



3D tisk fotopolymerního kovového materiálu pomocí technologie DLP

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Lukáš Volejník

Vedoucí práce:

Ing. Jaroslav Kovalenko, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultanti práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Ing. Martin Seidl, Ph.D.

Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace





Zadání bakalářské práce

3D tisk fotopolymerního kovového materiálu pomocí technologie DLP

Jméno a příjmení: **Lukáš Volejník**
Osobní číslo: S16000191
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je otestovat vhodnost použití DLP technologie 3D tisku pro tisk kovových výrobků z polymerního materiálu se suspenzí kovu.

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše aktuálního stavu problematiky.
2. Návrh experimentů včetně návrhu a přípravy vlastních 3D dat testovacích vzorků.
3. Provedení tiskových experimentů z vybraného materiálu a optimalizace parametrů tisku.
4. Optimalizace postupu sintrování vytištěných dílů.
5. Analýza získaných vzorků, pórovitost, drsnost povrchu, tvrdost.
6. Zhodnocení a závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
cca 40 stran + přílohy
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] WOHLERS, T., Wohlers Report 2016. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Wohlers Associates, 2016.
- [2] NAKAMURA, K., Photopolymers. Boca Raton: CRC Press, 8 2014.
- [3] LIAN, Q., YANG, F., XIN, H., a LI, D., Oxygen-controlled bottom-up mask-projection stereolithography for ceramic 3D printing, Ceramics International, vol. 43, no. 17, pp. 14 956 14 – 961, 2017.
- [4] PANDEY, R., Photopolymers in 3D printing applications, doktorská práce, University in Helsinki, 2014.
- [5] CHEN, Z., CHEN, Z., LI, Z. et al., 3D printing of ceramics: A review, Journal of the European Ceramic Society, vol. 39, no. 4, pp. 661 – 687, 2019.

Vedoucí práce:

Ing. Iaroslav Kovalenko, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultanti práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace
Ing. Martin Seidl, Ph.D.
Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

Datum zadání práce:

20. listopadu 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

20. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

15. července 2020

Lukáš Volejník

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Iaroslavu Kovalenkovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Jeho zkušenosti v oblasti 3D tisku mi pomohly tuto práci zkompletovat. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Seidlovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Šavkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě práce.

Abstrakt

Technologie stereolitografie je jednou z metod 3D tisku, která je používána pro výrobu relativně malých, ale detailních součástí. Principem této metody je vytvrzování tekutého fotopolymeru v jednotlivých vrstvách pomocí světelného záření. Fotopolymer může obsahovat různé příměsi. Typickou příměsí může být kov či keramika, které dále umožňují širší použití, než čistý fotopolymer. Technologie DLP, která je v této práci používána, je metoda velmi podobná metodě SLA, pro vytvrzení fotopolymeru je používán UV projektor. Pro tisk fotopolymeru s příměsí kovu je potřeba velká intenzita UV světla pro jeho dostatečné vytvrzení. Díky kovovým částicím je možné získat magnetické modely. Tisk kovového materiálu je velmi náročný na dobu tisku.

Takto vytisknutému modelu se říká zelená součást („green body“). Zelená součást je model, který ještě není hotový a je třeba jeho další úprava. V první řadě je model potřeba očistit od přebytečného polymeru. Dalším krokem, pokud je to potřeba, je vytvrzení v UV komoře. Posledním krokem je vypalování a spékání. Vypalování je proces, v němž dochází k vypalování polymeru. Spékání je proces, ve kterém dochází ke spékání kovových částic, a je potřeba ho provádět bez přítomnosti kyslíku, protože jinak dochází k oxidaci. Během experimentů se podařilo zjistit optimální parametry pro tisk a téměř dokonalé podmínky pro jeho tepelné zpracování, které jsou detailně popsány v praktické části práce.

Klíčová slova

3D tisk, DLP, SL, Kov

Abstract

Stereolithography technology is one of the methods of 3D printing, which is used for the production of small detailed components. The principle of this method is the formation of a liquid photopolymer in individual layers by means of light radiation. The photopolymer may contain various additives. Typical direct uses may be metal or ceramics, which can be used more widely than pure photopolymer. DLP technology used in this work is a method very similar to the SLA method, a UV projector is used to cure the photopolymer. For direct metal photopolymer printing, a high intensity of UV light is advantageous for its sufficient formation. Thanks to metal direct images, magnetic models are possible, it is possible to redeem by a time that is very high when printing a photopolymer with a metal admixture.

A printable model is called a green part ("green body"). The green part is a model that is not yet hot and is another modification. In the first place, it is possible to eliminate excess polymer, which is suitable for ultraviolet radiation, where it is necessary to perform curing in a UV chamber, the last and more endangered is to turn off and sinter. Burning is the process used to burn a polymer. Sintering is a process in which harmful substances are sintered. Sintering is desirable without damaging the oxygen, which then oxidizes. During the experiments, it was possible to obtain optimal parameters for printing and perfect conditions for its heat treatment, which are described in detail in the personal parts of the work.

Key words

3D printing, DLP, SL, Iron

Obsah

Úvod.....	12
1 Aditivní výroba.....	13
1.1 3D tisk vs AM a jeho budoucnost.....	14
1.2 Využití.....	14
1.2.1 Automobilový průmysl.....	14
1.2.2 Medicína.....	15
1.2.3 Letectví a vesmírný průmysl.....	15
1.2.4 Komerční účely.....	15
1.2.5 Strojní výroba.....	16
2 Metody 3D tisku.....	17
2.1 FDM.....	18
2.2 SLS.....	18
2.3 MJM/PJM.....	19
2.4 3DP.....	20
2.5 LOM.....	21
2.6 LENS.....	22
2.7 DLP.....	23
3 Fotopolymery vytvrditelné pomocí UV světla.....	25
3.1 Chemické složení fotopolymerů.....	26
3.2 Sintrace.....	26
3.2.1 Sintrace ve 3D tisku.....	27
4 Praktická část.....	28
4.1 Materiál.....	28
4.2 3D tiskárna.....	28
4.3 Příprava tiskárny.....	29
4.4 Tepelné zpracování.....	31
4.5 Návrh experimentu.....	32
4.6 Tisk a tepelné zpracování.....	33
4.7 Testy tvrdosti, drsnosti a pórovitosti.....	53
Závěr.....	58
Literatura.....	60

Seznam obrázků

Obrázek 1: Popis metody FDM [12].....	18
Obrázek 2: Popis metody SLS [13]	19
Obrázek 3: Popis metody MJM/PJN [14].....	20
Obrázek 4: Popis metody 3DP [11]	21
Obrázek 5: Popis metody LOM [16]	22
Obrázek 6: Popis metody LENS [15]	23
Obrázek 7: Porovnání umístění projektoru [17]	24
Obrázek 8: Popis metody DLP [18].....	24
Obrázek 9: Molekulární struktury polymerů [19].....	25
Obrázek 10: DLP tiskárna.....	30
Obrázek 11: Graf zobrazující podmínky sintrace udávané výrobcem.....	37
Obrázek 12: Sady modelů 1, 2 a 3 po vypalování	37
Obrázek 13: Porovnání sintrovaných a nesintrovaných modelů	39
Obrázek 14: Modely s výškou vrstvy 25 μm	42
Obrázek 15: Porovnání sady 5 a 6	43
Obrázek 16: Porovnání sady 5 a 7	44
Obrázek 17: Porovnání vlivu UV komory pro vzorky s tloušťkou stěny 0,5 mm.....	46
Obrázek 18: Porovnání vlivu UV komory na tvorbu trhlin v modelech	46
Obrázek 19: Sada 10 po vypálení	47
Obrázek 20: TGA analýza. Porovnání ochranné atmosféry	48
Obrázek 21: Sada 11 po vypálení	49
Obrázek 22: Vzorky vytažené z pece, kde byl přítomen kyslík	51
Obrázek 23: Vzorky vytažené z pece, kde nebyl přítomen kyslík.....	52
Obrázek 24: Porovnání vzorků vypálených s přítomností a bez přítomnosti kyslíku	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Technologie 3D tisku.....	17
Tabulka 2: Referenční hodnoty fungující pro keramický materiál.....	33
Tabulka 3: Parametry vypalování udávané výrobcem.....	33
Tabulka 4: Detailní popis upravených hodnot.....	34
Tabulka 5: Porovnání rozměrů u různých časů vytvrzení	35
Tabulka 6: Parametry tisku pro sady vzorků 1, 2 a 3	36
Tabulka 7: Parametry tisku pro sady 4	38
Tabulka 8: Podmínky vypalování bez sintrace.....	39
Tabulka 9: Podmínky vypalování pouze pro ohřev.....	40
Tabulka 10: Parametry tisku pro sadu 5	40
Tabulka 11: Podmínky vypalování pouze pro ohřev se sníženou rampou	40
Tabulka 12: Podmínky vypalování se sníženou rampou a nulovou dobou udržení	41
Tabulka 13: Nastavení tiskárny pro výšku vrstvy 25 μm	41
Tabulka 14: Parametry tisku pro sadu 6	42
Tabulka 15: Parametry tisku pro sady 7-13	44
Tabulka 16: Parametry vytvrzování v UV komoře pro sadu 8	45
Tabulka 17: Podmínky vypalování pro sadu 8 a 9.....	46
Tabulka 18: Podmínky vypalování pro první polovinu sady 10.....	47
Tabulka 19: Podmínky vypalování pro druhou polovinu sady 10.....	47
Tabulka 20: Podmínky vypalování pro první polovinu sady 11.....	49
Tabulka 21: Parametry tisku pro sady 14-15	50
Tabulka 22: Podmínky vypalování pro 2/2 sady 11 a 1/4 vzorků ze sady 14	50
Tabulka 23: Podmínky vypalování pro 1/2 sady 13 a 1/4 vzorků ze sady 14	51
Tabulka 24: Optimální podmínky sintrace	53

Seznam zkratek

2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
3DP	Trojrozměrný tisk – „Three-Dimensional Printing“
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AM	Aditivní výroba – „Additive manufacturing“
CAD	Počítačem podporované projektování – „Computer Aided Desing“
DLP	Digital Light Processing
DMD	Direct Metal Deposition
EBM	Electron Beam Melting
FEP	Fluorovaný ethylen-propylen
FDM	Fused Deposition Modeling
IJP	Inkejt Printing
LED	Elektroluminiscenční dioda – „Light Emmiting Diode“
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MIT	Messachusetský technologický institut
MJM	MultiJet Modeling
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Polykarbonát
PCL	Polykaprolakton
PEG	Polyethylenglykol
PLA	Polymléčná kyselina – „polyactic acid“
SL/SLA	Stereolitografie
SLM	Selektivní tavení laserem – „Selective Laser Melting“
SLS	Selektivní spékání laserem – „Selective Laser Sintering“
TGA	Termogravimetrická analýza – „Thermal Gravimetric Analysis“
UAM	Ultrasound Additive Manufacturing
UV	Ultrafialové záření – „Ultraviolet light“

