku se objevovalo mnoho vad. Během optimalizace modelu bylo provedeno zhruba 28 různých návrhů a simulací. Postupnou optimalizací bylo dosaženo finální verze (viz obrázek 19).



Obrázek 19 Odlitek s náličky a vtok. soustavou

Následně pak byl od celého odlitku odvozen profil formy a složena sestava o rozměrech 280 x 170 x 70 mm.



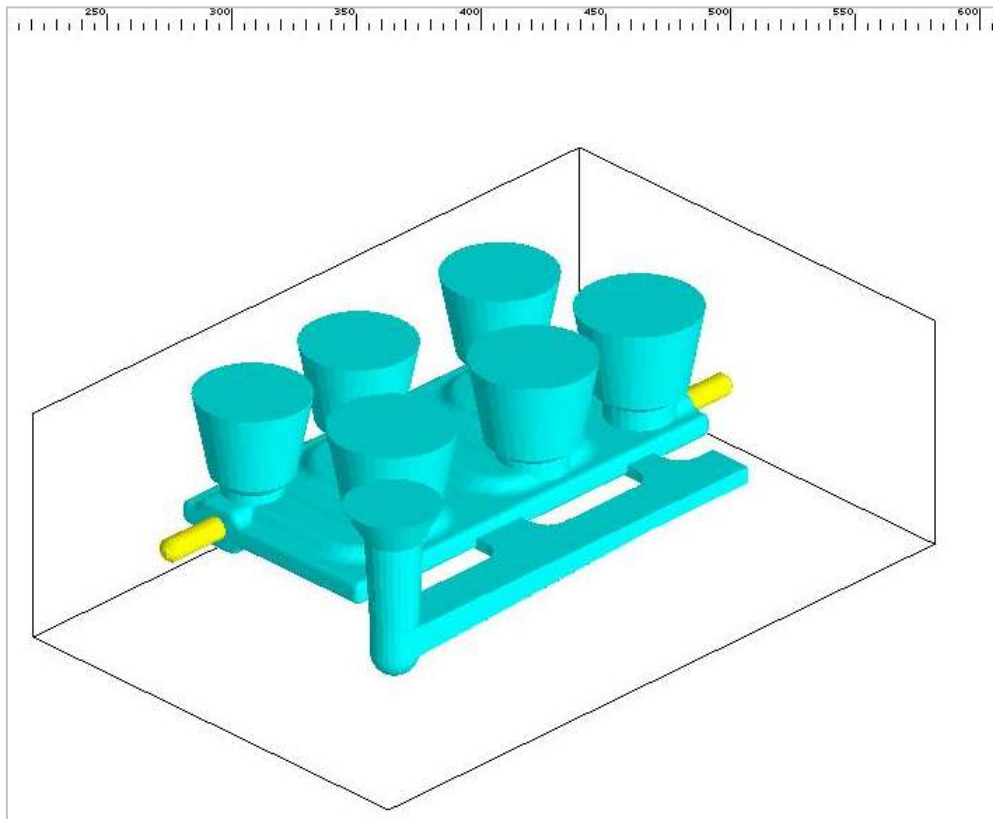
Obrázek 20 Sestava

5.2 Simulace tuhnutí NovaFlow

Vstupními daty pro simulaci byl model odlitku s nálitky a vtokovou soustavou, který byl vytvořen v programu SolidWorks. Pomocí přenosového formátu. STEP byla do softwaru Nowaflow nahrána geometrie. Ve stejném formátu bylo přeneseno i jádro. Po nahrání geometrie následovalo vytvoření sítě. V tomto kroku dojde k obalení geometrie odlitku formovacím materiálem. Jako formovací materiál byla použita furanová směs o tloušťce 25 mm.

Vstupní podmínky simulace:

- materiál jádra – furanová směs, teplota 20 °C,
- materiál formy – furanová směs, teplota 20 °C,
- materiál odlitku – AlSi10Mg,
- lící teplota – 720 °C.

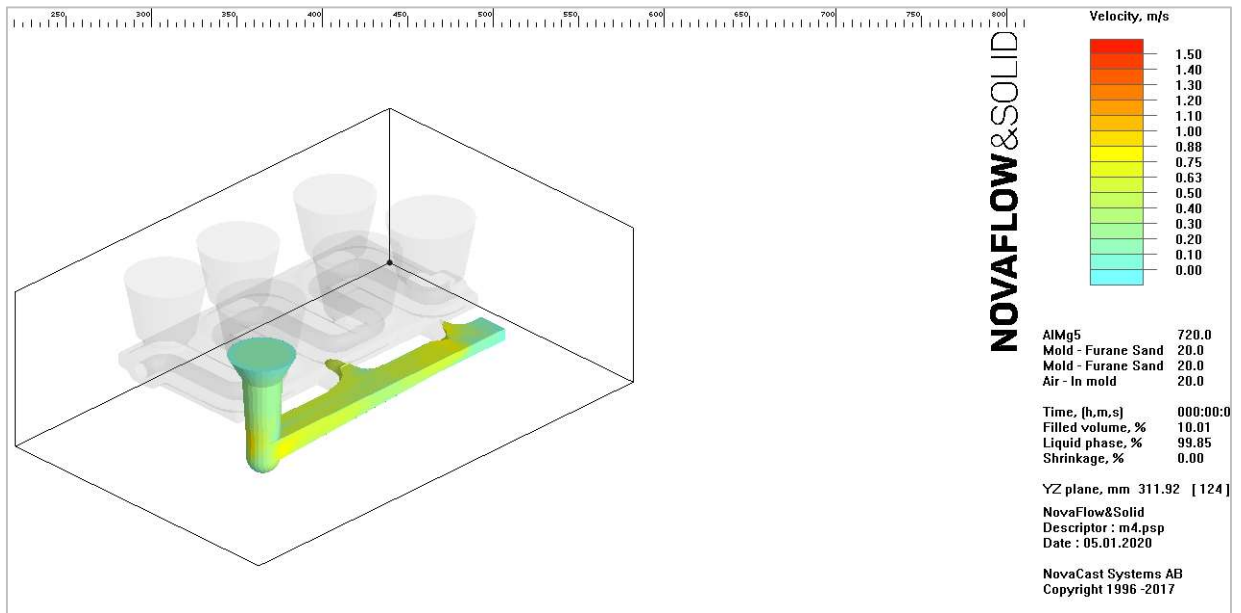


Obrázek 21 Model odlitku s jádrem v prostředí programu NovaFlow

Pro spuštění simulace bylo nezbytné zadat vstupní podmínky. Materiál odlitku byl zvolen stejný jako v Modelárně Liaz, kde byla forma odlita. Byl to materiál AlSi10Mg. Lící teplota byla nastavena na 720 °C. Jako materiál formy a jádra byla zvolena furanová směs o teplotě formy 20 °C. Okolní vzduch v dutinách formy byl taktéž nastaven na teplotu 20 °C.

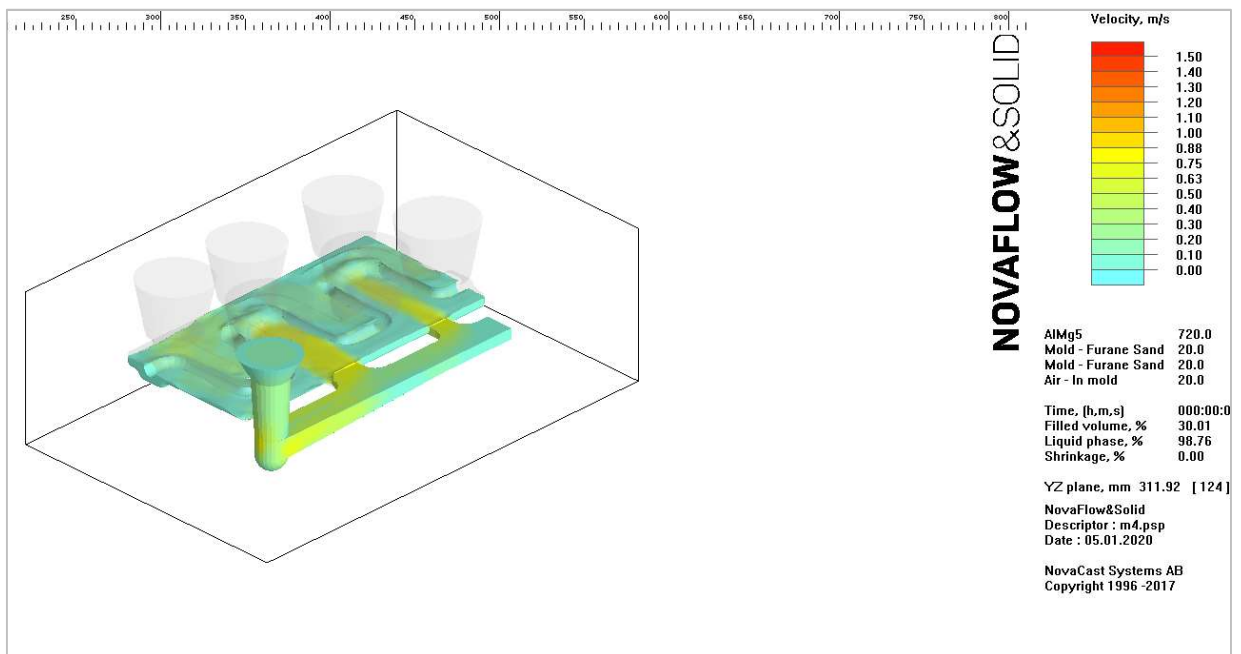
Po nastavení podmínek byla spuštěna simulace tuhnutí, jejímž cílem bylo usměrnit tuhnutí z odlitku do nálitku. Dalším cílem simulace bylo odstranit staženiny z odlitku a lokalizovat staženiny v nálitcích. Během simulací byla několikrát pozměněna geometrie a umístění nálitků tak, aby byla nalezena nejvhodnější varianta.

V této práci je prezentována poslední verze simulace. Následně byla spuštěna simulace plnění formy. Takto odsimulované návrhy formy byly následně poslány do firmy, ve které došlo k výrobě formy a následnému odlití.

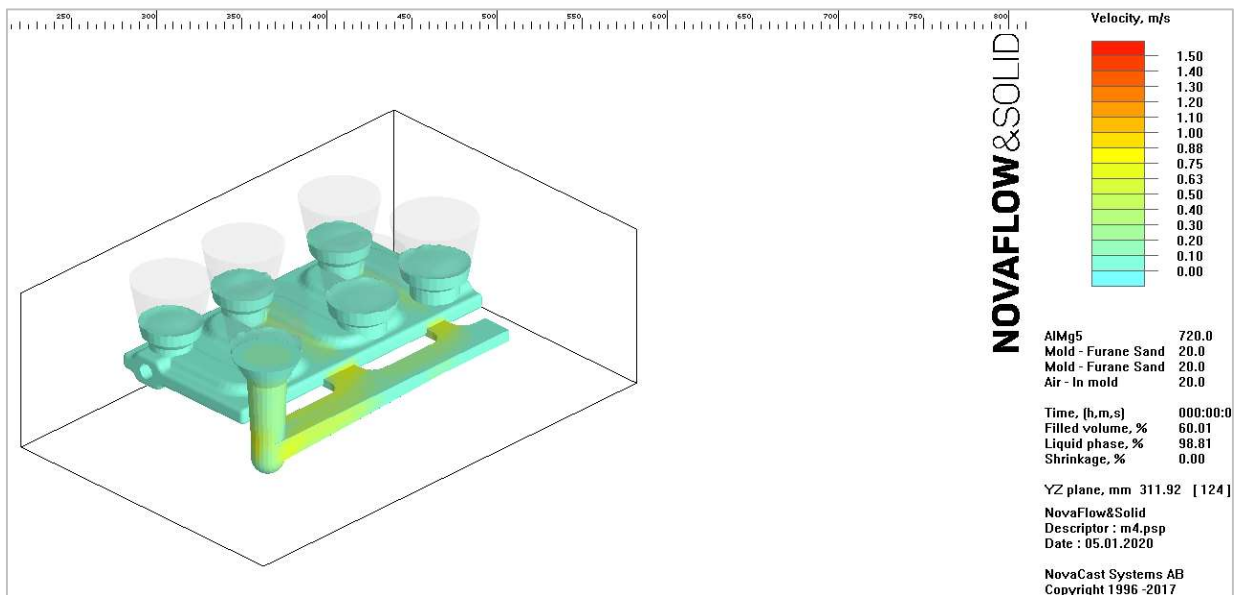


Obrázek 22 Plnění 10%

Na obrázcích 22, 23 a 24 je zobrazen průběh plnění formy v programu NovaFlow. Ze simulace je patrné, že plnění probíhá stejnoměrně ve všech nálitcích.

