



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE VTOKOVÉ SOUSTAVY S OHLEDEM NA
VYUŽITÍ TEKUTÉHO KOVU PŘI VÝROBĚ AL ODLITKŮ
TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU**

OPTIMIZATION OF GATING SYSTEMS (THEIR YIELD) IN AL CASTINGS MADE BY INVESTMENT CASTING
TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Žižka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jiří Žižka**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace vtokové soustavy s ohledem na využití tekutého kovu při výrobě AI odlitků technologií vytavitelného modelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizace vtokových soustav u technologie vytavitelného modelu AI slitin z hlediska využití tekutého kovu, tj. poměru hmotnosti vlastního čistého odlitku k celkové hmotnosti odlitku i se vtokovou soustavou (hrubý odlitek).

Cíle diplomové práce:

Hlavním úkolem DP je u vybraných odlitků navrhnout vtokové soustavy (včetně počtu odlitků na jednom stromečku) tak, aby byla zaručena požadovaná výsledná kvalita odlitků a přitom bylo zvýšeno využití tekutého kovu a tím snížen podíl vratného materiálu ve firmě Alucast, s.r.o.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.

DOŠKÁŘ, J., J. GABRIEL. Výroba přesných odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací vtokových soustav tvarově složitých hliníkových odlitků litych metodou vytavitelného modelu. Pro optimalizaci byly vybrány dva odlitky, jejichž mohutné vtokové soustavy činí problém s využitím tekutého kovu. Každý odlitek je popsán ve své kapitole. Jednotlivé podkapitoly se pak zabývají popisem původní a nově navržené vtokové soustavy. U každé varianty proběhla simulace, odlití zkušebních odlitků, kontrola rentgenem a metalografické vyhodnocení. Na konci každé kapitoly je pak zhodnocení výsledků provedené optimalizace vtokové soustavy.

Klíčová slova

Vytavitelný model, přesné lití, vtoková soustava, využití tekutého kovu, numerická simulace

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the optimization of gating systems of shape-complex aluminum castings produced by investment casting process. Two castings whose massive gating systems make problem with the use of liquid metal (so called yield) were chosen for optimization. Each casting is described in its own chapter. The individual subchapters deal with description of the original and newly designed gating system. Simulation, test castings, X-ray inspection and metallographic examination were performed for each variant. At the end of each chapter there is an evaluation of the results of the optimization of gating system.

Key words

Lost wax process, investment casting, gating system, use (yield) of liquid metal, numerical simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽIŽKA, Jiří. *Optimalizace vtokové soustavy s ohledem na využití tekutého kovu při výrobě Al odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124474>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Horáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Optimalizace vtokové soustavy s ohledem na využití tekutého kovu při výrobě Al odlitků technologií vytavitelného modelu* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny na konci této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Jiří Žižka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanovi Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Julišovi, Ph.D., Ing. Jarmilu Cilečkovi, Ing. Radimu Čagánkovi a kolektivu firmy Alucast, s.r.o. za pomoc při vypracování praktické části této práce.

Zvláštní poděkování bych chtěl věnovat své rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 Metoda vytavitelného modelu	10
1.1.1 Výroba matečné formy	11
1.1.2 Výroba voskového modelu	12
1.1.3 Sestavování voskových modelů	13
1.1.4 Skořepinová forma.....	14
1.1.5 Vytavování	16
1.1.6 Žihání skořepin.....	17
1.1.7 Tavení a lití.....	18
1.1.8 Dokončovací operace.....	19
1.1.9 Kontrola odlitků.....	20
1.2 Vtoková soustava v lití metodou vytavitelného modelu	21
1.2.1 Hlavní části vtokové soustavy.....	22
1.2.2 Základní rozměry vtokové soustavy	24
1.2.3 Vtokové soustavy z hlediska proudění	25
1.3 Simulace ve slévárenství	29
1.3.1 Pre-processing - vstup dat	29
1.3.2 Processing - vlastní výpočet.....	30
1.3.3 Post-processing - výstup dat.....	30

1.4 Slitiny hliníku používané v lití metodou vytavitelného modelu	31
1.4.1 Slitiny Al-Si-Mg.....	31
1.4.2 Slitiny Al-Cu.....	32
1.4.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin.....	32
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	34
2.1 Odlitek 1	35
2.1.1 Odlitek 1 - původní vtoková soustava	36
2.1.2 Odlitek 1 - nová vtoková soustava	44
2.1.3 Odlitek 1 - zhodnocení	50
2.2 Odlitek 2	52
2.2.1 Odlitek 2 - původní vtoková soustava	53
2.2.2 Odlitek 2 - nová vtoková soustava	60
2.2.3 Odlitek 2 - zhodnocení	66
ZÁVĚR	68
POUŽITÁ LITERATURA.....	69
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	72

ÚVOD

Přesné lití metodou vytavitelného modelu je nejstarší metodou odlévání kovu a patří mezi vysoce náročné technologie výroby odlitků s vysokou přidanou hodnotou. Pomocí této technologie se v posledních letech vyrábí stále více odlitků, neboť součásti navrhované konstruktéry mají čím dál více složitější tvary a metoda vytavitelného modelu je schopna jich, jako jedna z mála technologií, dosáhnout.

Se složitými odlitky se pojí i složitější vtokové soustavy. Vtokové soustavy jsou pro odlitky navrhovány tak, aby zajistili správné vyplnění dutiny formy a také, aby byl odlitek zdravý, bez vnitřních vad. Mnohdy ale tyto vtokové soustavy značně převyšují hmotnost samotného odlitku a využití tekutého kovu je mizerné, to pak činí slévárnám velký problém. V dnešní náročné době, kdy zákazníci kladou vysoké nároky na slévárny a požadují co nejkvalitnější odlitky za co nejnižší cenu, je třeba, aby slévárny neustále optimalizovali svoje výrobní procesy, mezi něž patří i optimalizace vtokových soustav. Optimalizací se dosáhne nejen zvýšení využití kovu, ale také se může dosáhnout odlitků s lepší mikrostrukturou, což následně vede k lepším mechanickým vlastnostem. Tímto vším se pak slévárna stává konkurenceschopnější.

Cílem této diplomové práce je právě u vybraných odlitků optimalizovat jejich vtokové soustavy za účelem zlepšení využití tekutého kovu a aby byla zaručena požadovaná výsledná kvalita odlitků. Tato diplomová práce je řešena ve spolupráci se slévárnou přesného lití Alucast, s.r.o.

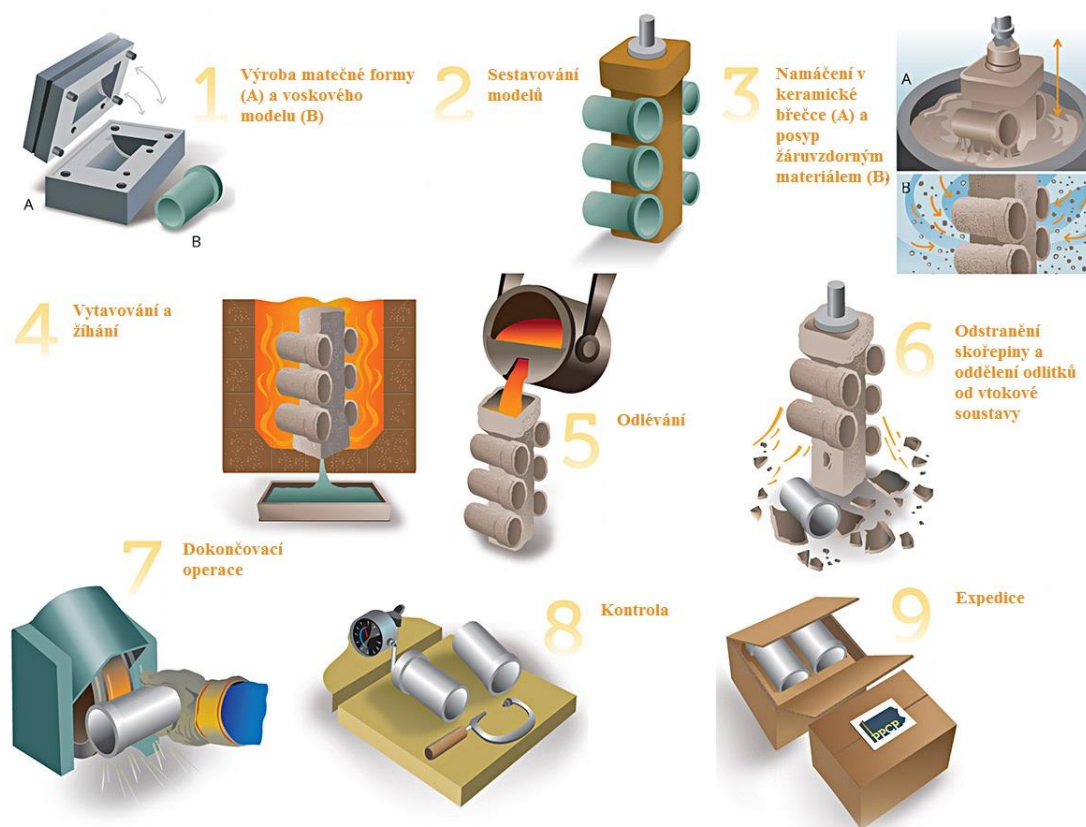
1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Metoda vytavitelného modelu [1,2]

Lití odliteků na vytavitelný model, metoda, která je často nazývána anglicky „lost wax“ nebo „investment casting“, má důležitou roli v oblasti moderních technologií odlévání kovu. Začleňujeme ji mezi technologie „near-net-shape“, jinak řečeno produkty blízké hotovým výrobkům, kde je podstatou dosáhnout co nejmenších odchylek a získat tak tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům.

Lití metodou vytavitelného modelu je dosti náročný proces, který se používá k výrobě široké škály součástí s vysokou kvalitou a funkčností při zachování značné ekonomičnosti. Podstatou této technologie je výroba tvarově složitějších součástí se snahou o co největší eliminaci dalších dokončovacích operací, jako je např. třískové obrábění, a tedy možnost používat odlitek již v litém stavu. V některých případech odlitek v litém stavu použít nelze a přídatky na obrábění jsou nezbytné, ty jsou ovšem téměř zanedbatelné, což šetří čas, materiál a s tím spojené výrobní náklady. Nevýhodou této technologie je omezení velikosti odlévaných součástí, nutnost dokonalé znalosti této technologie a důsledné provedení všech operací, které jsou na obrázku 1 a dále popsány v dalších podkapitolách.

Metodou vytavitelného modelu dokážeme odlévat téměř všechny materiály, ať už to je ocel, slitiny hliníku nebo dokonce velmi reaktivní materiály jako je titan a jeho slitiny. Odlitky z těchto materiálů lité touto technologií nachází uplatnění v nejrůznějších oblastech, a to od drobných součástek do elektroniky nebo potravinářství až do objemnějších součástí v letectví a armádním průmyslu.



Obr. 1 Fáze výroby [3]

1.1.1 Výroba matečné formy [1,2,4]

Ještě před výrobou modelového zařízení neboli matečné formy se vytvoří z výrobního výkresu a 3D modelu zákazníka výkres odlitku, který obsahuje všechny náležitosti, jako jsou technologické přídavky, nejnútnejší úkopy a vtoky. Poté se dle tohoto výkresu odlitku zhotoví matečná forma. Její výroba je první důležitou operací při odlévání přesných odlitků a zásadně ovlivňuje rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu budoucího odlitku.

Tvar dutiny matečné formy kopíruje tvar vyráběného odlitku, proto jsou kladeny vysoké nároky na její zhotovení. Navržená forma musí umožnit výrobu kvalitních modelů bez rozměrových odchylek s kvalitním povrchem a bez vad jako jsou staženiny, propadliny, vzduchové bubliny atd., dále také aby po odstříknutí voskových modelů bylo jejich setrvání ve formě co nejkratší. Při jejím zhotovení je potřeba dbát hlavně na teplotní roztažnost vosku, proto musí být dutina uvnitř zvětšena o předpokládané procento smrštění, aby se při zhotovení odlitku dosáhlo požadovaných rozměrů v rámci tolerancí. Finální rozměry a dosažitelná přesnost matečné formy je dána zvolenou technologií její výroby, která má velký vliv na cenu a kvalitu odlitku, a tak bychom při její volbě měli brát v potaz informace jako je například odhadovaný počet kusů, požadovaná kvalita odlitku a jeho koncové použití.

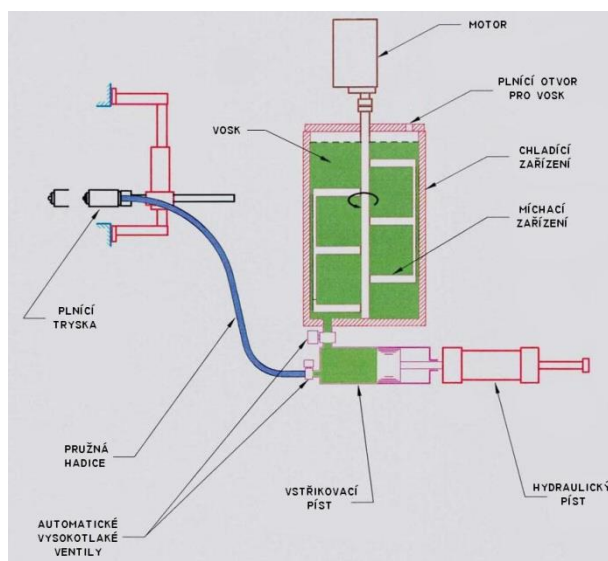
Formy na výrobu voskových modelů můžeme rozlišovat například podle konstrukce na samostatné formy pro jeden či více modelů, dále pak dle účelu a použití na formy k výrobě vlastních voskových modelů a k výrobě vtoků, nálitků apod., dle stupně mechanizace rozeznáváme formy s ručním vyjímáním modelů, s vyhazovači a celkově mechanizované nebo automatizované. Dále pak lze rozdělit formy dle použitých materiálů, což je ocel, hliníkové slitiny, nízkotavitelné slitiny, zinkové slitiny, plastické hmoty nebo sádra. Nakonec se formy dělí i podle způsobu jejich technologie výroby, vyrobené podle matečného modelu (odléváním, galvanoplasticky, metalizováním) nebo obráběním z kovových bloků (obr. 2), což je nejčastější.



Obr. 2 Forma vyrobená obráběním [5]

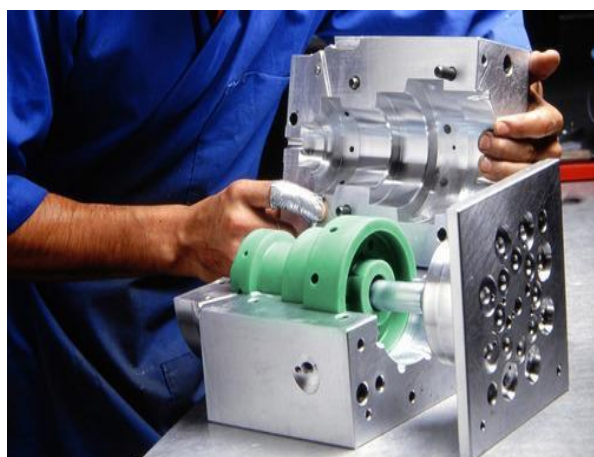
1.1.2 Výroba voskového modelu [1,2,4,6,11]

Po výrobě matečné formy přichází na řadu samotná výroba voskového modelu, což je další důležitá operace, při níž je nutné dbát zvýšenou pozornost pro vyrobení kvalitního odlitku metodou přesného lití. Výroba voskových modelů se provádí dvěma způsoby, buď gravitačním litím do formy, které se používá jen velmi zřídka a to hlavně na vtokové kanály atd., nebo vstřikováním do formy, což je hlavní metoda. Na obrázku 3 je znázorněno právě vstřikovací zařízení. Hlavní částí je zásobník vosku, který je schopen vosk promíchávat a udržovat na potřebné teplotě (55-90°C). Váhou voskové směsi a podtlakem hydraulického nebo pneumatického pístu je vosk přepraven do vstřikovací jednotky. Po naplnění se uzavře vysokotlaký ventil, čímž se oddělí zásobník od pístu a zařízení je připraveno. Plnicí tryska se pevně přiloží ke vtoku formy a pomocí stlačení vstřikovacího pístu se dutina formy vyplní voskem pod předem nastaveným tlakem. Tento tlak může být nižší (0,5-1 MPa) nebo vyšší (2,5-5 MPa), záleží na tom, s jakým voskem vstřikovací stroj pracuje. Poté dochází k různě dlouhé prodlevě nutné ke ztuhnutí, záleží na složení voskové směsi. Po ochlazení a ztuhnutí vosku je forma rozebrána pomocí stroje nebo ručně a voskový model je vyjmut (obr.4). Matečná forma se následně očistí, nanese se separátor a znovu se složí k dalšímu použití. Separátor se používá k dobrému oddělení voskového modelu od matečné formy, používají se různé separátory, například na bázi silikonu. Poté se celý proces opakuje.



Obr. 3 Schéma vstřikovacího zařízení [7]

Na výrobu voskových modelů se nepoužívá obyčejný vosk, používají se různé voskové směsi, které splňují všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Tyto směsi se skládají z více komponent jako jsou syntetický vosk, uhlovodík, ester, pryskyřice, organické plnivo a voda. Jednotlivé komponenty se mohou mísit podle více variant a tím zaručit různou tvrdost, viskozitu, tepelnou roztažnost nebo bod tavení. Voskové modely jsou zobrazeny na obrázku 5.



Obr. 4 Vyjmutí voskového modelu [8]



Obr. 5 Voskové modely [7]

1.1.3 Sestavování voskových modelů [1,2,4,6,11]

Než dojde k sestavení jednotlivých modelů, musí se počkat na jejich „vyzrání“ (stabilizaci), aby došlo k úplné tepelné změně rozměrů, to bývá alespoň 24 hodin od vytažení z formy. Při této operaci se rovněž provádí i očištění hran a přetoků z dělicí roviny. Voskové modely se následně zpracovávají dle velikosti. V případě rozměrnějších (nad 2 kg) nebo složitě členitých odlitků se tyto odlitky zpracovávají samostatně do sestav jednotlivých modelů (obr.6). Jedná se převážně o odlitky u nichž velké nároky na kvalitu vylučují použití jiné technologie. V případě drobnějších součástí se jednotlivé odlitky skládají do tzv. stromečků (obr.7). Tyto stromečky jsou složeny z různého počtu kusů, jedná se však vždy o stejný sortiment a nemůže se stát, že by na jednom stromečku bylo více typů odlitků. V obou případech sestav se modely na vtokovou soustavu připojují buď lepením nebo pájením. Při lepení se na stykové plochy modelu a vtokového systému nanáší roztavené voskové lepidlo pomocí pistole. Při lepení je důležité, aby lepidlo smáčelo celou plochu vtoku a při přitlačení modelu vytvořilo prstencový přetok. Při pájení se používá rozžhavené pájedlo, to je vloženo mezi mezi vtok modelu a vtokový systém do místa, kde se má model připojit, model se na pájedlo přitlačí, po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model se přitiskne k vtokovému systému.



Obr. 6 Sestava jednoho modelu [9]

Při sestavování modelů se musí brát v potaz určité faktory, které mají vliv na tvar stromečkových sestav, některé z nich platí i pro sestavy jednotlivých modelů. Při navrhování rozložení a počtu kusů na stromečku se musí dávat pozor, aby nedošlo k jejich dotknutí, a to ani po nanesení posledního obalu při tvorbě skořepiny, zároveň musí být zajištěno dokonalé posypání obalů a sušení. K modelům musí být umožněn dobrý přístup, přičemž se nesmí



Obr. 7 Sestava modelů do stromečku [10]

modely při lepení či pájení poškodit. Dále se musí brát ohled na hmotnost stromečku, neboť stromeček bude po obalení a odlití daleko těžší než voskový, což vede k obtížné manipulaci. Modely by měly být umístěny dutinami dolů, aby při následné operaci obalování mohla obalová hmota bez problému stékat a nedocházelo tak ke zvětšování tloušťky obalu v dutinách a tím k nepříznivému posunutí tepelné osy. Umístění modelů na vtokový systém musí být také navrženo tak, aby bylo umožněno bezproblémové vytékání vosku při vytavování modelů ze skořepiny. Pokud nelze najít vhodnou polohu modelu pro dokonalé vytavení vosku, je nutno k modelu připojit pomocný výfuk nebo jiné pomocné výtokové otvory. V neposlední řadě je třeba brát ohled i na oddělování odlitků od vtoku v pozdější fázi výroby.

1.1.4 Skořepinová forma [1,2,4,6,11]

Výroba skořepinové formy je stěžejní operací v technologickém postupu přesného lití metodou vytavitelného modelu. Je to tak z důvodu, že povrch a rozměry odlitku mohou být pouze tak kvalitní, jako je kvalitní samotná forma. Právě díky keramické skořepině je touto metodou možné odlévat širokou škálu tvarově složitých odlitků z mnoha různých slitin, ať už železných či neželezných. Tato část výroby ovšem bohužel bývá dost obtížná, proto je třeba si na ni dát záležet a provést tento krok opravdu precizně. Principem je postupné obalování voskového modelu jednotlivými vrstvami obalové hmoty, dokud se nedosáhne požadované tloušťky skořepiny. Dále jsou jednotlivé kroky výroby skořepiny podrobněji rozebrány.

Příprava voskového modelu

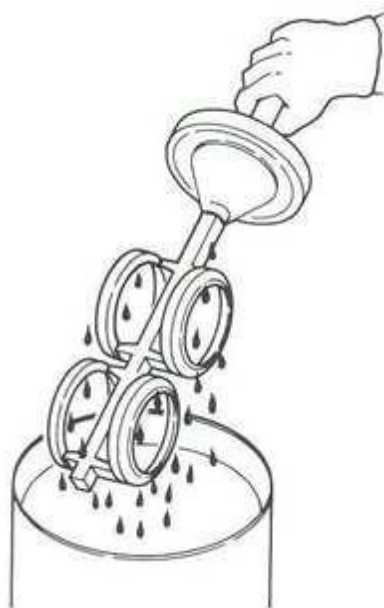
Před nanesením prvního obalu je nutné voskové modely začistit a z povrchu stromečku odstranit zbytky separátoru použitého při jejich výrobě v matečné formě. V opačném případě by první obal k povrchu voskových modelů dokonale nepřilnul, vyschlý obal by pak vlivem pnutí popraskal nebo se odloupl a byl by příčinou defektů.

Namáčení do obalové hmoty

Druhým krokem je namočení voskového stromečku do obalové hmoty (obr.8), které se jinak říká keramická břecha. Namáčení probíhá pozvolna strojně nebo ručně při současném otáčení a naklánění, aby obalová hmota pokryla stromeček rovnoměrně a netvořily se v koutech či drážkách vzduchové bublinky. Sestava se poté vyjme a manipuluje se s ní tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozděvila po povrchu a přebytečná směs okapala zpět do zásobníku. Keramická břecha udává základní vlastnosti keramických skořepin a skládá se z plniva a pojiva.

Plnivo je žáruvzdorný materiál a je hlavním nositelem základních vlastností skořepiny. Při výběru žáruvzdorného materiálu jsou důležité vlastnosti jako tepelná roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost vůči odlévaným kovům. Jako plnivo se používají hlavně oxidy (Al_2O_3 , ZrO_2) a křemičitany (mulit, zirkon, silimanit a hlavně molochit). Molochit však není běžná surovina, ale je to mulit v obálce amorfního SiO_2 .

Pojivo je vazná kapalina, která je druhou složkou obalové směsi pro výrobu skořepin a musí splňovat určité požadavky. Pojivo nesmí snižovat žáruvzdornost formy, musí být netečné k žáruvzdornému materiálu i roztavenému kovu, po vysušení a vypálení musí dodat formě dostatečnou pevnost. Používá se především oxid křemičitý, respektive jeho koloidní roztoky (hydrosoly na bázi vody a alkosoly na bázi alkoholu), ovšem někdy se místo něj používají organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu nebo sloučeniny anorganické. V praxi se používají převážně pojiva na bázi vody i navzdory jejich delší době schnutí. Je to z toho důvodu, že dosahují vyšších pevností a jsou méně náchylné k praskání lícního obalu. Další výhodou hydrosolů je jejich šetrnost k životnímu prostředí.



Obr. 8 Namáčení do obalové hmoty [1]

Posyp zrnitým keramickým materiálem

Hned po okapání přebytku keramické břechky následuje další krok, a to je nanášení žáruvzdorného posypového materiálu, ostřiva (obr. 9). Ostřivo se může nanášet dvěma základními metodami, buď se jedná o sprchový posyp, kdy je stromeček obalený keramickou směsí vložen do proudu volně padajícího materiálu, nebo se jedná o fluidní posyp, kdy se stromeček ponoří do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva obaly se nanáší jemnější materiál o zrnitosti 0,1-0,25 mm, je to z důvodu, že první obaly rozhodují o kvalitě povrchu odlitku. Další obaly slouží především jako zesilovací vrstvy a zaručují pevnost a prodyšnost formy, proto se používá hrubší ostřivo se zrností 0,25-0,5 mm. Pro ostřivo jsou opět důležité vlastnosti jako tepelná roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost vůči litému kovu. Používají se keramické materiály jako molochit, křemen, korund, zirkon atd.



Obr. 9 Nanášení ostřiva [1]

Sušení a vytvrzování skořepin

Jako čtvrtý krok po obalení keramickou směsí a nanesení ostřiva následuje sušení (obr.10). Při této operaci jednotlivé obaly, z nichž se skořepina skládá, tuhnou. Děje se tak buď pouze obyčejným sušením na vzduchu, kdy dochází k odpaření disperzního prostředí z kapalného pojiva (přeměna soli v gel neboli gelace) nebo se proces gelace urychlí působením chemického činidla (alkalicky reagující látky, nejčastěji čpavek).

Sušení skořepin probíhá v klimatizovaných prostorech při teplotě 20 až 24°C a vlhkosti 50 až 70% (záleží na typu pojiva), přičemž musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu. Doba sušení se obvykle pohybuje od dvou do čtyř hodin. Mírným ohrátím a větší rychlostí proudění vzduchu se dá doba sušení zkrátit. V případě chemického vytvrzování se forma nejprve suší volně na vzduchu, a poté se na krátkou dobu vystaví účinku plynného čpavku, ten se později proudem vzduchu odstraní, tím se celý proces tuhnutí urychlí. Při příliš rychlém sušení skořepin a velkém nárůstu teploty okolí může dojít vlivem rozdílné tepelné roztažnosti voskové směsi a keramiky k popraskání skořepiny, proto se musí dávat pozor na podmínky sušení.

Po důkladném vysušení formy se tento celý proces výroby skořepiny opakuje, to znamená od namáčení do obalové hmoty až po sušení. Takto se vytváří jedna vrstva za druhou, dokud není dosažen požadovaný finální počet vrstev. Počet vrstev bývá v rozmezí od pěti do patnácti vrstev, to se liší podle velikosti a složitosti odlitku a také podle odlévané slitiny.



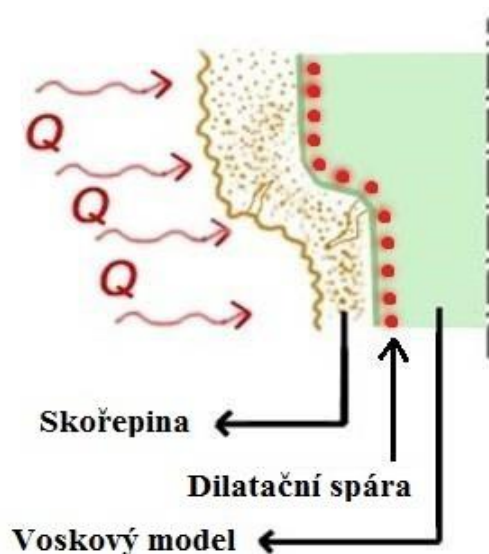
Obr. 10 Sušení skořepin [12]

1.1.5 Vytavování [1,2,4,6,11]

Po nanesení a dokonalém vysušení posledního obalu skořepinové formy následuje další fáze výroby, tou je odstranění voskového modelu, tzv. vytavování. Principem je rychlý ohřev formy s voskovým modelem nad teplotu tavení vosku, při němž dojde k odstranění veškeré voskové směsi ze skořepiny, tak vznikne prázdná forma připravená k lití tekutého kovu. Formy musí být v zařízení na vytavování seřazeny tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat, zachycoval se ve sběrné nádobě a nedocházelo tak k odpadovým ztrátám. Zachycená vosková směs se dále upravuje a je znovu používána v regenerovaném nebo rekonstituovaném stavu na výrobu nových vtoků, náliček a voskových modelů. Pomocí vytavování vosku lze také v této fázi odhalit praskliny ve skořepině, neboť vosk při prosáknutí zobrazí prasklinu jako skvrnu.

Zásadním problémem při odstranění vosku je jeho vyšší tepelná roztažnost oproti skořepině, proto vosk nemůže být vytavován pouze při jeho teplotě tání, která je v rozmezí 60 až 90°C, při níž by došlo k rozměrové dilataci modelu a tím k možnému popraskání skořepiny. Abychom těmto vadám předešli, musí se na vnější straně skořepiny vygenerovat dostatečně velké množství tepla, které umožní roztavit tenkou vrstvičku vosku, která je v kontaktu s primárním obalem. Tímto dojde k vytvoření dilatační spáry, která zachycuje vzniklé deformace vosku a zabraňuje praskání skořepiny. Dilatační spára vzniká rychlým ohřevem, aplikací tzv. tepelného šoku (obr.11).