Úvod

Technologie aditivní výroby (AM) získává stále větší popularitu, a to díky stále rostoucímu uplatnění v nejrůznějších odvětvích, jako je výroba součástek do strojních zařízení nebo různé výrobní díly. Jako materiál bývá používán plast, keramika, kov, sklo nebo kompozitní materiály. Surový materiál může být v podobě různých past, vláken, tekutin, strun, prášků, pelet nebo desek. Konkrétními případy, kde se technologie AM uplatňuje, jsou spotřební zboží, letectví, medicína nebo armádní průmysl. Mezi výrobky patří například fotoaparáty, mobilní telefony, části motorů, interiér automobilů, součástky v letectví, elektro nářadí nebo lékařské implantáty. Toto je pouze zlomek výrobků, které lze vyrábět metodou AM. Dnes se všechny společnosti snaží o co nejrychlejší zavedení výrobků na trh. Na jejich vývoj jsou tak kladeny stále vyšší nároky z důvodu konkurenceschopnosti. Společnosti usilují o to uvést daný produkt na trh co nejlevněji, nejrychleji a nejkvalitněji. Právě v tomto ohledu umožňuje AM řadu zlepšení a usnadnění [1, 2, 3].

Cílem této práce je optimalizace tiskových parametrů, parametrů vypalování a provedení zkoušek tvrdosti, pórovitosti a drsnosti povrchu. Optimalizace tisku je prováděna pomocí změny tiskových parametrů, jako je čas vytvrzení jedné vrstvy či tloušťka jedné vrstvy. Pro optimalizaci vypalování je potřeba měnit teplotu, čas nebo rampu. Provedení zkoušek slouží pro vyhodnocení výsledků a určení možného použití podle vlastností materiálu.

1 Aditivní výroba

AM je definována normou ISO/ASTM 52900 jako proces spojování materiálů z 3D modelu. Výsledný model vzniká nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Pojem 3D tisk je také definovaný normou ISO/ASTM 52900 jako výroba objektů skrze nános materiálu za použití tiskací hlavy, trysky nebo jiných tiskacích technologií [1, 2].

Největší předností 3D tisku je schopnost vytvářet složité geometrické tvary, duté modely a modely, které nepotřebují téměř žádnou další úpravu, tzv. post-processing. Navíc při těchto procesech vzniká pouze minimální množství odpadu. Díky zmíněným vlastnostem jsou designéři schopni vytvořit unikátní produkty při nízkých nákladech. Jednou z výhod je skutečnost, že produkty, které by jinak musely být vyráběny ve více procesních krocích, mohou být vyrobeny jako celek. V kontextu současných ekologických trendů je nespornou výhodou 3D tisku šetrnost k životnímu prostředí [3].

3D tiskem je možné dosáhnout výsledků, kterých nelze jinou výrobní metodou dosáhnout buďto vůbec, nebo jen velice těžko. Jedním z hlavních účelů této technologie je výroba prototypových modelů. Pro tisk je využíváno 3D modelu, který byl vytvořen v CAD softwaru, 3D skenováním, lékařskými metodami, nebo dokonce lze využívat modely z video her či filmů. Tyto modely jsou následně rozřezány na tenké vrstvy ve svislém směru. Vrstvy musí být konečné a musí mít definovanou tloušťku. Nepochybnou výhodou je, že produkt lze vyrábět přímo z 3D modelu, což celý proces výroby velice usnadňuje, protože není třeba vytvářet výrobní výkres. Oproti konvenčním metodám není třeba po vytvoření 3D modelu do detailu zkoumat, který konkrétní nástroj a způsob výroby je třeba použít pro danou geometrii, tím se metoda stává univerzální. I po 28 letech vývoje a výzkumu jsou stále objevovány nové metody a materiály, které je možné využít v praxi. Společnosti investují stále větší peníze do nových technologií a vývoje v oblasti AM, protože díky této metodě jsou schopny vyrobit velké množství různorodých výrobků na jednom stroji bez dalšího opracování a s minimálním množstvím odpadu. Pomocí technologie 3D tisku je redukováno množství výrobků, které by se na trh dostaly jako vadné, slouží tedy také jako vizuální nástroj [1, 2].

1.1 3D tisk vs AM a jeho budoucnost

3D tisk je mladá technologie, která značně usnadňuje a zlevňuje výrobu ve všech odvětvích. Proto se předpokládá, že zájem o tuto technologii v příštích letech značně poroste. Nejčastějším materiálem, který se používá pro tisk, jsou různé druhy plastu. V poslední době jsou stále více používané technologie, které umožňují 3D tisk z kovových materiálů. To značně pomáhá popularizaci celé technologie [3].

Pojem 3D tisk je často používán jako neoborný název pro AM. Aditivní výroba je oficiální pojem, který je upravován normou ISO a ASTM. V posledních letech se stal pojem 3D tisk daleko populárnějším a používanějším než pojem AM [1].

1.2 Využití

Jak již bylo zmíněno, 3D tisk má širokou škálu využití v mnoha odvětvích, jako jsou letectví, vesmírný průmysl, automobilový průmysl, medicína, zbrojní průmysl, strojná výroba, spotřební zboží, elektronika, akademické účely nebo stavební průmysl. AM zahrnuje několik odlišných způsobů, jak daný výrobek vytvořit. Díly jsou vytvářeny vrstvením materiálu na sebe. Mezi způsoby, kterými je možné vrstvení materiálu provádět, patří vytlačování, tryskání, vytvrzování pomocí UV záření, laminování nebo tavení materiálu. Rozsah používaných materiálů v této oblasti je poměrně široký. V základu se nejvíce používají různé druhy plastů, kovů nebo keramiky. Je ale možné použít například i různé kompozitní materiály. Aditivní výrobou se dají vyrábět součástky různorodé povahy. Tato technologie je využívána také v širokém spektru různých odvětví, jako jsou spotřební zboží, výrobní firmy, medicína, armádní průmysl, letectví nebo vesmírný výzkum. Dalším využitím aditivní výroby je také výroba obráběcích a montážních nástrojů [1].

1.2.1 Automobilový průmysl

Automobilový průmysl patří bezpochyby k největším uživatelům 3D tisku v průmyslovém odvětví. Firmy začaly do této technologie investovat a dále ji rozvíjet krátce poté, co byla komercializována. První pokusy o vytvoření vstřikovacích forem zprvu končily bez úspěchu. Postupně se však podařilo tuto technologii zdokonalit natolik, že je nyní možné vytvářet kovové formy. Tento způsob využití je stále zkoumán a vylepšován. Metodou

3D tisku je totiž možné dosáhnout výsledků, kterých nelze dosáhnout obráběním. Největší využití v automobilovém průmyslu má 3D tisk pro výrobu prototypů, forem a nástrojů, a to především v oblasti vývoje, protože vytvářet finální výrobky metodou 3D tisku je v současnosti stále velice nákladné. Důležitá část vývoje se zabývá vytvářením forem a nástrojů. Ovlivněná je tím pak cena počáteční investice a celkový čas potřebný pro vývoj. Jako materiál se používá ocel, nerezová ocel nebo hliník. Pro výrobu se uplatňuje metoda PBF (tavení prášku v nádobě), jejímž principem je nanášení vodorovné vrstvy prášku a jeho tavení pomocí laseru nebo elektronového paprsku [1, 4].

1.2.2 Medicína

Medicína je dalším odvětvím, které pro své účely používá metodu 3D tisku. Hlavní dva obory, které využívají metody 3D tisku, jsou ortopedie a výroba zubních náhrad. Pro ortopedické účely jsou vytvářeny lebeční, páteřní, kolenní nebo kyčelní implantáty. Jako materiál se používá například nylon, silikon, titan, polyethylenglykol (PEG) nebo polykaprolakton (PCL). Pro dentální účely se využívá na výrobu zubních náhrad. Díky této metodě je možné zlevnit a urychlit výrobu zubních náhrad. Nejčastěji používaným materiálem je keramika [1, 5, 6].

1.2.3 Letectví a vesmírný průmysl

Letectví a vesmírný průmysl byly jedněmi z prvních odvětví, kde se začalo využívat metod 3D tisku pro výrobu součástí, a to v polovině 90. let 20. století. Tyto výrobky byly používány jak pro komerční účely, tak i pro armádní účely. Zatímco v letectví byly používány nestrukturální součásti, ve vesmírném průmyslu firmy jako NASA, SpaceX nebo Evropská vesmírná agentura používají metodu 3D tisku pro tvorbu vstříků nebo spalovacích komor pro raketové motory. Často používaným materiálem je keramika pro její dobrou tepelnou odolnost a mechanické vlastnosti [1, 6].

1.2.4 Komerční účely

Technologie 3D tisku může být využita nejen k tvorbě funkčních částí, ale také při výrobě designových prvků. Této technologii je využíváno například při výrobě šperků, kdy je model šperku vytvořený pomocí 3D tisku a následně je použit pro výrobu formy pro samotný šperk. Dále je možné tuto technologii využívat také pro domácí dekorace, jako

jsou lampy, sošky nebo kryty na mobilní telefony. 3D tisk má své uplatnění rovněž v potravinářském průmyslu. V současné době se se používají různé 2D prvky, které je možné umístit na již zhotovené výrobky, jako třeba fotografie na dort. Pomocí 3D tisku je možné vytvořit produkt se 3D strukturou každému zákazníkovi na míru, a to včetně tvaru, chuti, barvy nebo dokonce nutričních hodnot [1, 7].

1.2.5 Strojní výroba

Strojní výroba je oblast, pro kterou metoda 3D tisku otevírá spoustu nových možností. V současné době je možné tisknout výrobky, které jsou finální a nepotřebují další opracování. Mezi výrobky, které jsou vytvářeny metodou 3D tisku, patří různá měřidla, šablony nebo přípravky. Lze také vyrábět vodící prvky pro řezání či vrtání. Dále je také možné vytvářet výrobky, jež jsou součástí celého zařízení, a mají funkční účel. Těmito výrobky mohou být palivové trysky, lopatky turbíny, příchytky nebo různé držáky [1].

