



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY 3D TISKU PRO SLÉVÁRENSKÉ APLIKACE

3D PRINTING METHODS FOR FOUNDRY APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Rendek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Andrej Rendek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.
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 bakalářské práce:

Metody 3D tisku pro slévárenské aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk modelů a forem se rozvíjí raketovým tempem, přičemž dodavatelé neustále přicházejí s řadou novinek v koncepci svých zařízení, zejména s ohledem na rozměrové možnosti, rychlosti tisku a dále se rozšiřující portfolio tištěných materiálů. 3D technologie tisku nalézají své uplatnění v řadě slévárenských aplikací, nicméně chybí přesnější znalosti o vlastnostech, vhodnosti použití a chování jednotlivých materiálů ve vztahu k navazující slévárenské technologii. Technologie odlévání do keramických skořepin stále častěji využívá 3D tisk modelů a z toho vyplývá nutnost rozšíření know – how v této oblasti.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provedení literární rešerše současných metod 3D tisku se zaměřením na technologii odlévání do keramických skořepin. Pro konkrétní model odlitku bude pomocí 3D tisku připraveno několik modelů z různých materiálů a tyto modely budou mezi sebou porovnány a vyhodnoceny s ohledem na vhodnost pro technologii lití do keramických forem. Budou porovnány vlastnosti a případně i finanční náklady pro zvolené metody tisku.

Seznam doporučené literatury:

GIBSON, I., D.W. ROSEN and B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-1120-9.

ČAGÁNEK, R. Možnosti uplatnění moderních aditivních technologií při výrobě prototypových odlitků. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.

Encyklopedie 3D tisku. Aditivní výroba & Rapid Prototyping [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z:
<http://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>

Termín odevzdání bakalářské 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

RENDEK Andrej: Metody 3D tisku pro slévárenské aplikace

Bakalárska práca je zameraná na aplikáciu 3D tlače pre zlievarenstvo, konkrétne pre technológiu presného odlievania. V práci sú opísané rozdielne metódy tlače a princípy na ktorých sú založené s podrobnejším popisom materiálov obsahujúcim ich vlastnosti a v niektorých prípadoch aj doporučené modifikácie procesu odlievania. Posledná časť je venovaná cenovému zrovnaniu troch vybraných druhov tlače modelov pre použitie v presnom odlievaní a dilatometrii šiestich materiálov s určením ich koeficientov tepelnej expanzie a teplôt skleného prechodu.

Kľúčové slová: 3D tlač, presné odlievanie, dilatometria

ABSTRACT

RENDEK Andrej: 3D printing methods for foundry applications

The bachelor thesis is focused on the application of 3D printing methods for foundries, specifically for investment casting technology. The paper describes different printing methods and principles which they are based on with a more detailed description of materials containing their properties and in some cases recommended modifications of the casting process. The last part is devoted to price comparison of three selected methods of model printing for investment casting and dilatometry of six materials with evaluation of their coefficients of thermal expansion and glass transition temperatures.

Key words: 3D printing, investment casting, dilatometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

RENDEK, Andrej. *Metody 3D tisku pro slévárenské aplikace* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124357>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že som predloženú bakalársku prácu vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a informačných prameňov, ktoré sú uvedené v zozname na konci práce.

V dňa 26.6.2020

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D. za cenné pripomienky a rady týkajúce sa spracovania bakalárskej práce. Zároveň ďakujem svojej rodine za prejavenu podporu počas štúdia.

OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Pod'akovanie

Obsah

ÚVOD	9
1 TECHNOLÓGIA PRESNÉHO ODLIEVANIA	10
2 ADITÍVNA VÝROBA U PRESNÉHO ODLIEVANIA	11
3 DRUHY 3D TLAČE S POUŽÍVANÝMI MATERIÁLMI	13
3.1 FDM – Fused deposition modeling.....	13
3.1.1 Vosk.....	14
3.1.2 PolyCast.....	15
3.1.3 ABS – Akrylonitrilbutadiénstyren.....	16
3.2 MJP – MultiJet Printing.....	18
3.2.1 Vosk.....	18
3.3 SLA – Stereolitografia.....	19
3.3.1 Somos® Element.....	19
3.3.2 PolyJet.....	20
3.4 SLS – Selective laser sintering.....	22
3.4.1 HIPS – High impact polystyrene.....	22
3.4.2 PC101 – PrimeCast 101.....	23
3.4.3 CastForm.....	24
3.5 BJ – Binder jetting.....	24
3.5.1 PMMA – Polymetyl metakrylát.....	25
4 DOPAD 3D TLAČE KOVU NA PRESNÉ ODLIEVANIE	27
5 CENOVÉ POROVNANIE VYBRANÝCH DRUHOV TLAČE	29
6 DILATOMETRIA	31
7 ZÁVERY	36

Zoznam zdrojov

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

ÚVOD

Existuje viacero metód pre výrobu odliatkov, ktoré môžeme deliť podľa rôznych kritérií. Jedným z najzákladnejších patrí delenie podľa charakteru formy, a to na odlievanie do trvalej a netrvalej formy. Odlievanie do netrvalej formy je možné ďalej rozdeliť podľa toho, či je použitý trvalý alebo netrvalý model. Technológia na ktorú je práca zameraná využíva netrvalý model aj formu a nazýva sa presné odlievanie. [1]

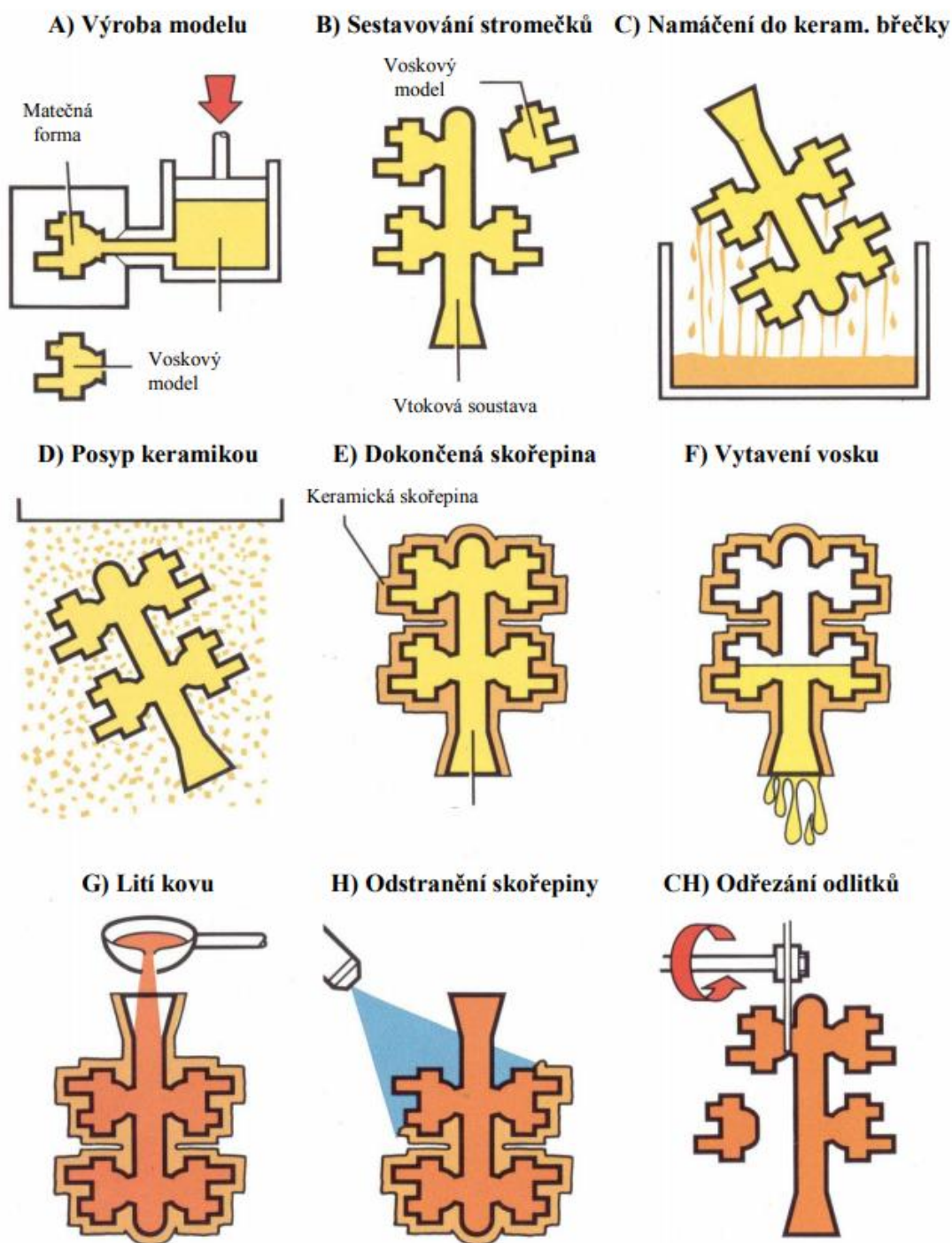
Univerzitná zlievareň je vybavená zariadením Cyclone (obr. 1) kombinujúcom nádrž s keramickou suspenziou, zásobník ostriva a komoru pre sušenie obalovej vrstvy. Cyclone je plne automatizovaný a umožňuje kompletne vytvorenie formy už do štyroch hodín. Model požadovaného tvaru je typicky vytvorený vstrekom roztaveného vosku do kovovej formy. Až v kombinácii s tlačou modelov je však možné využiť jeho potenciál pri prototypovaní odliatkov naplno. [2], [3]



Obr. 1 Zariadenie Cyclone [4]

1 TECHNOLOGIA PRESNEHO ODLIEVANIA

Technológia presného odlievania schematicky znázornená s jednotlivými krokmi na obr. 2 (anglicky „investment casting“) je jednou z popredných metód v modernom zlievarenstve. Jej vzostup podmienili požiadavky na rozmerovú presnosť, tvarovú komplexnosť odliatkov a materiálová náročnosť. [5], [6]



Obr. 2 Schéma metódy odlievania do keramických škrupín [5]

Použitie tejto technológie je predovšetkým vhodné, keď je jedinou praktickou resp. ekonomickou metódou produkcie alebo pri súčiastkach, ktorých plochy by nebolo možné bezproblémovo, či vôbec obrobit'. Cieľom je odliat' súčiastku s dobrou akosťou povrchu, ktorá nepotrebuje ďalšie dokončovacie operácie, čo značne skraca celkový čas výroby a znižuje náklady. Tento proces sa dá menovite využiť pri odlievaní lopatiek turbín znázornených na obr. 3 a rôznych iných komponentov v leteckom priemysle. [5], [6]

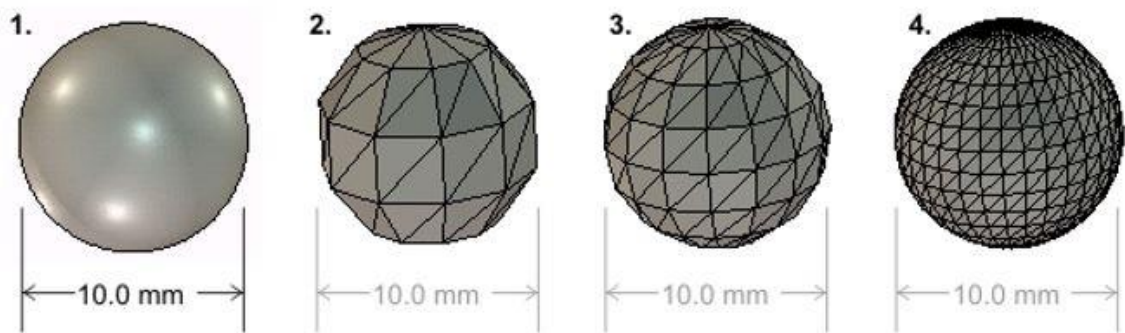


Obr. 3 Lopatky turbíny vyrobené presným odlievaním [7]

2 ADITÍVNA VÝROBA U PRESNÉHO ODLIEVANIA

Aditívna výroba, ktorá je charakterizovaná ako proces pri ktorom je model vytvorený spojením jednotlivých vrstiev materiálu o rovnakej hrúbke v rovine XY je taktiež nazývaná ako 3D tlač. Vrstvy pridávaného materiálu sú nahromadené na sebe v ose Z, tým pádom vzniká model o troch dimenziách. Aditívna výroba výrazne zjednodušuje výrobu trojrozmerného modelu oproti iným výrobným procesom, ktoré vyžadujú analýzu geometrie súčasti a dôkladné premyslenie týkajúce sa využiteľných technológií, používaných nástrojov a samotného poradia, v ktorom budú prvky súčasti vytvorené. V porovnaní pri využití 3d tlače je nutná „iba“ základná znalosť princípov využívaných typov tlače a náležitých materiálov. Aditívna výroba postráda obmedzenia trieskového obrábania a poskytuje väčšiu voľnosť a možnosti pri návrhu produktu. Navyše má veľký potenciál na zmiernenie dopadu na životné prostredie. [8], [9], [10]

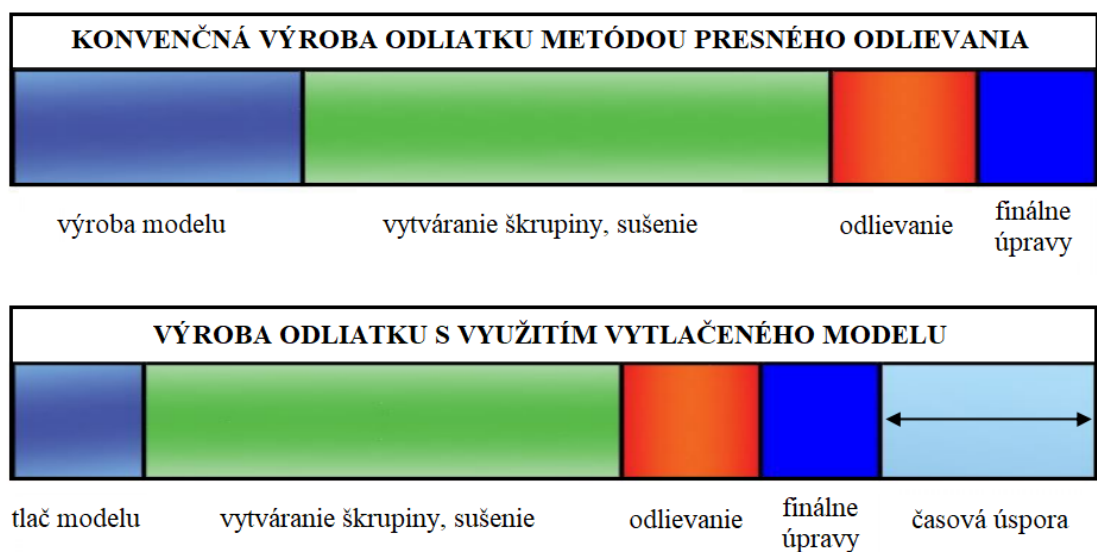
Prvým krokom k úspešnému prototypovaniu odliatku po vymodelovaní v CAD softvéri je exportovanie modelu do formátu STL. STL je priemyselne akceptovaný štandard do ktorého je možné exportovať z väčšiny CAD programov. STL je formát, ktorý na reprezentáciu vonkajšieho povrchu modelu využíva sieť trojuholníkov (obr. 4) a jeho rozlíšenie má priamy vplyv na kvalitu vytlačeného modelu. Ak je použité príliš nízke rozlíšenie v porovnaní s rozlíšením modelu tlačiarne, budú jednotlivé trojuholníky viditeľné. Naopak príliš vysoké rozlíšenie má za následok omnoho väčšie súbory s extrémnym množstvom detailov, ktoré nie je možné vytlačiť. [11], [12]



