



Bakalářská práce

Optimalizace technologie výroby odlitku pomocí simulačního softwaru Magma

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Lukáš Tengler

Vedoucí práce:

Ing. Milan Jelínek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Optimalizace technologie výroby odlitku pomocí simulačního softwaru Magma

<i>Jméno a příjmení:</i>	Lukáš Tengler
<i>Osobní číslo:</i>	S20000122
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií gravitačního lití do kovových forem a s parametry, které tuto technologii ovlivňují.
2. Proveďte analýzu stávajícího stavu výroby řešeného dílu (rozbor vad, procesních parametrů).
3. Seznamte se se simulačním softwarem Magma 5 a proveďte simulaci současného stavu.
4. Navrhněte změny v technologii výroby dílu s cílem snížení zmetkovitosti. Proveďte simulaci navržených variant a na základě výsledků dejte doporučení pro optimalizaci výroby.
5. Navržené řešení ověřte ve výrobě.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] MICHNA, Š. et al. Encyklopedie hliníku. 1. vyd., Prešov 2005.
[2] HOROVA, Ivana a Jiří ZELINKA. Numerické metody. 2. vyd. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2004. 294 s. 3871/Př-2/04-17/31. ISBN 80-210-3317-7.
[3] Uživatelský manuál simulačního softwaru MAGMASoft

Vedoucí práce: Ing. Milan Jelínek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Optimalizace technologie výroby odlitku pomocí simulačního softwaru Magma

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá technologií výroby odlitku vzduchového regulátoru vysokotlakého kompresoru, geometrií a úpravou formy za účelem eliminace vnitřních vad. Byla provedena analýza stávajícího procesu výroby ve slévárně Alumentall CZ s.r.o., při které byly zjištěny základní technologické parametry, které následně sloužily společně s CAD modelem formy jako vstupní hodnoty do simulačního programu MAGMASoft®. Na základě vyhodnocení vad stávajících odlitků byly s využitím simulace plnění a tuhnutí odlitku navrženy změny geometrie formy s cílem snížit výskyt vad. U finální verze byla v simulačním programu provedena optimalizace teploty taveniny a obsahu křemíku. Vybrané návrhy řešení byly doporučeny firmě Alumentall k realizaci.

Klíčová slova: gravitační lití, odlitek, vady odlitků, úprava kokily, simulační program

Optimization of casting production technology using Magma simulation software

Annotation

This bachelor thesis deals with the technology of production of the high-pressure air regulator casting, mould geometry and modification in order to eliminate internal defects. An analysis of the existing production process in the Alumetall CZ s.r.o. foundry was carried out, during which basic technological parameters were identified, which subsequently served together with the CAD model of the mould as input values to the MAGMASoft® simulation program. Based on the evaluation of defects in existing castings, changes to the mould geometry were proposed to reduce the occurrence of defects using the simulation of filling and solidification of the casting. For the final version, the melt temperature and silicon content were optimized in the simulation program. The selected solution designs were recommended to Alumetall for implementation.

Key words: gravity die casting, casting, die casting defects, mould adjustment, simulation program

Poděkování

Za odborné vedení, trpělivost při konzultacích, pomoc při strukturalizaci a poskytnutí zázemí pro vypracování bakalářské práce děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Jelínkovi, Ph.D. a konzultantce doc. Ing. Ivě Novákové, Ph.D. Poděkování také patří firmě Alumetall CZ s.r.o. a Ing. Davidu Jelínkovi ze společnosti MAGMA Gießereitechnologie GmbH za zprostředkování pětidenního školení v softwaru MAGMASoft®.

V neposlední řadě děkuji rodičům, prarodičům a celému zbytku rodiny za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část.....	10
2.1	Hliník a jeho slitiny	10
2.1.1	Slitiny typu Al – Si (siluminy)	10
2.2	Tavení a udržování taveniny slitin Al – Si	12
2.3	Metalurgická úprava taveniny	13
2.4	Gravitační lití do kovových (trvalých) forem	14
2.4.1	Kovové gravitační formy (kokily) a jejich konstrukce.....	15
2.5	Nejčastější slévárenské vady v odlitcích.....	19
2.6	Výpočtové simulační programy	20
2.6.1	Simulační program MAGMASoft®	22
3	Experimentální část.....	23
3.1	Popis odlitku.....	23
3.2	Stávající technologie výroby.....	24
3.2.1	Konstrukce formy	24
3.2.2	Tavení slitiny a udržování taveniny.....	25
3.2.3	Odlévání.....	26
3.2.4	Stanovení procesních parametrů pro nastavení simulace	27
3.2.5	Posouzení vad v odlitku	28
3.2.6	Vyhodnocení největší vady v oblasti 1.....	29
3.2.7	Vyhodnocení největší vady v oblasti 2.....	30
3.2.8	Vyhodnocení největší vady v oblasti 3.....	30
3.3	Simulace stávající technologie	31
3.4	Porovnání výsledků simulace se skutečností	33
3.4.1	Porovnání teplot formy	33
3.4.2	Porovnání vad v odlitku s výsledky simulace.....	33
3.5	Návrh úpravy formy a následné vyhodnocení jednotlivých simulací	36
3.6	Návrh optimalizace chemického složení a teploty lití	38
4	Diskuze	40
5	Závěr.....	43

1 Úvod

Slévárství je výrobní odvětví zpracování materiálů, které se specializuje na výrobu odlitků z kovů a jejich slitin, které nelze jinak efektivně vyrábět. Hliníkové slitiny mají výhodu nižší hmotnosti, ceny, odolnosti proti korozi a mohou mít i vynikající mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti umožňují rychlou a flexibilní výrobu odlitků různých tvarů a velikostí, které lze snadno obrobit. V roce 2019 bylo v České republice vyrobeno 384 500 tun odlitků a z toho 94 700 tun tvořily odlitky ze slitin hliníku. Odlitky ze slitin hliníku se tedy řadí z hlediska tuzemské výroby na druhé místo hned po odlitcích z šedé litiny (LLG). Celosvětově bylo v roce 2019 z celkových 110 000 000 tun odlitků 17 200 000 tun odlitků ze slitin hliníku a z hlediska výroby se řadily na třetí místo hned po odlitcích z LLG a LKG. V roce 2019 se odléváním slitin neželezných kovů v České republice zabývalo 37 sléváren [1].

Gravitační lití je jednou z technologií odlévání slitin hliníku, která spočívá v plnění formy vlivem tíhy roztaveného kovu. Při tomto procesu se tavenina slitiny hliníku nalévá do speciální kovové formy, která má vnitřní dutinu, odpovídající tvaru požadovaného odlitku. Gravitační lití do kovových forem se často používá pro výrobu složitějších a větších odlitků z hliníkových slitin, kde je vyžadována vysoká geometrická přesnost a kvalita povrchu. Tento proces se často kombinuje s dalšími technologiemi, jako je tepelné zpracování, CNC zpracování nebo povrchová úprava, aby se dosáhlo maximální kvality a přesnosti výsledného výrobku.

Nevyhovující konstrukce slévárenských kovových forem (kokil) a složitá geometrie odlitku může vést ke vzniku vnitřních vad v odlitku, které negativně ovlivňují jeho mechanické vlastnosti a tlakotěsnost. V dnešní době existuje řada simulačních programů, které se zabývají slévárenskými procesy a vadami s nimi spojenými. S využitím těchto programů při konstrukci nebo úpravě forem lze vzniku slévárenských vad předejít ještě před tím, než je forma poslána do výroby.

Cílem této bakalářské práce bylo optimalizovat technologii výroby odlitku s využitím simulačního programu MAGMASoft® za účelem eliminovat vnitřní vady.

2 Teoretická část

2.1 Hliník a jeho slitiny

Jedná se o velmi lehký kov bělavě šedé barvy, který je dobrým vodičem elektrického proudu široce používaným v elektrotechnice. Teplota tání hliníku je 660 °C. Vysoká čistota hliníku negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti a má za důsledek špatnou slévateľnost. Za účelem zvýšení pevnosti a tvrdosti a zlepšení slévateľnosti jsou přidávány vhodné přísady dalších prvků, čímž vznikají binární, ternární a vícesložkové slitiny. Největší výhodou těchto slitin je jejich hustota, která je oproti oceli a litině až třetinová. Tyto slitiny následně nacházejí uplatnění pro různé průmyslové aplikace, jako například výroba motorů, převodovek a jiných dílů automobilů, lodí a letadel [2, 3].

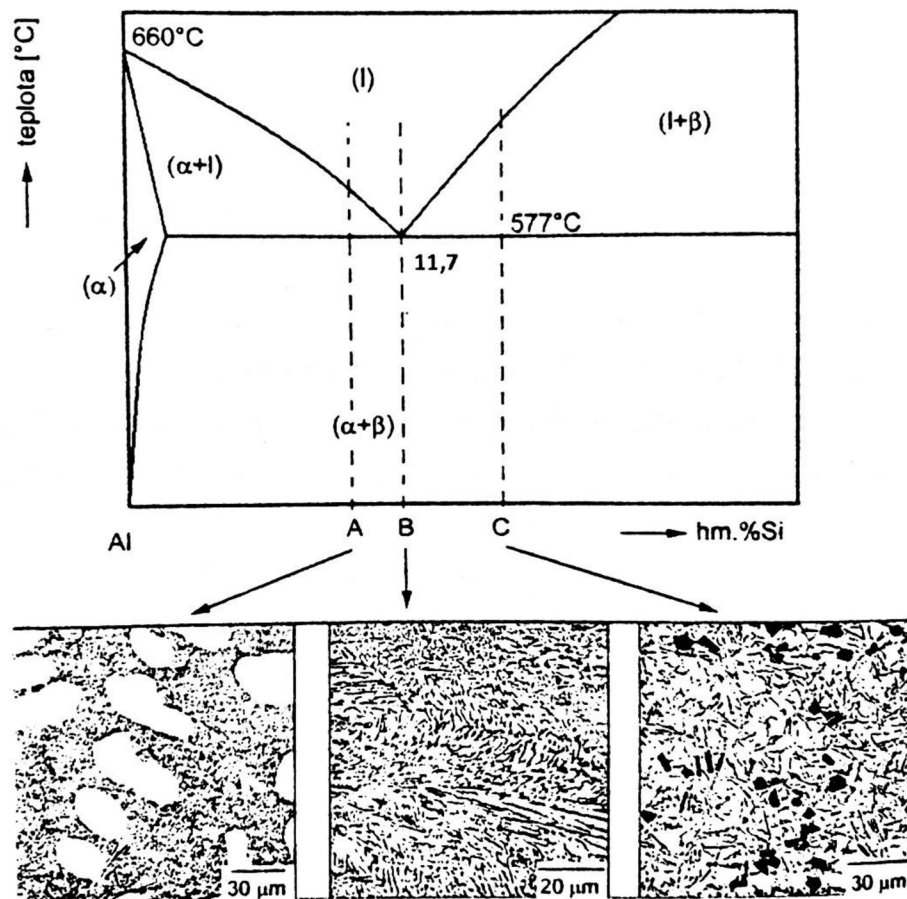
Z velkého množství odzkoušených slitin se uplatnily a v běžné slévářenské praxi používají slitiny **Al – Si** tzv. siluminy, dále slitiny **Al – Mg** tzv. hydronaly používající se pro dekorativní účely, a nakonec slitiny **Al – Cu** tzv. duraly charakterizující se špatnou slévateľností ale vysokými mechanickými vlastnostmi [2].

S ohledem na materiál použitý v experimentální části se teoretická část zabývá podrobněji pouze siluminy.

2.1.1 Slitiny typu Al – Si (siluminy)

Jedná se o nejrozšířenější slévářenské slitiny hliníku. Základní přísadou je zde křemík, jehož obsah je v siluminech vždy vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku hliníku o hodnotě 1,65 %. Rovnovážný diagram hliníku (fáze α) s křemíkem (fáze β) znázorňuje eutektický systém s omezenou rozpustností Si v Al. Hliník tvoří s křemíkem eutektikum při obsahu křemíku 11,7 %, eutektická teplota je 577 °C. Siluminy se metalurgicky zpracovávají v teplotních intervalech od 700 do 820 °C. Mechanické vlastnosti siluminů se zlepšují očkovaním, modifikací a tepelným zpracováním [2, 4].

Slévářenské vlastnosti siluminů jsou velmi dobré, jedná se zejména o výbornou zabíhavost, minimální riziko vzniku trhlin, malý interval tuhnutí díky čemuž nejsou tolik náchylné k tvoření mikrostaženin a ředin. Při zvyšování obsahu Si nad mez maximální rozpustnosti dochází ke zlepšení zabíhavosti. Při zvyšování obsahu Si k hodnotě eutektické koncentrace se zmenšuje celkové smršťování odlitku a redukuje se velikost dvoufázového pásma. Negativem je zhoršování obrobiteľnosti, toto negativum lze umírnit přísadou mědi a úpravou taveniny. Ze siluminů se vyrábí složité a vysoce namáhané odlitky převážně pro automobilový, letecký a elektrotechnický průmysl. Příkladem jsou bloky motorů, hlavy válců, kryty elektrických rozvodů a další [2, 4].



Obr. 2-1 Rovnovážný diagram Al – Si a typické strukturální složení dle obsahu Si [2]

Na obr. 2-1 je vidět, že se slitiny Al – Si dají rozdělit podle složení na [2, 5]:

- **Podeutektické** – nejpočetnější, obsah Si do 10 %, struktura je tvořena sítí primárních dendritů fáze α (Al) a eutektikem jehož obsah se zvětšuje s rostoucím obsahem Si.
- **Eutektické** – obsah Si v oblasti eutektického složení (cca 11,7 %), struktura tvořena pouze eutektikem.
- **Nadeutektické** – výskyt fáze β ve struktuře, obsah Si nad eutektickým složením (hranice není přesně určena, udává se do 25 %).

V rámci experimentální části této bakalářské práce je používána slitina **AlSi10MgMn**. Jedná se stále o siluminy, do kterých je jako přísadový prvek přidán hořčík a mangan. Jedná se o podeutektické slitiny. Obsah hořčíku v těchto slitinách se pohybuje v rozmezí mezi 0,2 % do 1,5 % a umožňuje provádět vytvrzování za tepla nejčastěji metodou T6. Po ztuhnutí mají odlitky jen průměrné mechanické vlastnosti, vysokých mechanických vlastností je docíleno až po vytvrzení. Obecně platí, čím vyšší je obsah Si, tím lepší je slévateľnost. Obsah Mn ve slitině je z důvodu tlumení negativních účinků železa, které se v ní vyskytuje jako nečistota. Tyto slitiny se používají pro všechny druhy lití, tj. gravitační lití do pískových nebo kovových forem

(kokil) a lití pod tlakem. Využívají se pro výrobu tenkostěnných, tvarově složitých odlitků s vysokými nároky na pevnost a houževnatost s aplikací třeba v leteckém a automobilovém průmyslu [5].

2.2 Tavení a udržování taveniny slitin Al – Si

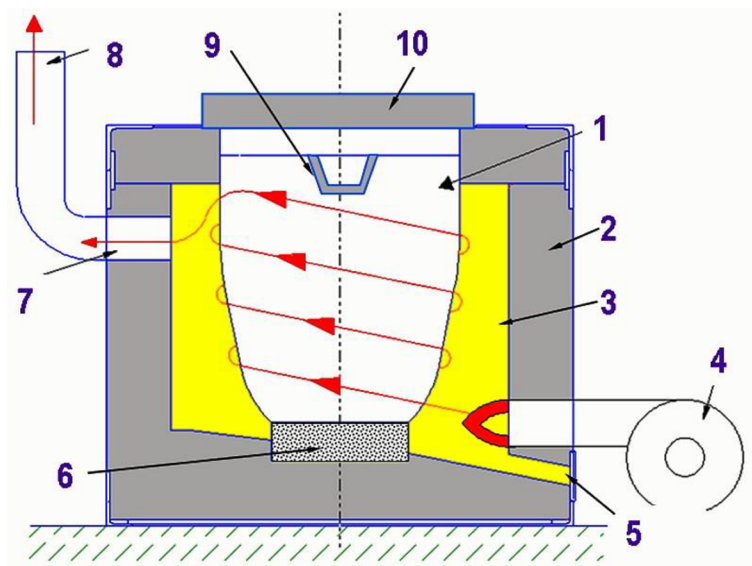
Tavení slitin hliníku probíhá ve většině sléváren v prostorách tavírny v tavících pecích. Tavící pece slouží k tavení a následnému přehřátí taveniny na požadovanou teplotu. Vyšší teplota se používá tam, kde je tavenina rozvážena pomocí dopravních kelímků do udržovacích pecí, nebo je ještě předtím odplyňována a počítá se s poklesem její teploty v řádu několika desítek stupňů. Do pece se sázejí housky dané slitiny, popřípadě vratný materiál stejného chemického složení. Během tavení dochází k reakcím s okolím. Jedná se především o reakci s atmosférou, při které dochází k tzv. oxidaci hliníku a tvorbě oxidu hlinitého (Al_2O_3) na povrchu taveniny. Naplynění taveniny vodíkem může vznikat při kontaktu hliníku s vlhkostí. Z tohoto důvodu je nutné veškerý materiál vkládaný do tavící, nebo udržovací pece nechat přehřát.

