



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ODLITKŮ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU S VYUŽITÍM 3D TIŠTĚNÝCH MODELŮ

PRODUCTION OF CASTINGS BY THE FULL-MOLD CASTING USING 3D PRINTED MODELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bořil

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jaroslav Svoboda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bořil**
Akademický rok: 2021/22

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 odlitků metodou vypařitelného modelu s využitím 3D tištěných modelů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Lití na vypařitelný model se často využívá pro kusovou výrobu odlitků nebo pro výrobu tvarově složitých odlitků. Modely bývají nejčastěji zhotoveny z polystyrenu nebo z PMMA (Polymethylmethakrylát) CNC obráběním, tvarově složité modely pak lze zhotovit lepením jednotlivých segmentů k sobě. V současné době je možné modely z PMMA a polystyrenu tisknout pomocí 3D tiskáren, čímž se otevírají cesty pro zefektivnění výroby odlitků touto metodou především u menších a tvarově složitých odlitků.

Cíle bakalářské práce:

- provést literární rešerši na dané téma.
- ověřit možnosti použití 3D tištěných modelů při lití na vypařitelný model v podmínkách školní slévárny a zhodnotit použitou technologii výroby odlitků.

Seznam doporučené literatury:

ELBEL, T. Speciální metody výroby odlitků. Studijní opora. FMMI. VŠB-TU Ostrava, 2008, 95 s.

BEELEY, P.R. Foundry technology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.

MOCEK, J. and A. CHOJECKI. Gas Atmosphere Formed in Casting by Full Mold Process. Archives of metallurgy and materials [online]. WARSZAWA: De Gruyter Open, 2014, 59(3), 1045-1049 [cit. 2021-10-22]. ISSN 1733-3490. Dostupné z: doi:10.2478/amm-2014-0176

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je výroba odlitku metodou vypařitelného modelu s využitím 3D tištěných modelů. Nejprve je v práci provedena rešerše na dané téma a následně pojednává o postupu výroby odlitku touto metodou. Pro výrobu modelu byla vybrána 3D FDM tiskárna PRUSA MK3S+ a zvoleny filamenty HIPS a PMMA. Následuje volba nátěru modelu vhodného pro tuto technologii, zaformování do netrvalých pískových forem a odlití modelů. Nakonec jsou porovnány výsledné povrchy odlitků z modelu s nátěrem a bez nátěru.

Klíčová slova

full mold, lost foam, vypařitelný model, 3D tisk

ABSTRACT

The aim of the work is to produce a casting using the evaporable model method with the use of 3D printed models. First, the thesis conducts a research on the topic and then discusses the process of producing a casting using this method. The PRUSA MK3S+ 3D FDM printer was chosen for the production of the model and HIPS and PMMA filaments were selected. This is followed by the selection of a model coating suitable for this technology, moulding into non-permanent sand moulds and casting the models. Finally, the final surfaces of the cast models with and without coating are compared.

Key words

full mold casting, lost foam casting, evaporative pattern, 3D print

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, Jaroslav. *Výroba odlitků metodou vypařitelného modelu s využitím 3D tištěných modelů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140231>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Petr Bořil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma výroba odlitků metodou vypařitelného modelu s využitím 3D tištěných modelů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....

místo, datum

.....

Jaroslav Svoboda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé práce Ing. Petru Bořilovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji svým rodičům, bratrovi, přítelkyni a blízkým přátelům za jejich podporu a nekonečnou trpělivost se mnou.

.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2 LITÍ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU	11
2.1 Metody	12
2.2 Nátěr	15
2.3 Atmosféra uvnitř formy a nežádoucí uhlík	16
3 TVORBA MODELU	17
3.1 Konvenční výroba modelu	17
3.2 3D TISK	19
3.2.1 FDM	19
3.2.2 SLA	21
4 VÝROBA ODLITKU	22
4.1 Optimalizace HIPS a PMMA	23
4.2 Nátěr	25
4.3 Formování a lití	26
4.3.1 První lití	28
4.3.2 Druhé lití	30
ZÁVĚR	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	36
SEZNAM PŘÍLOH	37

ÚVOD

3D tiskárnu už má doma dnes skoro každý. Dá se najít téměř v každé firmě, škole, nebo i domácnosti. Jelikož jsou zejména FDM tiskárny stále více dostupné, přibývá i lidí, kteří si je pořizují. Obvykle si s nimi chtějí nějak ulehčit život. Vytisknout si rozbité nástavce na vysavač, kryt baterií k dálkovému ovládání nebo nějakou ozdobu do domácnosti či kanceláře. Možnosti jsou téměř neomezené a bylo otázkou času, kdy se tisk začne používat úplně všude. Výjimkou není ani široká oblast slévárenství, kde jej lze využít pro tvorbu modelů nebo forem. Výhoda 3D tisku je, že lze vytisknout velmi složité dílce i malých rozměrů za velmi krátkou dobu.

Jelikož existuje velká spousta druhů materiálů, které lze pro 3D tisk použít, tak najde využití i v technologii lití na vypařitelný model. Tato technologie s názvem lost foam casting a full mold casting se používá již od roku 1958, kdy si H.F. Shroyer patentoval tuto metodu. Největší zájem o vývoj těchto metod byl zaznamenán v 80. letech, kdy se začal používat v oblasti automotive pro Ford, Fiat a Mitsubishi. [4; 2]

Výhodou 3D tisku je tedy to, že není třeba zadávat nové programy do CNC ani pořizovat nákladné vypěňovací formy na používané polystyrenové vypařitelné modely. S tiskárnou se model jednoduše vytiskne, zaformuje a odlíje. Jelikož model zůstává až do úplného odlití ve formě, nemusí konstruktér myslet na žádné úkosity, jádra atd., což může zkrátit celkový čas designování modelu a vést k větší produktivitě.

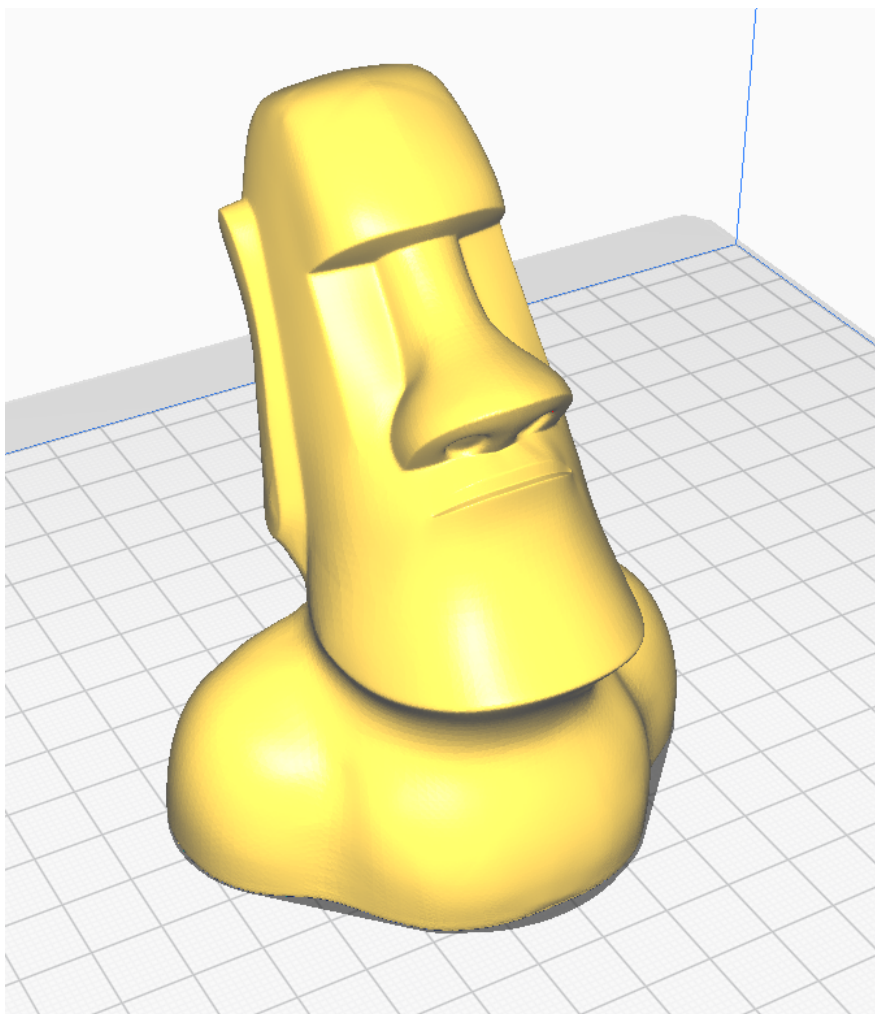
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem bakalářské práce je vyrobit odlitek v prostorách školní slévárny metodou full mold, která spočívá v lití na vypařitelný model do netrvalé pískové formy. Bude zaformováno několik 3D tištěných modelů, které se budou lišit zejména materiálem. Materiály pro tento způsob lití byly zvoleny high impact polystyrene (HIPS) a polymethylmetakrylát (PMMA).

Pro dobrou kvalitu výsledného odlitku bude potřeba správně optimalizovat parametry tisku. To bude spočívat ve volbě vhodných teplot pro daný materiál, správných tiskových rychlostí, chlazení, výšky vrstvy atd. Pokud by tiskový materiál nebyl správně optimalizován, mohly by se vyskytnout chyby jako nedostatečná přilnavost jednotlivých vrstev, tvorba nežádoucích vláken nebo roztékání materiálu. Následně by se samozřejmě všechny tyto nedostatky vyskytly i na odlitku.

Modely budou následně ve školní slévárně opatřeny vhodným nátěrem, zaformovány, bude vytvořena vtoková soustava a budou odlity. Ve finále budou zhodnoceny všechny odlitky a porovnány výsledky.

Pro práci byla jako model zvolena soška Moai (viz obr. 1), která je volně dostupná na webu Cults3D v několika variantách [20]. Optimalizace modelu pro 3D tisk, výběr teplot, rychlosti a celkově všechno nastavení, které se týká 3D tisku, bude nastaveno v programu Ultimaker Cura. Model bude nakonec vytištěn na tiskárně PRUSA MK3S+.



Obr. 1 Vybraný model.