2 Metody 3D tisku

Technologie 3D tisku je možné rozdělit do 7 různých kategorií. Každá z těchto technologií obsahuje různé metody a procesy, jak je znázorněno v tabulce 1. Toto rozdělení je upravováno normou ISO/ASTM 52900 [1].

Tabulka 1: Technologie 3D tisku

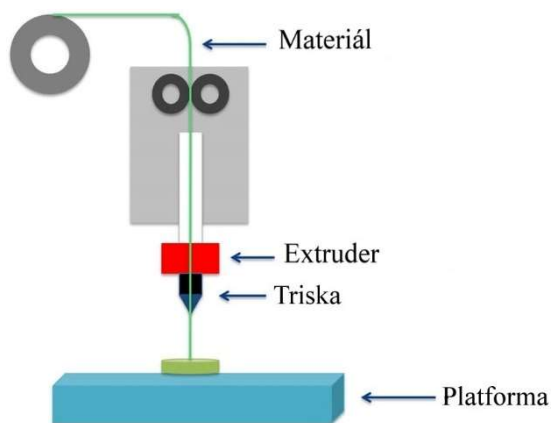
Technologie	Metody
Material extrusion	FDM
Powder bed fusion	SLS, EBM, SLM
Material jetting	MJM, IJP
Binder jetting	3DP
Sheet lamination	LOM, UAM
Directed energy deposition	LENS, DMD
Vat photopolymerization	DLP, SL

- Material extrusion – Proces aditivní výroby, ve kterém je materiál selektivně vytlačován skrz trysku nebo jiný otvor;
- Material jetting – Proces aditivní výroby, ve kterém jsou kapky stavěcího materiálu selektivně nanášeny;
- Binder jetting – Proces aditivní výroby, ve kterém je tekuté pojivo selektivně nanášeno za účelem spojení práškových materiálů;
- Sheet lamination – Proces aditivní výroby, ve kterém jsou tabule materiálu spojeny za účelem zformování dílu;
- Vat Photopolymerization – Proces aditivní výroby, ve kterém je tekutý fotopolymer uložený v nádobě selektivně vytvrzován pomocí polymerizace aktivované světlem;
- Powder bed fusion – Proces aditivní výroby, ve kterém tepelná energie selektivně taví oblasti v nanesené vrstvě prášku;
- Direct energy deposition – Proces aditivní výroby, ve kterém je soustředěná tepelná energie používána pro tavení materiálu během jeho nanášení [1].

2.1 FDM

Metoda FDM (Fused deposition modelling) dokonale reprezentuje technologii Material extrusion, která pracuje na principu vytlačování zahřátého materiálu skrz trysku a jeho nanášení v tenkých vrstvách na sebe, jak je zobrazeno na obrázku 1. Materiál v podobě drátu je v tisknoucí hlavě zahříván lehce nad teplotu tání. Díky tomu materiál ihned po vytlačení z trysky rychle chladne a stává se tuhým a pevným. Teplota tání závisí na typu a složení materiálu. Pro tuto metodu se používají nejrůznější druhy termoplastu, jenž se pro tento proces dokonale hodí díky své vlastnosti opakovaného ohřívání. První vrstva se přichytává na vyhřívanou stavěcí desku, která je kovová nebo skleněná. Po dokončení první vrstvy se posune stavěcí deska dolů nebo tryska nahoru, záleží na konstrukci dané tiskárny, a začíná se tvořit další vrstva, která je nanášena na tu předchozí.

Některé materiály nevyžadují předehřev desky. Konkrétní použité materiály pak mohou být polylaktid (PLA), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polykarbonát (PC), nylon nebo různé dřevnaté materiály. Technologií FDM není možné dosáhnout tak kvalitního tisku jako u jiných technologií. Díky nízkým nákladům na materiál i na samotné zařízení má však velké uplatnění nejen v hobby prostředí, ale i v průmyslových odvětvích, kde je tato technologie využívána pro výrobu levných plastových dílů [1, 3].



Obrázek 1: Popis metody FDM [12]

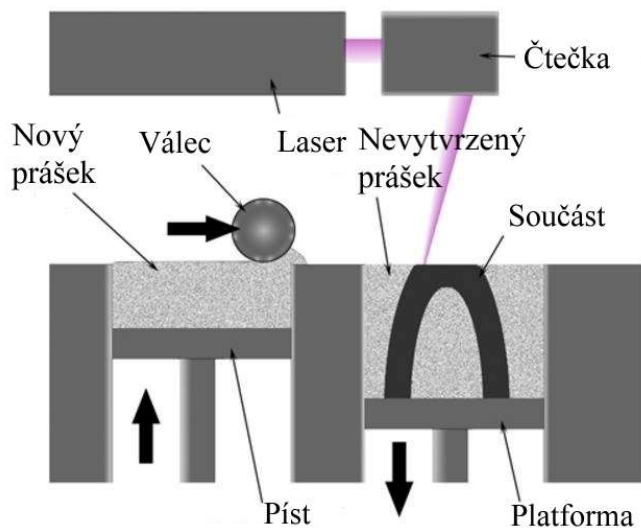
2.2 SLS

Metoda SLS (Selective laser sintering) patří do skupiny metod technologie Powder bed fusion. Tato metoda funguje na principu spojování prášku. Zároveň se jedná o úplně první metodu, která využívala tohoto principu. Materiál je v tenkých vrstvách nanášen na stavěcí desku. Vždy se nanese pouze jedna tenká vrstva, ta je uhlazena válcem a poté je

vrstva osvětlena pomocí laseru, který nanese vrstvu prášku speče dohromady. Metoda je znázorněna na obrázku 2. Proces je opakován do doby, než je celý model hotový. Díky laseru je kvalita výtisku velice vysoká, ale také nákladná. Jako materiál je možné používat jak polymer, tak třeba i kovový materiál.

Během tisku polymeru se vždy nevytvdí všechny nanesený prášek. Zbytek materiálu, který nebyl vytvrzen pomocí laseru, slouží jako podpůrný materiál. Díky tomu není při tvorbě 3D modelu třeba přidávat jiné podpory. Prášek je v tisknoucí komoře vystavován zvýšeným teplotám, kvůli čemuž degraduje a snižuje se jeho životnost. V důsledku toho musí být prášek pravidelně měněn za nový. Pro kovový prášek je potřeba používat kotvy pro přichycení ke stavěcí platformě. Pokud by nebyly použity kotvy, je zde riziko uvolnění od stavěcí desky, a tím by došlo k selhání tisku.

Riziko uvolnění je způsobeno tím, že kovový prášek vyžaduje pro své spečení vyšší teplotu. To může v důsledku vést k vyššímu napětí, tepelnému pnutí a deformacím [1, 8, 9].



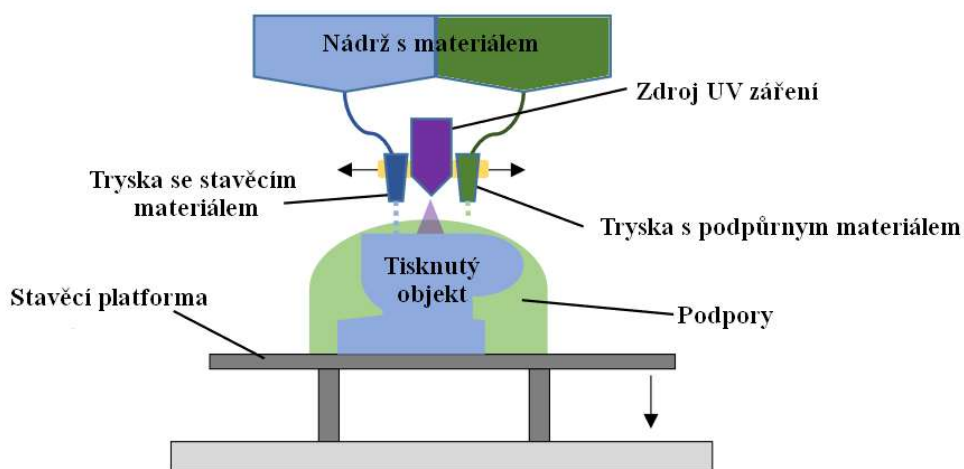
Obrázek 2: Popis metody SLS [13]

2.3 MJM/PJM

Metoda MJM/PJM (Multijet Modelling/Polyjet Modelling) je součástí technologie Material jetting. MJM/PJM funguje velmi podobně jako ostatní metody 3D tisku. Tato metoda využívá podobného principu jako klasický inkoustový 2D tisk, ovšem je aplikovaný do trojrozměrného prostředí. Tisková hlava se pohybuje nad tiskovým prostorem a nanáší speciální termo-plastický materiál tam, kde je to potřeba, a tím vzniká jedna vrstva. Pro

vytvrzení termo-plastického materiálu je vždy po každé vytvořené vrstvě použito UV záření. Tím je jedna vrstva dokončena a celý tento proces se opakuje, dokud není zhotoven kompletní model [2].

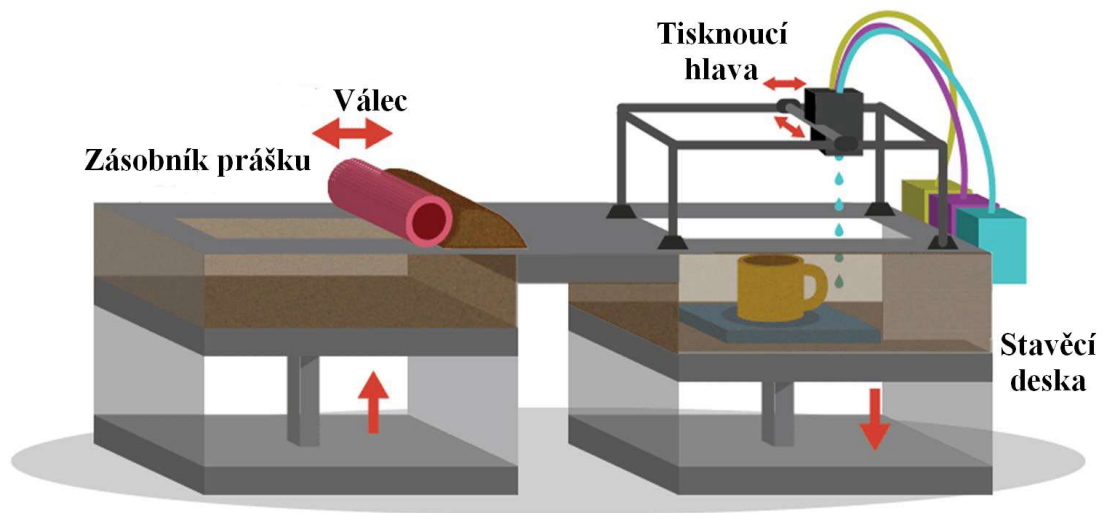
Pro urychlení celého procesu je často používáno více trysek umístěných na tisknouce hlavě. Díky tomu je možné tisknout více barev či materiálů najednou. Příkladem takového využití je konfigurace, kdy jedna tryska tiskne hlavní model a druhá tryska tiskne podpurný materiál. Díky těmto vlastnostem je možné pomocí MJM/PJM tisknout širokou škálu barev a materiálů [1].