Tavící pece se dle druhu ohřevu dělí na elektrické a plynové. Z elektrických jsou používány elektrické indukční pece kelímkové, nebo odporové pece. Z plynových to jsou například plynové pece šachtové a plynové pece kelímkové.

Vzhledem k tomu, že ve firmě Alumetall jsou pro tavení používány **plynové pece kelímkové**, viz obr. 2-2, je dále popsán princip tavení v těchto pecích.

Jako zdroj tepla se používá zpravidla jeden velký plynový hořák s velkým tavícím výkonem, který je k peci připevněn, nebo je automaticky přisouván a odsouván. Účinnost plynových pecí se pohybuje kolem 42 % a jsou určeny k tavení slitin hliníku, zinku, mědi a bronzu. Tyto pece se často vyrábí ve sklopném provedení za účelem možnosti přelití taveniny do dopravního kelímku. Plnění probíhá ručně aby se minimalizovala možnost poškození kelímku. Z důvodu bezpečnosti a lepšího přístupu mohou být tyto pece z části zapuštěny do země. Při prasknutí kelímku dojde k výtoku taveniny havarijním otvorem ve spodní části pece do záchytné komory [5].

K udržování teploty taveniny na lící teplotě (u slitiny AlSi10MgMn přibližně od 715 °C do 730 °C) jsou určeny **udržovací pece**. Nacházejí se na slévárně v těsné blízkosti jednotlivých lících pozic. Nejčastějším provedením u gravitačního lití jsou dobře regulovatelné elektrické odporové pece kelímkové, kde je kelímek tepelně zatěžován rovnoměrně, aby se co nejvíce prodloužila jeho životnost. Tavenina může být v těchto pecích dle potřeby odplyňována, očkovaná a modifikována.



Obr. 2-2 Plynová tavící pec kelímková [6]

1 – kelímek; 2 – obložení pece; 3 – spalovací prostor; 4 – plynový hořák; 5 – havarijní výpust; 6 – podstavec pod kelímek; 7 – boční odvod spalin; 8 – komín; 9 – vylévací hubice; 10 – víko

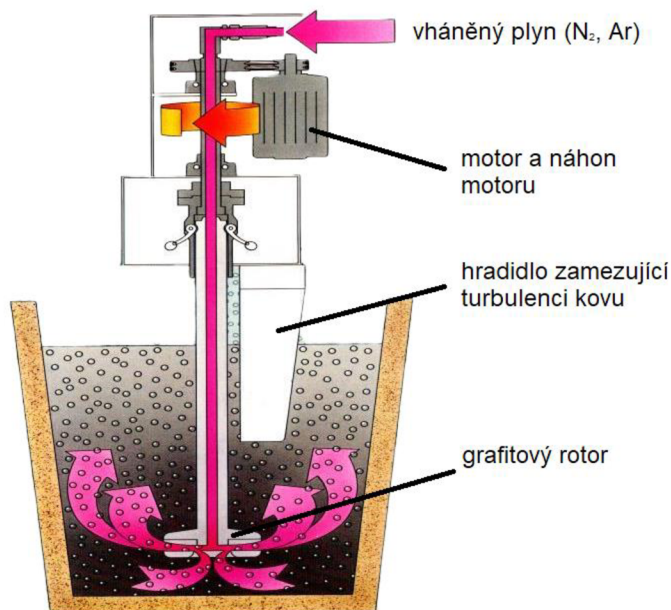
2.3 Metalurgická úprava taveniny

Vzhledem k tomu, že slitiny hliníku mají při tavení sklon tvořit oxidické vměstky a sklon k naplnění taveniny vodíkem, je nutné provádět rafinaci a odplynění taveniny.

Snížení množství vměstků lze docílit procesem zvaným **rafinace**. Vměstky vyplouvající na povrch vytvářejí na hladině tzv. „strusku“, která kromě nečistot obsahuje i značné množství kovové fáze. Za tímto účelem jsou používány rafinační soli, které tuto kovovou fázi uvolňují zpět do lázně. Struska je následně z hladiny odstraněna [5].

Jelikož obsah vodíku závisí na vlhkosti předmětů, které se dostávají do kontaktu s taveninou a vlhkostí vzduchu, je nutné veškeré tyto předměty před vložením do taveniny přehřát. Pokud i přes to dojde k naplnění taveniny, je vhodné obsah vodíku snížit procesem zvaným odplynění. **Odplynění** je založeno na difuzi vodíku do bublin inertního plynu (dusík, argonu) nebo směsného plynu (směs argonu a chloru), s nimiž je vynášen společně s oxidickými vměstky na hladinu taveniny. Malá velikost bublin, jejich dostatečně dlouhá dráha k hladině a správné promíchávání je hlavním kritériem správného odplynění. Plyn může být do taveniny vháněn pomocí odplyňovacích trubic, porézních tvárnic, nebo rotorových zařízení. Pro odplynění je také možné používat odplyňovací soli nebo tablety, jejichž rozkladem vzniká chlor.

Zdaleka nejběžnější metodou je odplyňování pomocí **rotorových zařízení** (FDU), popis tohoto zařízení je na obr. 2-3. Tato metoda využívá grafitový rotor a nejčastěji inertní plyn. Plyn se do taveniny vhání pomocí rotujícího grafitového rotoru, který ústí až u dna kelímku, čímž je docíleno rovnoměrné rozptýlení bublinek vháněného plynu. Obsluha může nastavit rychlost rotace (ot/min) a délku odplynění. Vertikální pohyb rotoru je z části automatizován [5].



Obr. 2-3 Schéma slévárenské odplyňovací jednotky s grafitovým rotorem (FDU)

Mechanické vlastnosti odlitků lze dále zlepšit dalšími metalurgickými úpravami taveniny.

Jedním ze způsobů, jak zlepšit mechanické a technologické vlastnosti slitinů je **očkování**. Očkování se provádí za účelem zjemnění zrna vnášením látek, ze kterých se tvoří krystalizační zárodky. Očkování podeutektických slitinů se provádí nejčastěji kombinací titanu a bóru. Tyto očkovačla se do taveniny vnášejí pomocí očkovacích solí (např. K_2TiF_6), očkovacích tablet, nebo pomocí předslitin (např. Al – Ti – B). Očkování snižuje sklon slitiny ke vzniku trhlin a poretivity, zlepšuje tažnost, pevnost, těsnost, obrobitelnost a vlastnosti odlitku po tepelném zpracování [2, 5].

Zlepšení mechanické vlastností, zejména tažnosti a houževnatosti lze docílit **modifikací** taveniny. Vylučováním křemíku vzniká modifikované eutektikum, kde křemík tvoří jemná vlákna, jeví se jako tečky či tyčinky. Modifikované eutektikum vzniká za přítomnosti modifikačních prvků, kterými je sodík aplikován ve formě tablet a stroncium aplikované ve formě předslitiny AlSr. Sodík zvyšuje sklon k oxidaci taveniny a zhoršuje zabíhavost, proto je nutné aplikovat přiměřené množství modifikátorů. Naopak odplyňování snižuje obsah sodíku, z tohoto důvodu by modifikace měla následovat až po odplynění [2, 5].

2.4 Gravitační lití do kovových (trvalých) forem

Slitiny hliníku je možné odlévat všemi běžnými způsoby jako je gravitační lití do pískových, kovových i skořepinových forem a tlakové lití do kovových forem. Ze slitin hliníku je možné odlévat tenkostěnné odlitky složitých tvarů. O vhodné volbě způsobu lití rozhoduje mnoho kritérií, ať už ekonomie výroby, mechanické a geometrické požadavky a jiné. Často se stává, že se mezi danými technologiemi (gravitací a tlakovým litím) přechází [2].

Vzhledem k zaměření bakalářské práce je dále věnována pozornost technologii **gravitačního lití do kovových forem**.

Jedná se o jednu z nejjednodušších metod odlévání. Jak už z názvu technologie napovídá, forma je plněna přes vtokovou soustavu působením gravitace a tuhnutí probíhá za atmosférického tlaku.

Výhody gravitačního lití do kovových forem oproti lití do pískových forem [7]:

- Vysoká hladkost povrchu odlitků – ovlivněna kvalitou povrchu dutiny formy a vrstvou naneseného postříku, tato vrstva zároveň chrání formu a usměrňuje tuhnutí, s vyšší tloušťkou vrstvy hladkost klesá.
- Vyšší přesnost odlitků – snížení tolerance rozměrů.
- Snížení přídavek na obrábění.
- Výhodné použití tepelně izolačních vložek a výmazů nálitků.
- Forma o životnosti několik vyšších desítek tisíc cyklů.
- Možnost aplikace kovových jader a v případě složitých tvarů dutin i jádra jednorázová (písková).
- Možnost hydraulicky automatizovat otevírání a zavírání formy, popřípadě pohyb kovového jádra.

Negativa gravitačního lití do kovových forem oproti lití do pískových forem [7]:

- Nevhodné pro kusovou výrobu.
- Časově i finančně náročná konstrukce forem.
- Formy a kovová jádra je třeba dobře ošetřovat postříkem.
- Kovové formy nejsou prodyšné – kritické je správné odvodušnění formy.

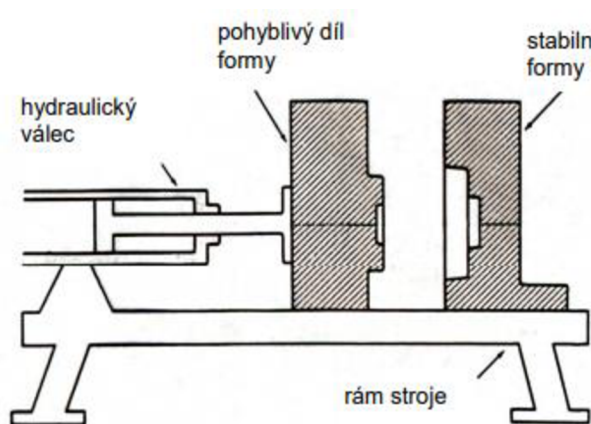
Za předpokladu dodržení stanoveného technologického postupu je tato metoda spolehlivá a produktivní. Při dostatečném taktu jednotlivých cyklů se forma ustálí na požadované lící teplotě. Počet zahřívacích cyklů je zpravidla 3 až 6. Jelikož je s odlitky převážně ručně manipulováno, jejich hmotnost nepřesahuje 20–30 kg. Po vložení pískového jádra, případně filtru je forma uzavřena a je zasunuto kovové jádro. Tekutý kov je vléván do vtokové jamky a přes zužující se vtokovou soustavu zaplňuje dutinu formy. Plnění formy by mělo být kontinuální, bez přerušování.

2.4.1 Kovové gravitační formy (kokily) a jejich konstrukce

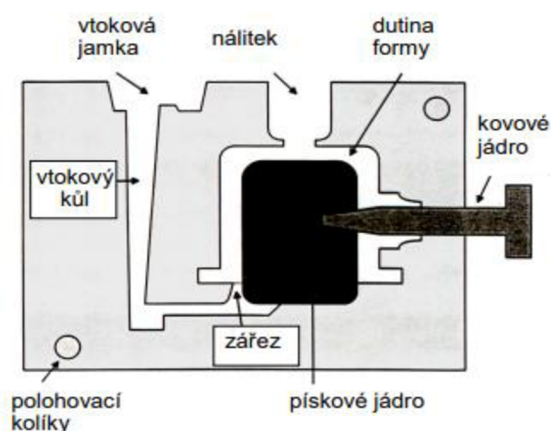
Formy pro gravitační lití jsou řešeny převážně se svislou dělicí rovinou a odlitky jsou z nich uvolňovány pomocí vyhazovačů, nebo sjetím kovového jádra, čímž dojde k uvolnění odlitku. Poloviny formy mohou být ovládány hydraulicky (obr. 2-4), každopádně ovládání může být stále i manuální. Plochy, které jsou kolmé k dělicí rovině musí mít slévárenské úkosy alespoň

2 až 3° a ostré hrany musí být opatřeny rádiusy. Důležitým činitelem při konstrukci kokily je stanovení tloušťky jednotlivých stěn. Tloušťka stěn závisí převážně na tloušťce stěn odlitku, ale také na materiálu odlitku a způsobu chlazení kokily.

Dutina formy tvoří negativ odlitku a je rozdělena na jednotlivé části, které jsou popsány na obr. 2-5. Jádro tvoří nejčastěji vnitřní tvar odlitku (pravá jádra), nebo může tvořit vnější vpadlé dutiny (nepravá jádra). Licí kanál (vtokový kůl) má zužující se charakter, díky tomu v něm dochází k laminárnímu proudění a zamezuje vniknutí vzduchu. U symetrických odlitků se běžně používá licí kanál rozvětvený do dvou stran pro získání rovnoměrného plnění a teplotního pole při tuhnutí. Často se lze setkat s kombinací, kde jsou poloviny formy zavírány a otevírány hydraulicky, ale kovová jádra jsou vkládána manuálně. Licí stoly jsou zpravidla univerzální, aby se na ně dalo připevnit více různých forem.



Obr. 2-4 Kokilový stroj s dvoudílnou formou [5]



Obr. 2-5 Forma s jádry – pohled do dělicí roviny [5]

Na **materiál forem** se kladou velké nároky. Musí být odolný proti opakovaným změnám teploty, proti erozi proudícího kovu a proti namáhání, které vzniká při rozebírání kokily a vyhazování odlitku. Nesmí být pórovitý. Měl by mít dobrou tepelnou vodivost a být snadno obrobitelný. Dále je třeba volit materiál s malým součinitelem roztažnosti, což zvyšuje životnost formy. V dnešní době je tvar kokil a kovových jader obráběn z polotovarů vyrobených z normalizované nástrojové nebo konstrukční oceli. Úzká a dlouhá kovová jádra se vyrábí ze středně a vysoce legovaných ocelí [8].

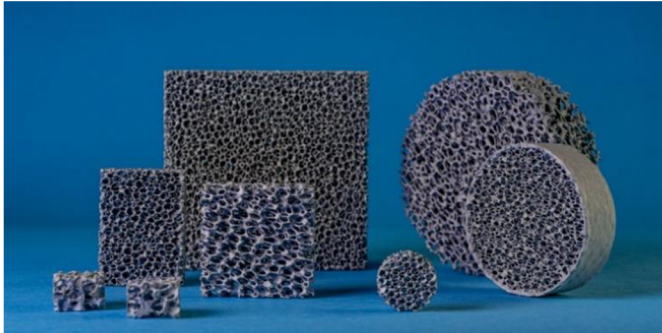
Tuhnutí odlitku lze usměrnit pomocí **ochranných nátěrů a postřiků**. Postřík se skládá z ostřiva, pojiva a nosné kapaliny. Všechny postříky se ředí v předepsaném poměru vodou. **Silně izolační nátěr (výmaz)** je používán na vymazání náliček a zásadně prodlužuje dobu jeho tuhnutí. **Izolační postřík** uchovává teplo a používá se na velké plochy a tenké stěny, popřípadě rozmezí mezi náličkem a odlitkem, je na bázi plavené křídly, křemeliny, ZnO nebo wollastonitu. **Vodivý grafitový postřík** je určen ke zvýšení rychlosti odvodu tepla z odlitku do formy a jako médium pro snadnější uvolnění odlitku. Výmaz se natírá štětcem a postřík se aplikuje stříkací pistolí. Postříky také slouží k eliminování kontaktu taveniny s formou, tím je zamezeno lepení odlitku ke kokile a rozpouštění železa [8].

Před začátkem odlévání je třeba kokily ošetřené postříkem **předehřát** na teplotu, která zajistí nejlepší průběh ochlazování odlitků. Předehřívací teplota se pohybuje od 200 do 470 °C podle tloušťky stěny formy. Ohřev kokil se provádí plamenem, nebo elektricky a musí být rovnoměrný. Proto je lepší použít větší množství hořáků o menším výkonu. Tam, kde se teplota neudrží na potřebné výši, může být kokila ohřívána i v průběhu lití, případně může být toto místo tepelně izolováno. V průběhu lití je třeba některé části kokil **chládit**, aby docházelo ke kladně usměrněnému tuhnutí odlitku. Rychlost ochlazování kokil lze regulovat např. hmotností kokily, velikostí povrchu (žebrováním), ofukováním, chlazením vodou. Regulování teploty částí kokil je možné provádět např. volbou různých postříků, vyrobení zachlazované části kokily z lépe tepelně vodivého materiálu, použitím měděných chladítek, ofukováním částí kokily, příkládáním chladítek s proudící vodou. Pro hromadnou výrobu odlitků se vyrábí kokily s řízeným tepelným režimem, kde snímače v určitých teplotních pásmech regulují a udržují ohřev nebo chlazení [8].