2 LITÍ METODOU VYPAŘITELNÉHO MODELU

Metoda vypařitelného modelu spočívá v lití roztaveného kovu do formy, ve které se na rozdíl od většiny slévárenských metod daný model při lití stále nachází a vypaří se vlivem vysoké teploty kovu, který vtéká do prostor formy k modelu. Nejčastěji používaný materiál pro tvorbu modelu je expandovaný polystyren (EPS). Příklady polystyrenových modelů a následně i z něj vzniklé odlitky lze vidět na obrázku 2. Nejpoužívanější druhy tohoto způsobu lití se nazývají Full mold casting (zkráceně FMC) a Lost foam casting (zkráceně LFC). [2]

Tyto metody mají oproti ostatním, klasickým způsobům odlévání, mnoho výhod. Zejména možnost vyrobit velmi složité tvary o malých rozměrech, velká přesnost odpadá nutnost použití a výroby jader. Vzhledem k tomu, že se model z formy nevyjímá, není třeba řešit tvar modelu, s kterým souvisejí na příklad normálně nepostradatelné úkosy. To dává větší volnost a svobodu, co se týče tvorby tvaru modelu. Větší možnost využití této technologie na příklad pro lití ocelí bohužel omezuje velké množství uhlíku, který se uvolňuje při spalování polystyrenového modelu a ovlivňuje chemické složení taveniny. Tvoří také nežádoucí vrstvy, které mohou vést ke spoustě defektů. [2; 4]

Klíčovou roli pro dosažení kvalitního povrchu odlitku hraje samotná technologie výroby daného modelu. Kromě klasických způsobů výroby modelu, jako je na příklad velmi flexibilní metoda použití CNC, ručního řezání nebo vypěňovacích forem, je možné využít i technologie 3D tisku. Propojení těchto dvou odvětví slévárenství a rapid prototyping dává nové možnosti přístupu k tvorbě modelů. To se odráží zejména na výsledné kvalitě jak modelu, tak odlitku a čase výroby. 3D tisk totiž kombinuje kladné vlastnosti všech druhů výroby modelů, které se dosud používali a tvoří mezi nimi skvělý kompromis, zejména pro tvorbu prototypů nebo malých a tvarově velmi složitých dílců. Pro větší kusy se příliš nehodí, jelikož tiskový čas by byl poněkud velký. [2; 6]



Obr. 2 Odlitky a jejich EPS modely [19].

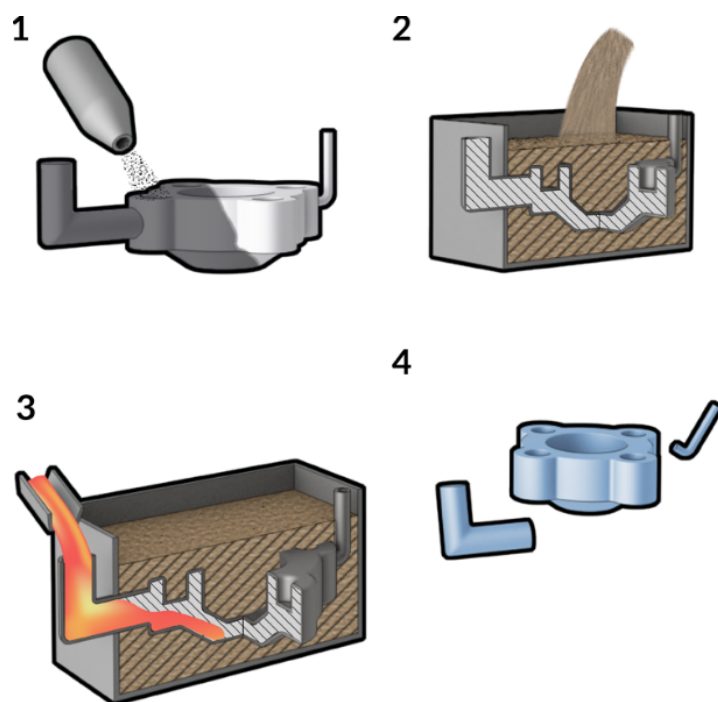
2.1 Metody

Mezi současně nejpopulárnější metody se řadí zejména metody FMC, LFC a z něj vyvinutý Replicast®. Všechny tyto technologie jsou velmi podobné, pracují na principu modelu, který se vlivem vysoké teploty roztaveného kovu vypaří a v plynné formě unikne z formy ven. V několika věcech se však liší:

- Lost foam a full mold – Jsou metody lití na vypařitelný model, které se velmi podobají lití na model vytavitelný. Rozdíl je v tom, že model zůstává ve formě, až do lití roztaveného kovu a obvykle je vyráběn z expandovaného polystyrenu. Model se začne vysokou teplotou roztaveného kovu vypařovat (spalovat) a uniká přes ostřivo ven z formy. Jelikož se při lití vypařuje, je každý polystyrenový nebo jiný model pouze na jedno použití. Princip LFC lze pozorovat na obrázku 3. [1;2]

Nejdříve tu byla technologie FMC, která používala tradiční systém směsi ostřiva s pojivem, kterým se ve formě zasypal polystyrenový model. Metoda se stále používá, ale obvykle jen pro kusovou výrobu velkých a těžkých odlitků. Tento způsob však postupně začala nahrazovat metoda LFC, která mimo jiné nabízí zejména lepší výsledný povrch odlitku oproti metodě předchozí. [1;2;7]

Na rozdíl od předešlého postupu, používá LFC ostřivo bez pojiva. Polystyrenový model opatřený ochranným nátěrem je vložen do kovového kontejneru a kontrolovanými vibracemi zaplní písek ve formě všechny dutiny a místa okolo něj. Jakmile jsou vibrace ukončeny, začíná lití roztaveného kovu a model se vlivem vysoké teploty vypařuje ven. Vysoké náklady u metody LFC vznikají hlavně na vypěňovacích formách pro tvorbu modelu. Díky těmto formám se dá získat model, který má velmi malou hustotu, snadno se odpařuje a má dobrou kvalitu povrchu. Ta se projeví zejména na výsledném odlitku. I přes vysoké vstupní náklady může být však tato metoda velmi ekonomicky výhodná. [1;2;4]



Obr. 3 Postup při výrobě odlitku [11].

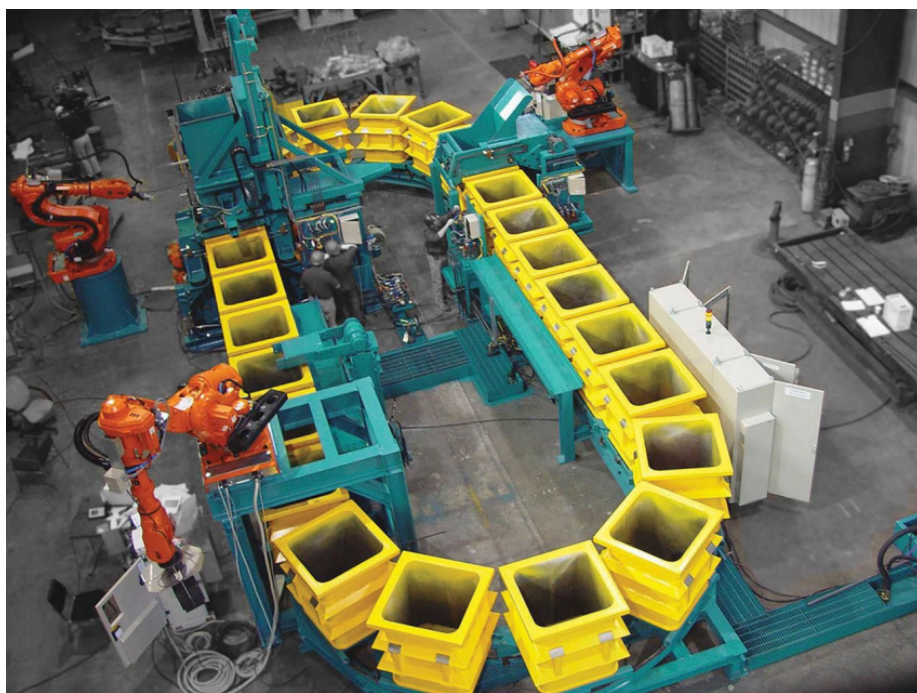
Mezi hlavní výhody metody LFC patří [1;4]:

- Náklady pro velkosériovou výrobu jsou ve výsledku nízké,
- výsledné výrobní výdaje u jednoduchých odlitků jsou při metodě LFC v porovnání s tradičními metodami lití zhruba o 25 % levnější a u komplexnějších dílů až o 45 % levnější,
- nižší energetická spotřeba při výrobě,
- snadnější vyjímání odlitků z forem oproti ostatním metodám,
- snížená nutnost opracování výsledného odlitku,
- písek není nijak toxicky závadný a může se tedy používat opakovaně,
- možnost automatizace výroby (viz obr. 4).

Mezi hlavní nevýhody metody LFC patří [1;4]:

- Vysoké pořizovací ceny vybavení, zejména vypěňovacích forem,
- nutné šetrné zacházení s modely, vzhledem k jejich materiálu.

Velký vliv na výslednou kvalitu odlitku má rychlost lití. Ta ale není dána tím, jak rychle se kov do formy nalévá, ale spíše jak rychle může model v plynném stavu opustit formu. Tato rychlost je závislá hlavně na druhu a tloušťce nátěru modelu, zejména pak na jeho prodyšnosti, a také na čísle zrnitosti ostřiva, přes které model uniká ven z formy v plynném stavu. Číslo zrnitosti je bezrozměrná hodnota, která za předpokladu, že všechna zrna jsou stejná, udává přibližný počet otvorů v síti na 1 palec čtvereční, kterými by prošel písek a má jednotku AFS (American foundry society). [4; 6] Ideální číslo zrnitosti ostřiva při odlévání slitiny hliníku a křemíku je od 50 do 60 AFS. Při číslech od 70 do 80 AFS má sice výsledný model dobrou kvalitu povrchu, ale výrazně se prodlužuje lící čas. To je dáno tím, že ostřivo má nižší prodyšnost, což znamená, že plyn hůře ostřivem uniká a roztavený kov nemá kam dále zatékat. Nižší čísla zrnitosti naopak znamenají snadné unikání plynu z formy a tím pádem kratší doby lití. V těchto případech je zrno moc hrubé a výsledný povrch odlitku již nemá dostatečnou kvalitu. [6]



Obr. 4 Automatizovaná linka lost foam [7].