Obr. 4 Porovnanie rozlíšenia STL súboru: (1) guľička reprezentovaná dokonale oblým tvarom v CAD softvéri; (2,3,4) rozdielne rozlíšenia exportovaného formátu [11]

Nasleduje vygenerovanie tzv. G-kódu podľa ktorého pokynov je riadená tlačiareň. Používa sa softvér zvaný „slicer“, ktorý je možno zakúpiť alebo použiť jednu z voľne dostupných verzií. G-kód obsahuje pokyny pre pohyb tlačovej hlavy v osách X,Y a Z, množstvo extrudovaného materiálu a rýchlosť pohybu hlavy. V tejto fáze sa určuje orientácia modelov v tlačovom priestore, umiestnenie podpôr a výplň modelu. Kód je nahraný do tlačiarne a nasleduje samotná tlač. [13]

V poslednej dobe získala 3D tlač význam v technológiách presného liatia. Dôvodom sú nízke náklady pri malosériovej výrobe a možnosť odlievať komplexné geometrie, ktoré sú príliš náročné alebo nákladné na výrobu konvenčným odlievaním. Tieto výhody majú význam pri výrobe takzvaných topologicky optimalizovaných súčastí, ktorých tvary častokrát nie je možné vytvoriť obrábaním. 3D tlač ako metóda rýchleho prototypovania (RP) nachádza uplatnenie pri vývoji produktu a pomáha ho optimalizovať. Pre úspešný vývoj je potrebné, aby výsledný produkt bol vysokej kvality tak, aby sa dal vyrobiť rýchlo, bezpečne a s čo najmenšími nákladmi na výrobu. Význam RP spočíva v skrátene času vývoja a uplatniť sa dá aj pri nešpecifických resp. meniacich sa požiadavkách zákazníka. Medzi výhody patrí minimalizácia vývojového času, rýchlosť výroby, nízke náklady, takmer neobmedzené tvarové možnosti a fyzický model v rádoch hodín. [14], [15]

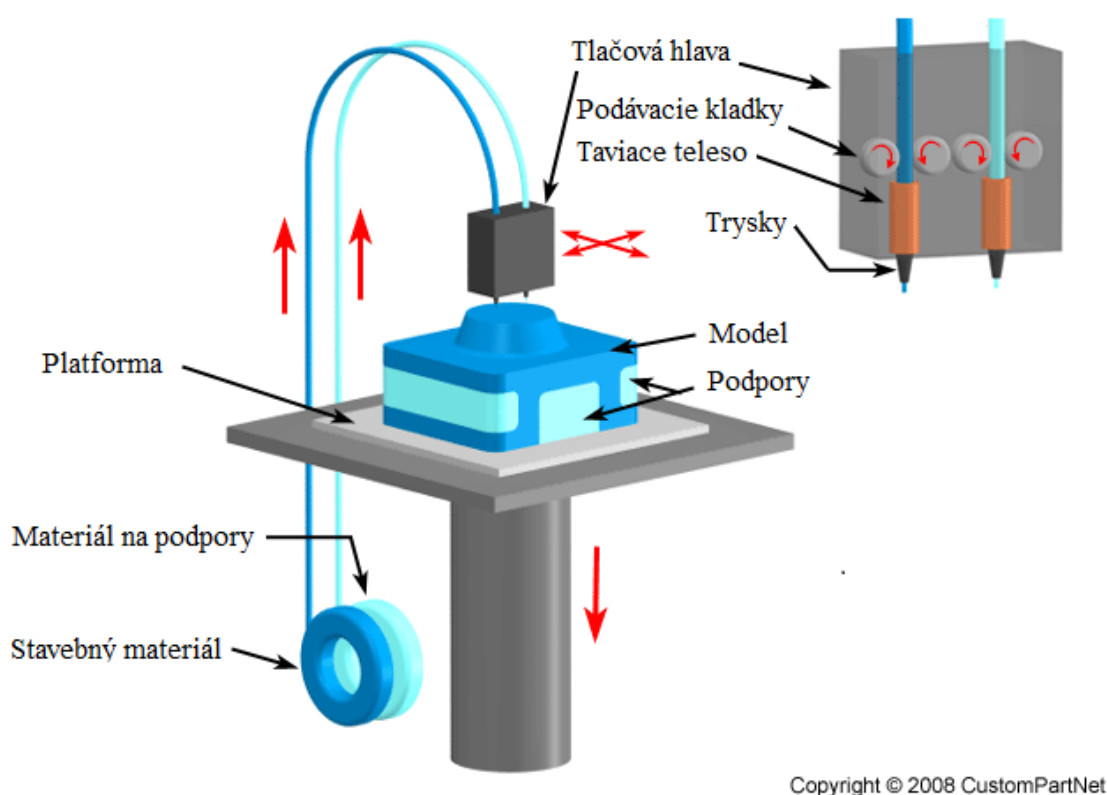


Obr. 5 Časové porovnanie metód presného odlievania [16]

3 DRUHY 3D TLAČE S POUŽÍVANÝMI MATERIÁLMI

Podľa prístupu existuje viacero typov aditívnych technológií a výrobcovia prichádzajú na trh s materiálmi špecificky prispôbenými k dosiahnutiu čo najvyššej kvality výslednej súčasti a bezproblémového procesu od návrhu modelu po samotné odliatie. Každý druh má svoje výhody aj nevýhody čím môže byť rýchlosť, rozmerová presnosť, kvalita povrchu, rozmerové limitácie jednotlivých tlačiarňí a v neposlednom rade je na výber množstvo materiálov z ktorých niektoré sú optimalizované na odlievajú viac a niektoré menej.

3.1 FDM – Fused deposition modeling



Obr. 6 Schéma metódy FDM [17]

Metóda FDM (taktiež známa pod označením FFF – fused filament fabrication) na obr. 6 je jednou z najrozšírenejších metód 3d tlače. Jej princíp spočíva v roztavení materiálu jeho zahriatím nad teplotu skleného prechodu a jeho vytlačovanie skrz trysku. Plastový materiál je navinutý vo forme struny a v tlačovej hlave je zahriaty nad teplotu skleného prechodu a ukladá sa do jednotlivých vrstiev. Podložka na ktorú je nanášaná prvá vrstva býva vyhrievaná aby sa zabránilo príliš rýchlemu ochladzovaniu, ktoré môže spôsobiť tzv. „warping“ – odlepovanie spodnej časti telesa od podložky. Niektoré tlačiarne umožňujú tlač viacerých materiálov súčasne, čoho sa dá využiť napríklad na stavbu podpôr z odlišného materiálu. Výhodou danej metódy je dostupnosť širokého portfólia materiálov a na rozdiel od FDM, iné technológie využívajúce lasery sú nákladnejšie a vyžadujú vysokú údržbu. [18], [19]

3.1.1 Vosk

Pre FDM tlačiarne existujú voskovité filamenty, menovite Print2Cast a ďalej podrobnejšie popísaný MoldLAY (obr. 7). Modely z týchto materiálov je možné tlačiť takmer so všetkými tlačiarňami pracujúcimi s plastovými filamentmi a dovoľujúcimi nastavenie teploty trysky na cca 140-180 °C. [20], [21]



Obr. 7 Filament MoldLAY [22]



Obr. 8 Povrchové vady odliatku [15]

Z rozdielnych materiálových charakteristík a reštrikcií jednotlivých druhov tlače vyplýva aj potreba pozmenenia niektorých krokov pri výrobe odliatku. Tieto kroky zahŕňajú prípravu modelu pred alebo po tlači, skladanie vtokovej sústavy, obaľovanie, vytavovanie, vypaľovanie, čistenie škrupín a odlievanie. Každý materiál je špecifický svojimi vlastnosťami a pri niektorých materiáloch je nutné prispôbiť viacero krokov ako u iných.

Pri MoldLAY sú to nasledujúce:

- Príprava modelu – prebieha nasledovne. MoldLAY sa dá tlačiť takmer ako ABS alebo PLA, avšak s nižšou teplotou trysky pohybujúcou sa okolo 170-180°C a doporučenou teplotou podložky maximálne 40°C. Pri voskových modeloch je preferovaná stopercentná výplň, no ak sa na povrch modelu utesní voskovým povlakom je akceptovateľná aj menšia hustota výplne. Neutesnenie povrchu môže viesť k povrchovým vadám zobrazeným na obr. 8. Materiál sa tlačí takmer bez deformácií a model nie je možné vyhladzovať acetónom. Povrch je vyhladiteľný prebrúsením alebo ohrevom, ktorý ale môže spôsobiť tvarové zmeny. [15], [21]
- Skladanie vtokovej sústavy – prebieha ako zvyčajne. Vytlačené modely sa dajú lepiť na konvenčné voskové vtokové sústavy. [15]
- Vytavovanie – sa deje v peci pri teplote cca 270°C, kedy MoldLAY skvapalňuje na olejovitú konzistenciu. [21]

3.1.2 PolyCast

PolyCast je filament navrhnutý pre potreby presného odlievania. Svojimi vlastnosťami pripomína PLA, takže je možné ho požiť v kombinácii s akoukoľvek FDM tlačiarňou. Pre PolyCast sú odporúčané nasledovné úpravy [23]:

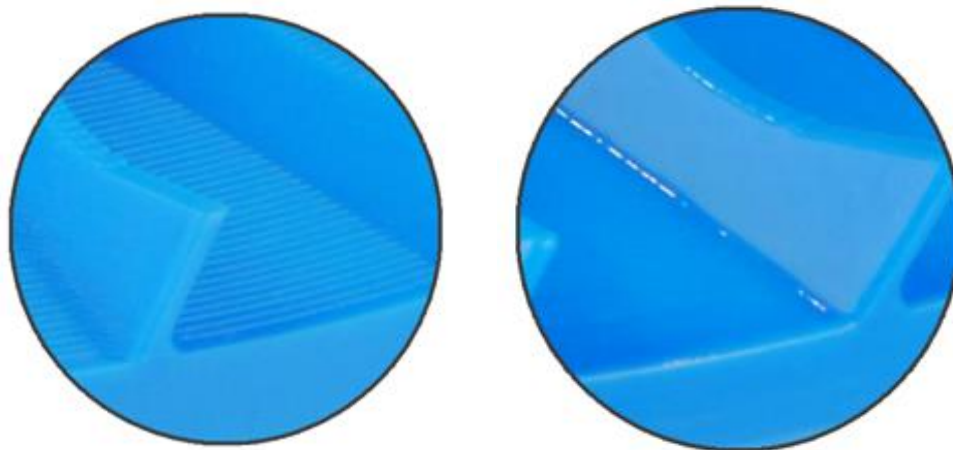
- Príprava modelu – začína ešte pred tlačou samotnou. Model by mal byť vytlačený s čo najmenšou možnou výplňou aby sa predišlo poškodeniu škrupiny. Orientácia modelu ovplyvňuje výslednú kvalitu povrchu a pomáha minimalizovať množstvo podpôr. [24]



Obr. 9 Vytlačené modely a ich odliatky [25]

Materiál PolyCast je citlivý na relatívnu vlhkosť vzduchu, ktorá by nemala presahovať 20%. Príliš vysoká vlhkosť môže mať za následok praskanie škrupín, a preto by mali byť modely pred vypaľovaním sušené horúcim vzduchom o teplote 50°C po dobu aspoň jednej hodiny. Porézny povrch so schodovitou štruktúrou charakteristickou pre FDM modely môže spôsobiť vznik keramickej suspenzie alebo vznik vzduchových bublín medzi modelom a škrupinou. Vyhladenie povrchu je nevyhnutné pre dosiahnutie optimálnej kvality povrchu a výrobca odporúča jednu z troch metód [24]:

- Prístroj Polysher – na povrch modelu naniesie vrstvu kvapôčiek alkoholu (<math><10 \mu\text{m}</math>), ktoré sú absorbované a následne vyhladia a ucelia povrch s dodržaním rozmerovej presnosti, viz obr. 10. [24]
- Model je ponorený do izopropylalkoholu alebo etanolu na 5-10 sekúnd. [24]
- Povrch modelu je nastriekaný izopropylalkoholom/etanolom. [24]



Obr. 10 Povrch pred a po ošetroení prístrojom Polysher [26]

Model je následne 20-30 minút sušený aby sa zaistilo kompletne vyparenie a stvrdnutie povrchu. [24]

- Skladanie vtokovej sústavy – prebieha klasicky. Modely je možné lepiť na štandardné voskové vtokové sústavy s odporúčením výrobcu použiť dodatočné výfuky pre lepšie vypaľovanie. [24]
- Obaľovanie – na vytvorenie dostatočne silnej škrupiny si vyžaduje niekoľko vrstiev keramiky. Počet vrstiev závisí od konkrétnej súčasti pričom je odporúčené použiť minimálne 5 a pri tenkostenných geometriách je vhodných 7-9 vrstiev. [24]
- Vytavovanie – má za následok odstránenie vosku, no modely sa neodstránia, iba sa zmäkčia. Preto je nutné vypálenie v peci pri vyššej teplote. [24]
- Vypaľovanie – prebieha v peci pri 1100-1200°C cca 40-60 minút. Presnejšie teploty a potrebný čas závisia od špecifickej súčasti a použitej pece. [24]
- Čistenie škrupín – je nutné pri nedokonalom odstránení materiálu v predošlom kroku. Popol sa vyplachuje po schladnutí škrupiny vodou. Ak je však proces vypaľovania dostatočne optimalizovaný, je možné tento krok preskočiť. [24]

3.1.3 ABS – Akrylonitrilbutadiénstyren

ABS je najpoužívanejší FDM materiál. Je to nepriehľadný termoplastický polymér, ktorý je pevný aj pri nízkych teplotách. ABS často obsahuje aditíva podporujúce jeho tok pri tlačení z trysky, pigmenty dodávajúce farbu (obr. 11) alebo napríklad UV pohlcovače ku predídaniu degradácie. Jedná sa o teplotne a chemicky odolný materiál a pri vysokých teplotách je horľavý. Najskôr sa roztápa, potom začína vriieť a následne jeho výpary vzplanú. Pri použití modelov z ABS je nutné vziať do úvahy jeho vlastnosti a spôsobiť proces odlievania. [27], [28]



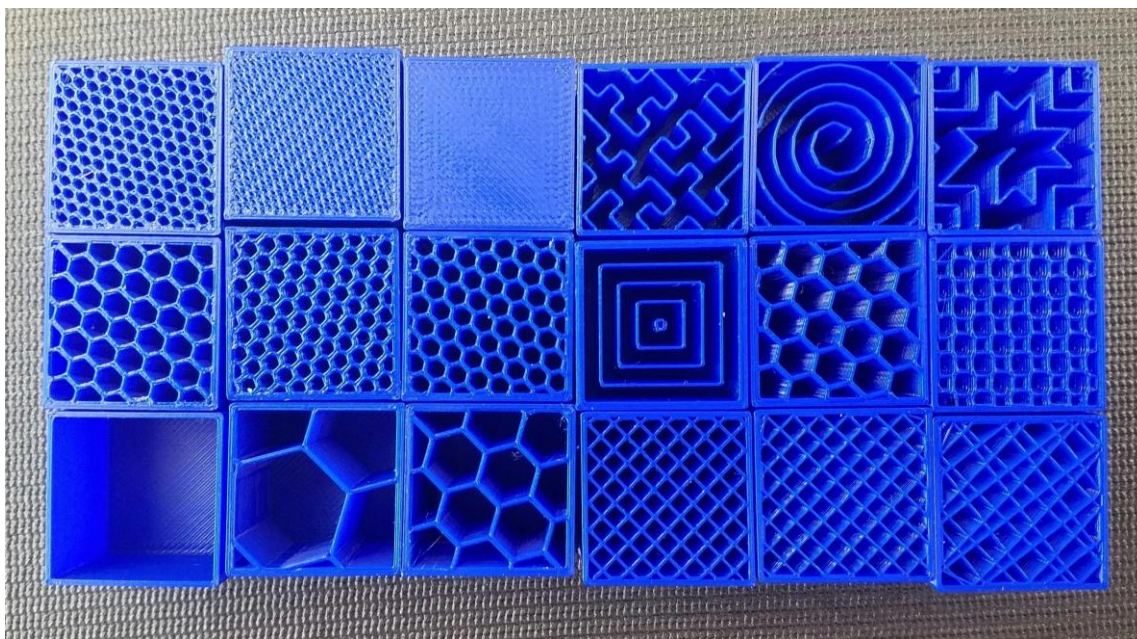
Obr. 11 Farebné varianty filamentov [29]