V současné době je nejpoužívanější metodou odstranění vosku vytavování v autoklávech (obr.12) a bojlerklávech, která zaručí dostatečný tepelný šok. Proces je založen na prudkém ohřevu skořepin pomocí přehřáté vodní páry, při němž vznikne dilatační spára. Zařízení pracují s tlaky 0,3 až 0,6 MPa při teplotě páry od 135 do 165°C. Těchto podmínek je nutné dosáhnout během 4 až 5 sekund, aby došlo k požadovanému tepelnému šoku. Výhodami této metody jsou ideální vlastnosti páry pro přenos tepla, malé ztráty na modelovém vosku, menší množství popraskaných skořepin a možnost pracovat s tenčími skořepinami. Kromě autoklávů a bojlerklávů existují i další metody vytavování, např. vyžihání neboli flash fire systém. Při této metodě se voskové modely vytavují v peci při teplotách 750-1100°C za současného vypalování skořepin. Nevýhodou je částečné znehodnocení a ztráta voskové směsi (10-15%).



Obr. 11 Dilatační spára [7]



Obr. 12 Skořepiny v autoklávu [13]

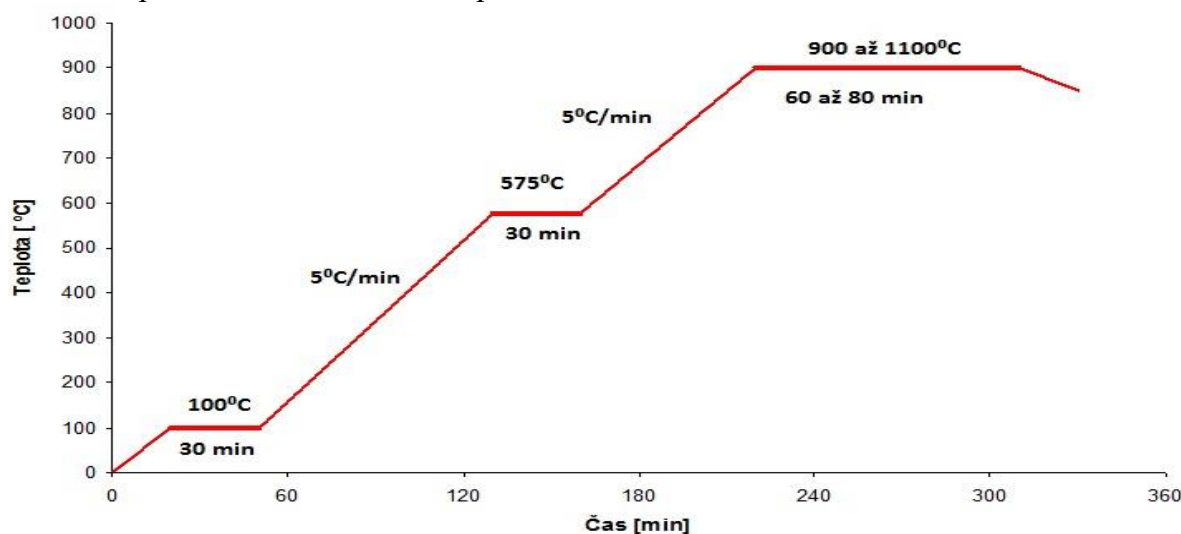
1.1.6 Žihání skořepin [1,2,4,6,11]

Ještě před samotným odléváním je nezbytné provést žihání skořepiny (obr.13). Žihání se provádí ze 3 hlavních důvodů. Prvním důvodem je odstranění zbytků vosku a volných tekavých látek ze skořepiny. Alkohol má nízkou teplotu varu a odstraní se již při teplotách nižších než 100°C, avšak ke kompletnímu odstranění vody obsažené v gelované struktuře křemičitého pojiva je zapotřebí teploty okolo 1000°C. Dalším důvodem žihání je, aby došlo k převedení amorfni vazné vrstvy SiO₂ na krystalickou formu, a díky tomu skořepiny dosáhly požadovaných mechanických vlastností. Aby se toho dalo dosáhnout, musí být teploty více než 800°C, většinou se pohybují v rozmezí 900-1100°C, záleží na vlastnostech skořepin a charakteru pecí. Třetím důvodem je předejít skořepině, aby se snížil teplotní šok při odlévání a tím se zabránilo praskání skořepin, dále se zabránilo rychlému poklesu teploty kovu ve formě, tzv. zamrzání.



Obr. 13 Žihání skořepin [14]

Podle vlastností použitého keramického materiálu a druhu odlévané slitiny volíme postup žihání. Některé skořepiny vyrobené z materiálu, který má nízký koeficient tepelné roztažnosti a neprochází tak při ohřevu krystalografickými změnami, dobře snáší teplotní šok a lze je tak dávat do pece s vyšší teplotou, aniž by se poškodily. To však nelze provádět u skořepin ze žáruvzdornin jako je křemen a na bázi oxidu hlinitého, jelikož ty podléhají vysoké tepelné roztažnosti a jsou velice náchylné na tepelný šok. Na obrázku 14 je znázorněný stupňovitý ohřev, jenž se provádí u skořepin z křemenné moučky. Nejdříve skořepiny setrvávají na 100°C (u jiných materiálů se vkládají do teplot 300-400°C) okolo 30 minut, aby překonaly teplotní náraz, poté se pozvolna zahřívají na teplotu okolo 575°C, kde dochází k objemovým změnám a transformaci křemene, zde se setrvává znovu okolo 30 minut. Následně se provede ohřev na žihací teplotu v rozmezí 900 až 1100°C.



Obr. 14 Postup žihání [7]

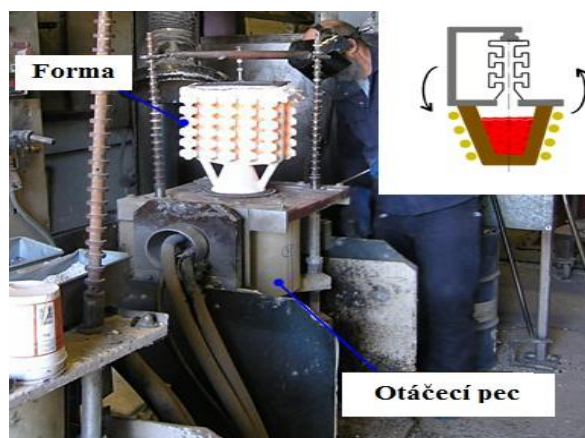
1.1.7 Tavení a lití [1,2,4,6,11]

Kov se taví v indukčních nebo odporových pecích, nejčastěji však v indukčních. V závislosti na požadované kvalitě odlitku a na taveném materiálu se taví buď na vzduchu nebo ve vakuu. Roztavený kov se lije do horkých skořepin, předehřátých na 700-800°C, nebo do studených skořepin. Nejčastěji se odlévá do forem, které se právě vytáhly z žíhací pece, snižuje se tím teplotní šok, předchází se vzniku vnitřních pnutí a nebezpečí praskání. Před litím se do žhavých skořepin většinou vkládají keramické filtry předehřáté na teplotu skořepiny. Do studených forem se nesmí odlévat, pokud se jedná o formy křemenné, hrozí zde praskání vlivem transformace křemene.

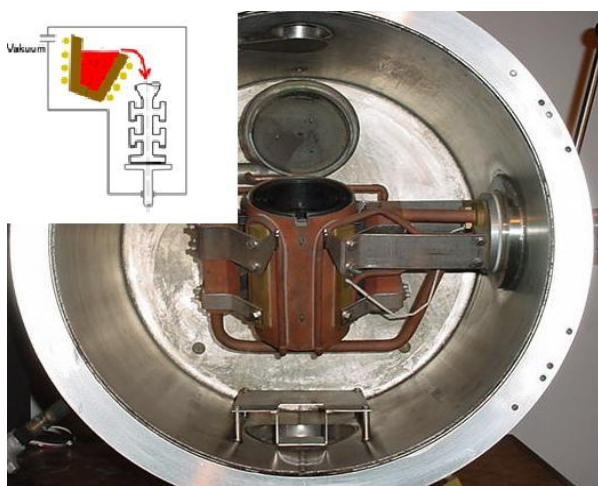
Existuje více způsobů lití, nejběžněji se používá gravitační lití (obr.15), při kterém je kov přiváděn do skořepiny pomocí gravitace. Další možností je sklopné lití (obr.16), kde se forma upne k horní části pece a otočením o 180° dojde k naplnění formy kovem. Výhodami jsou dobré řízení teploty kovu a snížení kontaminace struskou. Při výrobě vysoce kvalitních odlitků ze superslitin pro letecký či automobilový průmysl je třeba využít vakuového lití (obr.17). Pod vakuem probíhá celý proces, od zahřívání skořepiny až po odlití taveniny. V neposlední řadě lze odlévat odlitky metodou vakuového nasávání (obr.18). Při této metodě je forma umístěna do vakuové komory a kov je do ní nasáván. Existují dva hlavní druhy, CLA a CLV, rozdíl je pouze v umístění taveniny buď na vzduchu nebo ve vakuu.



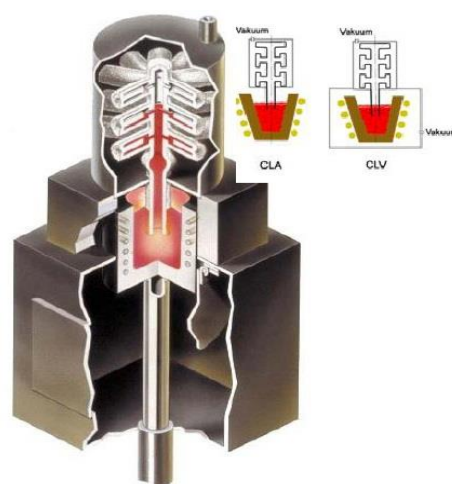
Obr. 15 Gravitační lití [10,15]



Obr. 16 Sklopné lití [10,16]



Obr. 17 Vakuové lití [10,17]

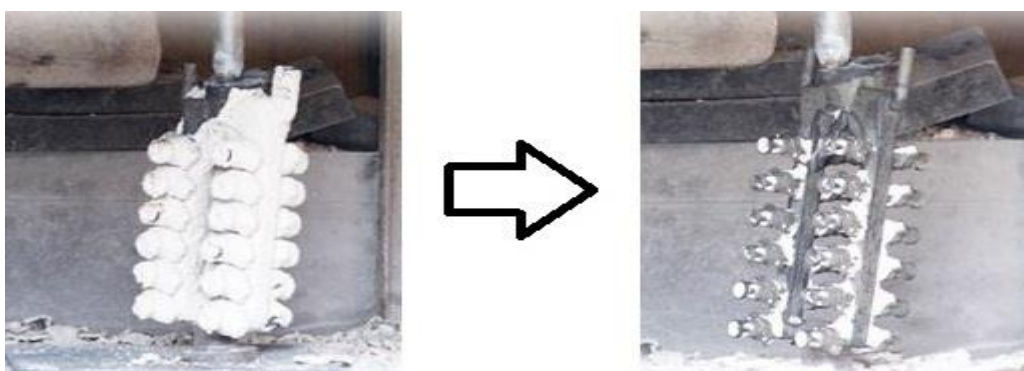


Obr. 18 Vakuové nasávání [10,18]

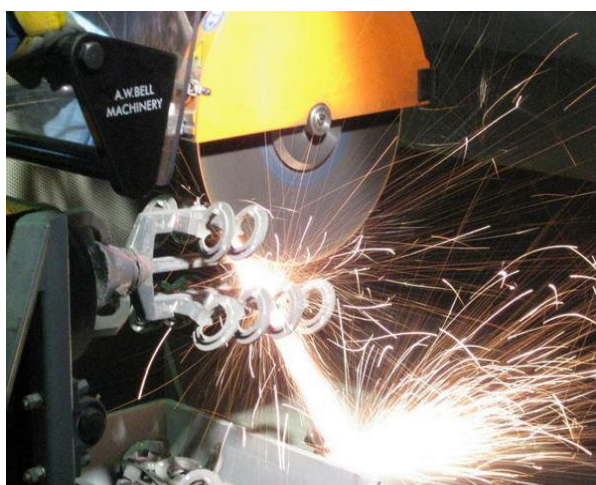
1.1.8 Dokončovací operace [1,2,4,6]

Po odlití je třeba provést dokončovací operace, které jsou jedny z nejpracnějších z celé technologie. Jedná se o hrubé odstranění skořepiny, oddělení odlitků z vtokové soustavy, odstranění zbylé keramiky na odlitcích a závěrečné čištění odlitků. V některých případech se provádí i dodatkové obrábění a tepelné zpracování.

Po ztuhnutí a zchladnutí kovu se odstraní největší část skořepiny (obr.19), ta bývá velice pevná, a tak se odstraňuje obtížně. Odstranění se provádí mechanicky vibračním oklepáváním pomocí vibračních strojů nebo kladiv ve zvukotěsných a prachotěsných kabinách. V dnešní době je nově používanou metodou odstranění skořepiny pomocí vysokotlakého vodního paprsku. Po hrubém odstranění keramiky většinou následuje oddělení odlitků od vtokové soustavy. U ocelí se dělení provádí vibračními stroji nebo řeznými kotouči (obr.20), na slitiny hliníku se využívají pásové pily. Jakmile se jednotlivé odlitky oddělí, je potřeba odstranit zbývající keramiku. Mohou se použít buď abrazivní nebo chemické metody, nejčastěji se však používají metody abrazivní. Ocelové odlitky se většinou tryskají litinovou drtí, ocelovými kuličkami nebo korundovým pískem, na hliníkové odlitky se může použít tryskání tlakovou vodou s přidaným abrazivem. Na konci dokončovacích operací se ještě provádí odstraňování vtoků z odlitků, zbavování povrchových vad a skvrn, broušení a leštění. K tomuto se používá široká škála brousicích zařízení (obr.21).



Obr. 19 Odstranění skořepiny [19]



Obr. 20 Oddělování odlitků [20]



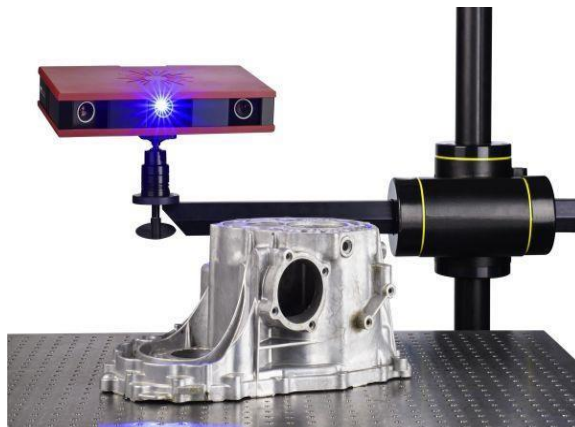
Obr. 21 Broušení odlitku [21]

1.1.9 Kontrola odlitků [1,2,4]

Po zhotovení se na základě požadavků zákazníka provede kontrola jakosti na výsledném odlitku. Kontrola kvality odlitků se dá rozdělit na kontrolu rozměrů, stanovení povrchové kvality a odhalení vad. Rozměry se dají kontrolovat více způsoby, může to být pomocí posuvných měřidel a nejrůznějších měrek (obr.22). Dále se používá 3D skener (obr.23), kterým je možné měřit i formu na vstřikování vosku nebo samotné voskové modely, což umožňuje odhalit chyby již na začátku výroby. Vady, které se u odlitků vyskytují, se dělí na povrchové a vnitřní. Povrchové vady jsou viditelné a jedná se zejména o pórovitost, praskliny, zavaleniny, kontaminaci struskou nebo vměstky. Tyto vady lze odhalit vizuální kontrolou, kapilární zkouškou, magnetickou metodou nebo metodou vířivých proudů. Vnitřní vady jsou například segregace, bubliny nebo porezita. K jejich zjišťování se používají nedestruktivní zkoušky jako jsou ultrazvuk (obr.24) nebo radiologická zkouška (obr.25). Ultrazvuk dokáže odhalit vnitřní dutiny, trhliny, ale je také vhodný pro měření tloušťky stěny. Radiologická zkouška nám pomáhá získat trvalý obraz zejména vnitřních objemových vad. V dnešní době je kladen stále větší důraz na zdravotnost odlitku a jeho rozměrovou přesnost, proto i metody zkoušení se musí stále více zdokonalovat.



Obr. 22 Měření posuvným měřidlem [22]



Obr. 23 Měření 3D skenerem [23]



Obr. 24 Měření ultrazvukem [24]

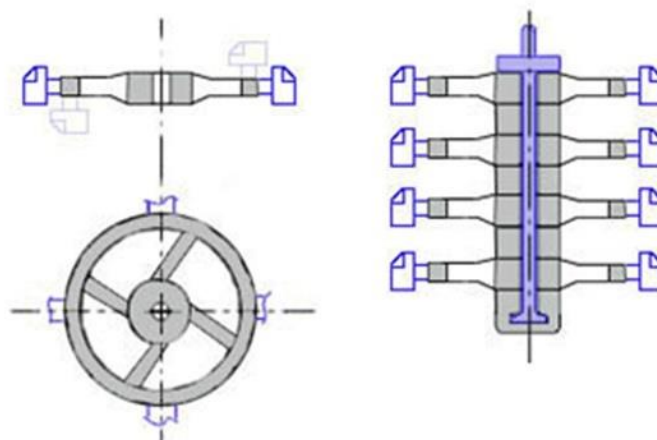


Obr. 25 Rentgen [25]

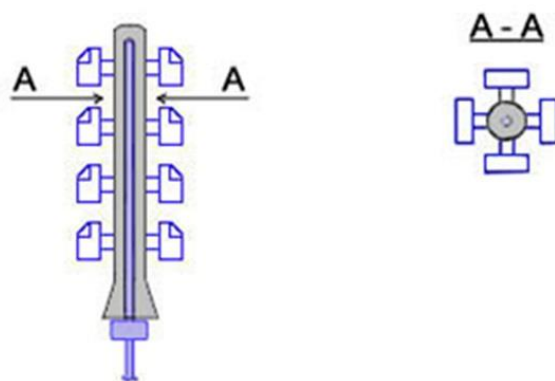
1.2 Vtoková soustava v lití metodou vytavitelného modelu [1,2,26]

Jedním ze základních předpokladů pro zhotovení konečného odlitku o požadované vnitřní kvalitě a tvaru je vhodně navržená vtoková soustava. Aby byl vyrobený odlitek zdravý, je třeba, aby navržená vtoková soustava umožnila dokonalé vyplnění dutiny formy kovem a dále také, aby se nahradilo smrštění, které je nedílnou součástí tuhnutí odlitku. Při navrhování těchto vtokových systémů se vychází ze základních poznatků o vtocích a nálitcích při lití do písku, které jsou tak obecné, že většinu z nich lze použít i na metodu přesného lití. Na světě existuje spousta vtokových systémů, každý z nich je originální a každá slévárna má svoje standardizované vtokové soustavy, které používá podle typu odlitku. Obecně lze rozdělit vtokové systémy na systémy s horním nebo dolním plněním, přičemž nejvíce se používá plnění horem. U těchto systémů se ovšem musí dávat pozor, neboť při větší výšce licího kůlu vzniká turbulentní proudění, které je nežádoucí. Dalším obecným rozdělením může být rozdělení na vtokové soustavy sestav s jedním modelem nebo sestav více modelů, tzv. stromečků. Stromeček se skládá z většího počtu modelů spojených jednotlivými vtoky s vtokovou soustavou, která musí zajišťovat výrobu kvalitních odlitků. Navrhování stromečkových sestav má určité specifické požadavky, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.3. Stromečkové sestavy můžeme rozdělit na sestavy:

- se středovým licím vtokovým kanálem a s modely sestavenými na etážových vtocích horizontálně nebo vertikálně (obr.26)
- s modely sestavenými přímo na vtokový kanál (obr.27)

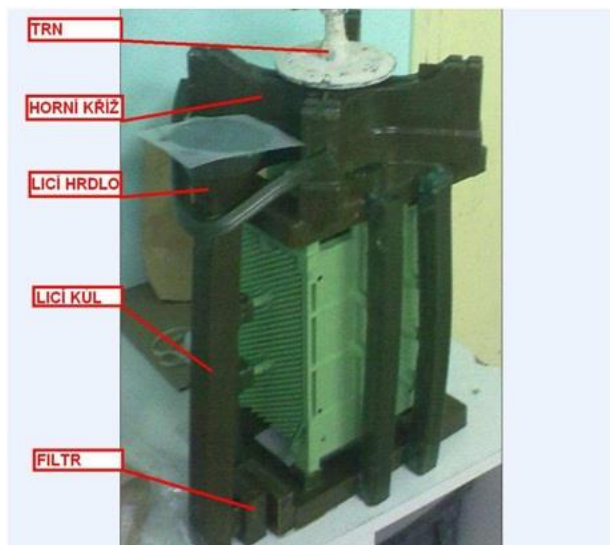


Obr. 26 Modely sestavené etážově horizontálně [7]



Obr. 27 Modely sestavené na vtokový kanál [7]

Jako další možná, ale mnohem méně obvyklá, varianta vtokové soustavy je tzv. klecová vtoková soustava. Tento typ vtokového systému se používá především pro velké a na kvalitu náročné odlitky. V těchto případech probíhá plnění kovem od spodu nahoru. Nevýhodou je delší sestavování vtokové soustavy a nízké využití tekutého kovu. Tyto klecové vtokové soustavy mají určité společné znaky, jsou to licí kůl, filtr a horní kříž. Licí kůl bývá umístěný na boku klecové soustavy a v horní části je přilepen ke kleci tak, aby kov neproudil nejdříve do horního kříže a tím neplnil dutinu formy shora. Filtr se umísťuje do nejnižšího bodu klecové soustavy pod licí kůl a má větší průřez než je licí kůl, je to z důvodu zachování průtočnosti kovu. Horní kříž funguje jako pevnostní prvek, ale zároveň slouží jako dosazovač tekutého kovu do ramen vtokové soustavy při tuhnutí odlitku.



Obr. 28 Klecová vtoková soustava



Obr. 29 Obalování klecové vtokové soustavy

1.2.1 Hlavní části vtokové soustavy [2]

Vtoková jamka

Vtoková jamka, jinak také nálevka, slouží k usměrnění proudu kovu do vtokového kanálu, což zmírní nárazy kovu na skořepinu a tím její namáhání. Další funkcí je zbavení kovu od všech nečistot, avšak to jde pouze, když je nálevka při lití zcela naplněna kovem. U sestav jednotlivých odlitků zastává nálevka zároveň funkci nálitku.

Vtokový kanál

Vtokový kanál má za úkol převést tekutý kov z nálevky do rozváděcích kanálů a dále přes vtokové zářezy do dutin formy. Má tvar válce nebo hranolu, obvykle má velký průřez a vytváří tak potřebný hydrostatický tlak, plní funkci nálitku.

Rozváděcí kanál

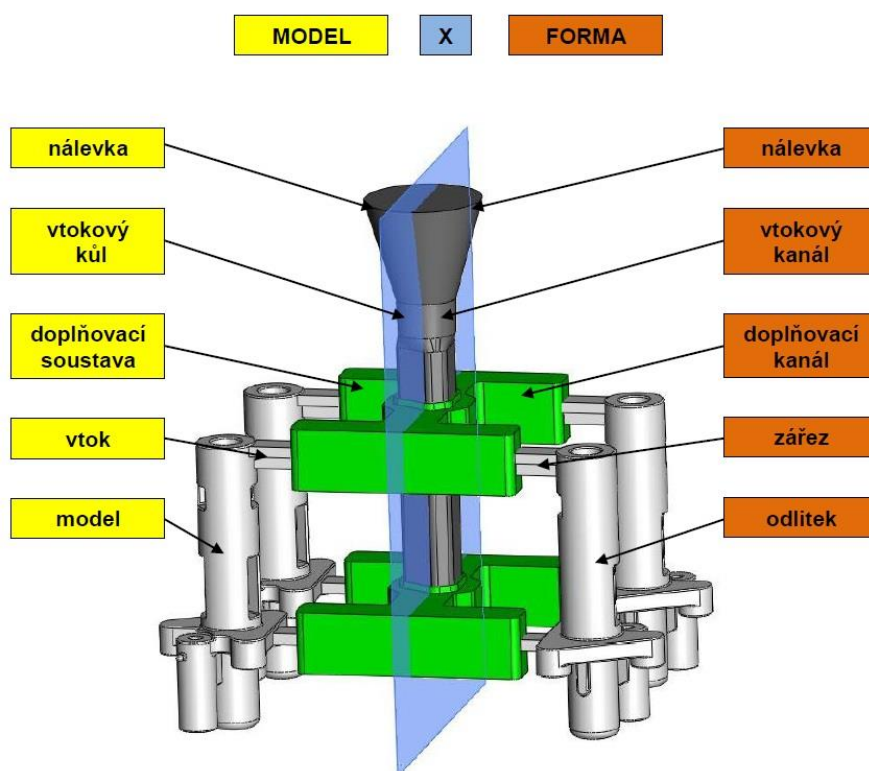
Funkcí rozváděcího neboli doplňovacího kanálu je dostat tekutý kov od vtokového kanálu směrem k vtokovým zářezům a v průběhu tuhnutí odlitků ho do nich stále doplňovat. Aby bylo umožněno správné doplňování kovu, musí být objem rozváděcích kanálů, včetně vtokového, přibližně stejný jako objem odlitku a jeho rychlost ochlazování musí být menší než tomu je u vtokového zářezu a odlitku. Rozváděcí kanál by měl být schopen zachytit nečistoty, proto jeho průřez má být větší než průřez vtokového kanálu, aby se při zpomalení proudu kovu mohly nečistoty zachytit ještě před vniknutím do dutiny odlitku.

Vtokové zářezy

Vtokové zářezy slouží ke spojení vtokové soustavy s dutinou formy odlitku a bývají kruhového, půlkruhového, čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Podle směru proudění kovu mohou být horizontální, vertikální nebo šikmé. Velikost zářezů musí být nastavená tak, aby dokázaly klidně a za optimální dobu vyplnit dutinu formy.

Nálitky

Nálitky fungují jako zásobník tekutého kovu, který je umístěn tak, aby dokázal nahradit úbytek při smršťování kovu během tuhnutí odlitku. Cílem je, aby zůstal v tekutém stavu déle než odlitek, proto musí mít takový objem a tvar, aby jeho chladnutí probíhalo pomaleji. Někdy se chladnutí nálitku zpomaluje tím, že se obalí hmotou s menší tepelnou vodivostí.



Obr. 30 Hlavní části vtokové soustavy [27]

1.2.2 Základní rozměry vtokové soustavy [2]

Při výpočtech a konstruování vtokové soustavy lze použít těchto vztahů:

Doba lití stromečku:

$$t = s \cdot \sqrt{M} [s]$$

t - doba lití

M - hmotnost kovu ve formě

s - koeficient rychlosti lití

Koeficient s se určuje z tabulek a liší se podle typu odlévané slitiny.

Průřez doplňovací soustavy:

Kolečko s n počtem spojovacích ramen s vtokovým kulem:

$$F_d = n \cdot s_d \cdot h_d [cm^2]$$

F_d - plocha řezu v místech připojení modelů

s_d - šířka ramen [cm]

n - počet ramen

h_d - výška ramen [cm]

Plný kotouč bez ramen:

$$F_d = \pi \cdot D_v \cdot h_d [cm^2]$$

D_v - průměr vtokového kanálu [cm]

h_d - tloušťka doplňovacího kanálu [cm]

Součet průřezů zářezů v jedné etáži:

$$F_z = \frac{M_e}{t_e \cdot K \cdot H_p} [cm^2]$$

F_z - plocha všech zářezů připojených v jedné etáži

M_e - hmotnost odlitku v jedné etáži [g]

t_e - doba lití jedné etáže [s]

K - koeficient průtoku [g/cm³]

H_p - výška sloupce kovu nad odlitky až po další etáž [cm]

Koeficient průtoku se vypočítá ze vzorce:

$$K = \frac{M}{V^x}$$

M - hmotnost jednoho odlitku [g]

V^x - objem tělesa, které tvoří vnější obrys stromečku [cm^3]

1.2.3 Vtokové soustavy z hlediska proudění [1,26,28]

Při navrhování vtokových soustav z hlediska proudění je nutné mít na paměti dva základní zákony - energie je vždy zachována, hmota je vždy zachována. Zákon zachování energie je popsán Bernoulliho rovnicí a zákon zachování hmoty je popsán rovnicí kontinuity.