- Replicast® - Technologie LFC vzala to nejlepší z metody FMC a pozdvihla ji na novou úroveň. To samé dělá metoda Replicast® s procesem LFC. Zde se využívá o něco silnější keramické obalové hmoty, která je nanášena na polystyrenový model podobnou metodou jako u lití na vytavitelný model, tzn. opakovaně se v ní máčí a nechává sušit, dokud se nedosáhne požadované tloušťky. Poté se celý model s vrstvou keramické obalové hmoty nechá dostatečně vysušit a vloží se do pece s teplotou kolem 1000 °C, přičemž se polystyrenový model vypaří a zanechá za sebou jen keramickou formu s obvyklou tloušťkou stěny 5 mm, připravenou pro lití roztaveného kovu (viz obr. 5). [2]

Forma se následně vkládá opět do kovového kontejneru (stejně jako u metody LFC) a je zasypana ostřivem, které je následně zhutněno vibracemi. Na kontejner se aplikuje vakuum, aby ostřívo maximalizovalo svůj podpůrný potenciál pro keramickou formu. Jelikož ve formě už není vypařitelný model jako v případě LFC a FMC, nevznikají žádné další plyny způsobené vypařováním polystyrenu, které by mohly poškodit výslednou kvalitu povrchu odlitku. Nedochází tedy ani k nasycování výsledného materiálu uhlíkem, což je velmi pozitivní. Vzhledem k absenci polystyrenového modelu je možné použít hustší polystyrenový model než v případě LFC a FMC. To umožní získání lepšího povrchu a silnějšího polystyrenového modelu. Pro očištění výsledného odlitku stačí jemné abrazivní otryskání, čímž se získává čistý jemný povrch a v určitých případech není nutné další obrábění. [2]

Přesností se Replicast® dá srovnávat s přesným litím s využitím vytavitelného modelu a lze nad ní uvažovat, že je jakousi alternativou přesného lití. Replicast® má ale výhodu, že jej lze využít na o mnoho těžší a větší odlitky (od 0,4 kg do 1000 kg), než je zvykem u přesného lití s vytavitelným modelem a zachová všechny výhody metody lití na vypařitelný model. [2; 20]



Obr. 5 Skořepinové formy vzniklé metodou Replicast® [20].

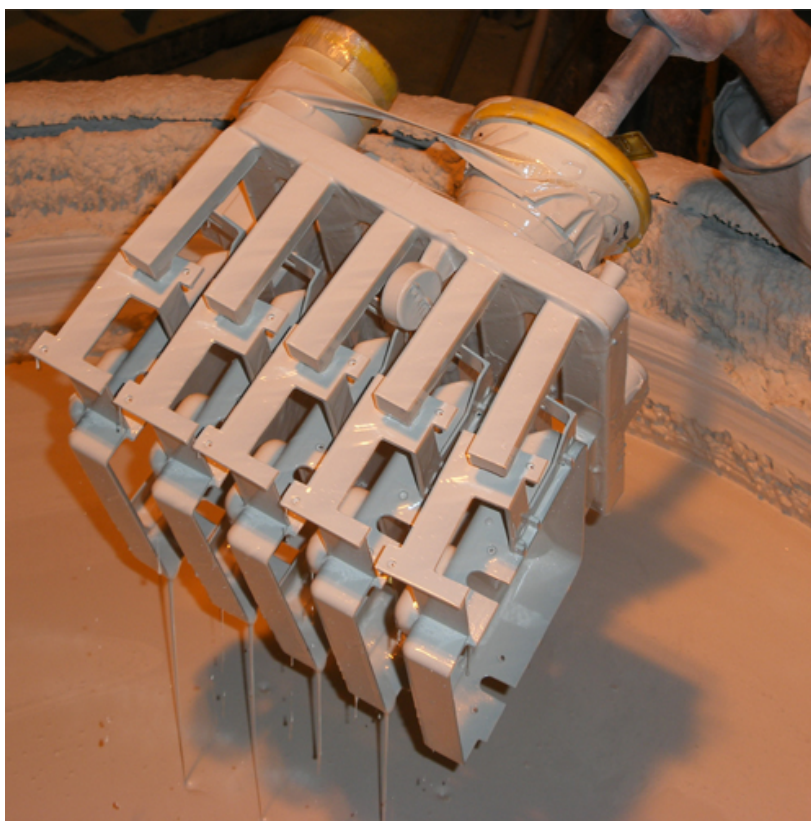
2.2 Nátěr

Nátěr hraje u technologie lití na vypařitelný model zásadní roli, co se týče výsledného povrchu a kvality odlitku. Poskytuje izolační vrstvu mezi pískem ve formě a modelem. Musí být dostatečně pevný, aby vydržel tlak písku ve formě při lití kovu a zabránil zborcení písku, a tím pádem i modelu. Tento tlak vzniká u LFC vibracemi, které mají za úkol dostat zrnka písku rovnoměrně do všech potřebných oblastí okolo modelu. Je důležité zajistit ideální tloušťku nátěru. Zvyšování tloušťky mu sice přidá na pevnosti, ale ubere mu na jeho druhé základní vlastnosti, kterou je prodyšnost. Při lití na vypařitelný model je totiž zásadní, aby měly unikající plyny vypařeného polystyrenu nebo jiného vypařitelného materiálu kam uniknout. Z toho důvodu musí mít nátěr i určitou prodyšnost, která se snižuje s přibývajícím tloušťkou. [1; 11]

Nátěry se nanášejí přímo na zhotovený spalitelný model, a to v závislosti na velikosti modelu buď namáčením, nebo ručním natíráním (viz obr. 6). Rovnoměrnost nátěru má zásadní vliv na výslednou kvalitu odlitku, a proto se kontroluje po každé vrstvě vážením modelu. Po nanesení potřebného počtu vrstev následuje sušení, které probíhá za teplot od 50 °C do 60 °C a do zaformování bývají uskladněny v temperovaných skladech. [1; 11]

Strukturu samotného nátěru tvoří zejména [12]:

- žárovzdorné složky – uplatňuje se zejména oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid zirkoničitý, chromit a aluminosilikáty,
- pojivo A – účel pojiva prvního je zajištění přilnavosti a soudržnosti jednotlivých částic nátěru, pevnost po vysušení, a v neposlední řadě pevnost během lití roztaveného kovu,
- pojivo B – druhé pojivo zabezpečuje soudržnost jednotlivých částic žárovzdorných složek nátěru,
- suspenzní médium (voda) a surfaktanty – obalují a navlhčují polystyrenový nebo jiný model a zároveň brání sedimentaci částic v nátěru.



Obr. 6 Nátěr pro lost foam [13].

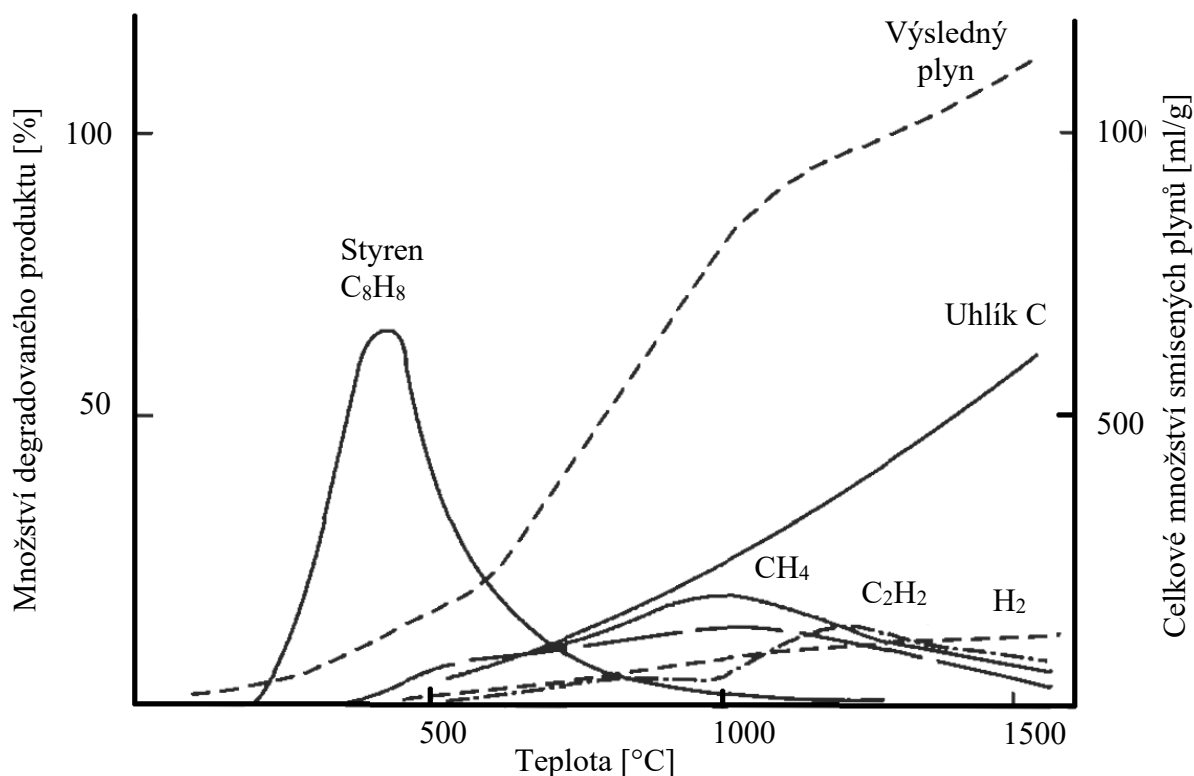
2.3 Atmosféra uvnitř formy a nežádoucí uhlík

Zdrojem téměř všech plynů jsou u metod LFC a FMC samotné modely spalované roztaveným kovem, které se začínají vypařovat zhruba na teplotě 500 °C (případ EPS). Objem produkovaných plynů EPS je extrémně závislý na teplotě. Při teplotě 750 °C je objem asi $250 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. U teploty 1300 °C lze pozorovat výrazný nárůst v objemu plynů a to až $800 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Z toho lze vyvodit, že i tlaky vzniklé vypařováním modelu budou tím vyšší, čím vyšší bude teplota litého kovu. Grafické znázornění rozpadu polystyrenu lze vidět na obr. 7. [4]

Při teplotách úměrných lití slitin hliníku se na příklad polystyren rozpadne pouze na styren (C_8H_8). Ten se poté v tekuté formě vsákne do nátěru a na okamžik sníží jeho prodyšnost na nulu, což může být zdrojem defektů při lití slitin hliníku metodou LFC nebo FMC. [3]

Při teplotách vhodných pro lití slitin železa, které jsou vyšší než pro slitiny hliníku, se vyskytne složitější rozpad polystyrenu. Styren se totiž začne dále rozkládat na lehčí uhlovodíky jako C_7H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , vodík (H) a v neposlední řadě volný uhlík. Ten se poté postupně ukládá v místě kontaktu taveniny s polystyrenem, transformuje se na grafit a v tuhnoucí složce tvoří vrstvu, které se říká lesklý uhlík. Tato vrstva je i za teplot lití železa vcelku stabilní, a může proto díky ní dojít k vážným defektům odlitku. Tento problém brání větší adopci metod LFC a FMC. Při lití oceli jsou totiž teploty dostatečně velké na to, aby se musel uhlík brát opět v potaz. U ocelí s nízkým až středním obsahem uhlíku se tedy také vyskytují místa o nežádoucím vysokém obsahu uhlíku. [3; 4; 14]

Této kontaminace uhlíkem u lití oceli se dle studie [14] nelze zbavit ani v případě použití jiného materiálu než EPS. Testovány byly materiály expandable polyethylene (EPE), expandable polypropylene (EPP) a EPS o různých hustotách modelu. Ani jeden z uvedených materiálů ale neobstál a obsah C všech odlitků byl nad povolenou hodnotou. Hustota modelu neměla také žádný vliv. [14]



Obr. 7 Produkty rozpadu polystyrenu [3].

