



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA PROTOTYPOVÉHO ODLITKU HLINÍKOVÉHO ROTORU SE ZÁLITKEM POMOCÍ TECHNOLOGIE PŘESNÉHO ODLÉVÁNÍ

PRODUCTION OF A PROTOTYPE CASTING OF ALUMINIUM ROTOR WITH AN INSERT USING PRECISION  
CASTING TECHNOLOGY

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Záviský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2024

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Matěj Záviský**  
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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 bakalářské práce:

### **Výroba prototypového odlitku hliníkového rotoru se zálitkem pomocí technologie přesného odlévání**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Požadavky zákazníků mají neustále stoupající tendenci, a to nejen v oblasti dodávek sériově vyráběných odlitků, ale rovněž v oblasti dodání prvních prototypových odlitků. Od prototypových odlitků se očekává maximální kvalita a rychlost dodání, a to při zachování komplexnosti požadovaného dílu. Z tohoto důvodu je řada sléváren nucena zavádět technologie rychlého prototypování tak, aby vyhověli novým trendům a technologiím. Rozvoj 3D tisku otevírá možnosti i pro slévárenskou technologii. Na použití těchto nových metod je však nutné navázat zvládnutím dalších technologických procesů, které se odvíjí od numerické simulace a návrhu technologie tak, aby prototyp byl vyroben na první pokus a pokud možno bez vad. Technologie přesného lití patří mezi výrobní technologie, která je v současnosti s oblibou využívána právě pro výrobu prototypů. Je to dáno její variabilitou a možností výroby velmi komplikovaných tvarů. Technologii lze velmi dobře kombinovat s 3D tiskem a toto propojení bývá nazýváno „hybridní technologií“. Speciální problematikou je odlévání prototypů se zalitými inserty a to díky odlišné dilataci jednotlivých částí řešeného systému. Rozdílná dilatace je příčinou praskání skořepin, které je následně nutné nákladně opravovat, případně je není možné pro výrobu použít.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je rozbor možností výroby hliníkového odlitku s ocelovým zálitkem pomocí metod rychlého prototypování se zaměřením na technologii lití do keramických skořepin. Experimentální část si klade za cíl výrobu a vyhodnocení kvality zadaného odlitku ze slitin Al na výrobním zařízení Cyclone.

**Seznam doporučené literatury:**

KUMAR, Parlad; SINGH, Rupinder; AHUJA, Ips. A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process. Asian Review of Mechanical Engineering. 2013, Vol. 2, No. 2, pp. 49-55. ISSN 2249-6289.

BEELEY, Peter; SMART, Robert. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 0-901716-66-9.

CAMPBELL, John. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth–Heinemann Ltd., 1991. ISBN 0-7506-1072.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zaměřuje na výrobu hliníkových odlitků s ocelovými zálitky pomocí hybridního přesného lití za použití aditivních technologií. Hlavním cílem je analyzovat možnosti výroby a kvalitu odlitku, s důrazem na problematiku praskání skořepiny při vypalování modelu za vysokých teplot. Práce se zabývá inovativními postupy v oblasti přesného lití a optimalizace procesů pro dosažení pevné metalurgické vazby mezi materiály. Využití bimetalických součástí lze použít pro dosažení optimálního výkonu konkrétní aplikace a strukturální integritu v různých odvětvích průmyslu. Ke zlepšení výsledné kvality odlitku také přispělo využití digitálních technologií a simulačních softwarů.

### **Klíčová slova**

hybridní přesné lití, aditivní technologie, metalurgická vazba, bimetalická součást, simulační software

## **ABSTRACT**

This thesis focuses on the production of aluminium castings with steel inserts produced by hybrid investment casting using additive technologies. The main objective is to analyse the production possibilities and quality of the casting, with emphasis on the shell cracking issue during high temperature firing of the model. The thesis deals with innovative techniques in investment casting and process optimization to achieve a strong metallurgical bond between materials. Bimetallic components can be used to achieve optimum application specific performance and structural integrity in various industry sectors. The use of digital technology and simulation software has also contributed to improving the final casting quality.

### **Keywords**

hybrid investment casting, additive technology, metallurgical bond, bimetallic component, simulation software

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZÁVISKÝ, Matěj. Výroba prototypového odlitku hliníkového rotoru se zálitkem pomocí technologie přesného odlévání [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157639>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba prototypového odlitku hliníkového rotoru se zálitkem pomocí technologie přesného odlévání vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

místo, datum

---

Matěj Závický

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	10
1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ.....	11
1.1 Postup výroby metodou Investment Casting.....	11
1.2 Spojení technologií Rapid Prototyping a Investment casting.....	12
1.2.1 Materiály pro výrobu modelů .....	13
1.2.2 Výroba vstříkovaných voskových modelů .....	14
1.2.3 Materiály používané pro 3D tisk .....	14
1.2.4 Metody 3D tisku .....	15
1.2.5 Výhody a nevýhody použití Rapid prototyping .....	17
1.2.6 Vývoj a současné aplikace.....	18
1.3 Optimalizace kvality odlitků .....	19
1.3.1 Destruktivní metody .....	19
1.3.2 Nedestruktivní metody .....	20
2 ZÁLITKY VE STROJNÍCH SOUČÁSTECH.....	21
2.1 Bimetalické a kompozitní součásti.....	21
2.2 Vývoj a dnešní využití zálitků.....	22
2.3 Materiály zálitků.....	23
2.4 Výhody a nevýhody použití zálitků.....	23
2.5 Způsoby optimalizace vzniku metalurgické vazby .....	23
2.5.1 Hliníkový povlak .....	23
2.5.2 Zinkový povlak.....	24
2.5.3 Cínový povlak.....	24
2.5.4 Al-Fin proces .....	24
2.5.5 Ni + Cu povlak .....	25
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	26
3.1 Rotor se zálitkem.....	26
3.2 Použité materiály .....	27
3.2.1 Zálitek.....	27
3.2.2 Model odlitku a vtokové soustavy.....	28
3.2.3 Skořepina .....	28
3.3 Použitá zařízení .....	28
3.3.1 3D tiskárna.....	29
3.3.2 MK Cyclone .....	29
3.4 Prototypový odlitek .....	30
3.4.1 Simulace lití prototypového odlitku .....	30
3.4.2 Výroba prototypového odlitku.....	31
3.4.3 Vyhodnocení kvality prototypového odlitku.....	32
3.5 Úprava podmínek pro odstranění pórovitosti odlitku.....	36
3.6 Lití po upravení podmínek .....	37
3.6.1 Zhodnocení úprav .....	41
3.7 Návrh dalších úprav.....	42

3.7.1 Slévárenské filtry .....	42
3.7.2 Kalící polymer .....	42
3.7.3 Úprava geometrie zálitku.....	43
ZÁVĚR.....	44

---

---

## ÚVOD

V dnešní době se průmyslová výroba stále více zaměřuje na inovativní technologie a materiály, které umožňují efektivní výrobu komplexních komponent s optimálními vlastnostmi. Jednou z těchto technologií je odlévání kovů s využitím přesného lití, které umožňuje vytvářet složité geometrie a kombinovat různé materiály pro dosažení požadovaných vlastností.

Díky narůstajícím požadavkům zákazníků a recesí výroby v posledních letech jsou slévárny nuceny hledat řešení pro zvýšení kvality produktů a snížení výrobních nákladů. Jedním z těchto řešení je zalévání kovových zálitků do jiného kovového materiálu, reagují tak na současný trend snižování emisí CO<sub>2</sub>. Tato technologie se využívá zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, kde je největší tlak na redukci hmotnosti jednotlivých komponent. K tomu se využívají slitiny hliníku a hořčíku, ačkoli ty vykazují určité nedostatky při vysokých teplotách, jako je ztráta pevnosti nebo otěruvzdornost, eventuálně i deformace a oxidace povrchu. Pro řešení těchto problémů se využívají železné slitiny a tím vzniká technologie výroby bimetalických odlitků, kde hlavní část komponent je vyrobená z lehkých kovů, a slitiny železných kovů jsou použity na kritická místa, kde jsou vyžadovány lepší vlastnosti.

Častým materiálem pro zálitky jsou slitiny oceli, které poskytují vysokou pevnost materiálu, dalšími běžně používanými materiály jsou slitiny mědi, které vynikají svou odolností vůči korozi, vysokou tepelnou vodivostí a kluznými vlastnostmi. Výroba těchto odlitků má několik výhod, jako je snížení nákladů na mechanické zpracování nebo zlepšení schopnosti odlitku vést teplo.

Slévárny také čelí stále rostoucím požadavkům na rychlou výrobu prototypů, a proto se stále více využívá technologií rychlého prototypování, které lze dobře kombinovat s 3D tiskem. Toto propojení, nazývané "hybridní technologie," přináší nové možnosti, ale také výzvy. Hlavními problémy jsou dilatační rozdíly při odlévání prototypů se zálitky, což může způsobit praskání skořepin a vyžadovat nákladné opravy. Další možností jak předejít problémům, snížit náklady a zkrátit dodací lhůtu je využití simulačních programů, díky kterým lze optimalizovat celý proces již před jeho začátkem, nebo ho v průběhu výroby upravit.

Cílem práce je rozbor a výroba hliníkových odlitků s ocelovými zálitky pomocí hybridní technologie vytavitelného modelu za použití zařízení Cyclone. Hlavním úkolem je analyzovat možnosti výroby a kvalitu odlitku rotoru ze slitiny hliníku s ocelovým zálitkem se zaměřením na problematiku praskání skořepiny při odstraňování modelu za vysokých teplot v žíhací peci.

## 1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

Technologie přesného lití, anglicky Investment casting (IC), známá také jako lití na vytavitelný model má dlouhou historii sahající tisíce let zpět. Tato starověká technika byla využívána různými civilizacemi k vytváření složitých kovových objektů. Zahrnuje jednoduchý proces vytvoření voskového modelu, jeho pokrytí keramikou, rozpuštění vosku pro vytvoření dutiny a následné nalití taveného kovu do formy. [1]

Původ technologie přesného lití lze vysledovat až do starověké Mezopotámie a Egypta, kde řemeslníci používali proces ztracené formy k výrobě šperků, figurín a dalších dekorativních předmětů. Technika se dále v průběhu času rozšířila i do starověkého Řecka a Říma. Následně se během středověku začala tato technologie využívat i k výrobě některých funkčních součástí, jako např. částí zbraní a nástrojů. Průmyslová revoluce přinesla pokrok jak v používaných materiálech, tak v technikách výroby, což také vedlo k modernizaci celého procesu IC. [1]

Největšího rozvoje se metoda IC dočkala až ve 20. století zejména v leteckém a automobilovém průmyslu a v lékařství. Použité materiály, vybavení a řízení procesů se dále optimalizovali, což mělo za následek zlepšení kvality odlitků a zvýšení efektivity výroby. Velký pokrok však zaznamenala během druhé světové války kvůli potřebě výroby přesných součástí s komplexní geometrií, jako jsou např. lopatky turbín pro letecké motory, nebo součástky zbraní a vozidel. Tradiční nástrojové procesy nedokázaly uspokojit rostoucí poptávku způsobenou válkou, a proto se metoda IC dále vyvíjela. [1] [2]

Dnes je metoda přesného lití široce využívaným výrobním procesem pro výrobu dílů s přesnými rozměry a složitými tvary (tab. 1), jako jsou např. turbíny, motorové součástky, ale i šperky kde by ruční obrábění bylo nepraktické a neekonomické. Z vysoce specializované metody se vyvinula v běžně rozšířenou technologii, která splňuje požadavky zákazníků na tvarovou a rozměrovou přesnost, stejně jako na materiálovou náročnost odlitků. Je také hojně využívána k rychlé výrobě prototypů, a tak zrychluje celý proces výroby. Vývoj dále urychluje i integrace digitálních technologií a automatizace, což z ní činí všestrannou a nákladově efektivní metodu pro výrobu široké škály součástí. [1] [3] [4]

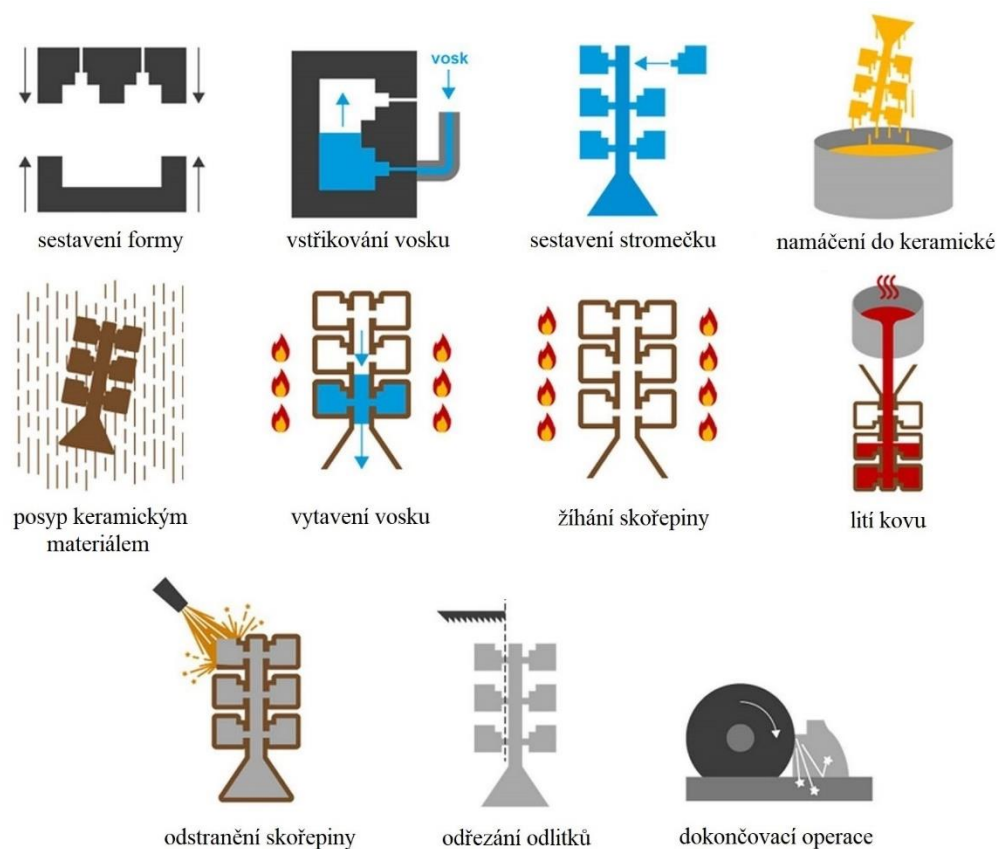
### 1.1 Postup výroby metodou Investment Casting

Proces výroby IC lze rozdělit do několika kroků (obr. 1):

- **Vytvoření voskového modelu** – Vstříkovaním vosku do matečné formy se vytvoří voskový model odlitku. Tento voskový model musí obsahovat veškeré detaily požadované pro finální odlitek. Voskový model je také možné vyrobit ručně buď z jednoho kusu vosku nebo slepením více částí. Tato metoda je hojně využívána v uměleckém lití.
- **Sestavení stromečků** – Sestavování voskových modelů do stromečků je běžnou praxí a přináší několik výhod zejména v oblasti efektivity, manipulace a optimalizace výrobního procesu, protože lze odlít více součástek najednou.
- **Výroba skořepiny** – Hotový voskový model je střídavě namáčen do keramické břechky a následně posypán keramickým práškem, s tím že první 3 vrstvy jsou nejdůležitější, zvláště ta první, a určují tak výslednou kvalitu povrchu odlitku. Po každé vrstvě keramické směsi je nutné model nechat vyschnout, aby se odpařila veškerá vlhkost a zajistilo se pevné spojení mezi jednotlivými vrstvami. Obvykle je zhotoveno 6 až 8 vrstev, dokud není požadovaná vrstva keramiky dostatečně silná.
- **Vytavení vosku** – Skořepinová forma s voskem uvnitř je zahřáta, čímž se vosk rozpustí a vyteče ven. Tím se vytvoří dutina pro samotný odlitek.