Bernoulliho rovnice:

$$\frac{v_x^2}{2 \cdot g} + \frac{p_x}{\rho \cdot g} + h_x + \sum F = K$$

v_x - rychlost kovu

p_x - tlak kovu

ρ - hustota kovu

g - gravitační zrychlení

h_x - licí výška

F - ztráty třením v každém zúžení nebo změně směru

K - konstanta

Rovnice kontinuity:

$$Q_1 = Q_2 = Q_x = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = v_x \cdot A_x$$

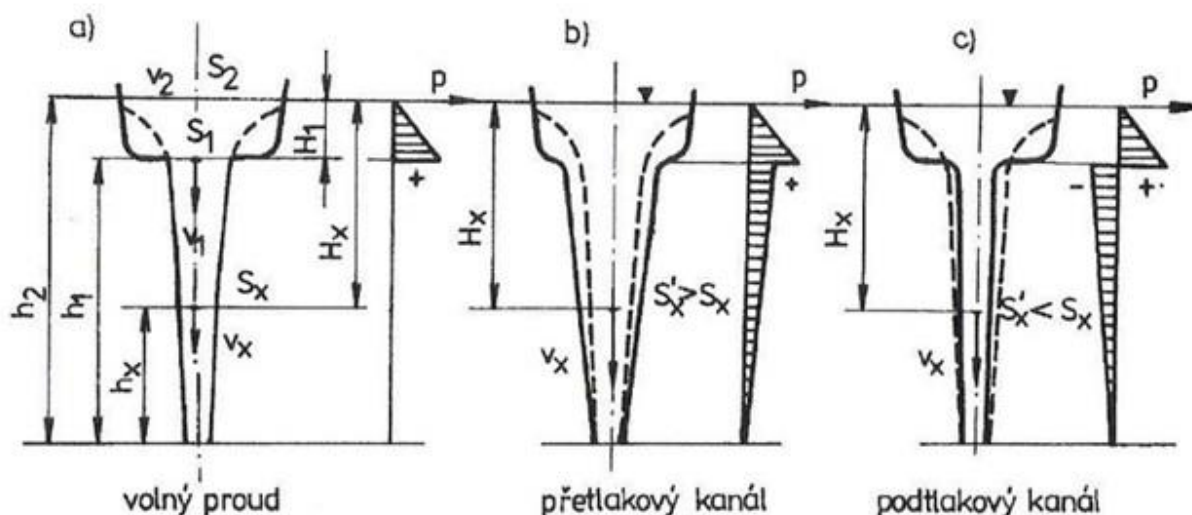
Q - objemový průtok

v - rychlost kovu

A - průřez kanálu

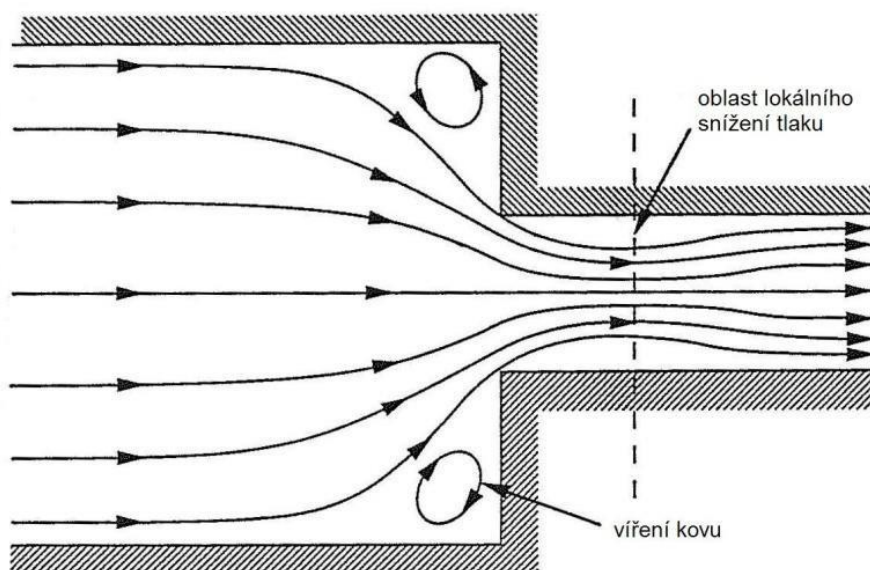
Bernoulliho rovnice je základem pro stanovení rychlosti kovu ve vtokovém systému při známé licí výšce h . Rovnice kontinuity ukazuje, že objemový průtok kovu Q bude zachován v kterékoliv části vtokové soustavy, přičemž se změnou průřezu kanálu se mění rychlost proudění kovu.

Při navrhování vtokové soustavy by se mělo myslet na to, aby tvar formy zajišťoval během plnění minimální styk kovu s plyny a omezilo se tak vytváření nekovových vměstků. Na obrázku 31 je znázorněno proudění ve svislých vtokových kanálech. Aby se minimalizoval styk kovu s okolní atmosférou, je třeba použít přetlakový kanál, kov pak nemá tendenci nasávat skrze formu vzduch.



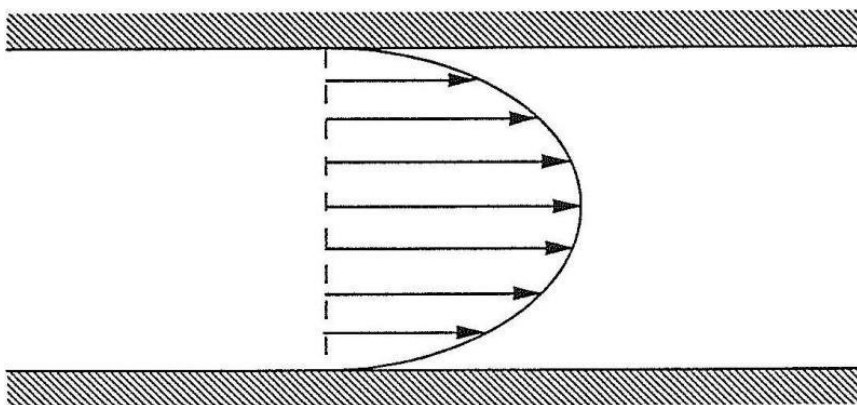
Obr. 31 Proudění ve svislých vtokových kanálech [26]

Další věc, které bychom se při navrhování vtokového systému měli vyhnout jsou skokové změny v příčném průřezu vtokové soustavy (obr. 32). Kov v rozích víří namísto toho, aby postupoval dále. Dále v oblasti za zúžením dochází vlivem náhlého zrychlení kovu a jeho hybnosti k lokálnímu snížení tlaku, což způsobuje opět nasávání vzduchu přes fórmu a jeho reakci s kovem, čímž se zhoršuje jeho kvalita.



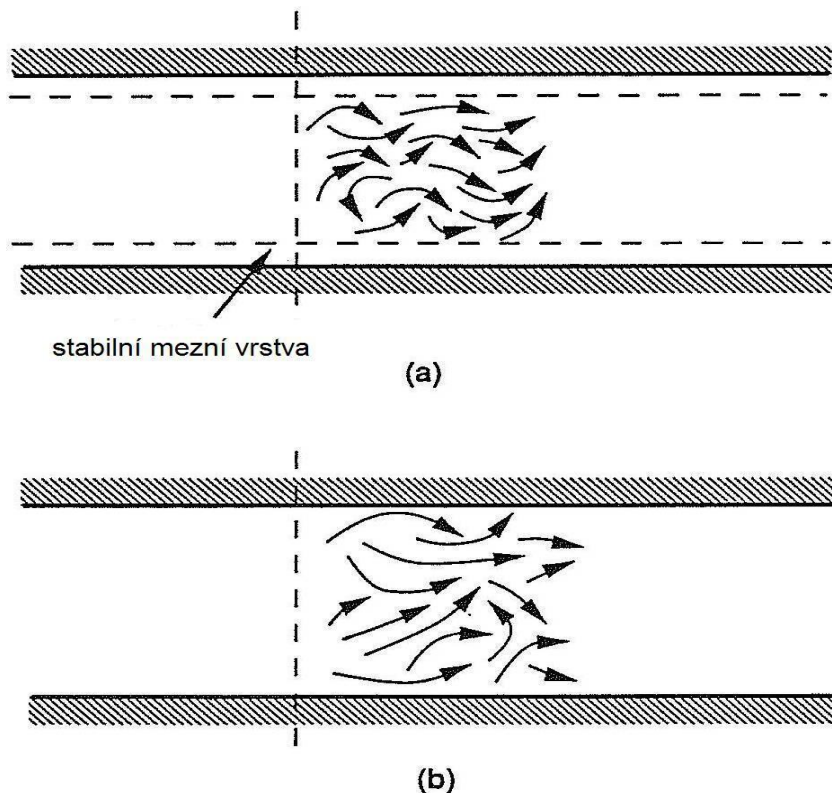
Obr. 32 Skoková změna průřezu [1]

Proudění kapalin se dá rozdělit do dvou režimů, jedná se o laminární proudění a turbulentní proudění. Laminární proudění je charakteristické tím, že dráhy všech molekul v proudu kovu jsou rovnoběžné se stěnou kanálu. Na povrchu stěny, kde je kov v kontaktu s formou, mají molekuly prakticky nulovou rychlost, ta se však od stěny formy směrem ke středu zvyšuje a nejvyšší rychlost kovu je ve středu kanálu (obr. 33).



Obr. 33 Laminární proudění [1]

O turbulentní proudění se jedná v případě, kdy proudění molekul v rovnoběžných přímkách je rozbito a dochází k promíchávání jednotlivých vrstev kapaliny. Existují dva druhy turbulentního proudění, jeden je s tzv. stabilní mezní vrstvou a druhý s tzv. nestabilní mezní vrstvou (obr. 34). V případě turbulentního proudění se stabilní mezní vrstvou je to podobně jako u laminárního proudění, rychlost kovu na stěně formy je nulová, ačkoliv v kanálu se zbytek taveniny pohybuje turbulentně. Nicméně v případě turbulentního proudění s nestabilní mezní vrstvou je rychlost proudění tak velká, že turbulence v proudu poruší tuto mezní vrstvu a rozmetá ji do proudícího toku. V případě odlitků litých do keramických skořepin tekutý kov při kontaktu se stěnou formy s ní reaguje a je oxidován. Tento zoxidovaný kov je smeten do proudu kovu a může vytvořit vměstky v odlitku.



Obr. 34 Turbulentní proudění se stabilní (a) a nestabilní (b) mezní vrstvou [1]

Kritérium určení, zda proudění bude laminární nebo turbulentní, je tzv. Reynoldsovo číslo. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné a lze jej spočítat podle vztahu:

$$R_e = \frac{4 \cdot R_h \cdot v}{\nu}$$

$$R_h = \frac{S}{O}$$

R_e - Reynoldsovo číslo

R_h - hydraulický průměr

v - střední rychlost proudění

ν - kinematická viskozita

S - průřez kanálu

O - obvod kanálu

Experimentálně bylo zjištěno, že proudění je laminární, pokud Reynoldsovo číslo je nižší jak 2000. Při Reynoldsovu číslu vyšším jak 2000 a nižším jak 20 000 nastává turbulentní proudění se stabilní mezní vrstvou, pokud Reynoldsovo číslo vystoupá nad 20 000, je mezní vrstva nestabilní a porušuje se. Z hlediska zdravoti odlitku je nejlepší laminární proudění, avšak, aby se ho dosáhlo, musela by být rychlost proudění kovu nízká, kvůli tomu by pak ale mohlo docházet k zamrznání kovu a tím k nezaběhnutí odlitku. Proto je požadování, aby vtoková soustava byla navržena tak, že bude dosaženo turbulentního proudění, ale Reynoldsovo číslo se bude pohybovat pod hodnotou 20 000.

1.3 Simulace ve slévárenství [29,30]

V současné době je na výrobce, v tomto případě na slévárny, vyvíjen čím dál větší tlak ze strany zákazníků. Zákazníci požadují dodání kvalitních odlitků v co nejkratším možném čase, za nejnižší cenu, dále se zvětšuje poměr malosériových a středněsériových zakázek na úkor velkosériových. Aby slévárna zůstala konkurenceschopná a vyhověla všem požadavkům, musí hledat cesty, kterými toho docílit. Musí začít snižovat své výrobní náklady za současného udržení nebo dokonce zvýšení kvality svých produktů. V této cestě slévárnám pomáhá právě numerická simulace, která eliminuje metodu pokusů a omylů, která je mnohdy velice nákladná. Dříve simulace řešily pouze identifikace tepelných uzlů odlitku, ovšem se značným vývojem v dnešní době dokáže simulační program predikovat vady, zbytkové napětí, mikrostrukturu nebo mechanické vlastnosti. Díky simulacím tak lze optimalizovat spoustu slévárenských proměnných, jedná se například o lící podmínky, konstrukci vtokové soustavy, tím zvýšit využití kovu atd. Simulace lze použít pro všechny běžně odlévané slitiny a slévárenské technologie.

Simulace rozhodně pomáhají slévárnám v každém ohledu jejich práce. Je ovšem nutné si uvědomit, že simulační programy nenavrhují samotné řešení problému, ale pouze simulují procesy, a dosažené výsledky jsou pouze tak blízko realitě, jak jsou realitě blízká samotná vstupní data vložená do simulace. Proto i nadále zůstává nenahraditelným článkem slévárenský technolog, neboť on je ten, kdo zodpovídá za správné vstupní parametry, následné vyhodnocení výsledků a implementaci nových řešení do provozního prostředí. Každopádně simulace jsou velmi dobrým pomocníkem každého technologa, který mu napomáhá vyrobit odlitek tzv. napoprvé dobře. Tím se eliminují náklady spojené s úpravou technologie (např. úprava nebo výroba nové matečné formy) a snižuje se množství času s těmito operacemi spojené, což vyúsťuje v kratší dodací lhůty samotných odlitků.

1.3.1 Pre-processing - vstup dat [31,32]

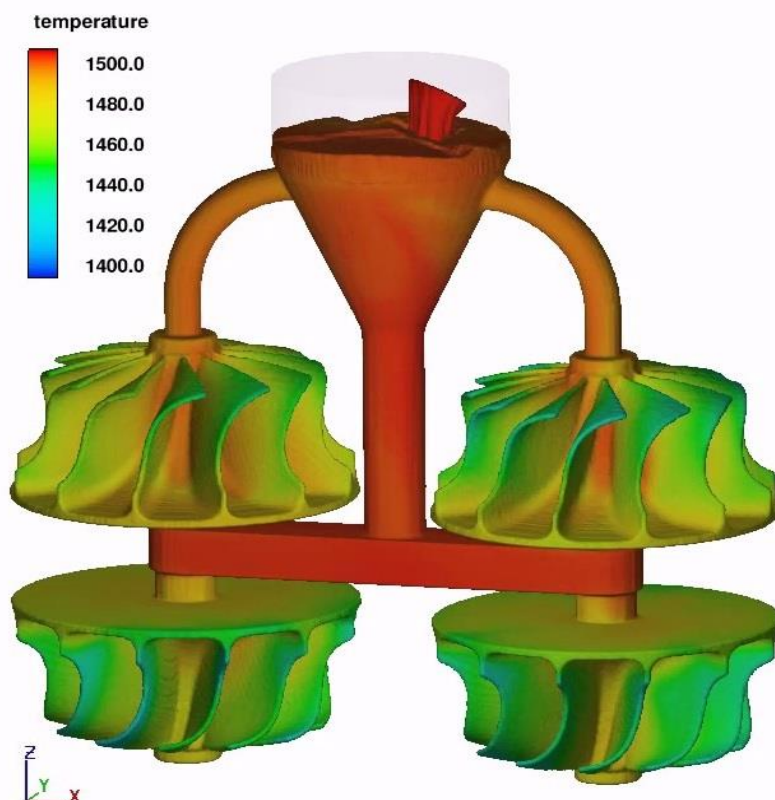
Každá simulace se skládá z jednotlivých operací, první z nich je tzv. pre-processing. Jedná se o stěžejní část procesu, neboť při této operaci se zadávají všechny parametry, s kterými bude simulace počítat. Jednou z částí pre-processingu je nastavení optimální trojúhelníkové 2D sítě, jenž detailně popisuje celý odlitek a také charakterizuje skořepinovou formu, do které se bude odlévat. Program poté tuto 2D síť převede do 3D sítě, která se skládá z milionů elementů. K tvoření těchto sítí se v současné době nejčastěji používají dvě metody, jedná se o metodu konečných prvků (MKP) a metodu konečných diferencí (MKD). Další částí je zadání vstupních hodnot jako jsou materiály, jejich počáteční teploty, přestupy tepla, čas nebo rychlost lití a další. Jako poslední část tohoto procesu je zadání parametrů výpočtu, kde se nastaví velikost kroku simulace, četnost ukládání a rozsah výsledků. Výstupem jsou datové soubory, které se mohou později zpětně načíst a upravovat podmínky do nich zadané.

1.3.2 Processing - vlastní výpočet [31,32]

Další částí simulace je samotný výpočet, jenž se dá rozdělit na výpočet plnění, teplotní výpočet a napěťový výpočet. Při výpočtu plnění můžeme simulovat charakter proudění, erozi formy, nezaběhnutí, studené spoje a rozložení plynu ve formě. Výpočet proudění je založen na Navier-Stokesově rovnici. Při teplotním výpočtu se simuluje tepelný tok, při němž se berou v úvahu všechny tři základní druhy šíření tepla - vedení, proudění, záření. Vývin tepla při fázových změnách je popsán entalpií materiálu. Teplotním výpočtem se řeší problémy spojené s tepelnými uzly a makro/mikro staženinami. Při napěťovém výpočtu lze predikovat deformaci, napětí v odlitku a formě, vznik trhlin a prasklin a další. Celkovou dobu výpočtu ovlivňuje velikost odlitku, rozsah požadovaných výsledků a přesnost, v neposlední řadě záleží také na hardwarovém výkonu počítače. V některých programech lze během výpočtu sledovat výsledky, v případě chyby výpočet přerušit, chybu opravit a pustit výpočet znovu.

1.3.3 Post-processing - výstup dat [31,32]

Poslední částí simulace je výstup dat a jejich vyhodnocení. Z výsledků proudění můžeme určit zda je charakter plnění vyhovující, dále zda dojde k zaplnění celé dutiny formy či jestli nehrozí vznik studených spojů. Simulační program nám také pomáhá s optimalizováním vtokové a náliťkové soustavy, můžeme vyhodnotit zda je vtokový systém vhodný vzhledem k rozložení teplotního pole a dosazování. Z výsledků můžeme určit kritická místa odlitku, kde by mohlo docházet k výskytu staženin a ředin. Všechny nasimulované vlastnosti lze pozorovat v nejrůznějších řezech celým modelem a z výstupů lze vytvořit obrázek nebo video celého procesu. Na obrázku 35 je obrázek ze simulace rozložení teploty kovu po odlití metodou vytavitelného modelu.



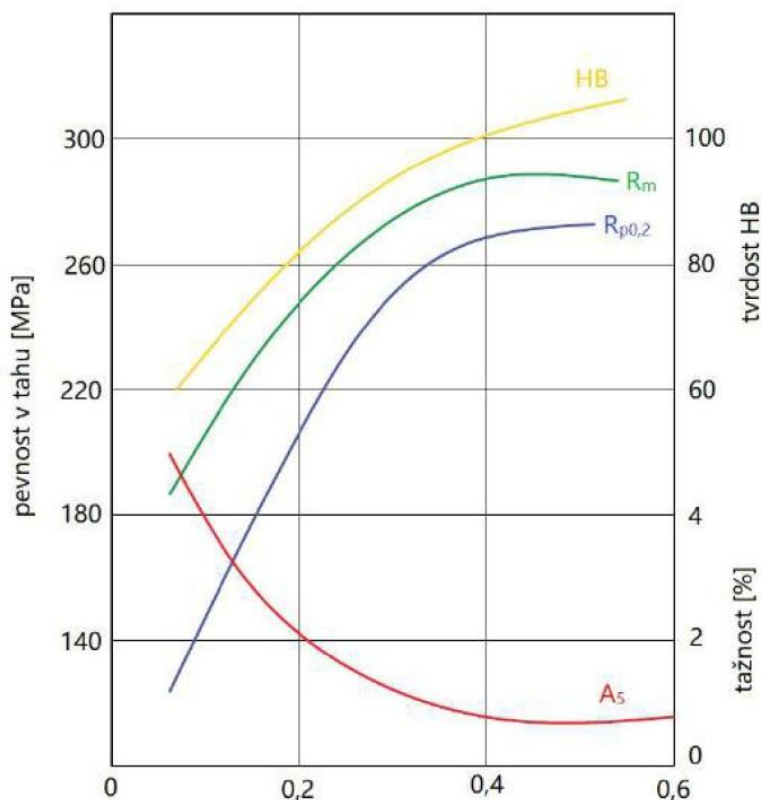
Obr. 35 Teplota kovu po odlití

1.4 Slitiny hliníku používané v lití metodou vytavitelného modelu [33]

Čistý hliník se pro konstrukční účely vůbec nepoužívá, je to z důvodu jeho špatných mechanických i slévárenských vlastností, to ovšem neplatí pro jeho slitiny, které tyto vlastnosti mají podstatně lepší, a tak se můžou používat na výrobu široké škály součástí. Vzájemnou kombinací a množstvím přísadových prvků můžeme získat slitiny o různých mechanických a technologických vlastnostech. Přísadové prvky jsou hlavní a vedlejší. Hlavní přísadové prvky jsou stěžejní pro určení druhu a vlastností slitiny a jejich obsah bývá druhý nejvyšší po hliníku. Ve slévárenských slitinách jsou hlavními přísadovými prvky křemík (siluminy Al-Si), měď (duralaluminium Al-Cu) a hořčík (hydronalium Al-Mg). Vedlejší přísadové prvky jsou ty, jejichž obsah je nižší než obsah hlavního přísadového prvku a může jich být ve slitině několik současně. Tyto prvky taktéž ovlivňují vlastnosti dané slitiny, což může být například zlepšení zabíhavosti, zvýšení mechanických vlastností, lepší obrobiteľnost atd., podle míry ovlivnění těchto vlastností rozdělují slitiny dále do skupin (Al-Si-Cu, Al-Si-Mg apod.), pro siluminy jsou nejdůležitější hořčík a měď.

1.4.1 Slitiny Al-Si-Mg [33,34]

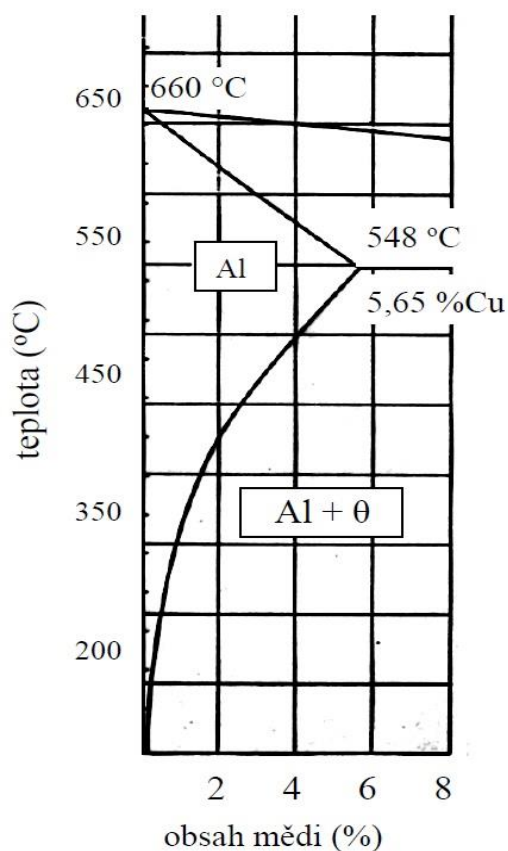
Jedná se o siluminy, kde vedlejším přísadovým prvkem je hořčík. Tyto slitiny mají v litém velmi dobré slévárenské vlastnosti, ale průměrné mechanické vlastnosti. To se ovšem mění, pokud provedeme vytvrzování za tepla, což umožňuje právě hořčík, kterého je v těchto slitinách 0,25-0,45%, někdy až 0,7%, pak tyto slitiny dosahují nejvyšších hodnot mechanických vlastností. Při běžné rychlosti ochlazování se hořčík ve slitině vylučuje jako intermetalická fáze Mg_2Si , která tvoří eutektikum Al-Si- Mg_2Si s teplotou tuhnutí asi 555°C. Jak lze vidět na obrázku 36, po vytvrzení a se zvyšujícím se obsahem hořčíku dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti, to se ovšem děje za současného snižování tažnosti. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické slitiny a podle obsahu křemíku se dělí do dvou skupin, které se značí AlSi7Mg a AlSi10Mg, dále se pak dělí podle obsahu hořčíku. Slitiny AlSi10Mg mají díky vyššímu obsahu křemíku lepší slévárenské vlastnosti a jsou lépe svařitelné. Všechny typy slitin AlSiMg se mohou lít metodou vytavitelného modelu a jejich odlitky se používají pro vysoce namáhané součásti v leteckém a automobilovém průmyslu.



Obr. 36 Vliv obsahu Mg na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si 9 po vytvrzení [33]

1.4.2 Slitiny Al-Cu [33,34]

Jedná se o duraluminy, což jsou slitiny hliníku s mědí jako hlavním přísadovým prvkem, kterého v nich bývá 4-5%. Hliník společně s mědí v těchto slitinách tvoří intermetalickou fázi Al_2Cu označovanou jako fáze θ . Eutektická teplota je 548°C a eutektická koncentrace je 33,2% Cu. Maximální koncentrace mědi, kterou lze v hliníku rozpustit je za eutektické teploty 5,65%, s klesající teplotou se toto množství znatelně snižuje a už při 300°C je rozpustnost pouze 0,45% (obr.37). Díky takto omezené rozpustnosti lze s těmito slitinami provádět vytvrzování za tepla i za studena, což opět pomáhá se zlepšováním mechanických vlastností. Slitiny Al-Cu mají poměrně široký interval tuhnutí, kvůli čemuž se těžce nálitkují a jejich slévárenské vlastnosti jsou velice špatné. Pro zajištění kvalitních zdravých odlitků je třeba, aby probíhalo usměrněné tuhnutí s velkým teplotním gradientem. Kvůli špatným slévárenským vlastnostem se jako běžný přísadový prvek používá titan v množství do 0,3%, ten pomáhá zjemnění primárního zrna. Dále se může použít křemík, ten ovšem podstatně snižuje pevnost. Jako další přísadové prvky se přidávají hořčík (do 0,35%) nebo mangan (do 0,5%), které zvyšují pevnost slitin, avšak mimořádně vysoké mechanické vlastnosti (pevnost v tahu až 450 MPa, tažnost kolem 15%) zajistí slitině po vytvrzování přísada stříbra (max. 1%). Tyto slitiny proto patří k vysokopevným slitinám hliníku. Další zajímavostí je, že při přidání asi 2% niklu lze odlévat odlitky, které jsou vhodné pro použití za zvýšených teplot.



Obr. 37 Rovnovážný diagram Al-Cu [33]

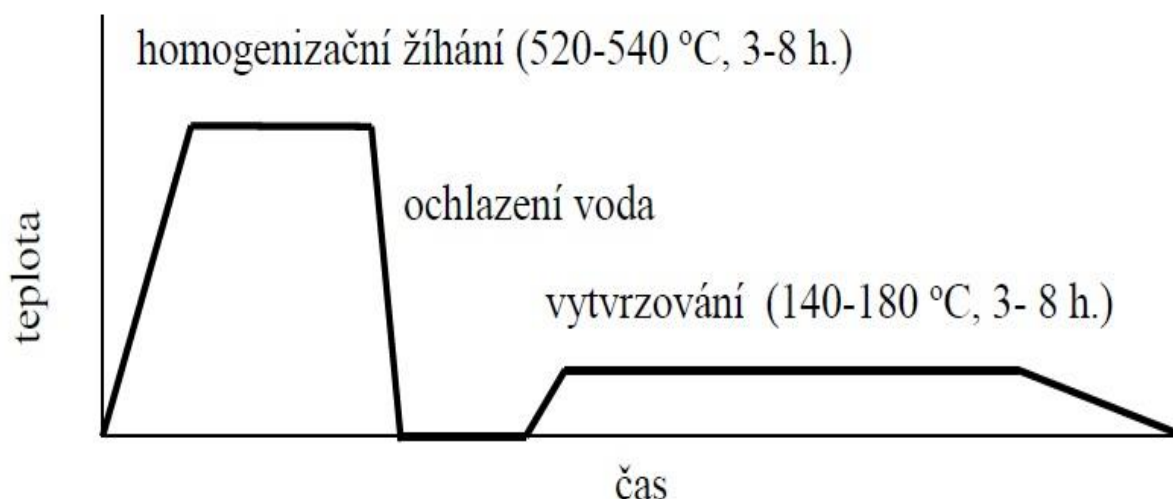
1.4.3 Tepelné zpracování hliníkových slitin [33,34]

Převážná část odlitků z hliníkových slitin se používá v tepelně nezpracovaném stavu. Když už se tepelné zpracování používá, bývá to zejména z těchto hlavních důvodů: zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřních pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. Existují dva druhy tepelného zpracování hliníkových slitin, je to žíhání a vytvrzování. V drtivé většině se ovšem provádí vytvrzování, při němž se využívá změny rozpustnosti některých přísadových prvků během chladnutí, jsou to především hořčík a měď. Vytvrzováním dosahujeme vyšších pevností a tvrdostí, avšak je to na úkor snížení tažnosti. Podle toho, jestli je slitina schopná vytvrzení, dělíme hliníkové slitiny na vytvrditelné a nevytvrditelné. Proces vytvrzování se skládá ze tří částí, je to rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a precipitační vytvrzování (obr.38).

Na začátku před tepelným zpracováním máme odlitek, který ztuhl ve formě poměrně pomalým ochlazením, což zapříčinilo, že přísadové prvky se vyloučili v podobě intermetalických fází (např. Al_2Cu , Mg_2Si). Takto vyloučené fáze mají hrubou strukturu a negativně ovlivňují vlastnosti slitiny. Prvním krokem, abychom se těchto hrubých fází zbavili, je provedení rozpouštěcího žíhání, čímž se získá homogenní tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. To se provádí ohřátím odlitku na žíhací teploty, které se pohybují 10-15°C pod eutektickou teplotou. Obvyklá doba výdrže na těchto teplotách je v rozmezí 3 až 8 hodin, záleží však na disperzitě výchozího odlitku a na tloušťce stěn.

Po rozpouštěcím žíhání následuje rychlé ochlazení, které má za cíl zamezit zpětnému vyloučení intermetalické fáze a vytvořit tak strukturu tvořenou přesyceným tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$. Odlitek po tomto zpracování je poměrně měkký a tvárný. Ochlazení do teploty max. 150-200°C se musí provést co nejrychleji, aby nedošlo k částečné segregaci, na ochlazení se proto používá studená voda. Doba od vyjmutí odlitků ze žíhací pece a ponořením do vody taktéž musí být co nejkratší a u tenkostěnných odlitků by neměla překročit 10 sekund.

Poslední fází celého procesu je precipitační vytvrzování, často též nazýváno stárnutí, při kterém probíhá postupný rozpad přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Jednotlivé atomy přísadového prvku difundují do oblastí bohatších na tento prvek, kde dochází k nukleaci nové fáze. Postupným růstem se vytváří koherentní precipitáty destičkového tvaru. Tyto precipitáty jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jíž deformují a vyvolávají v ní pnutí, jenž je příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku dochází k vytvrzování buď za studena nebo za tepla. Teploty vytvrzování za tepla se obvykle pohybují v rozmezí od 140°C do 180°C a doba setrvání na těchto teplotách je od 3 do 8 hodin. Teplota a čas se musí sledovat, neboť při příliš vysoké teplotě nebo příliš dlouhé době vytvrzování může dojít ke stavu, jemuž se říká přestárnutí slitiny.