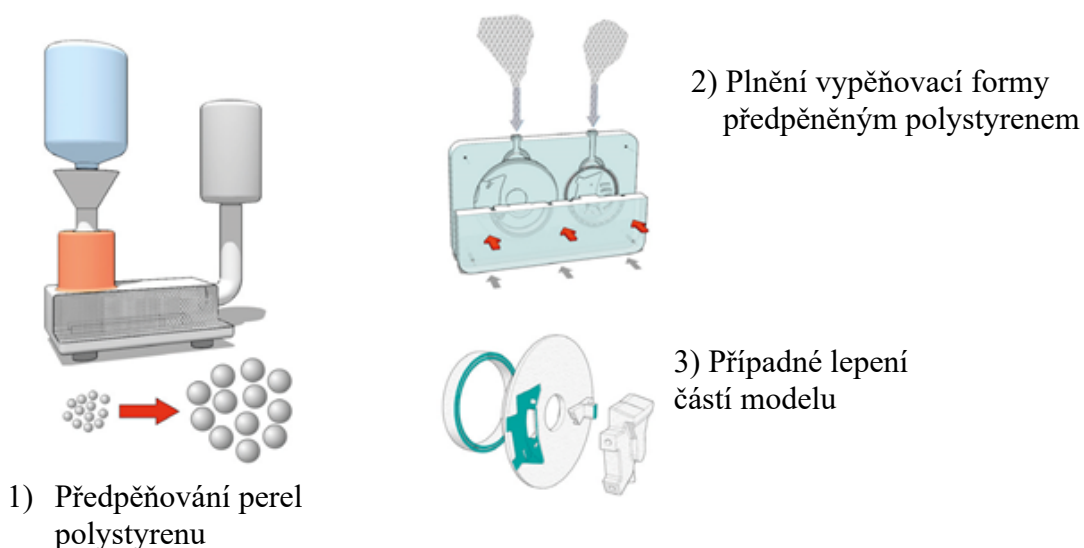
3 TVORBA MODELU

Způsob, jakým je vypařitelný model vyroben, má zásadní vliv na kvalitu výsledného odlitku. Pro různé typy lití se mohou používat různé metody výroby. Nejčastější jsou zejména ruční výroba, CNC a vypěňovací formy. Vypařitelné modely se vyrábějí nejčastěji z expandovaného polystyrenu (EPS). Pro některé litiny se místo EPS používá polymetylmetakrylát (PMMA) nebo copolymer. [1; 5]

Co se týče polystyrenu EPS je nutná jeho příprava. Základní surovinou pro výrobu EPS je zpěňovatelný polystyren, který má formu perlí, jež se skládají z 4 % až 7 % z nadouvadla. Vlivem syté vodní páry nabírají perly objem a zvětší se dvacetkrát až padesátkrát, k čemuž jim dopomůže pentan, který má bod varu asi 37 °C, a tím zredukuje i měrnou hmotnost materiálu, která byla původně asi 600 g · l⁻¹ na asi 15 až 40 g · l⁻¹. Takto nově zvětšené perly jsou velmi náchylné na mechanické poškození. To je způsobeno tím, že se v perlách po ukončení vlivu syté vodní páry a jejich ochlazení vytvoří podtlak. Kvůli tomu se perly nemůžou ihned dále zpracovávat. Aby bylo možné s perlami dále pracovat, umísťují se do provzdušňovacích sil, kde se zároveň i suší. Zde se difúzí vzduchu podtlak vyrovná, zlepší se jejich mechanické vlastnosti, a tím pádem jsou předpěněné, vyzrálé perly připraveny na zpracování. Nejčastěji se z nich vyrábějí bloky nebo řezou desky. [1; 9]

3.1 Konvenční výroba modelu

- Vypěňovací formy – Do vypěňovacích forem (viz obr. 8) se dodávají předpěněné kuličky polystyrenu o stejné velikosti. Vlivem syté vodní páry se kuličky opět zahřejí, změkknou a díky pentanu ještě více expandují, dokud nevyplní celou dutinu formy a nezískají výsledný tvar daného vypařitelného modelu. Co se týče konstrukce těchto forem, vždy je dobré, aby se daný model dal vyrobít ideálně v jedné formě. V případě, že je model složitější a vyžaduje pro zhotovení více forem, dá se bez problému na části slepit do konečného tvaru. Není to ale ideální postup a je třeba myslet na to, že kromě nepřesností vzniklých lepením, se sem vnese lepidlo, které při vypařování může přinést do výsledného odlitku další zbytky uhlíku. To může mít za následek vyšší neshodnosti ve výrobě. Důležité je vyvarovat se tepelným uzlům ve stěnách formy a eliminovat vodní kondenzát. Pro snadné vytažení modelu z formy je také vhodné mít perfektně vyleštěný povrch formy. [1; 8]



Obr. 8 Výroba modelu ve vypěňovací formě [8].

- CNC – Pro obrábění polystyrenu se využívá speciálních nástrojů na obrábění nekovových lehkých materiálů. Pokud by tomu tak nebylo, vznikalo by příliš drsný povrch a vyskytovaly by se zde obrovské ztráty materiálu. Polystyren, jakožto velmi měkký materiál, má totiž tendenci se při obrábění nalepovat na hrany obráběcího nástroje, a tím se řezné podmínky zhoršují. [5]

Mezi tyto nástroje patří např. fréza pro frézování polystyrenu StyroSpeed (viz obr. 9). Využívá dutého frézovacího vřetena a vysokotlaké odsávací jednotky, díky které jsou třísky polystyrenu ihned odsávány čelem nástroje. Lze pomocí ní frézovat bez prasknutí i velmi tenká žebra, jelikož nabízí frézování za minimálního tlaku a velmi rychlého posuvu. [9]

Největší výhodou této metody výroby modelu je oproti vypěňovací formě zejména obrovská flexibilita, co se týče tvaru modelů (viz obr. 10) a vysoká účinnost. Na druhou stranu nedosahuje tak dobré struktury povrchu a odstraňování třísek může být v některých případech náročné. [5]



Obr. 9 Fréza StyroSpeed [9].



Obr. 10 Model z EPS vyrobený na CNC [10].

- Ruční řezání – Používá se v případě, kdy se nevyžaduje velká přesnost výsledného modelu, a to zejména v kusové nebo malosériové výrobě. Nejčastěji používané technologie pro ruční řezání jsou za pomoci horkého tavného drátu a horkého řezného nástroje. Největší výhodou ruční metody řezání jsou velmi nízké provozní a pořizovací náklady, což se ale negativně odráží na kvalitě produktu. [5]
- Rapid prototyping – Velkou výhodou této metody je možnost výroby modelů, které mají složitější tvar a nebylo by tak prototyp možné dostatečně přesně vyrobit ručně nebo při nemožnosti použít CNC a vypěňovací formy třeba z hlediska vysokých nákladů. Lze využít na příklad metodu 3D tisku. Při vhodné volbě materiálu s co nejnižší teplotou varu (PMMA, HIPS), je možné nahradit EPS. [5]

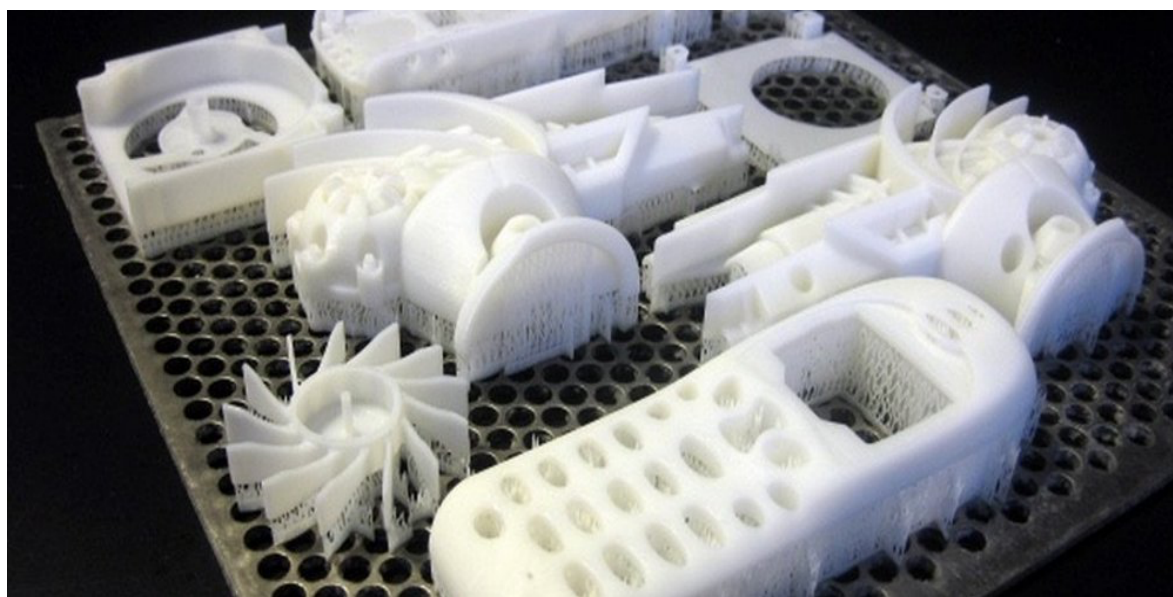
3.2 3D TISK

3D tisk je technologií aditivní výroby, kde se trojrozměrný model vytiskne vrstvu po vrstvě daného materiálu. Prvním krokem celého procesu 3D tisku je tvorba digitálního modelu. To se obvykle dělá v počítačových computer assisted design (zkráceně CAD) softwarech, případně může být již vyrobený model stažen či zakoupen z některých internetových portálů, jako je na příklad asi nejznámější tiskový portál Thingiverse. Třetí možnost je model naskenovat na 3D skeneru a v případě potřeby upravit dle svých představ. [15]

3D tisk už se zdaleka nepoužívá jen ve firmách pro tvorbu prototypů a jiných věcí. Postupem času se totiž stal dostupnějším a 3D tiskárnu je dnes možné najít skoro v každé škole, firmě, a dokonce i domácnosti. Nejznámější 3D tiskovou metodou je FDM. Mezi nejpobulárnější druhy materiálů, které je možné na FDM tisknout jsou PLA (polylactic acid), ABS (akrylonitrilbutadienstyren) a PETG (Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate).