- **Žihání skořepiny** – Žihání těsně před litím je velmi důležité a zajišťuje pevnost formy při následném odlévání kovu. Teplota žihání keramické formy je různá v závislosti na materiálu odlitku a aplikaci. Obvykle se u ocelových slitin pohybuje v rozmezí 700 až 900 °C a u hliníkových spíš 300 až 600 °C.
- **Lití kovu** – Roztavený kov se nalije do zahřáté skořepinové formy, kde vyplní celou dutinu. Následně kov ztuhne, čímž vznikne finální odlitek.
- **Odstranění skořepiny** – Po ztuhnutí kovu se skořepinová forma spolu s přebytečným materiálem odstraní, jednotlivé součástky jsou odřezány ze stromečku a jsou připraveny k finální úpravě.
- **Dokončovací operace** – Finální úpravy odlitku jako je broušení, leštění a další povrchové úpravy se odlišují dle požadavků zákazníka.

Je důležité dodržovat pečlivě jednotlivé kroky procesu a zajistit správné podmínky pro každou fázi výroby, což může ovlivnit celkovou časovou náročnost [2] [4]



Obr. 1 Postup výroby pomocí technologie přesného lití (upraveno) [5].

## 1.2 Spojení technologií Rapid Prototyping a Investment casting

3D tisk je stále více využíván v průmyslu díky své udržitelnosti, efektivitě a schopnosti vytvářet složité díly s minimálním odpadem materiálu. Zejména v průmyslu 4.0 hraje klíčovou roli, podporuje automatizaci, digitalizaci a vývoj chytrých materiálů, což umožňuje vytvoření autonomního průmyslového prostředí, a tak je velmi pravděpodobné, že aditivní technologie budou v budoucnu stále více využívány. 3D tisk se využívá k výrobě prototypů, montážních pomůcek, náhradních dílů a komponent do výrobních zařízení. Mimo plastu lze tisknout i z kovů nebo ze speciálních materiálů, které mohou být použity při IC místo vosku. [6] [7]

Technologie Rapid Prototyping (RP) používaná nejen ve slévárenství umožňuje flexibilní, rychlé změny designu a vytváření prototypů bez nutnosti výroby forem nebo nástrojů, což je ideální pro testování nových návrhů a rychlou dostupnost produktů na trhu. [8]

Tab. 1 Porovnání parametrů metod lití (upraveno) [9].

Metoda lití	Rozměry [mm]	Tolerance IT	Hmotnost [kg]	Tloušťka [mm]	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Pískové formy	5 až 5000	15	0,02 až 300 000	3 až 600	12 až 200
Skořepinové formy	2 až 500	13	0,2 až 150	2 až 40	6,3 až 25
Sádrové formy	1 až 500	12	0,1 až 15	1 až 20	1,6 až 12,5
Vakuové formy	5 až 3000	14	0,1 až 1000	2 až 200	12,5 až 200
<b>Vytavitelný model</b>	<b>5 až 2000</b>	<b>10</b>	<b>0,001 až 100</b>	<b>0,2 až 20</b>	<b>1,6 až 25</b>
Spalitelný model	10 až 5000	12	1 až 100 000	2 až 600	12,5 až 100
Keramické formy	1 až 500	13	1 až 1000	2 až 40	3,2 až 25
Kokily	50 až 1000	12	1 až 1000	2 až 600	3,2 až 25
Odstředivé lití	50 až 10 000	12	0,5 až 5000	5 až 500	6,3 až 25
Nízkotlaké lití	50 až 1000	12	0,5 až 1000	2 až 50	3,2 až 12,5
Vysokotlaké lití	1 až 2000	10	0,001 až 15	0,4 až 15	1,6 až 12,5

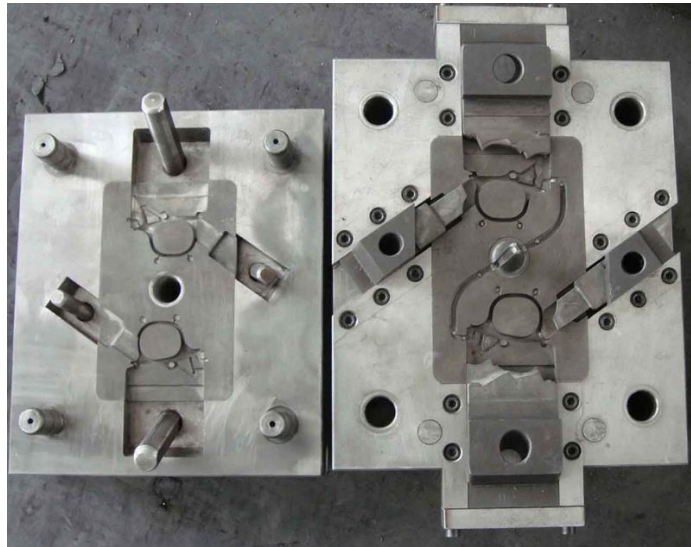
Jelikož je výroba voskových modelů pro IC zdlouhavým procesem, spojení s RP je velice užitečné. Tím vzniká nová metoda tzv. Hybrid Investment casting (HIC) umožňující rychlé vytváření přesných modelů potřebných pro tvorbu forem, přičemž tento proces je mnohem rychlejší než tradiční metody. Dále umožňuje snadnou úpravu návrhu, což podporuje rychlé iterace a vývoj nových produktů. Jejich spojením do jednoho vtokového systému a následné odlití všech najednou vede k výraznému zrychlení celého procesu výroby. [3] [10]

### 1.2.1 Materiály pro výrobu modelů

Při volbě materiálu pro výrobu modelu je nezbytné zohlednit několik faktorů. Mezi ty hlavní patří odhadovaný počet odlitků v sérii, požadovaná kvalita odlitku, fyzikální vlastnosti materiálu jako např. odolnost vůči teplotním změnám a chemickým látkám, snadnost opracování, ale také ekonomické celkové hledisko zahrnující cenu materiálu a náklady spojené s jeho zpracováním. Všechny tyto aspekty pak ovlivňují volbu použitého materiálu. [9]

### 1.2.2 Výroba vstříkovaných voskových modelů

Při výrobě voskových modelů pro IC se používají speciální slévárenské vosky, které se od těch obyčejných značně liší. Slévárenské vosky musí být hlavně schopny reprodukovat detaily, odolávat teplotním změnám a chemickým látkám, a být snadno opracovatelné. Výroba voskových modelů může probíhat vstříkovaním vosku do ocelové matečné formy (obr. 2), která definuje rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu budoucího odlitku. Ocelové matečné formy jsou však velice drahé, a tak se spíše hodí na velké série. V dnešní době se ale stále více využívá 3D tisku pro výrobu ať už menších sérií nebo na odlitky se složitou geometrií. [9]



Obr. 2 : Ocelová matečná forma pro výrobu voskového modelu [23].

### 1.2.3 Materiály používané pro 3D tisk

Jedním z používaných filamentů je PolyCast od společnosti Polymaker z termoplastického materiálu polyvinylbutyrátu (PVB), který je speciálně navržen pro vytváření modelů pro IC. Tento materiál je využíván pro vytváření modelů pomocí aditivní výroby. Díky svým vlastnostem umožňuje PolyCast vytvářet modely s dostatečnou pevností, nízkou tepelnou expanzí a schopností být spálen bez zanechání zbytků. Tímto způsobem je možné efektivně a přesně vytvářet modely, které splňují náročné požadavky na proces výroby tenkostěnných komponent s vysokou přesností a kvalitou povrchu (obr. 3). [11]



Obr. 3 Modely z materiálu PolyCast, skořepiny a hotové odlitky [12].

Nejpoužívanějším filamentem vhodným prakticky na jakékoliv aplikace je Polyactic Acid (PLA), který je také často využíván pro výrobu modelů pro přesné lití. Snadná zpracovatelnost PLA usnadňuje tisk modelů a následné použití při vytváření forem, zatímco jeho velkou výhodou je ekologická šetrnost, a to díky schopnosti PLA filamentu se biologicky odbourat, a zároveň možnost jeho výroby z obnovitelných zdrojů, což ho činí udržitelnou volbou. [13]

Dalším používaným filamentem je Polymethylmethakrylát (PMMA). Díky své dimenzionální stabilitě je PMMA přesnější než standardní voskové modely, což umožňuje eliminovat použití vyrovnávacích nástrojů pro složité tvary. Tato vlastnost PMMA má pozitivní vliv na snížení rizika praskání skořepiny během vypalování modelu. Díky lepší dimenzionální stabilitě PMMA modelů při pokojové teplotě je také možné optimalizovat transport a skladování modelů. Tato kombinace vlastností PMMA materiálu zvyšuje kvalitu modelů a přináší výhody pro výrobu precizních odlitků. [14]

Mezi jedny z největších firem na trhu s průmyslovými tiskárnami je společnost Voxeljet, která mimo průmyslových 3D tiskáren vyrábí i různé vysoce výkonné keramické materiály pro 3D tisk jader pro přesné lití. Tyto keramické materiály jsou využívány také pro výrobu katalyzátorů nebo bioaktivních keramických struktur. Keramické materiály jsou důležité pro vytváření složitých forem a detailů pro přesné lití, což přispívá k vysoké kvalitě a přesnosti výsledných odlitků. [15]

Výroba voskových modelů z materiálu PolySmooth a jejich následné formování pomocí forem ze silikonového kaučuku (Lukoprem N 1522) představuje inovativní přístup k RP pro přesné lití (obr. 4). Model z materiálu PolySmooth vytištěný na 3D tiskárně umožňuje dosažení vysoké kvality povrchu, která je dále ještě zlepšena pomocí povrchové úpravy aerosolem s isopropylalkoholem. Následně je dvousložkový silikonový kaučuk použit pro vytvoření forem s precizním kopírováním povrchu dílů, což zajišťuje požadovanou kvalitu. Tato kombinace materiálů a technologií umožňuje efektivní výrobu voskových modelů s vysokou kvalitou povrchu a snadným vyjímáním modelů z forem, čímž přispívá ke zrychlení a zlepšení procesu výroby. [10]



Obr. 4 Pozitiv vytisknutý na 3D tiskárně, Lukoprenová forma, hotový voskový model [10].

#### 1.2.4 Metody 3D tisku

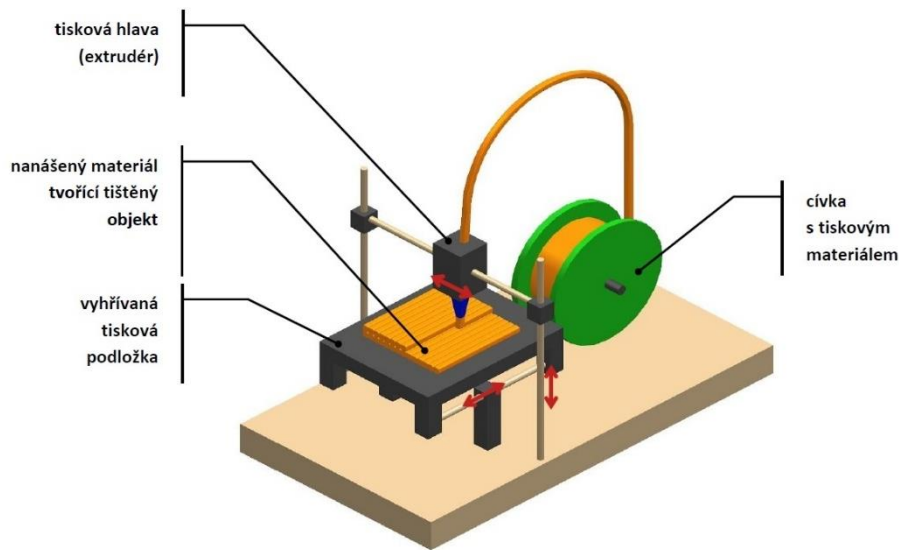
Existuje několik různých metod 3D tisku, z nichž každá má své vlastní zkratky a charakteristiky. Tou nejrozšířenější je Fused Deposition Modeling (FDM), kde se termoplastický materiál zahřívá, extruduje skrz trysku a postupně vytváří vrstvy dílu (obr. 5). Jedná se o cenově dostupnou a jednoduchou metodu, která se často využívá pro prototypování a výrobu konceptů díky své rychlosti a spolehlivosti. Tato metoda je ideální pro tvorbu robustních a funkčních prototypů s možností použití různých materiálů, jako jsou různé druhy plastů s širokou škálou vlastností. [16] [17]

Další metodou 3D tisku je Stereolithography (SLA), kde fotopolymerní pryskyřice postupně tuhne pomocí laserového paprsku, čímž se vytvářejí vrstvy dílu (obr. 6). SLA je známá pro

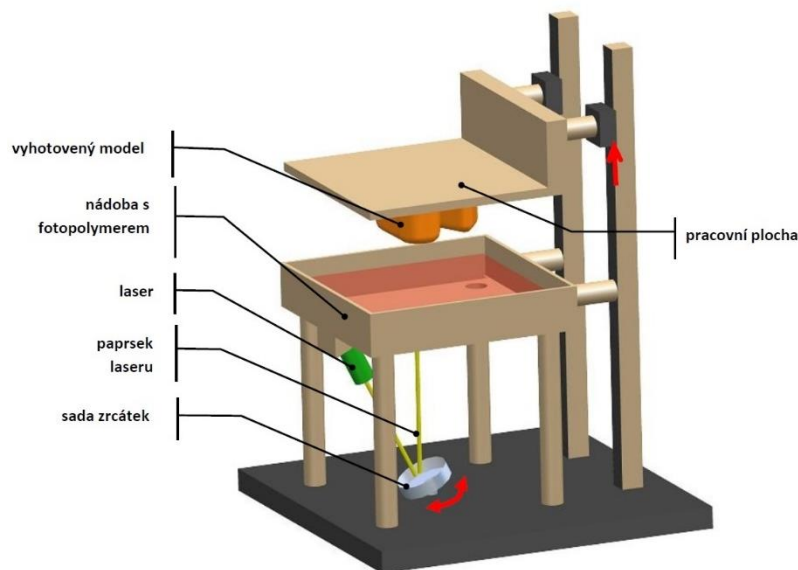
svou schopnost vytvářet detailní a vysoce přesné modely s hladkými povrchy. Tato technologie je často využívána pro výrobu prototypů, modelů a forem pro odlévání. [16]

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) využívá práškový materiál (často keramika nebo kov), který sinitruje (spéká) laserem, čímž se spojuje a vytváří pevnou strukturu. SLS umožňuje vytváření složitých geometrií bez potřeby podpůrných struktur a je oblíbená pro výrobu funkčních prototypů, dílů s vysokou pevností, a dokonce i pro medicínské implantáty. [16] [17]

Mezi další metody patří také Direct Metal Laser Sintering (DMLS), kde kovový prášek kompletně taje pomocí laserového paprsku, čímž se vytvářejí vrstvy kovového dílu. Laminated Object Manufacturing (LOM), kde se vrstvy materiálu (často papír, plast nebo kov) spojují a řezají laserem nebo nožem, čímž se vytváří 3D model. Všechny tyto metody 3D tisku poskytují širokou škálu možností pro výrobu komplexních a funkčních objektů v různých odvětvích průmyslu. [16]



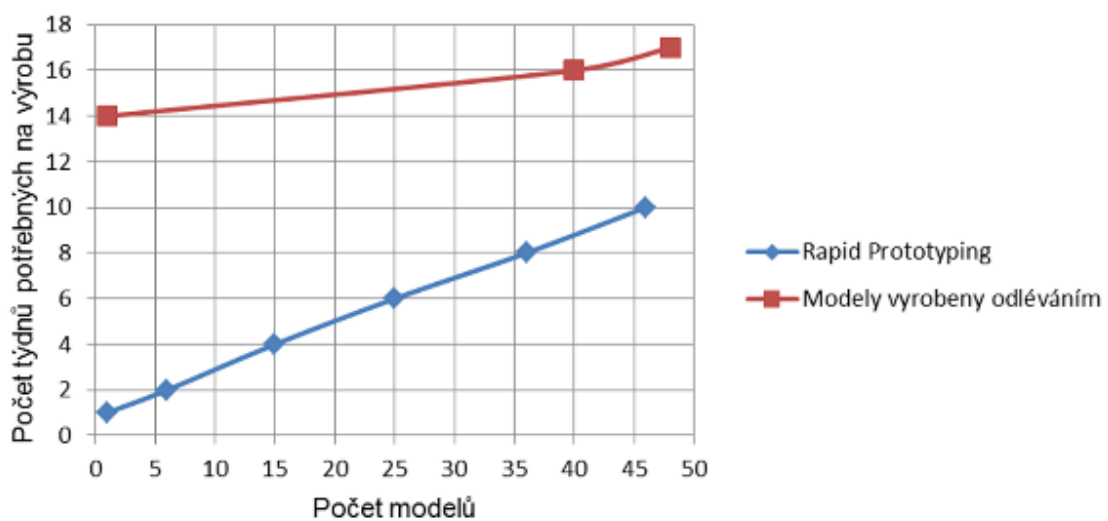
Obr. 5 Metoda Fused Deposition Modeling (FDM) [18].