Obr. 38 Orientační hodnoty vytvrzování za tepla [33]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V přesném lití metodou vytavitelného modelu není využití kovu příliš sledovaný parametr, důležitějším parametrem je především zdravotnost odlitku. To ovšem může přinést značné potíže s přebytečným materiálem z nevyužitého kovu. Hlavním cílem této diplomové práce je právě u vybraných odlitků optimalizovat vtokové soustavy tak, aby byla zaručena požadovaná výsledná kvalita odlitků a přitom bylo zvýšeno využití tekutého kovu, tj. poměru hmotnosti čistého odlitku k celkové hmotnosti odlitku i s vtokovou soustavou (hrubý odlitek), a tím snížen podíl vratného materiálu. Očekává se také ekonomický přínos z hlediska snížení celkových nákladů spojených s výrobou. Na odlitcích byla provedena také numerická simulace a metalografické vyhodnocení (DAS a procento pórovitosti). Ve všech případech je uvedena varianta původní vtokové soustavy, dále je pak uvedena verze upravené vtokové soustavy s lepším využitím tekutého kovu.

Tato diplomová práce se řešila ve firmě Alucast, s.r.o., která sídlí v Tupesích a vyrábí hliníkové odlitky metodou vytavitelného modelu. Tato firma je jedním z největších výrobců hliníkových odlitků v České republice a dodává odlitky pro zákazníky po celém světě. Tyto odlitky se používají především v obranném, optickém, elektrotechnickém a leteckém průmyslu.



Obr. 39 Areál firmy Alucast, s.r.o. [35]

2.1 Odlitek 1

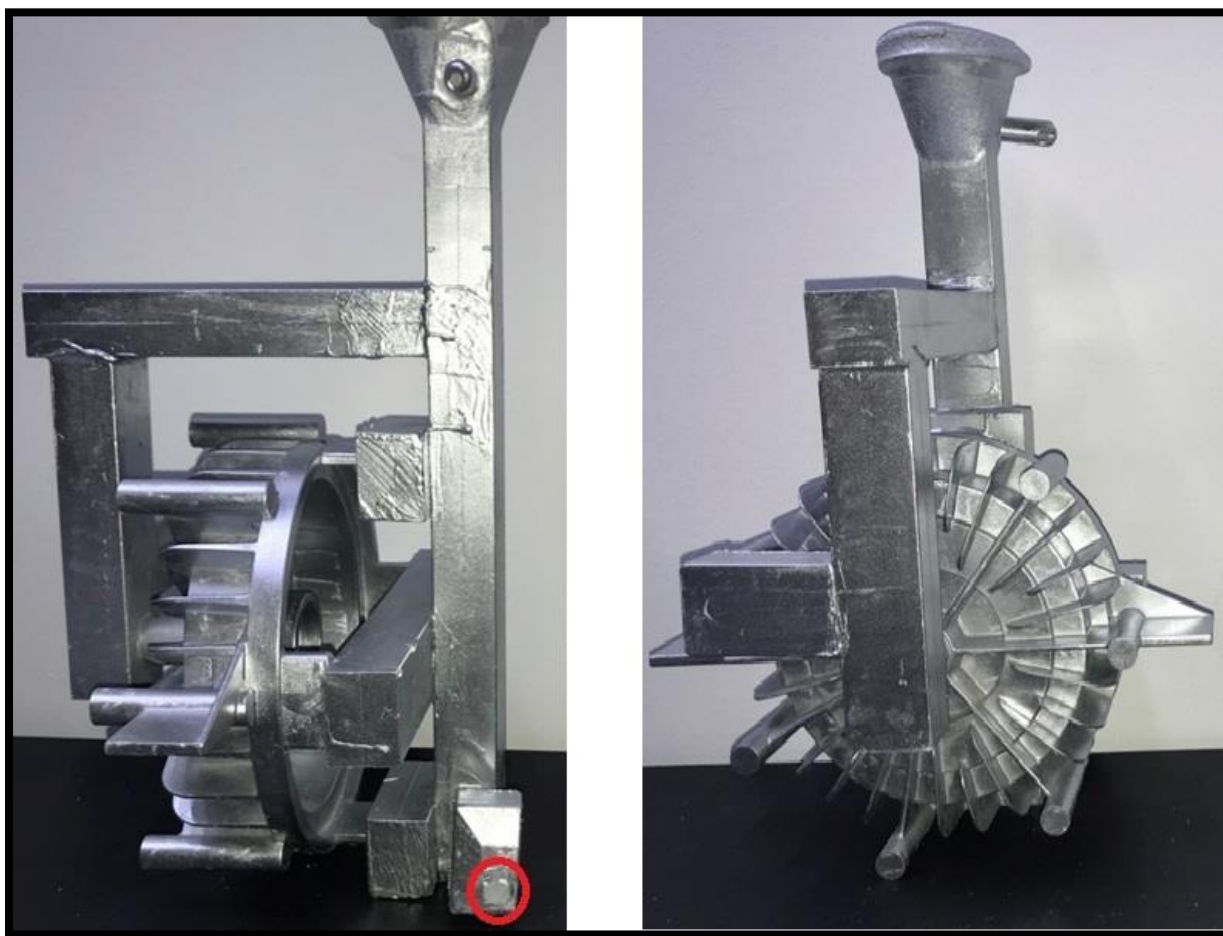
Jako první odlitek pro optimalizaci vtokové soustavy byl vybrán odlitek, který už je ve firmě Alucast nějakou dobu zaveden do výroby, ale činí značné potíže z hlediska využití tekutého kovu. Jedná se o skříň motoru, která je dodávána pro jednoho zahraničního zákazníka z oblasti leteckého průmyslu. Jelikož se jedná o odlitek pro letecké použití, musí být na všech odlitcích provedena kontrola rentgenem a musí být zaručeny dostatečné mechanické vlastnosti, které jsou dokládány na předlitých tyčinkách. Tento odlitek má středně silné až silné partie a jeho hmotnost činí 1,23 kg, na obr. 40 je voskový model odlitku. Jako materiál odlitku je použita slitina EN AC - AlSi7Mg0,6. Odlitek s vtokovou soustavou je vytvořen ve dvou variantách, první varianta je s původně používanou vtokovou soustavou, která je mohutná, jako druhá varianta je použita nově navrhovaná odlehčená vtoková soustava. Odlehčená verze se navrhla proto, aby se zlepšila využitelnost tekutého kovu a také aby se odlitek nepřehříval a zrychlilo se ochlazování, což má za následek jemnější porozitu a optimální DAS, to vede k lepším mechanickým vlastnostem. Pro podpoření ochlazování byl také použit ofuk na spodní části odlitku (JF casting) po dobu 5 minut. Pro obě varianty vtokové soustavy byly provedeny simulace. U obou variant bylo odlito více odlitků, byla provedena kontrola rentgenem a metalografické vyhodnocení struktury. Při lití tohoto odlitku nebyly přesně zaznamenány teploty skořepin při lití, a tak na vyhodnocování byly vybrány dva odlitky náhodně.



Obr. 40 Odlitek 1

2.1.1 Odlitek 1 - původní vtoková soustava

V původní variantě je stromeček tvořen jedním vertikálně orientovaným odlitkem se starou vtokovou soustavou, přední a boční pohled je zobrazen na obr. 41. Prvním článkem staré vtokové soustavy je vtokový kanál (tzv. fajka), který je umístěn mimo odlitek a na rozváděcí kanály je připojen ve spodní části, kde je umístěn také filtr, tím je umožněno klidné spodní plnění. Na obrázcích vtokový kanál nelze vidět, protože je ulomený, ale je označeno místo jeho napojení na rozváděcí kanály. Další částí vtokové soustavy je mohutná sestava rozváděcích kanálů, které se skládají z jednoho svislého a tří menších vodorovných. Tyto tři rozváděcí kanály jsou s odlitkem spojeny pomocí čtyř zářezů, které jsou rozmístěny pravidelně okolo odlitku. Dále se ve vtokové soustavě nacházejí dva spojené dosazovací kanály na přední straně, které fungují jako nálitky pro dva menší válcovité útvary ve středu a na kraji odlitku. Tato původní varianta vtokové soustavy s odlitkem váží celkově 5,1 kg a využití tekutého kovu je pouze 24%. Při jejím odlévání byla lící teplota kovu 720°C a doba lití byla okolo 13 vteřin. Teploty skořepin bohužel nebyly přesně zaznamenány, ale počítá se s teplotami kolem 700°C.



Obr. 41 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - přední a boční pohled

Simulace:

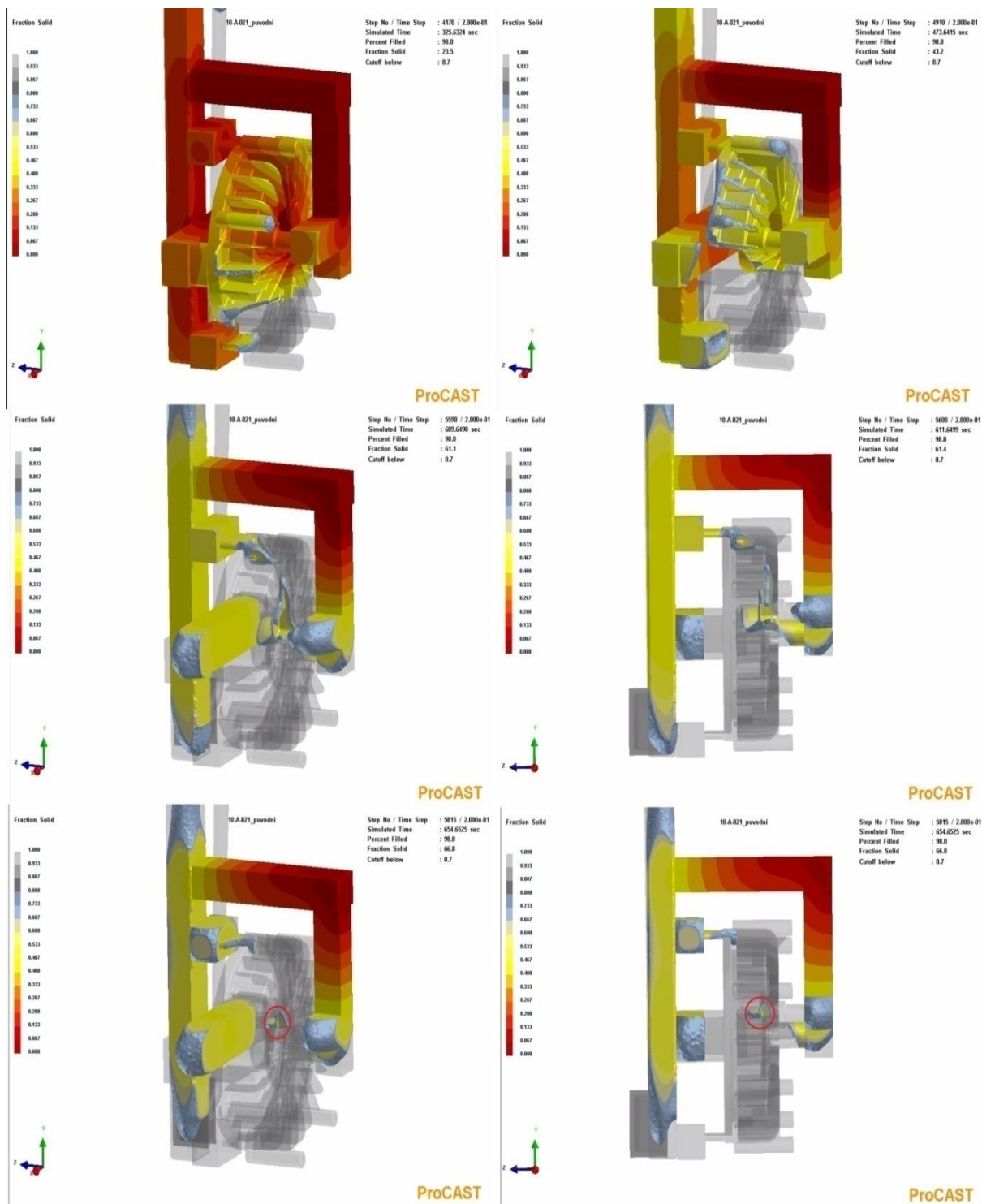
Jak již bylo zmíněno, u každého odlitku byla provedena simulace. Simulace se provádí, abychom zjistili, co se v odlitku během odlévání a tuhnutí odehrává a jaká místa v odlitku mohou být problémová. Před samotnou simulací byly stanoveny počáteční podmínky pro výpočet simulace, ty jsou uvedeny v tab.1. Ofuk byl v simulaci zohledněn úpravou přestupu tepla pro danou část skořepiny, kam ofuk směřoval, stejně tak to platí i pro ostatní simulace.

Tab. 1 Parametry simulace

Teplota formy	700 °C
Teplota tekutého kovu	720°C
Doba lití	13 sekund
Sklon formy	Vertikální, bez náklonu
Složení kovu	EN AC - AlSi7Mg0,6
Tloušťka skořepiny	5,7 mm
Materiál skořepiny	Molochit

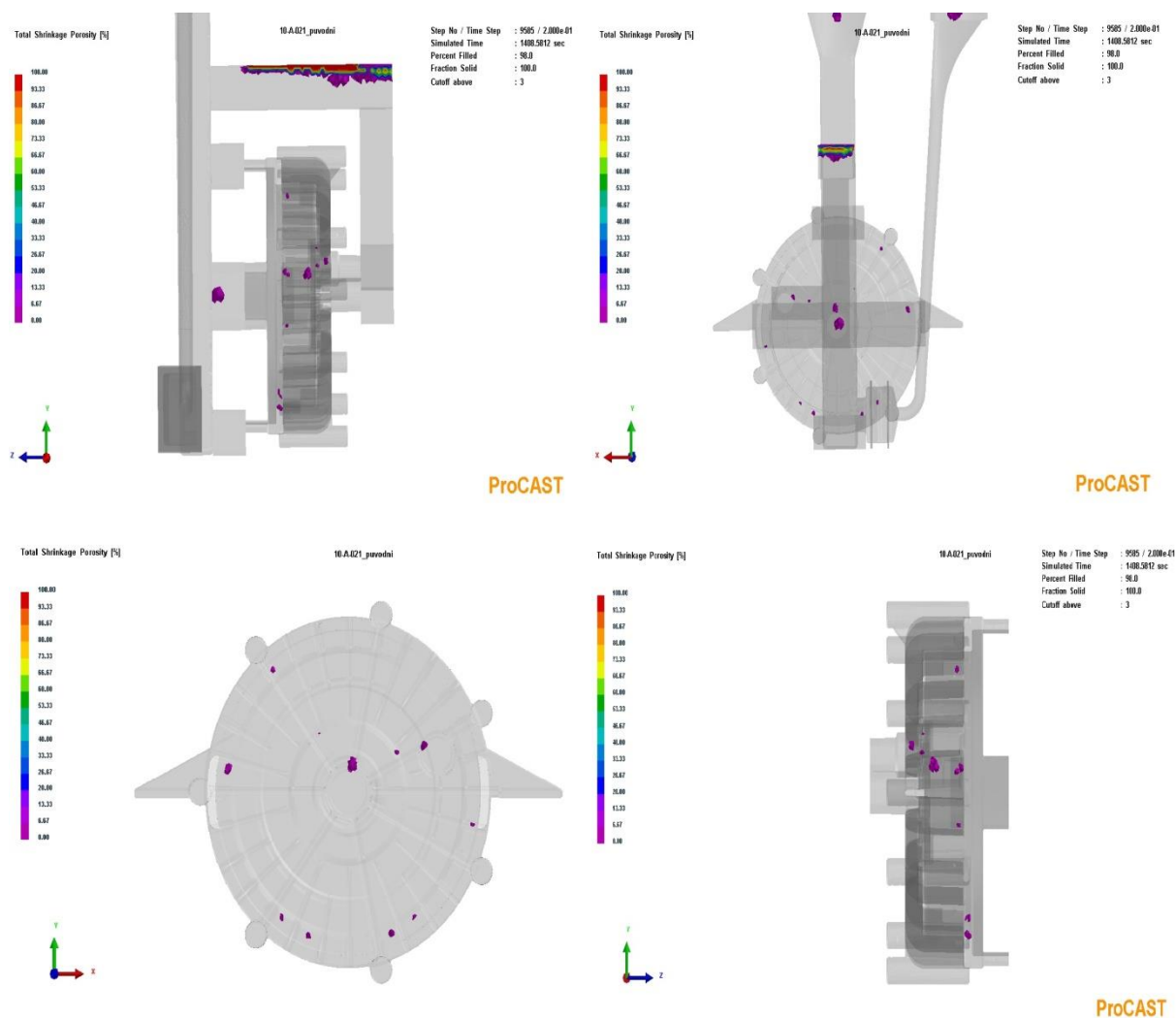
Ze simulace jde vidět, že plnění odlitku probíhá klidně a nebylo zaznamenáno, že by docházelo k uzavření většího množství plynů, což by následně vedlo ke vzniku bublin v odlitku. Plnění začíná skrz spodní zářez a dochází k zaplnění spodní části odlitku, následně kov stoupá směrem vzhůru k zářezům ve středu odlitku, kde se vyrovná hladina, poté už kov klidně zaplní formu až do horní části. Teplota kovu je po celou dobu plnění poměrně vysoko nad teplotou likvidu, tudíž by nemělo docházet k vadám typu studený spoj nebo nezaběhnutí.

Na simulaci tuhnutí je patrné, že odlitek začíná tuhnout směrem od jeho spodní části a okrajových částí ve středu, což se předpokládalo. Následně tuhnutí probíhá usměrněně do zářezů a směrem do horní a střední části odlitku. V určité chvíli se tuhnoucí kov v horní a střední části odlitku rozdělí, v horní části je tuhnoucí kov směřován do horního zářezu, ve střední části směřuje do nálitku. Ve střední části kolem nálitku však následně dochází k oddělení tuhnoucí taveniny bez možnosti dalšího dosazení, proto by zde mohlo dojít ke vzniku vnitřních vad a je nutné na něj dávat pozor. Je možné, že oddělení této části taveniny se děje z důvodu jejího ohřevu od středního rozváděcího kanálu. Na obr. 42 je zobrazeno postupné tuhnutí a je zde i zvýrazněno kritické místo.



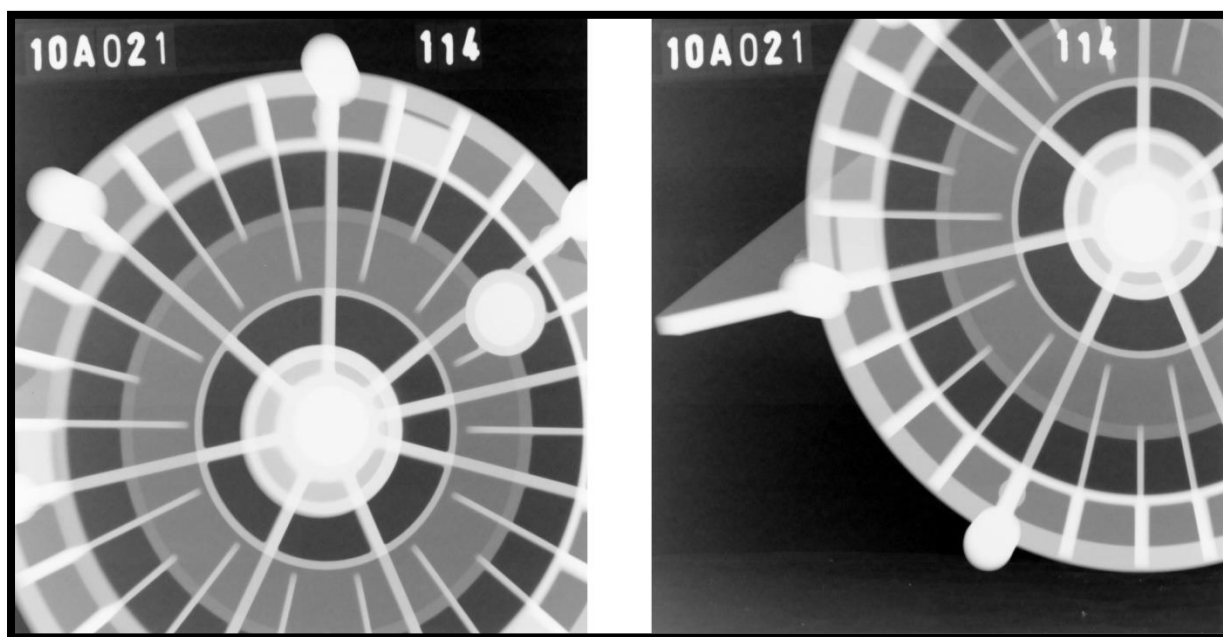
Obr. 42 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí

Na obr. 43 jsou znázorněna místa, kde simulace predikuje porozitu. Nejprve je zobrazen odlitek i s vtokovou soustavou, poté pouze odlitek bez vtokové soustavy. Predikce porozity se nachází hlavně kolem dvou válcových útvarů na odlitku, které se nálitkují. Tato místa souhlasí s částmi odlitku, kde kov v simulaci tuhl nejdéle.

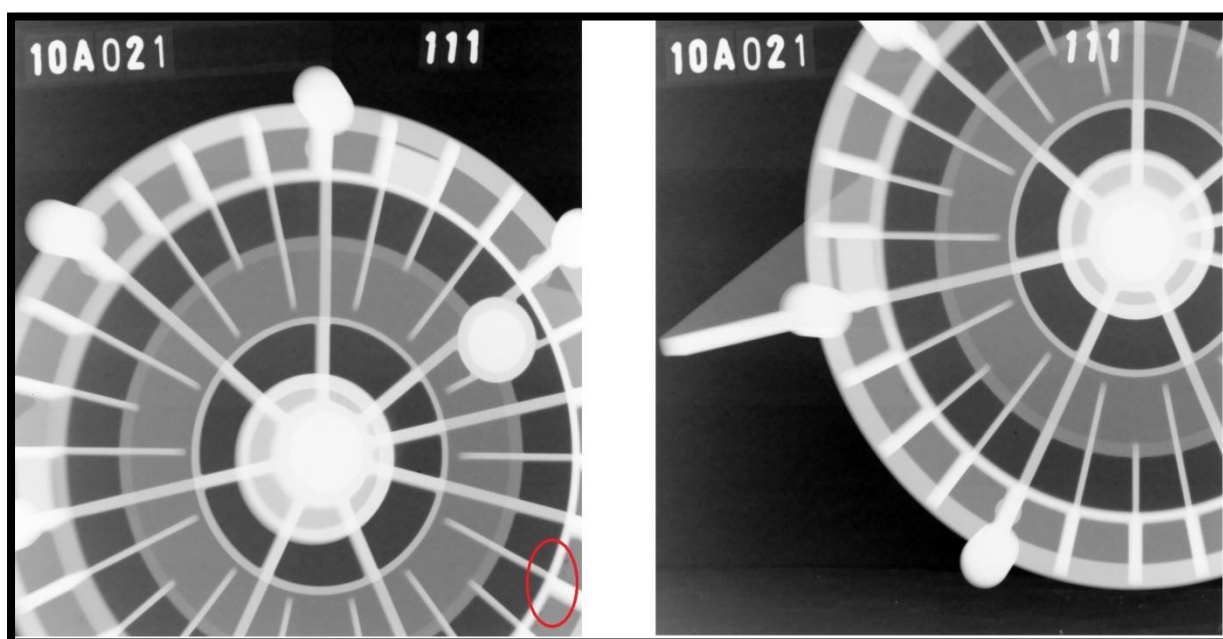


Obr. 43 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - predikce porozity

V rámci kontroly byly všechny odlitky zrentgenovány. I přes predikovanou porozitu nebyla na rentgenových snímcích objevena žádná zjevná vada. Pouze na jednom odlitku se v jeho spodní části objevila drobná porozita, ta je však v rámci hodnocení přijatelná. Odlitky se tedy pokládají za zdravé. Na obr. 44 a obr. 45 jsou ukázky rentgenových snímků odlitků.



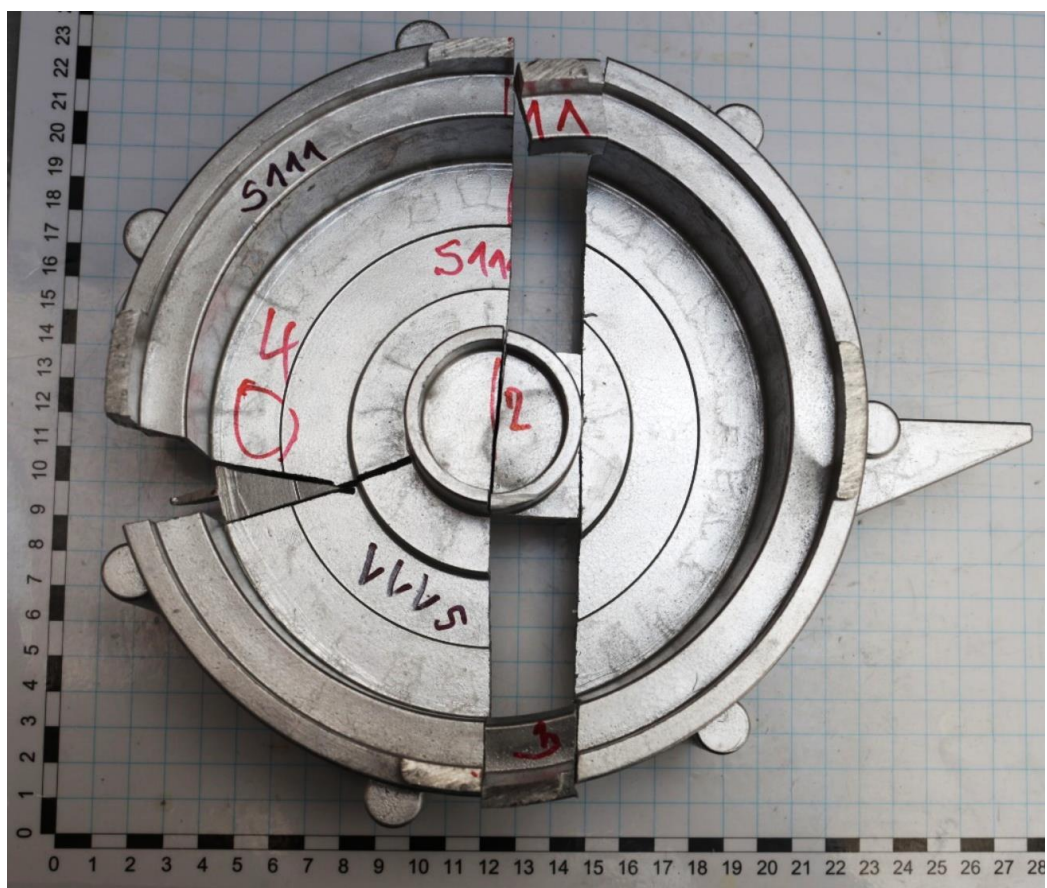
Obr. 44 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - rentgenový snímek



Obr. 45 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - rentgenový snímek s drobnou porozitou

Metalografické vyhodnocení:

Na vyhodnocení mikrostruktury byl od každé varianty vtokové soustavy vybrán jeden odlitek. Pro původní vtokovou soustavu to byl odlitek označen jako S111. Určovala se hodnota vzdálenosti sekundárních os dendritů (DAS) a procento pórovitosti. Na tomto odlitku se nejdříve vytipovala místa pro odběr vzorků, které se následně odebraly na vyhodnocení, viz obr. 46. Vzorky č.1 a č.3 jsou z oblasti horního a spodního zářezu, vzorek č.2 je ze středu odlitku a vzorek č.4 je z oblasti válcovitého útvaru na kraji odlitku. Na vyříznutí částí odlitku bylo použito přesného metalografického dělicího zařízení STRUERS Discotom100 a Secotom 50. Metalografické výbrusy těchto vzorků byly připraveny technikami broušení za mokra a leštění diamantovými pastami. Finální mechanicko-chemické doleštění bylo provedeno pomocí suspenze OP-Chem fy Struers. Pozorování a dokumentace mikrostruktury metalografických preparátů bylo prováděno na optodigitálním mikroskopu s vysokým rozlišením OLYMPUS DSX510, případně DSX110. Pro vyhodnocení parametru DAS a vnitřní pórovitosti vzorků byl použit software pro obrazovou analýzu Olympus Stream Motion. Veškerá popsaná experimentální technika byla použita na všechny odlitky uvedené v této diplomové práci.



Obr. 46 Odlitek 1 - odběr vzorků

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky měření hodnot DAS, je v ní vždy vzorek a k němu příslušný medián naměřených hodnot. Hodnoty uvedené v tabulce odpovídají tomu, jak rychlé bylo tuhnutí odlitku v daných oblastech. Nejmenší DAS má vzorek č.1, který je ze spodní části odlitku, ten ztuhnul nejrychleji a probíhal zde i ofuk. Největší DAS má vzorek č.2, což je střední oblast odlitku, ta byla nálitkována a tuhla nejdéle.

Tab. 2 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - vyhodnocení DAS

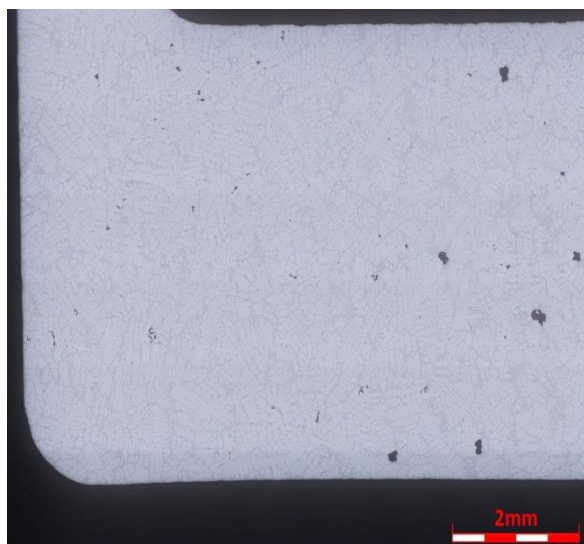
Odlitek	Vzorek	Median DAS [μm]
1	S111 - 1	45,33
1	S111 - 2H	62,85
1	S111 - 2S	61,13
1	S111 - 3	58,98
1	S111 - 4	55,89

V tab. 3 se nachází výsledky měření pórovitosti odlitku, pórovitost je uváděna v procentech. Výsledky pórovitosti vychází stejně jako výsledky DAS, nejmenší je u vzorku č.1, naopak největší je u vzorku č.2.