Co se týče popularity a dostupnosti následují tiskárny SLA. Používají oproti FDM zcela jiný materiál, kterým je resin (syntetická pryskyřice). Velkou výhodou této metody je nádherně hladký povrch modelu (viz obr. 11). [16]

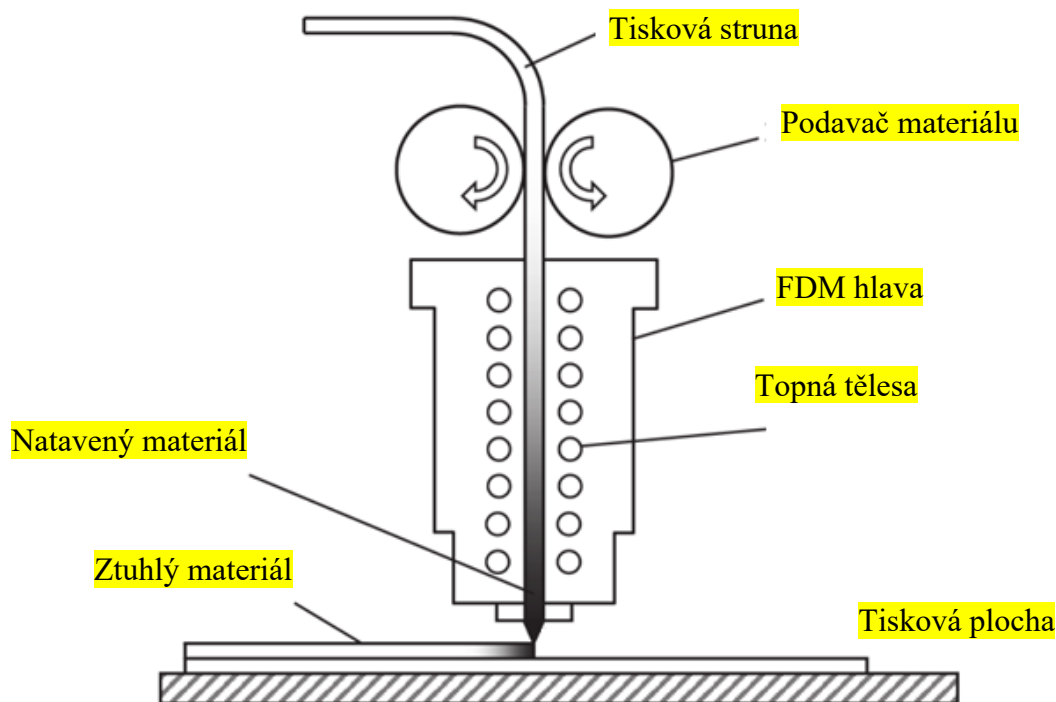
Mimo tyto dvě relativně cenově dostupné metody existují i další mnohem dražší technologie. Mají lepší výsledky vzhledem k pevnosti výtisku, kvality povrchu atd. Mezi ně patří na příklad SLS (selective laser sintering), Binder Jetting, MJM (Multi Jet Modelling systém) aj. [17]



Obr. 11 Modely vytištěné metodou SLA [16].

3.2.1 FDM

Materiál pro FDM tisk je ve formě tiskové struny (filament). Struna je podávána extrudérem, do tiskové hlavy, kde se vlivem vysoké teploty natavuje a protlačuje se ven. Natavený materiál je poté dodáván na potřebné místo, kde rychle tuhne vlivem nízké teploty mimo tiskovou hlavu. Poté, co je jedna vrstva hotová, posune se buď celá podložka nebo jen tisková hlava o výšku vrstvy ve směru osy Z a nanáší se vrstva další. Jednoduché schéma principu FDM tisku lze vidět na obrázku 12. Některé tiskárny nabízejí možnost extruze více materiálů najednou. Dá se tak tisknout jeden model ve více barvách nebo se to využívá pro tvorbu podpor, které jsou z jiného materiálu než model. Některé materiály jsou totiž rozpustitelné v různých látkách a odpadá tím tedy nutnost pracně podpory odstraňovat. [17]



Obr. 12 Princip FDM tisku [17].

FDM tisk najde využití zejména pro tvorbu modelů a prototypů. Výrobci mohou navrhnout designové řešení výrobku, které může být ještě před začátkem výroby otestováno na tištěném modelu. Prototyp může být i velmi pevný. Na příklad při využití materiálu ABS může být pevnost až 85 % pevnosti modelu vyrobeného metodou vstřikování plastů. Kromě tvorby prototypů se metoda skvěle hodí i do výuky. Díky zmenšeným modelům si mohou studenti osahat různé typy převodů, podívat se dovnitř turbíny atd. [17]

Pro různé účely existují různé druhy materiálů. Mezi ty nejznámější patří [18]:

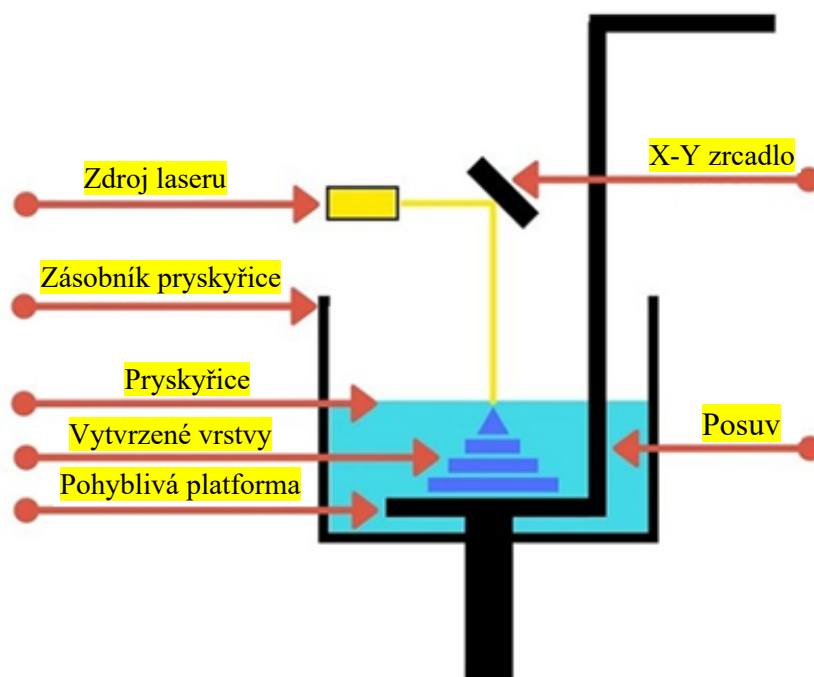
- PLA – Nejpopulárnější tiskový materiál. Velice jednoduchý tisk vhodný i pro nováčky. Nepotřebuje vyhřívanou podložku, je velmi levné, má mnoho barevných možností, je biologicky rozložitelné a při tisku nevydává žádné toxické výpary. Je velmi tvrdé, ale na druhou stranu křehké, na slunci barva bledne a je velmi málo odolné vůči teplu a začíná tect už při asi 60 °C.
- PETG – O něco složitější tisk než PLA. Vyžaduje vyšší tiskové teploty a vyhřívanou podložku, která zajistí lepší přilnavost materiálu k podložce. Je pevnější než PLA a má lepší odolnost vůči teplu. Jedná se o stejný materiál jako PET láhve, ale je zde příměs glykolu. Dají se zakoupit i 100 % recyklované.
- ABS – Jedná se o velmi pevný materiál s obrovskou teplotní odolností. Vyhlazením v acetonu se dá dosáhnout nádherně lesklého povrchu. Bohužel tisk ABS je poněkud obtížný a doporučuje se držet ho v boxu, aby se k materiálu nedostal jakýkoli průvan a nezačal ho kroutit. Tisk by měl probíhat ve velmi dobře ventilované a otevřené místnosti, jelikož výpary vznikající při tisku ABS mohou být zdraví škodlivé.
- TPU, TPE – Jedná se o velmi flexibilní materiály, které jsou něco mezi tvrdým plastem a gumou. Vyrábí se v různých úrovních elasticity. Některé materiály mohou být jako pneumatika od auta, ale druhé jako kancelářská gumička. TPU a TPE jsou velmi náročné na tisk a vyžadují velmi nízké tiskové rychlosti. Pro tisk se doporučuje mít přímý extruder.

- HIPS – Využívá se zejména v kombinaci s tiskem ABS jako materiál pro podpory. Má velmi nízkou hustotu a je rozpustný v D-limonenu a není tedy třeba pracně odlupovat podpory z výtisku. Má podobné tiskové vlastnosti, a proto je s ABS vhodný do kombinace. Při tisku uvolňuje toxické výpary a je doporučen tisk v boxu.
- PMMA – Jako HIPS vydává při tisku toxické výpary a je doporučen tisk v boxu. Je to velmi pevný a odolný materiál a jeho tisk není vhodný pro začátečníky. Obvykle je PMMA průhledné a hodí se tak pro díly, které by měly být alespoň trochu průhledné.