ABS nie je optimalizovaný pre použitie pri odlievaní. Pri jeho použití sú odporúčané nasledovné úpravy:

- Príprava modelu – ešte v softvéri znovu predchádza ostatným modifikáciam. Ešte pred samotným vytlačení je vhodné v CAD programe domodelovať výfuky. Pomerne dôležitým faktorom je aj orientácia modelu v tlačiarni. Po vytlačení sú na modeli viditeľné vrstvy. Tento efekt je možné minimalizovať nastavením menšej výšky vrstvy alebo vyhladením povrchu naleptávaním. Povrch modelu má byť uzavretý aby nedošlo ku vniku keramickej suspenzie. Rozdielne koeficienty tepelnej expanzie keramiky a ABS majú za príčinu praskanie škrupiny pri vypaľovaní. Pri nastavovaní tlače sa volí mriežkovitá vnútorná výplň modelu s dutinkami aby sa model pri vypaľovaní zrútil dovnútra a škrupina nepraskla. Duté vnútro modelu zároveň znižuje obsah zvyškového popolu. Oba typy modelov produkujú odliatky s rovnakou drsnosťou povrchu a pri vypaľovaní prebieha kolaps štruktúry podobne. V prospech dutého modelu nahráva lepšia výsledná rozmerová presnosť a absencia problémov s praskaním škrupiny pri vypaľovaní, ktorá môže byť pozorovaná u plného modelu.

Na obrázku 12 je možné vidieť niektoré z variant vnútornej výplne vrátane plného a úplne dutého modelu. [30], [31], [32]

- Skladanie vtokovej sústavy - je u modelov z ABS možné lepením na polystyrénové aj voskové vtokové sústavy. Ak nie sú výfuky už súčasťou samotného modelu je potrebné ich pridať kvôli prísunu kyslíku pri vypaľovaní. [30]
- Obalovanie – prebieha rovnako ako pri voskových modeloch s jediným rozdielom. Pridáva sa počet vrstiev keramiky na zabránenie prasknutia škrupiny. [30]
- Vytavovanie – je možné v autokláve. ABS sa však nevytaví a je nutné ho vypáliť pri vyšších teplotách. [30]
- Vypaľovanie – u ABS trvá približne 4 hodiny pri 870°C s možným skrátením na 2-3 hodiny so zvyšovaním teploty až na 1120°C. Pred vypálením je nutné otvoriť výfuky pre prístup kyslíku. [30]
- Čistenie škrupín – je prevedené vyfúknutím tlakovým vzduchom alebo výplachom vodou za účelom odstránenia zvyškového popola. [30]
- Odlievanie – nevyžaduje špeciálne úpravy. V prípade použitia výfukov je nutné ich pred odliatím riadne utesniť. [30]



Obr. 12 Porovnanie modelu vytlačeného v rôznych režimoch [33]

3.2 MJP – MultiJet Printing

MJP je technológia americkej spoločnosti 3D Systems ktorá využíva tlačovej hlavy k nanášaniu tekutého materiálu vo forme svetlom vytvrditeľnej živice alebo vosku pre potreby zlievarenstva. Tlačiarne (obr. 13) umožňujú výšku vrstvy až 16 mikrometrov s možnosťou voľby kombinácie rozlíšenia a rýchlosti tlače. Plynulú prácu s tlačiarňou zabezpečuje ľahko ovládateľný softvér 3D Sprint®, ktorý umožňuje prípravu a spravovanie výroby. Tlač voskových modelov je aplikovateľná najmä pri kusovej výrobe a malých sériách pre malé a stredne veľké modely. Modely majú výslednú kvalitu povrchu konkurujúcu SLA. Táto technológia v spojení s voskovým materiálom umožňuje výrobu topologicky optimalizovaných súčastí (obr. 14), ktoré nie je možné vytvoriť klasickým vstrekom do formy. Modely vytvorené technológiou MultiJet ponúkajú [34], [35]:



Obr. 13 ProJet® MJP 2500 IC [35]

- rozmery v rámci úzkych tolerancií,
- hladký povrch,
- ostré hrany,
- jemné detaily,
- kompletne modely v rádoch hodín [35]

3.2.1 Vosk

VisiJet M2 ICast je stopercentný vosk používaný u tlačiarňí MJP. Tento materiál má u vytavovania a vypaľovania vlastnosti štandardného zlievarenského vosku. Nie je potrebné upravovať proces odlievania ako u iných druhov tlače, čo značne uľahčuje jeho integráciu. [35]

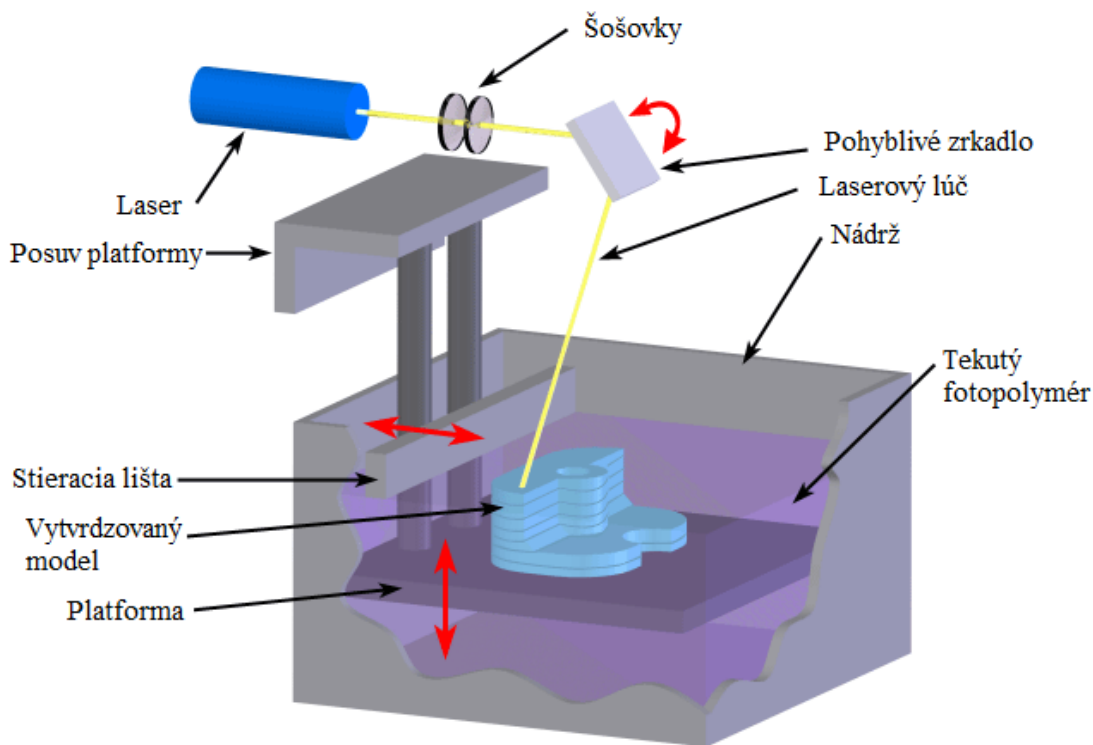


Obr. 14 Model topologicky optimalizovanej súčasti s odliatkom [35]

Vosk je zelenej farby s bodom tavenia pri 61-66°C no začína mäknúť už pri 40-48°C. Po vytavení je množstvo zvyškového popola menšie ako 0,05%. Podpory, ktoré sú ľahko odstrániteľné sú taktiež tvorené špeciálnym voskovým materiálom bielej farby pre ľahké vizuálne rozlíšenie od modelu. [36]

3.3 SLA – Stereolitografia

U SLA schematicky znázornenej na obrázku 15, prebieha tlač procesom fotopolymerizácie. Ako materiál sa používa zmes viskózných monomérov a fotoiniciátorov. Po osvetlení ultrafialovým svetlom prebehne lokálna reakcia pri ktorej z tekutých monomérov vznikajú tuhé polyméry v osvetlenej oblasti. Stereolitografia využíva UV lasery na vytvrdenie jednotlivých vrstiev. Po vytvrdení prvej je nanosená nová vrstva fotopolymérnej živice, ktorá je opätovne vytvrdená UV svetlom. Tlačené materiály v súčasnosti zahŕňajú aj kompozity či materiály na báze keramiky alebo kovu. [10], [37]



Copyright © 2008 CustomPartNet

Obr. 15 Stereolitografia [17]

3.3.1 Somos® Element

Na trhu existuje rada fotopolymérov prispôbených požiadavkám presného odlievania. Jedným z nich je aj menovaný materiál produkujúci pevné modely, ktoré sú rozmerovo stále a zanechávajú minimálne množstvo popola. Zvyšky po vypálení modelu z formy sú pritom ľahko odstrániteľné. Odliatky u presného odlievania môžu byť zo špeciálnych materiálov a často obsahovať tenkostenné prvky. Bežne používaný fotoiniciátor u fotopolymérov je na báze antimónu, ktorý však môže predstavovať problém pri určitých superzliatinách a reaktívnych kovoch.

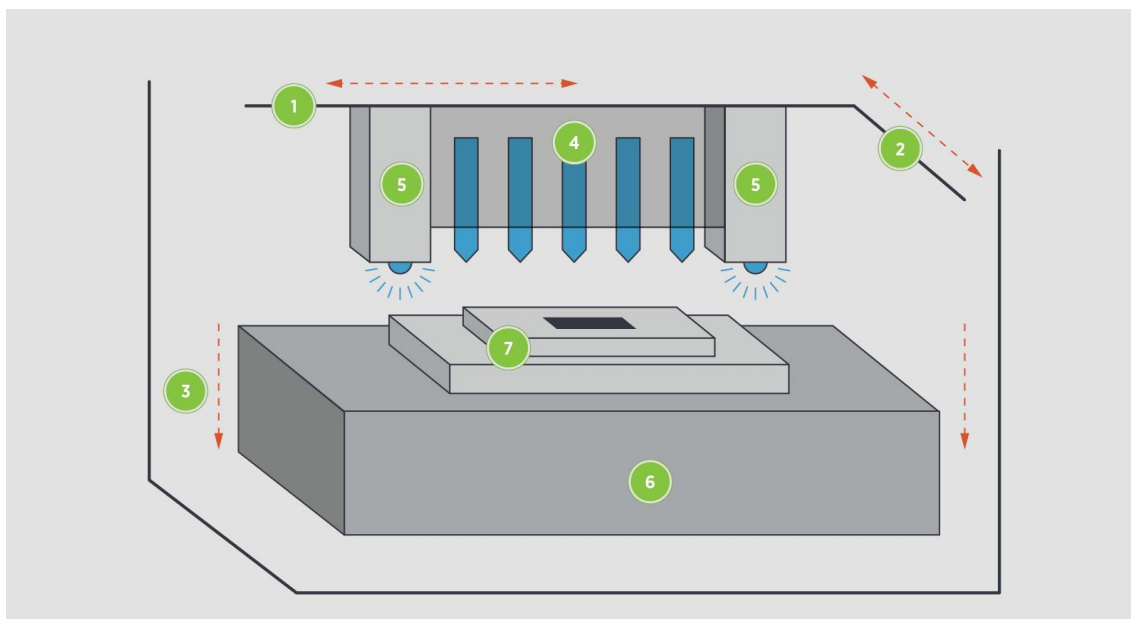


Obr. 16 Model s hexagonálnou výplňou [39]

Somos® Element je špeciálne vyvinutý materiál, ktorého fotoiniciátor neobsahuje antimón a v kombinácii s technológiou SLA umožňujúcou jemné detaily je realizácia podobných odliatkov možná. Pre minimalizovanie nákladov je možná tlač modelov spolu s vtokovou sústavou. Odpadá tým nutnosť manuálneho zostavovania modelov do stromčeka a s ňou spojené nepresnosti. [38], [40]

3.3.2 PolyJet

Technológia PolyJet od firmy Stratasys je založená na princípe stereolitografie s menšími odlišnosťami. Tak isto ako SLA využíva vytvrdzovanie fotopolymérov UV svetlom. PolyJet má niekoľko tlačových hláv, ktoré nanášajú tekutý materiál o výške od 16 mikrometrov a súčasne ho aj vytvrdzujú. Oproti SLA je PolyJet rýchlejší pri modeloch do 5 palcov (127 mm), avšak pri väčších rozmeroch je rýchlejšia technológia SLA, keďže laser nie je umiestnený na pohyblivej hlave ale je zameriavaný pomocou systému zrkadiel. Pre zaistenie presnosti a pri budovaní previsov je nutné využitie podpôr. Pri SLA je materiál podpôr totožný s finálnym modelom. Na rozdiel u PolyJetu je možnosť vytvárať podpory samostatným materiálom a modely nevyžadujú dodatočné vytvrdzovanie. [41]



Obr. 17 Schéma PolyJet: (1) osa x, (2) osa y, (3) osa z, (4) trysky fotopolyméru, (5) UV lampy, (6) platforma, (7) model [42]

Pri použití tejto technológie sú odporúčenia nasledovné:

- Príprava modelu – začína vhodným výberom. Doporučené materiály pri použití tohto druhu tlače pre presné odlietanie sú FullCure RGD720 a VeroBlack s najmenším množstvom popola s hodnotami uvedenými v tabuľke 1. Výrobca odporúča minimalizovať objem materiálu využitím dutých tvarov pri modelovaní STL súboru s optimálnou hrúbkou stien 1,27-1,5 mm kvôli ochrane voči prasklinám škrupiny pri vypaľovaní a redukcii obsahu popola s ďalšími doporučeniami uvedenými v tabuľke 2. Po vytlačení je nutné odstrániť podpory, ktoré sú tvorené z materiálu odstrániteľného otryskaním vodou alebo ručne. [43]

Tab. 1 Možné materiály pre použitie u odlievania [43]