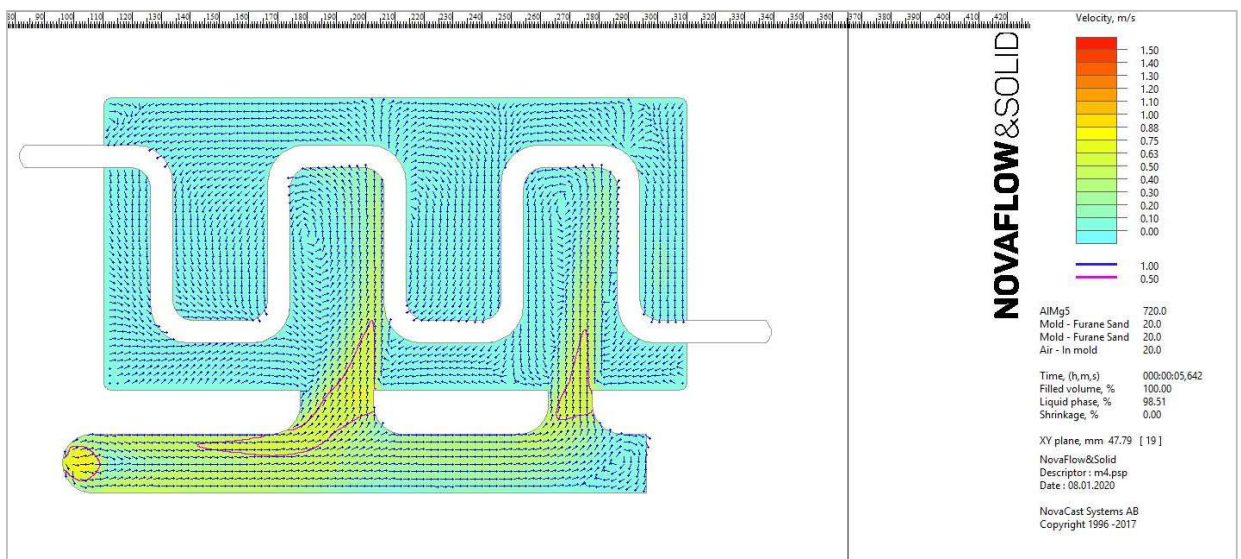


Obrázek 23 Plnění 30%

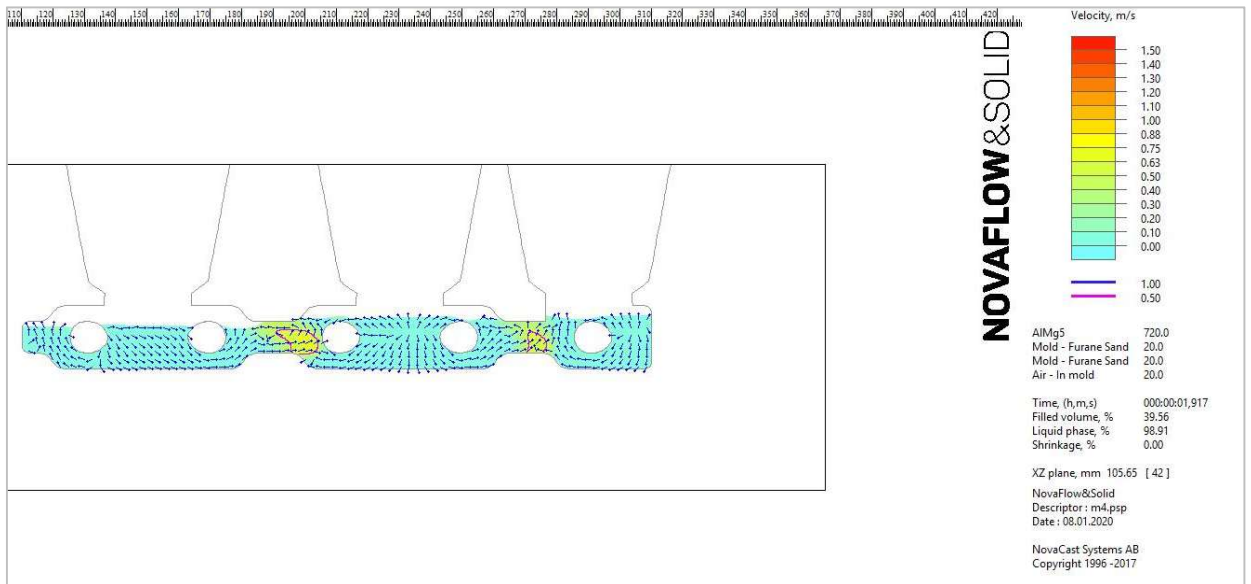


Obrázek 24 Plnění 60%

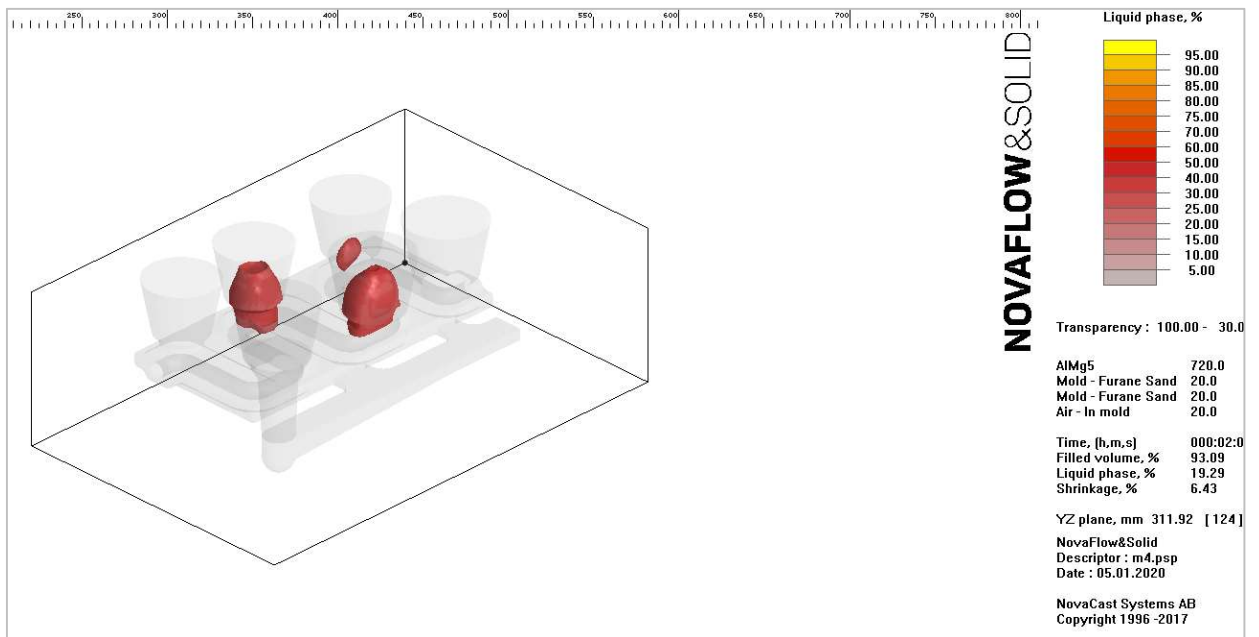
Na obrázku 23 jsou znázorněny vektory při plnění. Z tohoto obrázku je zřejmé, že pohyb vektorů je ustálený.



Obrázek 25 Proudění taveniny

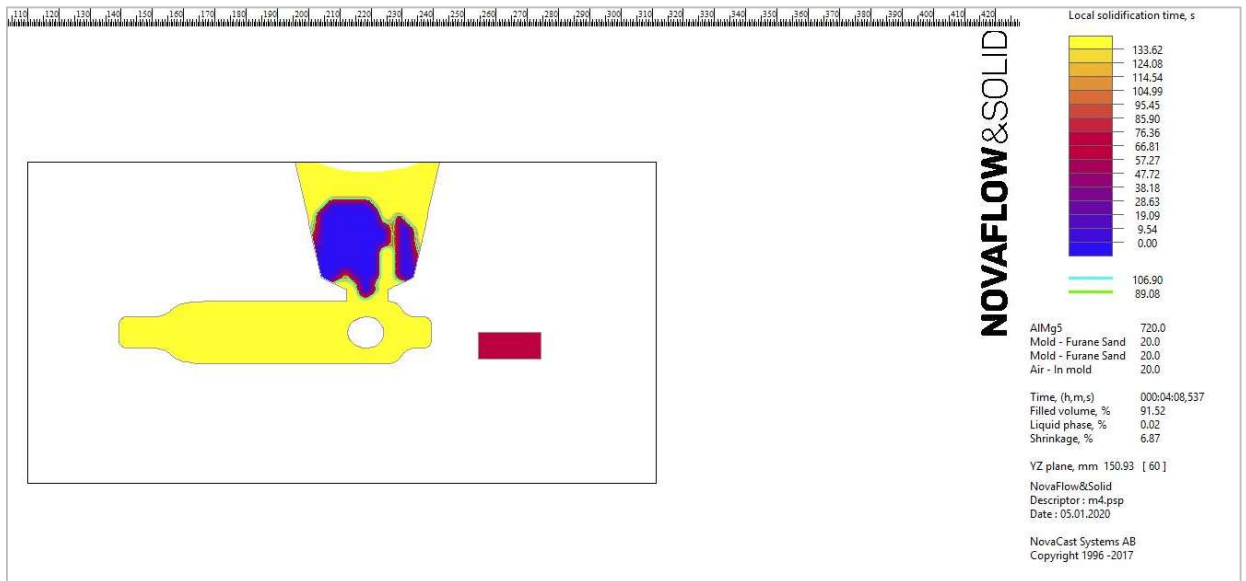


Obrázek 26 Proudění taveniny – řez nálitky



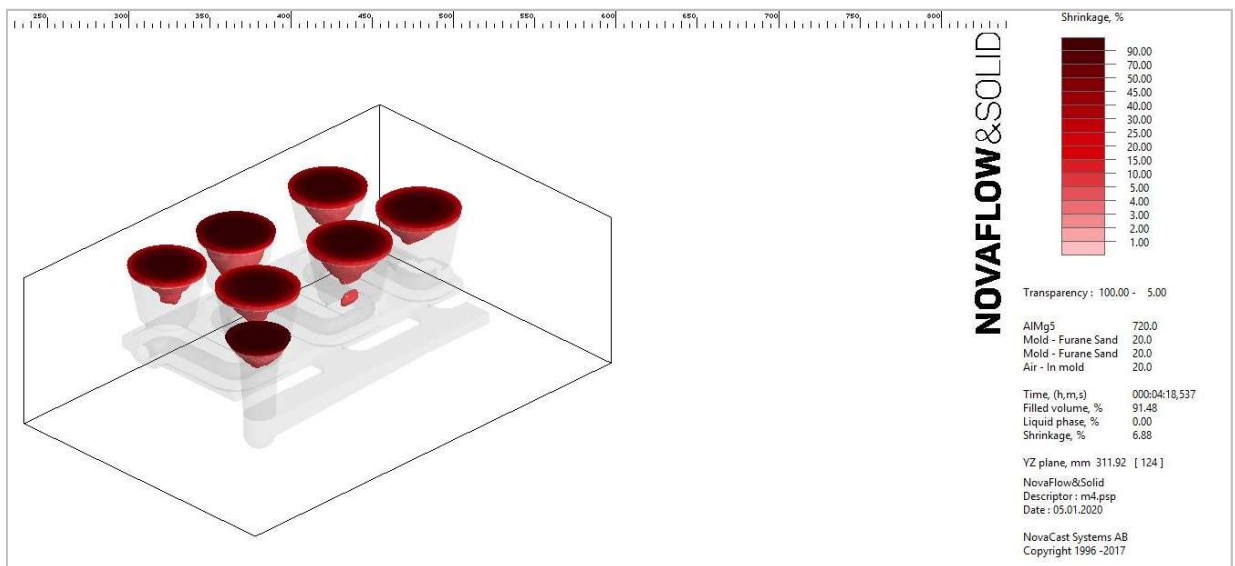
Obrázek 27 Poslední místo tuhnutí

Tuhnutí postupuje od spodní části odlitku k nálitkům. Na obrázku 27 jsou vidět poslední místa tuhnutí. Tato místa se nacházejí ve spodní části nálitku číslo 3 a 4. Finální vady jsou podle této simulace definovány v místech posledního tuhnutí (viz obrázek 27).



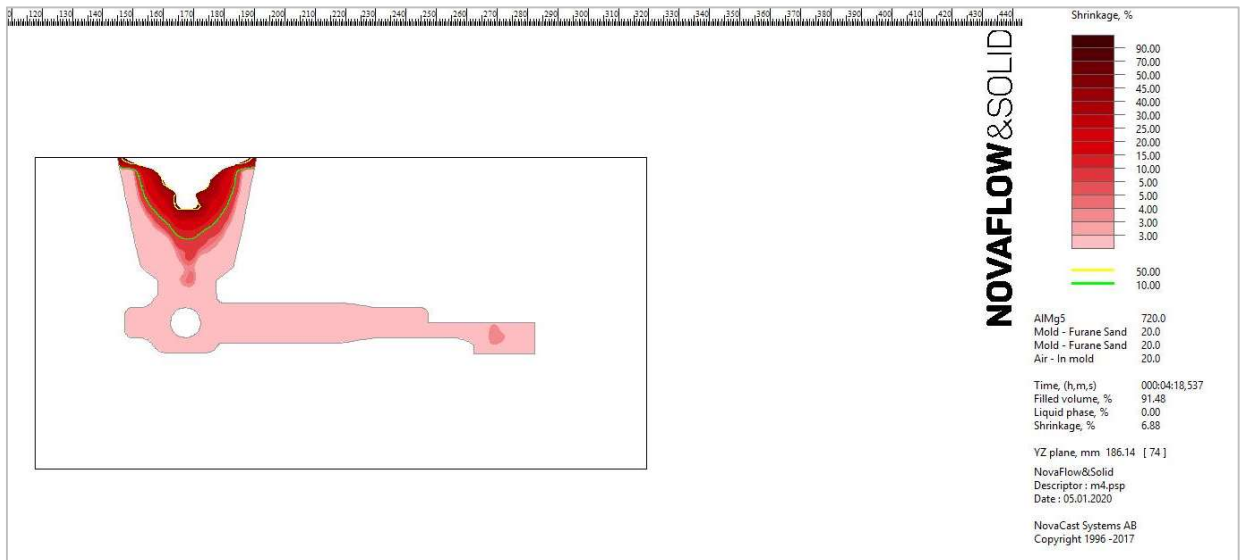
Obrázek 28 Řez nálitkem číslo 4

Na obrázku 28 je vyobrazen řez nálitku číslo 4 při tuhnutí. Z obrázku je patrné, že poslední místo tuhnutí zasahuje do krčku nálitku, ale je vytaženo mimo odlitek.



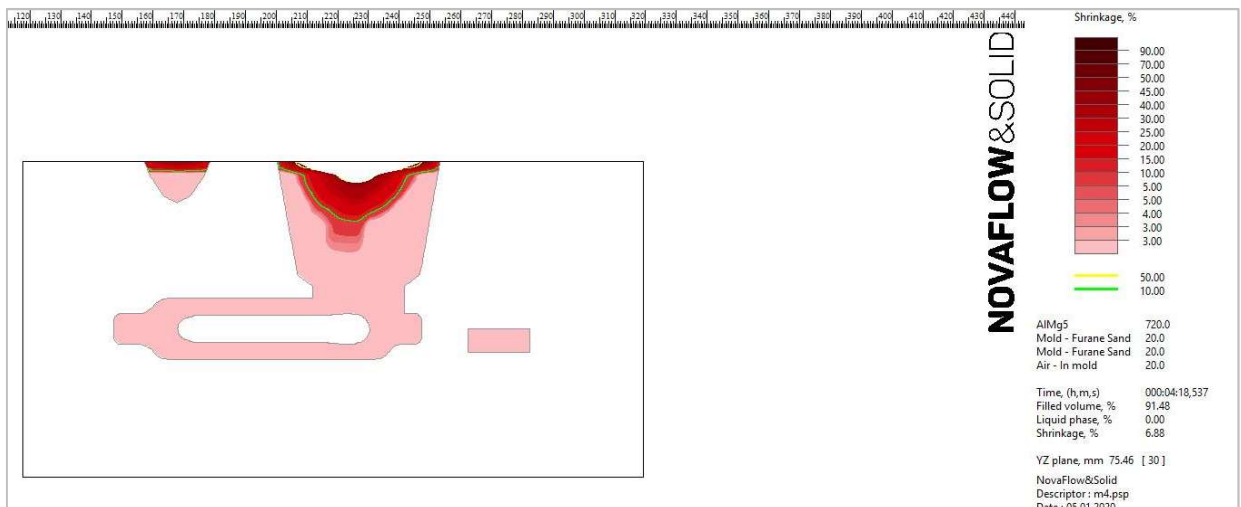
Obrázek 29 Výskyt staženin v odlitku

Z obrázku 29 je patrné, že se podařilo odstranit staženiny z odlitku. Jediné staženiny, které se v sestavě nacházejí, jsou v nálitkách. Z toho nejvíce jich je v nálitku 3, 4 a 5.



Obrázek 30 Staženina v nálitku 3

Na obrázku 30 je vyobrazena staženina v nálitku číslo 3. Staženiny by měly zasahovat maximálně do 2/3 nálitku, k čemuž v tomto případě nedochází. Navíc je zde možnost výskytu staženiny i ve spodní části nálitku.

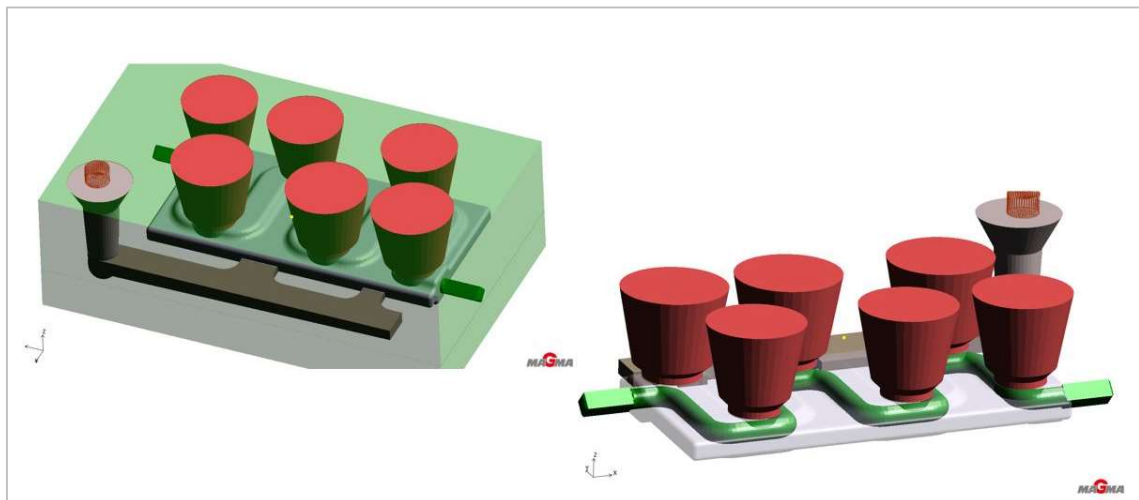


Obrázek 31 Staženina v nálitku 4

5.3 Simulace Magmasoft

Pro zjištění výskytu plynů ve formě a jádře byla provedena simulace v programu Magmasoft, který nabízí modul pro analýzu vývoje plynů. Tento modul není v programu NovaFlow obsažen. K provedení simulace došlo ve společnosti Magma GmbH Pardubice.