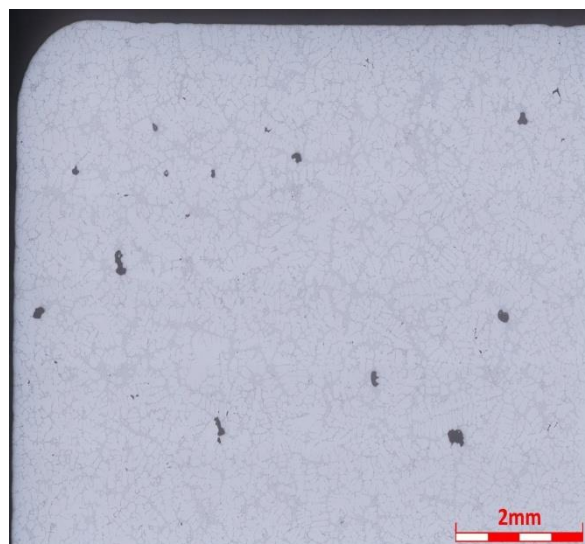
Tab. 3 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - vyhodnocení pórovitosti

Odlitek	Vzorek	Pórovitost [%]
1	S111 - 1	0,365
1	S111 - 2H	0,525
1	S111 - 2S	0,584
1	S111 - 3	0,452
1	S111 - 4	0,541

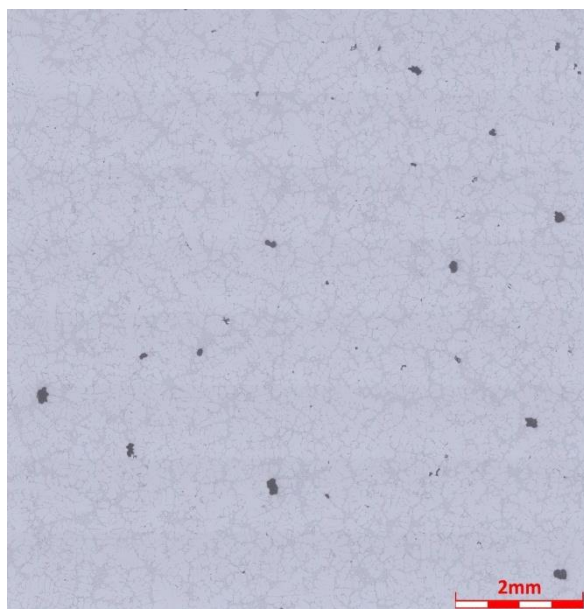
Na další stránce jsou fotky mikrostruktur jednotlivých vzorků. Tyto fotky byly pořízeny při 200 násobném zvětšení a focené vzorky byly 8x6 mm nebo 8x8 mm velké.



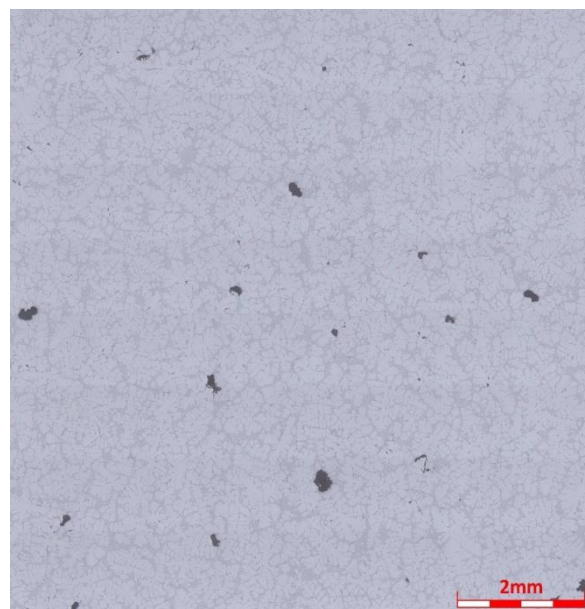
Obr. 47 S111 - 1



Obr. 48 S111 - 3



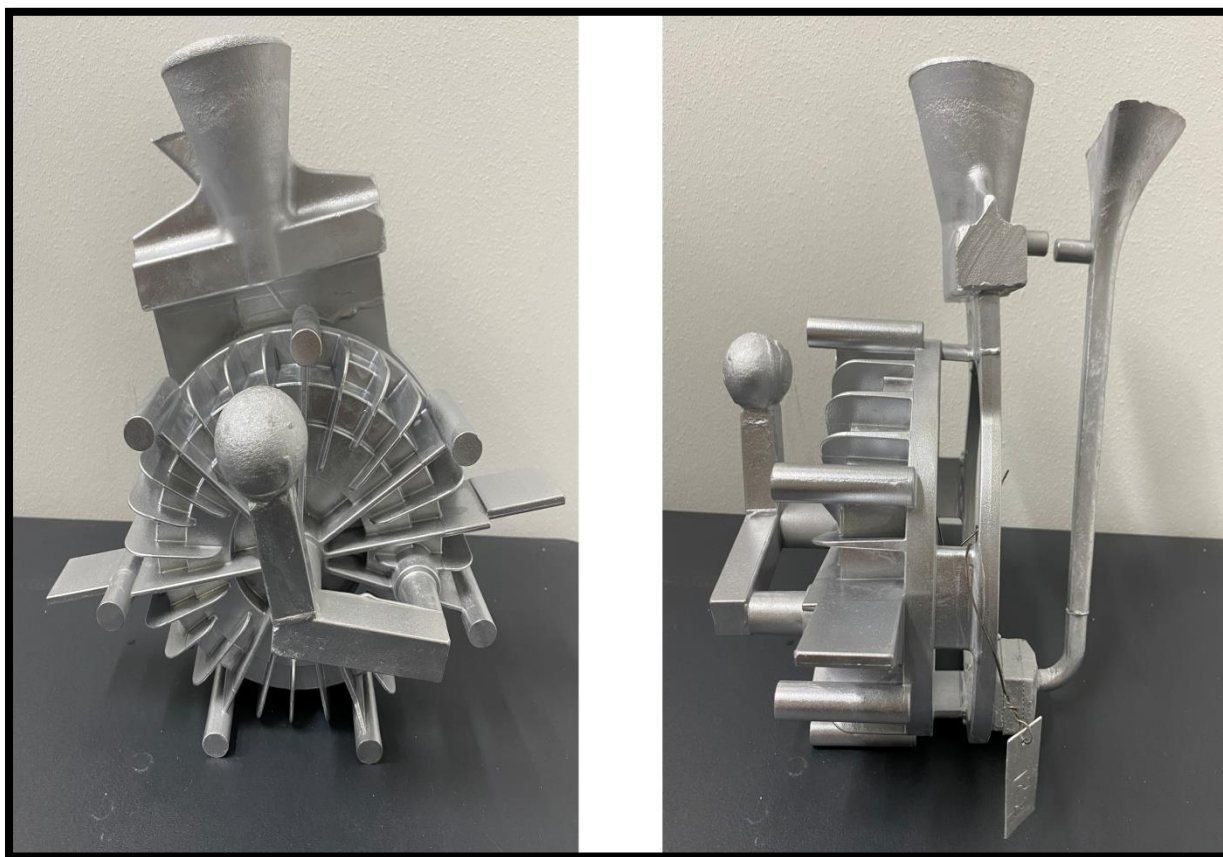
Obr. 49 S111 - 2H



Obr. 50 S111 - 4

2.1.2 Odlitek 1 - nová vtoková soustava

Nová varianta stromečku se skládá z jednoho vertikálně orientovaného odlitku s novou odlehčenou vtokovou soustavou, na obr. 51 se nachází přední a boční pohled. První částí vtokové soustavy je vtokový kanál (fajka), který je stejný jako tomu bylo u předchozí varianty. Je napojený na rozváděcí kanály ve spodní části a plnění tak probíhá odspodu, před napojením se ještě nachází filtr. V nové variantě vtokové soustavy je mohutná sestava rozváděcích kanálů nahrazena jedním rozváděcím kanálem kruhového tvaru, ten je s odlitkem spojen opět pomocí čtyř zářezů pravidelně rozmístěných okolo odlitku. Dva dosazovací kanály, které dosazují válcovité útvary na odlitku, jsou v nové variantě nahrazeny jedním nálitkem zakončeným ve tvaru koule. Díky odlehčené variantě rozváděcího kanálu a nálitku je celková hmotnost stromečku oproti původní variantě menší, stromeček váží 2,92 kg, tím taktéž došlo ke zlepšení využití tekutého kovu, které je 42%. Při lití byla lící teplota stejně jako u předchozí varianty 720°C, doba lití se ale zkrátila na 9 sekund. Teploty skořepin byly změřeny pouze u pár odlitků a pohybovaly se v rozmezí 690-710°C.



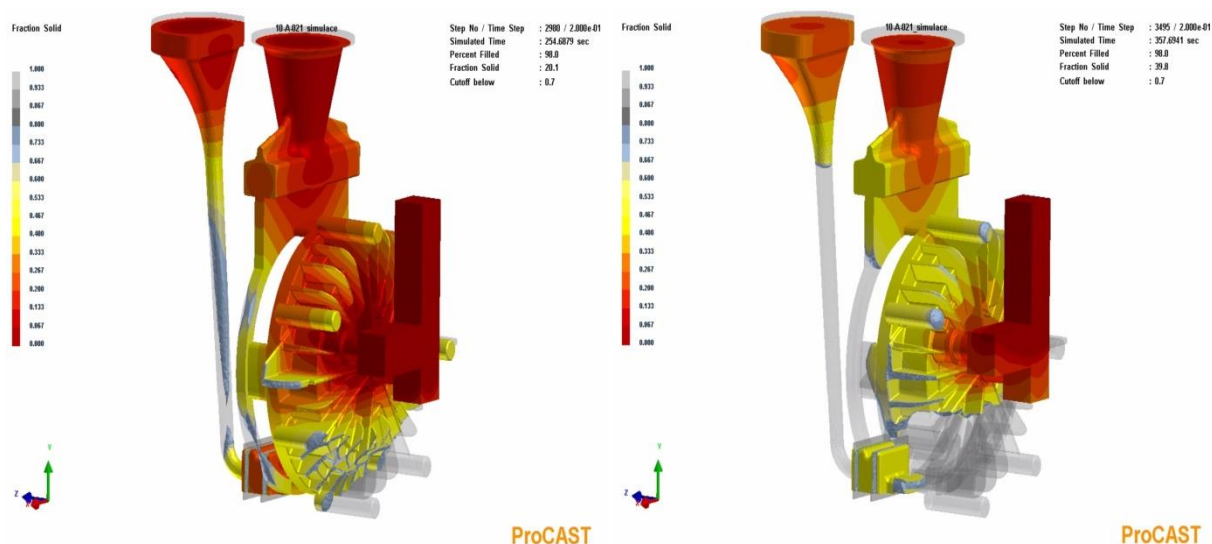
Obr. 51 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - přední a boční pohled

Simulace:

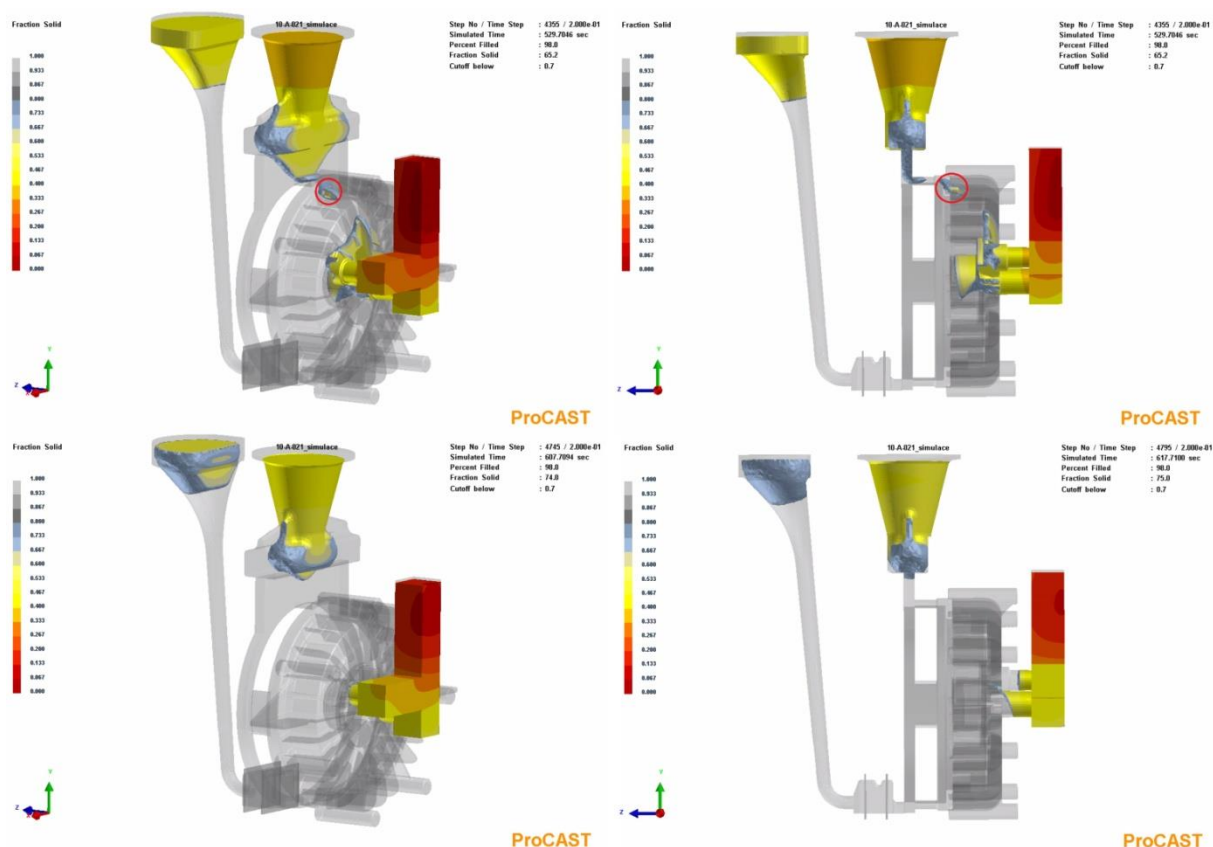
Při provádění simulace se vycházelo ze stejných podmínek, které byly použity při simulaci původní varianty, viz tab. 1. Jediný parametr, který se změnil, byl doba lití, ta se zkrátila z původních 13 sekund na 9 sekund.

Plnění podle simulace probíhá klidně a veškerý vzduch je tlačén před kovem a vytlačován směrem vzhůru. K plnění dochází odspodu, kde kov začne vyplňovat dutinu formy opět skrz spodní zářez. Zatímco se plní spodní část odlitku, hladina v rozváděcím kruhovém kanálu je o něco vyšší a stoupá ke středním zářezům. V této části se hladiny vyrovnají a dojde k postupnému zaplnění nálitku a zbytku odlitku. Během celého plnění je teplota kovu dostatečně vysoká.

Tuhnutí odlitku postupuje od jeho spodní části, která byla zaplněna jako první a kam je směřován ofuk, zároveň odlitek tuhne od jeho okrajových částí, kde ochlazování probíhá poměrně rychle. V nové variantě dochází k rychlejšímu ochlazování a tuhnutí kruhového rozváděcího kanálu na rozdíl od původních mohutnějších kanálů, které se udržovaly dlouho teplé. V důsledku toho střední zářezy tuhnou rychleji a tuhnutí odlitku směřuje do jeho horní části a střední části k nálitku. Horní zářez také natuhává rychleji než odlitek a v určitou chvíli dojde v horní části odlitku k oddělení menšího množství taveniny, to může způsobit vadu v odlitku. Střední část odlitku tuhne poměrně dobře a nedochází v ní k oddělení tuhnoucí taveniny jako tomu bylo u předchozí varianty. Nálitok u nové varianty začíná natuhávat podstatně později než tomu bylo u předešlé vtokové soustavy. Na obr. 52 a obr. 53 je zobrazena simulace tuhnutí se zvýrazněním problémového místa.

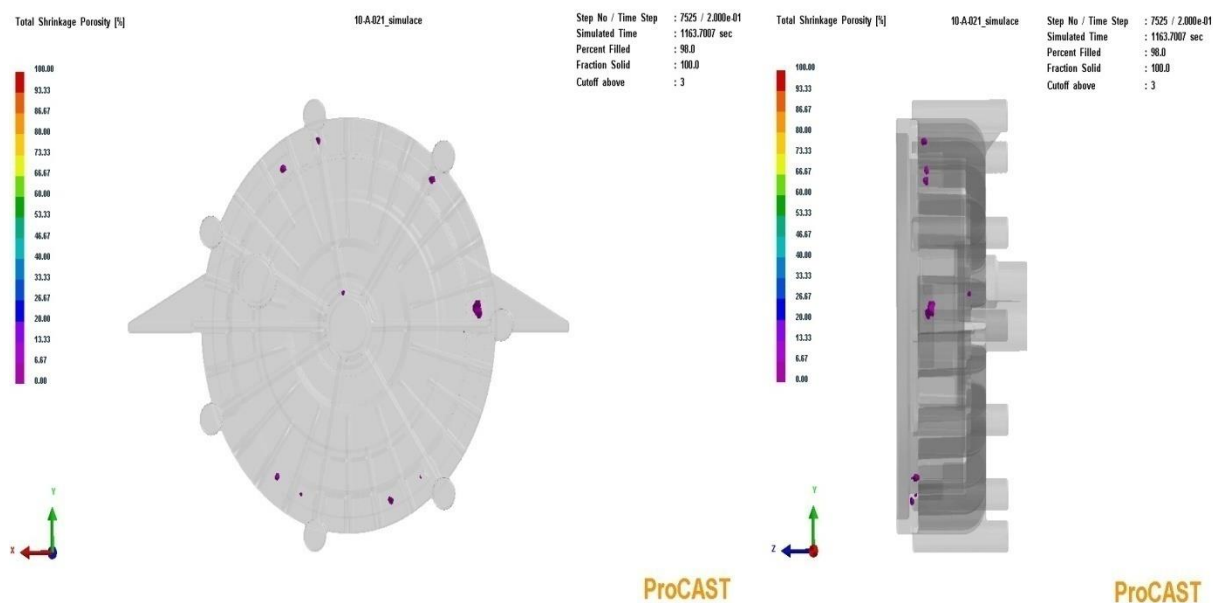


Obr. 52 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí



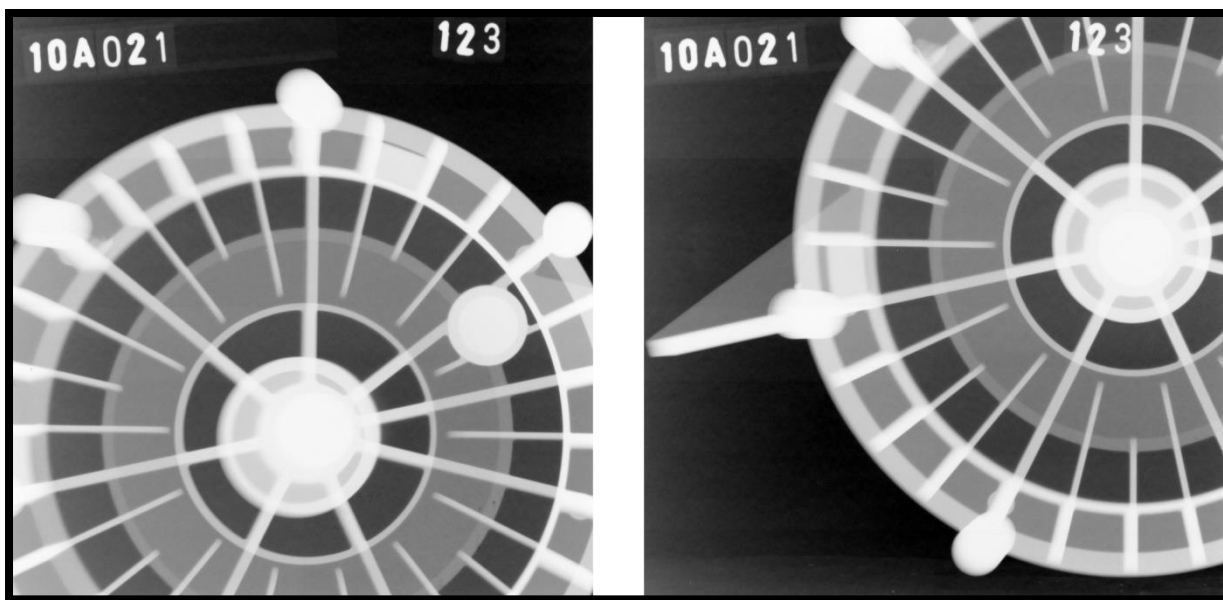
Obr. 53 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí

Obr. 54 ukazuje místa s predikovanou porozitou. V porovnání s původní variantou vtokové soustavy je v místech kolem dvou válcovitých útvarů menší predikce porozity. Další porozita se může objevit v oblasti horního zářezu, kde se část tuhnoucí taveniny oddělila.

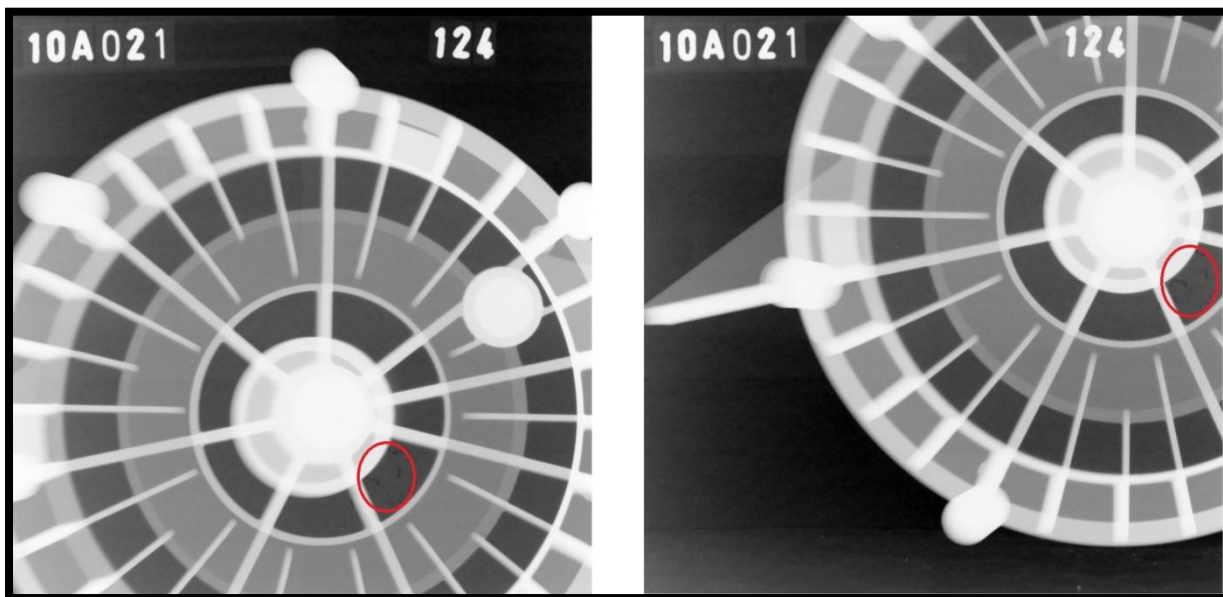


Obr. 54 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - predikce porozity

Jednotlivé odlitky prošly radiologickou zkouškou a většina z nich prošla bez vady. U jednoho odlitku se objevila jemná porozita, ta by však dle vyhodnocení byla označena jako přijatelná. Na obr. 55 a obr. 56 jsou rentgenové snímky dvou odlitků, jeden bez vady, druhý s vadou.



Obr. 55 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - rentgenový snímek



Obr. 56 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - rentgenový snímek s jemnou porozitou

Metalografické vyhodnocení:

Pro vyhodnocení odlitku s novou vtokovou soustavou byl vybrán odlitek označen jako N124. Na vyhodnocení DAS a pórovitosti byly odebrány vzorky ze stejných míst jako tomu bylo u odlitku S111 s původní variantou, tyto vzorky jsou také stejně označeny. Jedinou výjimkou je prohození vzorku č.1 a vzorku č.3. Vzorek č.1 je tentokrát z horní části odlitku, kdežto vzorek č.3 je ze spodní. Je to kvůli tomu, že odlitek byl při sestavování stromečku obrácen o 180°.

V tab. 4 jsou naměřené hodnoty DAS, stejně jako u tab. 2 je v ní vzorek a medián naměřených hodnot. Nejmenší hodnoty mají vzorky č.3 a č.4, které jsou ze spodní oblasti odlitku, kde bylo tuhnutí nejrychlejší a probíhal zde ofuk ze dvou stran. Největší DAS se tentokrát nenachází u vzorku č.2, jako tomu bylo u původní varianty, ale je u vzorku č.1 z horní oblasti. Střední část odlitku tentokrát tuhla rychleji. Celkově vzato, hodnoty DAS jsou výrazně nižší, než tomu bylo u varianty s původní vtokovou soustavou.

Tab. 4 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - vyhodnocení DAS

Odlitek	Vzorek	Median DAS [μm]
1	N124 - 1	51,82
1	N124 - 2H	47,02
1	N124 - 2S	46,99
1	N124 - 3	45,22
1	N124 - 4	43,25

Tab. 5 obsahuje hodnoty měření pórovitosti odlitku, ty jsou, stejně jako u výsledků DAS, podstatně menší než u varianty s předchozí vtokovou soustavou.

Tab. 5 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - vyhodnocení pórovitosti

Odlitek	Vzorek	Pórovitost [%]
1	N124 - 1	0,028
1	N124 - 2H	0,080
1	N124 - 2S	0,080
1	N124 - 3	0,055
1	N124 - 4	0,047

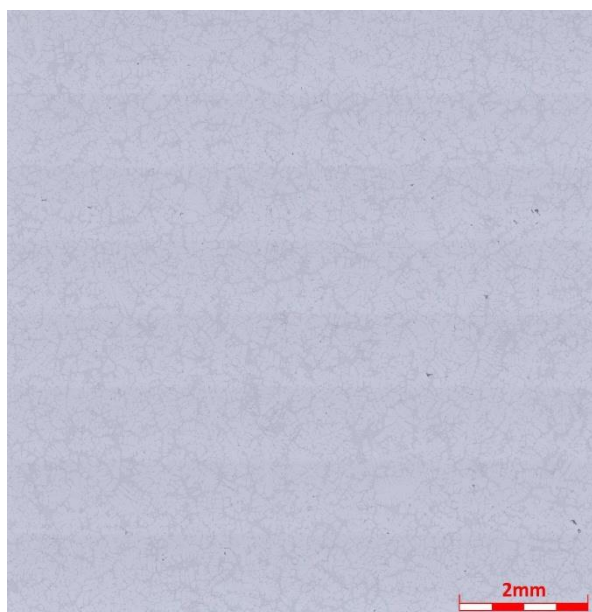
Na obr. 57 až obr. 60 jsou zobrazeny mikrostruktury jednotlivých vzorků, ty byly opět 8x6 nebo 8x8 mm velké a foceny byly při 200 násobném zvětšení.



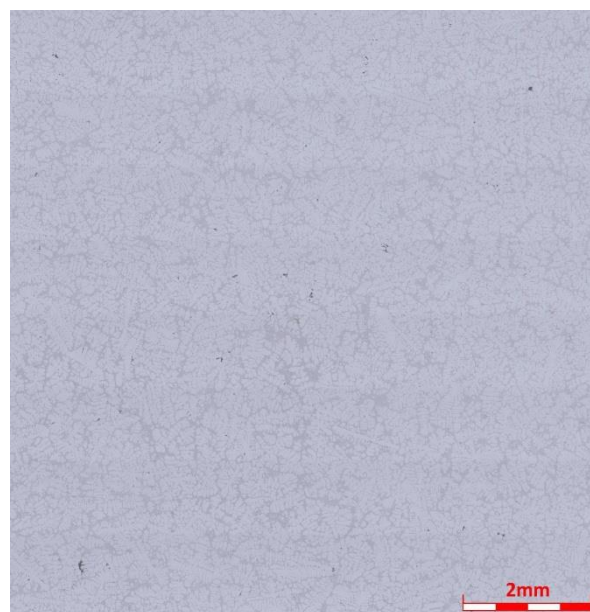
Obr. 57 N124 - 1



Obr. 58 N124 - 3



Obr. 59 N124 - 2H



Obr. 60 N124 - 4

2.1.3 Odlitek 1 - zhodnocení

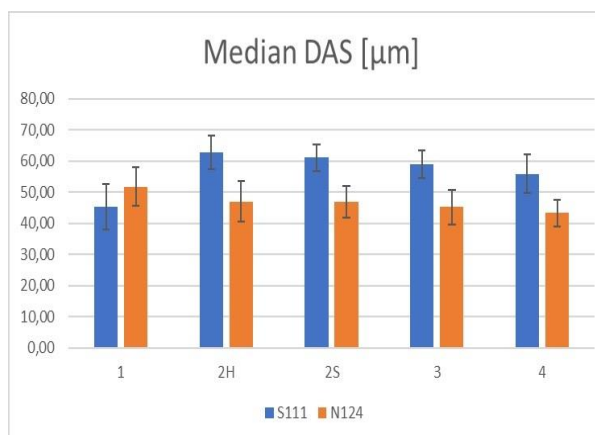
Změna vtokové soustavy u odlitku 1 přinesla jednak ekonomický efekt a jednak přinesla i značný technický efekt, což bylo cílem. Aby bylo možné dosahovat vysokých mechanických vlastností, je nutné, aby odlitky měly optimální DAS a pouze jemnou porozitu. To zajišťuje právě nová odlehčená vtoková soustava, která neohřívá odlitek a neprodlužuje jeho chladnutí, jako tomu bylo u staré vtokové soustavy. Mohutná vtoková soustava měla za následek hrubší strukturu s výraznější porozitou. Výsledky měření DAS a pórovitosti vychází znatelně lépe u nové varianty, což lze vidět na grafu 1 a 2, kde je porovnání odlitků S111 a N124. Znatelně kvalitnější mikrostrukturu nové varianty lze pozorovat také z porovnání některých vzorků na obrázcích 62 a 63.