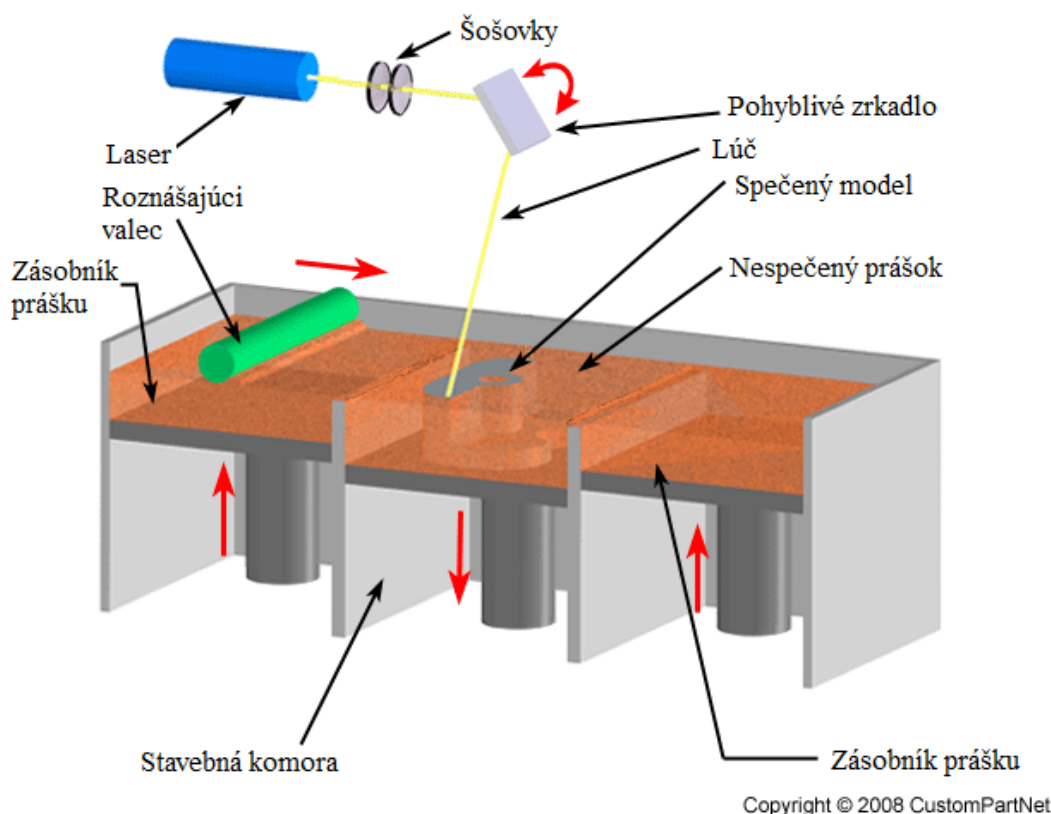
Materiál	Množstvo popola
FullCure RGD	0,01 - 0,02%
VeroBlack™	0,01 - 0,02%
VeroClear™	0,02 - 0,06%
VeroBlue™, VeroGray™, VeroWhite™	0,21 - 0,26%

Tab. 2 Doporučenia pri konštrukcii [43]

Konštrukčné prvky	Hodnoty a doporučenia
Zloženie obalovej vrstvy	Nekremititá keramika
Hrany	Vyhnúť sa ostrým hranám
Zaoblenia	min. 0,76 mm
Hrúbka steny tlačeného modelu	1,27 - 1,5 mm
Hrúbka steny odlievanej súčasti	min. 1,27 mm

- Skladanie vtokovej sústavy – je bez modifikácií a postup je rovnaký ako pri liatí na vytaviteľný voskový model. Je však doporučené prídanie viacerých výfukov kvôli prístupu kyslíka pri vypaľovaní a pre lepšie vypláchnutie popola zo škrupiny vodou. [43]
- Obaľovanie – sa nelíši od klasického s výnimkou počtu vrstiev. Výrobca odporúča o 3 vrstvy viac ako pri použití voskových modelov vzhľadom na tlaky ktoré vyvoláva PolyJet materiál pri svojej expanzii. Ako obalový materiál je odporúčaná keramika na báze zirkónu. [43]
- Vytavovanie – pre optimálny výsledok prebieha v autokláve pri minimálnom tlaku 700 kPa a teplote 135°C. Vosk by mal byť vytavený za 5-10 minút. [43]
- Vypaľovanie – prebieha ideálne podľa nasledujúcej doporučenej sekvencie:
 - 93 °C – 2 hodiny,
 - 121 °C – 2 hodiny,
 - 149 °C – 2 hodiny,
 - 177 °C – 2 hodiny,
 - 218 °C – 4 hodiny,
 - 260 °C – 4 hodiny,
 - 871 °C – 4 hodiny. [43]
- Čistenie škrupín – prebieha vypláchnutím vodou aby množstvo zvyškového popola bolo minimálne. Bez správneho prevedenia sa prejaví na odliatku vady. [43]
- Odlievanie – je bez nutnosti špeciálnych úprav. [43]

3.4 SLS – Selective laser sintering



Obr. 18 Schéma metódy SLS [17]

SLS je metóda využívajúca energiu laseru ku spekaniu prášku čím dochádza k vytvoreniu modelu, ktorý vyniká svojou pevnosťou. Ku spekaniu dochádza v inertnej atmosfére v stavebnej komore. Laser je smerovaný pomocou zrkadla, ktoré je natáčateľné a výroba súčasti prebieha po vrstvách. Po spečení jednej vrstvy sa stavebná platforma posunie nadol, roznášajúci valec naniesie ďalšiu vrstvu prášku a proces sa opakuje. Nespečený prášok plní úlohu podpornej konštrukcie. [44]

3.4.1 HIPS – High impact polystyrene

HIPS alebo húževnatý polystyrén je termoplast, ktorý sa tlačovými vlastnosťami podobá ABS. Jedná sa o polystyrén s prídavkom kaučuku. Mimo SLS je používaný v obalovom priemysle a pri dvojhlavových tlačiarňach, kedy jedna hlava tlačí model a druhá podpory z HIPS. [45]

Pre modely z HIPS sa odporúča nasledovné:

- Príprava modelu – začína po vytlačení keď je povrch pokrytý nespečeným práškom, ktorý sa dá ľahko odstrániť. Je tiež veľmi drsný a je potrebné infiltrovať model voskom (obr. 19). Teplota mäknutia HIPS je len 80°C takže kvôli zachovaniu rozmerovej presnosti musí mať vosk teplotu menšiu ako 70°C. [46]



Obr. 19 Infiltrácia voskom [47]

- Vytavovanie a vypaľovanie – je potrebné prispôbiť na dosiahnutie lepších výsledkov. V teplotnom intervale 250-350°C vznikajú z HIPS reťazce, ktoré nie je možné splyňovať ani pri vyšších teplotách kedy tvoria reziduá usadené na vnútorných stenách škrupiny, a preto je nutné sa tomuto intervalu vyhnúť. [46]

Pre správne vypálenie bez zvyškového popola je doporučené:

- vytavovanie vosku pri nízkych teplotách,
- zahriatie na 250°C (2 hodiny),
- vypaľovanie na 500°C (1 hodina),
- zahriatie na 700°C a nasledovné schladnutie. [46]

Keďže väčšina materiálu vytečie pri 250°C pred vypaľovaním, splynutý HIPS nespôsobí expanziu modelov a predíde sa praskaniu škrupiny. [46]

3.4.2 PC101 – PrimeCast 101

Jedná sa o šedý práškovitý materiál, ktorý je vhodný na odlievanie do keramických škrupín vďaka svojej vynikajúcej rozmerovej presnosti a nízkej teplote tavenia. Materiál je typicky používaný na výrobu keramických škrupín keďže je optimalizovaný nízkym obsahom popola po vypálení. Modely z PC101 (obr. 20) vytvorené pomocou SLS sa vyznačujú vlastnosťami: [48]

- vynikajúca rozmerová presnosť,
- výborná kvalita povrchu,
- dobrá pevnosť pre potreby odlievania. [48]

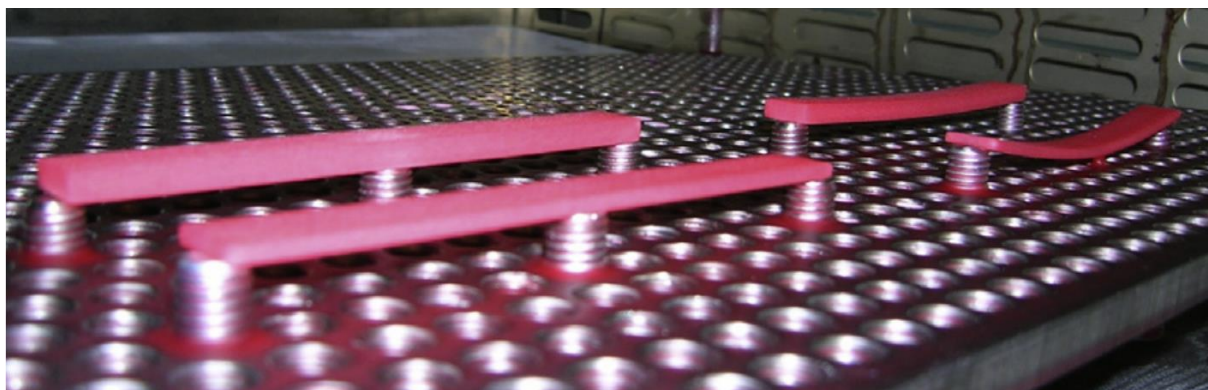


Obr. 20 Skriňa prevodovky [49]

3.4.3 CastForm

CastForm je ďalším materiálom na báze polystyrénu pre SLS. Pri odlievaní sa správa podobne ako vosk a je kompatibilný so štandardnými postupmi. Vzory sa vypaľujú v autokláve alebo štandardných peciach a to rýchlo s nízkym obsahom popola (~0,02%). [50]

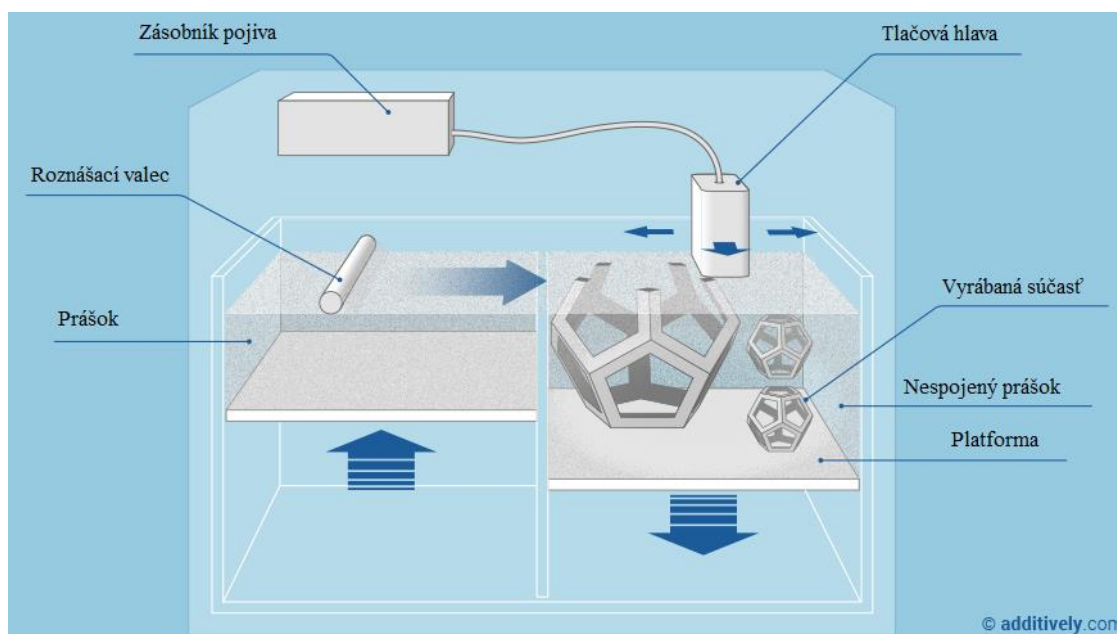
Na rozdiel od PC101 sú výsledné modely menej pevné a kvôli zlepšeniu mechanických vlastností a kvality povrchu je nutná infiltrácia voskom. Pri infiltrácii sú modely náchylné na deformácie, ktoré sa môžu prejaviť formou priehybu alebo v krajnom prípade lomom. Z toho dôvodu je potrebné využiť podpory napr. vo forme kovových skrutiek na obrázku 21. Veľké množstvo podpôr však nie je žiadúce, pretože by mohli mať za následok deformácie spôsobené zabraňovaním zmršťovania vosku pri chladnutí. [51]



Obr. 21 Použitie podpôr pri infiltrácii [51]

3.5 BJ – Binder jetting

Systémy binder jetting (BJ) využívajú trysky rovnako ako FDM systémy, ale miesto tlače samotného materiálu z trysiek vychádza pojivo, ktoré spojuje práškový materiál. Proces začína nanosením tenkej vrstvy. Následne je prášok spojovaný pojivom, ktoré je nanášané tryskami. Po tlačení pojiva nasleduje ďalšia vrstva prášku a tento proces sa opakuje až pokiaľ nie sú nanesené všetky vrstvy a súčiastka je hotová. [52], [53]



Obr. 22 Schéma technológie BJ [54]

Jedná sa o pomerne rýchlu a lacnú technológiu. Keďže väčšia časť objemu súčasti je tvorená práškovým materiálom, jednotlivé vrstvy môžu byť vytvorené veľmi rýchlo a to hlavne za použitia viacerých tlačových hláv – často do niekoľkých sekúnd. Výhodou je tiež absencia podpôr. Okolitý nespájaný práškový materiál poskytuje dostatočnú podporu previsom a môže byť použitý znovu. Výsledný povrch však nie je hladký a vyžaduje ďalšiu povrchovú úpravu. Model je tiež krehký. [52], [53]

3.5.1 PMMA – Polymetyl metakrylát

Na princípe BJ sú založené tlačiarne od nemeckej firmy Voxeljet s ktorou má skúsenosť už väčšina zlievarní presného odlievania. [30], [55]



Obr. 23 Model z PMMA a následný odliatok [55]

Niektoré z vlastností technológie od Voxeljet sú nasledovné:

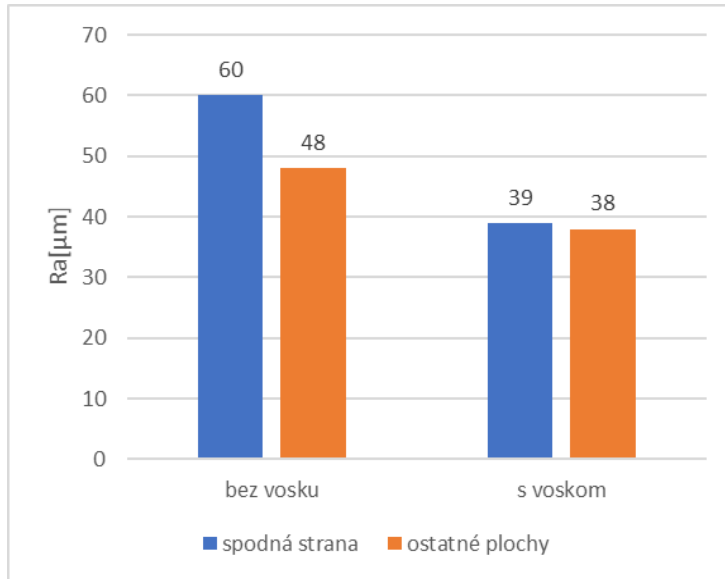
- Voxeljet umožňuje tlačiť modely o veľkosti až 1000x600x500 mm. [55]
- PMMA prášok nezanecháva pri vypaľovaní takmer žiaden zvyškový popol (výrobca udáva hodnotu <0,01% hmotnosti). [55]
- Tlačiarne od Voxeljetu (obr. 24) využívajú tlačové hlavy o veľkom rozlíšení (600dpi so štandardnou výškou vrstvy 150 μ m). [55]
- Vďaka využitiu BJ nie sú potrebné podpory a takmer 100% nevyužitého prášku je recyklovateľných a znovu použiteľných. [55]
- Žiadne riziko prasknutia škrupiny. Záporný koeficient tepelnej expanzie PMMA má za následok ideálne vypaľovacie vlastnosti aj pri tenkostenných geometriách. [55]