Obrázek 3: Popis metody MJM/PJM [14]

2.4 3DP

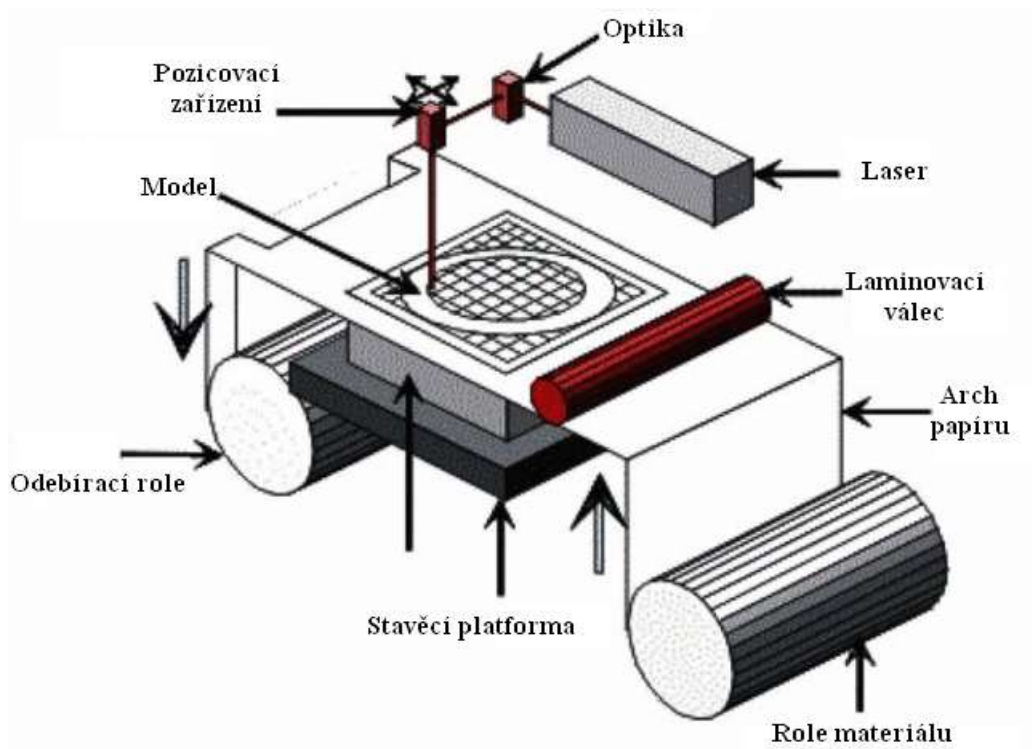
Metoda 3DP (Three-Dimensional Printing) je jedna z technologií Binder jetting, Metoda byla vytvořena na MIT (Massachusetts Institute of Technology). 3DP pracuje na principu pojení prášku pomocí tekutého pojiva. Samotný tisk poté probíhá tak, že pomocí válce je nanášena tenká vrstva prášku na stavěcí desku a z tisknouce hlavy je do prášku nanášeno tekuté pojivo, které prášek spojí. Pojivo ve formě kapek je nanášeno z jedné nebo více trysek. Průměr těchto kapek bývá 80 μm . Poté, co je zhotovena první vrstva, stavěcí platforma se posune směrem dolů. Válec nanese druhou vrstvu prášku a celý proces probíhá znovu, dokud není zhotoven celý díl. Detailní popis metody je zobrazen na obrázku 4. Výhodou této technologie je skutečnost, že není potřeba vytvářet podpory. Přebytečný prášek slouží jako podpora, stejně jako je tomu u technologie Powder bed fusion. Podobně jako u ostatních technologií 3D tisku je možné vytvářet více výrobků najednou [2].



Obrázek 4: Popis metody 3DP [11]

2.5 LOM

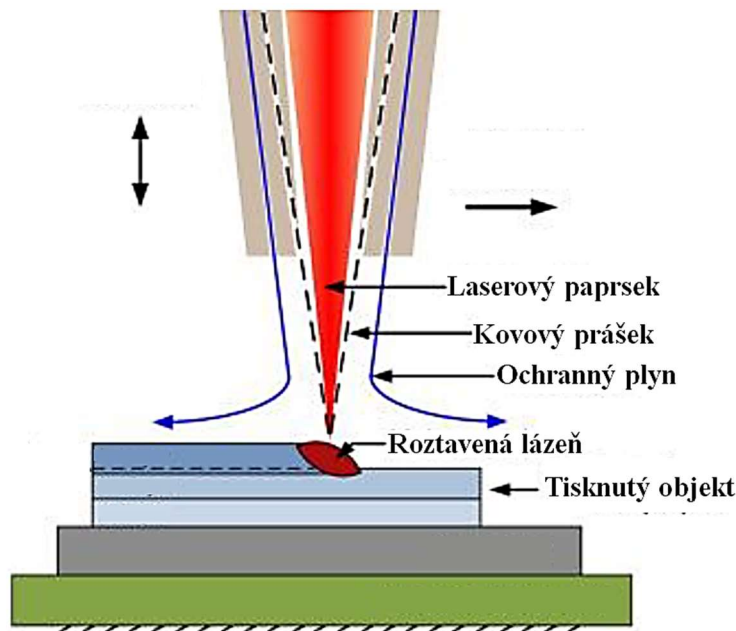
LOM (Laminated object manufacturing) je metoda fungující na principu technologie Sheet lamination. Materiál používaný pro metodu LOM je speciální druh papíru, který má z jedné strany nanesené lepidlo citlivé na teplo. Materiál je v zařízení uložen v podobě role, ze které je odmotáván. Papír je přichytáván na předchozí vrstvu a pomocí vyhřívaného válce aktivující lepidlo je přilepen na předchozí vrstvu. Kontura vrstvy je vyříznuta pomocí CO2 laseru, který je precizně seřízený tak, aby pronikl pouze do tloušťky přesně jedné vrstvy. Přebytný materiál je upraven na obdélníky, aby bylo usnadněno jeho odstraňování. Odpadový materiál stále zůstává na tisknoucí platformě a plní podpůrné účely. Arch papíru, který je používán jako materiál, je širší než tisknoucí plocha, díky tomu nedojde k porušení na jeho okrajích. Pomocí válce je arch natažen a poskytuje tak materiál pro další vrstvu [3].



Obrázek 5: Popis metody LOM [16]

2.6 LENS

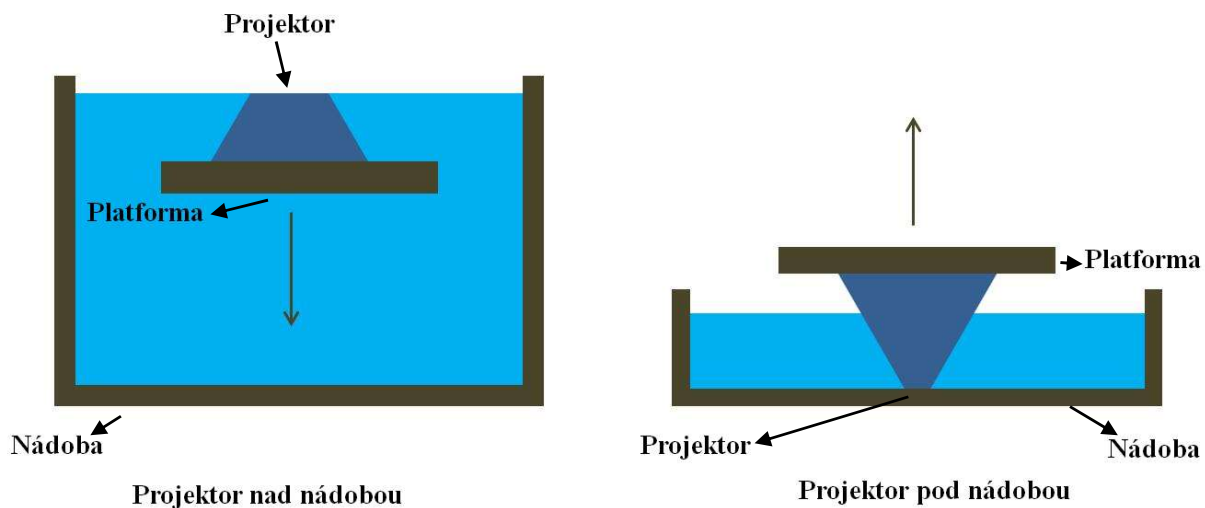
LENS (Laser engineered net shaping) spadá pod technologii Direct energy deposition. Principem této metody 3D tisku je použití vysokonapěťového laseru pro tavení kovového prášku. Speciální tryska vstříkne proud prášku přímo do zaměřeného laserového paprsku. Laserová hlava a tryska se pohybují jako jedna soustava. Kovový prášek je dopravován po okraji tisknoucí hlavy. Doprava kovového prášku je zajištěna pomocí gravitace nebo pomocí plynu, jenž je pod tlakem. Laserový paprsek vytváří na substrátu nebo na předchozích vrstvách malou roztavenou lázeň. Prášek přidávaný do této oblasti je spotřebováván v této louži, což způsobuje nárůst výšky ve směru od povrchu substrátu. Tisknoucí hlava se zdvihne ve chvíli, kdy je vrstva dokončena. Pomocí metody LENS je možné vyrábět poměrně velké objekty. Nevýhodou ovšem je nižší kvalita a přesnost těchto objektů oproti například metodě DMD (Direct metal deposition) [3].