Optimalizace vtokové soustavy měla z ekonomického hlediska vliv hned na několik věcí. Na novou soustavu se použije méně vosku, což je následně spojeno s menší fyzickou náročností při sestavování stromečku. Protože je použito méně vosku, je použito i méně obalového materiálu, díky tomu je pak stromeček lehčí a snáze se s ním manipuluje. Skořepiny jsou lehčí o cca 1 kg obalového materiálu. Dalším velmi důležitým efektem je větší využití kovové vsázky. Využití tekutého kovu se značně zvedlo z 24% na 42%, díky tomu je možné odlévat více odlitků na jednu tavbu. V neposlední řadě je pro pracovníky výhodou, že v důsledku nižší hmotnosti se dá s odlitým stromečkem lépe manipulovat při operacích jako jsou tryskání vodou a řezání.

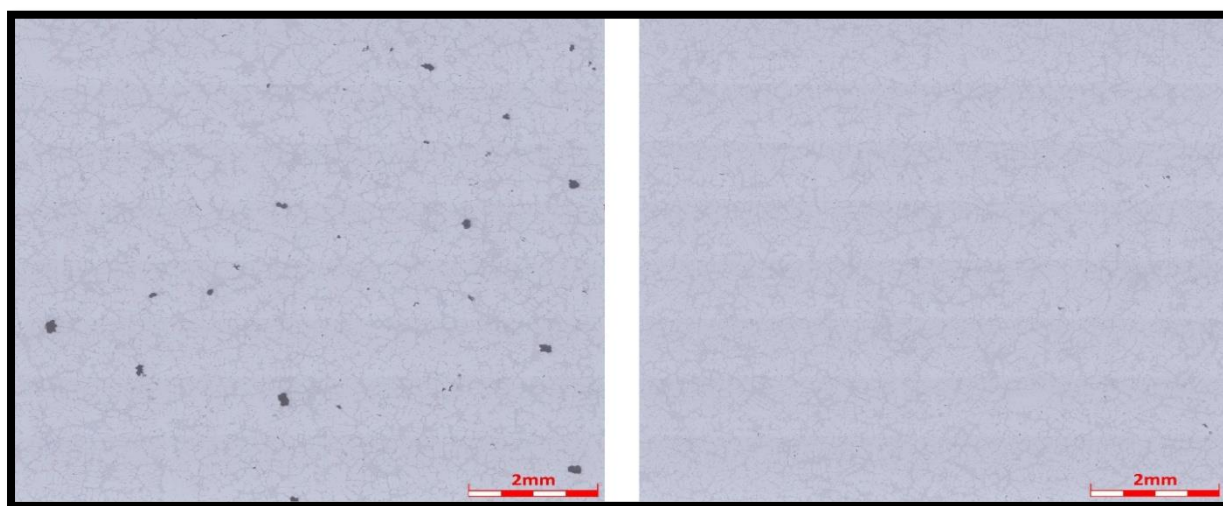
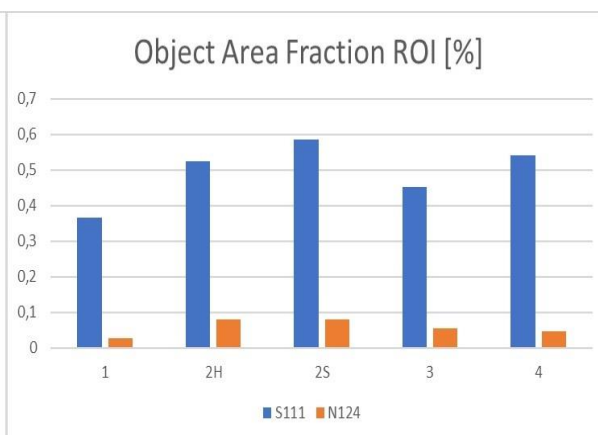


Obr. 61 Odlitek 1 - porovnání vtokových soustav

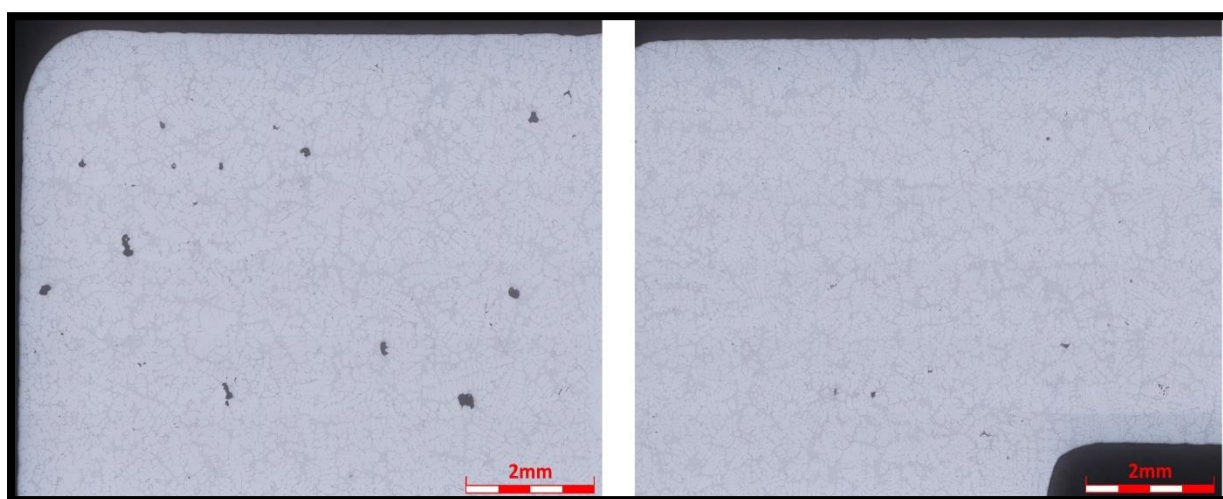
Graf 1 - Odlitek 1 - porovnání DAS



Graf 2 - Odlitek 1 - porovnání pórovitosti



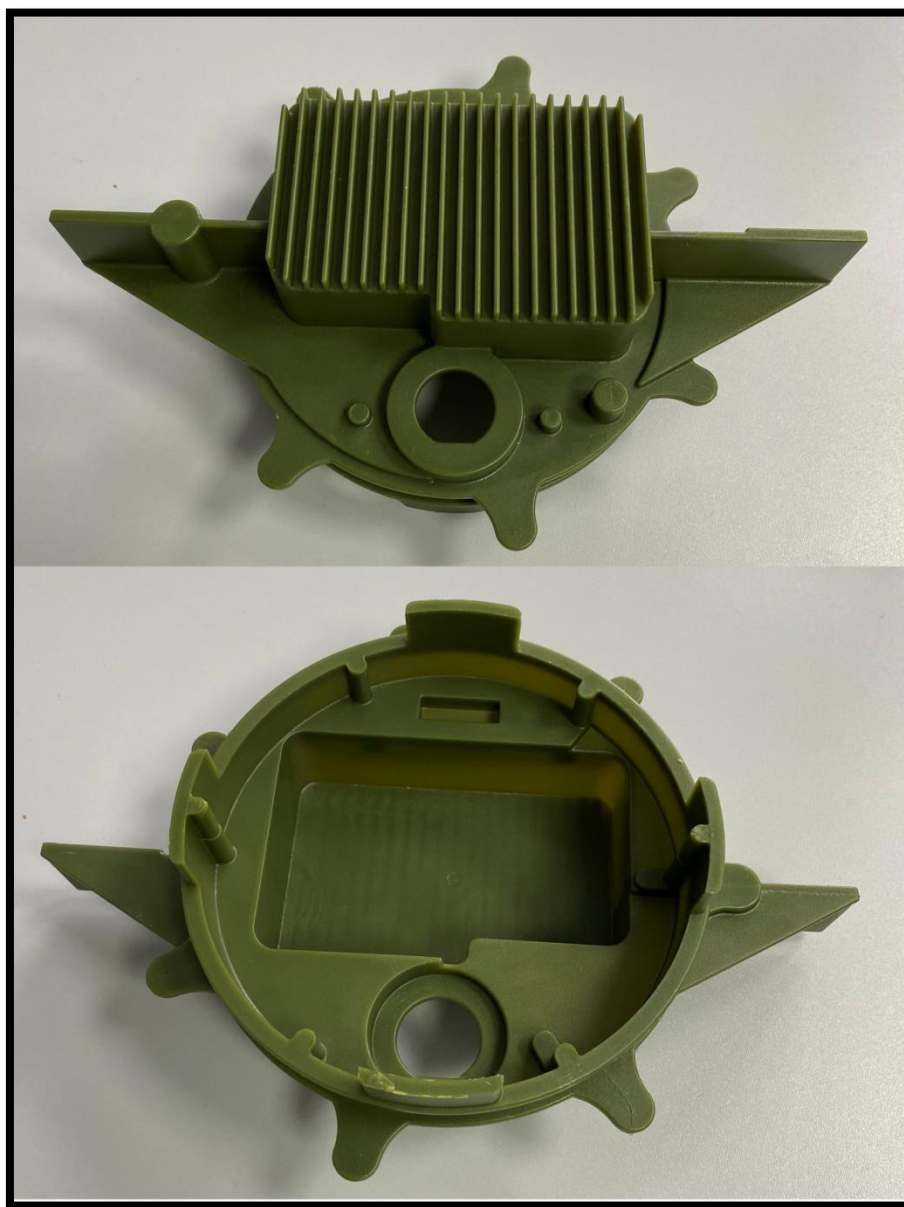
Obr. 62 Odlitek 1 - porovnání vzorků č.2



Obr. 63 Odlitek 1 - porovnání vzorků č.3

2.2 Odlitek 2

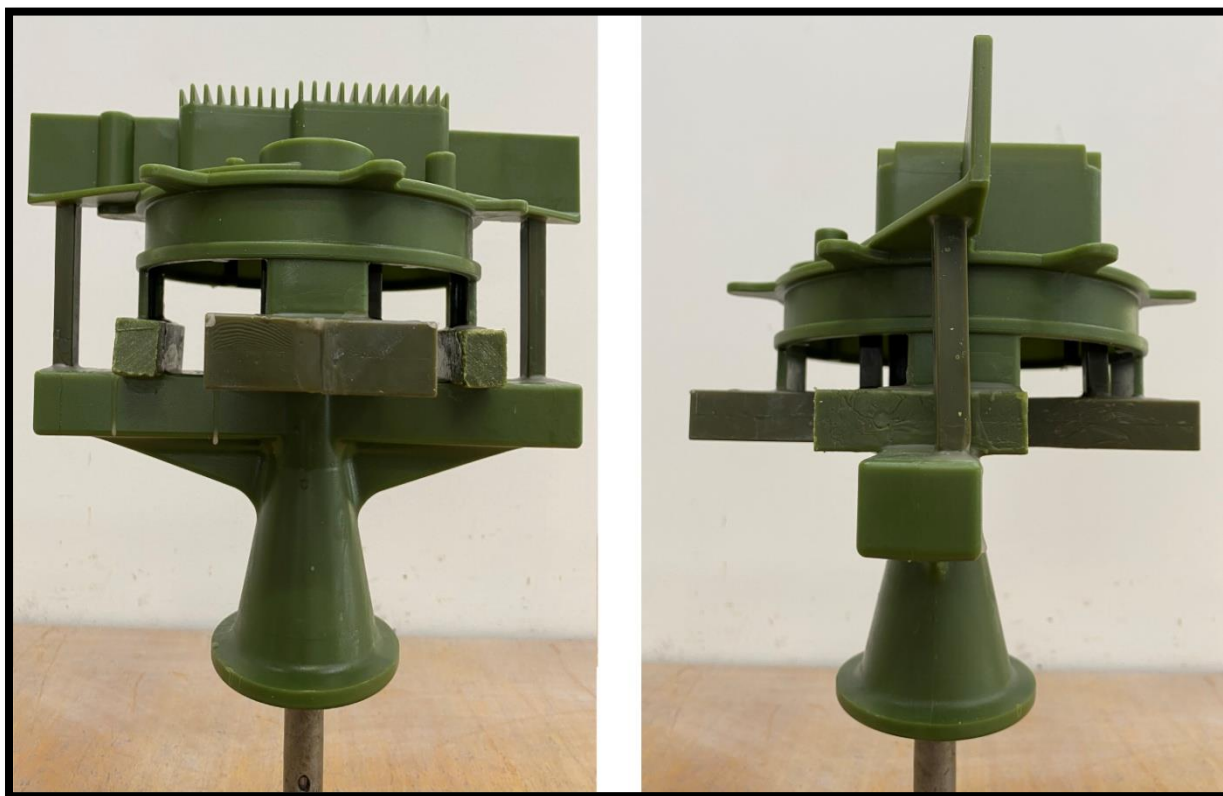
Druhý odlitek, který byl vybrán pro optimalizaci jeho vtokové soustavy, je zobrazen na obr. 64. Opět se jedná o odlitek do letectví pro stejného zahraničního zákazníka, tentokrát jde o skříň napájení. Odlitek je konstruován jako odlehčený s poměrně rovnoměrnou tloušťkou stěn, váží 0,62 kg a je odléváný ze slitiny EN AC - AlSi7Mg0,6. Na odlitcích musí být provedena rentgenová kontrola a musí dosahovat dostatečné mechanické vlastnosti. Způsob, jakým je navržena vtoková soustava k odlitku, má nízké využití tekutého kovu a může činit problémy i z hlediska přehřívání odlitku a jeho kvality, proto se navrhla nová vtoková soustava, která má tyto problémy eliminovat. Stejně jako u odlitku 1 bylo pro podpoření rychlosti ochlazování použito ofuku (JF casting), ofukovalo se po dobu 5 minut v oblasti žeber. Odlitky byly simulovány, rentgenovány a metalograficky zhodnoceny.



Obr. 64 Odlitek 2

2.2.1 Odlitek 2 - původní vtoková soustava

Původní varianta stromečku je tvořena jedním odlitkem ustaveným horizontálně a starou vtokovou soustavou, viz obr. 65. Hlavní součástí vtokové soustavy je masivní kříž s nálevkou, který rozvádí kov dále do zářezů. Tento masivní kříž je s odlitkem spojen pomocí čtyř zářezů rozmístěných pravidelně okolo odlitku a pěti pomocných vtoků, z nichž tři se nachází ve středové části odlitku a dva z nich jsou umístěny na okrajích odlitku. Tato mohutná sestava slouží zároveň i jako náletek. Celková hmotnost této sestavy odlitku s vtokovou soustavou je 2,75 kg a využití kovové vsázky je 21%. Bylo odlito více odlitků této varianty, přičemž se zaznamenávaly podmínky lití. Odlitky byly odlévány s lící teplotou kovu 720°C a doba lití byla okolo 7 vteřin. Teplota skořepin se pohybovala mezi teplotami 710-720°C.



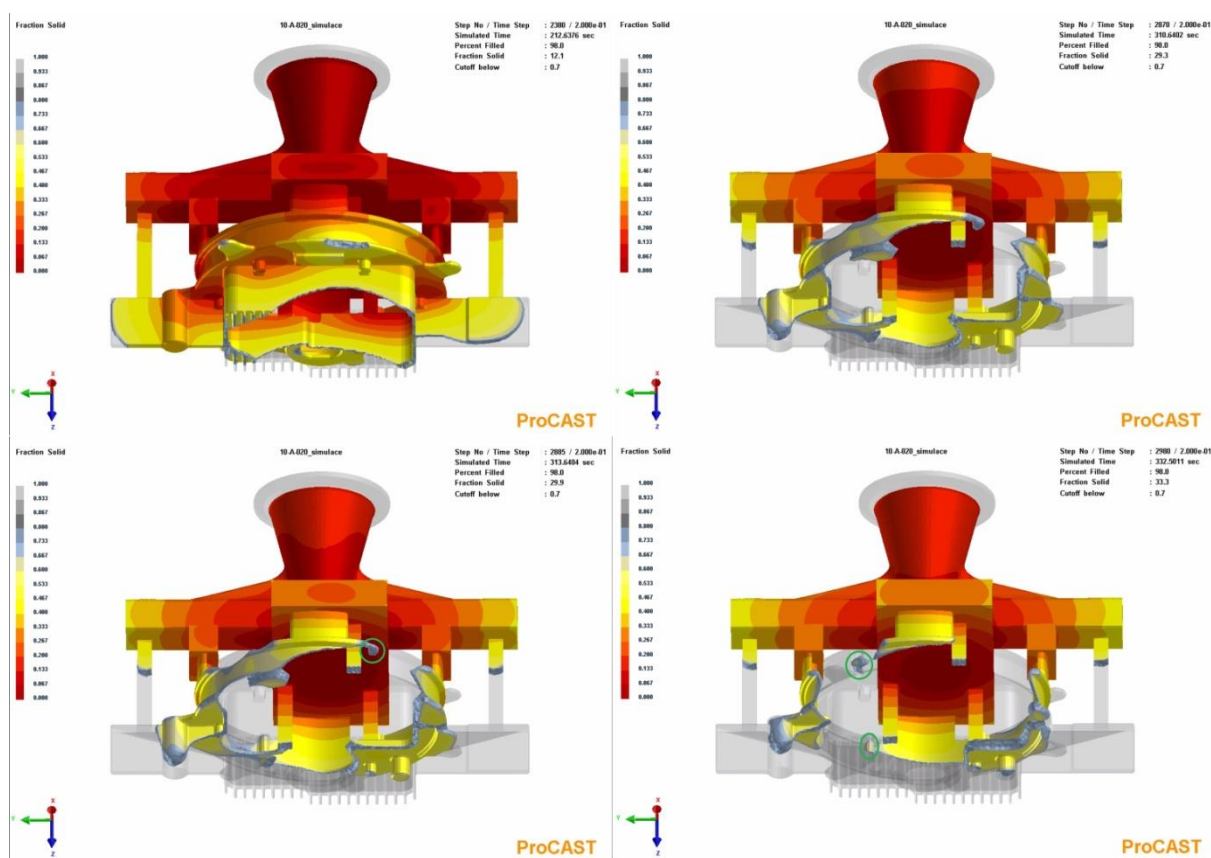
Obr. 65 Odlitek 2 - původní vtoková soustava

Simulace:

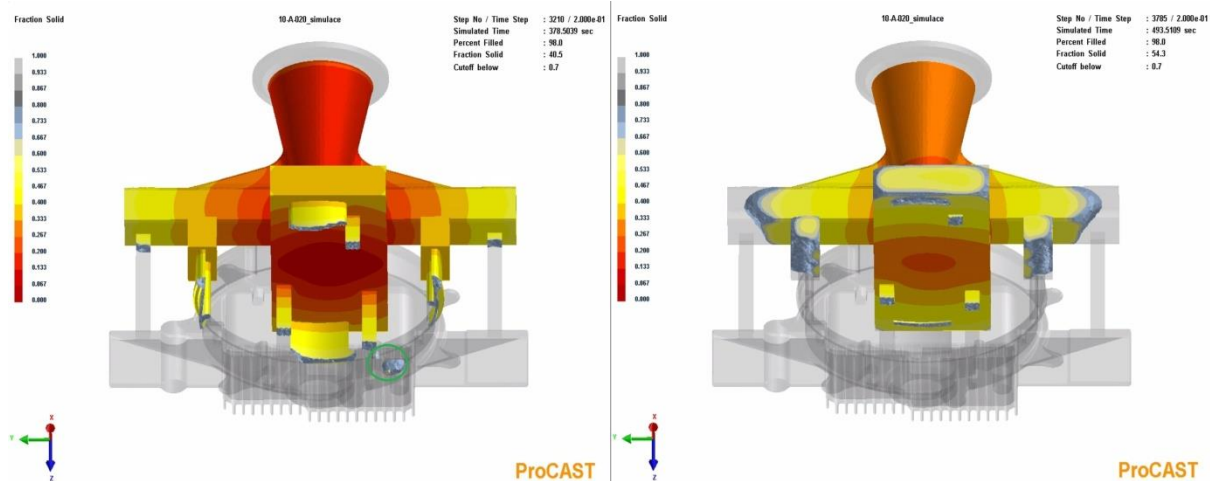
Simulace odlitku 2 byla prováděna při zadání stejných počátečních podmínek jako tomu bylo u odlitku 1 viz tab. 1. Změnila se pouze doba lití, která byla změněna na 7 sekund.

Plnění formy probíhá vrchem, kdy kov nejdříve zaplní spodní část rozváděcího kříže, přes který se kov dostane dále do dvou zářezů a tří pomocných vtoků, které postupně vyplní dutinu odlitku. Po zaplnění dutiny odlitku se hladina kovu přes zbylé dva zářezy a pomocné vtoky na okraji vrací zpátky do rozváděcího kříže, kde zaplní jeho horní část. Jelikož tato varianta používá horní plnění formy, proudění kovu není moc klidné a dochází k jeho občasnému víření, což může mít vliv na vnitřní kvalitu odlitku. Teplota kovu je během celého procesu plnění dostatečně vysoká.

Na simulaci lze pozorovat, že odlitek nejdříve tuhne v oblasti žebrování a na tenkých nejkrajnějších částech odlitku s pomocnými vtoky, neboť tato oblast nedrží teplo a zároveň je ofukována proudem vzduchu. Tuhnutí pokračuje směrem do horní části odlitku a jednotlivé zářezy rozdělují tuhnoucí taveninu na čtyři části. Jak tuhnutí postupuje, v určitou chvíli dochází na některých místech odlitku, kde jsou malé válcovité výstupky, k oddělení menších množství taveniny bez možnosti dalšího dosazení, což může způsobit vznik vad. Jako poslední tuhne masivní kříž, který tuhne ještě dlouho po tom, co už je odlitek ztuhlý. Na obr. 66 a 67 je ukázán postup tuhnutí a problémová místa.

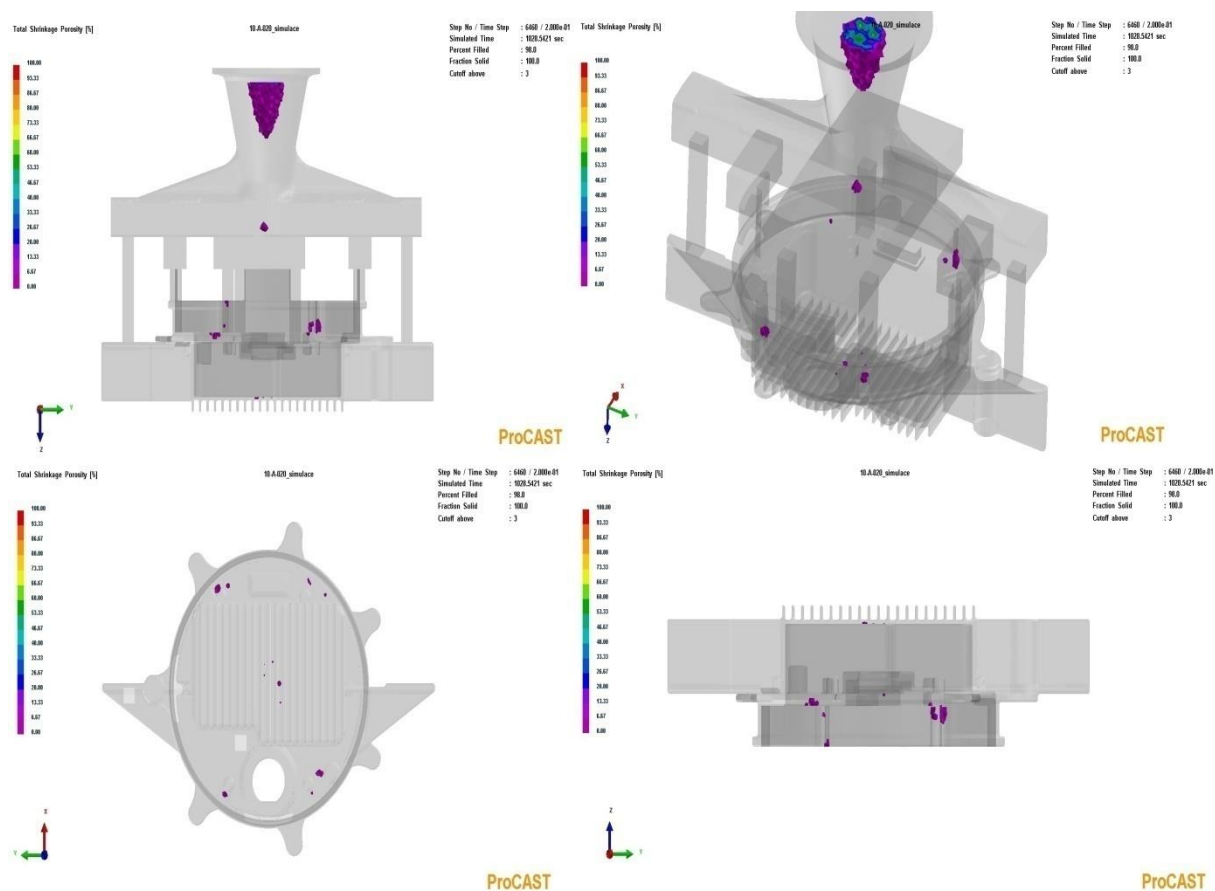


Obr. 66 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí



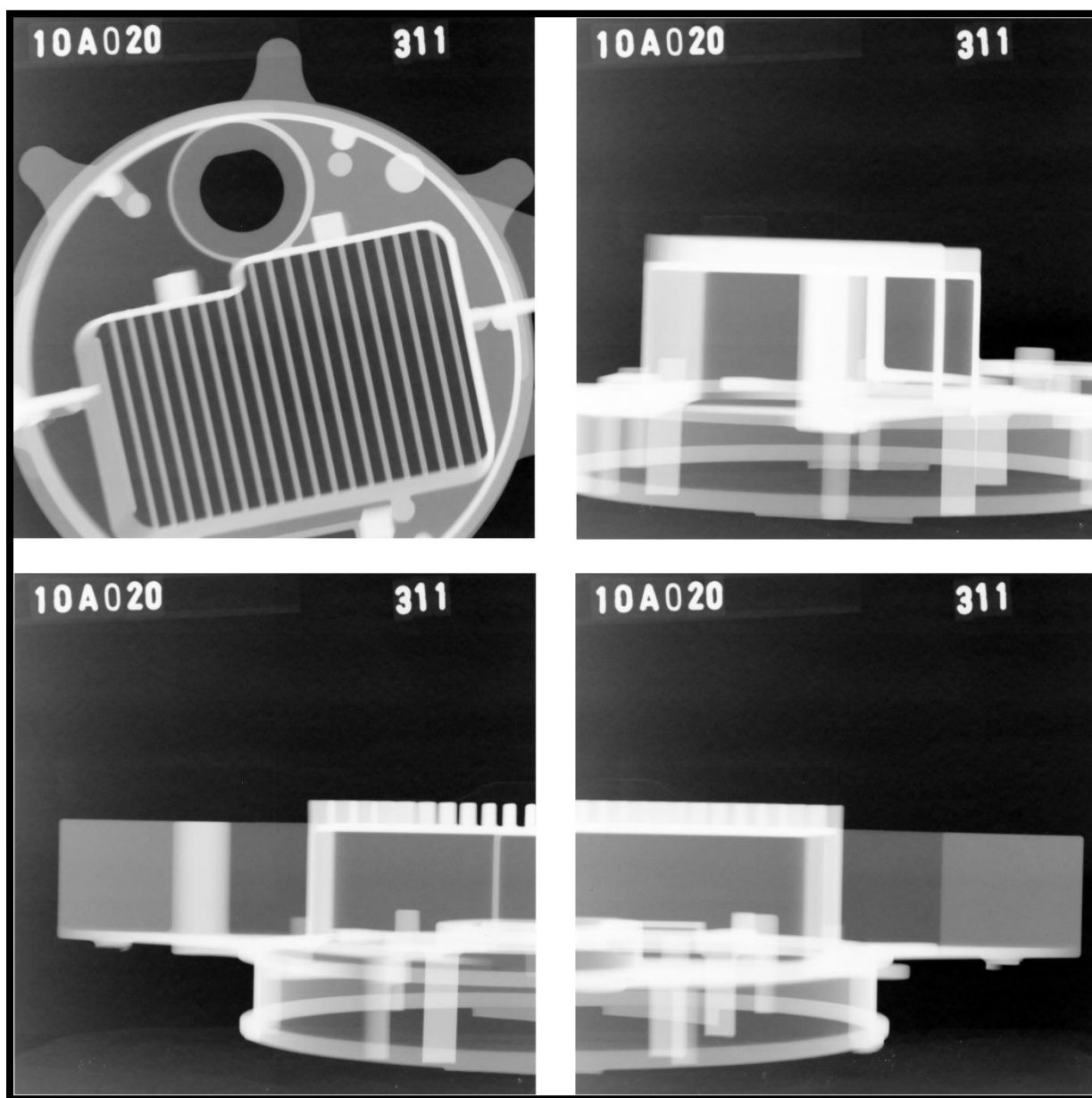
Obr. 67 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí

Na obr. 68 jsou vyznačena místa s predikcí porozity. Těmito místy jsou přesně ty oblasti kolem válcovitých výstupků na odlitku, kde se oddělovaly menší množství tuhnoucí taveniny. Menší porezita se objevila i v oblasti mezi žebry.