3.2.2 SLA

Stereolitografie, nebo lépe známý pojem SLA 3D tisk, je jednou z nejznámějších a nejrozšířenějších metod aditivních výrobních technologií. Pro vytvrzení tekuté pryskyřice, která je uchovávána v rezervoáru, se u této metody používá laser, který je usměrňován zrcadlem. Po vytvrzení první vrstvy se posune platforma o výšku vrstvy (obvykle 0,1 mm) a začne se vytvrzovat další vrstva (viz obr. 13). Po vytvrzení celého modelu steče pryskyřice, která nebyla vytvrzena laserem dolů pod platformu a může být použita k tisku dalšího modelu. Vytvrzený model se poté ukládá do UV komory, kde se více zpevní a stabilizuje. [16; 17]

Každá standardní SLA tiskárna se skládá z rezervoáru naplněným pryskyřicí, platformy ponořené v pryskyřici, vysokovýkonného laseru a počítačového rozhraní.



Obr. 13 Princip SLA [16].

SLA tisk má některé velmi silné výhody. První z nich je, že může být používán bez lidského dozoru po velmi dlouhé časy. Různé tiskárny mají různé maximální tiskové objemy. Menší SLA tiskárny zvládnou tisknout v rozměrech (250 x 250 x 250) mm a větší dokonce (1500 x 750 x 550) mm a každý si může zvolit velikost dle potřeby. Mají výbornou přesnost a dosahují nejlepších povrchů výtisku mezi všemi technologiemi aditivní výroby. [17]

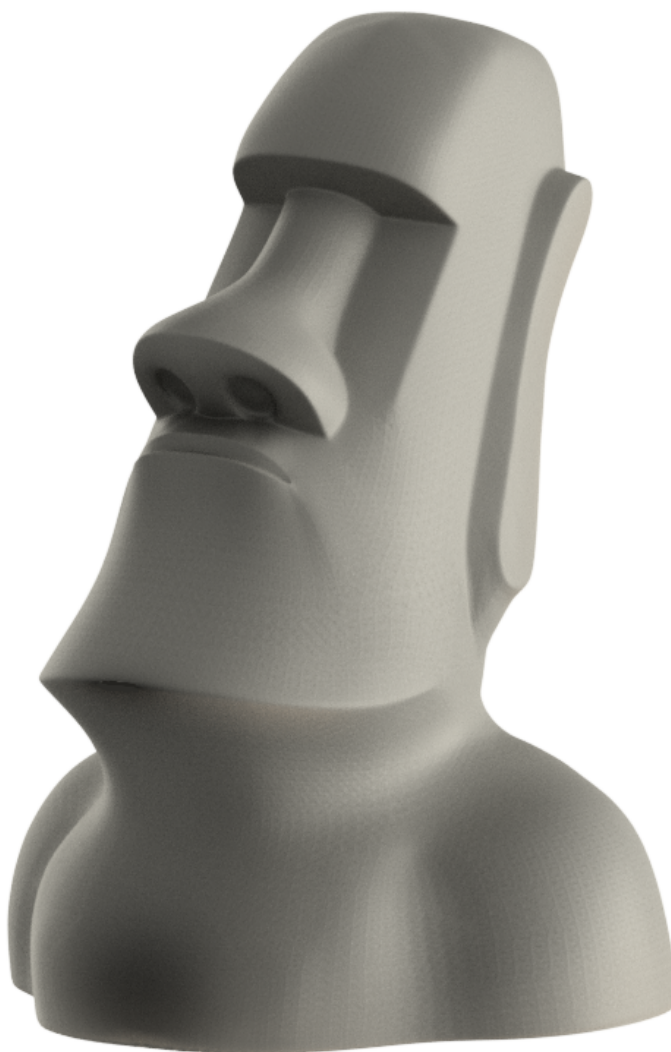
Má ale i nějaké nevýhody. Jednou z nich je, že si potřebuje stavět podpory pro převisující části tisknutého modelu a ty musí být designovány zároveň s hlavním tvarem modelu. Je tedy potřeba po ukončení tisku odstranit podpory a další nežádoucí materiály, což může být velmi časově náročné a vždy se při tom vyskytuje riziko poškození modelu. [17]

4 VÝROBA ODLITKU

Tištěný a následně odlévaný model nebyl určen k žádnému funkčnímu využití. Byl zvolen na základě dostupnosti a líbivého designu (viz obr. 14) a technologie by se mohla ukázat jako vhodná pro umělecké odlitky [20]. Nevyskytují se na něm skoro žádné převisy, které by mohly dělat už tak obtížnému materiálu na tisk větší problém. I přesto se ale určité problémy při jeho tisku objevily. Jednalo se zejména o nedostatečnou přilnavost jednotlivých vrstev, díky čemuž v modelu vznikaly díry. Jako první věc bylo tedy nutné oba dané materiály HIPS i PMMA řádně optimalizovat a zabránit tak vzniku dalších nedokonalostí.

Oba materiály dle výrobců vydávají při tisku nezdravé výpary, a proto není vhodné být delší dobu v místnosti, kde tisk probíhá. Podmínky pro tisk nebyly optimální vzhledem k absenci boxu, ve kterém by měl tisk správně probíhat, aby se k materiálu nedostával průvan a byla zachována konstantní teplota v okolí tištěného modelu.

Na základě literární rešerše vyplynulo, že je dobré mít v modelu co nejméně materiálu (nízká hustota EPS 0,011 až 0,032 g · cm⁻³), kvůli velkému množství vznikajících plynů při spalování modelu. Ty mohou následně poškodit odlitek a ovlivnit chemické složení taveniny. Snaha byla dosáhnout co možná nejnižší hustoty výplně modelu a použít co nejméně materiálu pro daný vypařitelný model, při zachování dostatečné pevnosti, aby nebyl při formování model porušen. Po odlití budou srovnány odlitky s nátěrem a bez nátěru.



Obr. 14 Render modelu.

4.1 Optimalizace HIPS a PMMA

Nastavení správného rozmezí teplot je zásadní pro kvalitní výtisk. Většina výrobců filamentu dodává ke svým výrobkům i doporučené nastavení pro tisk. Tomu nebylo výjimkou ani u použitých filamentů HIPS a PMMA.

Každá tiskárna se ale trochu liší a nastavení pro daný materiál může být rozdílné pro každou 3D tiskárnu. Během tisku při doporučených nastaveních bylo pozorováno mnoho problémů, které zapříčinily nepoužitelný model pro odlití. Bylo třeba zkoušet a vybrat optimální nastavení:

- HIPS – Doporučená teplota trysky pro tisk tohoto materiálu byla od výrobce od 230 °C do 245 °C, podložky od 80 °C do 100 °C a puštěný ofuk na 10 %. Tištěno bylo vrstvou vysokou 0,3 mm. Tisk byl tedy nejprve nastaven na teplotu trysky 230 °C a teplotu podložky 80 °C. Rychlosti tisku se pohybovaly kolem 40 mm · s⁻¹ a byla snaha dodržet co nejvyšší hustotu výplně.

Při tisku za nízké výplně (od 0 % do 10 %) bylo možné pozorovat problémy v kritických místech, kde vznikaly větší převisy (viz obr. 15). Bylo to způsobeno hlavně nízkou výplní. Ta se totiž zevnitř modelu chová jako podpory a podpírá materiál, který tvoří novou vrstvu pod velkým převisujícím úhlem. Při tištění modelů s výplní nad 10 % bylo vše relativně v pořádku (viz obr. 16).



Obr. 15 Problémové modely.



Obr. 16 Povedené modely z HIPS.

Po řadě změn v nastavení tisku se podařilo vytisknout i dutý model bez výplně. Řešením bylo snížení vrstvy z 0,3 mm na 0,2 mm, zvýšení teploty trysky na 255 °C, podložky na 100 °C a byl přidán 1 perimetr. Vážil ale více než model s malou výplní, dvěma perimetry a výškou vrstvy 0,3 mm, a proto použit nebyl. Nejvyšší rychlost, se kterou byl dosažen dostatečně kvalitní výsledek byla 60 mm · s⁻¹.

- PMMA – Jak HIPS, tak i PMMA má své doporučené teploty od výrobce. Tryska by měla být nastavena na 230 °C až 265 °C. Podložka by měla mít teplotu 100 °C až 120 °C. Ofuk může zůstat vypnutý. Z hlediska náročnosti tisku je PMMA problematictější materiálem než HIPS. Velkým problémem pro nenáročného uživatele by mohl být zápach, který materiál PMMA vydává při tisku. HIPS je v tomto ohledu mnohem šetrnější, i přestože oba materiály vydávají nezdravé výpary, které by uživatel neměl vdechovat, cítit tolik nejde. Je proto důležité při tisku těchto filamentů obstarat dostatečnou ventilaci vzduchu v místnosti. PMMA má také v porovnání s HIPS horší vlastnosti, co se týče přilnavosti k tiskové podložce, což může způsobovat problémy s tiskem první vrstvy. Ta je klíčová pro zbytek výtisku. Problémy s přilnavostí se mohou objevovat i u teplot podložky kolem 100 °C a je lepší použít místo hladké podložky texturovanou, na kterou materiál přilne lépe. Pro získání vyšší přilnavosti materiálu k podložce a zkvalitnění první vrstvy je zásadní udržovat podložku čistou, nebo je možno použít některé ze speciálních adhezivních sprejů, jako je např. 3DLAC (viz obr. 17). Ten byl ostatně v této práci využit a problémy s přilnavostí vyřešil. Oproti HIPS nevznikaly mezi jednotlivými vrstvami velké mezery, ani při nižších hustotách výplně, ale bylo třeba dodržet minimální teplotu trysky 250 °C. Při nižších teplotách bylo vidět, že soudržnost jednotlivých vrstev není dostačující. Ideální nastavení teplot lze pozorovat v tabulce 1 a modely vytištěné z PMMA jsou zobrazeny na obrázku 18.



Obr. 17 3DLAC.



Obr. 18 Modely z PMMA.

Tab. 1 Nastavení filamentů

	Teplota trysky [°C]	Tep. Podložky [°C]	Ventilátor [%]	Rychlosti [mm/s]
HIPS	255	100	10	40-60
PMMA	250	110	0	40-60

4.2 Nátěr

Na modely bez viditelných vad (viz obr. 21) byl nanesen nátěr (viz obr. 19) . Jednalo se o nátěr Ceramcote FS 402 na vodní bázi, který je dle výrobce vhodný pro technologie LFC a FMC. Dle výrobce je možné nátěr nanášet natíráním, máčením, stříkáním a poléváním. Vytisklé modely byly tedy do nátěru namáčeny (viz obr. 20 a 22) a následně se nechaly dostatečně dlouhou dobu vysušit.



Obr. 19 Kanistr s nátěrem.



Obr. 20 Namáčení modelu v nátěru.



Obr. 21 Modely připravené na nátěr.



Obr. 22 Modely s nátěrem.