Po ohřátí kokily jsou do ní vkládána písková a kovová jádra. **Kovová jádra** se používají za účelem hladkosti a stejnoměrné jemnosti struktury v celém objemu. Jelikož je kovové jádro oblitě po celém povrchu kovem, brání smršštění slitiny, proto musí být vyjmuto z odlitku co nejdříve. Úkoly kovových jader musí být z tohoto důvodu velké alespoň 3 až 6 °. Jádro je vysoce tepelně namáhané, proto se vyrábí z oceli tř. 17 nebo 19. Jednoduchá jádra se vytahují ručně páčidlem, složitější jádra mohou být ovládána hydraulicky nebo pneumaticky. **Písková jádra** se užívají v případě, že tvar dutiny je příliš složitý a neumožňuje rychlé a bezpečné vyjmutí kovového jádra. Písková jádra se používají také tam, kde průřez jádra je příliš velký a při použití kovového jádra by vzniklo nebezpečí trhlin v odlitku. Jádra se zakládají do tzv. známek, které zajišťují jeho vodorovnou i svislou stabilitu. Úkoly známek a vůle v uložení musí být takové, aby se při zakládání jádra neodírala, ale bezpečně jádro polohovala. Při kontaktu pískového jádra s taveninou dochází k uvolňování plynů. Plyny dle prodyšnosti směsi pronikají ven z jádra. Při hromadění těchto plynů může dojít k tomu, že tlak jimi vyvozený může překonat tlak taveniny na jádro a plyny mohou vnikat do taveniny a tvořit v odlitku charakteristické vady. Z tohoto důvodu je do kokil umísťováno dodatečné odvzdušnění v těsné blízkosti jader. Případně jsou jádra vyráběna dutá s odvzdušňovacím kanálem, který usměřňuje odvod plynu třeba skrz známku odvzdušňovacím otvorem ven [8].

Po vložení pískového a kovového jádra je možné ještě do filtrační komůrky vtokové soustavy formy vložit filtry. **Filtry** se používají za účelem čištění taveniny vtékající do formy a případně k dosažení laminárního proudění. *Objemové filtry* (obr. 2-6) mají schopnost hloubkové filtrace. Jedná se o lisované filtry, extrudované filtry, pěnové keramické filtry. Výška filtru a velká kontaktní plocha s taveninou snižuje rychlost plnění a tím je docíleno laminárního proudění. Pěnové keramické filtry jsou nejvíce rozšířeným druhem filtrů. Prouděním kovu ve filtru dochází ke vzniku vírů, v jejichž důsledku nečistoty přichází k častému kontaktu se

strukturou filtru, na které následně ulpívají. U slitin hliníku se často používají na zachycování oxidických plen. Výhodou je dlouhodobá teplotní odolnost. *Ploché filtry* (obr. 2-7) mají zanedbatelnou tloušťku. Mohou to být kovová síta, nebo žáruvzdorné tkaninové filtry. Všechny vměstky větší jak oka těchto filtrů jsou zachycovány [9, 10].



Obr. 2-6 Pěnový keramický filtr [9]



Obr. 2-7 Ploché kovové síto

Účelem **vtokové soustavy** je zajistit klidné a plynulé naplnění celé kokily. Další požadavky na vtokovou soustavu je bezpečné zaplnění formy, zachycení vměstků, zajištění usměrněného tuhnutí, minimální spotřeba tekutého kovu a zamezení erozi formy. Vtokovou soustavu lze k odlitku zaústit třemi způsoby. *Horní vtok* – lze využít pouze, pokud výška vtoku a odlitku nepřesáhne 150 mm. Zabezpečuje usměrněné tuhnutí odlitku. Rozstříknutí kovu o dno je možné zabránit naklopením formy, kov následně stéká po stěně. Po nalití se kokila opět postaví. Tento způsob se nazývá sklopné lití. *Spodní vtok* – přivádí kov do spodní části odlitku. Dochází ke klidnému plnění kokily. Průtoková rychlost ubývá se stoupáním hladiny kovu ve formě, tuhnutí není usměrněné. *Nožový vtok* – se používá u vysokých odlitků. Odlitky jsou spojeny s vtokovým kanálem po celé, nebo podstatné jejich výšce [8].

Kov při plnění formy vytlačuje vzduch a plyny z jader. Aby nedocházelo k zachycení vzduchu a plynů v kokile a tím se předešlo vadám, je třeba vzduch a plyny z kokily včas vyvést pomocí **odvzdušnění**. Vzduch je z formy odváděn vúlemi v dělicí rovině formy, ve vložkách kokil, u vyhazovačů, zlepšení odvodu vzduchu lze dosáhnout drážkami ve vedení vložek, kolíkovými průduchy s drážkami nebo ploškami po obvodě, speciálními průduchy se štěrbinovými drážkami. Štěrbiny a drážky musí být jen tak velké, aby se nezalézaly kovem. Odvzdušňovací vúle by z tohoto důvodu neměly být větší jak 0,2 mm. Odvzdušnění musí být vyvedeno z dutiny formy [8].



Z důvodu objemových změn při tuhnutí materiálu se u gravitačního lití používají **nálitky**. Nálitky slouží k tomu, aby doplňovaly kov do odlitku při jeho tuhnutí. Umístění nálitku musí být napojeno do nejsilnějších stěn odlitku a má-li být splněna podmínka, že nálitek tuhne naposledy, musí mít odpovídající velikost a tvar. Nálitek by se měl tvarem co nejvíce podobat kouli. Tloušťka stěny odlitky by se měla směrem k nálitkům rozšiřovat, a ne naopak zužovat, došlo by k uškrcení nálitku. Při sklopném lití mohou nálitky sloužit současně jako vtok. Odvod


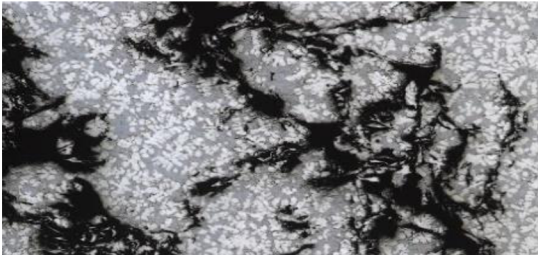
tepla z nálitků do stěn kokily lze snížit např. izolačním výmazem nálitků. Výmaz silný cca 2 mm, prodlouží dobu jeho tuhnutí až 10krát. Ještě podstatně delšího tuhnutí lze dosáhnout izolovanými nálitky, kde je tekutý kov od stěny kokily oddělen nekovovým izolačním materiálem, který je zpravidla chráněn vrstvou izolačního postřiku. Jako izolační materiál se nejčastěji používá keramika [8].

2.5 Nejčastější slévárenské vady v odlitcích

Vady v odlitcích mohou vznikat z mnoha důvodů. Tvar a velikost vad může napovědět důvod jejich vzniku. V tab. 2-1 jsou uvedeny nejběžnější vady odlitků, jejich popis a pravděpodobná příčina vzniku.

Tab. 2-1 Přehled vad odlitků ze slitin hliníku [3, 4, 7, 11]

Název vady	Popis vady/obrázek	Nejčastější příčina vady
Nezaběhnutí		Nízká teplota kovu při lití. Příliš pomalé lití. Absence odvzdušnění. Nevhodná vtoková soustava. Nedolitá forma.
Přesazení	Posunutí jedné části tvaru odlitku proti druhé.	Vadný jaderník. Nesprávně složená forma.
Mechanické poškození	Porušení tvaru a rozměrů odlitku. Poškození při odřezávání vtoků a nálitků. Poškození při výklepu jádra.	Předčasné vyjímání odlitku z formy. Chybné čištění a odstraňování vtoků a nálitků. Malé úkosy a rádiusy.
Výronky	Vystouplé žebrované, nebo žilkovité výrůstky na povrchu odlitku.	Porušení celistvosti nátěru formy při vyndávání odlitku nebo kovových jader. Trhliny v kokile.
Bubliny (mikrobubliny)	Dutiny ve stěně odlitku, povrch bubliny je čistý a hladký. Pokud nejsou vidět pouhým okem, jedná se o mikrobubliny. 	Přehřátá tavenina. Vysoký obsah vodíku. Vysoká vlhkost. Absence, nebo špatné umístění odvzdušnění. Nevhodné odvzdušnění jader.

<p>Staženiny</p>	<p>Dutiny ve stěně odlitku. Dutiny mají drsný, nebo hrubě krystalický povrch.</p> 	<p>Nevhodná konstrukce odlitku. Špatně nálitkované tepelné uzly. Neusměrněné tuhnutí odlitku vlivem špatného umístění nálitků, nebo přiškrcení nálitků. Nevhodná vtoková soustava. Nedolití nálitků. Špatné použití postříků.</p>
<p>Řediny (mikrostaženiny)</p>	<p>Nahromadění malých staženin na jednom místě. Hrubozrnná a řídká struktura kovu. Nejsou-li řediny viditelné okem, jedná se o mikrořediny.</p>	<p>Příčiny vady jsou stejné jako u vady „Staženiny“.</p>
<p>Vměstky</p>	<p>Dutiny ve stěně odlitku, vyplněné cizím předmětem.</p>	<p>Vměstky formovacích směsí, způsobené udobením jádra. Části odlouplého postříku.</p>
<p>Oxidické pleny/blány</p>	<p>Plošné tenké filmy oxidů vznikající na povrchu taveniny při odlévání. Vytvářejí rozsáhlé shluky. Jedná se stále o vměstky.</p> 	<p>Hliník reaguje s kyslíkem a v důsledku oxidace vzniká oxid hlinitý. Při nevhodném tvaru odlitku a absenci odvodu vzduchu dochází k usazování oxidických plen v odlitku. Špatná metalurgická úprava taveniny.</p>
<p>Vady struktury</p>	<p>Úchytky makro, nebo mikrostruktury od sjednaných technických podmínek.</p>	<p>Znečištění taveniny. Nesprávná nebo opomenutá modifikace a očkování.</p>
<p>Vady chemického složení, nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti</p>	<p>Nesprávné chemické složení. Špatné fyzikální a mechanické vlastnosti od sjednaných technických podmínek.</p>	<p>Znečištění taveniny. Pomíchání dvou nebo více slitin. Vysoká lící teplota. Nesprávná nebo opomenutá modifikace a očkování.</p>

2.6 Výpočtové simulační programy

Je tomu přibližně 30 let, kdy se začalo i do slévárenské technologie aplikovat simulačních technologií. Nepřetržitý vývoj výpočetní techniky a snižování její ceny vedl k větší dostupnosti těchto technologií. Kvalita simulačních programů je dána tím, jak kvalitně vystihují matematický popis dílčích dějů, jak dokáží zahrnout odchylky reálného stavu vůči ideálnímu předpokladu a jak zvládají definovat a numericky vyjádřit fyzikální a mechanické vlastnosti

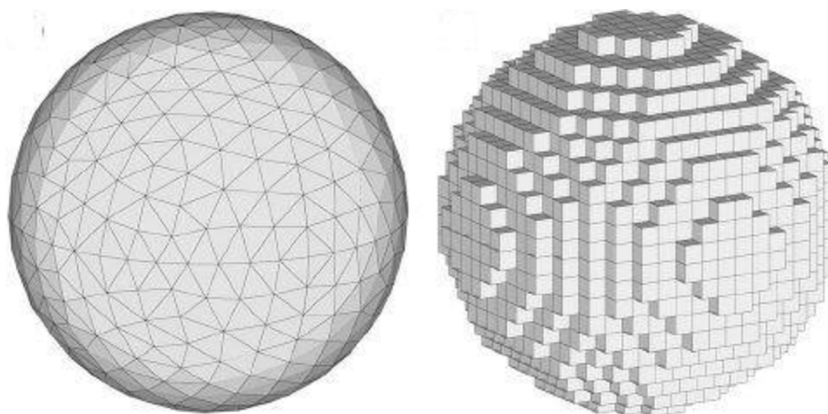
forem a taveniny v závislosti na teplotě. Důležitým faktorem je i stanovení výchozích a okrajových podmínek řešení [7, 12].

Simulační programy se zaměřují na čtyři hlavní skupiny problémů: plnění forem, tuhnutí a chladnutí odlitků, vznik struktury a vytváření vlastností odlitku, vznik pnutí a deformací [12].

Jevy řešené v simulaci jsou popsány následujícími rovnicemi: Rovnice kontinuity a Navier-Stokesův zákon o zachování hybnosti, které definují proudění kapaliny; Fourierova diferenciální rovnice pro přenos tepla definující tuhnutí a chladnutí odlitků; Zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci definující úroveň zbytkového či vnitřního pnutí v odlitku. Tyto rovnice jsou řešeny numerickými metodami. Za účelem výpočtu musí být objem rozdělen do sítě, v současné době jsou nejběžnější MKP a MKD [12].

MKP – Metoda konečných prvků označována i jako FEM (Finite-Element-Method). Řešená oblast je rozložena na podoblasti (elementy). Vrcholy elementů se nazývají uzly. Uspořádané elementy tvoří síť. Síť je ve 3D tvořena čtyřstěny, nebo hranoly. Hustotu sítě můžeme v oblastech o složitém tvaru zvyšovat, ale proces řešení bude pomalejší. Tvar této sítě je zobrazen na obr. 2-8 vlevo [12].

MKD – Metoda konečných diferencí označována i jako FDM (Finite-Differences-Method). V řešené oblasti je pravidelně rozloženo konečné množství bodů (uzlů), které vytvářejí síť. Síť je ve 3D tvořena kvádry. Výhodou sítě je její jednoduchost a krátká doba tvorby sítě. Nevýhodou je obtížný popis oblastí složitého tvaru. Tvar této sítě je zobrazen na obr. 2-8 vpravo [12].



Obr. 2-8 3D síť tvořena pomocí MKP (vlevo) a MKD (vpravo) [13]

Připravený geometrický model dané slévárenské technologie je ve vhodném formátu načten do simulačního programu. Nejběžnější využití mají výkonné CAD (Computer Aided Design) konstrukční nástroje pro tvorbu modelů, které se následně používají jako modely pro NC obrábění a výkresovou dokumentaci [7].

Aplikací simulačních programů do výroby a vývoje je dosahováno výrazného snížení nákladů na zkoušení a optimalizaci technologie. Při simulaci je možné vyzkoušet různé druhy vtokových soustav, nálitků, postřiků, teplot, slitin atd., a to ještě před tím, než je forma zadána

do výroby. Dochází ke zvyšování produktivity a úrovně poznání, kdy nejen technolog, ale i jakýkoliv jiný pracovník, může do značné míry pochopit, co se při plnění a tuhnutí uvnitř této formy děje. V každém případě je třeba tyto nástroje brát pouze jako nástroj pro technologa, který ho má nasměrovat k návrhu vhodné technologie [7].

2.6.1 Simulační program MAGMAsoft®

Jedním z celosvětově nejrozšířenějších systémů je program MAGMAsoft® (dále jen MAGMA), jeho vývoj a distribuci zabezpečuje německá firma MAGMA GmbH. Do programu MAGMA je možné importovat CAD data geometrie anebo celou formu a odlitek můžeme modelovat a upravovat ve vnitřním modeláři.