Obr. 68 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - predikce porozity

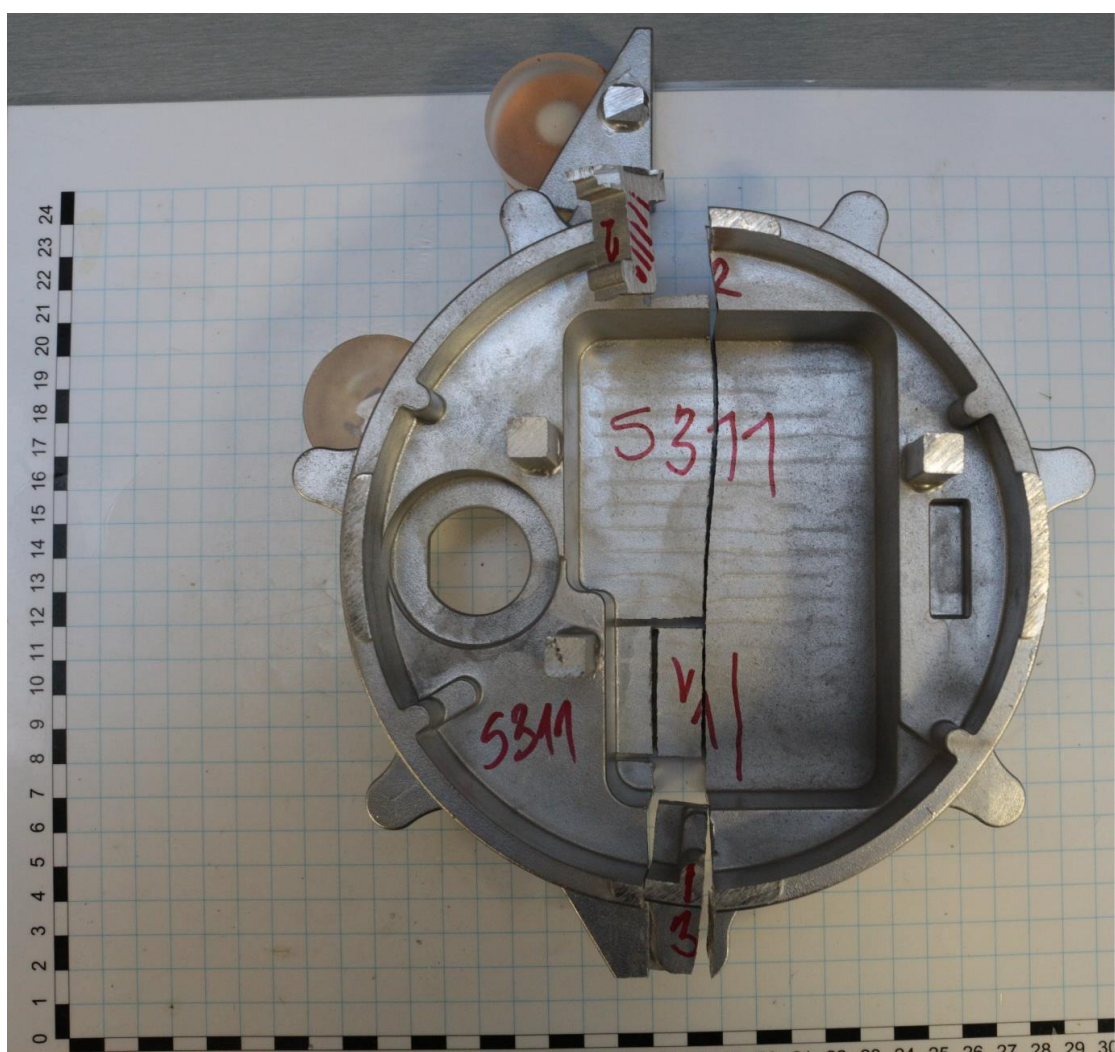
Všechny odlitky byly po odlití podrobeny radiologické zkoušce. I přes predikovanou porozitu nebyla na kritických místech žádného z odlitků nalezena vada. Na obr. 69 jsou ukázky jednotlivých rentgenových snímků jednoho z odlitků.



Obr. 69 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - rentgenové snímky

Metalografické vyhodnocení:

Na metalografické vyhodnocení byl od každé varianty vtokové soustavy vybrán jeden odlitek, tyto odlitky byly vybrány podle podobné teploty skořepin. Na vyhodnocení odlitku s původně používanou vtokovou soustavou byl vybrán odlitek s označením S311 s teplotou skořepiny 720°C. Stejně jako u vyhodnocování odlitku 1 se vyhodnocovaly vzdálenosti sekundárních os dendritů (DAS) a procento pórovitosti. Na obr. 70 je zobrazen odlitek s určenými místy pro odběr vzorků. Vzorek č.1 byl odebrán z oblasti žebrování, vzorky č.2 a č.3 byly odebrány z oblasti krajních vtoků. Vzorek č.3 je ještě rozdělen na vzorek 3A a 3B. Vzorek 3A je z oblasti vně kruhové části odlitku, kde je válcovitý útvar. Vzorek 3B je z oblasti uvnitř kruhové části odlitku pod plnicím vtokem.



Obr. 70 Odlitek 2 - odběr vzorků

Tab. 6 obsahuje výsledky měření hodnot DAS, respektive medián naměřených hodnot každého vzorku. Hodnoty jednotlivých vzorků odpovídají ochlazování odlitku. Nejkratší dendrity se nachází v oblasti žeber, což se očekávalo, neboť to je místo nejdále od vtokové soustavy a byl zde použit ofuk, a tak ochlazování zde bylo nejintenzivnější. Rozdíl mezi hodnotami DAS v oblasti vtoků je nepatrný, ale kratší dendrity jsou v oblasti vzorku č.2, jelikož tato oblast tuhla o něco rychleji.

Tab. 6 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - vyhodnocení DAS

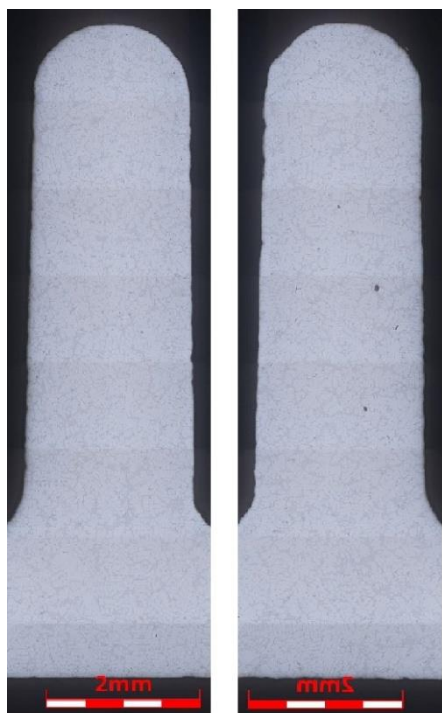
Odlitek	Vzorek	Median DAS [μm]
2	S311 - 1	40,69
2	S311 - 2	50,63
2	S311 - 3A	51,35
2	S311 - 3B	51,24

Výsledky naměřené pórovitosti odlitku obsahuje tab. 7. U všech vzorků bylo naměřeno nízké procento pórovitosti. Znatelně vyšší pórovitost oproti ostatním však byla naměřena u vzorku 3A.

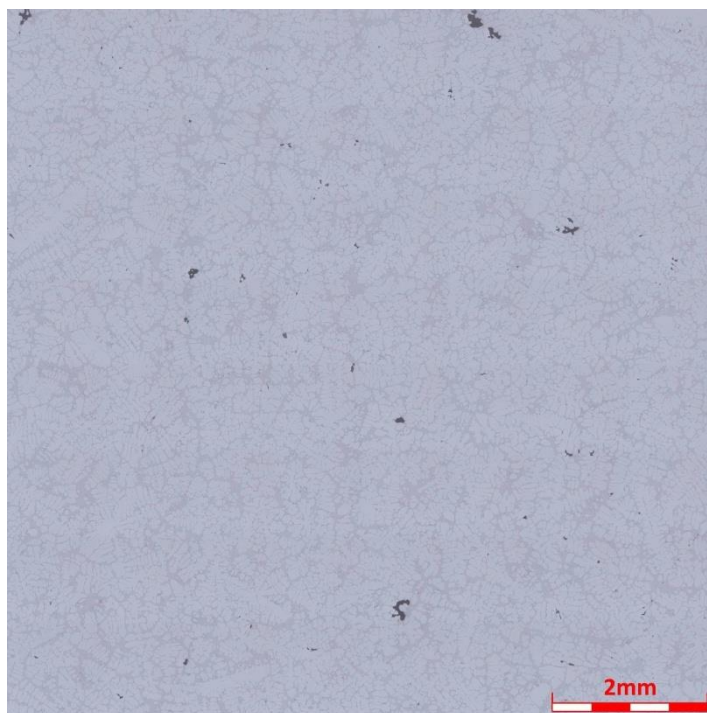
Tab. 7 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - vyhodnocení pórovitosti

Odlitek	Vzorek	Pórovitost [%]
2	S311 - 1	0,041
2	S311 - 2	0,047
2	S311 - 3A	0,175
2	S311 - 3B	0,060

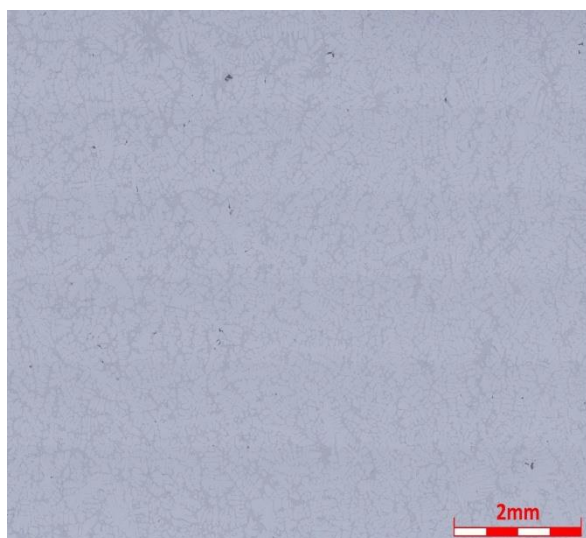
Na další straně jsou ukázky mikrostruktur jednotlivých vzorků. Vzorky jsou foceny při 200 násobném zvětšení. Velikost vzorku žeber je 2x8 mm, zbytek jsou vzorky 8x8 mm.



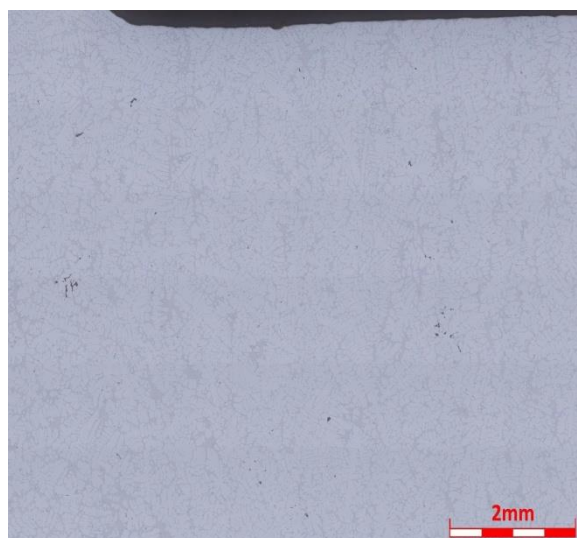
Obr. 71 S311 - 1



Obr. 72 S311 - 3A



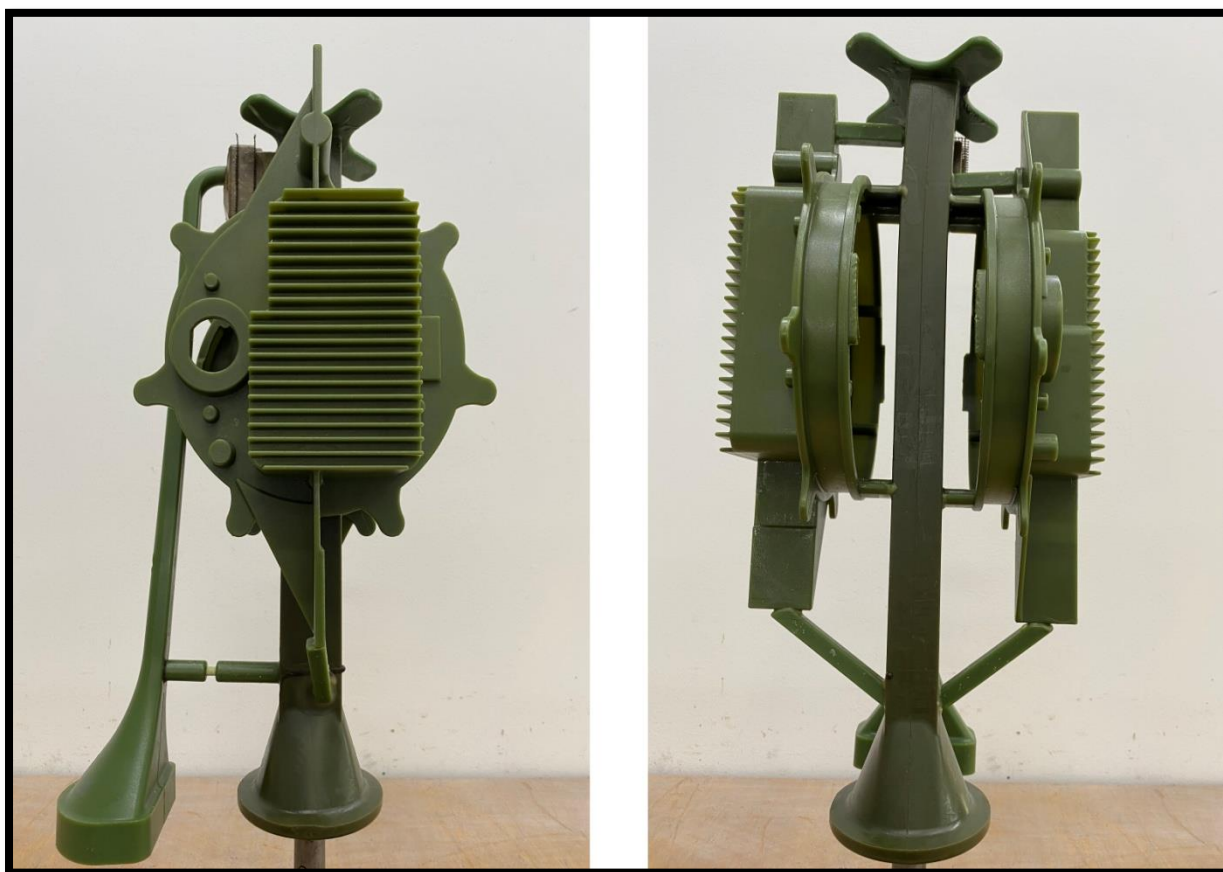
Obr. 73 S311 - 2



Obr. 74 S311 - 3B

2.2.2 Odlitek 2 - nová vtoková soustava

Nově navrhovaná varianta stromečku je značně odlišná, viz obr. 75. Stromeček je tvořen novou vtokovou soustavou a dvěma odlitky, které jsou k ní připojeny na stojato, na rozdíl od předchozí varianty, kde byl odlitek pouze jeden orientovaný na ležato. Dalším rozdílem je, že u nově navrhované vtokové soustavy je použit stejný vtokový kanál (fajka) jako u variant odlitku 1, který umožňuje klidné spodní plnění formy. Tato „fajka“ je společně s filtrem napojena na svislý vtokový kůl, který kov rozvádí dále do zářezů. Těchto zářezů je celkem šest a spojují oba svisle postavené odlitky s vtokovým kůlem. Na vrchní část každého odlitku je ještě připojen úzký odtokový kanálek, který je zde, aby umožnil bezproblémový odtok vytavenému vosku. Je nutno zmínit, že na spodku stromečku je kříž, díky němuž je pak skořepina samonosná a není třeba ji při lití nijak podpírat. Avšak problémem je, že tento křížek je náchylný na praskání. Stromečku po odlití váží 3,07 kg, což je více než původní varianta, ale nově navržená varianta umožňuje odlít dva odlitky najednou, díky čemuž je lepší využití tekutého kovu, to se značně zvedlo z 24% na 40%. Při odlévání byly podobné podmínky jako u původní varianty, lící teplota kovu byla 720°C a teplota skořepin byla v rozmezí 710-720°C. Průměrná doba lití byla místo 7 sekund 8 sekund.



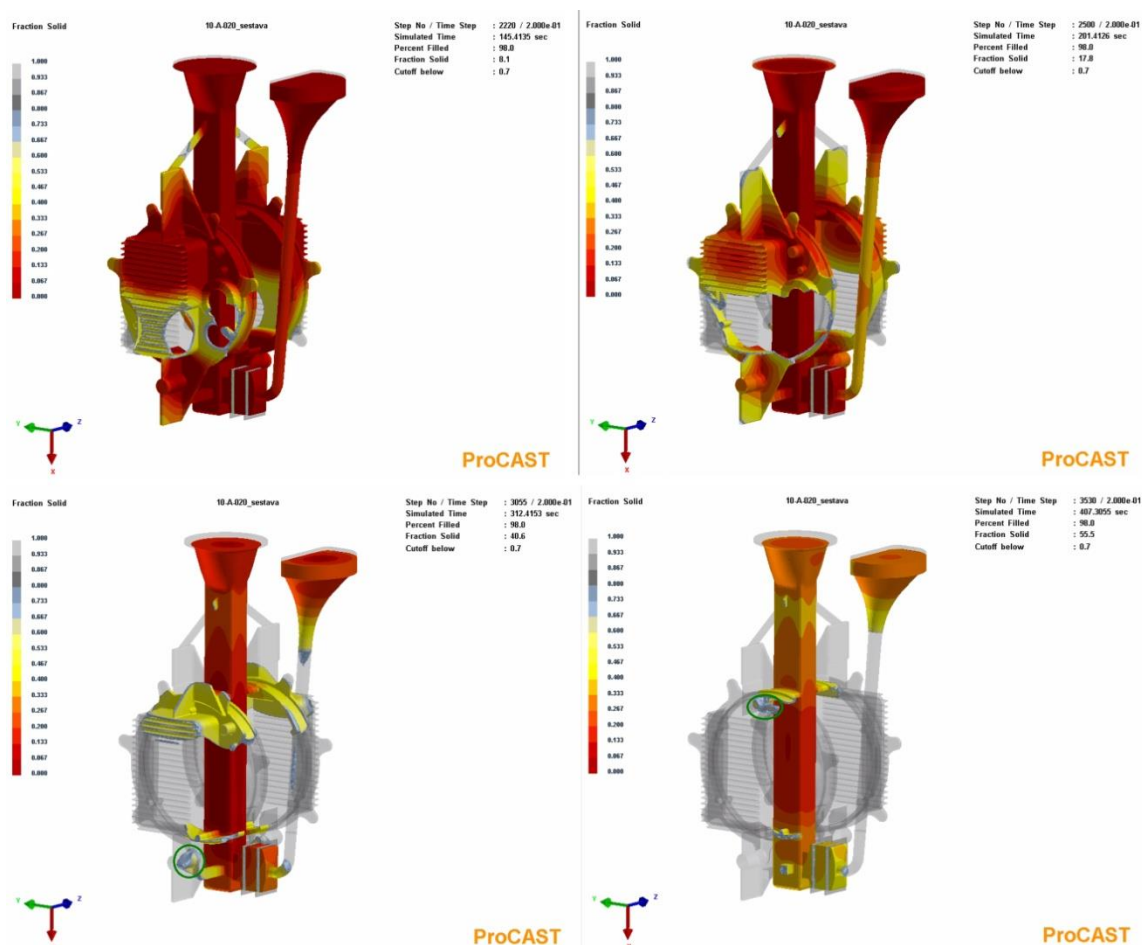
Obr. 75 Odlitek 2 - nová vtoková soustava

Simulace:

Do simulace byly zadány opět stejné podmínky jako při všech ostatních simulacích, pouze doba lití se změnila na 8 sekund.

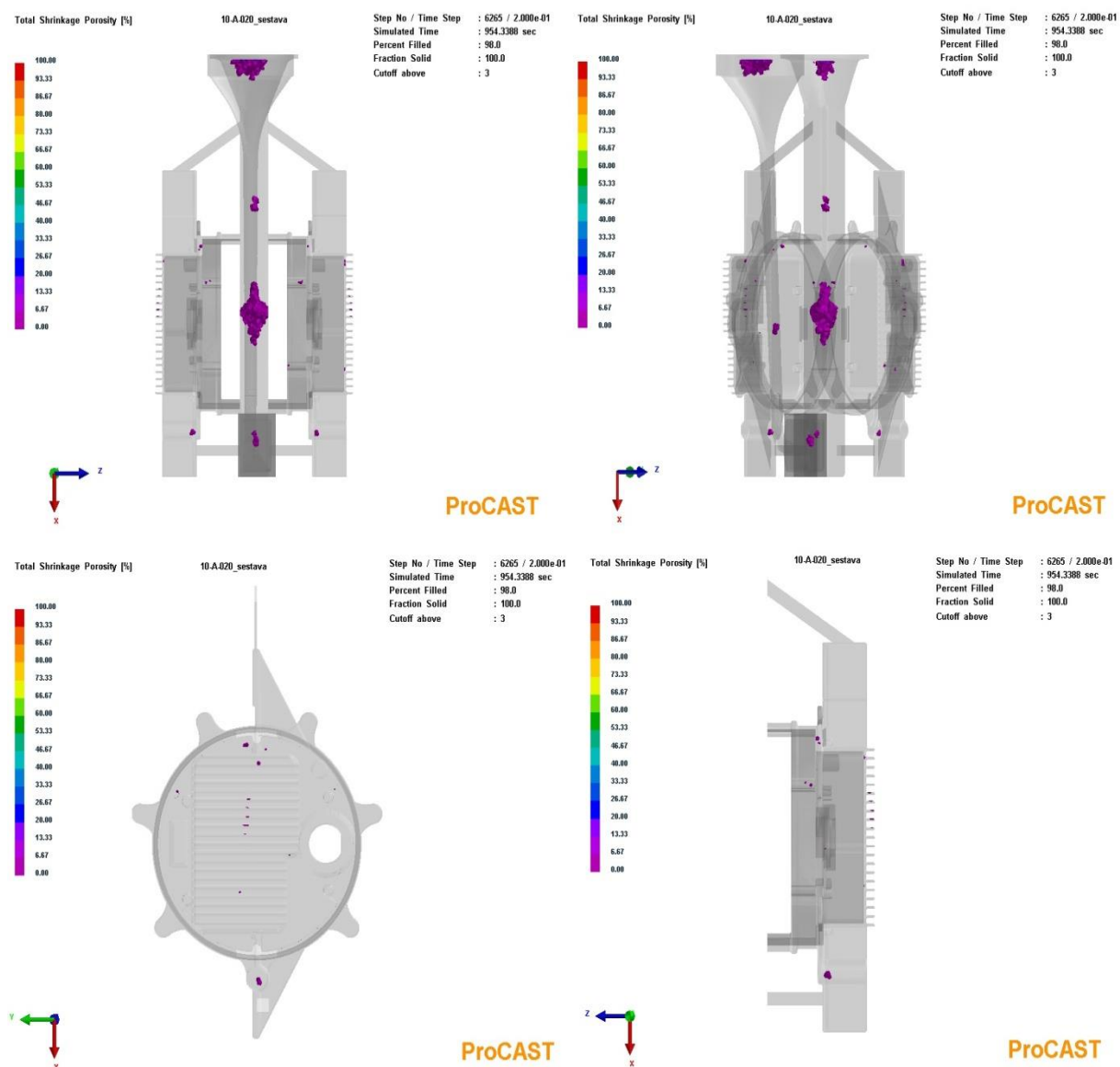
Nově navržená varianta, na rozdíl od předchozí, umožňuje plnění spodem, kdy kov nejdříve prochází přes filtr do spodní části vtokového kůlu, kde se přes spodní zářezy začnou vyplňovat oba odlitky. Ve spodní části dochází k mírnému rozvíření kovu. Hladina kovu ve vtokovém kůlu je vyšší a postupně stoupá k výše postaveným zářezům, zde dojde k vyrovnání hladiny s hladinou kovu v odlitcích. Poté se postupně a klidně vyplní zbytek dutiny formy.

Odlitek opět nejdříve tuhne v oblasti žebrování, přesněji v jeho spodní polovině, kde dochází k rychlému ochlazování pomocí ofukování proudem vzduchu. Tentokrát ale kov tuhne spíše od okrajů žebrování směrem dovnitř. Po určité době se tuhnoucí tavenina v odlitku rozdělí na dvě části, které tuhnou samostatně a každá směřuje k bližšímu zářezu. Spodní zářez tuhne rychleji než vrchní. Ve spodní části odlitku dochází k odtržení části taveniny, kterou spodní zářez není schopen usměrnit při tuhnutí směrem ven. Je to způsobeno válcovitou částí odlitku u spodního vtoku. Podobně se to děje i v horní části odlitku. Tyto dvě místa jsou riziková a mohou způsobit vady odlitku. Obr. 76 ukazuje proces tuhnutí s rizikovými místy.



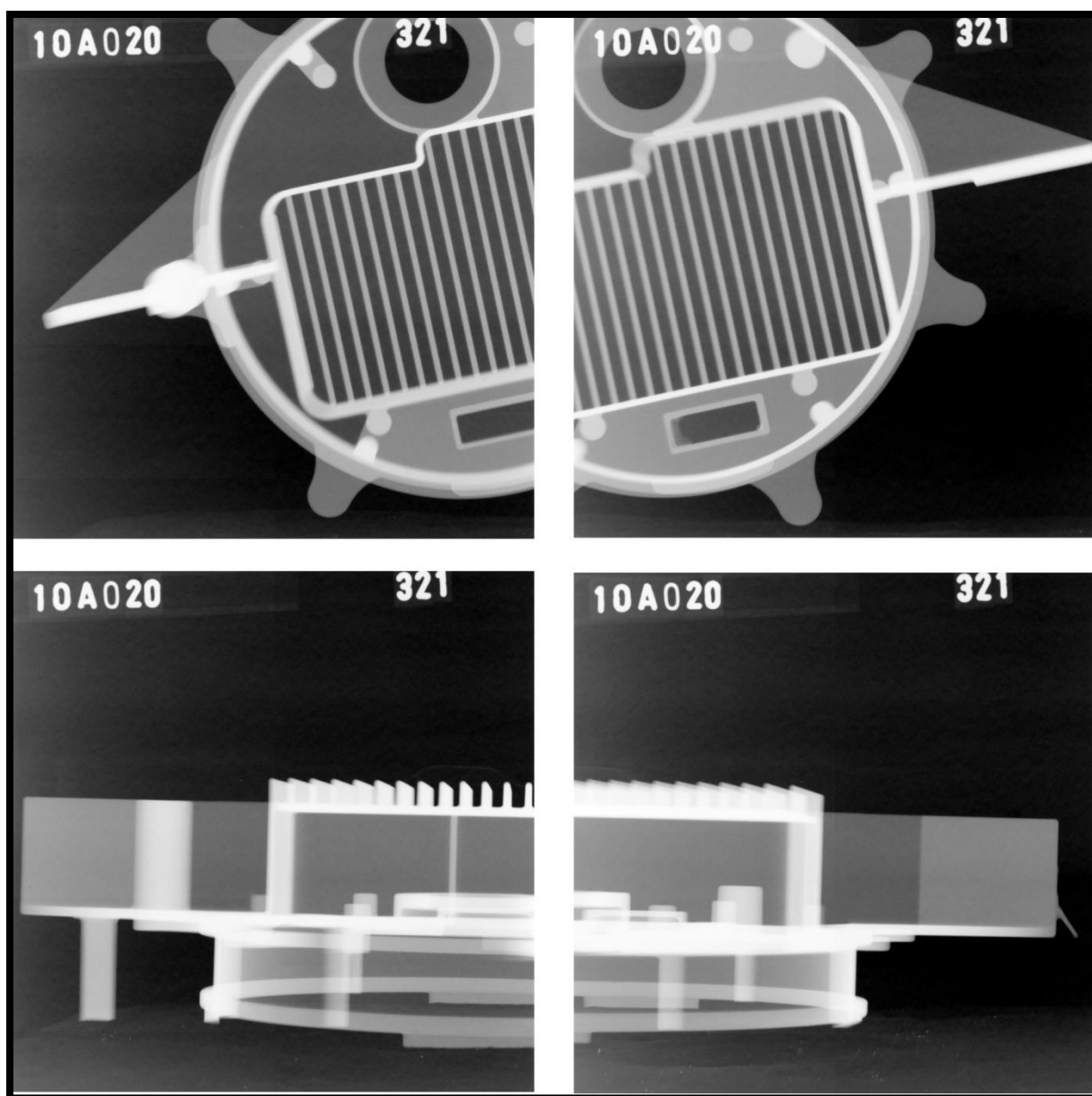
Obr. 76 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí

Obr. 77 zobrazuje predikovanou porozitu, je na něm odlitek s vtokovou soustavou i bez vtokové soustavy. Lze vidět, že oproti původní variantě zmizela porozita z oblasti válcovitých výstupků, naopak drobná porozita je ukazována mezi žebry. Dále se objevuje porozita v oblasti zářezů, kde se oddělilo určité množství taveniny při tuhnutí.



Obr. 77 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - predikce porozity

Po odlití byly všechny odlitky zrentgenovány. Žádný z rentgenových snímků odlitků neukázal nějakou vadu. Na obr. 78 jsou rentgenové snímky jednoho z odlitků.



Obr. 78 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - rentgenové snímky

Metalografické vyhodnocení:

Na metalografické vyhodnocení odlitku s nově navrhovanou soustavou se vybral odlitek N321. Tento odlitek měl teplotu skořepiny 725°C, tedy podobnou teplotu jako odlitek S311 původní varianty, a tak se tyto odlitky mohou lépe porovnávat. Vyhodnocované vzorky byly odebrány ze stejných míst a mají stejné označení. Vzorek č.1 je z oblasti žeber, vzorek č.2 je z oblasti horního plnicího vtoku a vzorek č.3 je z oblasti spodního plnicího vtoku.

V tab. 8 se nachází hodnoty DAS naměřené pro odlitek s novou vtokovou soustavou. Stejně jako u původní varianty se nejkratší dendrity nachází v oblasti žeber, opět zde probíhá nejrychlejší ochlazování. O něco větší hodnoty DAS vychází u obou vtoků, přičemž v oblasti spodního vtoku jsou hodnoty větší než u horního. V porovnání nově navrhované varianty s předchozí variantou vychází DAS o něco lépe.