Na obrázku 32 je vidět nastavení vstupní geometrie pro simulaci v programu Magmasoft.

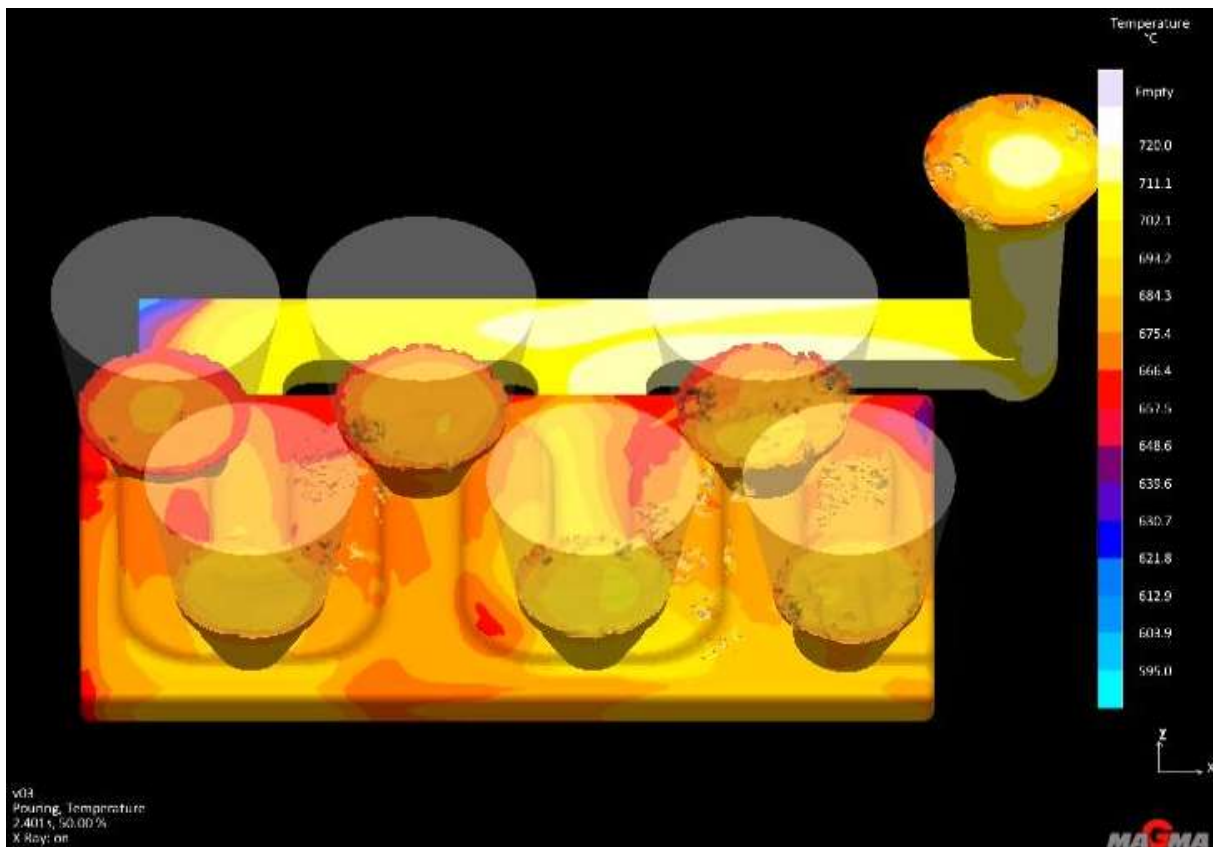


Obrázek 32 Nastavení geometrie pro simulaci v programu Magmasoft

Material	Mat ID	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Aluminum Composition			Feeding Effectivity (%)
> Cast Alloy		User/43100-ALSi10Mg-grav	720.0	Cr (Chromium)	0.0	%	40.0
				Cu (Copper)	0.028	%	
				Fe (Iron)	0.345	%	
				H (Hydrogen)	0.0	ml/100g	
				Mg (Magnesium)	0.3	%	
				Mn (Manganese)	0.228	%	
				Na (Sodium)	0.0	%	
				Ni (Nickel)	0.092	%	
				P (Phosphorus)	0.0	%	
				Sb (Antimony)	0.0	%	
				Si (Silicon)	10.082	%	
				Sr (Strontium)	0.002	%	
				Ti (Titanium)	0.14	%	
				Zn (Zinc)	0.036	%	
Material	Mat ID	Database/File name	Initial Temperature (°C)				
Core							
Core	horni_dil	MAGMA/Furan-mold	20.0				
Core	spodni_dil	MAGMA/Furan-mold	20.0				
Core	vnitri_jadro	MAGMA/Furan-mold	20.0				

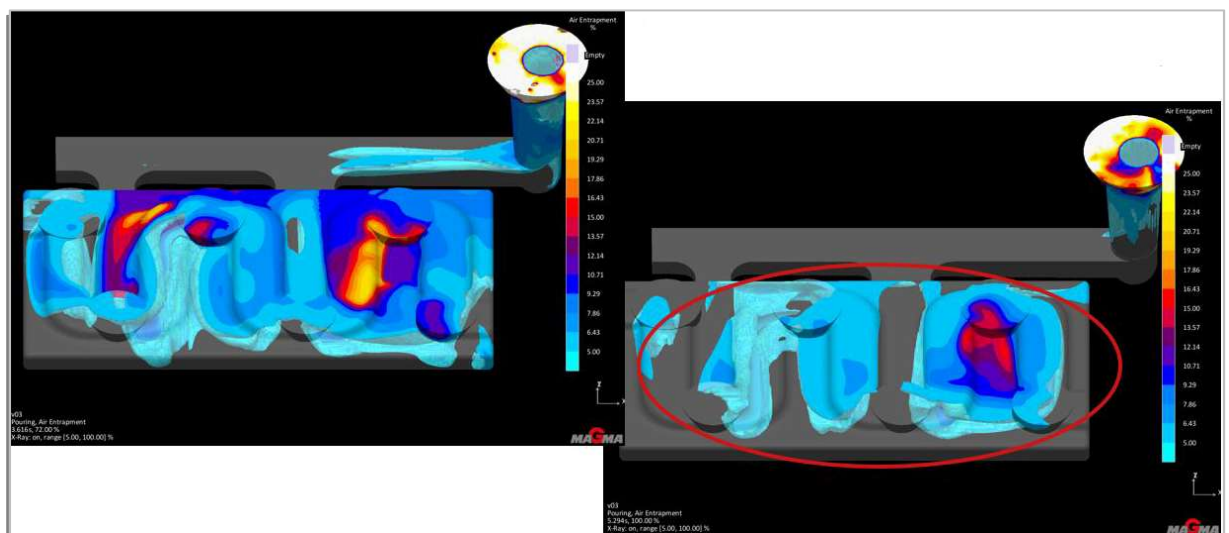
Obrázek 33 Použité materiály

Na obrázku 33 jsou znázorněny vstupní informace pro simulaci, v níž byla pro formu a vnitřní jádro použita furanová směs. Jako odlévaný materiál byla použita hliníková slitina AlSi10Mg se složením viz obrázek 33.



Obrázek 34 Teplota taveniny během odlévání

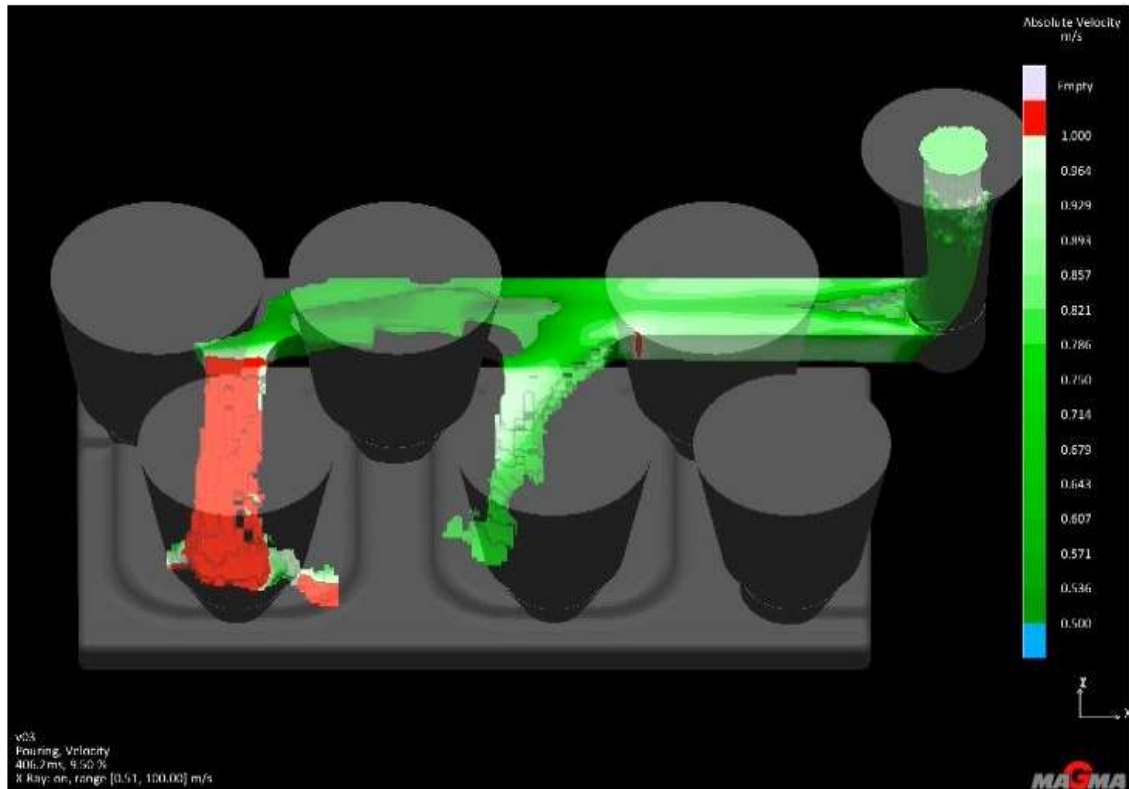
Na obrázku 34 je zobrazena teplota taveniny během plnění. Teplota se pohybuje okolo 700 °C. Tato teplota je dostatečně vysoká.



Obrázek 35 Zahlčený vzduch v tavenině

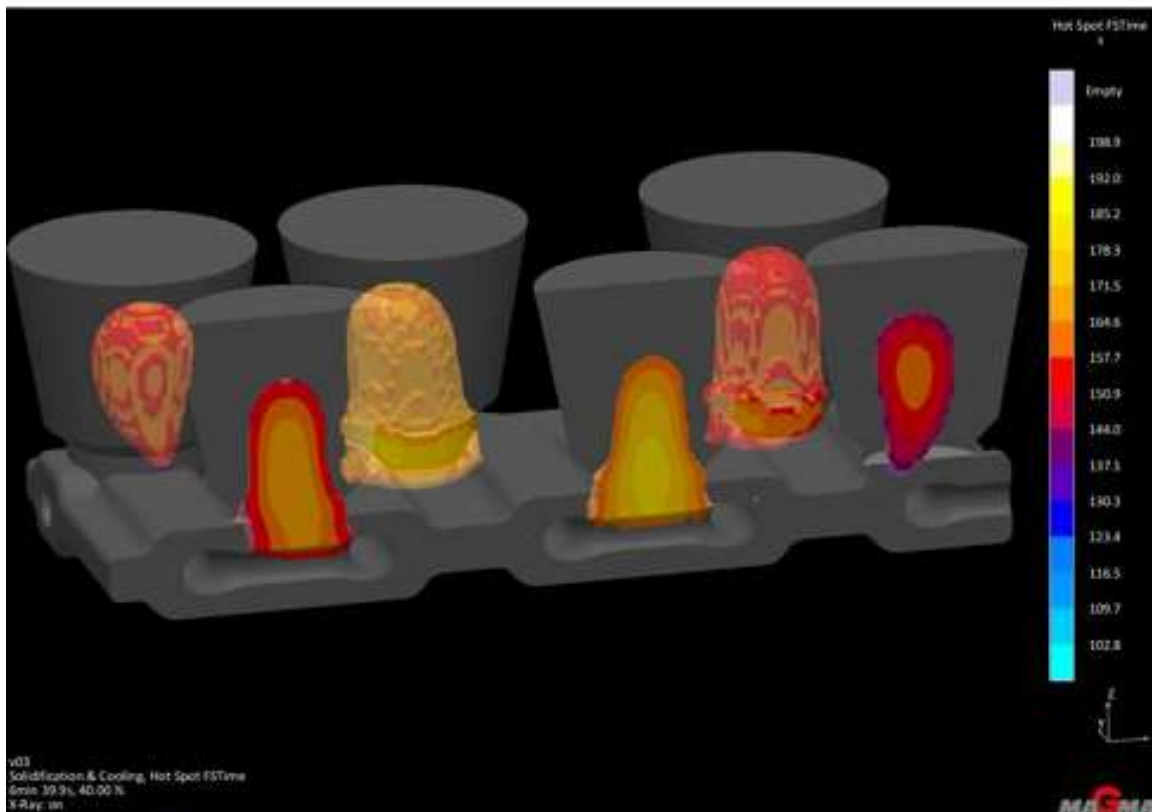
Byla provedena simulace proudění vzduchu v tavenině, ze které vyplynulo, že v odlitku jsou místa, ve kterých dochází k zahlcování vzduchu do taveniny. Z toho vyplývá velké riziko v podobě možného zůstávání velkého objemu zahlčeného vzduchu v odlitku po

dokončení plnění. Tento problém by bylo možné odstranit úpravou vtokové soustavy, aby se plnění zklidnilo. Na obrázku 35 jsou zobrazena místa, kde reálně hrozí výskyt vzduchové porozity.