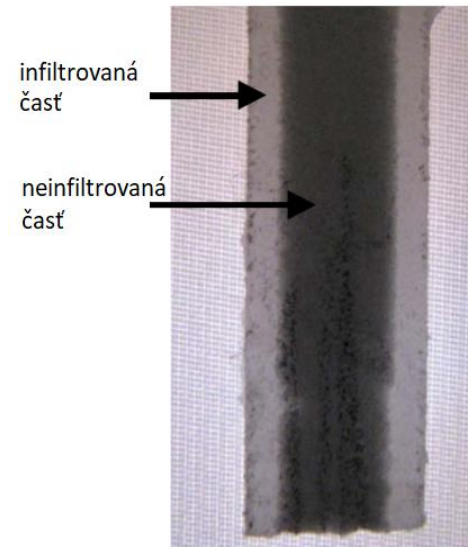
Obr. 24 Voxeljet VX1000 [55]

Pri využití danej technológie sa odporúča:

- Príprava modelu – prebieha nasledovne. Po vytlačení je model vytvrdzovaný pri nízkych teplotách a infiltrovaný voskom pre utesnenie povrchu. Priehľadný vzhľad infiltrovaných častí umožňuje vizuálnu kontrolu. Čiastočne infiltrovanú vzorku je možné vidieť na obrázku 26. Kompletne infiltrovaný model je homogénneho priesvitného vzhľadu. Drsnosť povrchu modelov, ktorej hodnoty môžu byť zlepšené použitím vosku (obr. 25) je oproti ostatným plochám vyššia na spodnej strane. Okrem drsnosti zlepšuje vosk aj mechanické vlastnosti, ale len do malej miery. [56]



Obr. 25 Drsnosti povrchu bez a s použitím vosku [56]



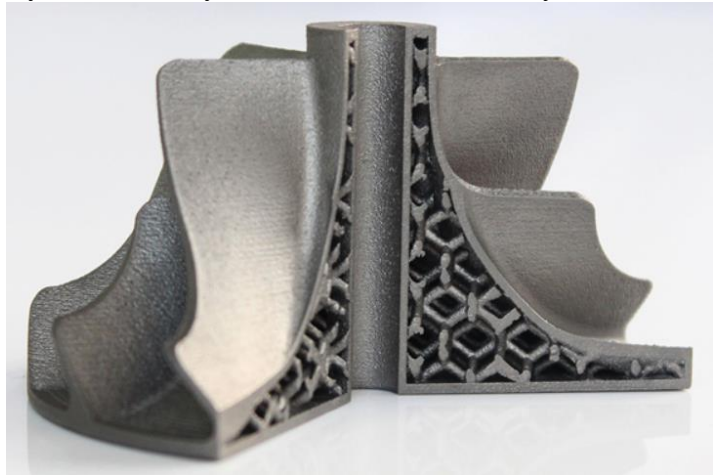
Obr. 26 Infiltrácia [56]

- Skladanie vtokovej sústavy – je možné lepením modelov klasickým spôsobom pomocou vosku. Výrobca odporúča použitie výfukov kvôli lepšiemu prístupu kyslíku pri vypaľovaní. Je možné použiť väčšie výfuky, ktoré nie je potreba pri vypaľovaní otvárať. Podľa skúseností spoločnosti MCAE Systems je možné použiť vtokovú sústavu vyrobenú z extrudovaného polystyrénu kvôli jednoduchosti tvarovania a vypaľovaniu takmer bez zvyškového popola. [30], [55]
- Obalovanie – je podľa Voxeljetu postupovo zhodné s klasickou výrobou. V niektorých prípadoch je možné použiť o vrstvu obalu menej. [30]
- Vypaľovanie – je u modelov z PMMA možné v peci pri 700°C cca 30 minút. Pri použití krátkych výfukov je nutné ich otvoriť a zaistiť tak dostatočný prístup vzduchu. Výrobca následne odporúča nechať škrupiny schladnúť až na izbovú teplotu. PMMA sa vypaľuje vo väčšine prípadov bez zvyškového popola bez potreby ďalších operácií na vyčistenie škrupiny. [30], [55]
- Čistenie škrupín – je v prípade zvyškového popola možné previesť odstránením stlačeným vzduchom alebo výplachom vodou. Voda však môže spôsobiť prilepenie popolu na stenu škrupiny. [30]
- Odliovanie – je bez nutnosti špeciálnych úprav. [30]

4 DOPAD 3D TLAČE KOVU NA PRESNÉ ODLIEVANIE

V posledných rokoch začalo pribúdať výrobcov 3D tlačiarňí kovov a do tohoto druhu aditívnej výroby začali investovať spoločnosti ako je napríklad americká firma General Electric (GE), Caterpillar a BMW. Ako alternatíva k presnému odlievaniu by tlač kovu mohla mať veľký dopad. [57]

3D tlač kovov bola donedávna vnímaná len ako spôsob prototypovania. Teraz je však považovaná za potenciálne transformujúcu technológiu v mnohých oblastiach. Kovové materiály ponúkajú kombináciu praktických a estetických vlastností, vďaka ktorým nachádza tlač kovu uplatnenie pri výrobe prototypov funkčných súčastí akým je napr. obežné koleso na obrázku 27, či miniatúr a šperkov. Medzi výhody tohto spôsobu výroby patrí jeho hospodárnosť. Pri výrobe trieskovým obrábaním môže byť v niektorých prípadoch odobraného materiálu až 90% z pôvodného objemu. Oproti tomu vytlačené diely môžu byť omnoho ľahšie ako obrábané výrobky. V leteckom priemysle to znamená obrovské úspory hlavne na palive. [58], [59]

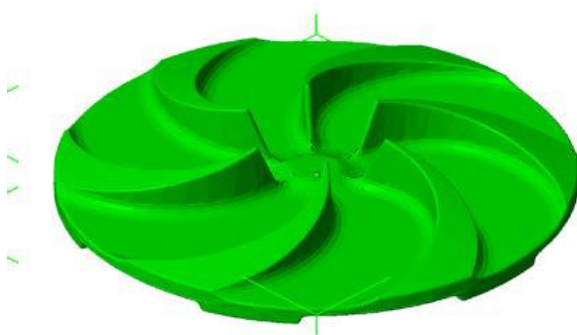


Obr. 27 Vnútorňa štruktúra modelu [60]

V súčasnosti dominujú v oblasti 3D tlače kovov 3 hlavné metódy:

- DED (direct energy deposition) – funguje na princípe tavenia kovového prášku laserom, pričom prášok vychádzajúci z trysky je sústredený do tenkého „lúča“. DED je vhodná pre rýchlu tlač veľkých komponentov s nižšou presnosťou. [60]
- PBF (powder bed fusion) – tiež využíva kovový prášok ktorý je v tomto prípade nanášaný vo vrstvách a laserom roztavený. Oproti DED je táto metóda síce časovo náročnejšia ale výsledný model má lepšie mechanické vlastnosti. [60]
- BJ (binder jetting) – je proces, pri ktorom je pojivo nanášané tryskami priamo na kovový práškový materiál. BJ je rýchla technológia a relatívne lacná, no modely nemajú dostatočné mechanické vlastnosti pre inžinierske aplikácie. [60]

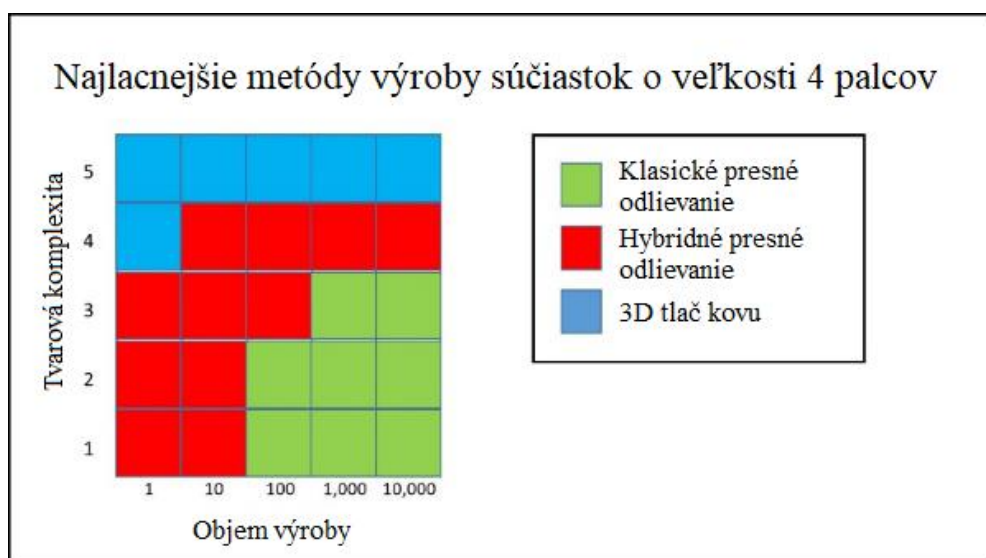
Za posledné dve desaťročia bola rozsiahlo študovaná topologická optimalizácia a to primárne u tradičných výrobných metód ako je trieskové obrábanie, vstrekovanie do foriem a odlievanie. V kombinácii s rozvojom 3D tlače, ktorá má menej tvarových obmedzení ako konvenčná výroba je možné dosiahnutie geometrií, ktoré doposiaľ neboli možné. V článku časopisu Transactions (2018) bolo vybraných 75 súčiastok o veľkostiach 4,8 a 16 palcov (101, 203 a 406 mm) s piatimi rôznymi stupňami komplexity, tvarom a hrúbkami stien a bolo uvažovaných 5 rôznych objemov výroby a to 1, 10, 100, 1000 a 10,000 kusov tak, aby dostatočne reprezentovali reálne aplikácie. Tejto štúdie sa zúčastnilo celkovo 7 zlievarní. Na obrázkoch 28 a 29 sú dve zo 75 súčastí na ktoré bola štúdia zameraná. [57], [61]



Obr. 28 Otvorené obežné koleso [57]



Obr. 29 Rám dronu [57]



Obr. 30 Porovnanie metód výroby [57]

Z vyššie uvedeného znázornenia najlacnejších metód na obrázku je možné konštatovať, že hybridné presné odlievanie s 3d tlačenými modelmi pre menej tvarovo komplexné súčiastky je výhodné len pri nižších kvantitách. Klasické presné odlievanie je vhodné najmä pri sériovej výrobe súčiastok s komplexitou 1-3. Naopak tvarovo najzložitejšie súčiastky, ktoré nie je možné vyrobiť odlievaním musia byť zhotovené 3d tlačiarňou kovov. Podobné závislosti a závery platia aj pre súčiastky o veľkostiach 8 a 16 palcov. [57]

Zo získaných dát je možné posúdiť nasledovné:

- vzhľadom na náklady nemá 3D tlač kovov v súčasnosti žiaden dopad na zlievarne presných odliatkov,
- keby sa cena tlače kovov znížila na 50%, stále by nemala dopad na technológiu presného odlievania (platí pre súčiastky o veľkosti 4 palcov a viac). [57]

Hoci je zrejmé, že tlač kovov v blízkej budúcnosti nenahradí presné odlievanie, existuje oblasť v ktorej môže mať výrazný vplyv. Topologicky optimalizované komponenty majú častokrát zložitú geometriu, ktorá nie je dosiahnuteľná klasickým presným odlievaním, a preto je nutné využiť hybridné odlievanie s tlačenými modelmi. To však nie je optimalizované na veľkosériovú výrobu a to je príležitosť pre 3D tlač kovov. [57]

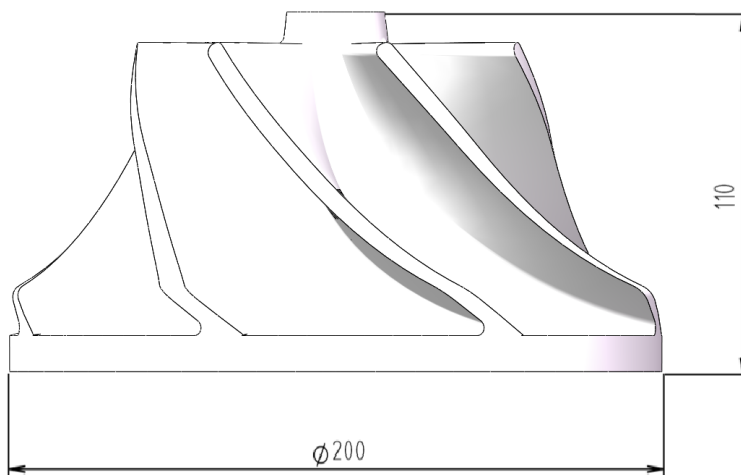
5 CENOVÉ POROVNANIE VYBRANÝCH DRUHOV TLAČE

Pre konkrétny model bolo vytvorené cenové porovnanie troch druhov tlače a to:

- FDM - materiál ABS
- BJ - materiál PMMA
- MJP - materiál VisiJet M2 ICast

Ako model na ktorom je porovnanie založené bolo zvolené obežné koleso zobrazené na obr. 31. Základné rozmery modelu sú priemer dolnej podstavy $\varnothing 200$ mm a výška 110 mm, pričom koleso obsahuje priechodnú dieru s priemerom $\varnothing 10$ mm. Celkový objem plného modelu činí 1109 cm^3 . Pre koleso bolo zhotovené porovnanie z hľadiska nákladov pre tlač jedného samostatného kusu a zároveň sérií o 10, 100 a 1000 kusoch v troch rôznych spoločnostiach zaoberajúcich sa zákazkovou 3D tlačou.

Z dôvodu zníženia ceny pri zachovaní dostatočných mechanických vlastností boli zvolené parametre podľa nasledujúcej tabuľky zahŕňajúce hlavne výplň modelov. U FDM a MJP sa jedná o 20% resp. 50% a pri kalkulácii modelov vytvorených BJ je uvažovaný dutý model bez výplne.