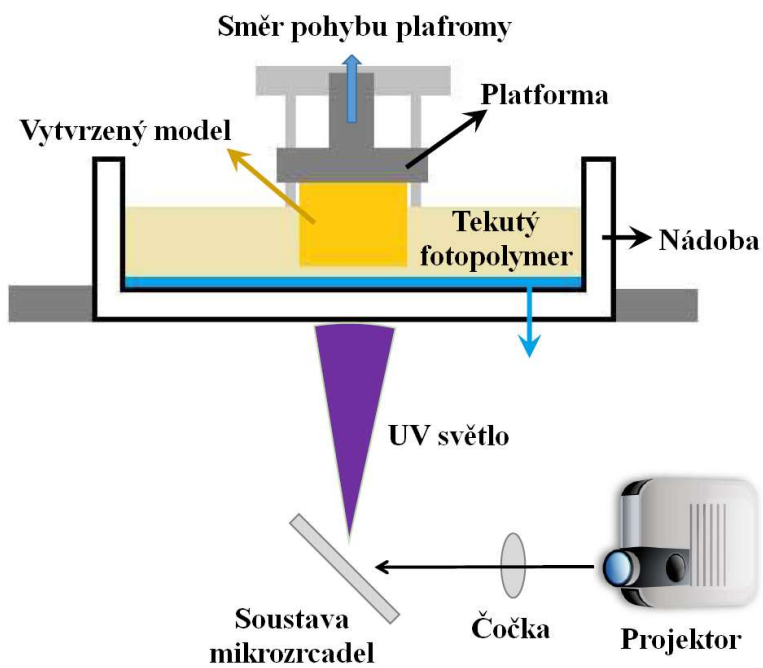
Obrázek 6: Popis metody LENS [15]

2.7 DLP

Metoda DLP (Digital light processing) využívá technologie Vat photopolymerization. Tato metoda pracuje na principu selektivního vytvrzování tekutého fotopolymeru pomocí světla, které zajišťuje polymerizaci použitého materiálu. Zdrojem světla pro metodu DLP jsou LED diody produkující UV záření. Pro přesné usměrnění světla ze zdroje se používají mikrozrcadla, pomocí kterých je obrázek promítnutý na spodek nádoby. Projekce obrázku způsobuje, že je celá vrstva vždy vytvrzena najednou. Díky tomu je technologie značně rychlejší než metoda SL (Stereolithography), jež využívá pro vytvrzení fotopolymeru UV laser, který vždy vytvrdí pouze jeden bod. Výhodami DLP metody jsou dostupnost velmi vysokého rozlišení a schopnost vytvářet značně jemný detail. Metoda DLP má však jednu velkou nevýhodu, a sice tisk velkých ploch, který se stává velmi drahý a technologicky náročný na provedení. Proto je tato metoda využívána pro menší a detailní plochy. Konstrukce tiskárny bývá navržena tak, aby byl projektor umístěn pod nádobou a vytvrzoval fotopolymer skrz průhledné dno nádoby. Stavěcí platforma se při tisku posouvá směrem nahoru. Díky této konstrukci může být v nádobě menší množství materiálu, než kdyby byl projektor nad nádobou a stavěcí platforma se posouvala směrem dolů do vnitřku nádoby, jak je zobrazeno na obrázku 7. Díky tomu se platforma neposouvá do vnitřku nádoby a vzniká tak větší prostor pro vyšší výtisky [1].



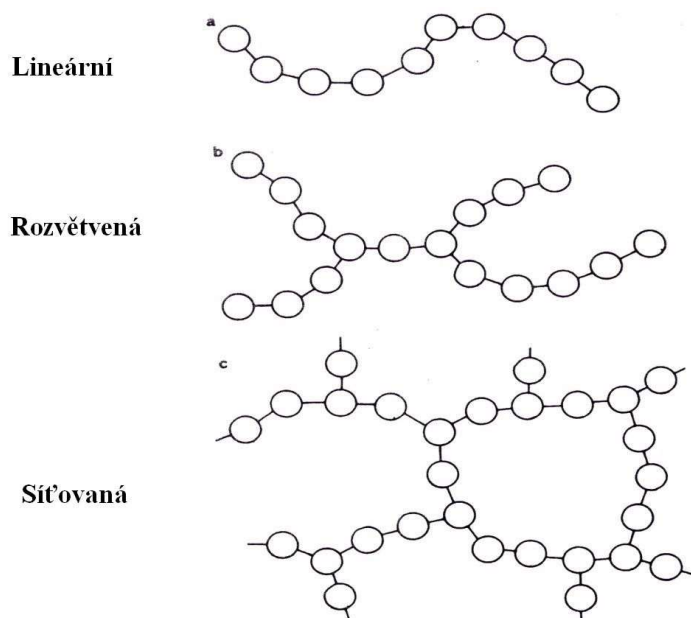
Obrázek 7: Porovnání umístění projektoru [17]



Obrázek 8: Popis metody DLP [18]

3 Fotopolymery vytvrditelné pomocí UV světla

Fotopolymery byly vynalezeny ke konci 60. let 20. století. V té době se používaly jako fotorezisty pro mikro elektroniku. To mělo zásadní vliv na jejich vývoj a výzkum. Pro vytvrzení fotopolymerů může být použita široká řada záření jako gamma záření, rentgenové paprsky, elektronový paprsek, UV záření, nebo v některých případech dokonce viditelné světlo. Postupně se ukázalo, že nejlepším zářením pro vytvrzení fotopolymeru je UV záření a viditelné světlo. Termoplasty používané při vstřikování mají lineární nebo rozvětvenou molekulární strukturu, která jim umožňuje opakované tavení a tuhnutí. Oproti tomu fotopolymery mají síťovanou molekulární strukturu a kvůli tomu netají, mají horší vlastnost tečení a uvolnění napětí. Porovnání molekulárních struktur je zobrazeno na obrázku 9 [2].



Obrázek 9: Molekulární struktury polymerů [19]

Fotopolymery, které jsou využívány pro 3D tisk, nazýváme resiny. Ty je možné vyrábět ze dvou různých látek: akrylátů nebo epoxidů. První patenty, které popisují fotopolymery na bázi akrylátu, byly publikovány v letech 1989 a 1990. Tyto fotopolymerní roztoky měly vysokou reaktivitu, ale často v nich vznikaly slabé části z důvodu nepřesnosti způsobené smrštěním a kroucením. Resiny na akrylové bázi byly vytvrzeny pouze z poloviny. Poté byla nanášena nová vrstva, jež byla vytvrzena. Část záření prošla skrz novou vrstvu a spustila další fotochemickou reakci ve vrstvě, která už byla částečně vytvrzená. Poté, co byla tato vrstva pokryta vrstvou novou, se snížila její náchylnost vůči působení kyslíku. Další příčná vazba na této vrstvě způsobila smrštění, které zvýšilo napětí ve vrstvě a způsobovalo kroucení [2].

První patent pro fotopolymery na epoxidové bázi byl vytvořen v Japonsku v roce 1988. Epoxidový resin vytváří daleko přesnější, tvrdší a pevnější součásti než akrylový resin. Smrštění při polymerizaci fotopolymerního roztoku na bázi akrylátu je 5–20 %. Zato smrštění u fotopolymeru na bázi epoxidu je pouze 1–2 %. Tato nízká úroveň smrštění zaručuje výbornou přilnavost a snižuje tendenci materiálu kroutit se během vytvrzení. Další výhodou je, že polymerizace resinu na bázi epoxidu není ovlivněna kyslíkem obsaženým v atmosféře. To umožňuje menší koncentraci fotoiniciátorů, díky čemuž má tento fotopolymer menší zbytkový zápach než fotopolymer na bázi akrylátu. Mezi nevýhody patří pomalé vytvrzování, křehkost a náchylnost na vlhkost, jenž může ovlivnit polymerizaci. Z toho důvodu se do epoxidového fotopolymerního roztoku přidává trocha akrylátu, který dodá epoxidu dostatečnou stabilitu, aby při výrobě nedošlo k jeho narušení. Díky akrylátu se také vyrovná křehkost epoxidových součástí. Z těchto důvodů se dnes používají výhradně takové fotopolymery, které obsahují jak epoxid, tak akrylát [2].

3.1 Chemické složení fotopolymerů

Fotopolymery, které jsou používány pro 3D tisk, jsou skládány z několika různých složek. Těmito složkami jsou tekuté monomery, fotoiniciátory, reaktivní ředidla, flexibilizátory a stabilizátory. Zjednodušený popis reakce je takový, že pokud UV záření dopadne na fotopolymer, fotoiniciátory vytvoří chemickou transformaci a stanou se reaktivními s tekutými monomery. Reaktivní fotoiniciátory reagují s molekulami monomeru a spustí jev, který se nazývá polymerní řetězec. Následnou reakcí vzniknou polymerní řetězce, jež se přetvoří do síťované molekulární vazby. Ta vznikne díky silným kovalentním vazbám mezi polymerními řetězci. Polymerizace je termín označující proces spojování mnoha malých molekul monomerů do větších molekul polymerů.

3.2 Sintrace

Sintrace je proces, ve kterém dochází ke zhutnění a zformování pevné hmoty objektu pomocí tlaku nebo teploty, a to bez jeho ohřátí na bod zkapalnění. Může probíhat přírodně nebo uměle. Sintrace je složitý děj, jenž má různé využití, například u katalýzy plastů či keramiky. Sintrace je citlivá na faktory, jako jsou teplota, čas a typ atmosféry, ve které je vypalování prováděno [21].

3.2.1 Sintrace ve 3D tisku

Po vytisknutí objektu je získána tzv. zelená součást („green parts“), na které je potřeba provést proces vypálení (debindingu) a spékání (sintrace). Působením tepla dochází k odstranění spojovacího materiálu a poté ke spečení stavebního materiálu. Teploty potřebné pro tyto procesy se liší v závislosti na spojovacím a stavebním materiálu. Pro následující experiment byl použit materiál Ferrolite, kde je spojovacím materiálem polymer a stavebním materiálem jsou částice kovu. Během celého procesu je potřeba udržovat stálou kontrolu nad teplotou v komoře, kde je debinding a sintrace prováděna. Kontrola a stabilita teploty redukuje tepelné napětí a chrání objekt před prasknutím [22].

4 Praktická část

Pro praktickou část práce bylo zvoleno zkoumání materiálu Ferrolite od firmy Tethon 3D. Jedná se o experimentální materiál, proto se velmi hodil pro účely práce. Materiál byl tisknut pomocí metody DLP. V této sekci byly zkoumány jednotlivé vlastnosti materiálu. Spolu s tím bylo pozorováno, jak se materiál chová při různých procesech a co všechno materiál může ovlivnit. Praktická část je rozdělena na tři části. V první části bylo popsáno, jak snadné či obtížné je materiál tisknout a podle dosažených výsledků jsou navrženy optimální parametry tisku. Ve druhé části je popsán proces vypalování. Během těchto experimentů byly zkoumány jednotlivé údaje a jejich vliv na celý proces. Pro proces vypalování bylo také potřeba navrhnout dle dosažených výsledků optimální parametry. Předpokládaným výsledkem měly být čistě kovové magnetické vzorky. Ve třetí a zároveň poslední části jsou popsány vlastnosti materiálu po vypálení. V této části byla zkoumána tvrdost, drsnost a pórovitost povrchu. V závěru celé práce jsou shrnuty dosažené výsledky, navrženy optimální parametry pro jednotlivé procesy, návrhy na zdokonalení, pro které nebyl v práci prostor, a také zamýšlení nad využitím materiálu v praxi.