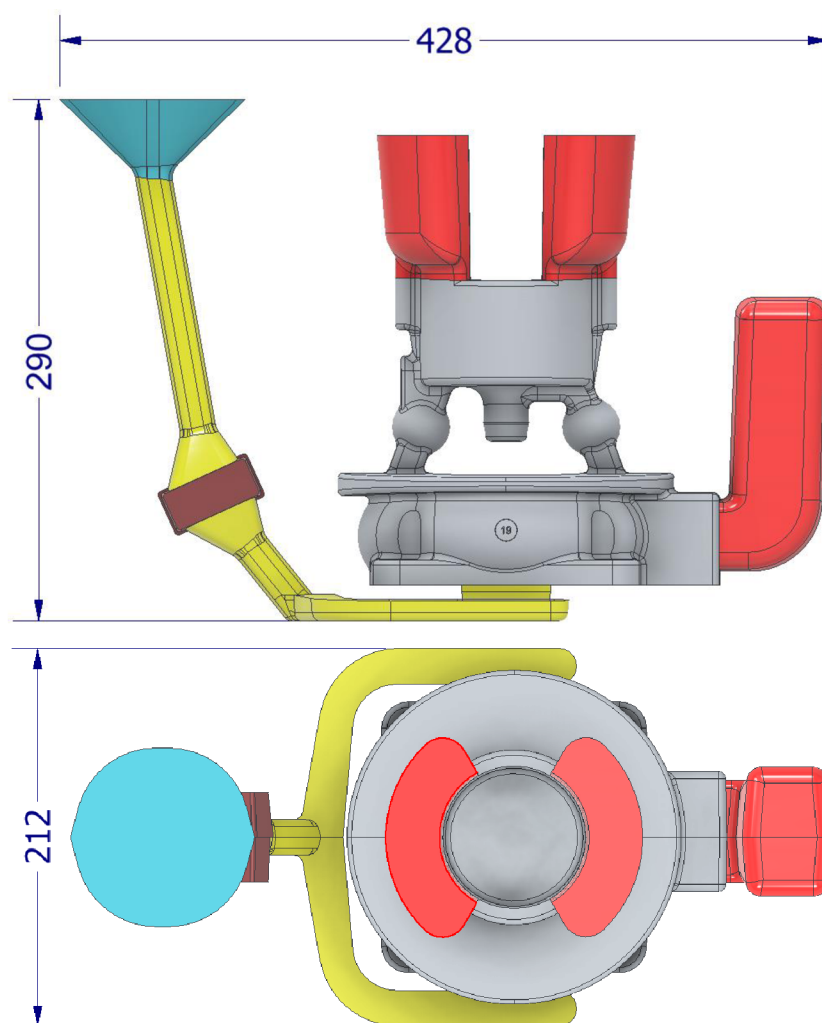
Program MAGMA pracuje na metodě FDM. Při síťování se nevytvoří síť pouze pro odlitek, ale pro celou vtokovou sestavu, nálitky, formu i jádra. Po nasíťování je třeba definovat parametry technologického procesu, tzn. teplota a složení taveniny, teplota formy, doba přípravy, doba plnění, doba celého cyklu, druhy postříků, z nichž se následně určují koeficienty přestupu tepla, definice okrajových podmínek vyplývajících z pohybů jednotlivých částí formy vůči sobě atd. Databáze softwaru MAGMA nabízí přibližně 130 nejpoužívanějších materiálů, tuto databázi může uživatel dále rozšiřovat o materiály a jejich tepelně-fyzikální veličiny získané ze svých měření. Výsledky simulace jsou rozděleny na výsledky plnění a výsledky tuhnutí, ze kterých lze exportovat videa i snímky. Výsledky umožňují analyzovat příčiny vzniku problémů, nejčastěji porezitu, studené spoje, nedolití, teplotní uzly, staženiny, mikroporezitu, až po zbytkové pnutí a deformace [7].

3 Experimentální část

Cílem bakalářské práce je optimalizovat technologii výroby odlitku za účelem eliminovat vnitřní vady. Práce byla řešena v rámci spolupráce s firmou Alumentall CZ s.r.o. (dále jen Alumentall) se sídlem v Týnci nad Sázavou, která se zabývá odléváním hliníkových slitin do pískových a kovových forem. Pro experiment byl vybrán gravitačně odlévaný díl, který je popsán níže.

3.1 Popis odlitku

Odlitek ze slitiny AlSi10MgMn, o hmotnosti cca 2,47 kg je odléván gravitačně do kovové formy a využívá se jako regulátor vzduchového vysokotlakého kompresoru. Model odlitku včetně vtokové soustavy a náliček je zobrazen na obr. 3-1.

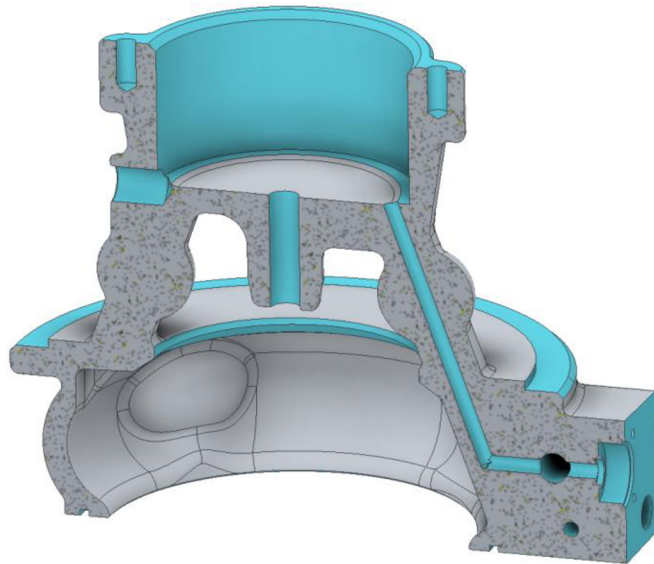


Obr. 3-1 Model odlitku z programu Autodesk Inventor s vyznačenými částmi odlitku



Licí jamka, licí kanál a otvor na filtr dohromady tvoří vtokový systém, který zaplňuje dutinu formy spodním vtokem od spodní části směrem vzhůru. Z odlitku je odřezán vtokový systém s

nálitky a je následně tepelně zpracován metodou T6, poté je odeslán k obrobení. Obrobené plochy musí být čisté, bez vad z důvodu požadavku na tlakotěsnost. Tato práce je zaměřena na odstranění vad, které by mohly negativně ovlivnit homogenitu v oblasti obrobených ploch a tlakotěsnost odlitku. Firma Alumentall poskytla CAD data odlitku (obr. 3-1) a fyzicky obrobek kus. Z těchto zdrojů byl následně vymodelován obrobek (obr. 3-2) za účelem jasného pochopení a zobrazení problematiky obrábění.



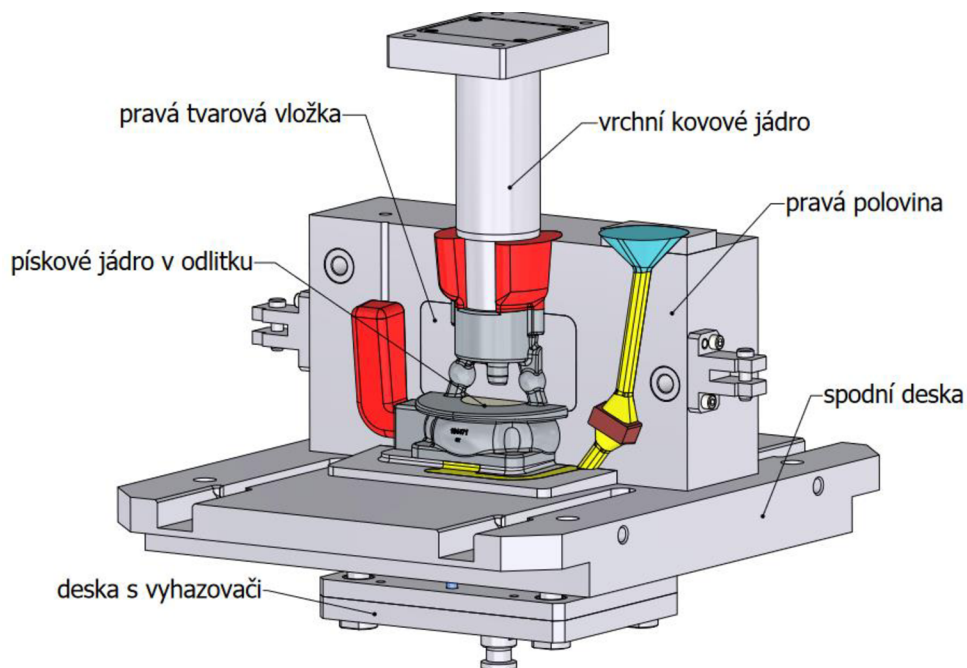
Obr. 3-2 Model obrobku v řezu s vyznačenými obrobenými plochami

Na obr. 3-2 je vidět, že je odlitek celkem komplexně obráběn. Spodek odlitku je také obroben. Vrchní část (tzv. „kalíšek“) je po celém vnitřním obvodu obráběna, tloušťka stěny po obrobení je zde 5 mm. Oblast před bočním nálitkem je taktéž značně obráběna, nachází se zde různé kanálky a díry se závity. Na základě požadavků na kvalitu a množství obrobených ploch lze konstatovat, že se v těchto případech jedná o kritická místa z hlediska výskytu vad.

3.2 Stávající technologie výroby

3.2.1 Konstrukce formy

Na obr. 3-3 je znázorněna CAD geometrie formy bez vnějšího nosného rámu. Levá a pravá polovina (dále jen LP a PP) se pohybuje po spodní desce, v níž jsou za tímto účelem obrobeny drážky, které zajišťují správné otevírání formy. Do LP a PP je vložena tvarová vložka, která je z vnější strany formy zajištěna proti posuvu. Z vrchní části je do formy vsouváno kovové jádro, které je společně s hydraulickým tahačem připojeno k rámu. Pod spodní deskou se nachází deska nesoucí vyhazovače. LP, PP, kovové jádro a deska s vyhazovači jsou pohybovány hydraulickými tahači. Materiál formy je konstrukční ocel. K tvarování vnitřní dutiny odlitku je použito pískové jádro, které si firma Alumentall kupuje a je vyráběno metodou COLD – BOX. Jádro tvoří dutinu ve spodní části odlitku a je vkládáno přímo do spodní desky. Ve vtokové soustavě je dutina, do které je vkládán pěnový keramický filtr.



Obr. 3-3 Popis CAD sestavy formy s odlitkem

3.2.2 Tavení slitiny a udržování taveniny

Housky a vrat slitiny AlSi10MgMn byly nataveny ve sklopné plynové tavící peci typu PCD 500AL a tavenina byla pomocí dopravního kelímku a vysokozdvížného vozíku převezena do kelímkové odporové udržovací pece typu CAC 500AL. V udržovací peci byla provedena rafinace a odplynění rotorovým zařízením typu STAR 2500. Následně bylo provedeno očkování a modifikace přípravky ve formě tablet. Po metalurgické úpravě taveniny byla provedena kontrola chemického složení spektrometrem SPECTROMAXx LMX08 a kontrola naplynění metodou dvojího vážení (kontrola probíhala po každé metalurgické úpravě).

Chemické složení taveniny, resp. obsah hlavních sledovaných prvků, je uvedeno v tab. 3-1, ze které je patrné, že chemické složení taveniny se pohybuje v předepsaných tolerancích.

Tab. 3-1 Výsledky hlavních sledovaných prvků spektrální analýzou

	Al T. k. k. [%]	Si T. k. k. [%]	Mg T. k. k. [%]	Mn T. k. k. [%]	Fe T. k. k. [%]	Na Konc. [%]
Min		9,00	0,230			0,0050
<x>	89,1	9,87	0,232	0,222	0,277	0,0061
Max		11,00	0,450	0,450	0,550	0,0100

*Režim korekce – typově korigované (T. k. k. = Typově korigovaná koncentrace)

Kontrola naplynění taveniny metodou dvojího vážení byla provedena na zařízení Martech-VTCM0017. Dle technologické návodky je u taveniny pro odlévání tohoto dílu předepsána hodnota Dichte index DI max 5 %, při překročení této hodnoty byla tavenina znovu odplyněna, aby naměřené hodnoty byly v předepsaných tolerancích.

3.2.3 Odlévání

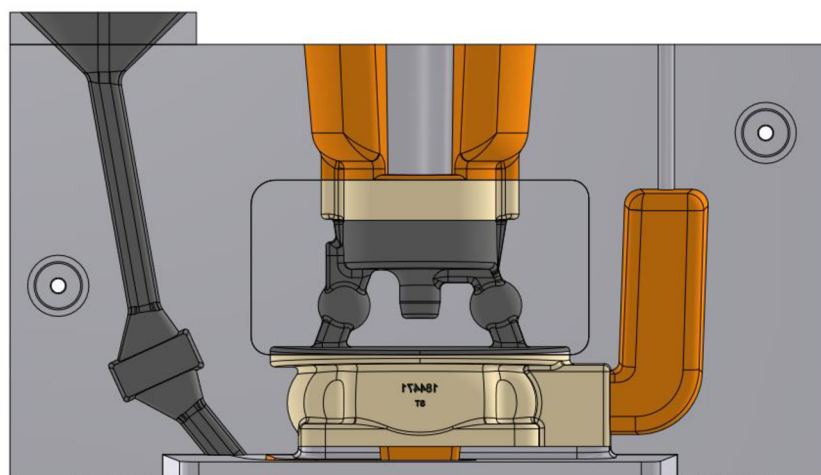
Licí pracoviště složené z licího stolu s postranními hydraulickými tahači nesoucími levou a pravou polovinu formy a z kovového rámu, ke kterému byl připevněn vrchní hydraulický tahač s kovovým jádrem, se nacházelo v těsné blízkosti udržovací pece. K ohřevu formy a kovového kádra bylo použito dvou plynových hořáků, každý z přední a zadní části pootevřené formy. Temperanční kanály se ve formě nenacházejí.

Pracovní postup slévače, krok za krokem:

- 1) Zbavení se postřiků z předchozí směny pomocí drátěného kartáče, nebo otryskání pískem.
- 2) Odstranění sloupaného postřiku a písku pomocí stlačeného vzduchu.
- 3) Ohřátí kokily na teplotu, kdy dochází k odpaření vody z postřiků – cca 180 °C.
- 4) Aplikování postřiků, nejdříve izolačních, poté grafitových (obr. 3-4).
- 5) Ohřev nad teplotu požadovanou pro lití (350-380 °C). V průběhu ohřevu příprava licí naběračky, očkování, modifikace a případné odplynění taveniny.
- 6) Temperování uzavřené kokily (cca 3 min).
- 7) Vložení pískového jádra na známku a filtru do filtrační komůrky.
- 8) Uzavření formy a vsunutí kovového jádra.
- 9) Kontinuální plnění formy až po vršek nálitků licí naběračkou.
- 10) Tuhnutí materiálu.
- 11) Vysunutí kovového jádra.
- 12) Otevření formy.
- 13) Vysunutí vyhazovačů.
- 14) Vyjmutí odlitku kleštěmi za vtokovou soustavu.
- 15) Vizuální kontrola kvality povrchu odlitku a vložení do vozíku.
- 16) Odfuk nečistot vzduchem.

Kroky 7) až 16) se následně dle kvality odlitků opakují.

Obě poloviny formy jsou ve čtvrtém kroku symetricky vymazávány silně izolačním nátěrem a stříkány izolačním a vodivým postřikem, jejichž typy nebylo firmou Alumetall dovoleno zveřejnit. Jaký postřik a kde je využíván, je znázorněno na obr. 3-4. Tvarové vložky jsou ošetřeny mimo formu, do které jsou následně zasunuty. Znalost míst aplikace nástřiků je důležitá z hlediska definování přestupu tepla mezi odlitkem a formou v simulaci.



Obr. 3-4 Schéma postřiku a výmazu formy

Silně izolační výmaz;
 Izolační postřik;
 Vodivý postřik

Silně izolační výmaz je aplikován z důvodu prodloužení tuhnutí nálitků tak, aby dokázaly zásobovat odlitek taveninou co nejdéle. K poslednímu tuhnutí by mělo docházet právě v nálitcích. Vodivý postřik ve středu formy je aplikován z důvodu rychlejšího zchlazení odlitku v této části s cílem dosáhnout toho, že vrchní nálitky kvalitněji zásobují materiálem pouze vrchní část odlitku. Vodivý postřik vtokové soustavy je aplikován pouze jako separační médium s cílem snazšího odlepení odlitku od polovin formy. Vtok ve spodní desce je vymazán. Kovové jádro je celé ošetřeno izolačním postřikem, kromě oblasti nálitků, kde je nanesen izolační výmaz.

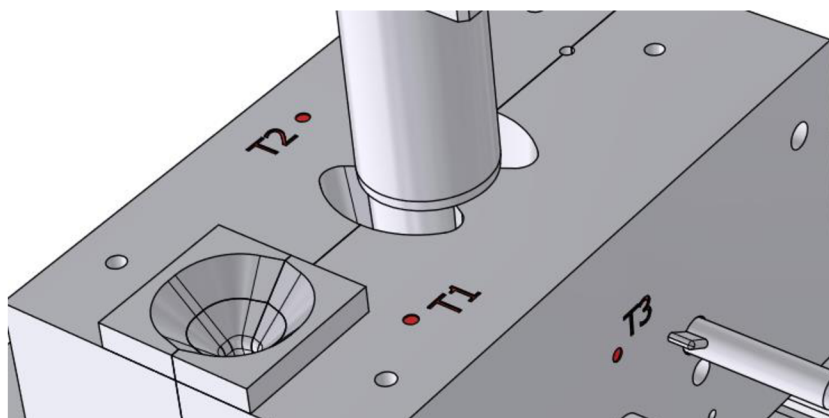
3.2.4 Stanovení procesních parametrů pro nastavení simulace

Čas plnění, tuhnutí, celého cyklu a teplota taveniny a formy byly měřeny v průběhu tří směn. Naměřené hodnoty byly následně zprůměrovány a slouží jako počáteční podmínky v simulaci stávající technologie. Oblasti měření teplot formy jsou vyznačeny na obr. 3-5 červenou barvou. Měření teploty formy probíhalo průmyslovým bezkontaktním teploměrem typu Fortum 4780401 bezprostředně po nalití a čas byl měřen pomocí stopek. V případě měření teploty taveniny byla použita teplotní sonda AHLBORN ALMEMO FTA150L0700H.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P1. Průměrné hodnoty sledovaných veličin jsou uvedeny v tab. 3-2. Z naměřených hodnot vyplývá, že forma se z teploty přehřevu 370 °C ustálí na teplotě ± 320 °C za 6÷7 licích cyklů. Teplota taveniny se pohybuje kolem 720 °C. Čas plnění je přibližně 8 sekund, čas chladnutí 2 minuty a 30 sekund, čas celého cyklu 4 minuty a 15 sekund.