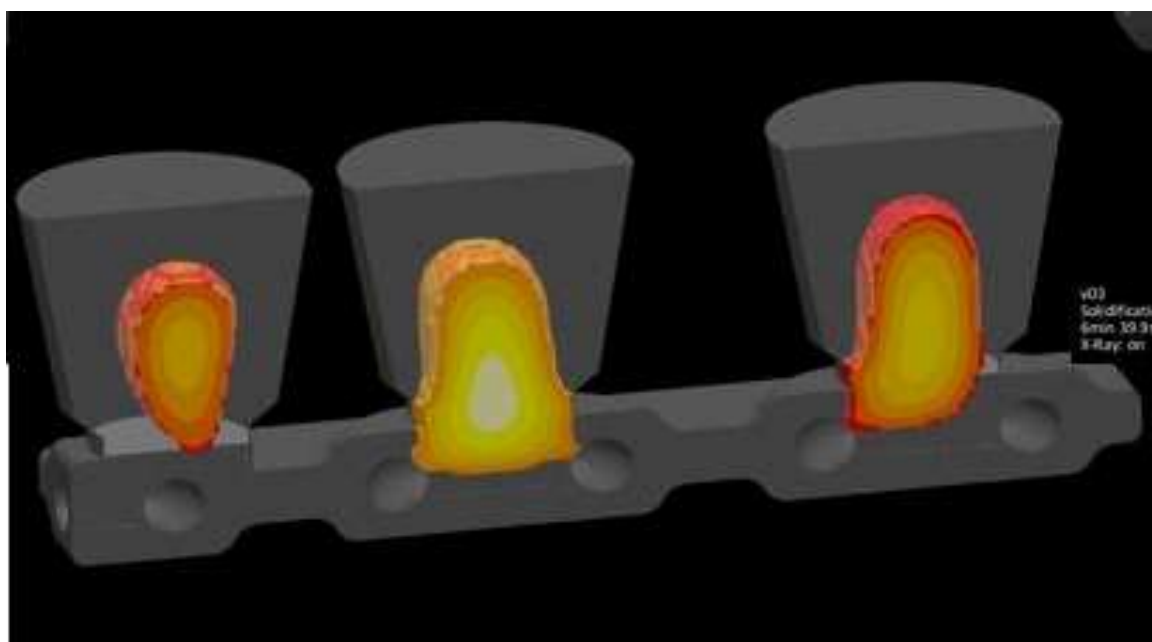


Obrázek 36 Rychlost proudění taveniny

Na obrázku 36 je znázorněna rychlost proudění taveniny. Zelená barva popisuje oblasti, ve kterých rychlost taveniny překračuje 0,5 m/s. Červená barva popisuje místa s rychlostí nad 1 m/s. Z obrázku je patrné, že rychlost proudění taveniny je poměrně vysoká. Toto chování má za následek zvýšené zahlcování vzduchu do taveniny.



Obrázek 37 Teplotní uzly

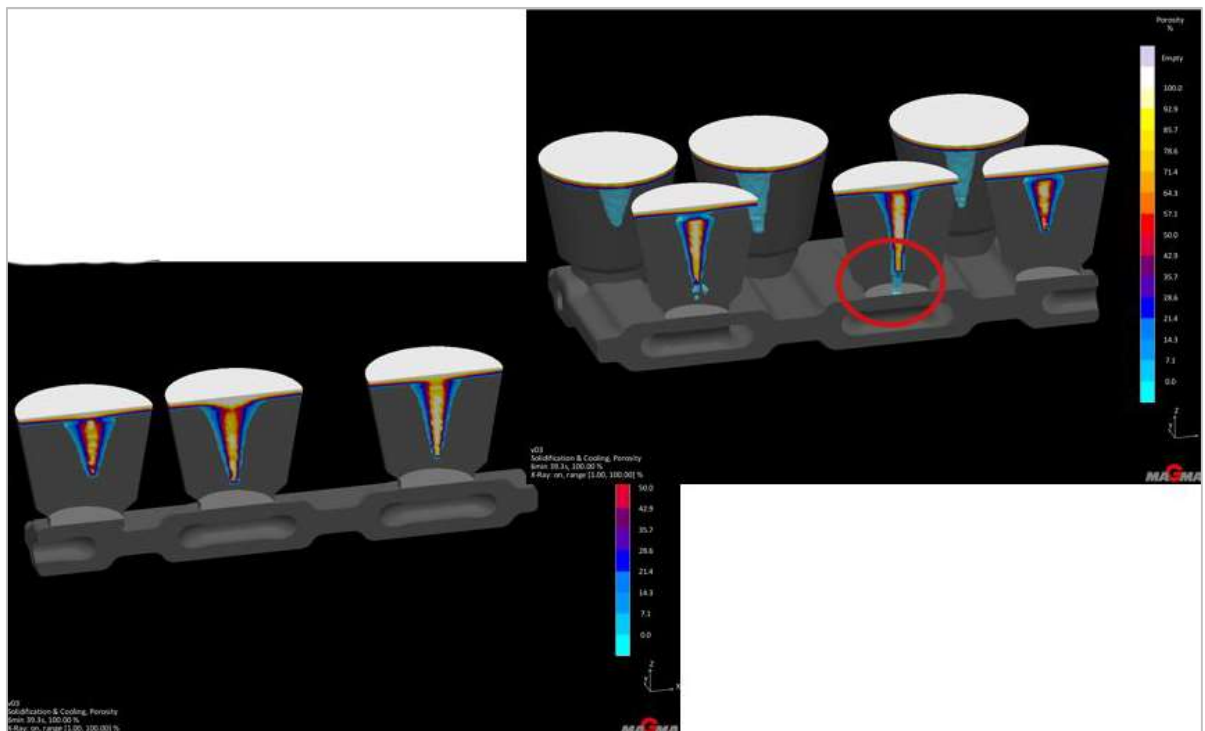


Obrázek 38 Teplotní uzly řez

Ze simulace průběhu tuhnutí byla zjištěna místa, která tuhnou naposledy. Tato místa se vyskytují mezi odlítkem a nálitky. Toto umístění je rizikové pro výskyt ředin pod nálitky.

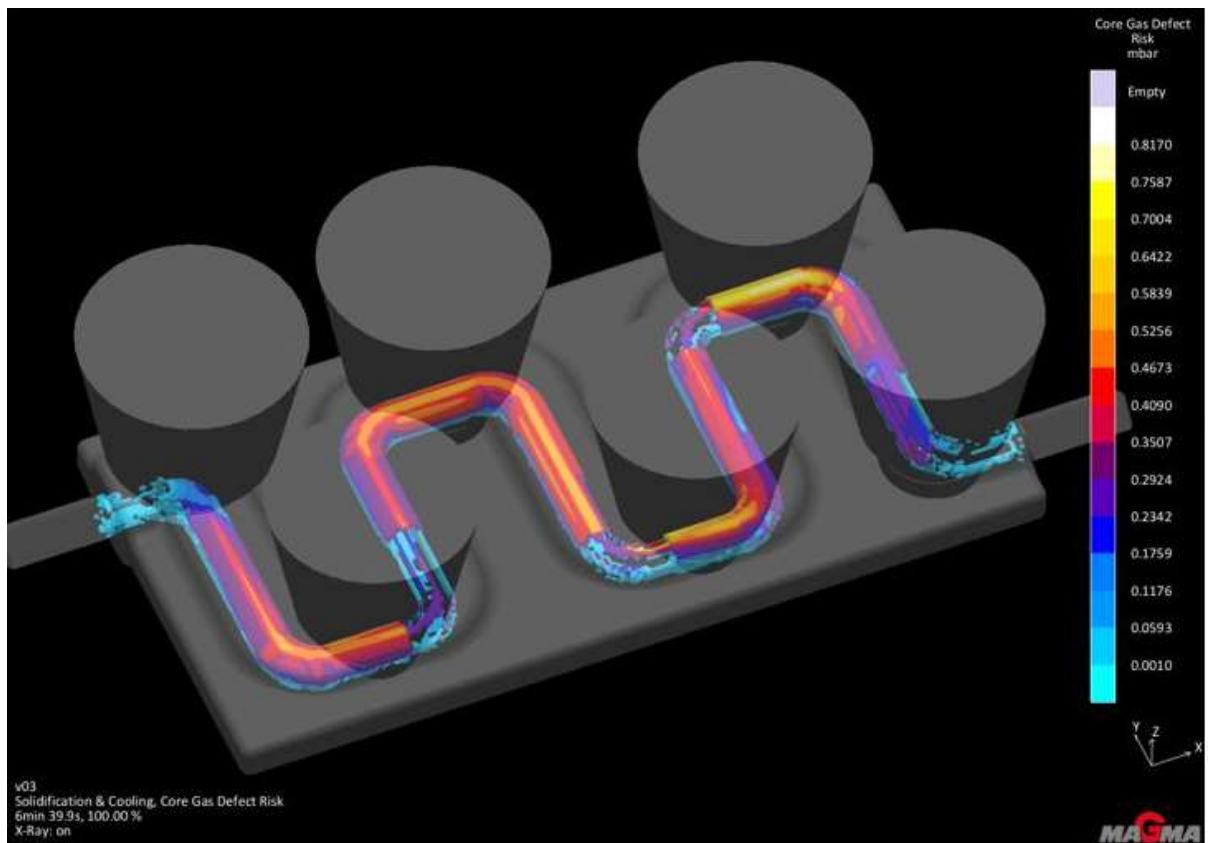
Z této simulace je patrné, že poslední oblast tuhnutí je pod nálitky, což je rozdílné oproti simulaci z NovaFlow, ve které bylo místo posledního tuhnutí ve spodní části nálitku.

Z obrázku 37 a 38 je vidět, že přímo v odlitku se žádné teplotní uzly nevyskytují. Teplotní uzly ale zasahují z nálitků až do odlitku. To v těchto místech může vést k výskytu mikroředin.



Obrázek 39 Výskyt ředin

Ze simulace bylo zjištěno, že u některých nálitků zasahuje oblast výskytu ředin až do odlitku (viz obrázek 39).



Obrázek 40 Riziko uvolnění plynu z jádra

Na obrázku 40 jsou popsány oblasti, kde může docházet k uvolnění plynu z jádra do odlitku. Simulace porovnává tlak plynu v jádře s metalostatickým tlakem kolem pískového jádra. Pokud v některé části jádra překročí tlak plynu metalostatický tlak, objeví se riziko.

U této sestavy je tlak plynu v jádře vyšší o 0,8 mbar, což značí velice malé riziko vniknutí plynu do taveniny.

6 Tisk a odlití formy

Simulace popsané v kapitole 5.2 a 5.3 sloužily ke zjištění, zda se dají při výrobě tohoto zkušebního odlitku očekávat nějaké problémy s výskytem plynů a vad. Ze simulace vyplývá, že tuhnutí odlitku je relativně v pořádku. Simulace z Magmasoftu poukazuje jen na tepelné uzly, které zasahují z náličky do odlitku. V těchto místech je reálný výskyt staženin.

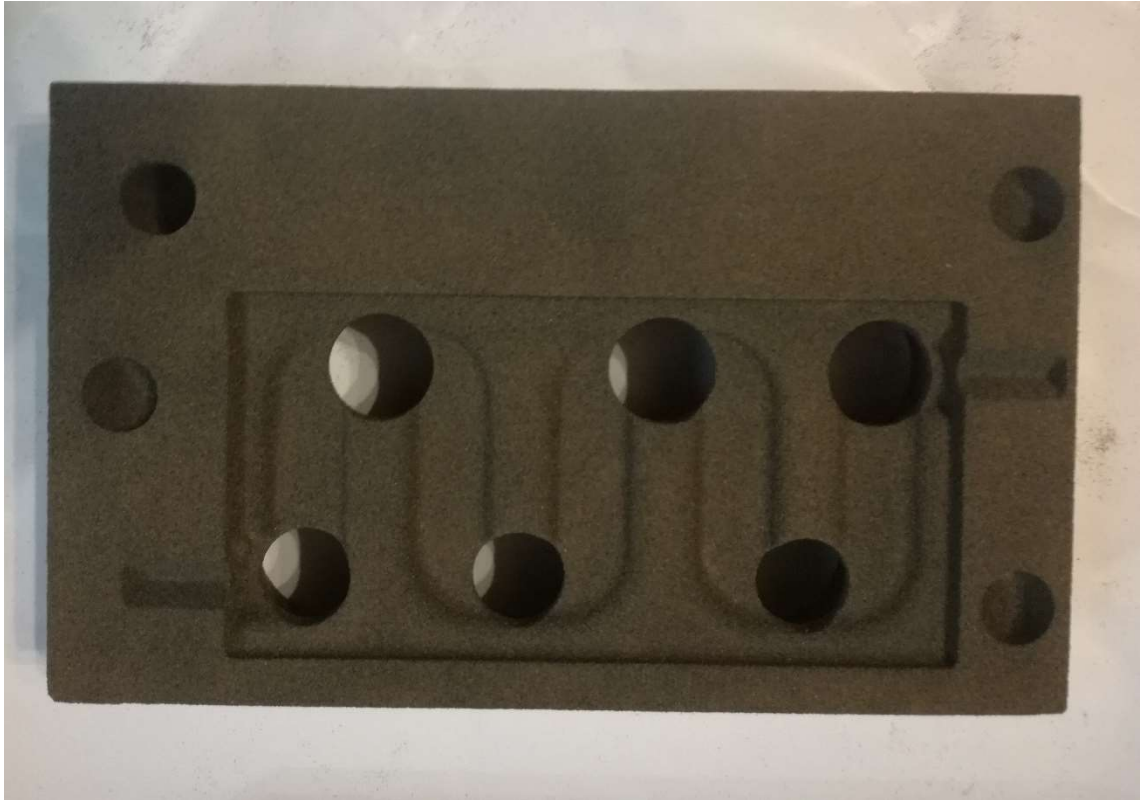
Pokud se v odlitku vyskytnou nějaké plyny, mohou být iniciovány buď z důvodu plnění, nebo mohou být iniciovány z jádra. Z tohoto důvodu je nutné provést experimentální odlití a odlitek následně vyhodnotit z pohledu výbrusů a vad.

Modelárna LIAZ spol. s r. o. disponuje 3D tiskárnou od společnosti ExOne (model S-MAX s furanovým pojivem). Tato tiskárna byla popsána v kapitole 2.6.2.

Po vymodelování jádra a formy i s vtokovou soustavou a náličky byl do Modelárny poslán soubor ve formátu .STL, který byl nahrán do tiskárny. Následně byly vtištěny 3 kusy formy. Jako formovací materiál byla použita furanová směs o zrnitosti písku 0,19 mm. Pevnost písku v ohybu je v rozmezí 180–220 N/cm², prodyšnost je 180–300 GP.



Obrázek 41 Spodní část formy s jádrem



Obrázek 42 Vrchní část formy



Obrázek 43 Jádro

Po vytištění a následném složení a zafixování formy byla forma odlita hliníkovou slitinou $AlSi10Mg0,4$. Slitina byla tavena v elektrické peci o objemu 500 kg, tavenina nebyla

naplyněna. Lící teplota byla přibližně 800 °C a odlití bylo provedeno pomocí naběrací lžice přímo z pece (viz obrázek 44).



Obrázek 44 Odlévání formy

Na obrázku 45 je vidět odlitá forma chladnoucí na vzduchu. Po ochlazení byl z formy vytlučen odlitek.



Obrázek 45 Odlitá forma

Na následujícím obrázku 46 je vidět už vytlučený zchlazený odlitek s nálitky a vtokovou soustavou. Po první vizuální kontrole nebyl nalezen žádný nedostatek. Kov vyplnil celou dutinu formy a odlitek nebyl poškozen.



Obrázek 46 Zchlazený odlitek



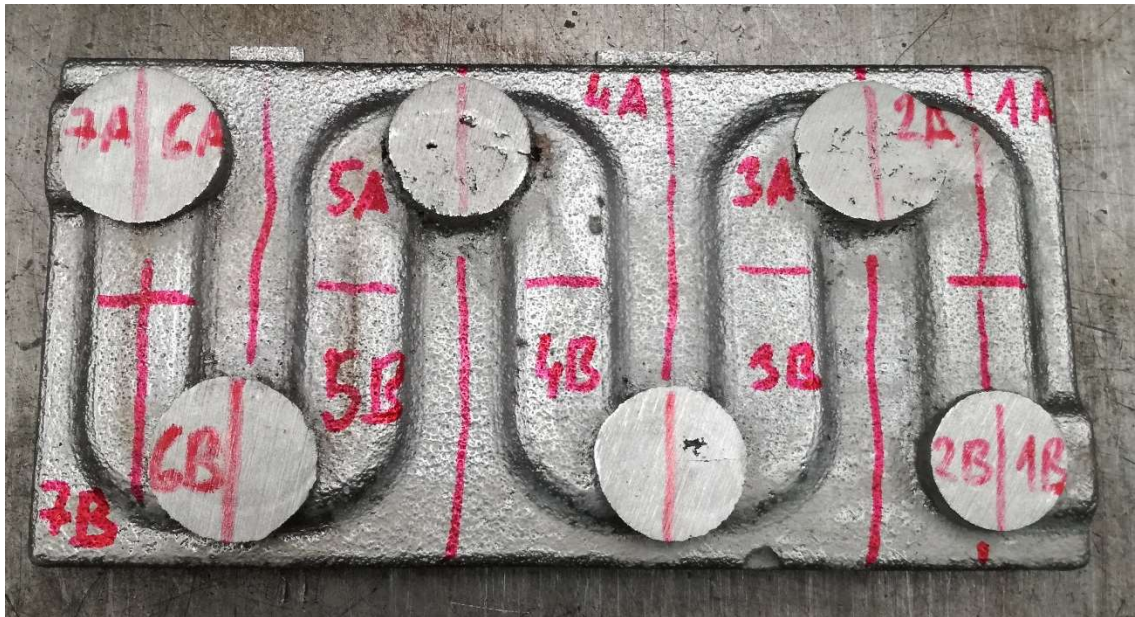
Obrázek 47 Spodní část odlitku

6.1 Odlitek 1

Dalším úkolem praktické části bylo vyhodnocení odlitku. Proto po vytlučení odlitku z formy následovalo odřezání vtokové soustavy a následně nálitků. Odlitek byl následně rozřezán dle nářezového plánu (viz obrázek 49).