Poté, co nátěr dostatečně zaschnul, bylo třeba oškrábat vrstvu nátěru v místě vtoku, aby nebránil přístupu roztavené litiny (viz obr. 23 a 24).



Obr. 23 Uschlý nátěr.



Obr. 24 Oškrábaný vtok.

4.3 Formování a lití

Jako ostřívo byl použit křemenný písek Bukowno s označením BK 27 (BK5D) se střední velikostí zrna $d_{50} = 0,27$ mm, což dle přílohy 1 odpovídá přibližně AFS = 50 a dle rešerše odpovídá optimální zrnitosti pro lití FMC a LFC. Pojivovým systémem byl zvolen GEOPOL®.

Natřené modely byly následně zaformovány do netrvalých forem. Pro první lití bylo zaformováno celkem 11 modelů, z nichž 8 bylo zaformováno po dvou v menších formách a zbylé 3 modely byly vloženy do jedné větší formy. Pro menší formy po dvou modelech byly potřeba celkem tři rámy. Jeden pro vtokovou soustavu a pro samotný model byly potřeba dva na sobě, jelikož byl model o něco vyšší než samotný rám (viz obr. 25).



Obr. 25 Modely ve formě.

Poté, co byly modely připraveny ve formě, byla forma zaplněna formovací směsí. První vrstva byla nejdůležitější, jelikož bylo třeba dostat směs pořádně k modelu a upéčovat (viz obr. 26). Zároveň bylo třeba dát pozor, aby se nepohnul zářez na vtok od modelu.

Následně byla forma plněna dalšími vrstvami formovací směsi a nová vrstva byla vždy mírně upéčována. V případě této směsi není třeba péčovat tolik, jako u bentonitu, protože je směs samotuhnoucí. Poté, co směs vytvrdla, byla forma otočena (viz obr. 27), vršek byl posypán separátorem, byl přiložen třetí rám formy se zaváděcími kolíky a byla zaformována vtoková soustava (viz obr. 28). Vtokové kůly byly přiloženy přesně na zářezy v části formy s modelem a rám byl opět zasypán formovací směsí. Po vytvrzení směsi v třetím rámu s vtokovou soustavou byly opatrně vytaženy dřevěné kůly a následně byly vytvořeny vtokové jamky (viz obr. 29). Stejně tak byly vytaženy i zářezy ve spodní části formy. Nakonec byla natřena vtoková soustava korundovým nátěrem (viz obr. 30 a 31).



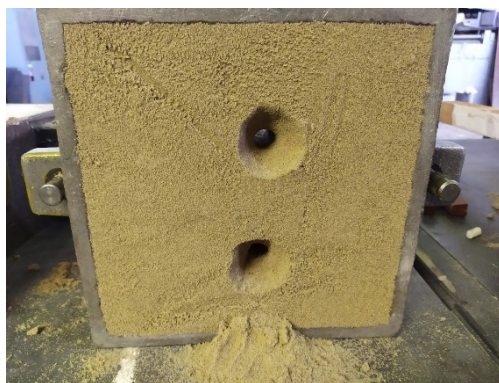
Obr. 26 První vrstva formovací směsi.



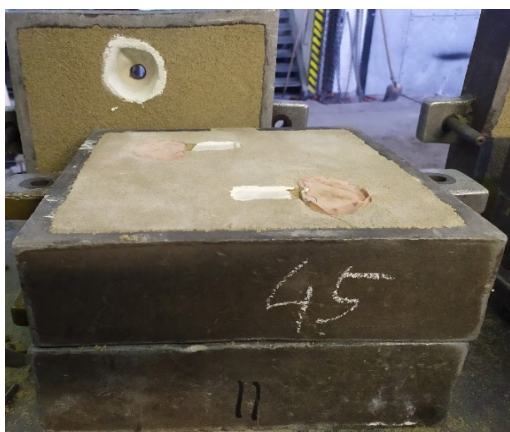
Obr. 27 Vytvrzená spodní část formy.



Obr. 28 Tvorba vtokové soustavy.



Obr. 29 Vtokové jamky.



Obr. 30 Připravená forma.



Obr. 31 Větší forma pro 3 modely.

4.3.1 První lití

Po zaformování následovalo lití modelu. Nejdříve bylo dle objemu modelu spočítáno množství potřebného kovu a poté byla složena forma (viz obr. 32). Následně byly všechny formy nachystány k sobě na pískové loži (viz obr. 33) a jednotlivě odlity (viz obr. 34). Pro lití byla použita litina s lupínkovým grafitem odlévána za teplot okolo 1400 °C. Po odlití a vychladnutí byly formy rozdělaný a byly pozorovány výsledky (viz obr. 35, 36).



Obr. 32 Spojení dílů formy.



Obr. 33 Formy připravené pro lití.



Obr. 34 Odlévání modelů.



Obr. 35 Formy ihned po lití litiny.



Obr. 36 Chladnutí forem.

První pokus o výrobu odlitku metodou lití na vypařitelný model se nevydařil (viz obr. 37 a 38). Litina téměř do prostor modelu nezatekla, a dokonce se ani většina modelů úplně nevypálila. Příčinou neúspěchu byla zřejmě vtoková soustava. Zážery vedoucí k modelu byly nejspíše moc malé a při vypařování spalitelného modelu tlačily plyny vyvolané spalováním modelu proti tekoucí tavenině, která se ve většině případů zastavila už v úzkém zážeru. Na druhou stranu bylo pozorováno, že nátěr oddělil prostor mezi modelem a formovací směsí dostatečně.



Obr. 37 Formy po rozdělení.



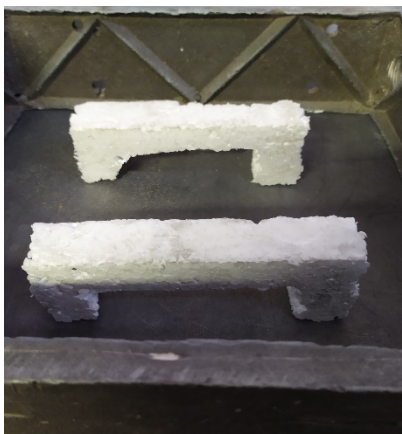
Obr. 38 Zbytek nátěru a modelu.

Vzhledem k tomu, že se modely u této technologie spalují, bylo potřeba na druhý pokus vytisknout všechny tyto modely znovu, protože byly z velké části poškozeny. Bylo znovu vytištěno 6 modelů o stejné výplni 6 %, které byly opět opatřeny nátěrem (2 byly ponechány bez nátěru pro porovnání), ale tentokrát byla vtoková soustava vyřešena jinak. Zároveň bylo vzhledem k bouřlivé reakci při lití litiny přistoupeno k volbě slitiny s nižší teplotou lití, což by na základě rešerše mělo vést k výraznému zmenšení objemu uvolňujících se plynů. Ty totiž způsobovaly to, že tavenina začala z formy prskat ven. Pro další pokusy byla použita hliníková slitina (teplota lití kolem 700 °C), která je pro lití ve školní slévárně pro tento způsob výroby odlitku přijatelnější.

4.3.2 Druhé lití

Připravené modely byly i na druhý pokus formovány po dvou. Po prozkoumání možných příčin neúspěchu prvního lití bylo rozhodnuto pro změnu vtokové soustavy. Malé zářezy byly tedy vyřazeny. Tentokrát se připravily celkem 3 formy a jejich tvorba vypadala následovně:

- Metoda A – Pro první formu byla připravena vtoková soustava zavedená zespodu. Z polystyrenu byl vyřezán tvar vtokové soustavy, který byl následně zaformován v samostatném rámu (viz obr. 39). Po vytvrzení formovací směsi byl rám otočen a vložila se na něj druhá část formy, do které byl zaformován samotný model s vtokovými kůly (ty se následně do formy umístily dle obr. 40). Oproti předchozímu pokusu byla také zvýšena licí výška, což je patrné z počtu rámu a obrázku 42. V předchozím pokusu byly rámy 3, v druhém pokusu již byly 4.



Obr. 39 Vtoková soustava z polystyrenu.



Obr. 40 Způsob formování.

- Metoda B – Pro druhou a třetí formu bylo využito mnohem vyšší licí výšky a vtoková soustava byla umístěna shora přímo na model (viz obr. 41). Tímto způsobem byly zaformovány 2 odlitky s nátěrem a 2 odlitky bez nátěru pro srovnání kvality povrchu.



Obr. 41 Vyšší licí výška.



Obr. 42 Připravená forma.

Rozdíl v lití slitiny hliníku a litiny s lupínkovým grafitem byl znát už při nalévání taveniny do formy. Menší teplota taveniny (kolem 700 °C) zajistila klidnější průběh spalování modelu. Nevyskytlo se žádné prskání a model v klidu vyhořel z formy. Ani v tomto případě se ale nepodařilo odlít všechny modely.

Úspěšně vzešly odlitky, které byly zavtokovány metodou B (vtok přímo na model). Všechny tyto modely byly z materiálu HIPS. Z PMMA se bohužel žádný model odlít nepodařilo, což mohlo být způsobeno vyšší hustotou modelu oproti HIPS (PMMA 0,2 g · cm⁻³, HIPS 0,14 g · cm⁻³), a tedy přítomností většího množství plynů při spalování:

- U metody A (se spodním vtokem) se tavenina k modelu dostala a téměř celý ho vypálila, ale i tak plyny taveninu přetlačily a tavenina tedy nebyla zcela schopna zaplnit prostor modelu (viz obr. 43). Na obr. 44 lze vidět, že většina materiálu byla vypálena a nátěr vydržel.



Obr. 43 Lití metodou A.



Obr. 44 Nevypálený model.

- Lití metodou B přineslo lepší výsledky a byly odlity celkem 3 modely. Na obr. 45 lze vidět odlitky z modelů, které nebyly opatřeny nátěrem a na obr. 46 odlitek z modelu, který nátěrem opatřen byl.



Obr. 45 Odlitky z modelu bez nátěru.



Obr. 46 Odlitek z modelu s nátěrem.

Po rozbití forem a vytažení odlitků byly modely okartáčovány a očištěny. Následně byly opískovány pro získání kvalitnějšího povrchu a poté byla odřezána vtoková soustava. Na obr. 47 lze vidět očištěný odlitek z modelu bez nátěru a na obr. 48 s nátěrem.



Obr. 47 Odlitek z modelu bez nátěru.



Obr. 48 Odlitek z modelu s nátěrem.



Obr. 49 Výsledné modely.