Tab. 3-2 Průměrné hodnoty vzorkovacího protokolu z přílohy P1

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	Tmat. [°C]	tpln. [s]	tchl. [s]	tcykl. [s]	Poznámka
318	330	320	720	7,5÷8,3	2:30	4:15	Průměrné ustálení

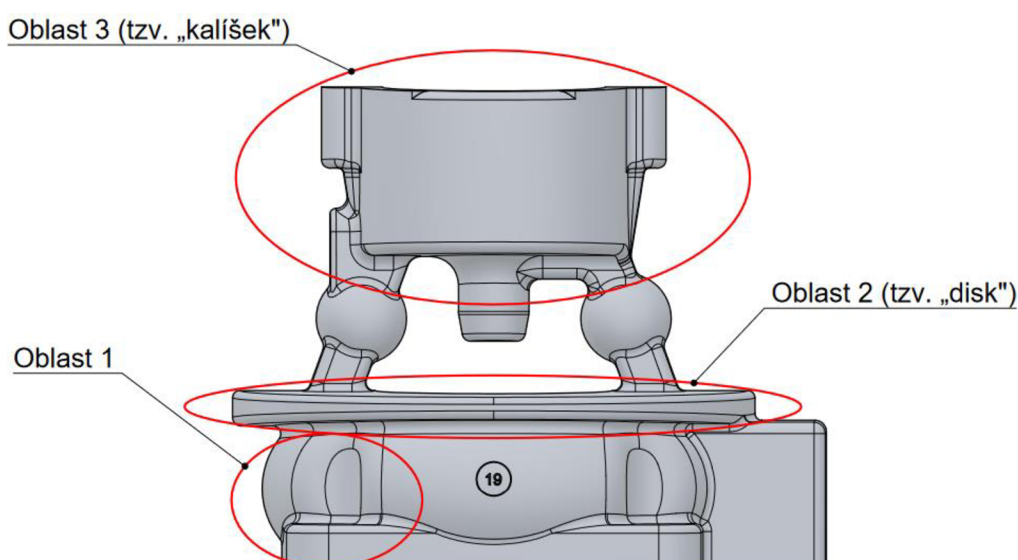


Obr. 3-5 Oblasti měření teploty formy

3.2.5 Posouzení vad v odlitku

Z padesáti poskytnutých odlitků byly po zrentgenování vybrány s ohledem na množství a velikosti vad tři odlitky. Některé odlitky měly pouze jednu vadu, proto byl z těchto tří kusů vybrán ten, který obsahuje všechny kombinace vnitřních vad. Kvalita tohoto odlitku byla v laboratořích Katedry strojírenské technologie FS TUL dále vyhodnocována.

Prvotně bylo provedeno nasnímání tomografem Zeiss Metrotom 1500. Po nasnímání vznikl 3D model, kterým lze otáčet a pomocí rovin jej lze i řezat a prohlížet si vady v dané řezné rovině. Výsledků z tomografu bylo využito na lokalizaci a separaci jednotlivých vad při řezání odlitku. Separované vzorky s vadami byly dále hodnoceny. S využitím digitálního mikroskopu Olympus DSX510 byly pořízeny mikro a makro snímky jednotlivých vad z metalografických vzorků.



obr. 3-6 Tři hlavní oblasti výskytu vad

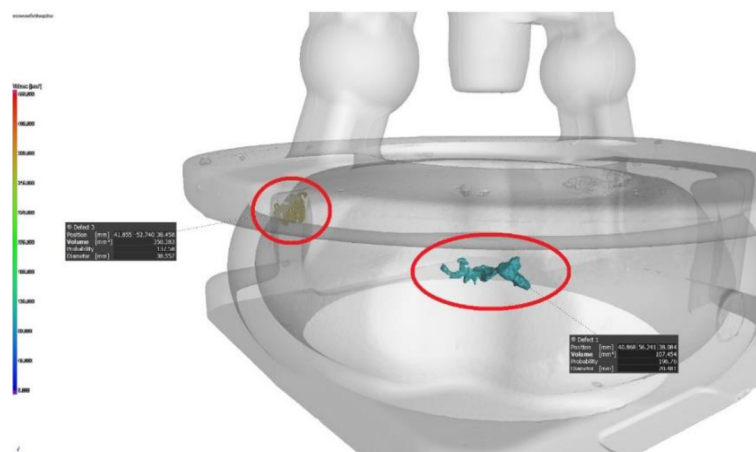
Odlitek byl rozdělen z hlediska výskytu vnitřních vad do třech oblastí zobrazených na obr. 3-6. Oblast 1 se nachází ve spodní části odlitku, její vnitřní geometrie je tvarována pískovým

jádrem. Oblast 2 se nachází těsně nad pískovým jádrem a má tvar disku. Oblast 3, také nazývána kalíšek tvoří vrchní část odlitku, její vnitřní geometrie je tvarována kovovým jádrem.

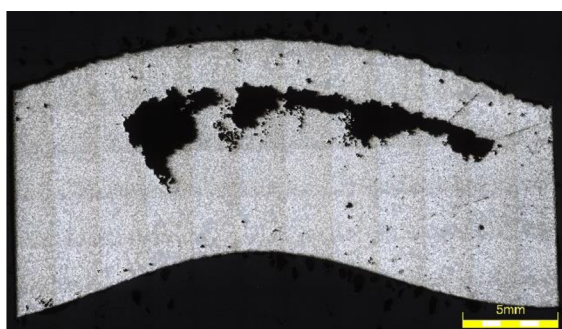
Největší počet zmetků a reklamací je dle firmy Alumetall z důvodu vad v oblasti 3. Tato oblast je zevnitř při běhu kompresoru značně tlakově namáhána a jakékoliv vady mohou snížit její tlakotěsnost. Na obr. 3-2 v kapitole 3.1 je vidět, že je tato část obráběna nejvíce, je zde velký úběr materiálu.

3.2.6 Vyhodnocení největší vady v oblasti 1

CT analýza ukázala, že se vada nachází v oblasti 1, viz obr. 3-7. Jelikož je odlitek téměř symetrický, je tato vada situována v levé i pravé části odlitku. Ze snímků makro a mikro struktury (obr. 3-8 a 3-9) je patrné, že se jedná o staženinu. Toto místo se nachází daleko od jednotlivých nálitků, tudíž není dostatečně zásobováno materiálem. Blízký vtokový systém může tuto část formy přehřívat, čímž je prodloužen interval tuhnutí oproti zbytku formy, a to podporuje vznik staženin. Z důvodu nulového počtu reklamací zapříčiněných těmito vadami se jejich eliminace dále neřešila.



Obr. 3-7 CT snímek první vady



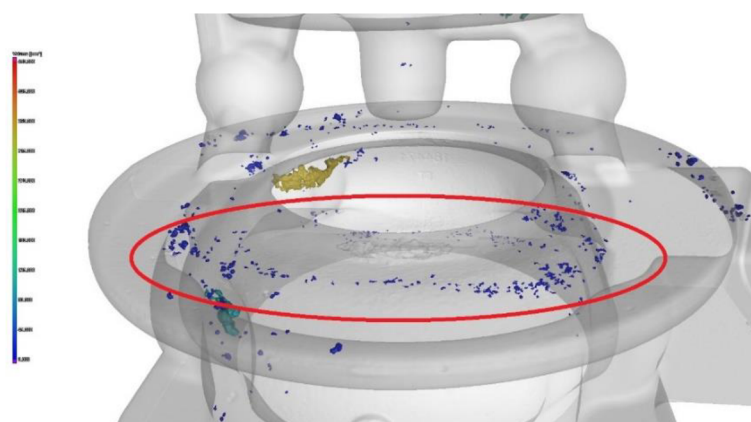
Obr. 3-8 Makrostruktura první vady



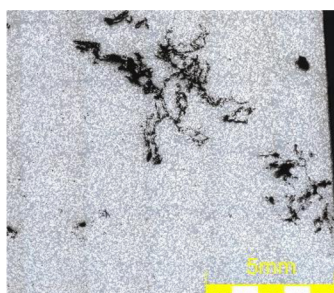
Obr. 3-9 Mikrostruktura první vady

3.2.7 Vyhodnocení největší vady v oblasti 2

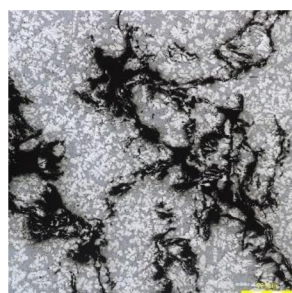
Na obr. 3-10 je zobrazen CT snímek výskytu vad v oblasti 2. Vady se nachází prakticky po celém jejím obvodu. Z metalografických snímků je vidět, že se tyto vady nacházejí u horní stěny. Převládají zde oxidické pleny (obr. 3-11 a 12), ale patrné jsou i bubliny (obr. 3-13 vlevo nahoře). Vznik je pravděpodobně zapříčiněn geometrií této části formy. Povrch je zde téměř vodorovný, a i přes velké množství odvzdušnění na vnějším obvodu je zde zachycován a zahlcován vzduch a vměstky. Jelikož se oblast 2 nachází v blízkosti pískového jádra, lze usuzovat, že bubliny patrné na metalografických snímcích mohly vzniknout také vniknutím plynů z jádra do odlitku. Tato vada je v přídatku na obrábění, proto je počet reklamací opět nulový a eliminace těchto vad nebyla dále řešena.



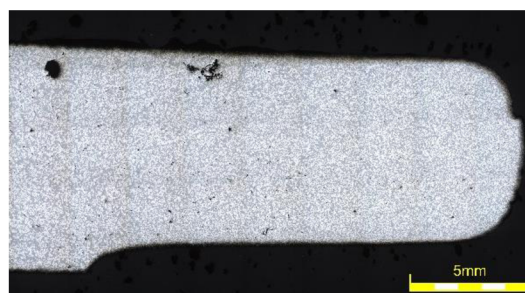
obr. 3-10 CT snímek druhé vady



Obr. 3-11 Makrostruktura druhé vady



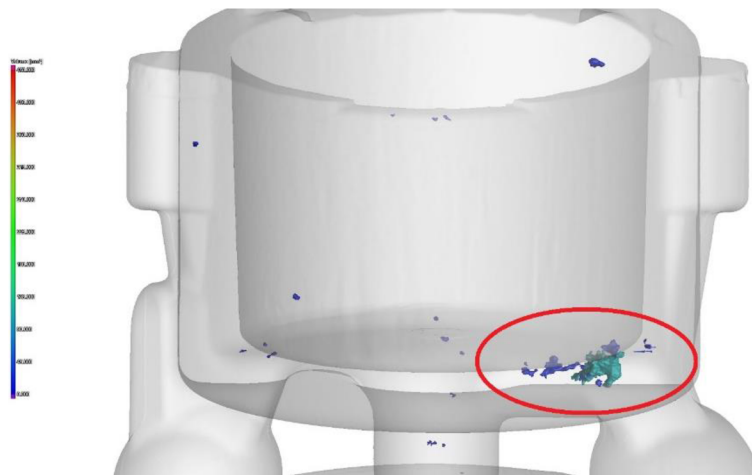
Obr. 3-12 Mikrostruktura druhé vady



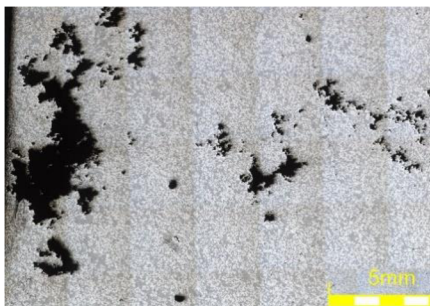
Obr. 3-13 Makrostruktura druhé vady – boční pohled

3.2.8 Vyhodnocení největší vady v oblasti 3

CT snímek oblasti 3 je uveden na obr. 3-14. Vady vznikají pouze v místě, kde má dno větší tloušťku. Dno je v této oblasti rozšířeno pravděpodobně za účelem propojení tzv. „špuntu“ s horním nálitkem. Z metalografických snímků (obr. 3-15, 16, 17) je patrné, že se jedná o staženiny. Vznik této vady je zapříčiněn pravděpodobně nevhodnou geometrií, kvůli které dochází k brzkému oddělení této části od nálitků v průběhu tuhnutí. Problémem bude zřejmě i malý rádius na konci kovového jádra. Z důvodu tlakotěsnosti a obrábění této části odlitku je vada nepřípustná a její eliminace byla cílem této práce.



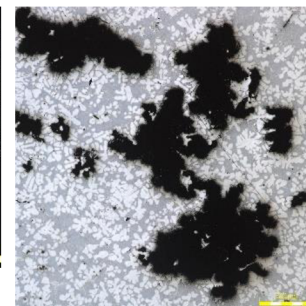
Obr. 3-14 CT snímek třetí vady



Obr. 3-15 Makrostruktura třetí vady



Obr. 3-16 Makrostruktura třetí vady – boční pohled



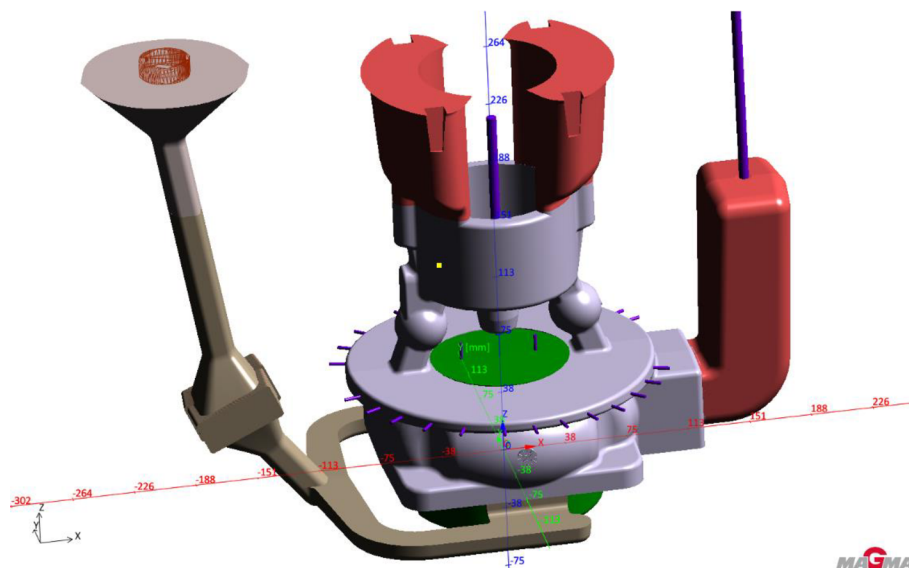
Obr. 3-17 Mikrostruktura třetí vady

3.3 Simulace stávající technologie

Simulační výpočet byl proveden v programu MAGMASoft® 5.5.1.

Jako první byla **importována CAD geometrie** a jednotlivé součásti sestavy byly patřičně pojmenovány. Všechny části formy, které se nedotýkají odlitku byly ze sestavy odstraněny, tyto součásti nemají takový vliv na teplotní pole a zbytečně by prodlužovaly délku výpočtu. Předchozí poznatky o aplikaci postřiků (obr. 3-4) umožnily se co nejlépe přiblížit skutečnosti z hlediska definování podmínek přestupu tepla. Následně se jednotlivé části přiřadily do materiálových skupin a bylo jim přiřazeno vlastní ID označení, které se využívá při definici materiálových charakteristik a koeficientů přestupu tepla mezi jednotlivými plochami.

Na obr. 3-18 je pomocí fialových válců zobrazeno odvzdušnění formy, které bylo nastaveno podle skutečnosti. Je možné si všimnout, že jednotlivé části odlitku byly rozděleny a mají vlastní identifikaci znázorněnou různými barvami. Na vršek vtoku byl umístěn tzv. inlet, který napodobuje šířku proudu taveniny při plnění formy.



Obr. 3-18 Model odlitku z programu MAGMA s vyznačeným odvodušněním a inletem

Následovala **tvorba sítě**. Síť je tvořena metodou konečných diferencí (FDM), která jednotlivé součásti nasítuje na konečný počet prvků ve tvaru kvádrů. Vytvořená síť odlitku obsahovala 587 997 prvků (obr. 3-19). Následně došlo ke kontrole kvality sítě (obr. 3-20). Zeleně vyznačené prvky na obr. 3-20 znázorňují plochy kontaktu odlitku s atmosférou. Počet kolizních a tenkých ploch byl minimální a na simulaci neměl žádný vliv.