Obrázek 48 Řezání odlitku



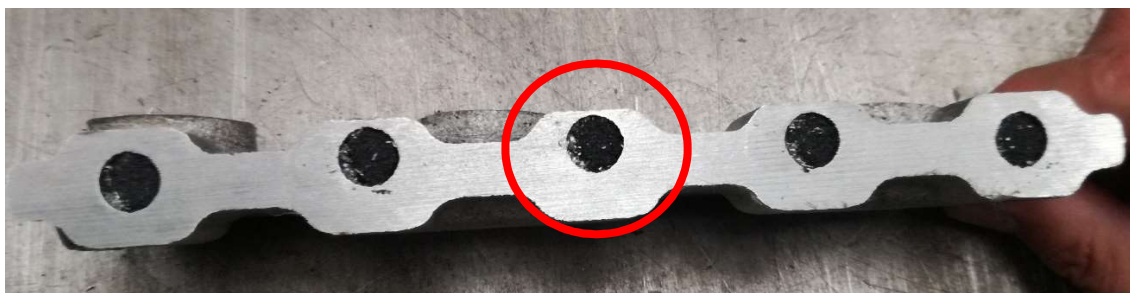
Obrázek 49 Nářezový plán

Po odřezání nálitků byla objevena první vada. Jak je vidět z obrázku 50, celistvost odlitku je narušena v místě pod nálitky 2 a 3, kde je prasklina v dutině vytvořené jádrem.



Obrázek 50 Vada odlitku

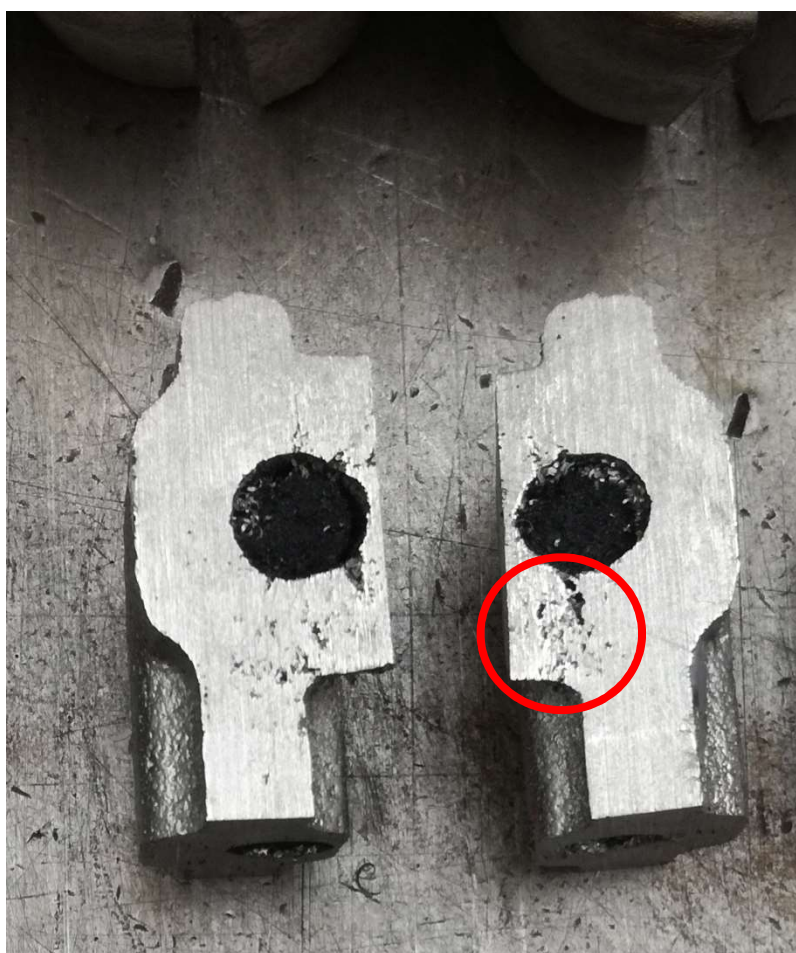
Tyto praskliny vznikly tím, že při plnění formy došlo k vyplavení jádra k horní části. Tuto teorii potvrzuje následující obrázek 51, na kterém je patrné, že tloušťka stěny je rozdílná. Přitom dutina byla konstruována uprostřed odlitku.



Obrázek 51 Tloušťka stěny odlitku

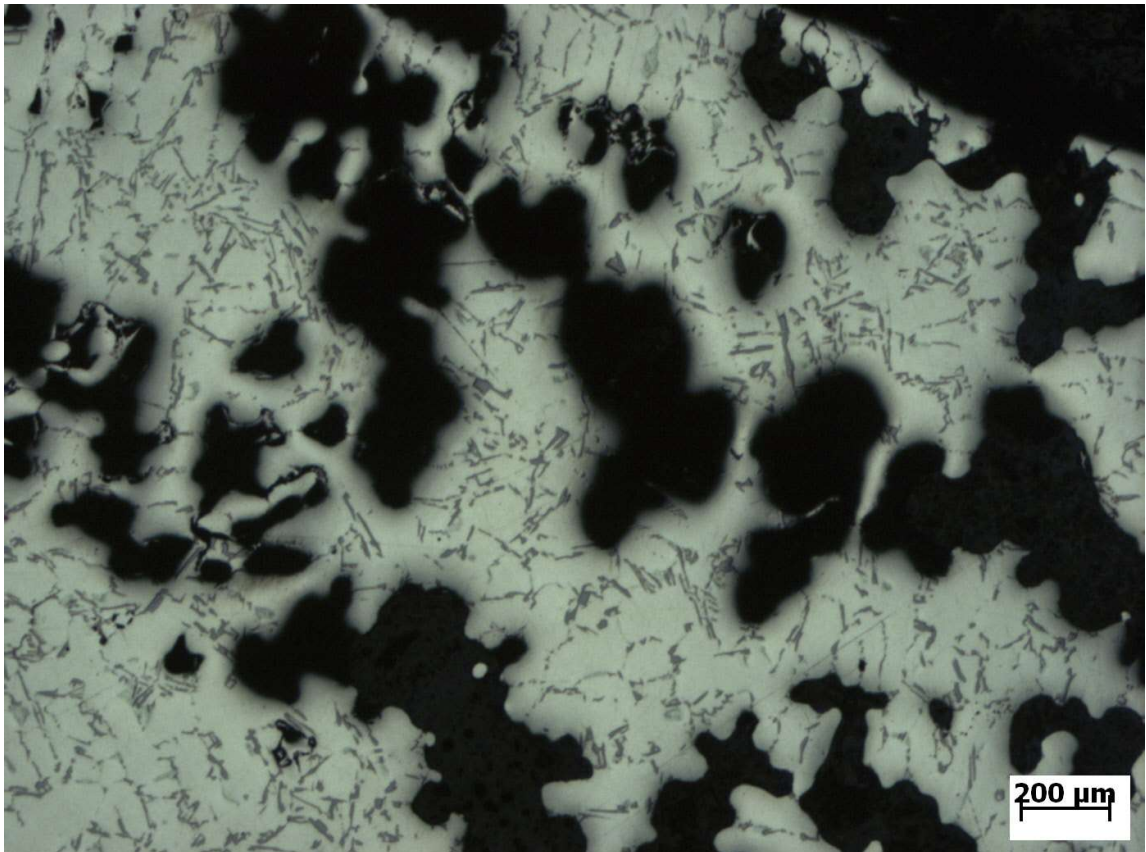
Po rozřezání odlitku byly vyhotoveny metalografické vzorky z určitých částí odlitku. Jak je vidět na obrázku 52, staženiny byly rozpoznatelné i bez zvětšení.

6.1.1 Vzorek 4A



Obrázek 52 Vzorek 4A

Na obrázku 53 je zobrazena makrostruktura vzorku 4A, kde jsou patrné vady typu staženin. Tento metalografický výbrus byl udělán v místě označeném na obrázku 52.



Obrázek 53 Makrostruktura 4A



Obrázek 54 Mikrostruktura 4A

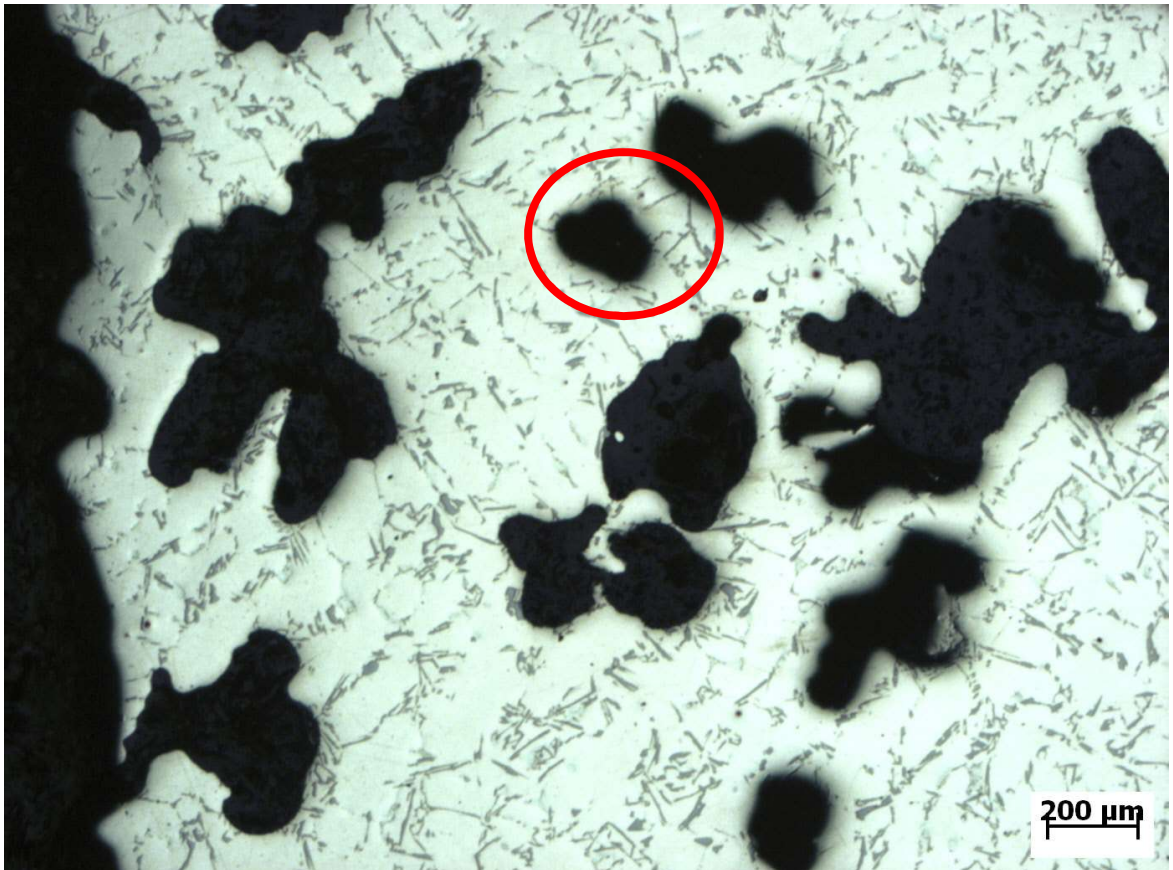
Na obrázku 53 jsou vyobrazeny vady. Většina těchto vad je typu mezidendritické staženiny. Na tomto obrázku není žádná vada typu bubliny, což znamená, že na tomto výbrusu se nepotvrdily vady způsobené plynem z jádra.

6.1.2 Vzorek 2A

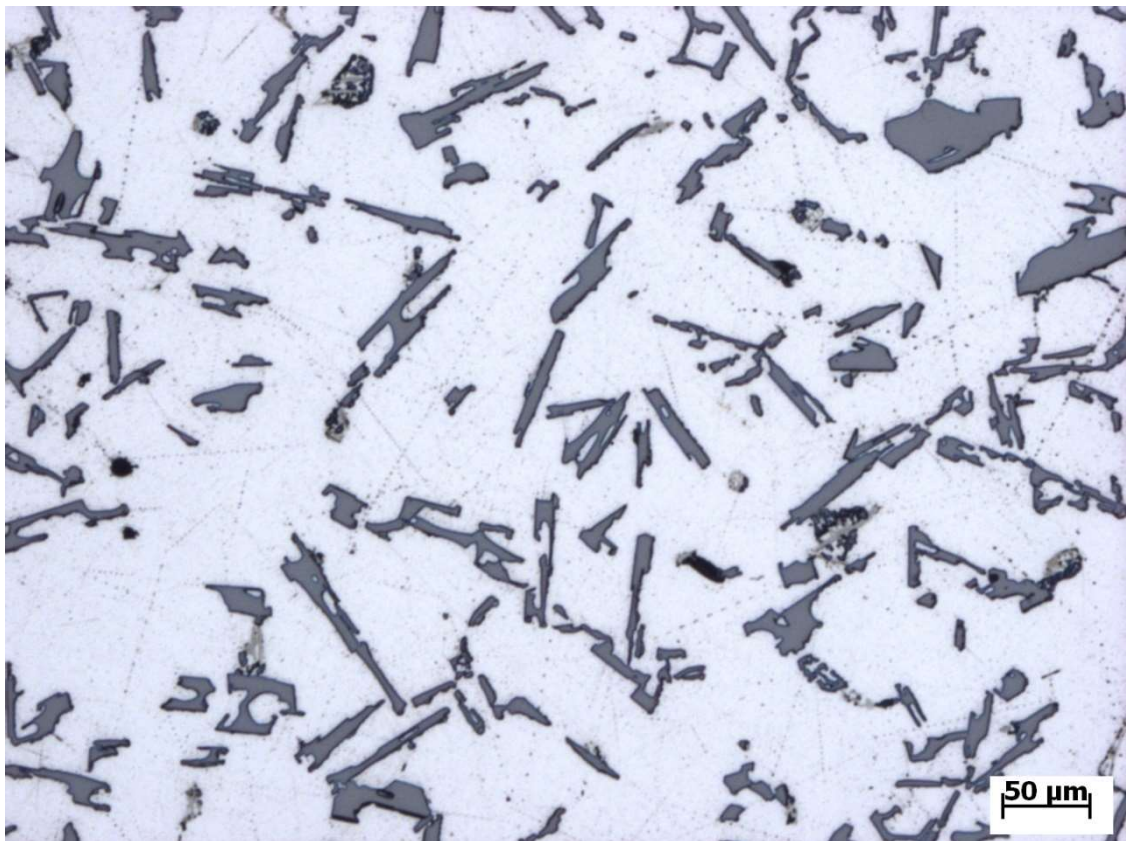


Obrázek 55 Vzorek 2A

Na vzorku 2A byl také vyhotoven metalografický výbrus v místech označených na obrázku 55. Ze snímku makrostruktury na obrázku 56 je patrné, že většina vad je typu mezidendritických staženin. Pouze o vyznačené vadě by se dalo polemizovat, zda to není zbytek bubliny, ale nejspíše se jedná taktéž o mezidendritický prostor.