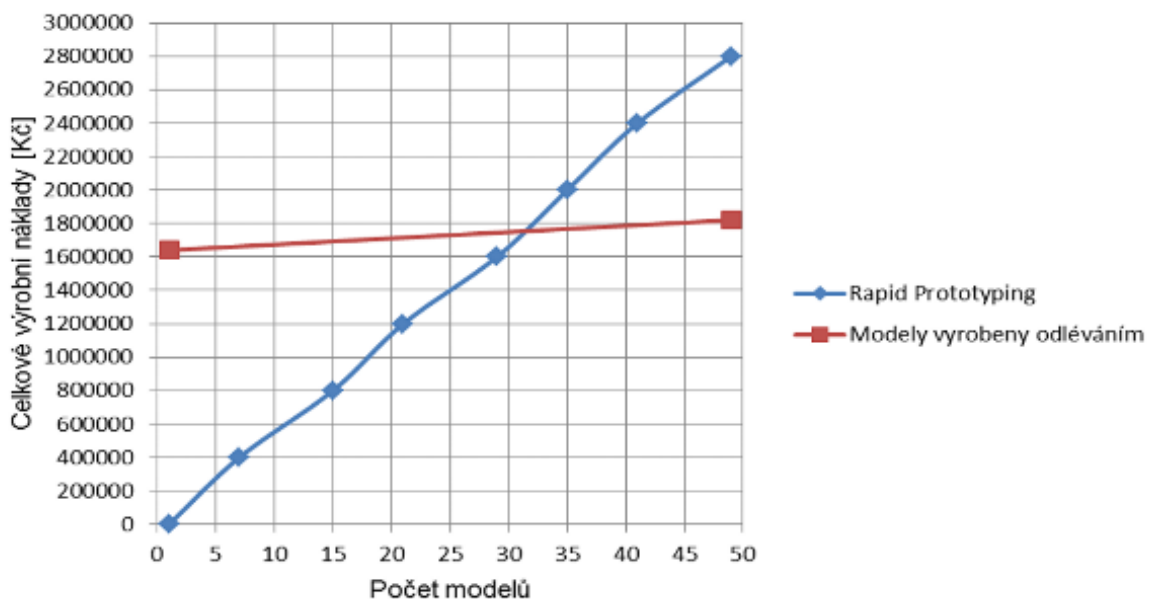
Obr. 6 Metoda Stereolithography (SLA) [18].

### 1.2.5 Výhody a nevýhody použití Rapid prototyping

Využití metod RP přináší několik výhod oproti tradičním metodám výroby voskových modelů pro přesné lití. Jednou z hlavních je schopnost rychle vytvářet voskové modely. Díky použití digitálních dat a automatizovaných procesů může být prototyp vyroben během několika hodin, což je výrazně rychlejší než tradiční metody, které mohou trvat dny až týdny (obr. 7). RP umožňuje snadnou úpravu designu a rychlé iterace prototypů. Pokud je potřeba provést změny v modelu, lze je snadno implementovat do digitálních dat a znovu vytisknout nový prototyp. Tato flexibilita umožňuje rychle reagovat na změny požadavků zákazníka, nové problémy nebo designové úpravy. Pro výrobu menších sérií voskových modelů může být RP ekonomicky výhodnější než tradiční metody, které by byly značně neekonomické. Díky nižším nákladům na výrobu prototypů lze snížit celkové náklady na vývoj nových produktů nebo menší série (obr. 8). [10] [19]



Obr. 7 Graf poměru počtu týdnů výroby s počtem vyrobených modelů pomocí FDM [20].



Obr. 8 Graf poměru celkových nákladů s počtem vyrobených modelů pomocí FDM [20].

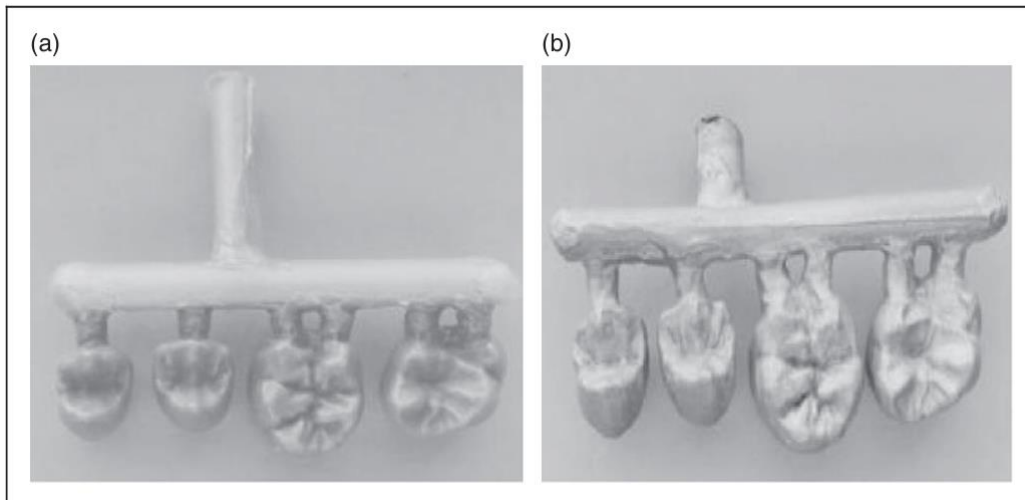
RP umožňuje vytvářet voskové modely s velmi složitými geometriemi a detaily, které by byly obtížné nebo nemožné vyrobit tradičními metodami. Tato schopnost otevírá nové možnosti kreativity při vývoji nových produktů. Celkově lze říct, že RP poskytuje rychlou, flexibilní a efektivní metodu výroby voskových modelů pro přesné lití, což umožňuje rychlý vývoj nových produktů s komplexní geometrií nebo výrobu menších sérií [10]

Existuje ale i několik výzev a omezení spojených s integrováním procesů Rapid Prototyping do již zaběhnutého procesu přesného lití. Pro správnou integraci RP s přesným litím je zapotřebí odborných znalostí a dovedností v obou oblastech, což může být ekonomicky náročné. Materiály používané ve spojení s RP mohou mít odlišné fyzikální vlastnosti než materiály vhodné pro přesné lití, což může ovlivnit kvalitu výsledného odlitku. Integrace těchto procesů může vyžadovat více času než tradiční postupy, což může zpomalit výrobní proces. Investice do technologií RP může být významná, a pro menší podniky tak nemožná. Tyto faktory je důležité zvážit při implementaci procesů RP ve spojení s IC pro dosažení optimálních výsledků. [3]

### 1.2.6 Vývoj a současné aplikace

V oblasti technologie HIC dochází k neustálému vývoji nových technologií, materiálů a postupů s cílem zlepšit přesnost, rychlost a efektivitu výrobního procesu. Nové technologie tisku, jako je například selektivní laserové tavení (SLM) nebo multi-jet tisk, umožňují vytvářet modely s ještě vyšší přesností a optimalizovat geometrie modelů pro přesné lití. Inovativní materiály jako jsou speciální vosky nebo polymery umožňují větší variabilitu v designu a výrobě složitých odlitků. Dále je kladen důraz i na optimalizaci postupů a metod, který vede ke zlepšení efektivity výrobního procesu, zahrnuje zkrácení času potřebného k výrobě modelů a tím snížení nákladů spojených s výrobou. Integrace digitálních technologií, jako je simulace proudění kovu nebo analýza napětí, umožňuje lepší predikci chování modelů během lití a optimalizaci designu pro dosažení požadovaných vlastností odlitků, což zvyšuje kvalitu a spolehlivost výsledných dílů. V budoucnu by mohla robotizace ještě zvýšit produktivitu, snížit chybovost a zefektivnit výrobní proces, např. robotické systémy mohou asistovat při manipulaci s voskovými modely nebo i při tvorbě keramické skořepiny. [3]

Technologie HIC je v dnešní době široce využívána v různých odvětvích a aplikacích. Nejčastěji se používá v průmyslovém designu a vývoji produktů pro rychlé prototypování k testování designů před jejich masovou výrobou. V oblasti zdravotnictví se využívá pro výrobu chirurgických kloubních náhrad, protéz, dentálních implantátů (obr. 9) a na výrobu chirurgických nástrojů. Automobilový průmysl využívá HIC pro vývoj nových dílů, prototypování interiérů a exteriérů vozidel a výrobu náhradních dílů. V letectví je klíčová pro výrobu lehkých a pevných komponent, jako jsou turbíny, ventily nebo modely letadel pro testování aerodynamiky. V oblasti architektury a stavebnictví se používá pro vytváření modelů budov, urbanistických plánů a detailních struktur. V akademickém prostředí slouží k výzkumu nových materiálů, procesů a aplikací v oblasti inovací a technického vývoje. Tyto oblasti ukazují široké spektrum aplikací technologie HIC a její důležitost v moderním průmyslu a výzkumu. [3] [10]



Obr. 9 a) Voskový model zubních náhrad, b) Hotový odlitek zubních náhrad [3].

### 1.3 Optimalizace kvality odlitků

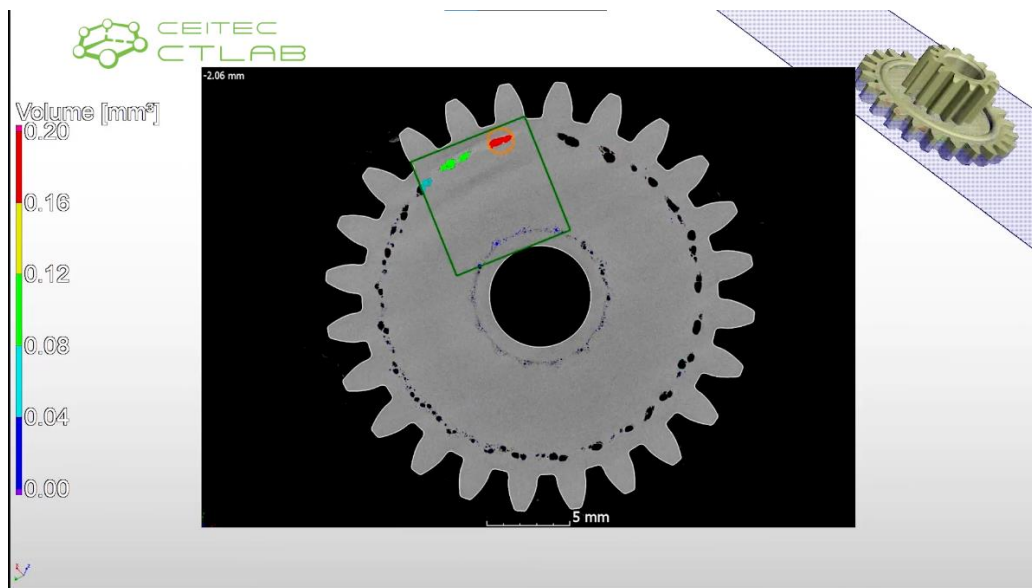
Optimalizace kvality odlitku je klíčová pro zajištění správného výsledku v průběhu celé série výroby. Po odlití prototypového odlitku k ní lze využít jak destruktivní, tak nedestruktivní metody, ale i simulační softwary které celý proces ještě více zoptimalizují. Destruktivní metody zahrnují testování, které způsobí zničení vzorku pro získání informací, zatímco nedestruktivní metody umožňují kontrolu bez poškození. Kombinace obou typů metod umožňuje získat komplexní informace o kvalitě odlitků a zajišťuje, že jsou splněny požadavky zákazníka. V dnešní době se ale stále více využívá simulačních softwarů, díky kterým lze provádět virtuální experimenty, což vede k redukci nákladů a času potřebného pro fyzické testování nových postupů výroby. [21] [22] [23]

#### 1.3.1 Destruktivní metody

Mezi destruktivní metody patří zkouška tahem, která poskytuje informace o mechanických vlastnostech materiálu, zkouška tvrdosti, která měří odolnost materiálu vůči deformaci, a metalografická analýza, která umožňuje detailní studium struktury materiálu a identifikaci vad. Další možností je zkušební odlitek po odlití rozřezat, a tak posoudit jeho kvalitu v řezu. Proto jsou tyto metody často využívány pro získání důkladných informací o materiálu, jeho pevnosti, tvrdosti a struktuře. [23]

### 1.3.2 Nedestruktivní metody

Mezi nedestruktivní metody patří vizuální kontrola, ultrazvuková zkouška, rentgenová zkouška, magnetická částicová zkouška a penetrační zkouška. Vizuální kontrola je nejjednodušší metodou pro identifikaci povrchových vad, zatímco ultrazvuková zkouška umožňuje detekovat vnitřní vadné struktury. Rentgenová zkouška se stává rychlou nedestruktivní metodou nahrazující tradiční, destruktivní a časově náročné procedury analyzování pórovitosti odlitků (obr. 10), zatímco magnetická částicová zkouška a penetrační zkouška jsou efektivní pro odhalení povrchových vad. Tyto nedestruktivní metody jsou široce využívány v průmyslu pro kontrolu kvality odlitků a zajištění jejich správné funkčnosti a bezpečnosti. [23] [24]



Obr. 10 Rentgenová zkouška ozubeného kola pro odhalení pórovitosti [24].