4.1 Materiál

Pro experiment byl zvolen materiál Ferrolite od americké firmy Tethon 3D. Jedná se o fotopolymerní materiál s příměsí železa, který je možné vytvrdit pomocí UV záření. Materiál je určen pro technologie DLP a SLA. Před vypálením je vytisknutý objekt feromagnetický. Po sintraci se vytisknutý objekt stává plně kovovým podobně jako kovový odlitek. Povrch je možné vyleštit tak, aby nabyl lesklosti, a to v sitrovaném i nesitrovaném stavu. [10]

Ferrolite byl vytvořen jako experimentální materiál za účelem rozšíření trhu s kovovým materiálem určeným pro 3D tisk. Díky složení Ferrolitu a jeho následné sintraci je možné vytvořit kovové objekty, které jsou pevné, odolné a dobře snášejí teplo. Aplikace tohoto materiálu mohou být různé. Předpokládané využití je ve strojním obrábění, automobilu, na chromované díly, při reprodukci železných artefaktů a tak dále. [20]

4.2 3D tiskárna

Pro tuto práci byla použita DLP tiskárna. Tato tiskárna je výrobkem Technické univerzity v Liberci. V tiskárně je namontován DLP projektor s čipem DLP450 s rozlišením

912 × 1140 pixelů. Součástí projektoru je UV LED dioda s vlnovou délkou 385–405 nm a výkonem 5,5 W. Tiskárna má projektor umístěný přímo pod nádobou. Hliníková nádoba má ve spodu otvor, přes který je do nádoby přišroubovaná FEP folie, skrz kterou je promítán obraz z projektoru. Tuto folii je třeba mít vždy optimálně napnutou, aby nedocházelo k velkým rozměrovým chybám na vytisknutých modelech. Rozměry celé hliníkové nádoby jsou 170 × 130 mm. Stavěcí platforma, která je určena pro tisk, je vyrobena také z hliníku a pohybuje se pomocí krokového motoru a lineárního vedení s délkou 470 mm. Velikost tisknoucí platformy je 80 × 50 mm. V platformě jsou vyvrtané otvory, které zajišťují lepší odstranění modelu a snížení sil působících na platformu. Okolo tiskárny je vytvořený kryt, který zabraňuje šíření UV záření.

4.3 Příprava tiskárny

Vytvořený model v libovolném CAD programu je potřeba převést do formátu STL. Model v tomto formátu je poté nahrán do webového rozhraní tiskárny. Uživatel se k webovému rozhraní tiskárny přihlašuje pomocí její IP adresy. Díky webovému rozhraní je možné tiskárnu ovládat z jakéhokoli zařízení, které má připojení k internetu. Dalším krokem je příprava tiskových parametrů. Ty definují například tloušťku vrstvy, dobu vytvrzení jedné vrstvy, zdvih platformy atd. Tyto parametry mají zásadní vliv na proces celého tisku, bez správně nastavených tiskových parametrů nemůže být tisk úspěšný. Poté, co je vše správně nastaveno, dojde k rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy. Ve webovém rozhraní je možné prohlédnout si, jak budou jednotlivé vrstvy vypadat. Aplikace, která je řízena pomocí webového rozhraní, zajistí přeložení vrstev do G-kódu. Takto upravený model je připravený pro tisk.

Po připravení modelu pro tisk je potřeba připravit také tiskárnu. V první řadě je potřeba ověřit kalibraci tisknoucí platformy. Kalibrací je potřeba nastavit výšku platformy ode dna nádoby tak, aby byla po celé ploše stejná. Tím je zajištěno správné přichycení první vrstvy na platformu a správný nulový bod tiskárny. Kalibrace se provádí v prázdné nádrži. Platformou je potřeba sjet co nejblíže k fólii, tak aby mezi fólií a platformou byla mezera menší, než je tloušťka kancelářského papíru. Poté se platforma vrátí do výchozí pozice. Vzdálenost, kterou tiskárna odměří od výchozí pozice k fólii, je rovna vzdálenosti, ve které bude probíhat tisk první vrstvy. Dalším krokem je příprava materiálu. Materiál je potřeba před vlitím do nádoby pořádně promíchat, aby byl co nejvíce homogenní. Délka promíchání se odvíjí od hustoty materiálu. Poté, co je materiál připraven, je potřeba

nalít jeho dostatečné množství do nádrže. Množství materiálu v nádrži by mělo být přibližně takové, aby došlo k téměř úplnému ponoření platformy. Pro lepší přilnavost první vrstvy je prováděno nanesení vrstvy materiálu na tiskovou platformu. Jako poslední krok před spuštěním tisku je potřeba zkontrolovat, zda je zapnutý projektor a zatažená clona. Pokud by nebyla zatažená clona na projektoru, docházelo by k ozařování materiálu ještě před samotným tiskem, čímž by se materiál poškodil.

Po dokončení tisku je potřeba opatrně odstranit modely z platformy. Při tomto úkonu je nutné postupovat co nejopatrněji, aby nedošlo k poškození vytisknutých modelů. Hotové modely je potřeba osušit ubrousky od přebytečného fotopolymeru a umýt je v izopropylalkoholu. Takto očištěné modely je možné vložit do UV komory na dodatečné vytvrzení, nebo rovnou do vypalovací pece. V peci je proveden celý proces vypálení a spečení dle zadaných teplotních parametrů.



Obrázek 10: DLP tiskárna

4.4 Tepelné zpracování

Značná část této práce je věnována procesu vypalování. Jedná se o složitý proces prováděný v uzavřené peci při vysokých teplotách. Během celého procesu je potřeba správně nastavit teplotu uvnitř pece, rampu a případně také čas udržení na dané teplotě. Rampa udává, jak rychle se vypalované modely ohřívají. Jednotkou tohoto údaje je °C/min. Čas udržení je aplikován, aby byla jistota, že jsou modely dostatečně prohřáté a všechny změny v modelu proběhly v pořádku. Proces vypalování je možné rozdělit do 3 částí.

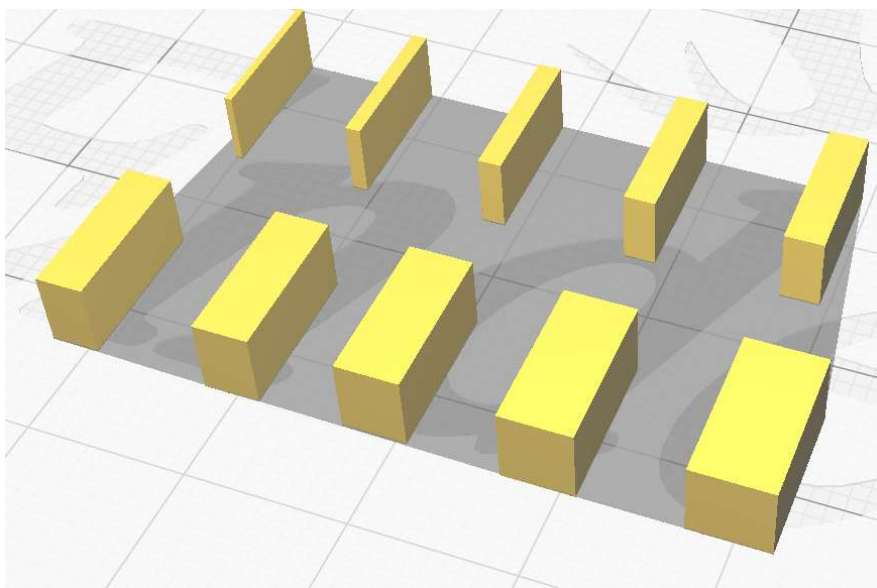
První částí je ohřev, dochází v ní k přehřevu materiálu. V této části nedochází k žádné změně uvnitř materiálu. Pro tento proces je důležité, aby jeho konečná teplota byla nižší než teplota, při které začne docházet k odpařování materiálu. Ohřev slouží jako příprava pro další fáze. Je důležitý z hlediska zabránění prudkého nárůstu teploty, proto je prováděn při nízké rampě, aby byl materiál dostatečně prohřátý v celém svém obsahu. Jedná se tak o časově náročnou část vypalování.

Druhou částí je debinding (vypalování). V této části procesu dochází k vypalování polymerního materiálu. Vypalování polymerního materiálu způsobí drobné mezery mezi kovovými částicemi. Polymer je potřeba odstranit, aby výsledný model obsahoval pouze kovové části. Dosažená teplota v této fázi by měla být zhruba taková, aby došlo k odstranění veškerého polymerního materiálu. Tato část bývá často velmi problémová, jelikož příliš rychlý ohřev může způsobit silné popraskání vypalovaných modelů.

Třetí částí tepelného zpracování je sintrace (spékání). Během této fáze dochází ke spékání kovových částic a k vyplnění drobných mezer, které zůstaly po druhé fázi. Poté, co jsou vyplněny mezery, dochází ke spojení jednotlivých částic kovu. Dosažená maximální teplota závisí na typu příměsi a její tepelné odolnosti. U materiálu, ve kterém je příměsí kov, se jedná o teplotu přibližně 1100 °C. Ohřev při sintraci může být prudký. Jelikož se jedná o fázi, kde probíhá nejvyšší nárůst teploty a zároveň nedochází k žádnému odstraňování materiálu, není zde tak velké riziko vzniku trhlin.

4.5 Návrh experimentu

Při navrhování experimentu bylo čerpáno ze zkušeností z předchozího testování fotopolymerního materiálu s příměsí keramiky. Později byly objeveny mnohé odlišnosti od keramického materiálu a data a pokusy bylo třeba zásadně změnit. První objevená odlišnost – bylo potřeba nastavit delší čas k vytvrzení jedné vrstvy, a to více než 10×. Od kovových částic se totiž UV záření odráží daleko více než od částic keramických. Pro experimenty byl navržen testovací model zobrazený na obrázku 3. Většina testů byla prováděna na modelech o rozměrech 5×10 mm s různou tloušťkou stěny od 0,5 mm do 5 mm.