Obrázek 56 Makrostruktura 2A



Obrázek 57 Mikrostruktura 2A

6.1.3 Nálitek číslo 3

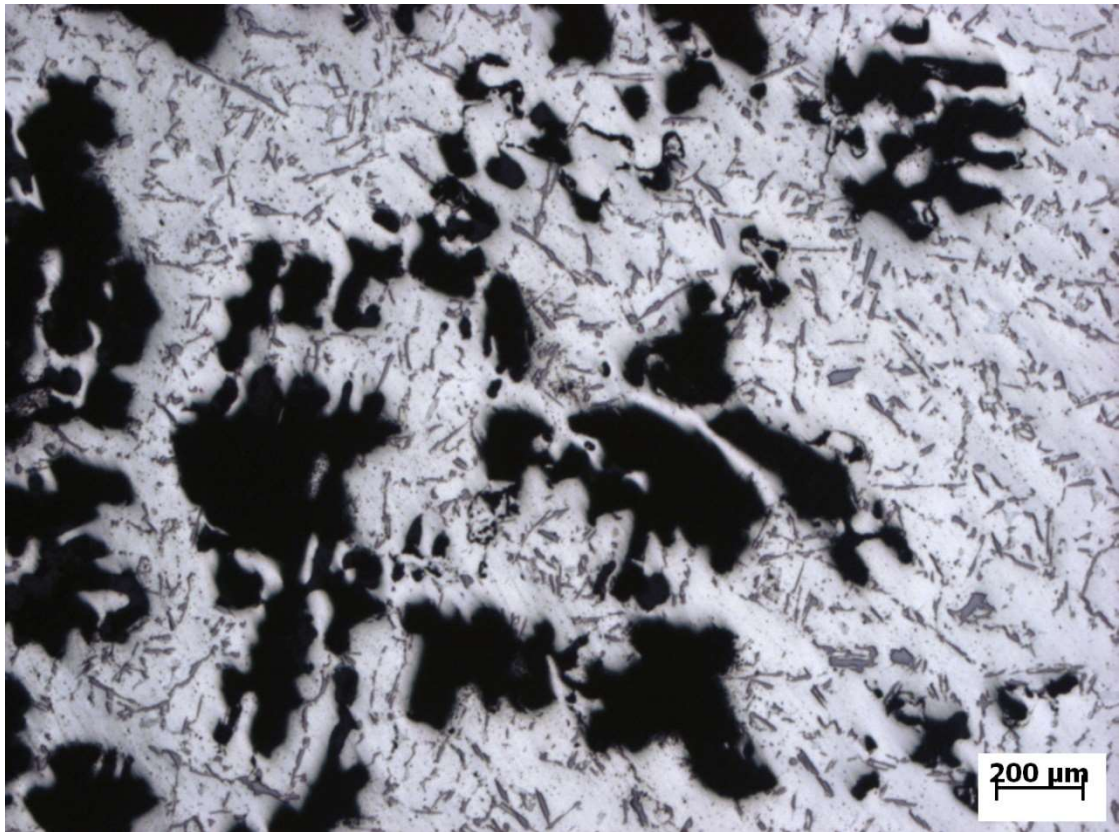
Na obrázku 58 je rozříznutý nálitek 3. Ve spodní části odlitku je vidět porozita. Podle simulace by měla být staženina na vrchu nálitku mnohem větší.



Obrázek 58 Rozříznutý nálitek číslo 4



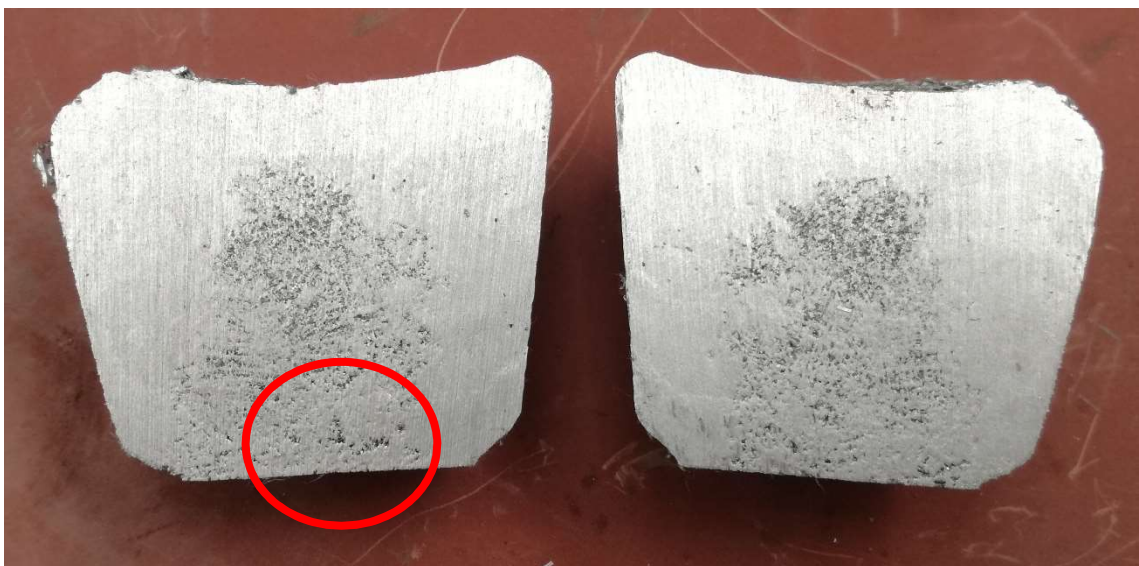
Obrázek 59 Krček nálitku číslo 4



Obrázek 60 Makrostruktura nálitku číslo 4

6.1.4 Nálitek č. 4

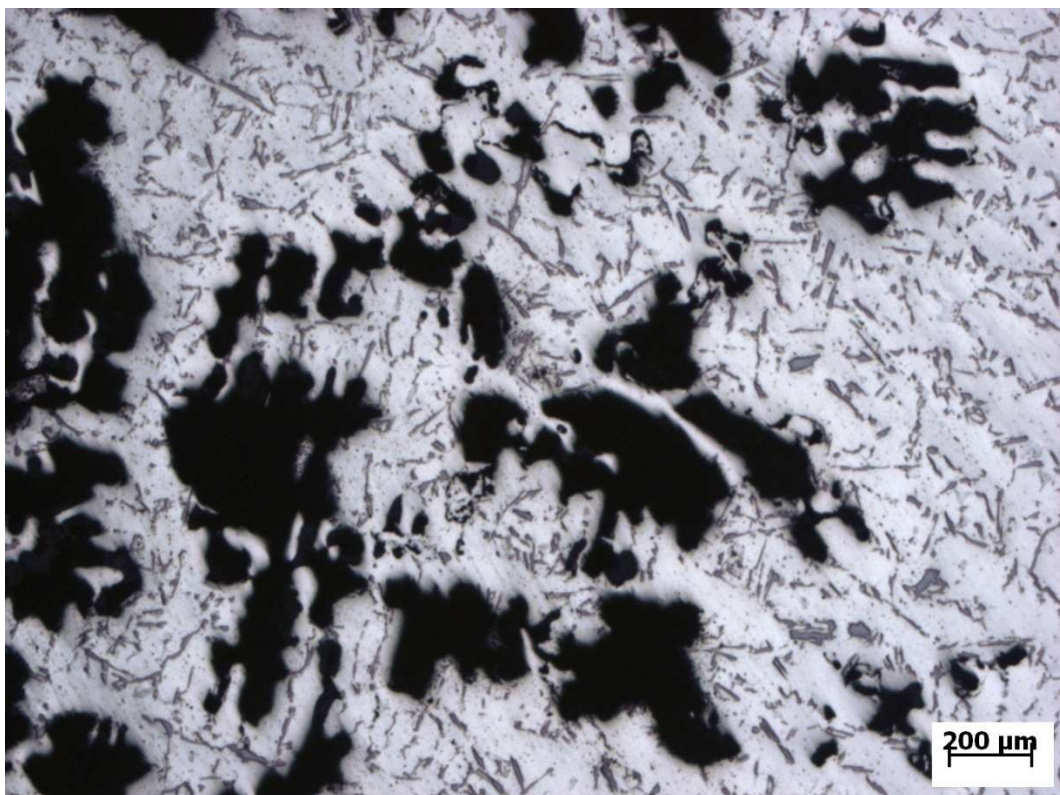
Na obrázku 61 je rozříznutý nálitek číslo 4. Již pouhým okem jsou zde vidět vady.



Obrázek 61 Rozříznutý nálitek číslo 4



Obrázek 62 Krček nálitku č. 4



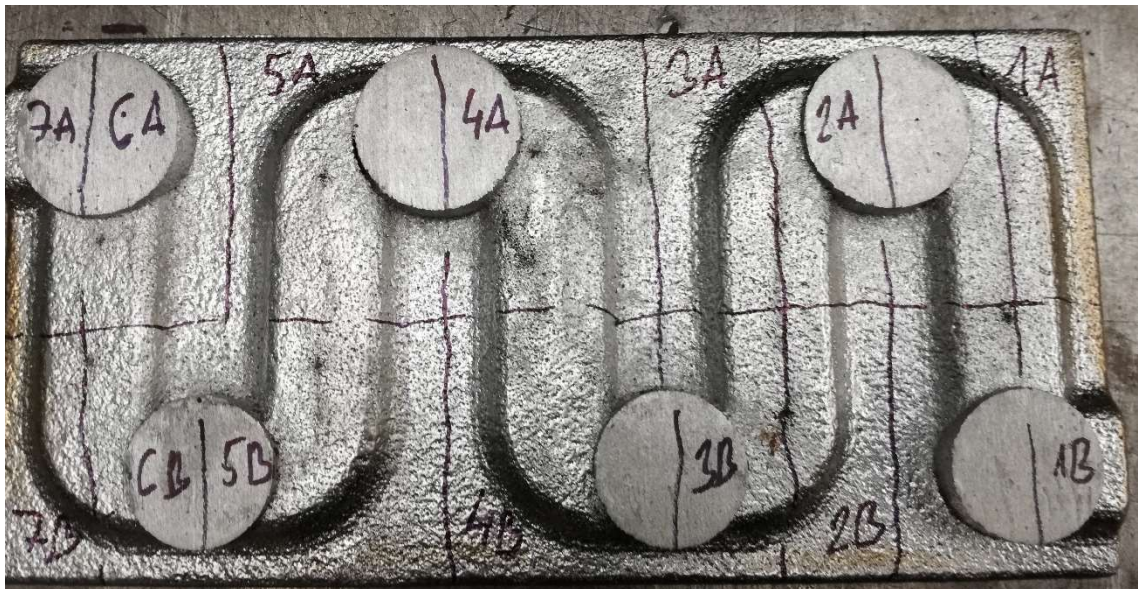
Obrázek 63 Makrostruktura nálitku č. 4

Na makroskopickém snímku (obrázek 62) jsou z krčku nálitku viditelné mezidendritické staženiny. Stejně tak i na obrázku 63 jsou znázorněny staženiny. Místo odběru vzorku je znázorněno na obrázku 61. Ani na těchto výbrusech se nepotvrdily vady způsobené plyny.

Z odlitku číslo 1 bylo vytvořeno 15 metalografických výbrusů. Snímky makrostruktur jsou v příloze číslo 1.

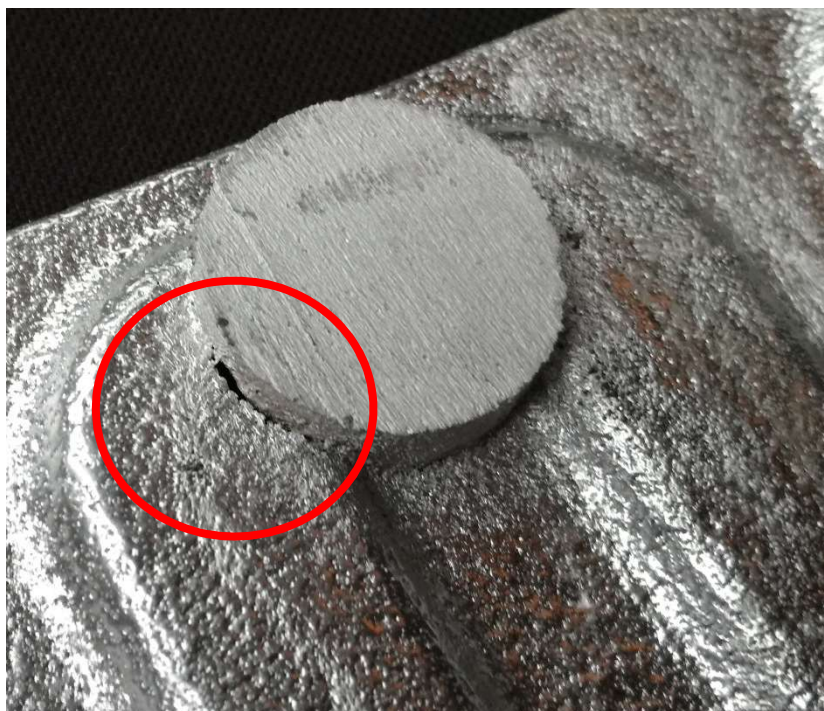
6.2 Odlitek 2

Stejně jako odlitek 1 byl tento odlitek rozřezán, aby byly zjištěny vady v tělese. Nářezový plán byl zvolen stejný jako u prvního odlitku aby bylo možné porovnat stejná místa.



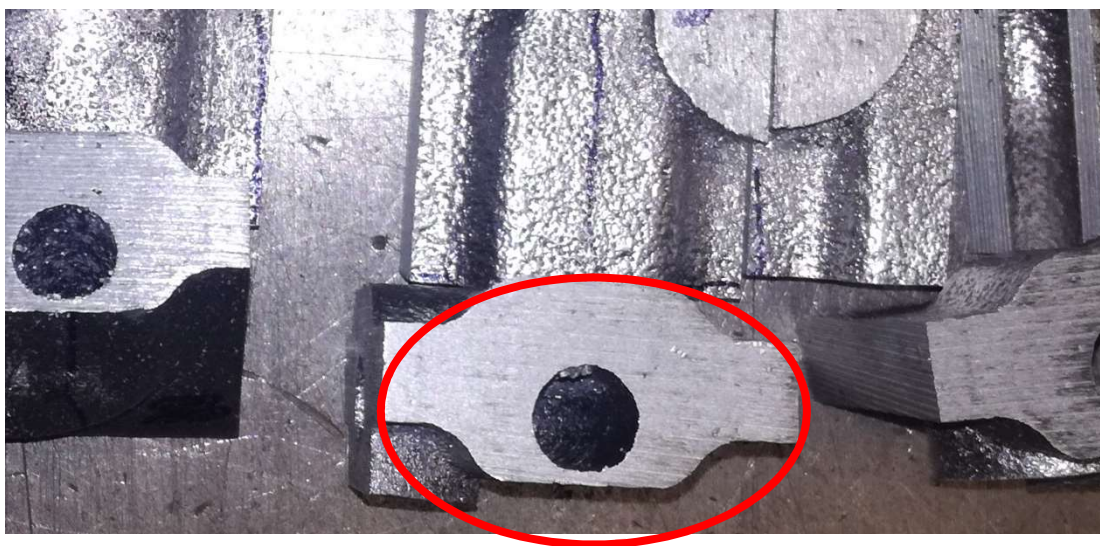
Obrázek 64 Odlitek číslo 2

Po odříznutí nálitků byla identifikována prasklina pod odlitky 2 a 3. Tyto praskliny v porovnání s prvním odlitkem jsou poloviční. To mohlo způsobit naplynění taveniny, nebo jiná lící teplota. Dalším rozdílem mohlo být jiná rychlost samotného lití. Na obrázku 65 je označena prasklina.