Spojení destruktivních, nedestruktivních metod kontroly odlitku je důležité pro komplexní hodnocení kvality jak jednotlivých odlitků, tak celé série. Tím lze dosáhnout nejefektivnějšího způsobu výroby v celém výrobním procesu. [23]

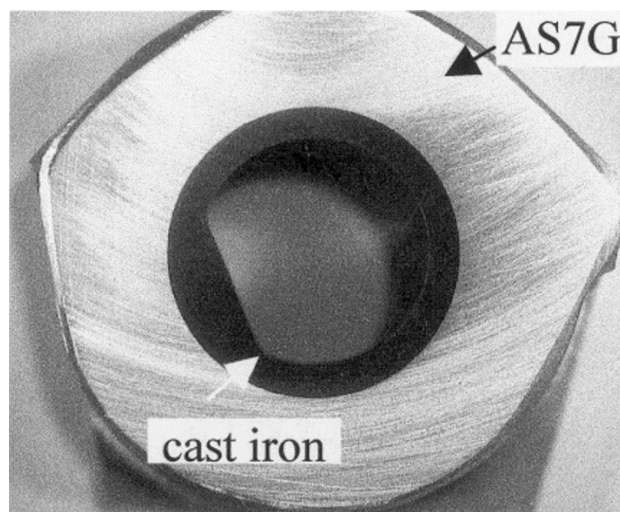
## 2 ZÁLITKY VE STROJNÍCH SOUČÁSTECH

Pro splnění požadavků na úsporu hmotnosti a nízké náklady na výrobu jsou mnohé strojní součásti, které byly dříve vyrobeny celé z jednoho materiálu, nyní vyráběny odléváním lehčích slitin doplněné o zálitky vyrobené z jiného materiálu na místech, kde je požadována např. vyšší pevnost. Tím vzniká tzv. bimetallická součást jejíž hlavní výhodou je mimo jiné hlavně značné snížení hmotnosti, což vede ke zlepšení hospodárnosti výroby. Pokud by se ale nejednalo o spojení pouze kovů, ale např. dřeva a kovu, nabízí se použití přesnějšího termínu kompozitní součást. [25] [26]

### 2.1 Bimetallické a kompozitní součásti

Bimetallická součást je komponenta složená ze dvou nebo více různých kovů spojených dohromady (obr. 11). Tyto součásti mají široké využití nejen ve strojírenství díky svým unikátním fyzikálním a mechanickým vlastnostem. Bimetallické součásti jsou často využívány k dosažení specifických vlastností, jako je kombinace pevnosti, odolnosti proti opotřebení, tepelné vodivosti a koeficientu tepelné roztažnosti, která vede k optimálnímu výkonu a životnosti dané součásti. V automobilovém průmyslu se např. bimetallické součásti používají k redukci hmotnosti vozidel, a tím ke snížení spotřeby paliva. Tyto metody umožňují vytvářet složité součásti s optimálními vlastnostmi pro různé aplikace. [27]

Výroba bimetallických součástí zahrnuje několik metod, které umožňují spojení různých kovů pro dosažení požadovaných vlastností. Mezi tyto metody patří válcování, navařování a compound casting. Jednou z nejběžnějších metod je válcování, kde jsou dvě různé kovové desky nebo pásy pevně spojeny válcováním za tepla nebo za studena. Tato technika umožňuje vytvořit tenkou vrstvu spoje mezi materiály, což zlepšuje jejich adhezi a umožňuje přenos tepla a síly mezi oběma částmi. Další metodou je navařování, kde je jedna kovová vrstva navařena na druhou za vysokých teplot a tlaků, čímž se vytvoří pevný spoj. Tato metoda je často používána pro opravy a renovace bimetallických součástí. Compound casting je metoda spojování kovů přímo při odlévání, kde se vytváří difúzně reakční zóna mezi kovy, což vede k vytvoření kovové vazby. Každá z těchto metod má své vlastní výhody a je vybírána v závislosti na konkrétních požadavcích na výslednou součást. [27] [28]



Obr. 11 Spojení litiny a slitiny hliníku v bimetallickou součást [26].

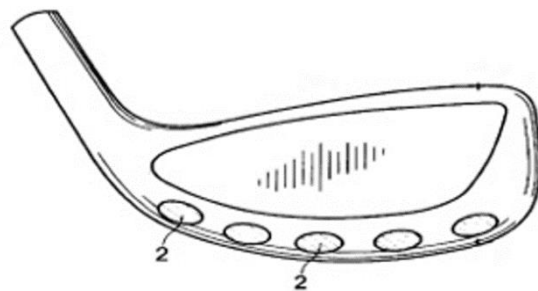
Jako materiály bimetallických součástí jsou často využívány kombinace různých kovů nebo slitin, jako např. ocel s hliníkem, měď s nerezovou ocelí nebo měď s hliníkem. Tyto kombinace materiálů umožňují vytvořit součásti se synergickými vlastnostmi, jako je vysoká pevnost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost nebo odolnost vůči korozním procesům. Spojení

oceli s hliníkem může poskytnout součásti pevnost oceli a lehkost hliníku, což je ideální pro aplikace, kde je potřeba kombinovat pevnost s nízkou hmotností. Měď a nerezová ocel jsou často kombinovány pro své vlastnosti vodivosti a odolnosti vůči korozi, což je užitečné pro elektrická zařízení nebo potrubní systémy. Spojení mědi s hliníkem je často využíváno v elektrických vedeních, transformátorech, chladičích a dalších zařízeních, kde je důležitá kombinace vysoké vodivosti a lehkosti materiálů. Výběr materiálů pro bimetalické součásti je klíčový pro dosažení požadovaných vlastností a optimálního výkonu v konkrétních aplikacích. [27] [28]

Mimo strojírenství lze bimetalické součásti najít i v dalších odvětvích. Ve šperkařství jsou často využívány při výrobě moderních šperků, kde je potřeba kombinovat různé materiály pro dosažení specifické estetiky a funkčnosti. Mohou být použity např. jako spojovací prvky, zdobné prvky nebo pro zvýraznění kontrastu mezi různými částmi šperku. Díky své lehkosti, pevnosti a možnosti různých textur a barev tak poskytují designérům široké možnosti pro tvorbu unikátních a inovativních šperků. Ve sportovním průmyslu jsou kompozitní součásti široce využívány pro výrobu lehčího a pevnějšího sportovního náčiní, jako jsou např. hokejky (obr. 12), golfové hole (obr. 13), tenisové rakety, cyklistická kola a lyžařské vybavení. Díky svým vlastnostem umožňují kompozitní materiály výrobu vysoce výkonných sportovních nástrojů, které jsou odolné a zároveň lehké, což přispívá ke zlepšení výkonu sportovců. [29] [30]



Obr. 12 Systém detekce poruch pomocí měděných vodičů v hokejce [29].



Obr. 13 Využití wolframových závitků v golfové holi (upraveno) [31].

## 2.2 Vývoj a dnešní využití závitků

Používání závitků ve strojírenství pro vytváření bimetalických odlitků prošlo v průběhu času významným vývojem. Postupem času byly vyvinuty různé strategie a techniky, jako je povrchová úprava závitků nebo optimalizace procesních a tepelných parametrů. Pomocí těchto technik je snahou překonat problémy s častou nekompatibilitou závitků se zbytkem odlitku, a dosáhnout tak pevné metalurgické vazby mezi materiály. Díky těmto inovacím se používání závitků stalo běžnou praxí a umožnilo výrobu složitých komponent s vylepšenými mechanickými vlastnostmi a strukturální integritou. [25]

Závitky jsou v dnešní době využívány v široké škále odvětví, včetně automobilového průmyslu, leteckého průmyslu, energetiky, strojírenství a mnoha dalších. V automobilovém průmyslu jsou použity v nejrůznějších motorových součástech. V leteckém průmyslu jsou závitky klíčové při výrobě součástí letadel z hliníkových nebo titanových slitin, které značně snižují jejich hmotnost. V energetice jsou závitky využívány při výrobě turbín, generátorů a dalších velmi namáhaných zařízení. Celkově lze konstatovat, že závitky jsou nedílnou součástí moderního průmyslu a jejich využití je klíčové pro výrobu lehkých, ale zároveň pevných součástí ve všech odvětvích. [32]

## 2.3 Materiály zálitků

Na zálitky v průmyslových aplikacích jsou běžně používány materiály s vysokou odolností a pevností, jako je nerezová ocel, uhlíková ocel nebo slitiny hliníku. Nerezová ocel je oblíbená pro svou odolnost vůči korozi a tepelnému namáhání, zatímco uhlíková ocel nabízí vysokou pevnost a tvárnost. Slitiny hliníku jsou preferovány pro svou lehkost a dobrou korozní odolnost, což je užitečné pro aplikace, kde je důležitá nízká hmotnost a vysoká pevnost materiálu. Spojení těchto materiálů umožňuje vytváření pevných a odolných kompozitních součástí pro různé průmyslové účely. [25]

## 2.4 Výhody a nevýhody použití zálitků

Použití zálitků přináší několik výhod v průmyslových aplikacích. Umožňují také kombinaci různých materiálů s odlišnými vlastnostmi, což poskytuje optimální výkon pro konkrétní aplikace. Díky použití zálitků lze dosáhnout komplexních geometrií a designů, což je užitečné pro výrobu složitých komponent. Další velice významnou výhodou je možnost snížení hmotnosti odlitku, což např. u automobilů vede ke snížení spotřeby paliva, a tím ke zlepšení jak ekonomické, tak i ekologické stránky. [25]

Přestože použití zálitků přináší výhody, existují také určité nevýhody nebo výzvy spojené s tímto procesem. Jednou z nevýhod může být obtížnost dosažení dokonalé metalurgické vazby mezi zálitkem a mateřským materiálem, což může vést k potenciálním problémům s pevností a strukturální integritou bimetallické součásti. Další nevýhodou může být náročnost procesu výroby zálitků, která může zahrnovat složité postupy a specifické technologie. Existuje také riziko vzniku vad, jako jsou trhliny, které přímo ovlivňují kvalitu výsledného produktu. Navíc mohou být náklady spojené s výrobou zálitků vyšší než u jiných metod výroby bimetallických součástí. [25] [31]

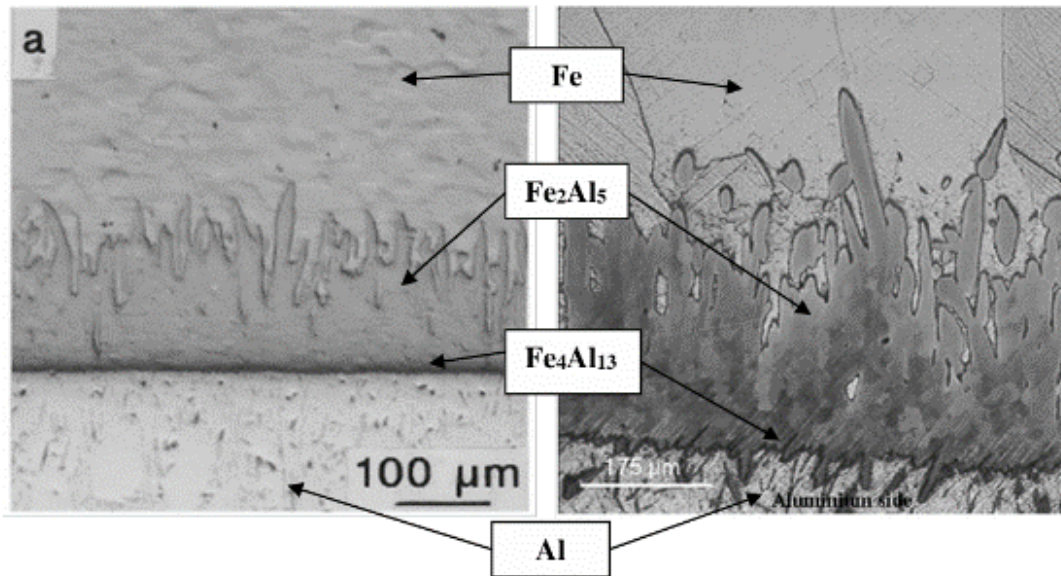
Celkově lze konstatovat, že použití zálitků přináší značné zlepšení pevnosti, odolnosti a designových možností v průmyslových aplikacích, na druhou stranu je ale nutno uvážit i faktory, které tento proces komplikují. [25]

## 2.5 Způsoby optimalizace vzniku metalurgické vazby

Pro zlepšení metalurgické vazby mezi zálitkem a odlitkem je možné využít různé strategie. Lze zvolit materiály, které jsou mezi sebou více kompatibilní, a tak metalurgická vazba vznikne snadněji. To ale nemusí být vždy možné, a tak jednou z dalších možností, jak zlepšit pevnost spoje zálitku a odlitku, je volba vhodného povrchového zpracování zálitku, např. vytvořením drážek a rýh, tvarových výstupků nebo zvětšením kontaktní plochy. Tento způsob ale nemusí zaručit dokonalé vytvoření metalurgické vazby, a tak se nabízí možnost použití speciálních technik spojování, jako např. tepelné zpracování nebo využití povlaků z různých kovů, které mohou metalurgickou vazbu ještě více posílit. [25] [31]

### 2.5.1 Hliníkový povlak

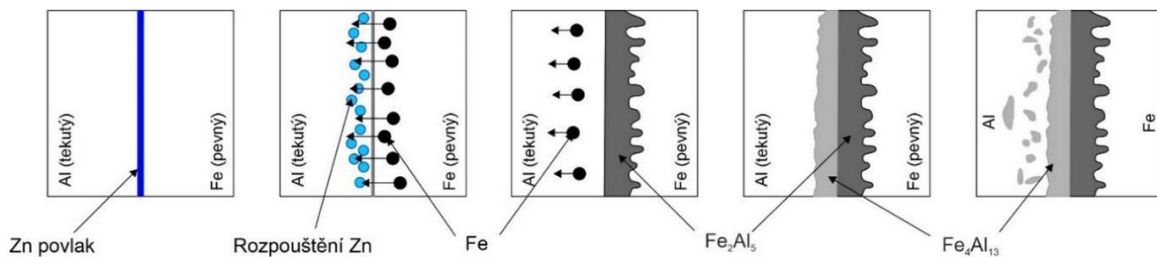
Smáčení povrchu insertu v tekutém hliníku, známé jako alfinace, je jedním z procesů při vytváření metalurgické vazby mezi hliníkovým zálitkem a odlitkem. V případě tekutého hliníku je smáčení klíčové pro vytvoření pevné vazby s povrchem insertu, což zajišťuje stabilitu a pevnost spoje (obr. 14). Je důležité zajistit, aby byl povrch insertu, připravený a čistý pro optimální smáčení a následné vytvoření kvalitní metalurgické vazby. [31] [33]



Obr. 14 Rozhraní Fe-Al [31].

### 2.5.2 Zinkový povlak

Zinkový povlak se využívá ke zlepšení smáčení povrchu insertu tekutým hliníkem a k vytvoření metalurgické vazby mezi zálitkem a odlitkem (obr. 15). Při kontaktu tekutého hliníku a zinku se nataví, což zlepšuje adhezi a minimalizuje tvorbu oxidů. Avšak rychlý růst intermetalických fází na rozhraní může negativně ovlivnit pevnost spoje. [31] [33]



Obr. 15 Vznik metalurgické vazby při použití zinkového povlaku [31].