Obrázek 3: 3D modely vzorků

Jako výchozí hodnoty byly použity parametry, které fungovaly pro tisk keramický materiálů. Tyto hodnoty sloužily jako referenční: bylo na ně pouze navázáno a byly upravovány podle dosažených výsledků a požadavků kovového materiálu. Referenční hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 2. Hlavní proměnná je čas vytvrzení jedné vrstvy. Tato hodnota měla velký vliv na tisk, ale i zásadní dopad na celé tepelné zpracování. Pro vypalování a spékání byly použity doporučené hodnoty od výrobce materiálu, jak je zobrazeno na obrázku 11. Tyto hodnoty se ukázaly jako nefunkční a bylo potřeba postupně změnit parametry v jednotlivých krocích. Jak již bylo popsáno výše, tepelné zpracování je rozděleno na 3 části. Každá z těchto částí byla postupně otestována, aby byla zjištěna příčina vzniku trhliny při vypalování a mohly podle toho být upraveny parametry v dané části. Jakmile

bylo tisknutí i vypalování úspěšně dokončeno, došlo na další testování vzorků. Testy probíhaly na vypalovaných i nevypalovaných vzorcích. Modely byly podrobeny testům tvrdosti, pórovitosti a drsnosti povrchu.

Tabulka 2: Referenční hodnoty fungující pro keramický materiál

	Hodnota
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	8 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Tabulka 3: Parametry vypalování udávané výrobcem

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba ohřevu [min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,4	600	360	Ohřev
240	650	0,8	513	15	Vypalování
650	1100	2,25	200	60	Spékání
1100	20	-	-	-	Chladnutí

4.6 Tisk a tepelné zpracování

Pro zkoumání tiskových a vypalovacích parametrů byly použity modely o rozměrech 5×10 mm s tloušťkou stěny od 0,5 mm do 2,5 mm, vzorky byly tisknuty v páru z důvodu lepšího porovnání výsledků. Byly takto vytvořeny dva páry vzorků, které mohly být vypalovány odděleně, nebo pro zajištění většího počtu vzorku jednoho druhu, na kterých lze zkoumat, zda chyba, která se objeví, je pouze anomálií a vyskytne se na jednom vzorku, či je to chyba, která má konkrétní důvod a je potřeba upravit určitý parametr pro tisk nebo sintraci. Všechny experimenty probíhaly následovně: nejprve byly vytisknuty modely, následně byly zkontrolovány kvůli trhlinám a špatné geometrii. Po umytí a osušení od přebytečného polymeru byly modely vloženy do pece, kde byl prováděn proces vypalování. Téměř všechny vzorky byly vypáleny do jednoho týdne od jejich vtištění.

V první fázi experimentů byly zkoumány výchozí podmínky pro tisk i vypalování. První pokusy o tisk modelů nedopadly dobře, protože nastavené hodnoty fungovaly správně pouze pro tisk modelů z keramických materiálů, nikoliv pro tisk modelů z kovového materiálu. První vrstva byla slabě přichycena, ostatní vrstvy nebyly vytvrzené. Nedostatečné vytvrzení bylo způsobeno špatným prosvícením v jednotlivých vrstvách, ke kterému došlo kvůli nedostatečně dlouhé době vytvrzování. Pro další experiment bylo potřeba navýšit čas vytvrzení jedné vrstvy. Zároveň byl vždy zadáván vyšší čas pro vytvrzení první vrstvy, a to z důvodu lepšího a pevnějšího přichycení materiálu na tisknoucí platformu. Po tomto experimentu bylo potřeba důkladně vyčistit nádobu s materiálem, protože uvnitř mohly zůstat drobné kousky špatně vytvrzených vrstev. Ty by mohly zabraňovat vytvrzení v dalších experimentech.

V dalším pokusu byla doba vytvrzení jedné vrstvy prodloužena na 20 sekund. Všechny ostatní parametry zůstaly nezměněny. Tento pokus byl úspěšný, všechny vzorky držely pevně na platformě a neměly na sobě žádné trhliny. Vytvrzení všech vrstev se zdálo být v pořádku. Všechny parametry tisku, které byly použity v tomto pokusu, jsou uvedeny v tabulce 4. Vzorky byly změřeny pomocí posuvného měřidla a bylo zjištěno, že rozměry modelů neodpovídají původnímu návrhu. Experimentem bylo zjištěno, že 20 vteřin je dostatečně dlouhá doba pro zhotovení modelu. Pro další krok byl navržen pokus, ve kterém bylo provedeno prodloužení vytvrzovací doby v jedné vrstvě.

Tabulka 4: Detailní popis upravených hodnot

	Hodnota
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	30 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	20 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Dále byl proveden experiment, jehož cílem bylo zjistit, zda má vytvrzovací čas vliv na přesnost vytisknutých vzorků. Byly vytisknuty dvě sady vzorků s odlišným časem vytvrzení. První čas vytvrzení byl 25 sekund a druhý čas byl 30 sekund. Pro porovnání naměřených hodnot byly použity pouze vzorky, u kterých byl vytvrzovací čas 30 sekund, a to z důvodu většího časového rozdílu. Tento pokus ukázal, že vytvrzovací čas nemá vliv na přesnost vzorků a příčina musí být jiná. Porovnání naměřených hodnot je možné vidět v tabulce 5. Z tabulky je patrné, že i když byl zvýšen vytvrzovací čas, naměřené hodnoty byly velmi podobné. Největší chyba se objevuje ve výšce. Tento rozměr byl tisknut v ose Z a měl by odpovídat 5 mm. V příložené tabulce 5 je možné vidět, že naměřené rozměry se ani nepřibližují požadovaným hodnotám. Pro navazující experimenty byly vytisknuty další vzorky, u kterých nebyly změněny parametry tisku, a byl na nich zkoumán proces vypalování.

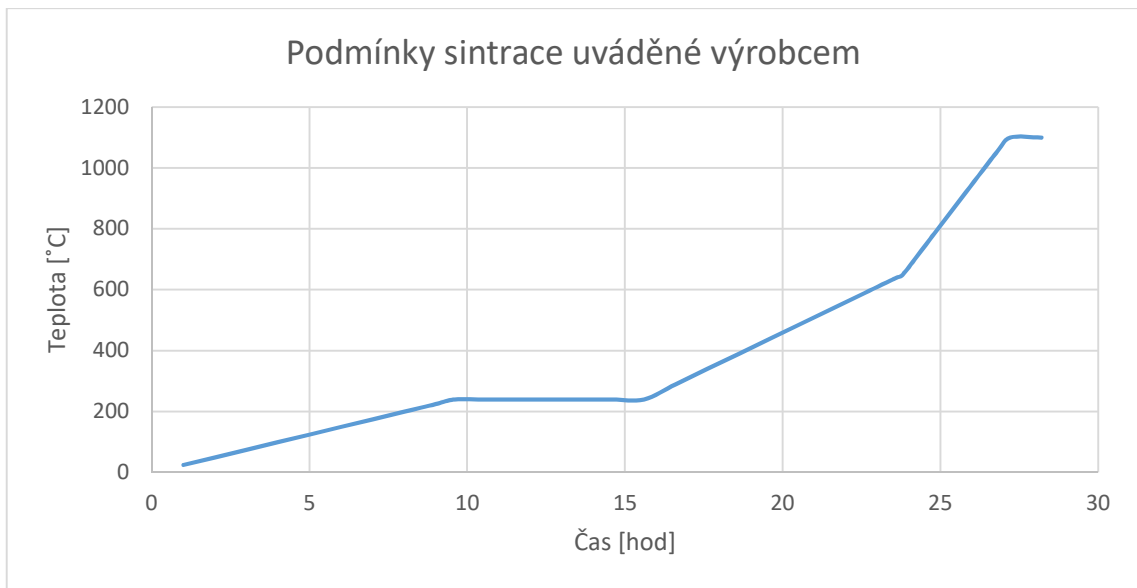
Tabulka 5: Porovnání rozměrů u různých časů vytvrzení

Číslo modelu	Čas ozařování jedné vrstvy 20 sekund			Čas ozařování jedné vrstvy 30 sekund		
	Tloušťka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]
1	0,47	10,45	4,03	0,5	10,52	4,22
2	0,49	10,5	4,2	0,51	10,53	4,06
3	1,01	10,53	4,23	1,06	10,55	4,1
4	1,01	10,53	4,17	1,05	10,53	4,17
5	1,58	10,55	4,01	1,6	10,53	4,13
6	1,6	10,52	4,03	1,6	10,57	4,01
7	2,1	10,5	4,21	2,11	10,53	4,38
8	2,09	10,55	4,34	2,1	10,52	4,29
9	2,6	10,49	4,23	2,64	10,54	4,21
10	2,63	10,53	4,02	2,64	10,57	4,01