Obrázek 65 Viditelná vada pod nálitkem č. 4

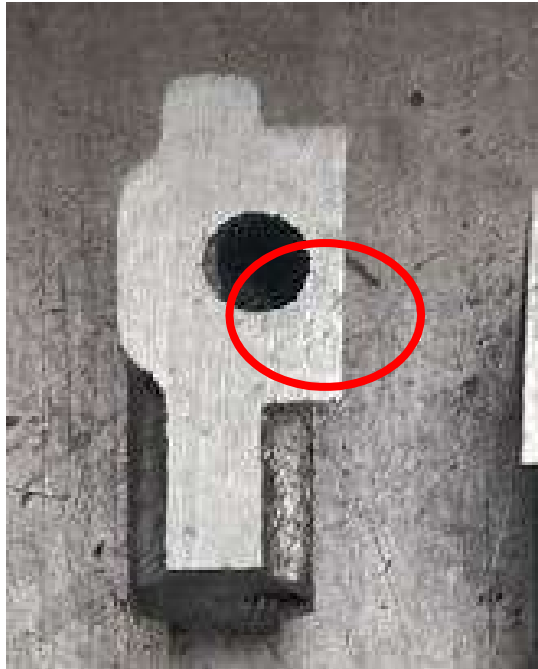
Na obrázku 66 je vidět, že i při druhém experimentu došlo k vyplavení jádra při odlévání.



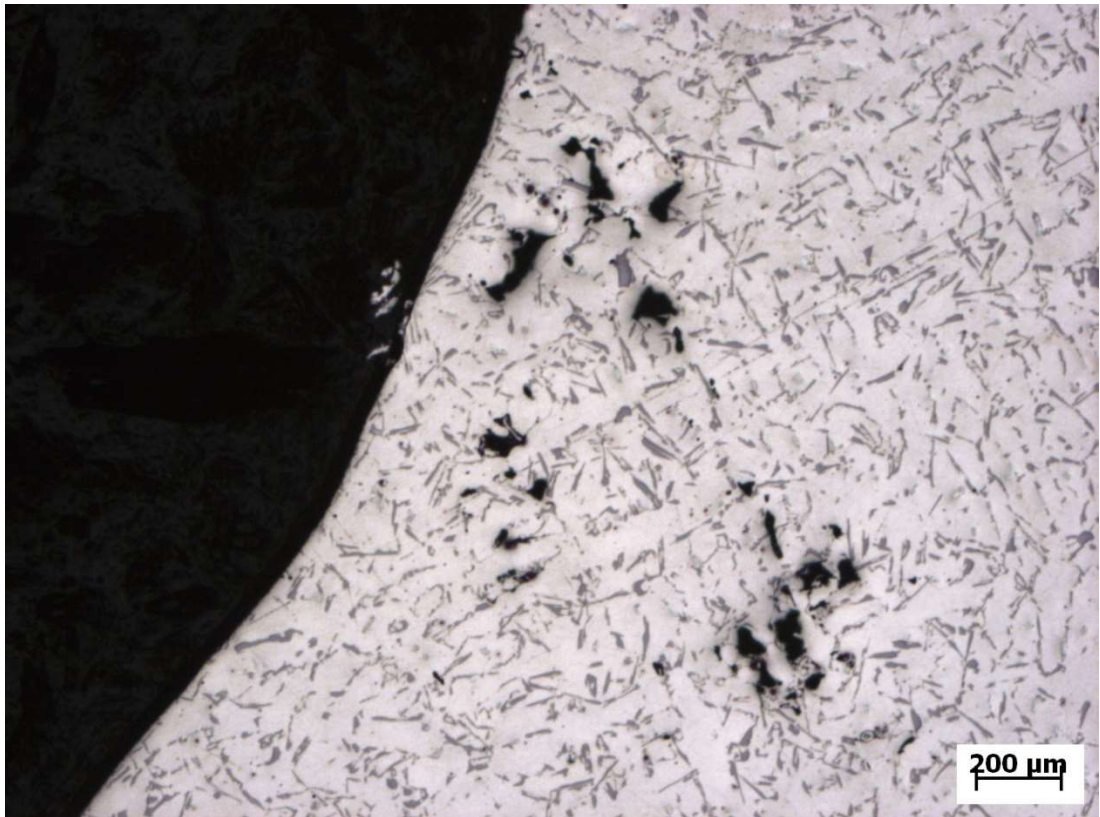
Obrázek 66 Vyplavené jádro

6.2.1 Vzorek 2A

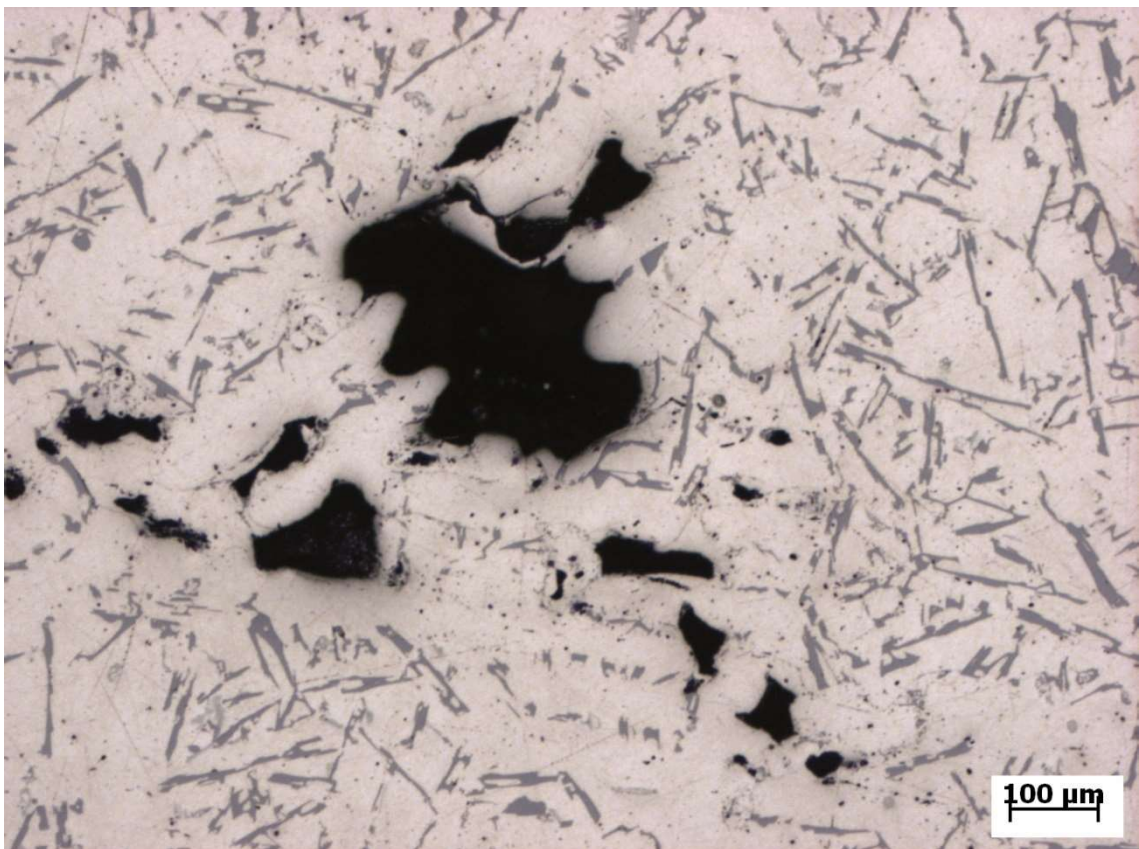
Z vybraných metalografických snímků byly vybrány ty, které byly odebrány ve stejném místě jako u prvního odlitku. Na obrázku 67 je znázorněno místo pořízení snímku.



Obrázek 67 Vzorek 2A



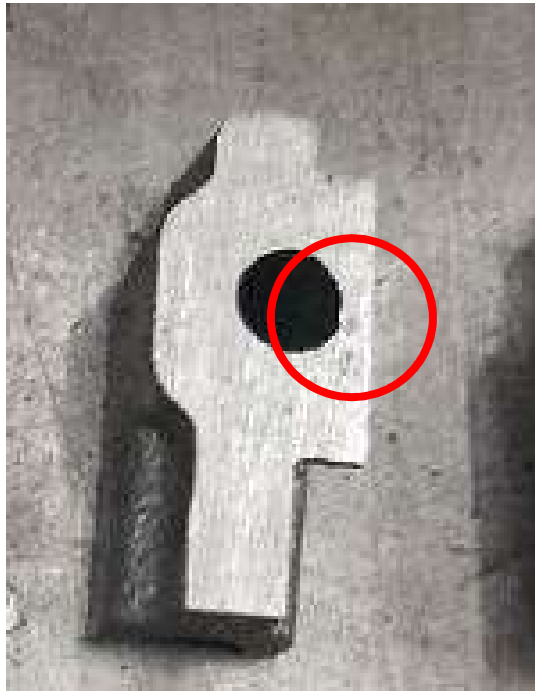
Obrázek 68 Makrostruktura 2A



Obrázek 69 Makrostruktura 2A-2

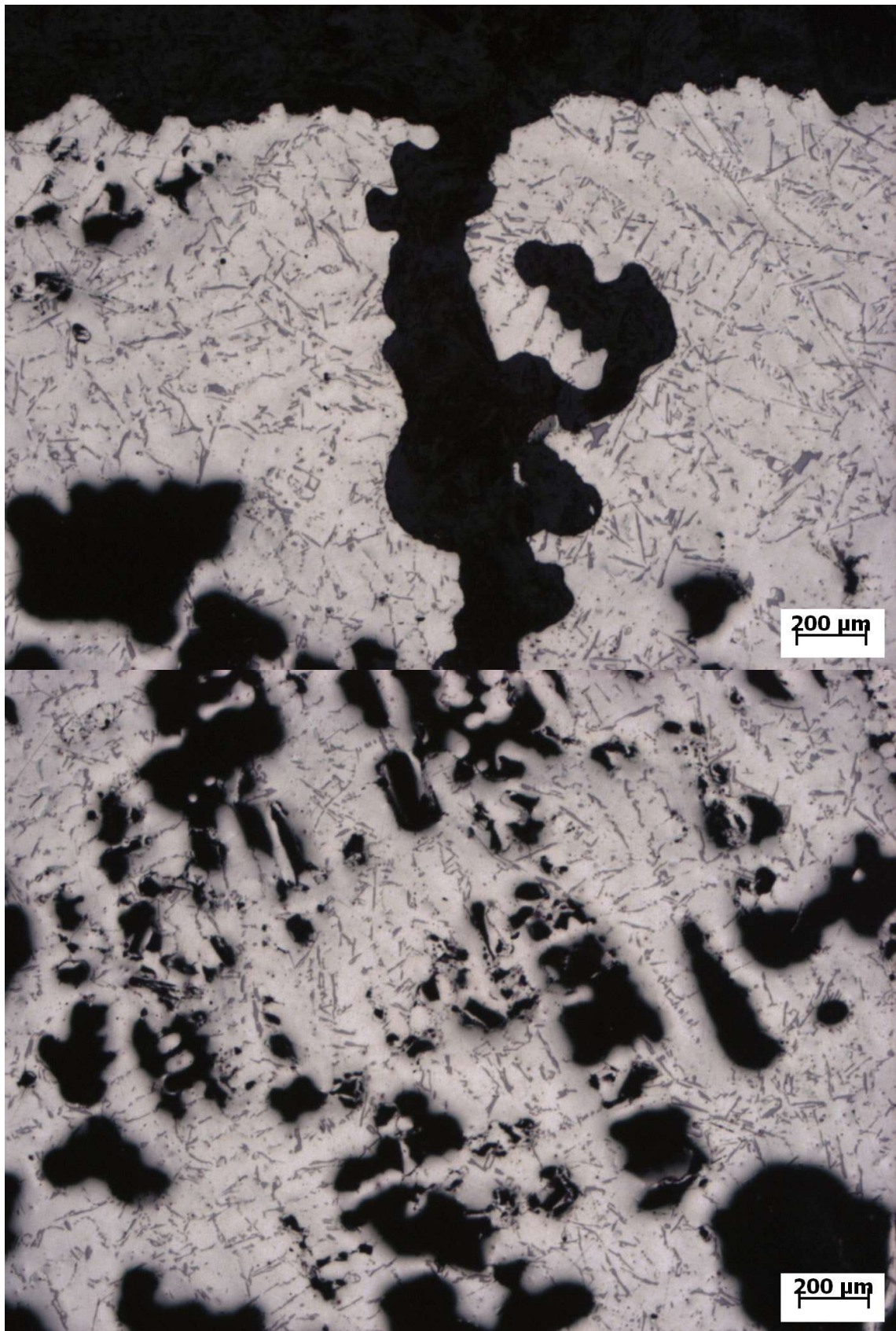
Na obrázku 68 a 69 jsou znázorněny makrostruktury dílu 2A. Na snímcích jsou vidět dendritické staženiny. Oproti prvnímu odlitku je množství těchto malé.

6.2.2 Vzorek 4A



Obrázek 70 Vzorek 4A

Stejný postup byl opakován i u vzorku 4A, obrázek 70. U tohoto vzorku je množství dendritických staženin větší, než u předchozího vzorku, viz obrázek 71. Ani na těchto snímcích nebyla nalezena vada typu bublin, která by značila výskyt plynů v tavenině.



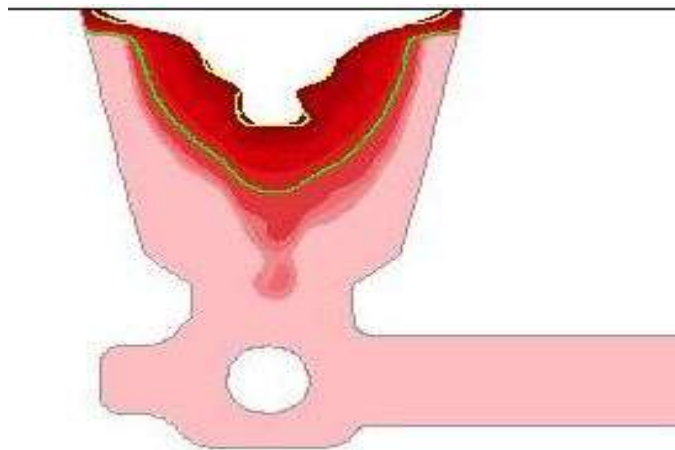
Obrázek 71 Makrostruktury vzorku 4A

7 Porovnání Simulací a odlitku

V následující kapitole budou srovnány obě provedené simulace jak v programu NovaFlow, tak v programu Magmasoft. Tyto simulace pak byly porovnány s experimentálním odlitkem.

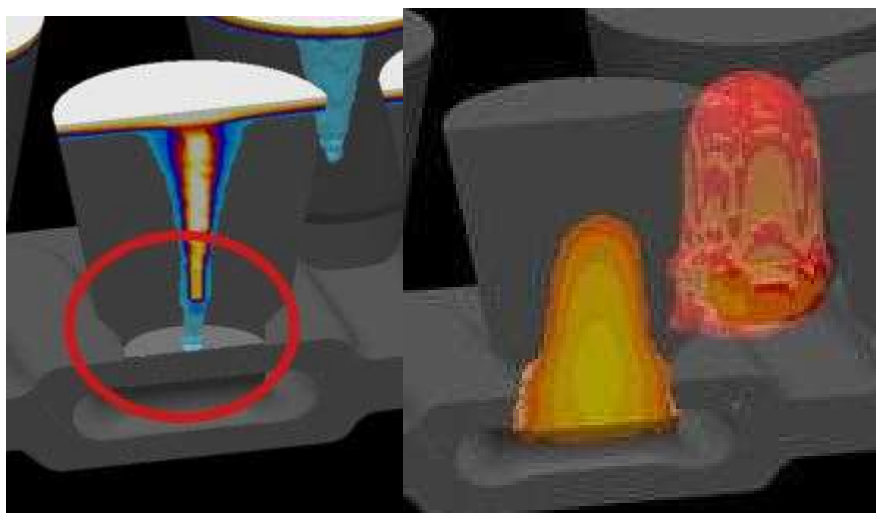
Pro porovnání byly vybrány nálitky, kde podle simulací mohlo vzniknout nejvíce staženin a ředin.