Obr. 3-19 Nasítovaný odlitek



Obr. 3-20 Kontrola kvality sítě

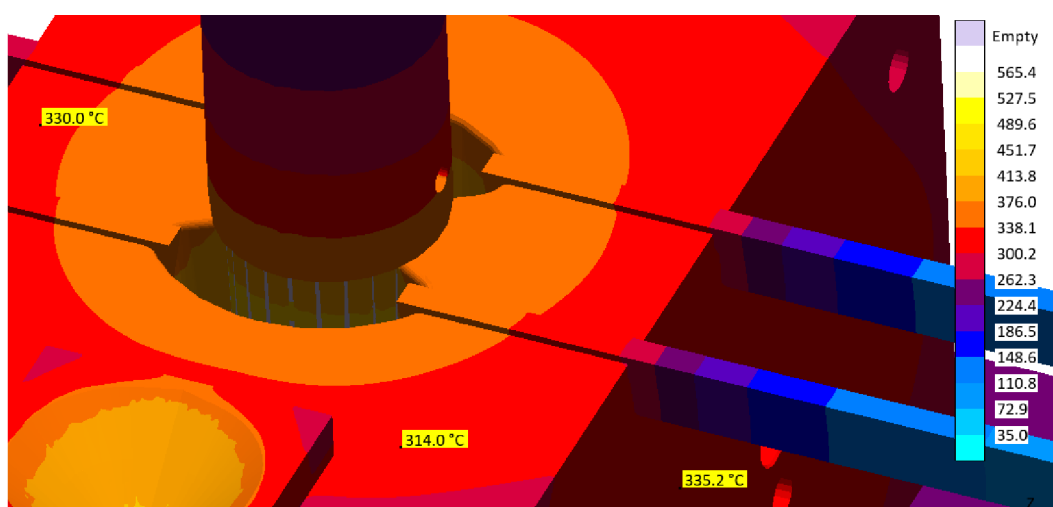
Posledním krokem byla **definice technologie**. Při tomto kroku došlo k definování složení odlévané slitiny, materiálu formy, pískového jádra a filtru. K jednotlivým materiálům byla přiřazena jejich počáteční teplota. Následovala definice přestupu tepla mezi jednotlivými plochami odlitku a formy, zde bylo využito poznatků z technologického postupu a měření ve firmě Alumetall. Jednotlivé druhy postřiků jsou již obsahem databáze programu MAGMA. Vztahy mezi částmi formy byly řešeny pomocí koeficientů přestupu tepla doporučených přímo firmou MAGMA. Jako poslední byly definovány časy jednotlivých kroků při odlévání, počet

zahřívacích cyklů byl nastaven na 5. Opět bylo využito předchozího měření ve firmě. Doba trvání výpočtů byla na univerzitní čtyř jádrové verzi programu přibližně 6 hodin.

3.4 Porovnání výsledků simulace se skutečností

3.4.1 Porovnání teplot formy

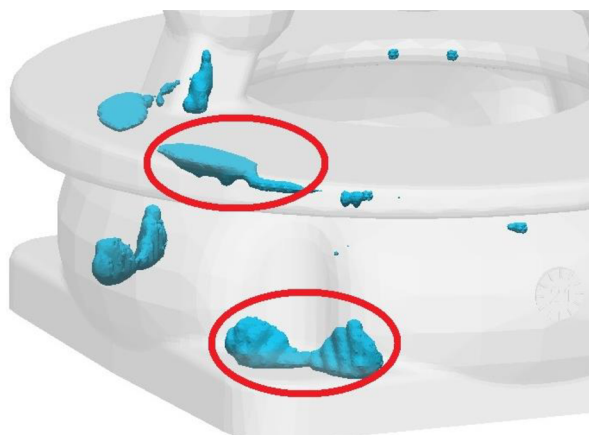
Výsledky simulace teploty formy byly porovnány s hodnotami naměřenými v průběhu sledování výrobního procesu ve firmě. Hodnoty teploty uvedené na obr. 3-21 byly porovnány s výsledky měření v tab. 3-2. Bylo zjištěno, že teplota vrchní části formy přesně odpovídá naměřeným teplotám ve firmě Alumentall. Boční teplota formy byla ve výsledcích simulace o něco vyšší, odchylka ale není nijak zásadně velká.



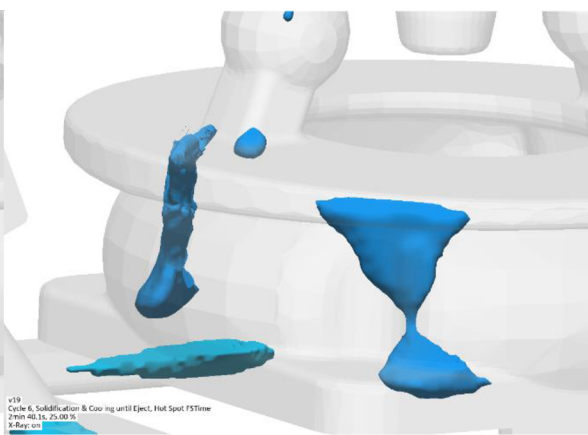
Obr. 3-21 Teplotní pole formy na konci plnění v simulaci

3.4.2 Porovnání vad v odlitku s výsledky simulace

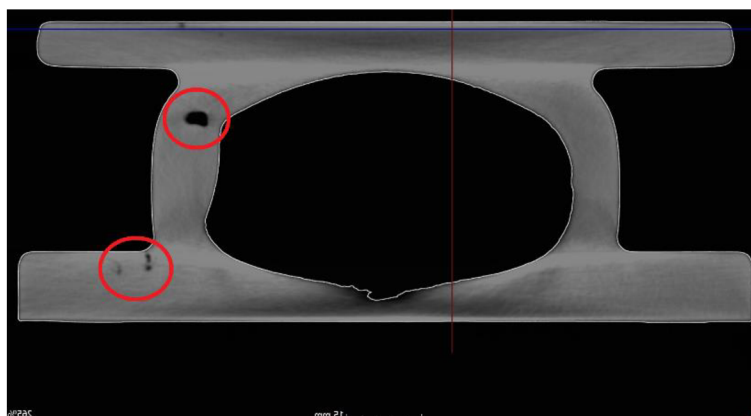
Výsledky simulace zobrazené na obr. 3-22 predikují výskyt porezity v oblasti 1. Z kritéria Hot Spot zobrazeném na obr. 3-23 je zřejmé, že v tomto místě dochází k tvorbě tepelných uzlů. Při porovnání predikce se snímkem reálné vady na obr. 3-24 výsledky odpovídají.



Obr. 3-22 Porezita v oblasti 1

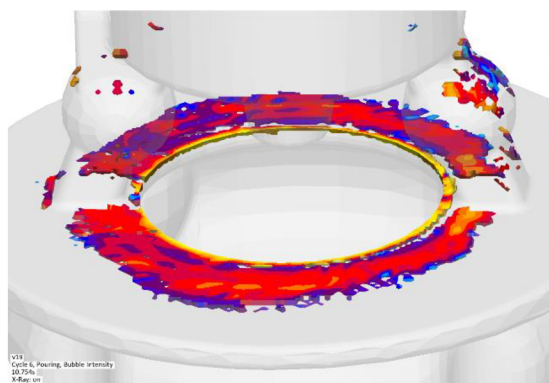


Obr. 3-23 Hot Spot v oblasti 1

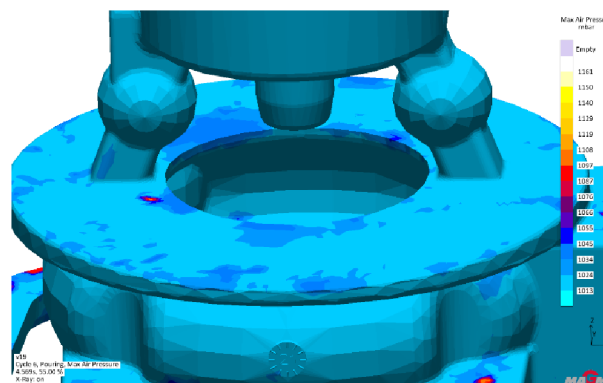


Obr. 3-24 CT snímek vad v oblasti 1

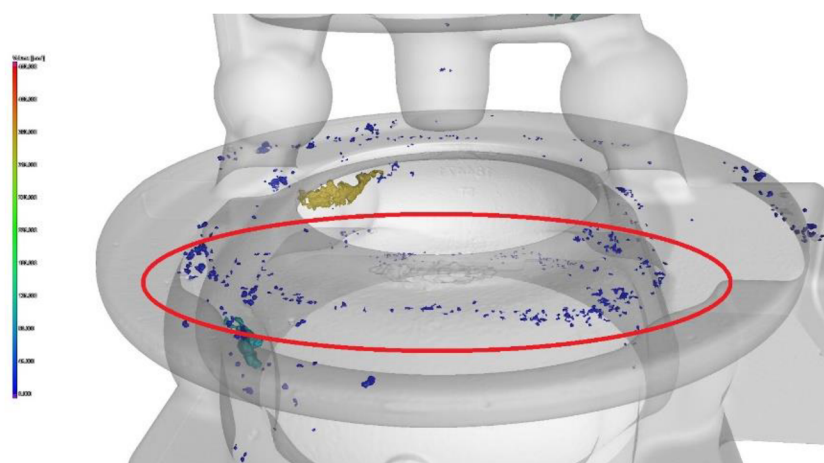
Na obr. 3-25 je znázorněna predikce zachycení bublin z pískového jádra a na obr. 3-26 je vidět predikce zahlceného vzduchu v oblasti 2. Při porovnání se skutečnou vadou (obr. 3-27) je možné konstatovat, že tato predikce odpovídá skutečnosti a opravdu zde dochází k usazení plynů z jádra a oxidů.



Obr. 3-25 Zachycení bublin v oblasti 2

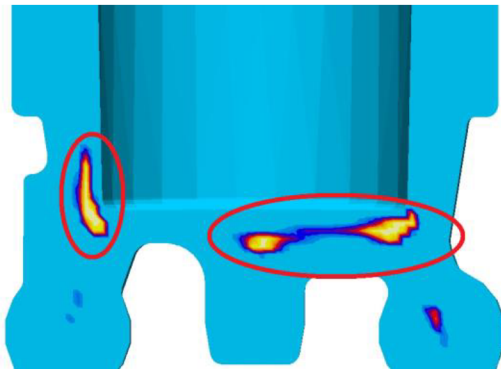


Obr. 3-26 Zahlčení vzduchu v oblasti 2



Obr. 3-27 CT snímek oblasti 2

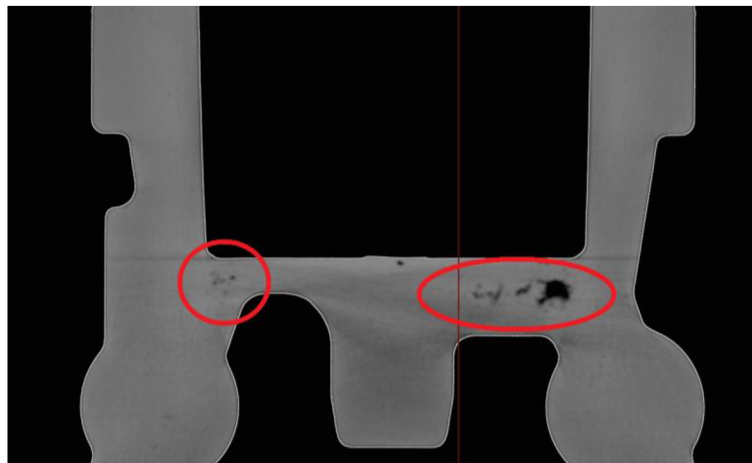
Při porovnání výsledků predikcí porezity a tepelných uzlů v oblasti 3 (obr. 3-28 a 3-29) se skutečností je vidět, že výsledky jsou v dobré shodě. Opět se tedy jedná o staženiny. Predikované vady se přibližně nacházejí na stejném místě jako ve skutečnosti (obr 3-30) a je možné usoudit, že i v této části odlitku výsledky simulace odpovídají skutečnosti.



Obr. 3-28 Porezita v oblasti 3

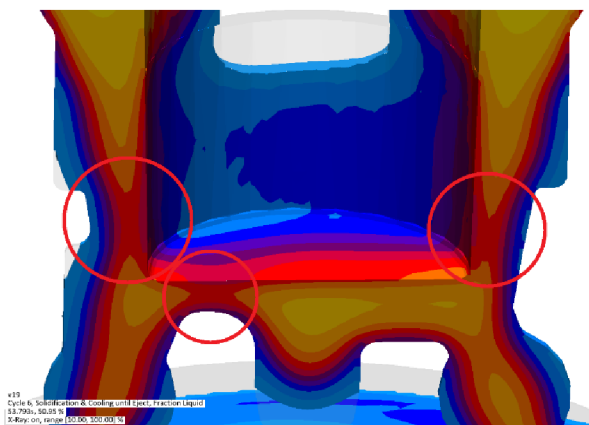


Obr. 3-29 Hot Spot v oblasti 3

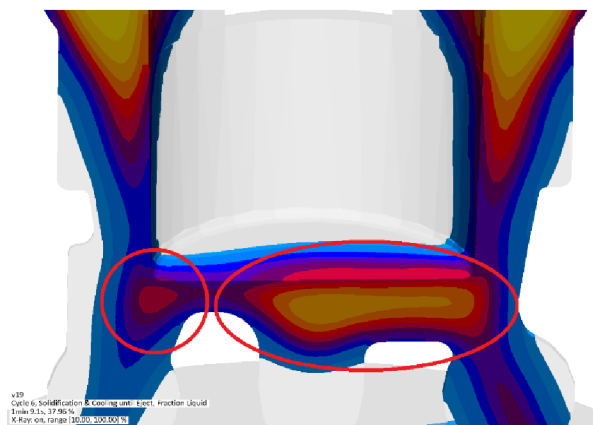


Obr. 3-30 CT snímek vad v oblasti 3

Jelikož právě u této části odlitku byla následně upravována geometrie za účelem eliminace vad v oblasti 3, je nutné se hlouběji podívat, co se v této oblasti při tuhnutí děje, a proč v ní vznikají tepelné uzly. Za tímto účelem nejlépe poslouží výsledky predikce tzv. Fraction Liquid, které zobrazují podíl tekuté fáze v průběhu tuhnutí. Modrá barva na obr. 3-31 a 32 znázorňuje téměř ztuhlý materiál, čím více je materiál žlutější, tím více tekuté fáze obsahuje. Průhledný tvar je již ztuhlý materiál. Na obr. 3-31 je vidět, že dochází k přerušení usměrněného tuhnutí směrem k nálitkům, vyznačená místa jsou postupně oddělena od možnosti být zásobována materiálem z nálitků (obr. 3-32) a vznikají staženiny.



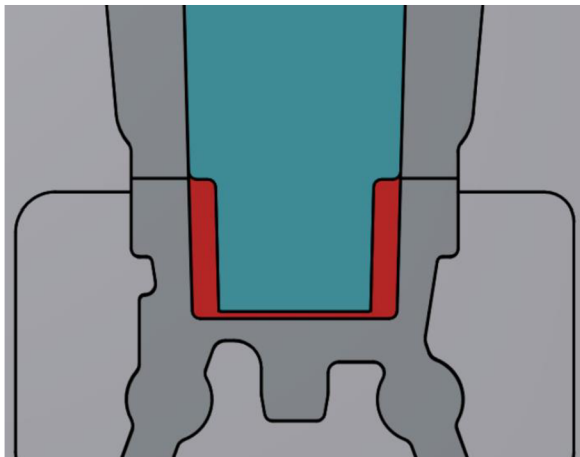
Obr. 3-31 Fraction Liquid stávající geometrie (54 s)



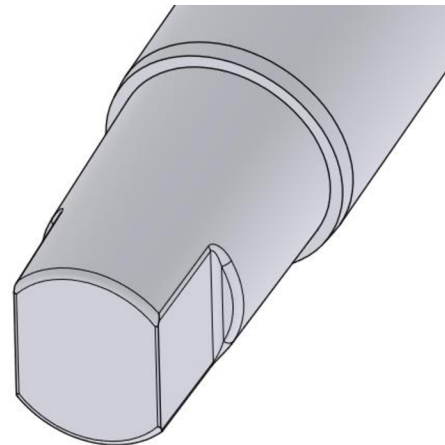
Obr. 3-32 Fraction Liquid ke konci tuhnutí (70 s)

3.5 Návrh úpravy formy a následné vyhodnocení jednotlivých simulací

Z předchozích výsledků a poznatků byla navržena **první úprava** vrchního kovového jádra. Vrchní jádro bylo zvoleno proto, protože jeho úprava je z hlediska proveditelnosti lehčí, než úprava tvaru pravé a levé poloviny formy a následné vyrobení a aplikace do výroby je mnohem více reálná. Vnější přídavek vzniklý úpravou tvaru polovin by bylo také mnohem obtížnější obrábět při následném zpracování odlitku. První úprava je zobrazena na obr. 3-33 a obr. 3-34, modře je zobrazena nová geometrie, červeně původní. Úprava spočívala v jednoduchém seříznutí spodní části kovového jádra tak, aby pod nálitky bylo více materiálu. Čelo jádra bylo zkráceno o 3 mm za účelem rozšíření tloušťky stěny odlitku v tomto místě.