ZÁVĚR

Nejdříve byly optimalizovány tiskové materiály HIPS a PMMA. Po několika pokusech bylo zjištěno, že oba materiály přilnou lépe na texturovanou podložku oproti hladké a nejvhodnější nastavení pro ně vypadá následovně:

- HIPS – Teplota trysky 255 °C, teplota podložky 100 °C, ventilátor nastaven na 10 % a rychlosti tisku od 40 do 60 mm · s⁻¹.
- PMMA – Teplota trysky 250 °C, teplota podložky 110 °C, ventilátor může zůstat vypnutý a rychlosti tisku od 40 do 60 mm · s⁻¹.

Nejnižší hustota výplně modelu, které bylo dosaženo při zachování modelu bez vad o co nejnižší hmotnosti, bylo 6 %. Objem modelu byl 143,5 cm³. Vypočtená teoretická hustota modelu z HIPS byla 0,14 g · cm⁻³ a PMMA 0,2 g · cm⁻³, což je oproti EPS s hustotou od 0,011 do 0,032 g · cm⁻³ vysoká hodnota.

Vytištěné modely byly následně namáčeny do nátěru s označením Ceramcote FS 402 a byly navrženy celkem 3 způsoby zaformování. První metoda s úzkými zářezy se prokázala jako nevhodná, jelikož plyny, které se uvolňovaly hořením modelu, tlačily proti tavenině, což způsobilo, že tavenina zatuhla už v zářezech a nepodařilo se odlít žádný model. Lití litiny s lupínkovým grafitem se navíc z důvodu neklidného průběhu lití ukázal jako nevhodný a zbylé modely byly odlity ze slitiny hliníku.

Lití slitiny hliníku mělo klidnější průběh. Metodou A (zavtokované pomocí polystyrenového vtoku zespodu modelu) se žádný model odlít nepodařilo a tavenina opět zamrzla již ve vtokové soustavě. Metodou B (lití přímo na model se zvýšenou licí výškou) se podařilo odlít celkem 3 modely. Všechny odlité modely byly z materiálu HIPS. Z PMMA se žádný model odlít nepodařilo, a proto se jeví HIPS jako lepší varianta.

Na odlitcích bez nátěru lze pozorovat velmi hrubý povrch, způsobený přímým stykem formovací směsi s modelem. Kvalita povrchu odlitku, který byl opatřen nátěrem, byla o mnoho lepší. Na odlitku si lze všimnout velmi hladkého povrchu, jelikož nátěr vytvořil vrstvu mezi formovací směsí a modelem. Na odlitku s nátěrem byly i tak objeveny nedostatky. Nejvíce z nich bylo způsobeno pravděpodobně zahlceným vzduchem v nátěru a nerovnoměrnou vrstvou nátěru. Lepších výsledků by mohlo být dosaženo, pokud by se nátěr nanášel na model štětcem a dosahovalo se tak rovnoměrnějších vrstev.

Využití 3D tisku pro metodu FMC je velmi zajímavé z pohledu jednoduchosti tvorby modelu a formování. Bohužel mají 3D tištěné modely oproti konvenčním modelům z EPS příliš velkou hustotu a uvolňuje se velké množství plynů, které hrají ve výsledné kvalitě odlitku klíčovou roli. Lepších výsledků při zachování technologie lití na vypařitelný model a 3D tištěných modelů by mohlo být dosaženo při použití metody Replicast®, kde je model vypálen ještě před litím.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ELBEL, Tomáš. *Speciální metody výroby odlitků*. Studijní opora. FMML. VŠB-TU OSTRAVA, 2008, 95s.
2. BEELEY, Peter. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinmann, 2001, x, 719s, : il., čb. fot. ;25 cm. ISBN 0-7506-4567-9
3. CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s, : il. ISBN 0-7506-4790-6
4. MOCEK, Jan a Adam CHOJECKI. Gas Atmosphere Formed in Casting by Full Mold Process. *Archives of metallurgy and materials* [online]. WARSZAWA: De Gruyter Open, 2014, 59(3), 1045-1049 [cit. 2022-03-26]. ISSN 1733-3490. Dostupné z: doi:10.2478/amm-2014-0176
5. DONG, Hong Zhao, Zhong De SHAN a Hong Ze CHEN. Research of Foam Pattern Processing for Lost Foam Casting. *Applied mechanics and materials* [online]. Zurich: Trans Tech Publications, 2013, **331**, 600-603 [cit. 2022-03-26]. ISBN 3037857269. ISSN 1660-9336. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.331.600
6. MARTINS, Francisco Germano a Carlos Augusto Silva DE OLIVEIRA. Study of full-mold casting process for Al–Si hypoeutectic alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 179(1), 196-201. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.085
7. MILLER, Marshall. Why Lost Foam?. *Modern Casting* [online]. Des Plaines: American Foundry Society, 2020, 110(8), 41-43 [cit. 2022-03-26]. ISSN 0026-7562. Dostupné z: databáze Proquest
8. *The process sequence. Lost Foam Council* [online]. c2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://lostfoamcouncil.de/the-process-sequence.html
9. *Fréza na frézování polystyrenu Styrospeed*. Stopkové frézy [online]. 23.3.2020 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.stopkovefrezy.cz/blog/freza-polystyren-styrospeed-hs
10. *3D services: Lamborghini Machining EPS foam car display by WeCutFoam*. *WeCutFoam* [online]. c2019 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: https://www.wecutfoam.com/3d-foam-cnc-machining?lightbox=dataItem-jm8n9sak3Lost foam casting. Manufacturing guide [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.manufacturingguide.com/en/lost-foam-casting
11. *Lost foam casting. Manufacturing guide* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.manufacturingguide.com/en/lost-foam-casting
12. AKBARZADEH, Yaser, Mostafa REZAEI, Ali Akbar BABALUO, Ali CHARCHI, Hamid Reza AZIMI a Yahya BAHLULI. Microstructure, permeability and rheological behavior of lost foam refractory coatings. *Surface & coatings technology* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2008, 202(19), 4636-4643 [cit. 2022-03-26]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2008.03.036
13. Paint for lost foam casting process/LFC Coating. *Alibaba* [online]. c2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/paint-for-lost-foam-casting-process_60679017159.html
14. KILIC, Oznur, Serhat ACAR, Alptekin KISASOZ a Kerem Altug GULER. *Investigation of carbon contamination in lost foam castings of low carbon steel*. China foundry [online].

- Singapore: Springer Singapore, 2018, 15(5), 384-389 [cit. 2022-03-26]. ISSN 1672-6421. Dostupné z: doi:10.1007/s41230-018-8091-5
15. RAYNA, Thierry a Ludmila STRIUKOVA. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological forecasting & social change* [online]. NEW YORK: Elsevier, 2016, 102, 214-224 [cit. 2022-03-26]. ISSN 0040-1625. Dostupné z: doi:10.1016/j.techfore.2015.07.023
16. *Stereolithography / SLA 3D Printing. ALL3DP* [online]. 1.8.2019 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
17. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications*. 5th ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2017. ISBN 9789813146761. Dostupné z: doi:10.1142/10200
18. *Ultimate 3D Printing Materials Guide*. Simplify3D [online]. c2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
19. Lost foam casting for OEM machinery parts. Made in China [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://m.made-in-china.com/product/Lost-Foam-Casting-for-OEM-Machinery-Parts-755244155.html>
20. Replicast. FAS fonderia [online]. c2021 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.fonderiafas.it/en/replicast.html>
21. *MOAI STATUE* [online]. 2017 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://cults3d.com/en/3d-model/art/moai-statue-no-overhang>
22. *The Best PMMA Filaments for Printing* [online]. 29. září 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/pmma-filament-basics-best-brands/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symoly

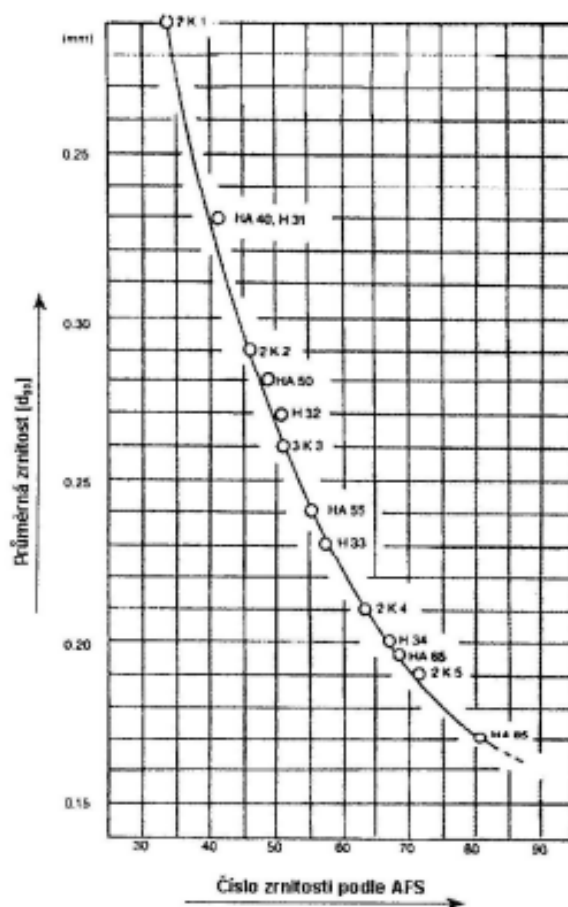
Označení	Legenda	Jednotka
AFS	American foundry society	[-]
d ₅₀	střední velikost zrna	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
FDM	fused deposition modeling
SLA	stereolithografie
PMMA	polymethylmethakrylát
HIPS	high impact polystyrene
LFC	lost foam casting
FMC	full mold casting
EPS	expanded polystyrene
CNC	computer numerical control
EPE	expanded polyethylene
EPP	expanded polypropylene
PLA	polylactic acid
PETG	polyethylene terephthalate glycol
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
TPE	thermoplastic elastomer
TPU	thermoplastic polyurethane
MJM	multi jet modelling
SLS	selective laser sintering
CAD	computer assisted design

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Převod AFS na střední velikost zrna



Obr. 36.: Závislost čísla zrnitosti AFS a průměrné zrnitosti ostřiv (d_{50})

Vztah mezi číslem síta (USA) a velikostí ok v mikrometrech uvádí tabulka:

Číslo síta (USA)	Velikost os síta v mikrometrech
zbytek	(20 ÷ 53)
270 Mesh	53
200	75
140	105
100	150
70	210
50	300
40	420
30	600
20	850
12	1700
6	3400