Obr. 31 Obežné koleso

Tab. 3 Parametre tlače

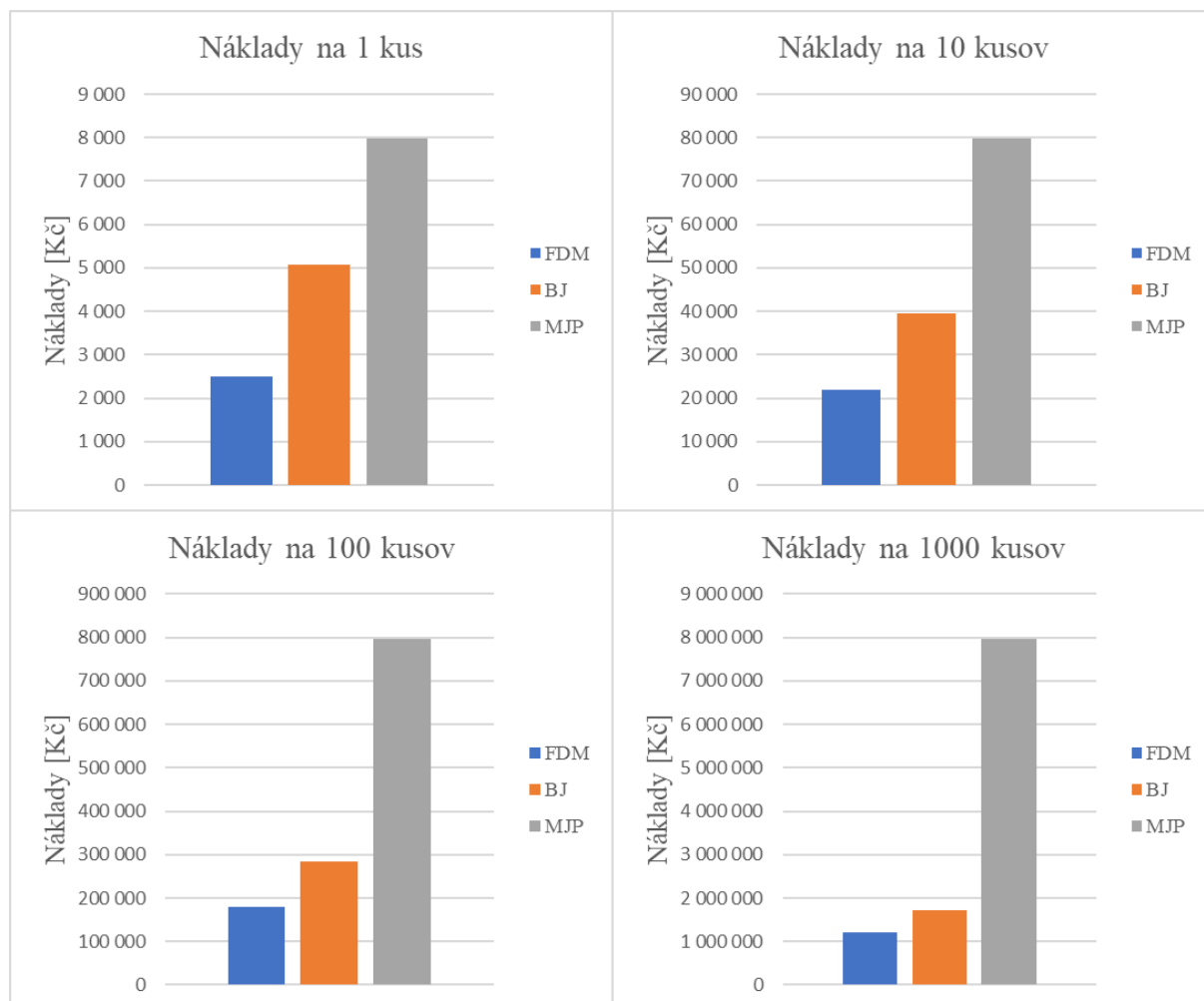
Metóda	Materiál	Výplň [%]	Výška vrstvy [mm]	Hrúbka steny [mm]	Termín dodania [dni]
FDM	ABS	20	0,2	2	-
BJ	PMMA	0	0,15	3	15
MJP	VisiJet M2 ICast	50	-	2	-

Je potrebné uviesť, že ceny závisia v neposlednom rade aj na termíne dodania, ktorý bol u BJ stanovený na 15 dní, no u ostatných metód nebol v kalkuláciách bližšie špecifikovaný a záleží na dohode a medzi zákazníkom a spoločnosťou, konkrétnych možnostiach spoločnosti a aktuálnej vyťažnosti. Drsnosť povrchu ovplyvnená výškou vrstvy, ktorá nie je pri MJP uvedená má tiež vplyv na výslednú cenu. Kalkulácia pre MJP zároveň nezahŕňa výšku vrstvy, termín dodania, ani náklady spojené s prácou potrebnou pre produkciu modelov. Jedná sa len čisto o materiálové náklady vychádzajúce z potrebného množstva stavebného a podporného materiálu.

Tab. 4 Náklady na tlač

Množstvo[ks]		1	10	100	1000
FDM	Cena za kus [Kč]	2 500,00	2 200,00	1 800,00	1 200,00
	Cena za sériu [Kč]	2 500,00	22 000,00	180 000,00	1 200 000,00
BJ	Cena za kus [Kč]	5 080,03	3 960,24	2 840,45	1 720,66
	Cena za sériu [Kč]	5 080,03	39 602,40	284 044,80	1 720 656,00
MJP	Cena za kus [Kč]	7 970,50	7 970,50	7 970,50	7 970,50
	Cena za sériu [Kč]	7 970,50	79 705,00	797 050,00	7 970 500,00

Náklady pre jednotlivé série a ich materiálové varianty sú uvedené v tabuľke 4. Grafické porovnanie pre rôzne počty kusov je uvedené na obrázku 32.



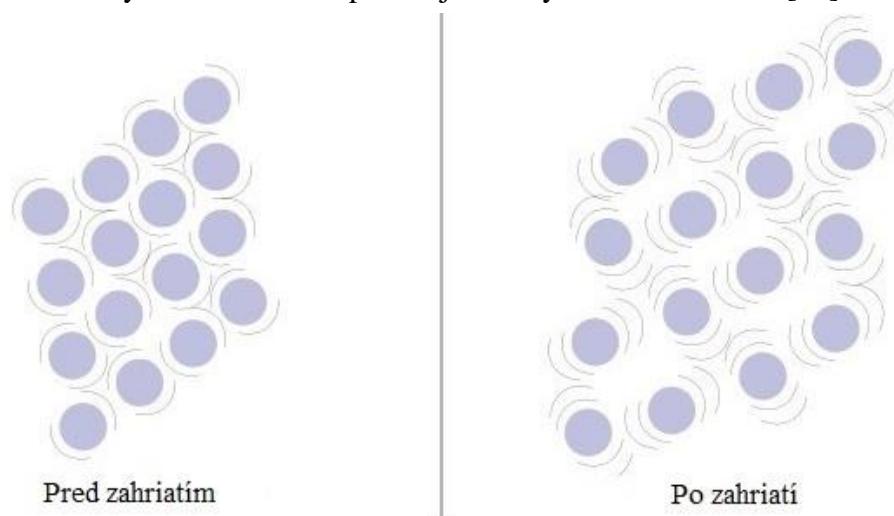
Obr. 32 Grafické zrovnanie nákladov pre rôzne početnosti

Pre všetky početnosti môžeme zhodnotiť, že z finančného hľadiska vychádza najvýhodnejšie FDM tlač. So zvyšujúcou sa sériovosťou sa však minimalizuje prepád medzi FDM a BJ. Na druhej strane, tlač voskových modelov prostredníctvom MJP sa javí ako veľmi nevýhodná, hlavne u tisíckusovej série. Je to spôsobené príliš veľkými rozmermi modelu, čo znemožňuje umiestnenie viacerých modelov do jednej tlačovej komory. To je dôvodom pre rovnakú cenu za kus, ktorá sa negatívne premietne pri zvyšujúcom sa počte kusov.

Pri rozhodovaní je nutné brať ohľad nielen na náklady, ale aj na vlastnosti výsledného modelu, drsnosti povrchu, rozmerovej presnosti, potreby postprocessingu a spôsobenia samotných procesov predchádzajúcich odlievaniu. V prospech FDM hovorí nízka cena, avšak na úkor kvality povrchu a možného praskania škrupín. Modely z PMMA vytvorené pomocou BJ majú záporný koeficient termálnej expanzie a praskanie nepredstavuje problém, no majú v sebe otvor na odstránenie nepoužitého práškoveho materiálu, ktorý je nutné uzatvoriť, inak dôjde ku vniknutiu keramickej suspenzie. MJP produkuje modely z VisiJet M2 ICast, ktorý má identické vlastnosti ako klasický zlievarenský vosk, no v tomto prípade stojí najviac spomedzi troch spomínaných metód.

6 DILATOMETRIA

Pojmom dilatometria sa označujú merania objemovej/dĺžkovej zmeny spôsobenej fyzikálnymi alebo chemickými procesmi. Dilatometre sa používajú pre určovanie koeficientu tepelnej expanzie (KTE), pri ktorom sú sledované rozmery vzorky za meniacej sa teploty. Tepelná expanzia sa najviac prejavuje pri plynách a kvapalinách, no môže mať pomerne veľký efekt aj pri tuhých látkach, čo pri odstraňovaní modelov vypaľovaním spôsobuje porušenia keramickej formy. Pri zahriatí teleso prijíma teplo, ktoré sa prejaví vo forme zvýšenej kinetickej energie atómov, čo zosilňuje ich prirodzené vibrácie, pričom sa navzájom vzdávajú. Tento efekt znázornený na obrázku 33 spôsobuje zmeny rozmerov telesa. [62]



Obr. 33 Expanzia častíc [62]

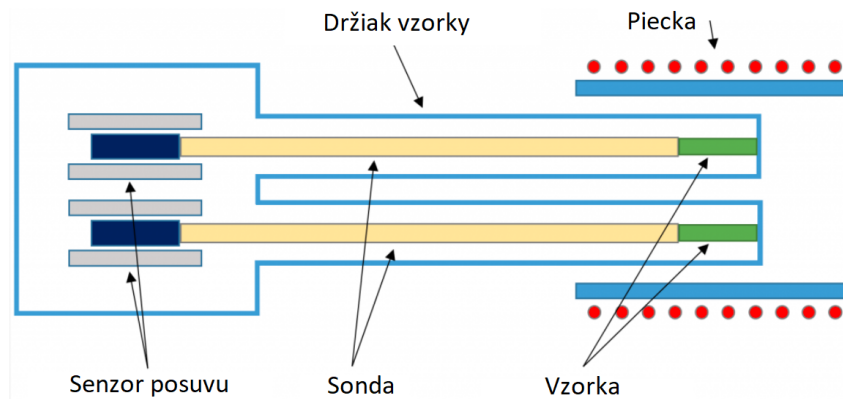
Existujú 2 hlavné dizajny dilatometrov. Podľa orientácie vzorky resp. čidla/sondy sú to horizontálne a vertikálne. Horizontálne usporiadanie je jednoduché, robustné, cenovo dostupné a určené najmä pre stredný teplotný rozsah. Vertikálne usporiadanie ponúka dizajn s nulovým trením, keďže vzorka je v kontakte len na spodnej a vrchnej strane (neopiera sa o steny), väčší teplotný rozsah a malé požiadavky na priestor v laboratóriu. Podľa spôsobu merania rozlišujeme napr. dilatometre s kapacitným snímačom, laserové, či optické využívajúce kamery. [62], [63]

Pre naše účely bol použitý vertikálny dilatometer Setsys Evolution TMA na obrázku 34 so schematickým znázornením konštrukcie na obr. 35. Umožňuje rozsah až do 2400°C s kontrolou teploty termoelektrickým článkom a dokáže detekovať veľmi malé rozmerové zmeny, čo znamená, že nie je nutné použiť veľké vzorky pre presné merania. Sonda je z materiálu s nízkym KTE a je uchytená vo svojej pozícii pomocou elektromagnetického závesu. Posuv sondy vo vertikálnom smere je zaznamenávaný senzorom, ktorý nemá žiadne trecie kontakty, fungujúcom na princípe elektrického transformátoru. [64], [65]



Obr. 34 Setsys Evolution TMA

Pri meraní sa postupne ohrevom zvyšuje teplota a je možné sledovať buď objemové zmeny a získať tak koeficient objemovej rozťažnosti, alebo zmeny charakteristického rozmeru (dĺžky) vzorky a získať tak koeficient lineárnej rozťažnosti, ktorý bol sledovaný v tomto prípade. [62]



Obr. 35 Schéma duálneho dilatometru [66]

Pre dĺžku vzorky po zahriatí platí nasledujúci vzťah prevzatý z [62]:

$$L = L_0 + L_0 * \alpha * \Delta T \text{ [mm]} \quad (1)$$

kde: L_0 – pôvodná dĺžka vzorky [mm]

α – koeficient lineárnej rozťažnosti [K^{-1}]

ΔT – zmena teploty [K]

Po vyjadrení koeficientu:

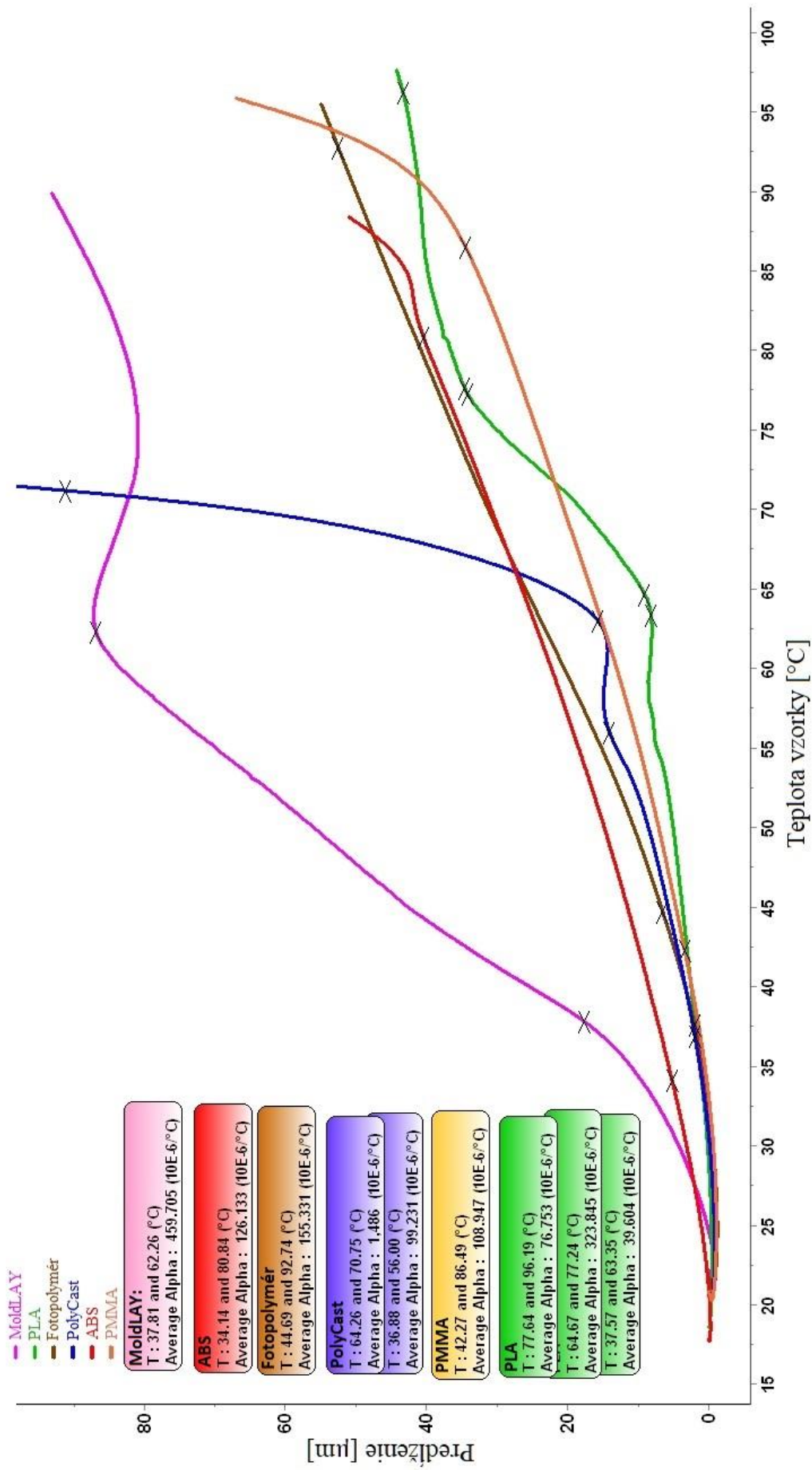
$$\alpha = \frac{L - L_0}{L_0 * \Delta T} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