### 2.5.3 Cínový povlak

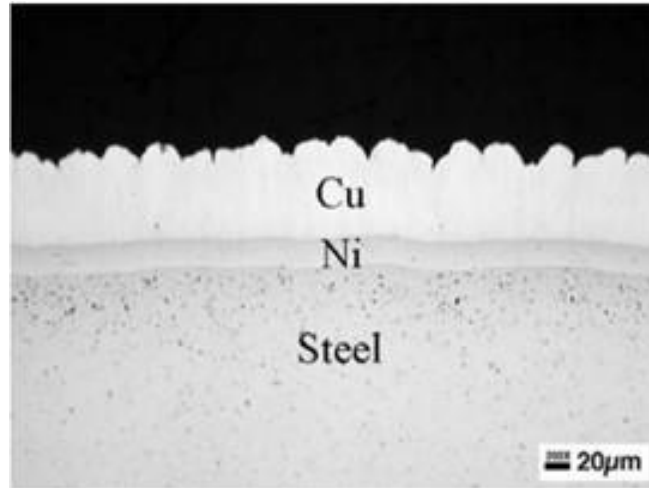
Cínový povlak se využívá k rychlejšímu vzniku metalurgické vazby než v případě zinkového povlaku. Při kontaktu s tekutým hliníkem se cín téměř okamžitě nataví díky nízké teplotě tavení. Avšak velkou nevýhodou je cena cínu, která je výrazně vyšší než cena zinku. [31]

### 2.5.4 Al-Fin proces

Al-Fin proces je efektivní patentovanou technologií pro vytváření metalurgické vazby. Tento proces zahrnuje nanášení povlaku na ocelový insert pomocí difuze atomů hliníku. Po očištění insertu v solné lázni je zajištěna jeho oxidická čistota, což přispívá ke zvýšení kvality vytvořené metalurgické vazby. Al-Fin proces tak umožňuje rychlý vznik, pevnost a stabilitu metalurgické vazby. [31]

### 2.5.5 Ni + Cu povlak

Tento povlak je složen nejdříve z tenčí vrstvy niklu a následně je nanášena tlustší vrstva mědi (obr. 16). Využívá se k redukci oxidů na povrchu insertu, což usnadňuje difuzi atomů a vytváření metalurgické vazby. Tímto povlakem lze, podobně jako u zinkového povlaku, snížit množství oxidů na povrchu, což zlepšuje adhezi a umožňuje vznik kvalitní metalurgické vazby. Nikl je v kontaktu s insertem a měď s hliníkem, což je zvoleno kvůli koeficientům tepelné roztažnosti. [31]



Obr. 16 Ni + Cu povlak [31].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním úkolem experimentální části této bakalářské práce byla výroba a vyhodnocení kvality zadaného odlitku z hliníkové slitiny na výrobním zařízení MK Cyclone.

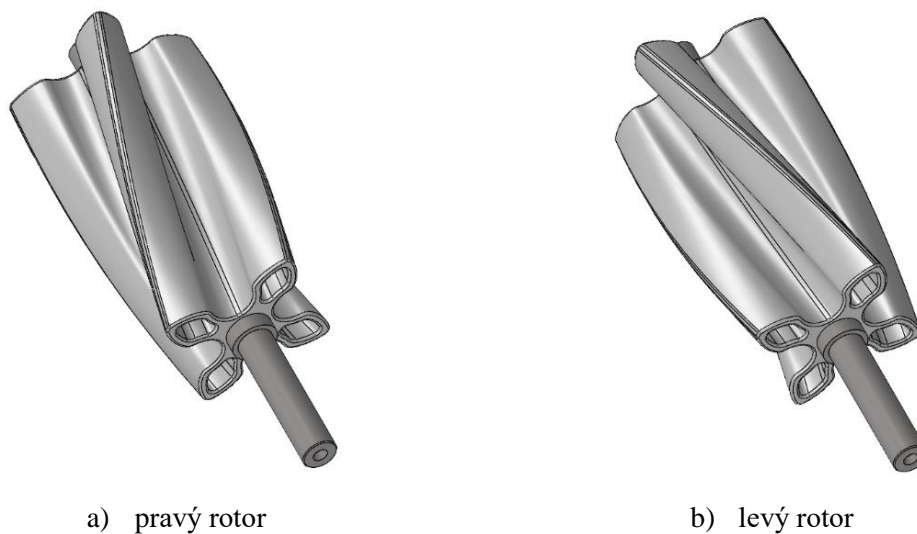
#### 3.1 Rotor se zálitkem

Zadaným odlitkem je rotor se zálitkem ve dvou variantách (obr. 17). Jejich geometrie se liší pouze směrem otáčení šroubovice, a to kvůli svojí funkci v sestavě mechanického dmyhadla typu Eaton (obr. 18), pro plnění dvoudobého motoru.

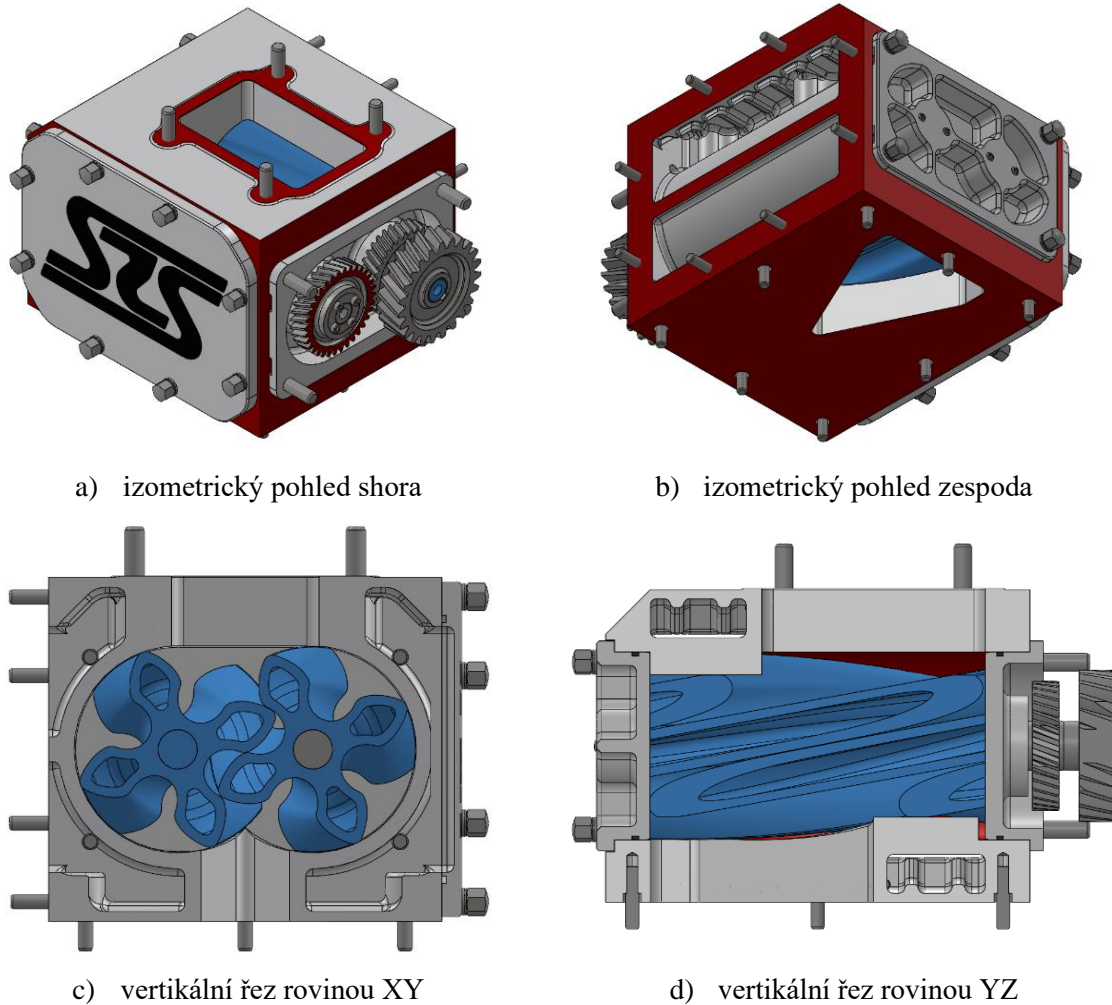
Tento typ dmyhadla je poháněn přímo klikovou hřídelí motoru. Jeho hlavní funkcí je stlačit vzduch a dodat ho do válců motoru s cílem zvýšit výkon. Kompresor s mechanickým pohonem odebírá určitou část výkonu motoru pro svůj provoz, což může způsobit vyšší spotřebu paliva ve srovnání s jinými typy přeplňování, ale zároveň poskytuje vysoký točivý moment i při nízkých otáčkách. [34]

Konstrukce rotoru vychází z požadavků zákazníka na minimální hmotnost, moment setrvačnosti rotačních částí a nízkou cenu při dostatečné přesnosti. Hlavním důvodem, proč zákazník zvolil právě technologii přesného lití je nemožnost malosériové výroby rotorů obráběním za rozumnou cenu. Dalším důvodem bylo i odlehčení pomocí dutých lopatek, které by bylo nemožné zhotovit pomocí obrábění. Důvodem odlehčení byla snaha snížit moment setrvačnosti lopatek, což by mělo mít za následek rychlejší reakci na změnu otáček. Důvodem použití zálitku pak byla nutnost souososti hřídele a samotného rotoru.

Přesné rozměry rotoru si zákazník nepřál zveřejňovat, pro představu se jedná o odlitek dlouhý do 200 mm na délku a do 100 mm v průměru.



Obr. 17 Varianty rotorů.



Obr. 18 Sestava kompresoru od zákazníka.

## 3.2 Použité materiály

Zde je popsáno složení oceli zálitku, parametry tisku rotoru a vtokové soustavy a také materiály použité na keramickou skořepinu.

### 3.2.1 Zálitek

Materiálem zálitku je ocel k zušlechťování s označením ČSN 15 142 QT, kde označení QT je značka tepelného zpracování kalením do oleje s následujícím popouštěním (chemické složení a tvrdosti uvedeny v tab. 2).

Tab. 2 Chemické složení a tvrdosti oceli ČSN 15 142 (upraveno) [35].

Značka oceli	Chemické složení [%]								Tvrdost ve stavu	
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni max.	P max.	S max.	Žih. na měkko	Zušl.
									HB max.	HRC min.
ČSN 15 142	0,38 až 0,45	0,50 až 0,80	0,17 až 0,37	0,90 až 1,20	0,15 až 0,30	0,50	0,035	0,035	217	359

### 3.2.2 Model odlitku a vtokové soustavy

Jako materiál pro 3D tisk byl zvolen PolyCast, který byl přímo vyvinut pro použití ve spojení s technologií IC. Parametry tisku samotného rotoru a parametry tisku vtokových soustav se liší pouze ve výšce vrstvy. Dále se jednotlivé části lišily v době tisku a množství použitého filamentu. Pro lepší porovnání času tisku mezi jednotlivými částmi jsou hodnoty uvedené v tabulce vždy vztaženy pro jeden rotor a jednu kompletní vtokovou soustavu (Tab. 3), kvůli úspoře času se některé části tiskly po více dílech najednou.

Tab. 3 Parametry tisku jednotlivých geometrií

	Výška vrstvy [mm]	Množství výplně [%]	Doba tisku	Použito filamentu [g]
Rotor (prototyp. odlitek)	0,1	7	25 hod 36 min	118,8
Vtoková soustava (prototyp. odlitek)	0,2	7	2 hod 57 min	28,3
Rotor (po úpravách)	0,1	7	23 hod 3 min	109,1
Vtoková soustava (po úpravách)	0,2	7	10 hod 27 min	100,4

### 3.2.3 Skořepina

Pro vytvoření skořepiny je vytištěný model střídavě namáčen do keramické suspenze a následně posypán keramickým materiálem. Primární obal je nejdůležitější, protože na něm závisí celková kvalita povrchu odlitku, proto se používá nejjemnější posyp a vysoce smáčivá suspenze. Zesilovací obaly slouží hlavně k zesílení skořepiny, z důvodu další manipulace a odolání vysokým teplotám, proto se na ně používá hrubší posypový materiál a méně smáčivá suspenze. Větší hrubost posypu pro zesilovací obaly má za následek vysokou prodyšnost, a tím i lepší schopnost vysoušení. Bylo nutné vytvořit osm obalových vrstev (Tab 4), oproti běžně používaným šesti, aby skořepina vydržela zvýšenou teplotu vytavování a rozdílnou teplotní dilataci modelu a keramické skořepiny. Vytavování modelů z materiálu PolyCast ze skořepin je nutné provádět za vyšší teploty, než je obvyklé, aby bylo dosaženo rychlého natavení na stěně skořepiny (tzv. Flash Fire), a celý model se tak mohl vypálit při dosažení co možná nejmenšího množství zbytkového popela. Protože byl jako materiál rotoru zvolena hliníková slitina, nebylo nutné skořepinu před litím žíhat, pouze byla těsně před litím předežhřata.

Tab. 4 Složení skořepin

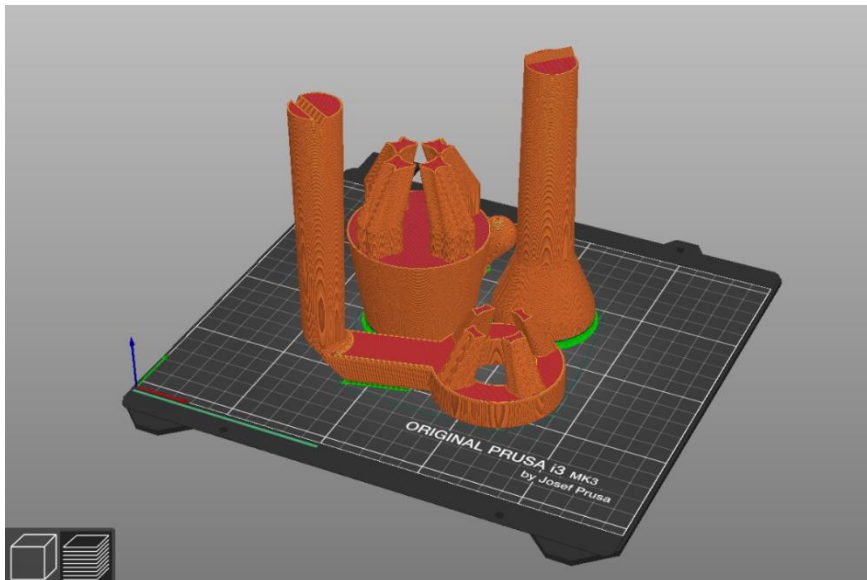
	Počet obalů	Pojivo	Plnivo	Zpevňující vlákna	Posyp
Primární obal	1	Primcote® binder	Ranco-Sil™ 4 fused silica – 200mesh	ne	Zirkon
Zesilovací obal	1	Wexcoat® 24	Molochit – 200mesh	ne	Mulit
Zesilovací obal	6	Wexcoat® 24	Molochit – 200mesh	ne	Molochit

### 3.3 Použitá zařízení

Pro výrobu modelů bylo využito 3D tiskárny a po spojení modelu a vtokové soustavy byla vytvořena skořepina pomocí systému MK Cyclone.

### 3.3.1 3D tiskárna

Modely byly tištěny na 3D tiskárně MK3S od společnosti Prusa Research. Tato 3D tiskárna funguje na základě postupného přidávání materiálu vrstvu po vrstvě. Tento proces je opakem obrábění, kde dochází k ubírání materiálu. Tiskárny MK3S využívají jednu z nejrozšířenějších technologií Fused Deposition Modeling (FDM), kde se materiál pro tisk taví a nanáší tryskou vrstvu po vrstvě. Pro tisk je nutné použít program jako např. PrusaSlicer (obr. 19), který CAD model převede na jednotlivé vrstvy, následně po přesunutí na SD kartu je možné tento soubor otevřít v rozhraní 3D tiskárny a začít tisknout.



Obr. 19 Vrtková soustava v prostředí PrusaSliceru připravená pro tisk.