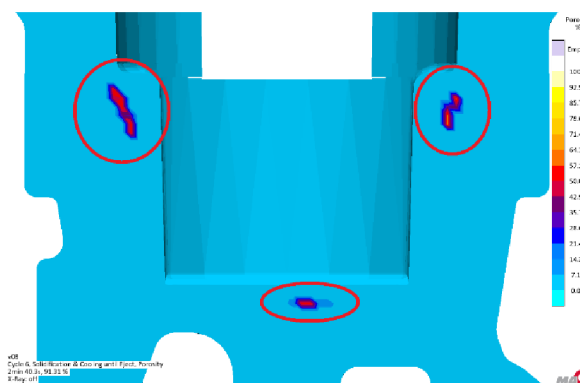


Obr. 3-33 Porovnání první úpravy se stávající geometrií

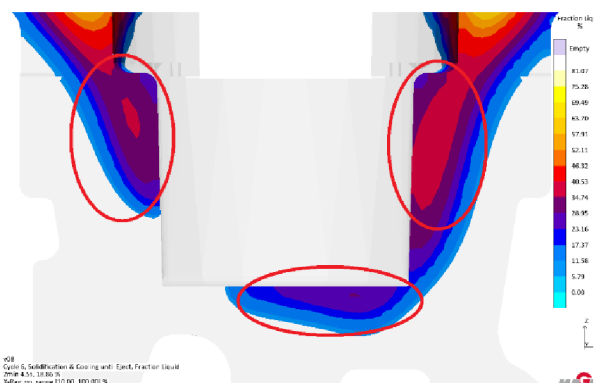


Obr. 3-34 Detail jádra po první úpravě

Na obr. 3-35 je vidět změna predikce porezity. Ve spodní části odlitku není již tak velká porezita, která se přesunula spíše do vrchní části této oblasti, kde došlo opět k uškrcení nálitků. Obr. 3-36 naznačuje, že spodní část kalíšku je zásobována pouze pravým nálitkem a přes ostrý rádius na čelo jádra není zásobování materiálem z nálitku příliš efektivní.



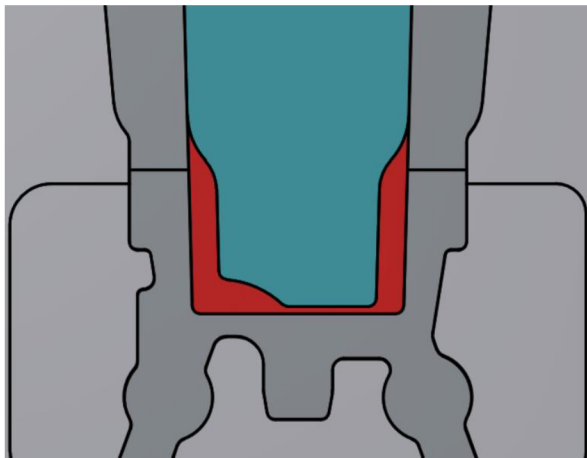
Obr. 3-35 Porezita po první úpravě



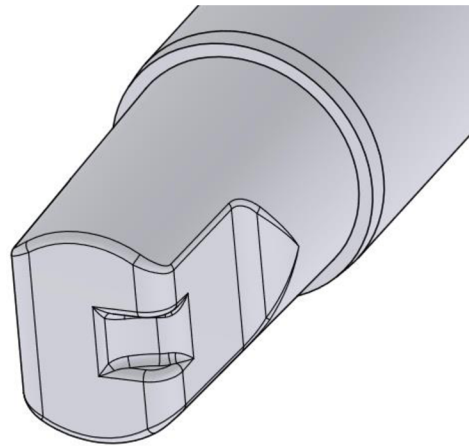
Obr. 3-36 Fraction Liquid první úpravy

Poznatků z první úpravy bylo využito k **druhé úpravě** zobrazené na obr. 3-37, ta spočívala v seříznutí větší části kovového jádra tak, aby přídavek končil až v oblasti nálitků a

nedocházelo k jejich uškrcení. Dále byla vytvořena drážka (obr. 3-38) s účelem propojení spodní části kalíšku při tuhnutí i s levým nálitkem. Jádru bylo opatřeno většími rádiusy.

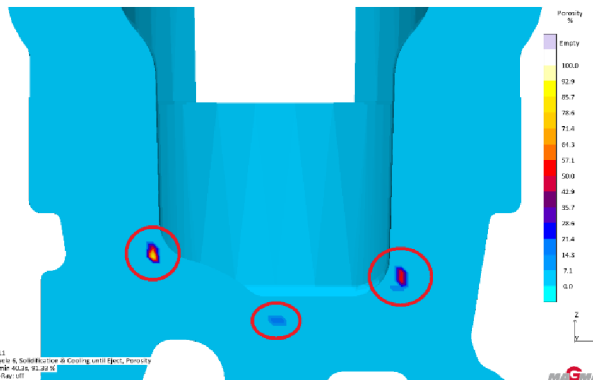


Obr. 3-37 Porovnáni druhé úpravy se stávající geometrií

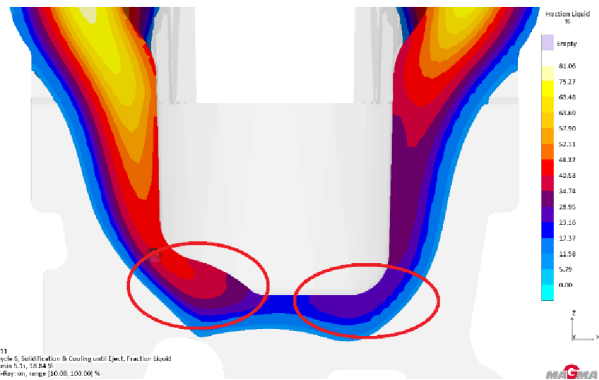


Obr. 3-38 Detail jádra po druhé úpravě

Na obr. 3-39 je znázorněna predikce porezity, která je objemově v porovnání s prvotní simulací velice malá a nachází se převážně v oblasti, která bude odstraněna při obrobení. Obr. 3-40 opět naznačuje, že kritickými místy jsou přechody mezi rádiusy. I přes to, že byly rádiusy zvětšeny, stále nedochází k ideálnímu tuhnutí. Výsledky jsou každopádně téměř uspokojivé.



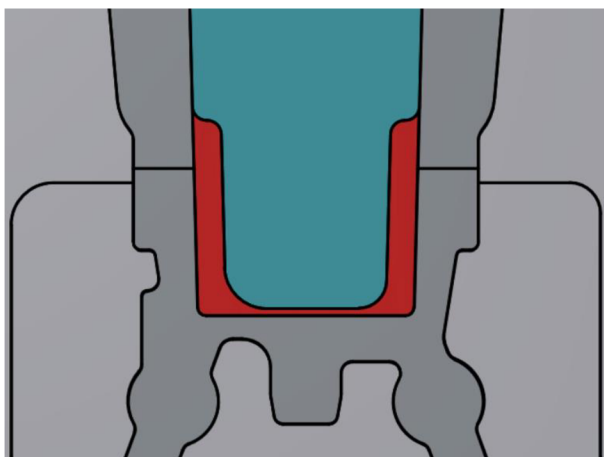
Obr. 3-39 Porezita po druhé úpravě



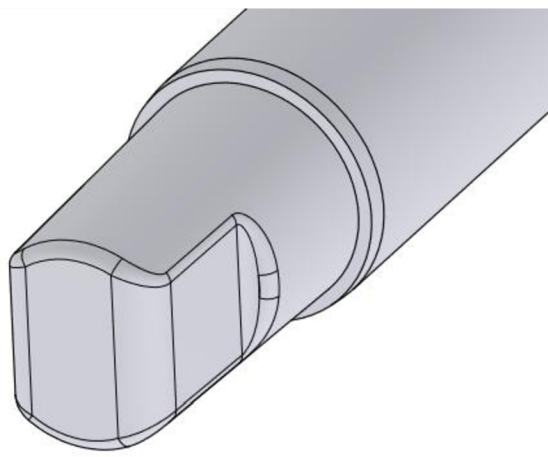
Obr. 3-40 Fraction Liquid druhé úpravy

Ve **třetí úpravě** zobrazené na obr. 3-41 a 42 byla drážka odstraněna a jádro bylo opatřeno velkými rádiusy. V **čtvrté úpravě** byla ponechána geometrie z třetí úpravy a byly testovány dvě úpravy vtokového systému, varianta 1 (obr. 3-43) a varianta 2 (obr. 3-44), které měly za následek usměrnění porezity do jednoho místa.

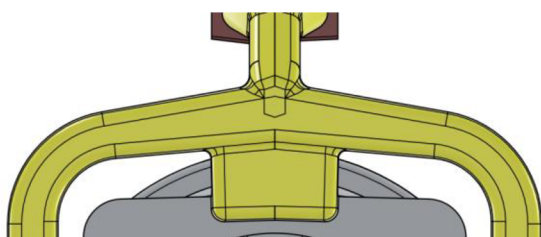
Jak je vidět na obr. 3-45, kombinace třetí úpravy kovového jádra a druhé varianty vtoku vedla k úplné eliminaci porezity. U pravého dolního rádiusu stále nedochází dle výsledků na obr. 3-46 k úplně dokonalému tuhnutí, i přes to zde žádná predikce porezity není.



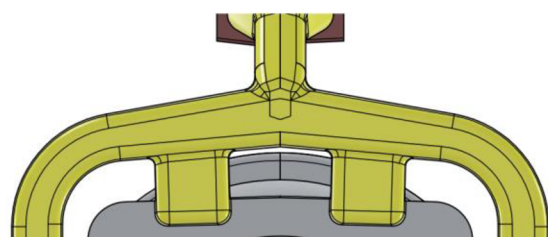
Obr. 3-41 Porovnání třetí úpravy se stávající geometrií



Obr. 3-42 Detail jádra po třetí úpravě



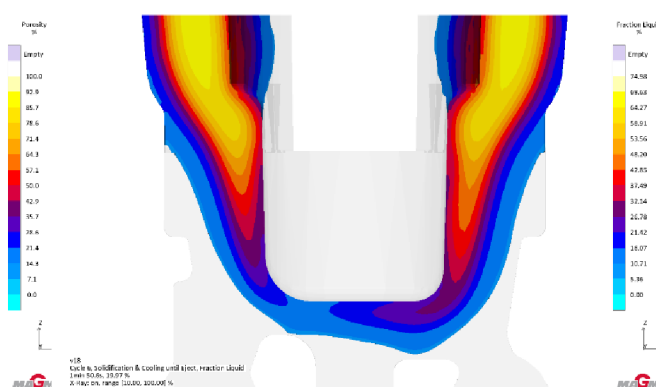
Obr. 3-43 První varianta úpravy vtoku



Obr. 3-44 Druhá varianta úpravy vtoku



Obr. 3-45 Porezita po čtvrté úpravě



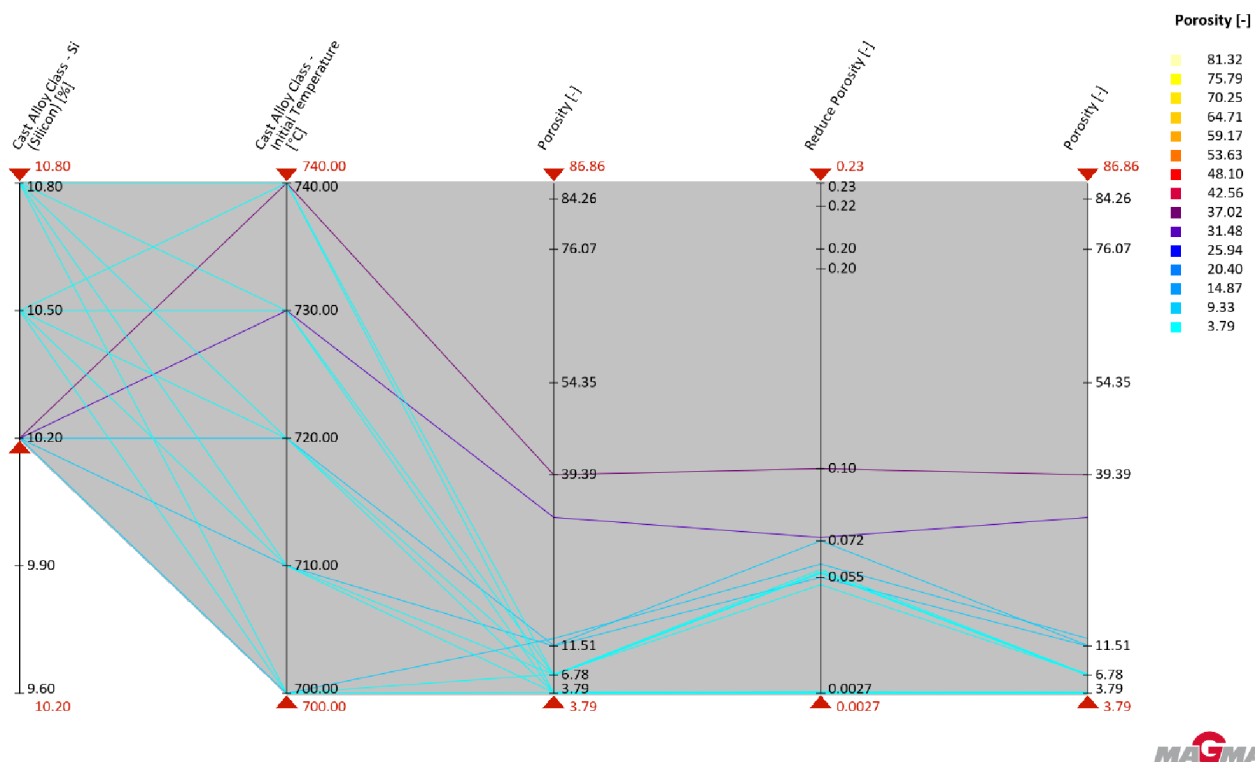
Obr. 3-46 Fraction Liquid čtvrté úpravy

3.6 Návrh optimalizace chemického složení a teploty lití

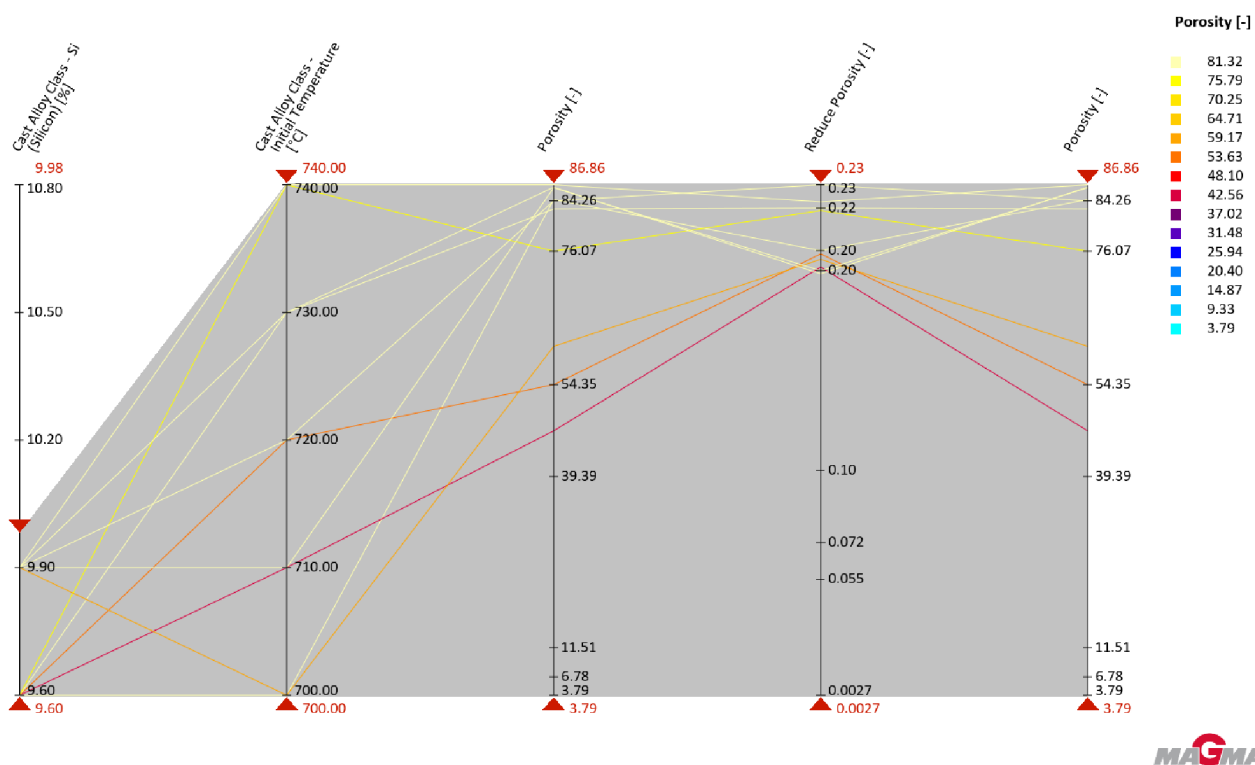
Pro nejlepší řešení z hlediska eliminace vad ve vrchní části odlitku vyhodnoceného v diskuzi byla v programu MAGMA provedena automatická optimalizace teploty lití a procentuálního obsahu křemíku s cílem snížit tendenci k tvorbě porezity. Teplota taveniny byla vyhodnocována v intervalu od 700 °C do 740 °C s krokem po 10 °C a obsah Si byl vyhodnocován v intervalu od 9,6 % do 10,8 % s krokem po 0,3 %. Ve výsledcích optimalizace bylo zjištěno, že teplota taveniny nemá na tvorbu porezity téměř žádný efekt.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při obsahu křemíku v intervalu od 10,2 % do 10,8 % Si (znázorněno na obr. 3-47), optimálně 10,5 % Si v tavenině.