Tab. 8 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - vyhodnocení DAS

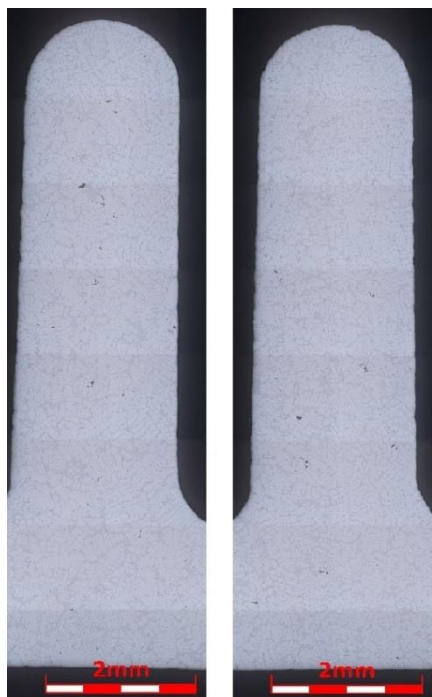
Odlitek	Vzorek	Median DAS [μm]
2	N321 - 1	43,95
2	N321 - 2	46,57
2	N321 - 3A	48,60
2	N321 - 3B	48,51

V tab. 9 jsou hodnoty naměřené pórovitosti jednotlivých vzorků. Hodnoty vyšly téměř stejné jako u odlitku původně používané varianty. Významný rozdíl se však objevil u vzorku č.3, kde se pórovitost zvedla o 1%. Tato část odlitku má větší pórovitost z důvodu, že při tuhnutí se zde více drželo teplo a oddělila se značná část taveniny bez možnosti dalšího dosazování.

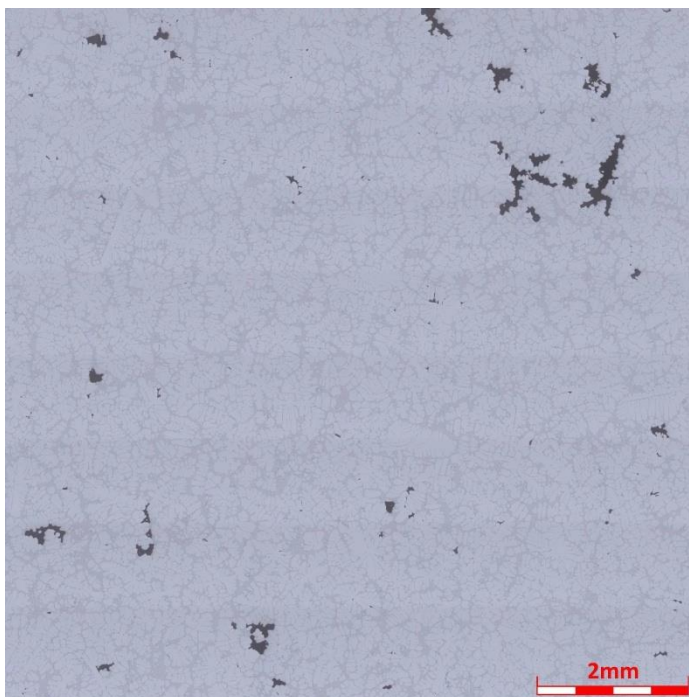
Tab. 9 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - vyhodnocení pórovitosti

Odlitek	Vzorek	Pórovitost [%]
2	N321 - 1	0,076
2	N321 - 2	0,039
2	N321 - 3A	1,169
2	N321 - 3B	0,037

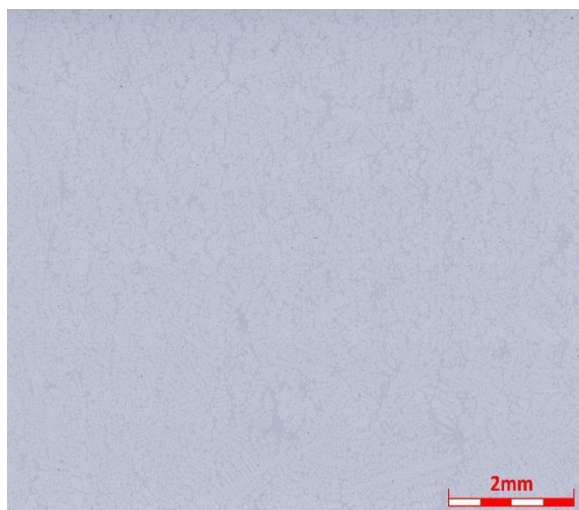
Na této stránce jsou ukázky mikrostruktur vzorků z odlitku. Stejně jako u původní varianty jsou vzorky 200 násobně zvětšeny, velikost vzorků žeber je 2x8 mm a ostatní vzorky jsou 8x8 mm. Na vzorku 3A lze vidět zvýšenou pórovitost a že nalezené póry mají převážně podobu mikrostazein.



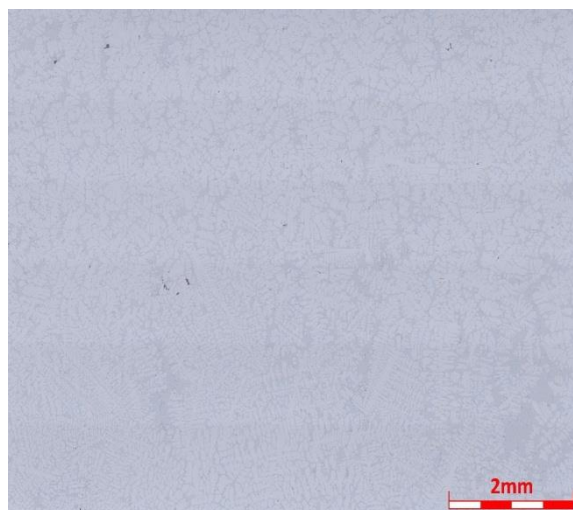
Obr. 79 N321 - 1



Obr. 80 N321 - 3A



Obr. 81 N321 - 2

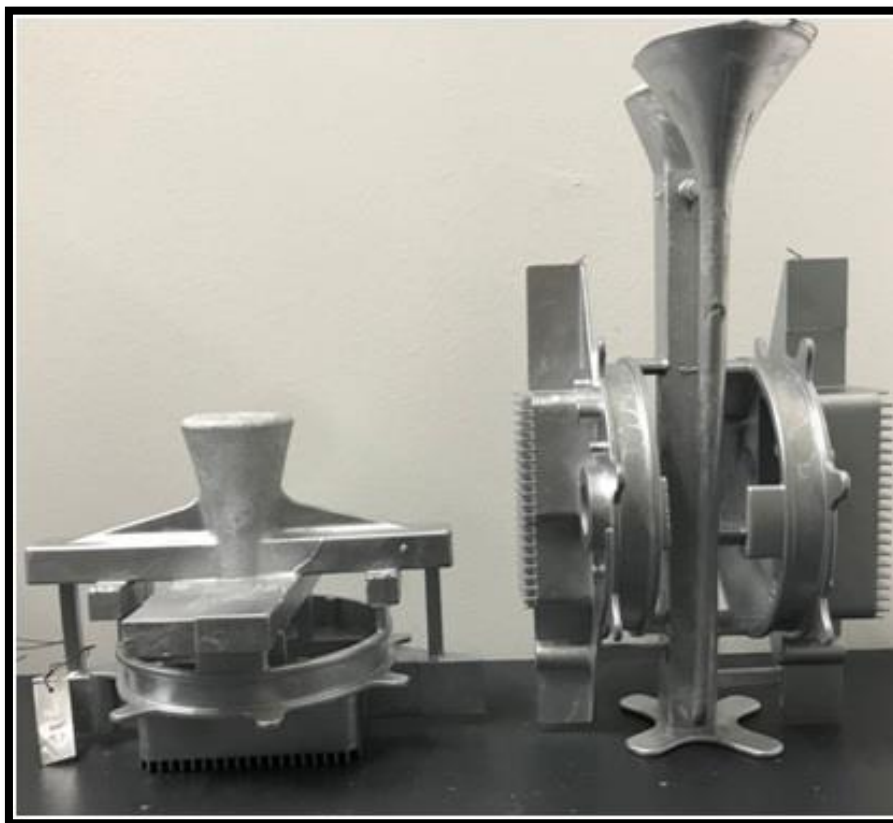


Obr. 82 N321 - 3B

2.2.3 Odlitek 2 - zhodnocení

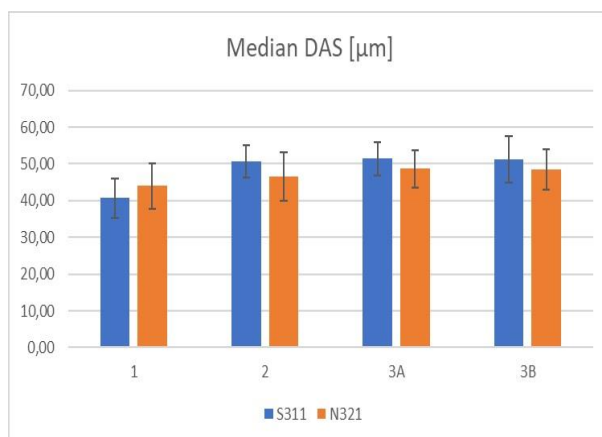
Navrhovanou změnu vtokové soustavy odlitku 2 lze hodnotit pozitivně. Změna měla pozitivní efekt na výrobu hned z několika hledisek. Pokud se to vezme z hlediska samotného odlitku, tak jde především o jeho mírné zlepšení mikrostruktury, viz graf 3 a 4, kde je porovnání odlitků S311 a N321, dále také možnost používat spodní plnění s filtrem, což u předešlého řešení použít nešlo. Díky spodnímu plnění s použitím filtru je plnění klidnější, čímž se snižuje riziko horší kvality odlitků způsobené vměstkou.

Řadu benefitů má nově navržený systém i z hlediska ekonomického a výrobního. Díky odlehčení vtokové soustavy došlo k celkové úspoře používaného materiálu. Hned ze začátku výroby se jedná o úsporu vosku, která činí 0,4 kg na odlitek. Odstraněním pomocných vtoků se podstatně snížil čas při přípravě voskového modelu, navíc se tím eliminovaly náklady spojené s jejich odstraněním po odlití. Voskový model se navíc nemusí sestavovat pomocí přehrátkového nože, což produkuje vysoké množství spalin, ale pouze lepením, to je jak produktivní tak i ekologické. Další úsporou je snížení spotřeby obalového materiálu, která je 0,37 kg na odlitek, s tím souvisí i snížení pracnosti při výrobě keramické formy, kdy se obalují dva voskové modely najednou místo jednoho. Nově navržená soustava má také lepší využití kovu, to se zvedlo z 21% na 40%. Ze 100 kg pece je možno odlít až o 89% více odlitků. V neposlední řadě je také menší pracnost při oddělování odlitků, symetrický tvar stromečku je totiž pro oddělování na pásové pile vhodnější než atypický původní tvar. S nově navrženou variantou se ale vyskytl i problém, tím je vytavování vosku, neboť při vytavování není skořepina moc stabilní a musí se složitě podpírat.

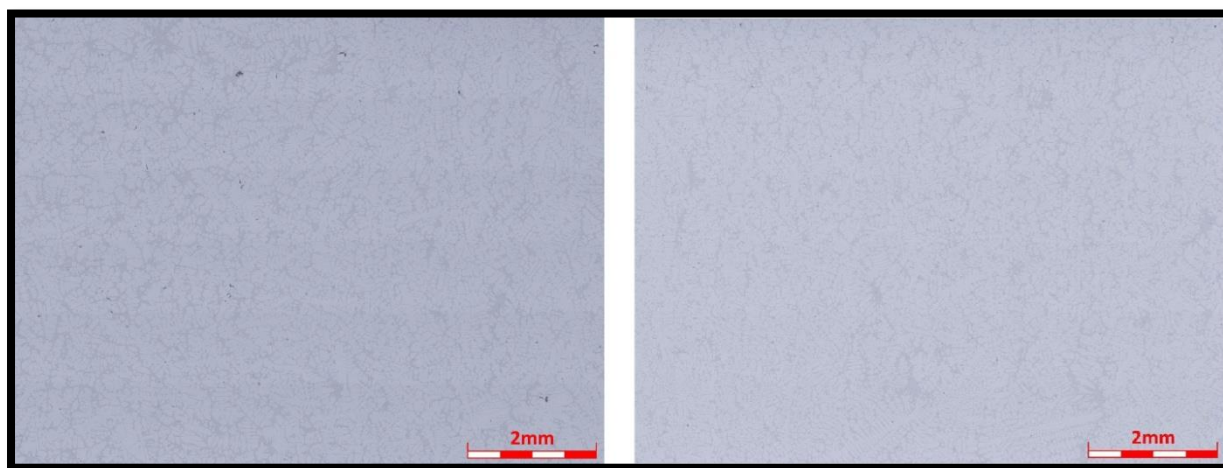
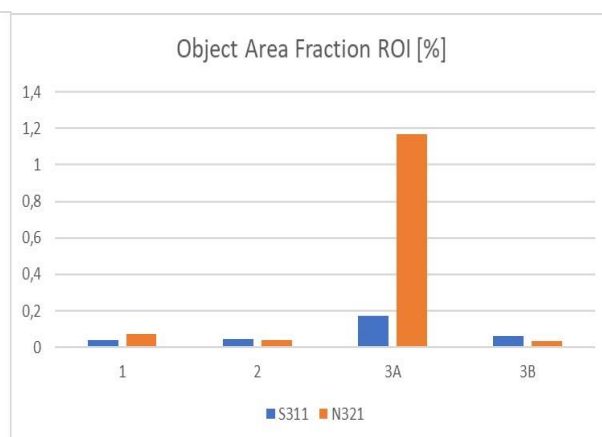


Obr. 83 Odlitek 2 - porovnání vtokových soustav

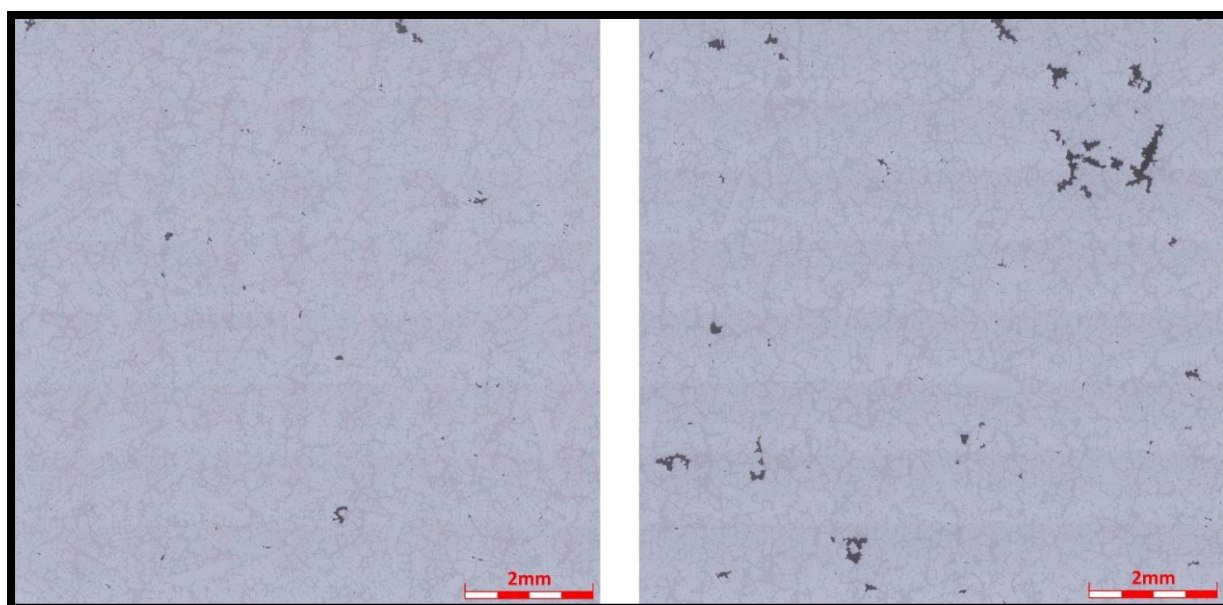
Graf 3 - Odlitek 2 - porovnání DAS



Graf 4 - Odlitek 2 - porovnání pórovitosti



Obr. 84 Odlitek 2 - porovnání vzorků č.2



Obr. 85 Odlitek 2 - porovnání vzorků 3A

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat u vybraných odlitků litých metodou vytavitelného modelu jejich vtokové soustavy s cílem zlepšit využití kovu, zachovat zdravotní odlitku a případně zlepšit jejich mikrostrukturu za účelem dosažení lepších mechanických vlastností.

Teoretická část obsahuje popis metody vytavitelného modelu, vtokových soustav z hlediska sestavování a proudění, dále je zde popsáno použití simulací ve slévárenství a jsou zde také popsány slitiny používané v přesném lití.

Pro praktickou část byly na optimalizaci vtokové soustavy vybrány dva odlitky firmy Alucast, s.r.o., které činí firmě problém z hlediska špatného využití tekutého kovu. Oba odlitky jsou dodávány pro stejného zahraničního zákazníka a jsou používány v letectví, tudíž jsou na ně kladeny určité nároky. Odlitky s vtokovými soustavami byly simulovány, po odlití byly podrobeny radiologické zkoušce a také metalograficky vyhodnoceny.

Prvním odlítkem byla skříň motoru, která má středně silné až silné partie. Její původní vtoková soustava byla mohutná, ohřívala odlitek a využití kovu bylo pouze 24%. Navrhla se nová vtoková soustava, která je značně odlehčená, umožňuje rychlejší ochlazování odlitku a využití kovu se zvedlo o 18%. Všechny odlité odlitky s nově navrženou soustavou, kromě jednoho, vyšly bez zjevné vady a znatelně se zlepšila jejich mikrostruktura. Mimo to přinesla změna vtokové soustavy i další benefity jako je úspora vosku a obalového materiálu nebo menší fyzická náročnost při manipulaci se stromečkou. Nová varianta tedy bude zaváděna do výroby.

V případě druhého odlitku se jednalo o skříň napájení s poměrně rovnoměrnou tloušťkou stěn. Odlitek měl zbytečně mohutnou vtokovou soustavu s několika pomocnými vtoky a využití tekutého kovu bylo v tomto případě pouze 21%. Navržením nové vtokové soustavy se využití kovu zvedlo na 40%, je možné odlévat dva odlitky v jednom stromečku a navíc nová varianta umožňuje klidné spodní plnění s použitím filtru. Podle rentgenu byly všechny odlitky v pořádku, avšak na metalografickém hodnocení vybraného odlitku se objevila zvýšená pórovitost v jedné jeho krajní části. Naměřené hodnoty DAS byly pro odlitek s novou vtokovou soustavou mírně lepší než u původní varianty. Stejně jako u prvního odlitku, nová varianta šetří materiál a má značný efekt při výrobě, např. snadnější sestavování stromečku.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že optimalizované vtokové soustavy pomáhají nejen z hlediska značně lepšího využití kovu a lepší vnitřní struktury odlitků, ale také z hlediska snížení pracnosti, úspory materiálu a energie nutné při výrobě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BEELEY, Peter R. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 09-017-1666-9.
- [2] DOŠKÁŘ, J., J. GABRIEL, M. HOUŠŤ a M. PAVELKA. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976, 315 s.
- [3] SMILE Inc. [online]. Copyright© [cit.06.06.2020]. Dostupné z: https://www.smile01.com/investment_casting_process.html
- [4] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2009. 30 s. Dizertační práce. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
- [5] *Slévárenství* [online]. 2000 [cit.06.06.2020]. Články. Dostupné z WWW: <<http://www.slevarenstvi.cz/text/Obr4.jpg>>.
- [6] HORÁČEK, Milan. *VÝROBA PŘESNÝCH ODLITKŮ TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU: Přednáška pro 2.ročník magisterského studia*. Odbor slévárenství ÚST , FSI VUT Brno, 2015.
- [7] HORÁČEK, Milan. *LATEST TRENDS IN INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY* [online]. 2008 [cit.06.06.2020]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl6.pdf>
- [8] Investment Casting Wax. In: *Westech Wax Products* [online]. Corona, California [cit.06.06.2020]. Dostupné z: <https://www.westechwax.com/investment-casting-wax/>
- [9] *Investcast* [online]. 2011 [cit.06.06.2020]. Wax Pattern Production. Dostupné z: <http://www.investacast.com/Portals/0/images/patternMixer.jpg>
- [10] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 06.06.2020]. Wax Pattern Production. Dostupné z: <http://www.investacast.com/Portals/0/images/waxPatternTreeLge.jpg>
- [11] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. 1. vyd. Brno: VUT FSI, 2009, 89 s. ISBN 80-214-2558-X.
- [12] Precision Investment Casting. *Object moved* [online]. Copyright ©2020 The Chemours Company. Chemours [cit. 09.06.2020]. Dostupné z: <https://www.chemours.com/en/brands-and-products/chemours-minerals/applications/precision-investment-casting>
- [13] Investment Casting Process | Garg Casteels Pvt Ltd. *Home | Garg Casteels Pvt Ltd* [online]. Copyright © 2018 All Rights Reserved by Garg Casteel Pvt Ltd. [cit.09.06.2020]. Dostupné z: <https://www.gargcasteels.com/investment-casting-process/>

- [14] PENNSYLVANIA PRECISION CAST PARTS. *Investment casting* [online]. 2020 [cit. 09.06.2020]. Dostupné z: <http://ppcpinc.com/investment-castings/>
- [15] Investment Casting-Amos Industries, Inc.. *Amos Industries, Inc.* [online]. Copyright © Amos Industries, Inc. COPYRIGHT ALL. [cit. 11.06.2020]. Dostupné z: <https://www.amosind.com/wap/about/?73.html>
- [16] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 11.06.2020]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <http://www.investacast.com/metal_casting.aspx>
- [17] *E. McGrath* [online]. 2011 [cit. 11.06.2020]. Vacuum and Atmosphere furnaces. Dostupné z WWW: <<http://www.emcgrath.com/catalog/images/FRO/FRO560-2.jpg>>
- [18] *Daido Steel* [online]. 2010 [cit. 11.06.2020]. Investment Casting Products. Dostupné z WWW: <http://dsuxgwns.aido.co.jp/english/products/casting/casting_systems.html>
- [19] LIN CHIAO CASTING Co. Ltd. *Investiční lití proces probíhá s vynikajícím designem By Lin Chiao* [online]. 2015 [cit. 11.06.2020]. Dostupné z WWW: <http://investment-casting.ready-online.com/cs/page/casting-process.html>
- [20] CONSULTANCY INCAST. *Photo gallery of investment casting process* [online]. [cit. 11.06.2020]. Dostupné z: <http://www.incastconsultancy.com/process.htm>
- [21] V A TECHNOLOGY Ltd. *Grinding systems* [online]. [cit. 11.06.2020]. Dostupné z WWW: <http://vatech.co.uk/products.php?p=32&c=32>
- [22] *Ortmann* [online]. 2008 [cit. 11.06.2020]. Slévárna. Dostupné z WWW: <<http://www.ortmann.cz/cs/page.php?lang=cs&page=slevarna>>
- [23] MATALOVÁ, Helena. Jak uplatnit 3D skener a získat konkurenční výhodu. In: *CAD* [online]. [cit. 11.06.2020]. Dostupné z: https://www.cad.cz/images/stories/aktuality/2017/08/3D_skener_3.jpg
- [24] LAFAYETTE TESTING SERVICES. *Ultrasonics testing* [online]. 2015 [cit. 11.06.2020]. Dostupné z WWW: <http://lafayettetesting.com/services/ultrasonicstesting#undefined2>
- [25] Yxlon International GmbH: Y.MU2000 X-ray inspection system from YXLON now with CT option, too! | foundry-planet.com - B2B Portal. *Foundry-planet.com | B2B Portal for Technical and Commercial Foundry Management* [online]. Copyright © 2004 [cit. 11.06.2020]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/cn/corporatenews/yxlon-international-gmbh-ymu2000-x-ray-inspection-system-from-yxlon-now-with-ct-option-too/>
- [26] Piwonka, T. S. – Gating and Feeding Investment Castings, <https://www.investmentcasting.org/paper-search.asp?inputMenuContains=Process> p. 151 - 174

- [27] MIKULKA, V. *Optimalizace technologie výroby Al odlitku litého metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [28] ROUČKA, Jaromír. *Technická příprava výroby: Poznámky z výuky*. Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2018.
- [29] Vyplatí se investovat do simulačních softwarů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, 1, [cit. 13.06.2020]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyplati-se-investovat-do-simulacnich-softwaru>>
- [30] KRUTIŠ, Vladimír; KUZMA, Zbyněk. Numerická simulace ve slévárenské technologii. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, 10, [cit. 16.06.2020]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologie>>
- [31] JOCH, Antonín, et al. Využití numerických simulací a CAD program v PBS Velká Bíteš. *Slévárenství*. 2016, 2016(7-8), s. 240-244. ISSN 0037-6825.
- [32] Casting Simulation Suite. [online]. [cit. 16.06.2020]. Dostupný z WWW: <http://www.esi-group.com/products/casting/procast/benefits/files/Brochure_casting_BD.pdf>
- [33] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [34] MICHNA, Štefán a kol., 2005. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin. ISBN 80-8904-88-4.
- [35] O nás. *ALUCAST, s.r.o.* [online]. [cit. 17.06.2020]. Dostupné z: <http://alucast.cz/cs/o-nas>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Fáze výroby	10
Obr. 2 Forma vyrobená obráběním	11
Obr. 3 Schéma vstřikovacího zařízení	12
Obr. 4 Vyjmutí voskového modelu	12
Obr. 5 Voskové modely	12
Obr. 6 Sestava jednoho modelu	13
Obr. 7 Sestava modelů do stromečku	13
Obr. 8 Namáčení do obalové hmoty	14
Obr. 9 Nanášení ostřiva	15
Obr. 10 Sušení skořepin.....	15
Obr. 11 Dilatační spára	16
Obr. 12 Skořepiny v autoklávu	16
Obr. 13 Žihání skořepin.....	17
Obr. 14 Postup žihání	17
Obr. 15 Gravitační lití.....	18
Obr. 16 Sklopné lití	18
Obr. 17 Vakuové lití	18
Obr. 18 Vakuové nasávání.....	18
Obr. 19 Odstranění skořepiny	19
Obr. 20 Oddělování odlitků	19
Obr. 21 Broušení odlitku	19
Obr. 22 Měření posuvným měřidlem	20
Obr. 23 Měření 3D skenerem.....	20
Obr. 24 Měření ultrazvukem.....	20
Obr. 25 Rentgen	20
Obr. 26 Modely sestavené etážově horizontálně.....	21
Obr. 27 Modely sestavené na vtokový kanál	21
Obr. 28 Klecová vtoková soustava.....	22
Obr. 29 Obalování klecové vtokové soustavy	22
Obr. 30 Hlavní části vtokové soustavy	23
Obr. 31 Proudění ve svislých vtokových kanálech	26
Obr. 32 Skoková změna průřezu	26
Obr. 33 Laminární proudění	27
Obr. 34 Turbulentní proudění se stabilní (a) a nestabilní (b) mezní vrstvou.....	27
Obr. 35 Teplota kovu po odlití.....	30
Obr. 36 Vliv obsahu Mg na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si 9 po vytvrzení	31
Obr. 37 Rovnovážný diagram Al-Cu.....	32
Obr. 38 Orientační hodnoty vytvrzování za tepla	33
Obr. 39 Areál firmy Alucast, s.r.o.....	34
Obr. 40 Odlitek 1.....	35
Obr. 41 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - přední a boční pohled.....	36
Obr. 42 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	38
Obr. 43 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - predikce porozity	39
Obr. 44 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - rentgenový snímek.....	40
Obr. 45 Odlitek 1 - původní vtoková soustava - rentgenový snímek s drobnou porozitou.....	40
Obr. 46 Odlitek 1 - odběr vzorků	41
Obr. 47 S111 - 1.....	43
Obr. 48 S111 - 3.....	43

Obr. 49 S111 - 2H	43
Obr. 50 S111 - 4.....	43
Obr. 51 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - přední a boční pohled.....	44
Obr. 52 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	45
Obr. 53 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	46
Obr. 54 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - predikce porozity	46
Obr. 55 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - rentgenový snímek	47
Obr. 56 Odlitek 1 - nová vtoková soustava - rentgenový snímek s jemnou porozitou	47
Obr. 57 N124 - 1	49
Obr. 58 N124 - 3	49
Obr. 59 N124 - 2H.....	49
Obr. 60 N124 - 4	49
Obr. 61 Odlitek 1 - porovnání vtokových soustav	50
Obr. 62 Odlitek 1 - porovnání vzorků č.2.....	51
Obr. 63 Odlitek 1 - porovnání vzorků č.3.....	51
Obr. 64 Odlitek 2.....	52
Obr. 65 Odlitek 2 - původní vtoková soustava	53
Obr. 66 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	54
Obr. 67 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	55
Obr. 68 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - predikce porozity	55
Obr. 69 Odlitek 2 - původní vtoková soustava - rentgenové snímky	56
Obr. 70 Odlitek 2 - odběr vzorků	57
Obr. 71 S311 - 1.....	59
Obr. 72 S311 - 3A	59
Obr. 73 S311 - 2.....	59
Obr. 74 S311 - 3B.....	59
Obr. 75 Odlitek 2 - nová vtoková soustava	60
Obr. 76 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - simulace tuhnutí.....	61
Obr. 77 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - predikce porozity	62
Obr. 78 Odlitek 2 - nová vtoková soustava - rentgenové snímky	63
Obr. 79 N321 - 1	65
Obr. 80 N321 - 3A.....	65
Obr. 81 N321 - 2	65
Obr. 82 N321 - 3B.....	65
Obr. 83 Odlitek 2 - porovnání vtokových soustav	66
Obr. 84 Odlitek 2 - porovnání vzorků č.2.....	67
Obr. 85 Odlitek 2 - porovnání vzorků 3A.....	67