Po úprave:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} * \frac{\Delta L}{\Delta T} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

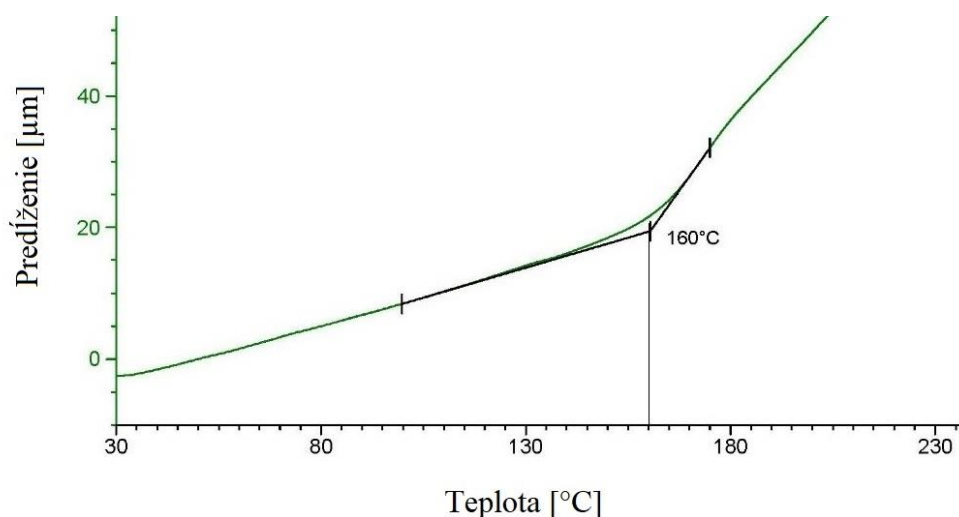
Vzorky z šiestich rôznych materiálov boli podrobené meraniam zobrazeným na obrázku 36 a v tabuľke 4. Vzorky predstavovali valčeky o priemere $\varnothing 6$ mm a rovnako výške 6 mm. Pri meraní sa postupovalo po inkrementoch s veľkosťou $3^\circ C/min$ a sledovalo sa absolútne predĺženie vzoriek. Hodnoty predĺženia v závislosti na teplote v intervale od teploty okolia do $100^\circ C$ boli vynesené do grafu. Zo získaných hodnôt môžeme určiť KTE materiálov. Dilatačné krivky nie sú dostatočne lineárne závislosti v celom teplotnom intervale. Amorfné polyméry majú náhodnú molekulárnu štruktúru, ktorá nemá presný bod topenia a tieto materiály postupne mäknú so zvyšujúcou sa teplotou nazývanou teplota skleneného prechodu (T_g). V tejto oblasti dochádza ku zmene stúpania krivky (obr. 37) a preto je nutné viazať KTE ku konkrétnemu vymedzenému intervalu. [67]

T_g je dôležitá charakteristika polymérnych materiálov. Reprezentuje bod pri ktorom dochádza ku zmene vlastností polyméru. Presnejšie uvedené je to oblasť, nie konkrétna teplota. Materiál mení vlastnosti v určitom rozsahu teplôt, nie len v jednom bode. Napriek tomu sa väčšinou uvádza ako jediné číslo. [68]



Obr. 36 Meranie

Polymér pri T_g prechádza zo sklovitého stavu vyznačujúceho sa vysokým modulom pružnosti, tvrdosťou a krehkosťou do viskózneho gumovitého stavu, kedy modul pružnosti môže poklesnúť aj o tri rády. Je to spôsobené zvýšenou pohyblivosťou molekúl, ktoré konajú rotačný alebo kývavý pohyb, ktorý má za následok pokles medzimolekulárnych síl. Pre približné určenie T_g je možné využiť viacero metód. Jednou z nich je aj dilatometria a metóda aproximácie je jednoduchá (obr. 37). V oblastiach pred a po T_g je krivka preložená priamkami, ktorých priesečník určuje teplotu prechodu. [68], [69]



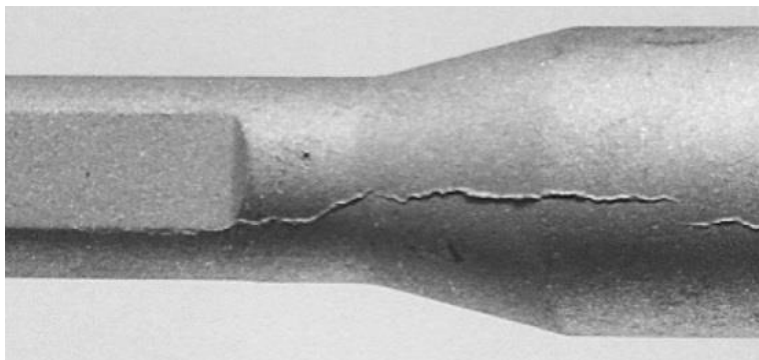
Obr. 37 Určenie teploty skleného prechodu [68]

Tab. 5 Výsledky merania

Materiál	Výška vzorky [mm]	$\sim T_g$ [°C]	Teplotný interval [°C]	KTE [10E-6/°C]
MoldLay	6,15	-	37,81 - 62,26	459,705
ABS	5,98	86	34,14 - 80,84	126,133
Fotopolymér	6,16	-	44,69 - 92,74	155,331
PolyCast	6,37	63	36,88 - 56,00	99,231
			64,26 - 70,75	1 486,000
PMMA	6,45	92	42,27 - 86,49	108,947
PLA	6,15	64	37,57 - 63,35	39,604
			64,67 - 77,24	323,845
			77,64 - 96,19	76,753

Z nameraných hodnôt predĺženia môžeme stanoviť KTE a z kriviek stanoviť približné T_g . Grafický výstup merania je na obrázku 37 s výsledkami uvedenými v tabuľke 5. Najmenší koeficient pred T_g má PLA. Nasleduje PolyCast, PMMA a ABS. Koeficienty vzoriek zo zmiených filamentov odpovedajú očakávaniam. Oproti zmieným štyrom filamentom má fotopolymér len o niečo väčší koeficient, čo by na prvý pohľad nepredstavovalo problém. Modely z fotopolymérov sú ale v porovnaní s voskovými a termoplastickými modelmi známe väčšou mierou expanzie. Sú to totiž reaktoplasty – vytvrdené, tepelne odolné látky so zosieťovanou štruktúrou. Fotopolyméry sa tým pádom nezmäkčujú pri nižších teplotách a pokračujú v expanzii aj vo vyšších teplotách na rozdiel od termoplastov akými sú napr. ABS, PLA a iné, čo znamená, že modely vytvorené stereolitografiou dosahujú vyšších predĺžení. Prekvapivé výsledky dosahuje filament MoldLAY vyvinutý špeciálne pre potreby odlievania s najväčším KTE zo všetkých testovaných materiálov. [67], [69], [70]

Pri vytavovaní rovnako dilatuje aj škrupina, avšak v menšej miere a pomalšie. Rozdiely v expanzii škrupiny a modelu sú dôvodom tvorenia prasklín, ktoré robia škrupinu nepoužiteľnou. Tento efekt je magnifikovaný prítomnosťou koncentrátorov napätia akými sú napr. ostré hrany. Problémy môžu predstavovať aj hlboké slepé diery v ktorých sa nevytvorí dostatočná vrstva alebo obalový materiál nevtučie ideálne a dôjde k uväzneniu vzduchových bublín medzi modelom a škrupinou. [5], [70]



Obr. 38 Vada odliatku [71]

Praskaniu škrupín je možné predísť vhodným výberom materiálu modelu vyznačujúcim sa menšou mierou expanzie. Nielen materiál ale aj jeho objem má vplyv na tvorbu prasklín, ktoré majú v tom lepšom prípade za následok tzv. „finning“ na obrázku 38, kedy pri odlievaní štrbinu zaplní roztavený kov. Problém je riešiteľný použitím redšej vnútornej výplne namiesto tlačenia plného modelu. Tá sa prejaví aj na množstve zvyškového popola po vypaľovaní. Pri použití voskovej vtokovej sústavy v kombinácii s vytlačenými modelmi je najprv doporučené vytavovanie vosku pri nižších teplotách. Preskočenie tohto kroku a vypaľovanie bez predchádzajúceho vytavenia môže mať za následky rozsiahle popraskanie. Ak je to možné, modely sú duté alebo s čo najmenšou dovolenou výplňou. Plné modely s väčším objemom vyvolávajú vyššie tlaky na stenu škrupiny. Paradoxne použitie dutého/čiastočne dutého modelu môže mať za príčinu nežiadúci efekt pri ktorom sa rozpína vzduch uväznený v kapsulách tvorených stenami modelu alebo výplňou. Pre dve varianty sa ponúkajú nasledujúce riešenia. V prípade modelu s 0% výplňou je možné buď manuálne, alebo pri modelovaní odobrať materiál na stene, ktorá bude lepená na vtokovú sústavu a vytvoriť tým otvor, cez ktorý môže unikať rozpínajúci sa vzduch, ktorému nebude brániť v pohybe vosková vtoková sústava ak sa správne najprv vytaví. Výplň predstavuje komplikáciu vo forme viacerých dutín z ktorých každá potrebuje vlastný otvor. Riešením by mohla byť aplikácia druhu výplne, ktorá tvorí v modeli len jednu vzájomne prepojenú dutinu akou je napr. typ „gyroid“ na obrázku 39. Táto výplň je zaujímavá svojím tvarom, ktorý poskytuje podporu a uniformnú pevnosť nielen v ose Z ale aj v iných smeroch. V porovnaní s inými výplňami môže vyžadovať menej materiálu a času. [71], [72], [73]



Obr. 39 Výplň „gyroid“ [73]

7 ZÁVERY

V práci boli uvedené dôvody pre použitie 3D tlače v spojení s presným odlievaním. Hybridné presné odlievanie s tlačnými modelmi je vhodné pri prototypovaní odliatku, kedy skracaie čas výroby a meniacich sa požiadavkách na jeho vlastnosti. Je taktiež vhodné ho použiť pri malosériovej výrobe, pri ktorej nie je hospodárne vytváranie kovovej formy pre vstrekolis. Princípy jednotlivých metód boli stručne popísané a u každej z nich uvedený aspoň jeden použiteľný materiál, častokrát s odporúčaniami pre dosiahnutie lepšej drsnosti, lepšiemu vypáleniu s čo najmenším množstvom popola, ktorý môže spôsobovať vady na odliatku. Odporúčania sú obecné a konkrétne postupy vždy závisia aj na parametroch akými sú geometria odlievanej súčasti, zloženie obalovej vrstvy či skúsenosti a vybavenie zlievarne.

3D tlač je vo veľkej časti práce vnímaná len ako prostriedok slúžiaci k tvorbe odliatkov, no ako bolo zmienené v kapitole 4, tlač kovových materiálov umožňuje priamu výrobu súčasti bez nutnosti podstupovania množstva úkonov nutných pre úspešné odliatie ako je tomu pri hybridnom odlievaní a zároveň nemá toľko obmedzení ako trieskové obrábanie. To ju robí unikátnou a v budúcnosti môže mať dopad aj na technológiu vytaviteľného modelu.

Cenové porovnanie zákazkovej 3D tlače zahŕňalo len 3 materiály. Z kalkulácií síce vyplýva, že FDM tlač je najlacnejšia vo všetkých uvažovaných objemoch výroby, no výsledok nie je v žiadnom prípade možné týmto spôsobom generalizovať. Kalkulácie sa navyše líšili v zohľadnení termínu dodania, prípadne ceny práce, ktorá je potrebná na prípravu modelov, čo znamená, že nie sú v tomto ohľade ekvivalentné a skutočné ceny sa môžu značne líšiť. Modely vytvorené FDM môžu vyžadovať dodatočné vyhladenie na dosiahnutie požadovanej drsnosti, prípadne zvolenie menšej výšky vrstvy. Rovnako modely z PMMA je nutné pre dosiahnutie lepšej drsnosti a pevnosti infiltrovať voskom. Pri výbere metódy tlače je nutné brať na zreteľ aj rozmerové limitácie. Príkladom je SLA tlač, za účelom ktorej boli kontaktované 2 rôzne spoločnosti, z ktorých ani jedna nedisponovala tlačiarňou s dostatočne veľkým priestorom. Riešením môže byť rozdelenie modelu na viacero samostatne vytlačených častí a následné zloženie za cenu viditeľnosti deliacich rovín alebo uvažovanie nad inými metódami tlače. Rozmery modelu na ktorom boli kalkulácie založené mali rovnako za následok vysoké náklady pri voskových modeloch dané obmedzeným tlačovým priestorom.

Pri dilatometrii boli merania uskutočnené iba raz a to v značne obmedzenom teplotnom intervale s krivkami zachytávajúcimi len časť expanzie vzoriek pri nízkych teplotách. Dáta sú dostatočné pre stanovenie koeficientov tepelnej expanzie v prislúchajúcich intervaloch a vo väčšine prípadov aj teplôt skleneného prechodu. Merania pri vyšších teplotách by si zaslúžil hlavne fotopolymér, u ktorého je predpokladaná možná expanzia až do teplôt ~300-400°C. Rovnako by boli vhodné aj opätovné merania pre filament MoldLAY, ktorý je na báze vosku a napriek tomu vykazuje vyššiu mieru rozťažnosti ako ostatné filamenty. Fenomén praskania škrupín je spôsobený príliš rozdielnou rozťažnosťou modelu a škrupiny a výšky teploty skleneného prechodu, ktorá je daná do veľkej miery typom polyméru. Koeficienty a teploty môžu byť odlišné aj pri materiáloch predávaných pod rovnakým označením keďže obsahujú aditíva, ktoré v konečnom dôsledku ovplyvnia aj tieto charakteristiky či už zámerne, alebo nie. Nežiadúcemu efektu praskania škrupín je možné zabrániť výberom vhodného materiálu a redukciami objemu modelu použitím výplne alebo kompletne dutého modelu s dodatočnými úpravami bližšie opísanými v kapitole 6.