Obsah Si pohybující se pod 10,2 %, tedy i obsah používaný firmou Alumatell, je vyhodnocen už jako špatný (zobrazeno na obr. 3-48). Z tohoto důvodu bylo firmě Alumatell doporučeno upravit složení slitiny a změnit povolený interval nastavený při spektrální analýze.



Obr. 3-47 Graf závislosti obsahu křemíku a teploty taveniny na množství poretity – nejlepší výsledky



Obr. 3-48 Graf závislosti obsahu křemíku a teploty taveniny na množství poretity – nejhorší výsledky

4 Diskuze

Cílem této bakalářské práce bylo optimalizovat stávající technologii výroby vzduchového regulátoru vysokotlakého kompresoru za účelem eliminace vad. Pro optimalizaci byl využit simulační program MAGMASoft®.

V rámci experimentální části práce byly nejprve zdokumentovány parametry současné technologie výroby vybraného odlitku a také vyhodnocena kvalita těchto odlitků. Po vyhodnocení vnitřních vad v odlitku došlo ke stanovení kritických oblastí odlitku z hlediska tlakotěsnosti a byla provedena první simulace stávající technologie. Výsledky simulace odpovídaly skutečným vadám detekovaným v odlitku. Na základě toho byly navrženy úpravy geometrie za účelem eliminace těchto vad.

První úprava jádra, ve které došlo k jednoduchému zúžení jádra pod nálitky (obr. 3-33 a 34), ukázala, že přídavek na odlitku je moc nízký a v rozhraní mezi odlitkem a nálitky se nachází stále místo, kde náhlé zúžení tloušťky stěny i nadále zamezuje efektivnímu zásobování odlitku materiálem. Výsledky simulace (obr. 3-35 a 36) dále ukázaly, že malé rádiusy na čele jádra mají tendenci přerušovat usměrněné tuhnutí směrem do nálitků. Zároveň bylo zjištěno, že spodní část řešené oblasti je zásobována materiálem pouze z pravého horního nálitku, k uškrcení levého nálitku došlo příliš brzo a pravý náliček musel zásobovat materiálem mnohem větší objem odlitku. I přesto, že výsledky simulace nebyly uspokojivé, poskytly důležité informace pro další úpravu. Bylo konstatováno, že přídavek na odlitku bude nutno v následujících simulacích prodloužit až do oblasti nálitků, rádiusy na čele jádra bude nutné zvětšit a tloušťku stěny spodní levé části odlitku rozšířit tak, aby se do jejího zásobování efektivně zapojil i levý náliček.

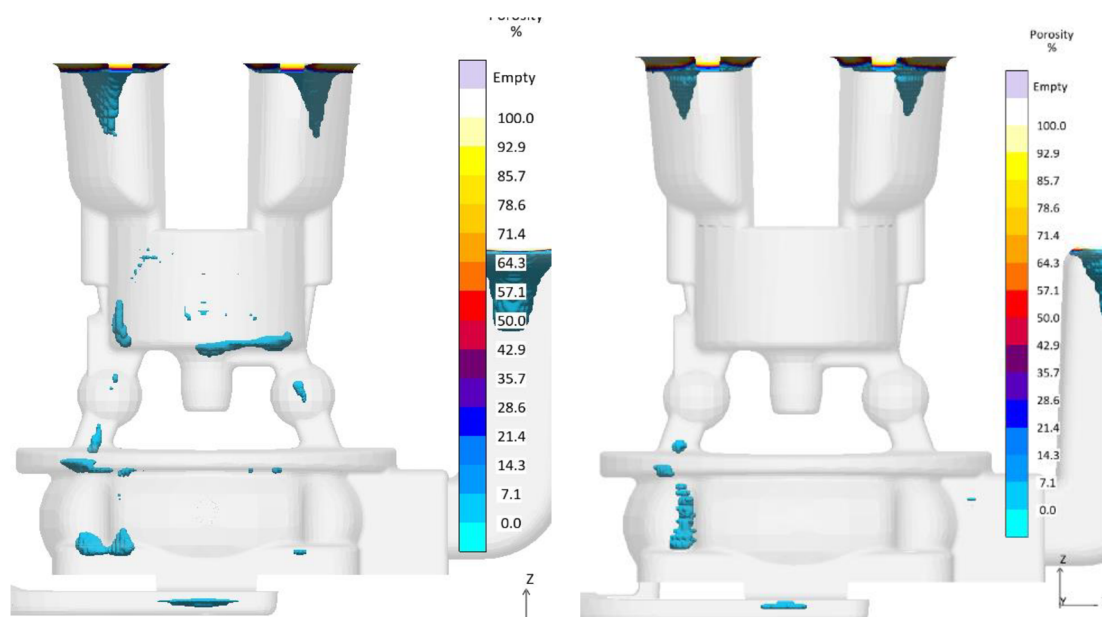
V následující **druhé úpravě jádra** byl přídavek na odlitku prodloužen tak, aby svým tvarem navazoval na geometrii nálitků (obr. 3-37 a 38). Výsledek simulace (obr. 3-39) ukázal, že tato úprava eliminovala veškeré vady na rozhraní odlitku s nálitky. Vady, které bylo nutné eliminovat, se nacházely již pouze ve spodní části řešené oblasti. Došlo k úpravě geometrie ve formě vybrání materiálu z čela jádra (obr. 3-37 a 38), čímž vznikla drážka, která měla za úkol zapojit levý náliček do zásobování spodní části materiálem. Aplikací drážky vzniklo několik dalších problémů spojených opět s velikostí rádiusů. Pokud hrany drážky byly opatřeny malými rádiusy, měla porezita tendenci se situovat právě v této drážce a kolem rádiusů (obr. 3-39). Materiál by se společně s vadou při následném zpracování pravděpodobně odstranil, ale hrozilo by riziko, že velikost porezity by v reálu mohla být mnohem větší a nemusela by se nacházet pouze v drážce. Zároveň by bylo třeba změnit odzdušnění této části odlitku, které nyní prochází středem jádra a muselo by být z důvodu změny geometrie posunuto mimo střed a hrozilo by snížení jeho efektivity. Při aplikaci větších rádiusů drážky by docházelo k velkému

snížování využitelnosti materiálu. Z těchto důvodů byla aplikace drážky na čele jádra v simulacích postupně zastavena a bylo hledáno jiné, lepší řešení.

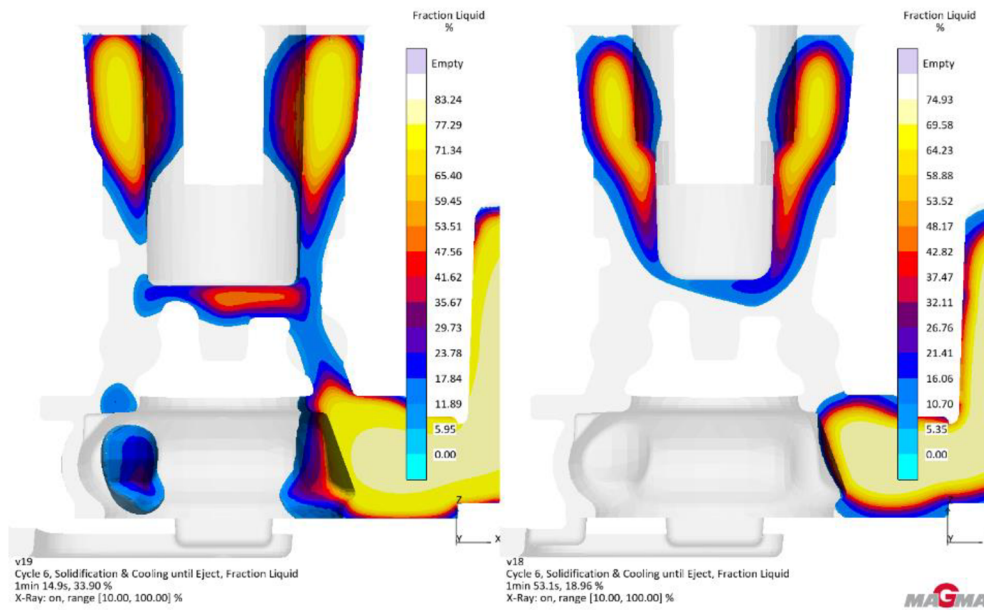
Následující **třetí úprava jádra** měla stejný charakter jako první úprava, ale čelo jádra bylo opatřeno velkými rádiusy a přídavek byl natažen až do oblasti nálitků (obr. 3-41 a 42). Rádus na levé straně byl zvětšen (obr. 3-41), čímž byla vykompenzována absence drážky a bylo docíleno efektivního zásobování spodní části oblasti materiálem z levého nálitku. Výsledky simulací byly o poznání lepší.

Jako poslední proběhla **čtvrtá úprava**, která spočívá v úpravě **vtokové soustavy** v kombinaci s třetí úpravou kovového jádra. Byly simulovány dvě varianty. **První varianta vtoku** spočívala ve vytvoření širšího vtoku na čele odlitku hned naproti licímu kanálu (obr. 3-43), to mělo za následek predikci vysokých rychlostí plnění, tyto rychlosti jsou nepříznivé z hlediska turbulentního proudění. Z tohoto důvodu byla vytvořena **druhá varianta vtoku**, se dvěma menšími vtoky v čelní části odlitku, které byly od licího kanálu odsunuty do stran (obr. 3-44), čímž došlo ke snížení rychlosti plnění. Úprava vtokového systému lehce změnila teplotní rozložení při lití a tuhnutí odlitku a měla za následek změnu míst predikce perezity, která se převážně seskupila do jednoho místa.

Následné výsledky simulace **kombinace druhé varianty vtokového systému a třetí úpravy jádra** (obr. 3-41, 42 a 44) ukázaly, že tato kombinace kompletně eliminuje perezitu a teplotní uzly v kritické horní části odlitku. Bylo docíleno toho, že k poslednímu tuhnutí dochází v nálitcích. Proto tato kombinace **byla doporučena** společně se zvýšením obsahu křemíku ve slitině na 10,5 % k aplikaci do výroby. Pro nejvhodnější čtvrtou úpravu kovového jádra byl vypracován výrobní výkres, který je uveden v příloze P2.



Obr. 4-1 Porovnání predikce perezity



Obr. 4-2 Porovnání tuhnutí tekuté fáze

Při porovnání výsledků simulace stávající geometrie a doporučené upravené geometrie na obr. 4-1 a obr. 4-2 je jasně vidět, že došlo k usměrnění tuhnutí a eliminaci porezity v kritické oblasti odlitku.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnotit stávající technologii výroby vzduchového regulátoru vysokotlakého kompresoru a s využitím simulačního programu MAGMASoft® navrhnout úpravu geometrie formy za účelem snížení počtu vad v odlitku.

S ohledem na téma bakalářské práce byla v teoretické části popsána výroba gravitačně litých odlitků ze slitin Al – Si a jejich vlastnosti. Byly popsány nejběžnější slévárenské vady odlitků a princip simulačních programů. Hlavní pozornost byla věnována kovovým gravitačním formám a jejich konstrukci.

V rámci experimentální části byl popsán materiál, geometrie a stávající technologie výroby odlitku. Dále byly zdokumentovány parametry současné technologie výroby odlitku a vyhodnocena kvalita odlitků vybraných ze stávající produkce. Po vyhodnocení vnitřních vad v odlitku došlo ke stanovení nejkritičtější vady z hlediska tlakotěsnosti a byla provedena první simulace stávající technologie. Výsledky simulace odpovídaly skutečným vadám detekovaným v odlitku. Na základě toho byly navrženy úpravy geometrie za účelem eliminace těchto vad.

Z navržených úprav byla vybrána varianta, která vedla k eliminaci vad a zároveň ji lze snadno realizovat v praxi.

Dále byla v softwaru MAGMASoft provedena automatická optimalizace teploty lití a chemického složení materiálu odlitku, ze které vyplynulo, že obsah křemíku v tavenině by bylo vhodné udržovat na hodnotě nad 10,2 %. Teplota taveniny dle výsledků výskytu vad nemá vliv.

Výsledky byly prezentovány firmě Alumatall CZ s.r.o. a bylo rozhodnuto o zavedení navržené úpravy do výroby. Po aplikaci finální úpravy geometrie do výroby a při předpokládaném snížení zmetkovitosti o 13 %, by na základě kalkulace firmy Alumatall došlo k návratnosti úpravy po 0,8 roku a k úspoře cca 70 000 Kč ročně.

Seznam použité literatury

- [1] *Informátor* Informátor prosinec 2021 [online]. Brno: Česká slévárenská společnost, z.s., 2021, č. 90 [cit. 19.5.2023]. Dostupné z: http://ceskaslevarenska.cz/wp-content/uploads/2022/02/Inf90_aktualizovano25022022.pdf
- [2] NĚMEC, Milan, BEDNÁŘ, Bohumír a BRYKSÝ STUNOVÁ, Barbora. *Teorie slévání*. 2. vyd. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2019. 217 stran. ISBN 978-80-01-06026-1
- [3] KOLEKTIV ČESKOSLOVENSKÝCH, MAĎARSKÝCH, NĚMECKÝCH A POLSKÝCH AUTORŮ. *Příručka o hliníku*. 1. vyd. Praha: STNL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1969. 706 stran.
- [4] SLOVÁK, Stanislav, RUSÍN, Karel. *Teorie slévání*. 1. vyd. Praha: STNL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1990. 231 stran. ISBN 80-03-00400-4
- [5] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004 [cit. 15.3.2023]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/metalurgie-nezeleznych-kovu/metalurgienezeleznychkovu-skripta.pdf>
- [6] Crucible furnace. *Foundry lexicon* [online]. Schaffhausen. [cit. 16.4.2023]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/crucible-furnace-4477/?cHash=2f13bdf0587ee76b52dd2c3911010a34>
- [7] MICHNA, Štefan, LUKÁČ, Ivan, OČENÁŠEK, Vladivoj, KOŘENÝ, Rudolf a kol. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, s.r.o., 2005. 700 stran. ISBN 80-89041-88-4
- [8] LOMOZ, Jan, RATHAN, Miroslav. *Soubor přednášek pro školení pracovníků KHL*. Týnec nad Sázavou: METAZ a.s., 1995. 82 stran.
- [9] *Filtrace neželezných kovů VAKUPOR®* [online]. Boskovice: LANIK s.r.o. [cit. 16.4.2023]. Dostupné z: <https://www.lanik.eu/produkt/vukopor-a/>
- [10] ROUČKA, Jaromír. Příručka o filtraci. Reprocentrum Blansko: Česká slévárenská společnost, Divadelní 6, 657 34 Brno, CR, 2000. 41 stran. ISBN 80-02-01389-1
- [11] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013. 179 stran. ISBN 978-80-248-3356-9
- [12] NOVÁ, Iva. *Tepelné procesy ve slévárenských formách*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. 133 stran. ISBN 80-7083-662-8
- [13] LWS. Numerical Modeling Methods in Water Management. In: lytlewater.com [online]. [cit. 16.4.2023]. Dostupné z: <https://www.lytlewater.com/blog/2020/6/30/numerical-modeling-methods-in-water-management>

Seznam příloh

Příloha P1: Vzorkovací protokol z měření ve firmě Alumetall CZ s.r.o.

Příloha P2: Výrobní výkres nejvhodnější verze úpravy horního kovového jádra