### 3.3.2 MK Cyclone

Systém MK Cyclone (obr. 20) je inovativní systém pro výrobu skořepinových forem, který se vyznačuje vysokou rychlostí a plnou automatizací. Díky sušící komoře, nádržím na keramickou břečku, sprchovým posypovým komorám a manipulátoru umožňuje výrobu skořepin během několika hodin bez nutnosti obsluhy. Tento systém je ideální pro průmyslovou výrobu forem na přesné lití, rychlé prototypování, zdravotnickou techniku a motoristický sport. [36]



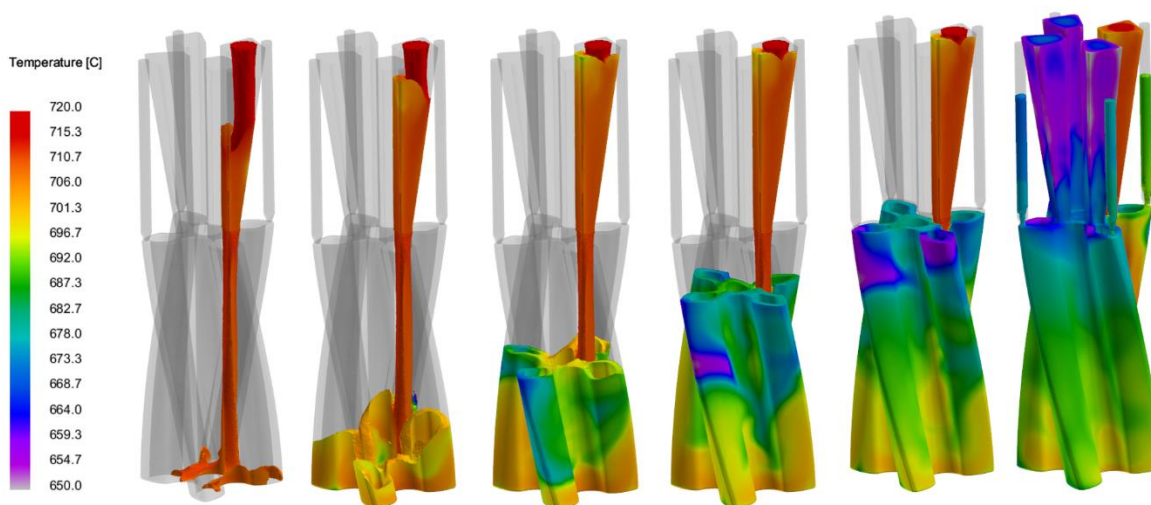
Obr. 20 Kompletní systém MK Cyclone [36].

### 3.4 Prototypový odlitek

Původní verze odlitku použitá pro simulaci byla pouze se čtyřmi výfuky (obr. 21), které plnily jak funkci vtokové soustavy, tak funkci náliťků. Kvůli obtížnému lití kvůli skrz malý otvor pro vtok byla navržena upravená verze se středovou jamkou, díky které se zvětšil otvor pro lití, kterým se utlumil dynamický účinek taveniny a tím zpomalil její proud dále do odlitku (obr. 25). Tyto úpravy však byly provedeny až pro zhotovení simulace, a proto se mohou její výsledky mírně lišit od reality.

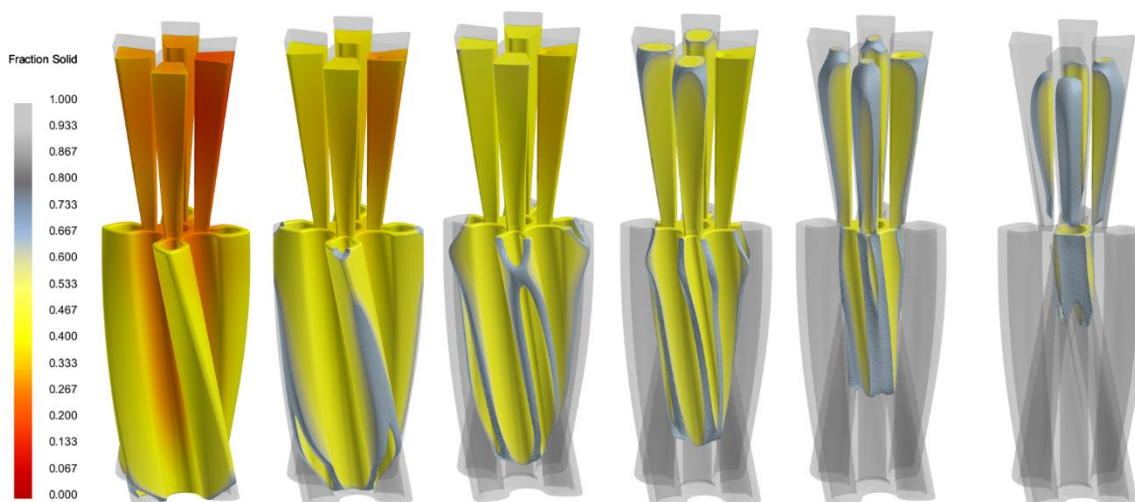
#### 3.4.1 Simulace lití prototypového odlitku

Pomocí programu ProCAST od společnosti ESI Group byla provedena kompletní simulace. Proběhla simulace plnění (obr. 21), tuhnutí (obr. 22 a 23) a simulace vzniku vad (obr. 24).

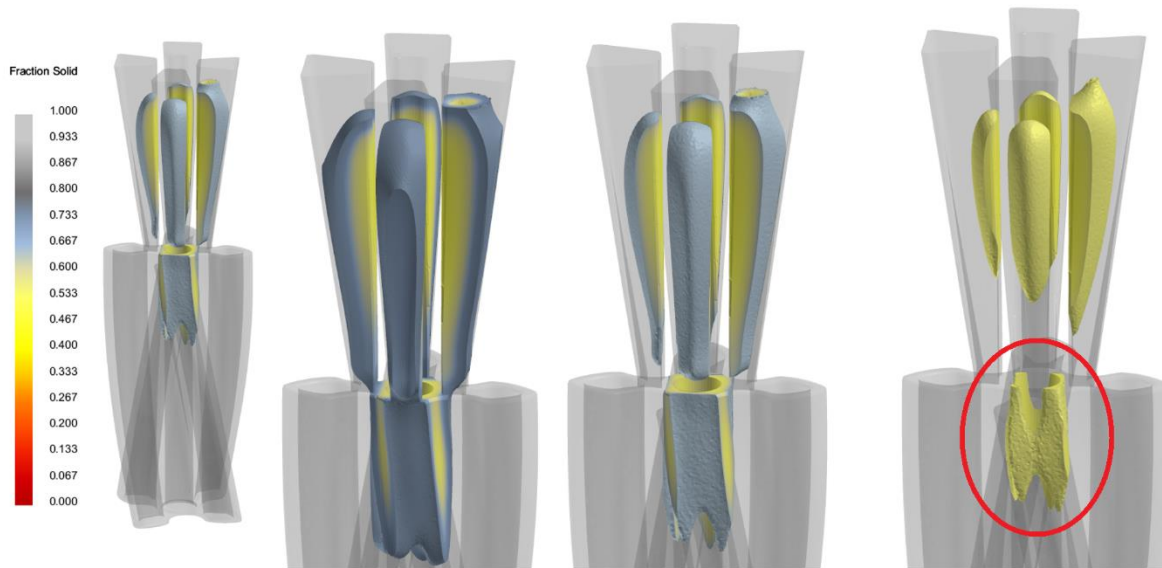


Obr. 21 Simulace procesu plnění.

Při postupném tuhnutí si lze všimnout postupně vznikajícího tepelného uzlu ve vrchní polovině rotoru (červeně zvýrazněno na obr. 23). Tepelný uzel vzniká v místě, v němž kov odlitku tuhne jako poslední. Jedná se o nežádoucí jev, a jeho důsledkem je pak nejčastěji vada ve formě pórovitosti.

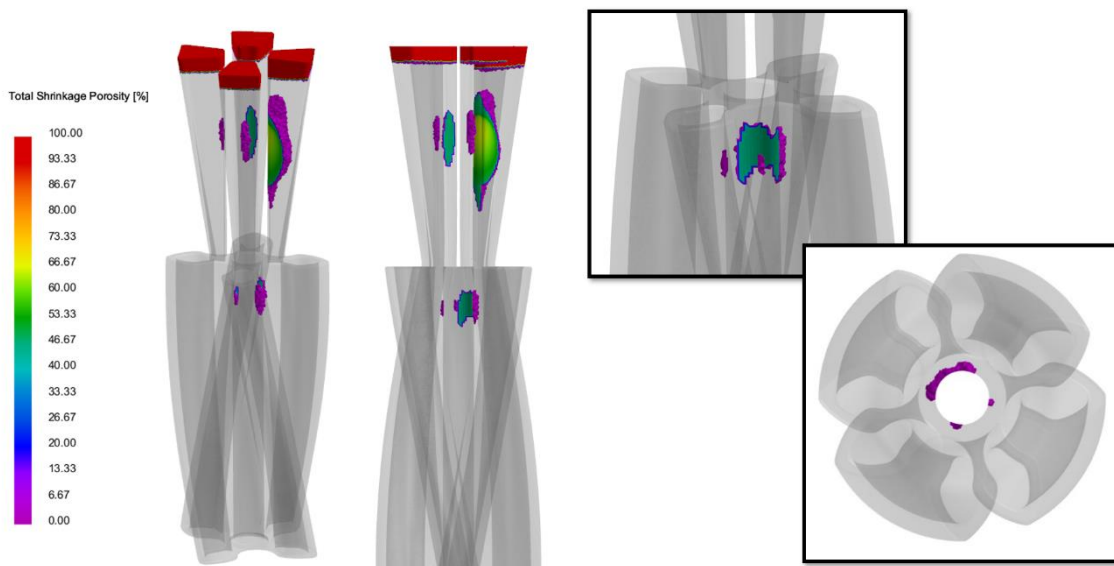


Obr. 22 Simulace tuhnutí prototypového odlitku.



Obr. 23 Vytvoření tepelného uzlu při tuhnutí.

Tepelný uzel viditelný na konci simulace tuhnutí (obr. 23) se v další simulaci potvrdil. Při provedení simulace vzniku vnitřních vad (obr. 24) je vidět mimo vady uvnitř vtokové soustavy, které neovlivňují kvalitu odlitku, i vady uvnitř rotoru zhruba v místě, kde vznikl tepelný uzel.



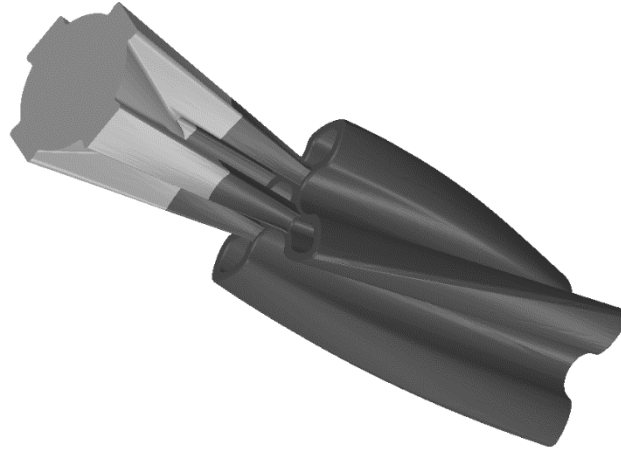
Obr. 24 Simulace vzniku vnitřních vad.

Jelikož byla simulace prováděna na jiné geometrii, než v realitě odlita, bude nutné provést kontrolu kvality hotového prototypového odlitku, aby se posoudila jeho kvalita a případně navrhly změny v procesu lití.

### 3.4.2 Výroba prototypového odlitku

Na 3D tiskárně byl vytištěn upravený model rotoru s výfuky (tmavě šedá část na obr. 25). Při pokusu o vsunutí hřídele do díry bylo však zjištěno, že ji nelze kvůli drážkování zasunout. Proto bylo nutné díru ručně zvětšit pomocí výstružníku. Následně byl vytištěn i zbytek vtokové soustavy (světle šedá část na obr. 25) a spojen pomocí vosku.

Při vytváření skořepiny byl zálitek vsunutý v rotoru a nebyl vyjmut po celou dobu manipulace. Aby se zabránilo popraskání skořepiny byla na konce hřídele aplikována vrstva vosku, která následně vytvořila dilatační spáru. Ze skořepiny vyčníval ve spodní části zálitek, a proto byl postaven mezi dva ocelové bloky, které sloužily zároveň jako chladítka. Celá spodní část byla pak obsypána pískem pro zlepšení stability.



Obr. 25 Geometrie odlitého prototypového odlitku spolu se středovou jamkou.

### 3.4.3 Vyhodnocení kvality prototypového odlitku

Aby se předešlo podobným vadám jako u prototypového odlitku, byla vyhodnocena jeho kvalita a navrženy opatření k jejich odstranění.

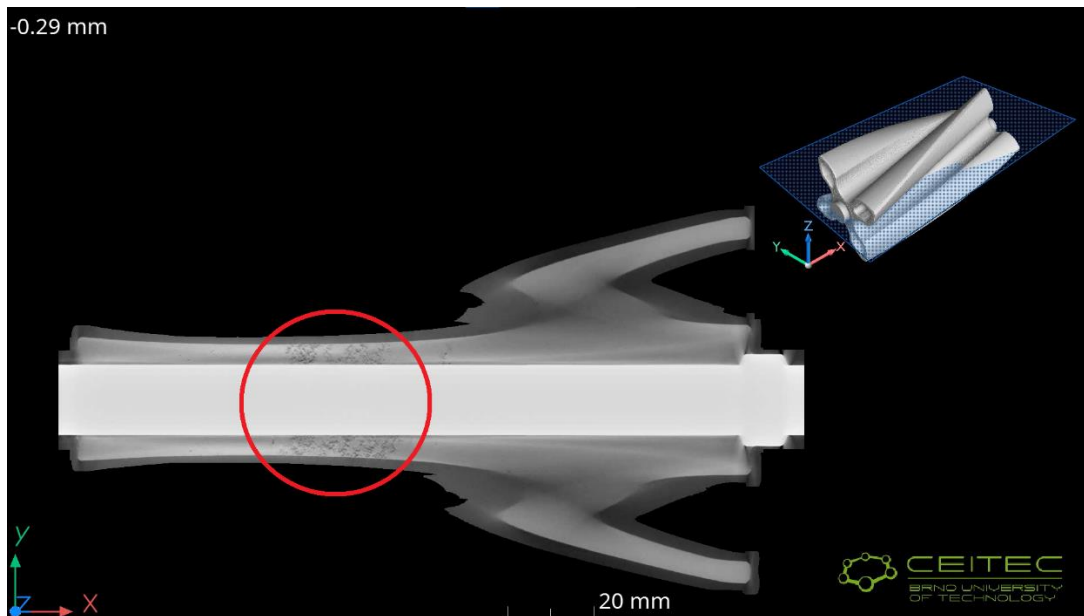
Prototypový odlitek byl na první pohled na povrchu jednoho ze čtyř lopatek rotoru znatelně pórovitý (obr. 26), což způsobily okuje, které se dostaly do taveniny z povrchu zálitku. Okuje vznikly pravděpodobně při vytavování modelu, protože zálitek byl celou dobu vsunut do rotoru a nebylo možné je odstranit. To je hlavním problémem, který by vedl k ovlivnění funkce samotného rotoru.



Obr. 26 Povrchová pórovitost prototypového odlitku.