ZOZNAM ZDROJOV

- [1] KHAN, M. A. A., A. K. SHEIKH a B. S. AL-SHAER. Evolution of Metal Casting Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-46633-0. ISBN 978-3-319-46632-3.
- [2] CYCLONE. MK Technology [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.mk-technology.com/?pageID=152>
- [3] PATTNAIK, Sarojrani, D. Benny KARUNAKAR a P.K JHA. Developments in investment casting process—A review. Journal of Materials Processing Tech [online]. Elsevier B.V, 2012, 212(11), 2332-2348 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003. ISSN 0924-0136.
- [4] MACHINE OUTILS AUTRES PROCÉDÉS: MK TECHNOLOGY – CYCLONE. In: Multistation [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.multistation.com/produit/mk-technology-cyclone/>
- [5] HORÁČEK, M. TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu [online]. Brno: Odbor slévárnství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/studium/studijni-opory>
- [6] BEELEY, P.R. a R.F. SMART. Introduction. Investment Casting. London: Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1995, s. 1-2. ISBN 9780901716668. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpIC000011/id:kt00B8UITJ/investment-casting/introduction?kpromoter=Summon>
- [7] Blades. Turbine casting [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.turbine-casting.com/#>
- [8] METEYER, Si., X. XU, N. PERRY a Y. F. ZHAO. Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes. In: Procedia CIRP [online]. Elsevier B.V, 2014, 15(C), s. 19-25 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.030. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114004533?via%3Dihub>
- [9] STUCKER, B., I. GIBSON a D.W. ROSEN. BRENT STUCKER. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer US, 2010. ISBN 1441911197.
- [10] GEBHARDT, A. a J.S. HÖTTER. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser Publishers, 2016. DOI: 10.3139/9781569905838. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [11] JONES, N. Preparing SOLIDWORKS Models for 3D Printing. SOLIDWORKS Tech Blog [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2015/05/preparing-solidworks-models-3d-printing.html>

- [12] Resolution when exporting 3D model. FACFOX [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://facfox.com/docs/file-resolution>
- [13] ZELTMANN, S., N. GUPTA, N. TSOUTSOS, M. MANIATAKOS, J. RAJENDRAN a R. KARRI. Manufacturing and Security Challenges in 3D Printing. JOM [online]. New York: Springer US, 2016, 68(7), 1872-1881 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1007/s11837-016-1937-7. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-016-1937-7>
- [14] GEBHARDT, A. Product Development - Product Formation - Rapid Product Development. Rapid Prototyping. Munich: Hanser Publishers, 2003, s. 1-27. ISBN 9783446402690. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpRP000001/id:kt003RPOJ8/rapid-prototyping/product-development-product?kpromoter=Summon>
- [15] WANG, J., S. R. SAMA, P. C. LYNCH a G. MANOGHARAN. Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting. Procedia Manufacturing [online]. 2019, 34, 683-694 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.224. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919309552>
- [16] HERZÁN, J. Možnosti uplatnění aditivních technologií při přímé výrobě slévárenských forem. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [17] CustomPartNet [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/>
- [18] JAIN, P. a A.M. KUTHE. Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach. In: Procedia Engineering [online]. Elsevier, 2013, 63(C), s. 4-11 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.275. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813014884>
- [19] RAFAJA, H. Monitorování procesu FDM tisku. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [20] 3D Printing Filament. MachinableWax [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.machinablewax.com/product.php?product=52>
- [21] LEFEBVRE, J. BRINGING INDUSTRIAL MANUFACTURING TO THE DESKTOP WITH NEW MOLDLAY 3D PRINTING FILAMENT. 3D Printing Industry [online]. 16. 2. 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/industrial-manufacturing-desktop-new-moldlay-3d-printing-filament-42481/>
- [22] MOLDLAY Filament. In: MatterHackers [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/moldlay-filament-3.00mm>
- [23] PolyCast. Filament2print [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://filament2print.com/gb/lay/946-polycast.html>

- [24] Application note for PolyCast™. In: Polymaker [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://polymaker.com/Downloads/Application_Note/PolyCast_Application_Note_V1.pdf
- [25] PolyCast: by Polymaker. LulzBot [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.lulzbot.com/store/filament/polycast>
- [26] Polymaker Polysher. CORE Electronics [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://core-electronics.com.au/polymaker-polysher.html>
- [27] GURJAR, D., S. SHARMA a M. SARKAR. A Review on testing methods of recycled Acrylonitrile Butadiene-Styrene. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2018, 5(14), 28296-28304 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.113. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318324088>
- [28] P GURJAR, D., S. SHARMA a M. SARKAR. A Review on testing methods of recycled Acrylonitrile Butadiene-Styrene. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2018, 5(14), 28296-28304 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.113. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318324088>
- [29] UP ABS PLUS (aka UP Fila Tough ABS). In: Plug N Play 3D [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.plugnplay3d.com/index.php/product/up-abs/>
- [30] BEZDĚK, A. Praktické skúsenosti s používaním 3D tlače v zlievniach neželezných kovov. In: , Kolektív autorů. Sborník přednášek ze 7. HOLEČKOVY KONFERENCE: Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů. Brno: Česká slévárenská společnost, 2017, s. 45-52. ISBN 978-80-02-02717-1.
- [31] MARWAH, O.M.F., S. SHARIF, S. SULAIMAN, M. IBRAHIM a E.J. MOHAMAD. Direct Investment Casting Numerical Study for ABS P400 FDM Materials. In: *Applied Mechanics and Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2014, s. 99-103 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.660.99. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287136356_Direct_investment_casting_numerical_study_for_ABS_P400_FDM_materials
- [32] HARUN, W., S. SAFIAN a M. IDRIS. Evaluation Of ABS Patterns Produced From FDM For Investment Casting Process. *WIT Transactions on Engineering Sciences* [online]. Southampton: W I T Press, 2009, 64, 319-328 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.2495/MC090301. ISBN 9781845641894. ISSN 17464471. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2262081499/>
- [33] SIBER, B. 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained. All3DP [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>
- [34] PAGE, I. New 3D Printing Solution Changes Investment Casting Wax Patterns. *Spotlightmetal* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.spotlightmetal.com/new-3d-printing-solution-changes-investment-casting-wax-patterns-a-770705/>

- [35] ProJet MJP 2500 IC: TOOL-LESS PRODUCTION OF 100% WAX CASTING PATTERNS. 3D Systems [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-mjp-2500-ic>
- [36] VisiJet M2 ICast (MJP): ProJet MJP 2500 IC Tech Specs (English). In: 3D Systems [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-m2-icast-mjp>
- [37] SCHMIDLEITHNER, Ch. a D.M. KALASKAR. Stereolithography. CVETKOVIĆ, D. 3D Printing [online]. InTechOpen, 2018, s. 3-22 [cit. 2020-06-14]. ISBN 978-1-83881-788-6. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/3d-printing/stereolithography>
- [38] Somos® Element for Better Investment Casting. DSM [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.dsm.com/solutions/additive-manufacturing/en_US/products/stereolithography/somos-element.html
- [39] O'CONNOR, D. Return of investment. TCT Magazine [online]. 29 December 2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/prsnlz/return-of-investment-3d-printing/>
- [40] Shaping the future of investment casting: using a polymer formulation instead of wax, stratasys direct manufacturing is offering accuracy, flexibility, and functionality to match certain foundries' particular techniques. Foundry Management & Technology [online]. Penton Media, Inc., Penton Business Media, Inc. and their subsidiaries, 2017, 145(7), 18 [cit. 2020-06-16]. ISSN 0360-8999. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1931581919/D0AB74EADEDC4E95PQ>
- [41] Top 4 Differences Between Stereolithography and PolyJet. Stratasys [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/manufacturing-services/3d-printing/differences-between-stereolithography-polyjet>
- [42] PolyJet & 3D Printed Silicone (60-65%): How Does PolyJet Work? Proto Labs [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.protolabs.co.uk/services/3d-printing/polyjet-3d-printed-silicone-60-65/>
- [43] PolyJet Investment Casting: DESIGN GUIDE. Stratasys [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/-/media/files/design-guides/dg_pj_investmentcasting_1217a.pdf
- [44] ŘASA, J. a Z. KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. MM Spektrum [online]. 2008 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [45] Materiálový slovník: HIPS. Materialpro3d [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/hips/>

- [46] YANG, J., Y. SHI, Q. SHEN a C. YAN. Selective laser sintering of HIPS and investment casting technology. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier B.V, 2009, 209(4), 1901-1908 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.056. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013608003671>
- [47] Investment Cast from 3D printed Master. In: Malcolm Nicholls Limited [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://rossnicholls.net/case-studies/mod-investment-cast-ball/>
- [48] PrimeCast® 101 Datasheet. UL Prospector [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/datasheet/e252322/primecast-101>
- [49] PrimeCast®101: the high performance pattern material. In: DocPlayer [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://docplayer.net/14606559-Eosint-p-and-formiga-p-materials-for-plastic-laser-sintering-systems.html>
- [50] DTM Offers Faster, More Reliable Path to Investment Casting. PR Newswire [online]. New York: PR Newswire Association, 1999, , 1-3 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/449861668/>
- [51] SOE, S. P. a D. R. EYERS. FEA support structure generation for the additive manufacture of CastForm™ polystyrene patterns. *Polymer Testing* [online]. Elsevier, 2014, 33(1), 187-197 [cit. 2020-06-15]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.08.009. ISSN 0142-9418. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941813001670>
- [52] STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: Technology Introduction and Business Implications. NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING. *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2011 Symposium*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2012, s. 5-14. ISBN 9780309221436. Dostupné také z: <https://www.nap.edu/read/13274/chapter/4>
- [53] 3D TISK V KOSTCE. Materiál pro 3D [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [54] Binder Jetting (BJ). Additively [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- [55] Voxeljet [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.voxeljet.com/>
- [56] POLZIN, Ch., S. SPATH a H. SEITZ. Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited, 2013, 19(1), 37-43 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1108/13552541311292718. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1355326862/B2B08258580547BAPQ/1?>

- [57] MUELLER, T.J. What impact will 3D metal printing have on investment casting? In: TRANSACTIONS of the American Foundry Society: One Hundred Twenty-Second Annual Metalcasting Congress. Schaumburg: American Foundry Society, 2018, s. 305-310. ISBN 978-0-87433-464-7.
- [58] TODD, I. Metallurgy: No more tears for metal 3D printing. Nature [online]. Nature Publishing Group, 2017, 549(7672), 342-343 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1038/549342a. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/549342a>
- [59] MENSLEY, M. Additive Metallurgy: 2020 Metal 3D Printer Buyer's Guide. All3DP Pro [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
- [60] KOW, Ch. 3D Metal Printing: Tips, Trends, and Common Misconceptions: Metal Printing Methods. In: MachineDesign [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21835806/3d-metal-printing-tips-trends-and-common-misconceptions>
- [61] LIU, J., A. GAYNOR, S. CHEN, et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. Structural and Multidisciplinary Optimization [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, 57(6), 2457-2483 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1007/s00158-018-1994-3. ISSN 1615-147X. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/2262563121/D6E2626723714BAAPQ/2?>
- [62] WHAT IS COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION? HOW TO MEASURE IT? Thermtest [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://thermtest.com/what-is-coefficient-of-thermal-expansion-how-to-measure-it>
- [63] Dilatometrie DIL. RMI [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.rmi.cz/dilatometrie>
- [64] SETSYS EVOLUTION TMA. Setaram: KEP TECHNOLOGIES [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.setaram.com/setaram-products/thermal-analysis/thermo-mechanical-analysis-tma-dilatometry/setsys-evolution-tma/>
- [65] Brochure-SETSYS Evolution. In: Setaram: KEP TECHNOLOGIES [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.setaram.com/setaram-products/thermal-analysis/thermo-mechanical-analysis-tma-dilatometry/setsys-evolution-tma/>
- [66] Dilatometry. Katedra fyziky materiálů [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://material.karlov.mff.cuni.cz/en/equipment/dilatometry>
- [67] Plastic Overview. In: SPIROL [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.spirol.com/mkt/rs1.php?search=9>
- [68] MOYLAN, J. Considerations for Measuring Glass Transition Temperature. Element [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2017/08/15/18/45/considerations-for-measuring-glass-transition-temperature>

- [69] BĚHÁLEK, L. Polymery [online]. [cit. 2020-06-21]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [70] A study of the effects of digitally produced casting models on casting quality. Legor [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://legor.com/fr/alliages-fra/430-a-study-of-the-effects-of-digitally-produced-casting-models-on-casting-quality>
- [71] Defects: Finning. Investmentcasting [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <http://61746c6173.investmentcasting.org/wax/defect/finning/index.html>
- [72] SHARMA, A., M. ACHARYA, A. AGARWAL, S.C. SHARMA, K. SREEKUMAR a P. P. SINHA. Study of Shell Cracking Behavior and its Remedies in Investment Casting Process Using Quick Cast Rapid Prototype Polymer Patterns. In: Materials Science Forum [online]. Trans Tech Publications, 2012, s. 214-219 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1038/nature14127. ISBN 9783037853177. ISSN 0255-5476. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284522487_Study_of_Shell_Cracking_Behavior_and_its_Remedies_in_Investment_Casting_Process_Using_Quick_Cast_Rapid_Prototype_Polymer_Patterns
- [73] GHARGE, P. Cura Gyroid Infill: All You Need to Know. All3DP [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cura-gyroid-infill/>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Význam	Jednotka
α	koeficient lineárnej rozťažnosti	[K ⁻¹]
ΔL	zmena dĺžky	[mm]
ΔT	zmena teploty	[K]
ABS	akrylonitrilbutadiénstyrén	[-]
BJ	binder jetting	[-]
DED	direct energy deposition	[-]
FDM	fused deposition modeling	[-]
HIPS	high impact polystyrene	[-]
KTE	koeficient tepelnej expanzie	[K ⁻¹]
L	celková dĺžka vzorky	[mm]
L ₀	pôvodná dĺžka vzorky	[mm]
MJP	multijet printing	[-]
PBF	powder bed fusion	[-]
PC101	PrimeCast 101	[-]
PLA	polylactic acid	[-]
PMMA	polymetyl metakrylát	[-]
RP	rapid prototyping	[-]
SLA	stereolitografia	[-]
SLS	selective laser sintering	[-]
T _g	teplota skleného prechodu	[°C]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Zariadenie Cyclone [4].....	9
Obr. 2 Schéma metódy odlievania do keramických škrupín [5].....	10
Obr. 3 Lopatky turbíny vyrobené presným odlievaním [7].....	11
Obr. 4 Porovnanie rozlíšenia STL súboru [11].....	12
Obr. 5 Časové porovnanie metód presného odlievania [16].....	12
Obr. 6 Schéma metódy FDM [17].....	13
Obr. 7 Filament MoldLAY [22].....	14
Obr. 8 Povrchové vady odliatku [15].....	14
Obr. 9 Vytláčené modely a ich odliatky [25].....	15
Obr. 10 Povrch pred a po ošetrovaní prístrojom Polysher [26].....	15
Obr. 11 Farebné varianty filamentov [29].....	16
Obr. 12 Porovnanie modelu vytláčeného v rôznych režimoch [33].....	17
Obr. 13 ProJet® MJP 2500 IC [35].....	18
Obr. 14 Model topologicky optimalizovanej súčasti s odliatkom [35].....	18
Obr. 15 Stereolitografia [17].....	19
Obr. 16 Model s hexagonálnou výplňou [39].....	19
Obr. 17 Schéma PolyJet [42].....	20
Obr. 18 Schéma metódy SLS [17].....	22
Obr. 19 Infiltrácia voskom [47].....	23
Obr. 20 Skriňa prevodovky [49].....	23
Obr. 21 Použitie podpôr pri infiltrácií [51].....	24
Obr. 22 Schéma technológie BJ [54].....	24
Obr. 23 Model z PMMA a následný odliatok [55].....	25
Obr. 24 Voxeljet VX1000 [55].....	25
Obr. 25 Drsnosti povrchu bez a s použitím vosku [56].....	26
Obr. 26 Infiltrácia [56].....	26
Obr. 27 Vnútoraná štruktúra modelu [60].....	27
Obr. 28 Otvorené obežné koleso [57].....	28
Obr. 29 Rám dronu [57].....	28
Obr. 30 Porovnanie metód výroby [57].....	28
Obr. 31 Obežné koleso.....	29
Obr. 32 Grafické zrovnanie nákladov pre rôzne početnosti.....	30
Obr. 33 Expanzia častíc [62].....	31
Obr. 34 Setsys Evolution TMA.....	31
Obr. 35 Schéma duálneho dilatometru [66].....	32
Obr. 36 Meranie.....	33
Obr. 37 Určenie teploty skleneného prechodu [68].....	34
Obr. 38 Vada odliatku [71].....	35
Obr. 39 Výplň „gyroid“ [73].....	35

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Možné materiály pre použitie u odlievania [43].....	21
Tab. 2 Doporučenia pri konštrukcii [43].....	21
Tab. 3 Parametre tlače.....	29
Tab. 4 Náklady na tlač.....	29
Tab. 5 Výsledky merania.....	34