7.1 Nálitek 3



Obrázek 72 Simulace NovaFlow

Na obrázku 72 jsou znázorněné staženiny nálitku 3 ze simulace v programu NovaFlow. Celý obrázek je použit v kapitole 5.2 obrázek 30.



Obrázek 73 Simulace Magmasoft

Na obrázku 73 je znázorněna simulace výskytu staženin z programu Magmasoft. V porovnání ze simulací v NovaFlow je zřejmé, že v této simulaci potenciální staženiny zasahují až do odlitku.



Obrázek 74 Nálitok 3

Na obrázku 74 je rozřízlý nálitok číslo 3. Oproti simulacím je vrchní staženina v reálu menší než podle simulace. Výskyt ředin a staženin je podobné jak u simulací, tak u reálného nálitku.

8 Zhodnocení a závěr

V rámci této diplomové práce byla řešena problematika 3D tištěných slévárenských forem a jader a možného výskytu plynů v nich. V teoretické části práce byly popsány vybrané metody 3D tisku pískových forem a následně byly popsány systémy tiskáren. Dále byl v teoretické části popsán vliv plynů na kvalitu odlitku a bylo popsáno srovnání klasických pískových jader a tištěných pískových jader.

Experimentální část byla vypracována ve spolupráci se společností MODELÁRNA LIAZ spol. s r. o., která sídlí v Liberci.

Hlavním cílem práce bylo pokusit se najít řešení odvodu plynů vzniklých jak při lití, tak při plnění a plynů vytvořených reakcí formy s taveninou u 3D tištěných forem a jader.

Pro řešení tohoto problému bylo navrženo pískové jádro poměrně velké délky a malého průměru, aby byl co největší jeho povrch, ze kterého by do taveniny pronikaly vzniklé plyny. Toto jádro viz obrázky 18, bylo opatřeno známkami o čtvercovém průřezu velikosti 10 mm. Délka známky byla 25 mm. Na provedeném experimentu se ukázalo, že vývoj plynů v jádře není průkazný. Pro získání lepších výsledků by bylo vhodné nechat vyrobit více různých typů jader o větších rozměrech a s různými délkami známek. K tomuto kroku však nebylo z časové a finanční náročnosti přistoupeno.

Dalším cílem této diplomové práce bylo navrhnout experimentální metodu pomocí níž by bylo možné vyhodnotit vývoj plynů v tištěném jádru. Proto byl navrhnout odlitek typu topného tělesa, ve kterém bylo umístěno jádro relativně složitěho tvaru. Na odlitku byly provedené simulace tuhnutí v programu NovaFlow k zjištění kritických míst. Tyto místa byly průběžnou optimalizací odstraněny. Celý odlitek i s vtokovou soustavou a nálitky byl optimalizován a finální geometrii byla provedena simulace tuhnutí. Z této simulace se dá usoudit, že z hlediska tuhnutí a plnění je odlitek v pořádku. Simulace neanalyzovala v odlitku místo, kde by mohlo dojít k vzniku vad.

Z toho důvodu se přistoupeno k vytištění formy a jádra na 3D tiskárně a následnému odlití dvou odlitků. Experimentální vzorek pak byl vizuálně analyzován a následně rozřezán a k zjištění vývoje plynů v jádře bylo použito metalurgických vzorků.

V provedeném experimentu se nepotvrdil vliv plynů vzniklých v jádru na kvalitu odlitku. Způsobené vady byly spíše způsobené nedostatečným ustavením jádra ve formě. Při

plnění formy došlo k vyplavení jádra. Ukázalo se, že byl nejspíše problém s dodržováním technologických podmínek. S nejvyšší pravděpodobností došlo vlivem vyšší rychlosti liti k vychýlení jádra i když je relativně tuhé dojde k jeho utržení a vyplavení. Tento problém by bylo nutné řešit podpěrkami jádra.

Z metalografických výbrusů bylo zjištěno, že většina vad v odlitku je typu staženin. Bubliny, vady, které by byly způsobené plyny se na snímcích nevyskytují. Vzniklé plyny, které se vyskytovaly v jádru, nejspíše unikly masivními nálitky. Takto masivní nálitky byly navrženy z důvodu dosažení usměrněného tuhnutí z odlitku do nálitku. Další z možných příčin mohla být skutečnost, že slitina nebyla naplyněna.

Z provedeného experimentu bylo zjištěno, že navržený model je malých rozměrů a pro správné zjištění vývoje plynů v jádře by bylo nutné nechat vytisknout formu a jádro větších rozměrů. Tato forma by však byla velice drahá. Z finančních důvodů se proto tiskly formy o velikosti 280 x 170 x 70 mm.

Dalším cílem bylo porovnání počítačových simulací tuhnutí v programu NovaFlow a Magmasoft. K provedení simulace tímto programem bylo přistoupeno z důvodu, že nabízí modul pro analýzu vývoje plynů, který program NovaFlow neobsahuje.

Ze simulace v programu Magmasoft vyplývá, že by mohly vznikat vady v odlitku, a to v místech pod nálitky. To má za následek, to, že v těchto místech tavenina tuhne jako poslední. Tím je možný vznik ředin v těchto místech. Problémy, které vznikly v odlitku nejspíše nebyly způsobeny vytvořeným plynem v jádře. Větší vliv na vznik vad má vzduch, který se do taveniny uzavře během plnění. Proudění taveniny při plnění je totiž vysoké a tím dochází k promíchávání taveniny se vzduchem a následné zahlcování vzduchu do taveniny.

Tento jev by se dal vyřešit úpravou vtokové soustavy. Vtoková soustava by byla zapotřebí mohutnější a zajistit více zářezů. Nicméně tato simulace byla dělaná jako doplňková již v průběhu ostatních experimentů. Z tohoto důvodu nebylo přistoupeno k úpravě geometrie vtokové soustavy.

Obě simulace prokázaly, že z pohledu plnění nebyl shledán problém. Rozdílné výsledky byly zaznamenány v simulaci tuhnutí, kdy v optimalizované simulaci z NovaFlow bylo dosaženo, že poslední bod tuhnutí byl umístěn v nálitku. Oproti simulaci v Magmasoftu,

kde poslední místa tuhnutí jsou pod nálitky. V těchto místech dochází k velkému přehřátí a v případě naplyněné taveniny by zde docházelo k uvolňování vodíku do taveniny.

9 Použitá literatura

- [1] PRAŽMA, Vojtěch a Libor HORÁČEK. Technologie 3D tisku písku v Modelárně LIAZ Liberec = 3D printing technology of sand in the pattern shop of Modelárna LIAZ in Liberec. *Slévárenství*. 2015, **63**(9-10), 312-314. ISSN 0037-6825.
- [2] GRIMM, Todd. User's guide to rapid prototyping. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2004. ISBN 0872636976.
- [3] *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping: učební text* [online]. 2012, 71 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/20Prototyping.pdf
- [4] BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [5] *What Is Binder Jetting?: 3D Printing Simply Explained* [online]. 5. 4. 2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-binder-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- [6] MM Průmyslové spektrum. *MM Průmyslové spektrum: Nové trendy v technologii výroby slévárenských forem*. 2015, 1997-, **2015**(6), 119. DOI: 1212-2572.
- [7] TRINOWSKI, Doug. Understanding 3D Sand Printers and Binder Technologies. *FOUNDRY Management and Technology* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.foundrymag.com/molds-cores/article/21931923/understanding-3d-sand-printers-and-binder-technologies>
- [8] ExOne uses Binder Jetting technology to 3D print complex parts in industrial-grade materials. *ExOne* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [9] *ExOne* [online]. 2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US>
- [10] *Binder Jetting - Additively* [online]. In: [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.additively.com/de/lernen/binder-jetting>

- [11] Phenol - Direct - Binding - PDB. *Voxeljet* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/applications/sandcasting/phenol-direct-binding/>
- [13] Phenol Direct Binding (PDB). *3D Printing Media Network* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-phenol-direct-binding/>
- [14] ... slévárenské dny: sborník = ... *Foundry Days : proceedings : Brno, Czech Republic...* Brno: Dům techniky ČSVTS, 1961. ISBN 978-80-02-02827-7.
- [15] EnvisionTEC Viridis 3D Printer: Create Custom Castings for Metal Foundries. *3HTi* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://3hti.com/viridis-3d-printer/>
- [16] Voxeljet presents new VJET X technology for additive mass production of sand cores. *3D Printing Media Network* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/new-vjet-x-technology/>
- [17] Loramendi & Aurrenak Group presents at GIFA 2019 the Industrialization of Core Printing. *Loramendi: Total performance in foundry* [online]. 19. 6. 2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.loramendi.com/news/loramendi-aurrenak-group-presented-at-gifa-2019-the-industrialization-of-core-printing/>
- [18] Direct laser sintering of a silica sand. *Materials & Design* [online]. 13. 6. 2013, **2013**(8), 623-629 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306903001262?via%3Dihub>
- [19] 3D tisk pískových forem a jader: Furanové pryskyřice, Fenolové pryskyřice, Silikáty na bázi vodního skla. *METOS v. o. s.: metalurgický technicko obchodní servis*. [Online] 2020. <http://www.metos.cz/3d.html>.
- [20] Technologie SANDPRINT: 3D tisk písku. Modelárna Liaz spol. s. r. o. [Online] 2020. <http://www.modelarna-liaz.cz/technologie/44-sandprint-3d-tisk-pisku/>.
- [21] S-Print®. *ExOne* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/sand-3d-printers/S-Print>

- [22] Organické pojivové systémy. *SANDTEAM* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <http://www.sandteam.cz/nase-sluzby/suroviny/organicke-pojivove-systemy/>
- [23] JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostřiva*. Ostrava: Petr Jelínek, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
- [24] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [25] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0750647906.
- [26] JELÍNEK, Petr. *Slévárenské formovací směsi*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 8070783265.
- [27] Voxeljet to debut new VJET X 3D printer for serial production of complex sand cores. *The magazine for design to manufacturing innovation* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/voxeljet-additive-manufacturing-complex-sand-cores/>
- [28] INDUSTRIALIZATION OF CORE PRINTING (ICP): OFFICIAL INTRODUCTION AT GIFA 2019. *ASKCHEMICALS* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.ask-chemicals.com/news-events/press-releases/news-single/industrialization-of-core-printing-icp-official-introduction-at-gifa-2019>
- [29] Sand Castings In Just A Few Hours. *Envisiontec* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/3d-printers/robotic-additive-manufacturing/>
- [30] Industrial 3D printing solution. Industrial 3D printing solution [online]. [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/>
- [31] HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*. 2. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991, 130 s. ISBN 80-214-0293-8.
- [32] MACHUTA, Jiří a Iva NOVÁ. *Slévárenské formy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 165 s. ISBN 978-80-7494-083-5.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Srovnání obrábění pískových forem s metodou rapid prototyping [4]	3
Obrázek 2 Princip 3D tisku pískových forem.....	5
Obrázek 3 Schéma 3D tiskárny pískových forem [5].....	7
Obrázek 4 Tiskárna ExOne [8]	9
Obrázek 5 Tiskárna Exerial [8].....	10
Obrázek 6 Tiskárna S-MAX [8]	11
Obrázek 7 Tiskárna S-Print [8].....	12
Obrázek 8 Metoda PDB [11]	13
Obrázek 9 Tiskárna VX 4000 [30]	14
Obrázek 10 Tiskárna VX 1000 [30]	15
Obrázek 11 Tiskárna VX 200 [30]	16
Obrázek 12 3D tiskárna Virids3D [29].....	17
Obrázek 13 Schéma zařízení Virids3D [29].....	17
Obrázek 14 Tiskárna VJET X 3D [27]	18
Obrázek 15 Tabulka srovnání tiskáren	19
Obrázek 16 Grafické znázornění úniku plynů do taveniny [26].....	21
Obrázek 18 Rozměry odlitku.....	30
Obrázek 19 Jádru	31
Obrázek 20 Odlitek s nálitky a vtok. soustavou	31
Obrázek 21 Sestava.....	32
Obrázek 22 Model odlitku s jádrem v prostředí programu NovaFlow.....	33

Obrázek 23 Plnění 10%	34
Obrázek 24 Plnění 30%	34
Obrázek 25 Plnění 60%	35
Obrázek 26 Proudění taveniny.....	35
Obrázek 27 Proudění taveniny – řez nálitky.....	36
Obrázek 28 Poslední místo tuhnutí.....	36
Obrázek 29 Řez nálitkem číslo 4	37
Obrázek 30 Výskyt staženin v odlitku.....	37
Obrázek 31 Staženina v nálitku 3	38
Obrázek 32 Staženina v nálitku 4	38
Obrázek 33 Nastavení geometrie pro simulaci v programu Magmasoft	39
Obrázek 34 Použité materiály.....	39
Obrázek 35 Teplota taveniny během odlévání	40
Obrázek 36 Zahlcený vzduch v tavenině.....	40
Obrázek 37 Rychlost proudění taveniny.....	41
Obrázek 38 Teplotní uzly	42
Obrázek 39 Teplotní uzly řez.....	42
Obrázek 40 Výskyt ředin	43
Obrázek 41 Riziko uvolnění plynu z jádra	44
Obrázek 42 Spodní část formy s jádrem.....	45
Obrázek 43 Vrchní část formy.....	46
Obrázek 44 Jádro	46
Obrázek 45 Odlévání formy	47

Obrázek 46 Odlitá forma	48
Obrázek 47 Zchladlý odlitek.....	48
Obrázek 48 Spodní část odlitku	49
Obrázek 49 Řezání odlitku	49
Obrázek 50 Nářezový plán	50
Obrázek 51 Vada odlitku	50
Obrázek 52 Tloušťka stěny odlitku.....	51
Obrázek 53 Vzorek 4A	51
Obrázek 54 Makrostruktura 4A	52
Obrázek 55 Mikrostruktura 4A.....	52
Obrázek 56 Vzorek 2A	53
Obrázek 57 Makrostruktura 2A	54
Obrázek 58 Mikrostruktura 2A.....	54
Obrázek 59 Rozříznutý nálitek číslo 4.....	55
Obrázek 60 Krček nálitku číslo 4	55
Obrázek 61 Makrostruktura nálitku číslo 4	56
Obrázek 62 Rozříznutý nálitek číslo 4.....	56
Obrázek 63 Krček nálitku č. 4	57
Obrázek 64 Makrostruktura nálitku č. 4	57
Obrázek 65 Odlitek číslo 2	58
Obrázek 66 Viditelná vada pod nálitkem č. 4.....	59
Obrázek 675 Vyplavené jádro	59
Obrázek 68 Vzorek 2A	60

Obrázek 69 Makrostruktura 2A	61
Obrázek 70 Makrostruktura 2A-2	61
Obrázek 71 Vzorek 4A	62
Obrázek 72 Makrostruktury vzorku 4A	63
Obrázek 73 Simulace NovaFlow	64
Obrázek 74 Simulace Magmasoft	65
Obrázek 75 Nálitek 3	65

11 Přílohy

11.1 Příloha 1

Metalografické snímky Odlitek 1

11.2 Příloha 2

Mikrostruktury Odlitku 1

11.3 Příloha 3

Metalografické snímky Odlitek 2