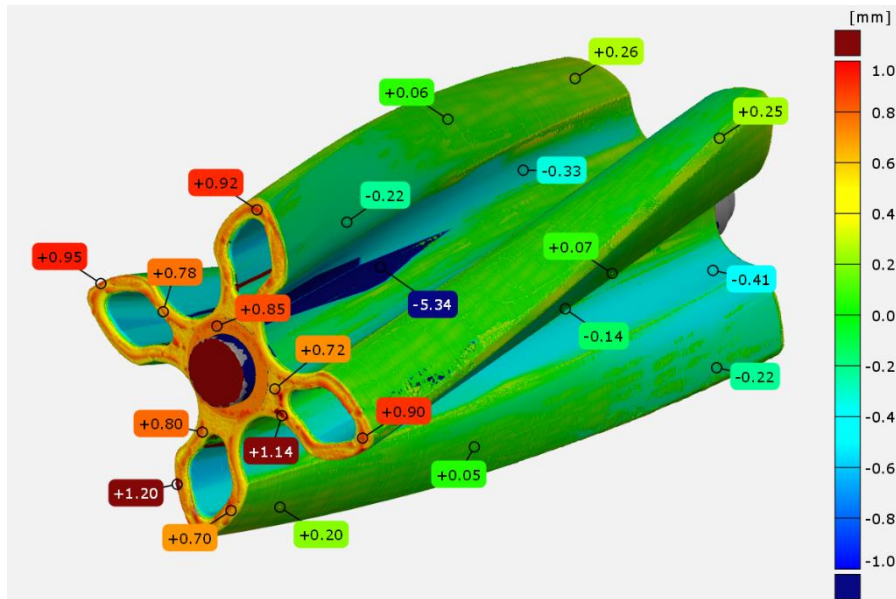
Kvůli podezření na vnitřní pórovitost a celkovému posouzení kvality byla provedena zkouška pomocí počítačové tomografie (CT) ve výzkumném vědeckém centru CEITEC v Brně, která toto podezření potvrdila. Ve vrchní polovině byla patrná vnitřní pórovitost v okolí zálitku

(obr. 27). Ta byla pravděpodobně způsobena vznikem tepelného uzlu a přerušením dosazování z horních nálitků. Malá vnitřní pórovitost je zanedbatelná a neměla by mít vliv na funkci a pevnost samotného rotoru. Na simulaci se však nacházela ve vyšší části odlitku, než v realitě což je pravděpodobně způsobeno odlišnou geometrií lití, než byla použita v simulaci. Dalším důvodem rozdílné pozice pórovitosti je použití ocelových chladítek, na kterých celá skořepina během lití stála, ty totiž do simulace nebyly zahrnuty.

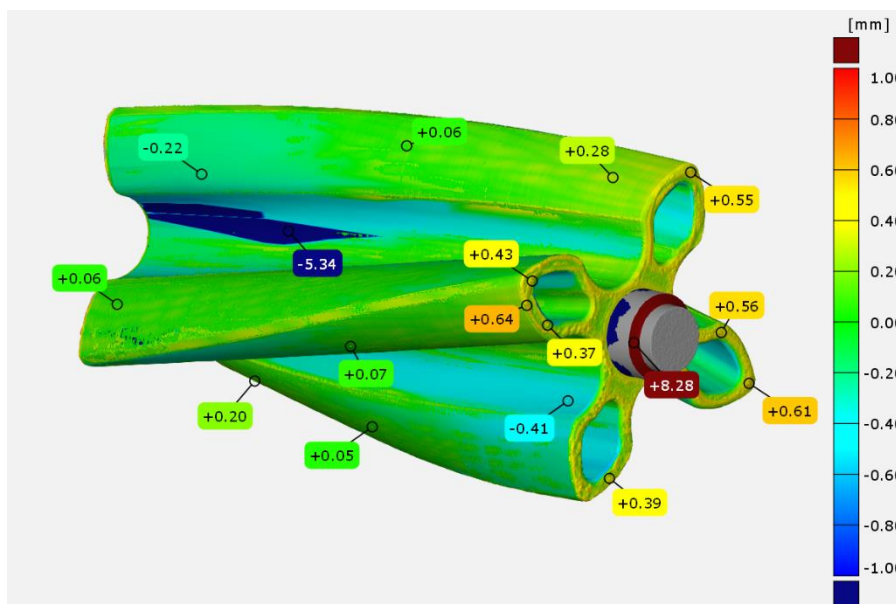


Obr. 27 Vnitřní pórovitost viditelná na rentgenové zkoušce.

Pomocí programu GOM Inspect lze porovnat 3D model s výsledkem rentgenové zkoušky prototypového odlitku exportovaným do formátu stl. Nejprve bylo nutné tyto dva objekty importovat do nového projektu a následně je zarovnat tak, aby se navzájem překrývaly. Rozdíly jsou pak znázorněny pomocí barevné stupnice, dále je možno použít praporky na vybraná místa pro zobrazení konkrétních hodnot odchylek (obr. 28 a 29). Bylo patrné, že největší odchylky se nacházely na obou čelních plochách. Tyto odchylky jsou ale kladné, a tím pádem je možno je odstranit obrobením. Odchylky na zakřivené části nepřesahují hodnotu 0,5 mm, což by nemělo mít vliv na funkci rotoru. Posunutí prototypového odlitku v ose x při provádění rentgenové zkoušky způsobilo chybu ve vykreslování odchylek jak na lopatkách rotoru (tmavě modrá oblast s hodnotou -5,34 obr. 28 a 29) a okolo osazení (tmavě vínová oblast s hodnotou +8,28 na obr. 29). Tyto odchylky byly vyhodnoceny jako chyba programu.

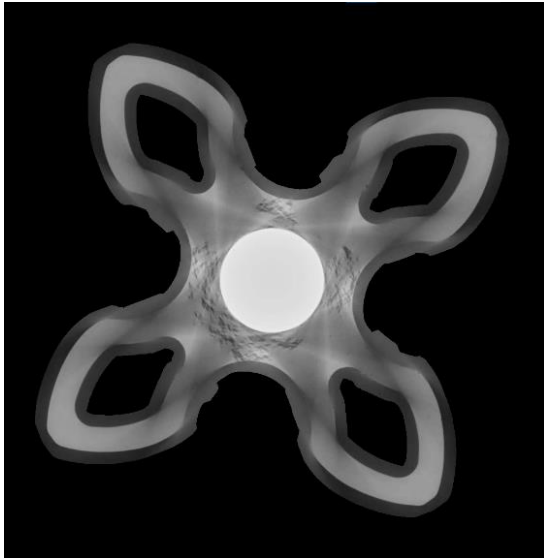


Obr. 28 Pohled na největší odchyly test. Odlitku s použitím programu GOM Inspect.



Obr. 29 Pohled ze strany osazení na odchyly test. odlitku s použitím programu GOM Inspect.

Následně byl prototypový odlitek rozřezán na předem určených místech, kde by se podle CT zkoušky měla nacházet vnitřní pórovitost. Bylo proto provedeno 5 řezů na pásové pile, které vnitřní pórovitost potvrdily. Je zřejmé, že výsledky zkoušky pomocí počítačové tomografie odpovídají realitě (obr. 30).



a) na rentgenové zkoušce



b) vzorek číslo 3 v řezu

Obr. 30 Porovnání výsledků rentgenové zkoušky a řezu ve stejném místě.

Kvůli hrubému povrchu, který vznikl při řezání prototypového rotoru pásovou pilou byl vybrán vzorek označený číslem 2 a jedna jeho plocha vybroušena. Hlavním důvodem bylo zlepšení kvality povrchu pro lepší viditelnost vad a také následné posouzení metalurgické vazby pomocí stereolupy. Celkové zvětšení nastavené na stereolupě bylo 40, pro obě zkoumané plochy. Na nevybroušené ploše byl povrch moc hrubý (obr. 31), aby bylo možné metalurgickou vazbu posoudit.



Obr. 31 Pohled stereolupou na nevybroušený vzorek.

Na vybroušené ploše bylo mimo lepšího pohledu na pórovitost zřejmé, že do rádlování na hřídeli kov při lití nezatekl na všech místech (červeně zvýrazněno na obr. 32), což by mohlo ovlivnit kvalitu metalurgické vazby. Dále je vidět na rozhraní zálitku a odlitku vrstva rezavé barvy. Jedná se pravděpodobně o okuje, které vznikly při vytavování modelu ze skořepiny.

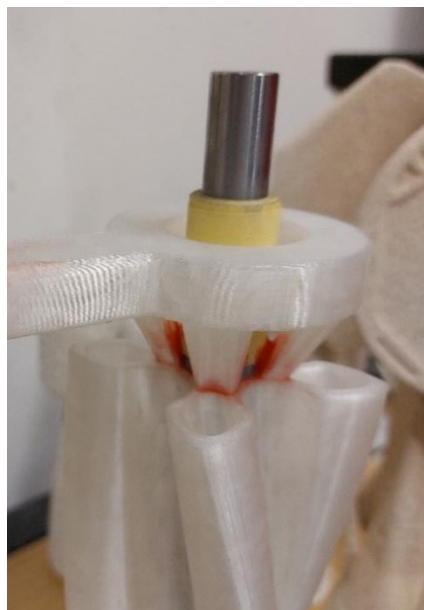


Obr. 32 Pohled stereolupou na vybroušený vzorek.

Celkově byl prototypový odlitek dostatečné kvality, ale s ohledem na malé vady bylo navrženo několik opatření, aby se u dalších odlitků předešlo zejména povrchové pórovitosti.

### 3.5 Úprava podmínek pro odstranění pórovitosti odlitku

Hlavním problémem, který by měl vliv na funkci rotoru, byla povrchová pórovitost, způsobená okujemi na povrchu ocelového zálitku. Tomu lze předejít upravením vtokové soustavy tak, aby bylo možné zálitek před vytavením modelu vyjmout, to s sebou ale neslo určité problémy. Bylo nutné obalit dolní část hřídele za osazením, aby se kolem něj nevytvořila skořepina, kvůli které by nebylo možné zálitek vyjmout (žlutá papírová páska obr. 33). Tuto a některé další části bylo nutné potřít separační tekutinou, na bázi epoxidové pryskyřice, která na povrchu vytvoří tenkou vrstvu. Díky ní se keramická suspenze nepřichytí na povrchu, a tak zde nevznikne skořepina.



Obr. 33 Obalená dolní část hřídele za osazením.

Aby se předešlo vnitřní pórovitosti, byla upravena vtoková soustava tak, že ve vrchní části, kde se nacházely výfuky, se rozšířila do tvaru kužele a sloužila jako nálitek. V první verzi této nové vtokové soustavy byla kuželovitá část výrazně větší (obr. 34 vpravo), ale muselo dojít k úpravě (obr. 34 vlevo) kvůli moc malé mezeře mezi výfuky, která by způsobila nemožnost vytvoření více než tří vrstev skořepiny.



Obr. 34 Prodloužení výfuků.

Bylo také velice důležité přechody mezi jednotlivými díly vtokové soustavy zahradit voskem (červená místa na obr. 33 a 34), aby keramická suspenze při vytváření skořepiny nezatekla do mezer, což by mělo za následek vlhkost uvnitř skořepiny. Ta by způsobila další problémy s litím.

### 3.6 Lití po upravení podmínek

Byla sestavena kompletní vtoková soustava (obr. 35), vytvořeno potřebných 8 obalů skořepiny a následně vypálen model. Zálitek zůstal při vytavování vložený ve skořepině, ale po vytavení byl vyjmut a vzniklé okraje odstraněny. Následně byl zálitek vložen zpět do skořepiny a otvor po vyjmutí byl utěsněn pomocí žárotmelu (tmavě šedá hmota na obr. 36).



Obr. 35 Kompletní sestava připravená k lití.

Při samotném lití bylo nutné dávat pozor na oblast, kde se nachází žárčmel, a to hlavně při otočení skořepiny do lící polohy žárčmelem dolů. Mohlo by se totiž stát, že by zálitek svojí vahou vypadnul ze skořepiny ven.



a) pohled na celou skořepinu



b) detail zatmeleného zálitku

Obr. 36 Hotová skořepina s vloženým zálitkem.

Těsně před litím bylo důležité prohřát skořepinu na dostatečně vysokou teplotu, což by podle předešlých testů mělo trvat 10 až 15 minut. To bylo nutné správně načasovat s momentem dosažení lící teploty hliníkové slitiny stanovené na 730 °C. Zároveň byla snaha neudržovat taveninu na lící teplotě moc dlouho, kvůli možné tvorbě nežádoucích oxidů. (parametry lití a skořepiny uvedeny v tab. 5)

Tab. 5 Parametry lití odlitku s upravenými podmínkami.

Skořepina	
Teplota při začátku lití	550 °C
Doba nahřívání skořepiny	15 min 52 s
Doba chladnutí skořepiny před litím	5 s
Parametry lití	
Označení slitiny	AlSi10Mg
Typ odlévacího zařízení	Ruční pánev
Teplota lití	721 °C
Teplota okolí při lití a tuhnutí	20 °C
Sklon formy	Vertikální bez náklonu

Kvůli možnosti vypadnutí zálitky ze skořepiny skrz žárotmel byla nahřátá skořepina těsně před samotným litím usazena do písku. V průběhu lití bylo nutné ji přidržovat kleštěmi z důvodu její značné výšky a po odlití podepřena ocelovými ingoty (obr. 37).



Obr. 37 Rotor těsně po odlití podepřený ocelovými ingoty.

Zhruba 20 hodin po odlití byla z odlitku ručně odstraněna většina skořepiny. Zbytky skořepiny mezi lopatkami a okolo vtokových kúlů nebylo možné ručně odstranit, protože by hrozilo riziko poškození povrchu rotoru. Ty byly následně odstraněny v pískovacím boxu, pomocí proudu abrazivního materiálu (obr. 38). Do tlakové pistole je přiváděn stlačený vzduch a zároveň tryskací médium ze zásobníku (korund), které je přísáváno podtlakem a poté urychlováno proudícím vzduchem. Tímto způsobem lze odstranit skořepinu bez rizika poškození odlitku.



Obr. 38 Odlitek po odstranění skořepiny.

Po odstranění skořepiny byla ruční pilkou na železo odstraněna i vtoková soustava spolu s nálitky (obr. 39). Ruční pilka byla použita z důvodu malého prostoru mezi vtokovou soustavou a zálitkem a jeho možnému poškození při použití např. úhlové brusky. Následně byl pomocí soustruhu odstraněn i zbytek vtokové soustavy (obr. 40 a 41).



Obr. 39 Odlitek po ručním odstranění vtokové soustavy.



Obr. 40 Odlitek po kompletním odstranění vtokové soustavy.

Skořepinu uvnitř lopatek (obr. 40) bude nutné také odstranit v pískovacím boxu podobně jako skořepinu mezi lopatkami. Pro zrychlení tohoto procesu bude nejdříve nutné vyvrtat otvory skrz jednotlivé lopatky a až pak skořepinu v pískovacím boxu odstranit.



Obr. 41 Finální odlitek.

### 3.6.1 Zhodnocení úprav

Na první pohled byl povrch rotoru velmi dobré kvality. Hlavní problém prototypového odlitku, kterým byla povrchová pórovitost byl z většiny odstraněn. Pouze na špičce jedné z lopatek byla vidět malá porozita (obr. 42). Ta však nebude mít vliv na funkci rotoru.



Obr. 42 Detail na pórovitost na špičce jedné z lopatek.

Celkově byly úpravy odlitku vedoucí k odstranění povrchové pórovitosti, která byla hlavní vadou předešlého prototypového odlitku, vyhodnoceny jako úspěšné. Pro další vyhodnocení kvality by bylo možné použít stejné metody jako u prototypového odlitku. Následně by bylo možné provést i zkoušky pro zjištění kvality metalurgické vazby. Bylo ale rozhodnuto, že tyto zkoušky již není nutné provádět vzhledem k dostatečné kvalitě finálního odlitku a bude možné vyrábět pomocí stejného postupu i další rotory.

### 3.7 Návrh dalších úprav

Vzhledem k dostatečné kvalitě finálního odlitku a úspěšnému odstranění povrchové pórovitosti se nenabízí mnoho změn, kterými by bylo možné kvalitu odlitku ještě více zlepšit. Jedná se spíše o možnosti, jak zachovat stejnou kvalitu při použití jiných slitin nebo geometrií.

#### 3.7.1 Slévárenské filtry

Použití slévárenských filtrů slouží k minimalizaci nečistot odlévaných slitin a je v dnešní době velice populární. Slévárenské filtry se dělí na dva hlavní typy, a to plošné a objemové. Mezi plošné patří tkaninové filtry, ty se používají k odstranění hrubých nečistot z roztaveného kovu. Naproti tomu mezi objemové patří např. pěnové keramické filtry, které jsou více pórovité, což jim umožňuje účinně odstraňovat i ty nejmenší nečistoty. Filtry lze využít i ve spojení s metodami RP, a to připojením samotného filtru přímo na vytištěnou vtokovou soustavu (obr. 43). Pórovitý filtr je nutné obalit voskem, aby kolem něj bylo možné vytvořit skořepinu. Bez tohoto kroku by suspenze zatekla dovnitř filtru a tím ho ucpala.



Obr. 43 Pěnový keramický filtr připojený na vtokovou soustavu.

#### 3.7.2 Kalicí polymer

Velkým problémem odlitků je také vznik tepelných uzlů, způsobený nerovnoměrným tuhnutím. To má za následek přerušení dosazování z nálitku a vznik vad. Tento problém lze vyřešit pomocí polymeru primárně určeného pro kalení. Jeho vlastnosti lze ale využít i ke zrychlení tuhnutí odlitků. Kalicí polymer dodávaný např. firmou POLYQUENCH ve formě koncentrátu je nutné nejprve zředit s vodou v poměru 40 litrů vody na 12,5 kg koncentrátu. Těsně po odlití je pak možné celou skořepinu umístit do zařízení, které ji pomalu spouští do předem připravené nádoby s polymerovou lázní. To má za následek usměrnění tuhnutí, a tak i možnost nahrazení chladítek nebo chlazení pomocí proudu vzduchu. Riziko použití této metody chlazení je však v jeho tekutém skupenství. Pokud se totiž polymer dostane např. prasklinou ve skořepině k roztavenému kovu rychle dosáhne bodu varu, vznikne pára a tím je celý odlitek znehodnocen.

### 3.7.3 Úprava geometrie zálitku

Hlavním problémem zálitku dodaného zákazníkem bylo rádlování. Jeho důvodem bylo zvětšení plochy na rozhraní zálitku a odlitku. Jak se ukázalo při pohledu stereolupou tavenina nezatekla do všech mezer v rádlování. Dalším problémem s rádlováním byla nemožnost vložení zálitku do vytištěného rotoru a nutnost vystružení díry. Tento problém by šlo vyřešit upravením tištěného modelu nebo úpravou geometrie zálitku. Proti protočení by bylo možné na hřídeli vyfrézovat 3 plochy pootočené mezi sebou o  $120^\circ$  a proti axiálnímu posunutí zhotovit 2 zápichy. Tyto úpravy by měly za následek jak zvětšení plochy kontaktu mezi zálitkem a odlitkem tak i zlepšení jejich mechanického spojení.

## ZÁVĚR

Rešeršní část této práce je zaměřena na technologii přesného lití a její využití ve spojení s problematikou zálitků ve strojních součástech. Důraz byl kladen na způsoby propojení tradičních slévárenských metod s novými moderními technologiemi, konkrétně s 3D tiskem, který hraje klíčovou roli v průmyslu 4.0, kde je využíván jak k rychlé výrobě prototypů, tak k výrobě samotných komponent. Jeho cílem je co nejvíce optimalizovat výrobní procesy a dosáhnout vyšší efektivity a přesnosti při výrobě. Hybridní technologie zahrnující kombinaci technologie přesného lití a rychlého prototypování vede k dosažení lepších výsledků a inovativních řešení. Stále více je v dnešní době využíváno bimetalických součástí, a to hlavně díky vysokým nárokům jak na pevnost, tak i na kvalitu povrchu. Nejčastěji spojovanými materiály jsou slitiny železa, z důvodu jejich vysoké pevnosti, slitiny hliníku pro jejich nízkou hmotnost a dále např. slitiny mědi s výbornou odolností vůči korozi. Častý problém bimetalický součástí je však nedokonalost metalurgické vazby mezi nimi, té je však možné dosáhnout buď pomocí povlaků tak i předeřtím skořepiny těsně před litím.

Hlavním úkolem experimentální části pak byla výroba a vyhodnocení kvality odlitku rotoru mechanického dmyhadla typu Eaton, pro plnění dvoudobého motoru. Po prvotní simulaci a odlití prototypového odlitku byly odhaleny vady jak na povrchu, tak uvnitř odlitku, které by měly vliv na jeho funkci. Proto bylo navrženo několik úprav jak postupu, tak i např. vtokové soustavy ke zlepšení jeho celkové kvality. Kvalita takto upraveného odlitku již byla dostatečně dobrá, a proto bude možné vyrobit pomocí stejného postupu i další rotory.

Nakonec byly navrženy ještě další možné úpravy. K nim patří v dnešní době často využívané slévárenské filtry, s cílem minimalizovat nečistoty v odlitku. Dále využití vlastností kalíciho polymeru ke zpomalení tuhnutí odlitků, a tak možné eliminaci vzniku tepelných uzlů. Nakonec byla navržena i úprava geometrie samotného zálitku s ohledem na možnou výrobu rotorů ve větších sériích. Jelikož ale kvalita finálního odlitku byla vyhodnocena jako dostatečná mohou mít tyto úpravy za následek spíše dosažení stejné kvality při použití v jiných aplikacích.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HORÁČEK, Milan. LATEST TRENDS IN INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY, 2008 Dostupné z: <<https://blayson.com/wp-content/uploads/2020/05/2010-Milan-Horacek-Latest-Trends-in-Investment-Casting-Technology.pdf>>. [cit. 2023-11-17].
2. PATTNAIK, Sarojrani; KARUNAKAR, D. Benny a JHA, P.K. Developments in investment casting process—A review. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, roč. 212, č. 11, s. 2332-2348. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>. [cit. 2024-02-15].
3. PATTNAIK, Sarojrani; JHA, Pradeep Kumar a KARUNAKAR, D Benny. A review of rapid prototyping integrated investment casting processes. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2014, roč. 228, č. 4, s. 249-277. ISSN 1464-4207. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1464420713479257>. [cit. 2023-11-16].
4. HORÁČEK, Milan. ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. Online. Brno, 2009. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>. [cit. 2023-11-17].
5. *Fáze přesného lití*. Online. In: Tech. 2021. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/48613>. [cit. 2024-05-15].
6. JANDYAL, Anketa; CHATURVEDI, Ikshita; WAZIR, Ishika; RAINA, Ankush a UL HAQ, Mir Irfan. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. Online. *Sustainable Operations and Computers*. 2022, roč. 3, s. 33-42. ISSN 26664127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>. [cit. 2024-02-08].
7. PRASHAR, Gaurav; VASUDEV, Hitesh a BHUDDHI, Dharam. Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. Online. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023, roč. 17, č. 5, s. 2221-2235. ISSN 1955-2513. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>. [cit. 2024-02-08].
8. VIVEK, Tiwary; ARUNKUMAR, P.; DESHPANDE, A. S.; VINAYAK, Malik; KULKARNI, R. M. et al. Development of polymer nano composite patterns using fused deposition modeling for rapid investment casting process. Online. In: . 020110-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5029686>. [cit. 2023-11-09].
9. BLAŽÍK, P. Lití na vytavitelný model – progresivní slévárenská technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Mikulka. [cit. 2024-02-22].
10. MARKO BEDNÁRIK a JURAJ BENIAK. Rapid prototyping of wax models for investment casting. Online. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2022, roč. 7, č. 2, s. 147-179. ISSN 25828266. Dostupné z: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2022.7.2.0141>. [cit. 2023-11-09].
11. KÖRBER, Selina; VÖLKL, Rainer a GLATZEL, Uwe. 3D printed polymer positive models for the investment casting of extremely thin-walled single crystals. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021, roč. 293. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117095>. [cit. 2024-03-17].
12. Polymaker. (n.d.). PolyCast™. Získáno z <https://polymaker.com/product/polycast/> [cit. 2024-04-18].

13. NGUYEN, Thanh Tan; TRAN, Van Tron; PHAM, Thi Hong Nga; NGUYEN, Van-Thuc; THANH, Nguyen Chi et al. Influences of Material Selection, Infill Ratio, and Layer Height in the 3D Printing Cavity Process on the Surface Roughness of Printed Patterns and Casted Products in Investment Casting. Online. *Micromachines*. 2023, roč. 14, č. 2. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi14020395>. [cit. 2024-04-18].
14. Krutiš, V.; Novosad, P.; Záděra, A.; Kaňa, V. Requirements for Hybrid Technology Enabling the Production of High-Precision Thin-Wall Castings. *Materials* 2022, 15, 3805. <https://doi.org/10.3390/ma15113805>. [cit. 2024-03-17].
15. VOXELJET. *3D printing materials*. Online. [Voxeljet.com](https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/3d-printing-materials/). 2020. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/3d-printing-materials/>. [cit. 2024-03-17].
16. RAMYA, A.; VANAPALLI, Sai Leela. 3D printing technologies in various applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2016, 7.3: 396-409. [cit. 2024-05-16].
17. SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T.C. a RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Online. *Procedia Manufacturing*. 2019, roč. 35, s. 1286-1296. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>. [cit. 2024-05-16].
18. *Přehled technologií 3D tisku*. Online. Dk metal. 2018. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>. [cit. 2024-05-16].
19. PARLAD KUMAR; RUPINDER SINGH a IPS AHUJA. A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process. Online. *Asian Review of Mechanical Engineering*. 2013, roč. 2, č. 2, s. 49-55. ISSN 2249-6289. Dostupné z: <https://doi.org/10.51983/arme-2013.2.2.2346>. [cit. 2024-02-22].
20. ČEJKA, Libor. Aplikace metod Rapid Prototyping ve slévárenské technologii lití na vytavitelný model. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s., CD. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Kosour. [cit. 07.04.24].
21. LUDWIG, Andreas; WU, Menghuai a KHARICHA, Abdellah. Simulation in Metallurgical Processing: Recent Developments and Future Perspectives. Online. *JOM*. 2016, roč. 68, č. 8, s. 2191-2197. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1992-0>. [cit. 2024-03-21].
22. HORÁČEK, Milan. *KERAMICKÉ FORMY*. Online. Odbor slévárenství ÚST: Studijní opory. 2022. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-ii/mhpslkeramickeformy.pdf>. [cit. 2024-03-26].
23. SMUTNÝ, Jakub. Vady odlitků a jejich kontrola Online. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 2020. Dostupné z: <https://theses.cz/id/sqq7ts/> [cit. 2024-03-28].
24. CEITEC. Tomografické měření Analýzy. [online]. Brno: CEITEC, Dostupné z: <https://ctlab.ceitec.cz/cs/analyzy/> [cit. 07.04.24].
25. FERRO, Paolo; FABRIZI, Alberto; BONOLLO, Franco a BERTO, Filippo. Influence of aluminum casting alloys chemical composition on the interaction with a 304L stainless steel insert. Online. *Procedia Structural Integrity*. 2021, roč. 33, s. 189-197. ISSN 24523216. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.023>. [cit. 2024-02-22].

- 
26. VIALA, J.C; PERONNET, M; BARBEAU, F; BOSSELET, F a BOUIX, J. Interface chemistry in aluminium alloy castings reinforced with iron base inserts. Online. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002, roč. 33, č. 10, s. 1417-1420. ISSN 1359835X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00158-6). [cit. 2024-02-22].
  27. TAVAKOLI, A. Manzari; NAMI, B.; MALEKAN, M. a KHOUBROU, I. Influences of Coating Type on Microstructure and Strength of Aluminum–Steel Bimetal Composite Interface. Online. *International Journal of Metalcasting*. 2022, roč. 16, č. 2, s. 689-698. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00630-7>. [cit. 2024-03-14].
  28. ZHANG, Xiaojun; GAO, Kunyuan; XIONG, Xiangyuan; HU, Xiuhua; WANG, Zhen et al. Effect of Si addition to Fe on the formation and growth of intermetallic compounds in Fe/Al composites. Online. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024, roč. 28, s. 1294-1302. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.064>. [cit. 2024-03-14].
  29. DAVIES-FREY, Declan; BOWKETT, Mark; CONSTANT, Ewen a THANAPALAN, Kary. Failure detection of composite materials in sport applications. Online. In: *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. IEEE, 2020, s. 563-567. ISBN 978-1-7281-5953-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263966>. [cit. 2024-03-14].
  30. ABISUGA, Oluwayemisi Adebola; DORAN, Kallie; DE BEER, Deon a DU PREEZ, W. Study of Investment Casting Process For 3D Printed Jewellery Design. Online. *MATEC Web of Conferences*. 2022, roč. 370. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237004002>. [cit. 2024-03-17].
  31. STRAKA, Pavel. Výroba hliníkových odlitků s použitím kovových zálitků u technologie odlévání do keramických skořepin Online. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139819>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš. [cit. 2022-05-07].
  32. UTHAYAKUMAR, M., G. PRABHAHARAN, S. ARAVINDAN a J.V. SIVAPRASAD. Study on Aluminum alloy piston reinforced with cast iron insert. *International Journal of Material Science* [online]. 2008, 3(1), 1-10. ISSN 0973-4589. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/312494582\\_Study\\_on\\_Aluminum\\_alloy\\_piston\\_reinforced\\_with\\_cast\\_iron\\_insert](https://www.researchgate.net/publication/312494582_Study_on_Aluminum_alloy_piston_reinforced_with_cast_iron_insert). [cit. 2024-02-22].
  33. SODERHJELM, Carl. Multi-material metal casting: metallurgically bonding aluminum to ferrous inserts. *Worcester Polytechnic Institute: Worcester, MA, USA*, 2017. [cit. 07.04.24].
  34. STANISLAV, Nikolaievskiyi. *Rekuperace kinetické energie u automobilů*. 2023. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum. [cit. 2024-04-27].
  35. *Ocel k zušlechťování ČSN 15142*. Online. T-PROM s r.o. 2024. Dostupné z: <https://www.tprom.cz/wiki/ocel/15142>. [cit. 2024-05-01].
  36. MCAE SYSTEMS, S.R.O. *MK Cyclone - Nová technologie pro výrobu skořepinové formy od MCAE Systems, s.r.o.* Online. Plasticportal.cz. 2016. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/mk-cyclone-nova-technologie-pro-vyrobu-skořepinove-formy-od-mcae-systems-sro/c/3809/>. [cit. 2024-04-18].
-

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

Označení	Legenda
AlSi10Mg	slitina hliníku
CAD	computer-aided design
CT	počítačová tomografie
DMLS	direct metal laser sintering
FDM	fused deposition modeling
HIC	hybrid investment casting
IC	investment casting
LOM	laminated object manufacturing
PLA	polyactic acid
PMMA	polymethylmethakrylát
PVB	polyvinylbutyrát
RP	rapid prototyping
SLA	stereolithography
SLM	selektivní laserové tavení
SLS	selective laser sintering