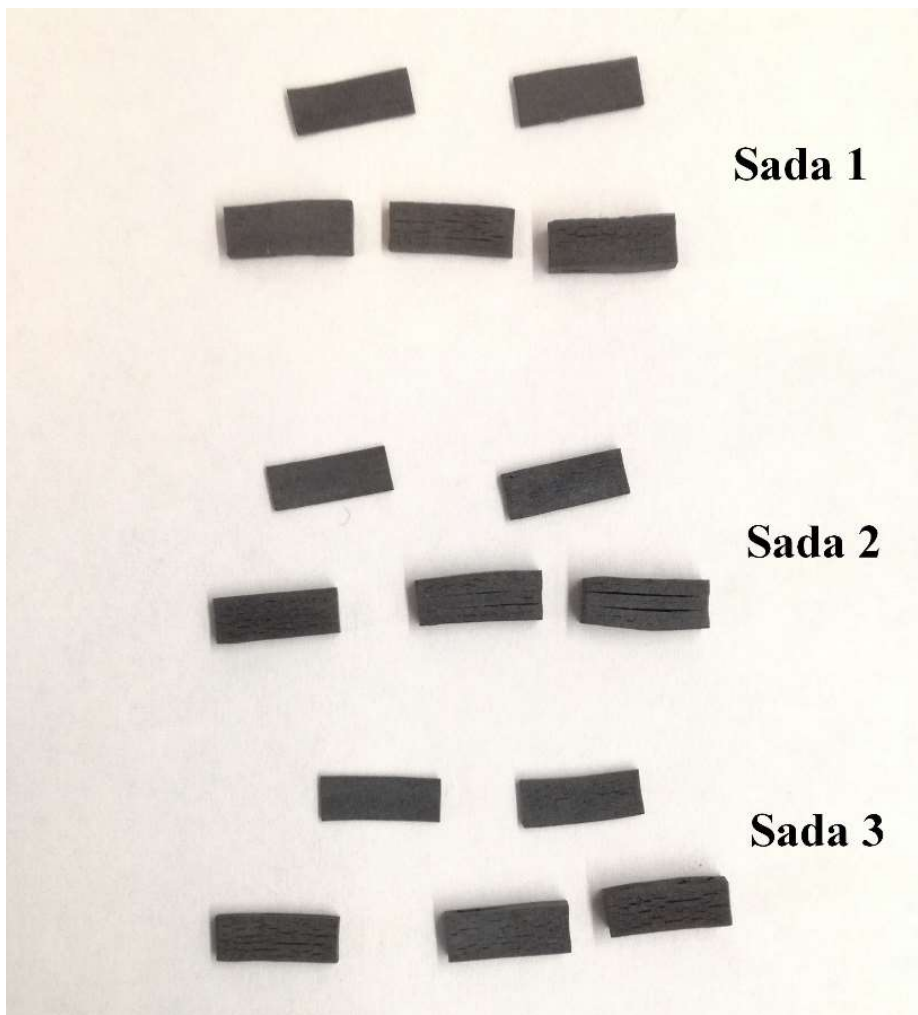
Dosavadní vytisknuté vzorky se zdály být v pořádku, proto bylo navrženo, že bude proveden pokus s vypalováním. Tento experiment měl za cíl zjistit, zda parametry pro vypalování udávány výrobcem fungují. Tyto parametry jsou zobrazeny v tabulce 3, jež byla pro lepší přehlednost převedena do podoby grafu, kterému odpovídá obrázek 11. V grafu však není zobrazeno chladnutí, které bylo provedeno samovolně v peci. Pro tento pokus byly použity 3 sady vzorků. Jedná se o stejné vzorky, na kterých bylo prováděno měření. Parametry tisku těchto modelů jsou zobrazeny v tabulce 6. Výsledkem tohoto testu bylo značné popraskání všech modelů. Při podrobnějším zkoumání se zdálo, že vytvrzovací čas nemá vliv na míru popraskání vzorků. U vzorků bylo možné pozorovat rozdíl v intenzitě popraskání na modelech s odlišnou tloušťkou. Modely s tloušťkou stěny 0,5 mm byly výrazně méně popraskané než modely s tloušťkou stěny 2,5 mm, jak je patrné na obrázku 12. V dalším experimentu byla zjišťována příčina popraskání vzorků. V rámci tohoto experimentu byly vynechány postupně některé fáze z procesu vypalování, aby bylo možné zjistit, během které dochází k popraskání, a jaké hodnoty je potřeba změnit.

Tabulka 6: Parametry tisku pro sady vzorků 1, 2 a 3

Číslo sady	1	2	3
Tloušťka vrstvy	50 μm	50 μm	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	30 s	35 s	40 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	20 s	25 s	30 s
Doba čekání před tiskem	5 s	5 s	5 s
Doba čekání po tisku	1 s	1 s	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s	5 s	5 s



Obrázek 11: Graf zobrazující podmínky sintrace udávané výrobcem



Obrázek 12: Sady modelů 1, 2 a 3 po vypalování

V druhé fázi experimentů bylo potřeba zjistit, co způsobuje popraskání vzorků během vypalování a případně upravit parametry tisku nebo tepelného zpracování. Všechny modely, které byly zmíněny v předchozí fázi experimentu, byly vytištěny během jednoho týdne. Další týden byly nalezeny trhliny na nevypálených vzorcích. Tyto vzorky byly po odnětí z tiskárny umyty v nádobě s izopropylalkoholem a následně usušeny. Modely s trhlinami nebyly dále použity. Vzorky byly po vytištění vloženy do UV komory za účelem dodatečného vytvrzení. Vytvrzování vzorků v UV komoře trvalo 60 minut při teplotě 35 °C.

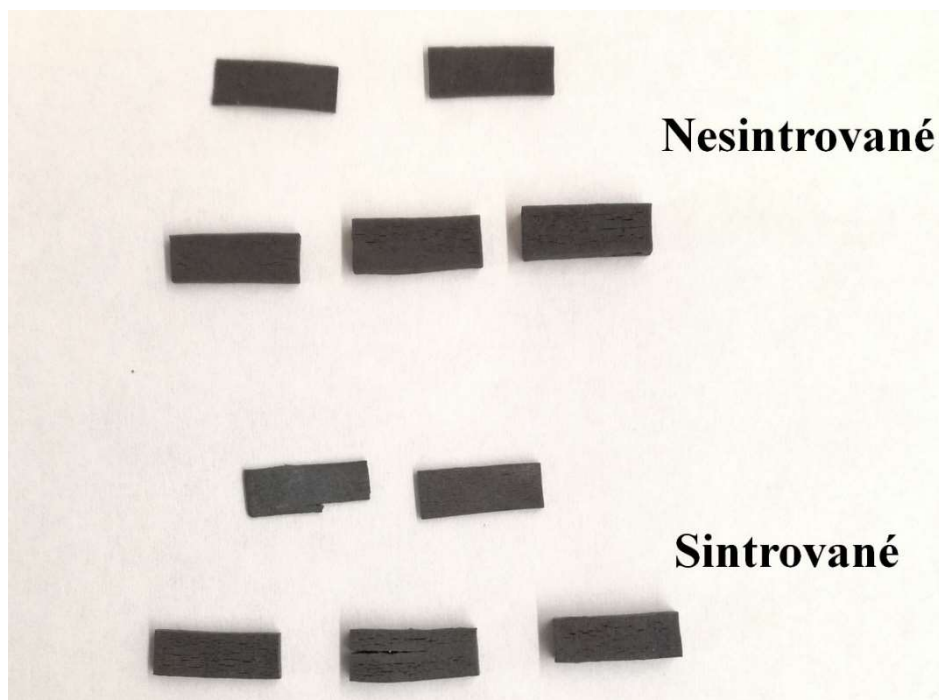
Pro další experiment byla vytisknuta sada 4. Parametry tisku jsou uvedeny v tabulce 7. V tomto experimentu byly postupně vynechávány některé fáze z vypalování. První vynechanou fází byla sintrační část. Tento pokus byl aplikován na polovinu vzorků ze sady 4. Podmínky vypalování bez spékání jsou uvedeny v tabulce 8. Ve výsledku byly vzorky stále popraskané, i když byla z procesu vypalování vynechána fáze spékání. Porovnáním spékaných vzorků s těmi, jež spékány nebyly, bylo zjištěno, že vzorky, které nebyly spékány, mají oproti spékaným vzorkům menší trhliny, jak je možné vidět na obrázku 13. Vynecháním spékání došlo ke zmenšení velikosti trhlín, nepodařilo se však trhliny zcela odstranit. Z toho důvodu byla v navazujícím experimentu vynechána další fáze. V dalším experimentu prošly vzorky pouze fází ohřevu.

Tabulka 7: Parametry tisku pro sady 4

	Hodnota
Číslo sady	4
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	30 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	20 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Tabulka 8: Podmínky vypalování bez sintrace.

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,4	360	Ohřev
240	650	0,8	15	Vypalování



Obrázek 13: Porovnání sintrovaných a nesintrovaných modelů

V dalším pokusu bylo zjišťováno, zda vzorky při procesu vypalování nepraskají již ve fázi ohřevu. Pro tento experiment byla použita druhá polovina vzorků ze sady 4. Vzorky byly vloženy do pece za podmínek zobrazených v tabulce 9. Po dokončení procesu bylo možné na vzorcích pozorovat téměř totožné popraskání jako při předchozím experimentu. V tomto ohledu zde nedošlo k žádnému zlepšení. Z toho vyplývá, že vzorky praskají již ve fázi ohřevu. Pro další experiment byly změněny dva parametry. V první řadě byla navýšena doba vytvrzení jedné vrstvy při procesu tisku. Druhá změna spočívala ve snížení rampy o 50 % u procesu vypalování.

Tabulka 9: Podmínky vypalování pouze pro ohřev.

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,4	360	Ohřev

V tomto experimentu bylo zkoumáno, zda změněné parametry tisku a vypalování změní výsledné popraskání vzorků. Pro tento experiment byla vytisknuta sada vzorků 5, všechny parametry tisku jsou uvedeny v tabulce 10. U sady vzorků 5 byl navýšen čas vytvrzení, protože u předchozích vzorků byly nalezeny trhliny již po samotném tisku. Vzorky byly po vytisknutí vytvrzovány v UV komoře při teplotě 35 °C po dobu 60 minut. Tento experiment přímo navazoval na ten předchozí, pouze při ohřevu byla snížena rampa o 50 %. Do pece byla vložena pouze polovina vzorků ze sady 5. Parametry vypalování jsou zobrazeny v tabulce 11. Na vzorcích bylo možné pozorovat drobné zlepšení oproti předchozímu experimentu. Toto zlepšení bylo velmi malé a bylo viditelné pouze na modelech s tloušťkou stěny 0,5 mm a 1 mm. Pro další experiment bylo navrženo odstranění doby udržení 360 minut.

Tabulka 10: Parametry tisku pro sadu 5

	Hodnota
Číslo sady	5
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	35 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	25 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Tabulka 11: Podmínky vypalování pouze pro ohřev se sníženou rampou

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,2	360	Ohřev

Další částí tohoto experimentu bylo odstranění doby udržení. Zkoumané vzorky byly poměrně malých rozměrů, z toho důvodu nebyla potřeba takto dlouhá doba udržení na teplotě 240 °C. Vzorky byly pravděpodobně dobře prohřáté i bez tohoto udržení. Pro pokus byla použita druhá polovina vzorků ze sady 5. Parametry, které byly nastaveny pro pec, jsou zobrazeny v tabulce 12. Tento pokus nepřinesl žádný posun. Na vzorcích nebylo možné pozorovat žádný rozdíl oproti předchozímu experimentu. Všechny vzorky byly stále popraskané. V tuto chvíli nebylo možné více změnit rampu. Pro další experiment přišla na řadu razantní změna parametrů tisku.

Tabulka 12: Podmínky vypalování se sníženou rampou a nulovou dobou udržení

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,2	-	Ohřev

Prvním návrhem bylo zkusit zmenšit tloušťku vrstvy na 25 μm a zároveň lehce navýšit čas. Tyto dvě změny byly provedeny, protože předpokladem bylo, že tenčí vrstva půjde snáz prosvítit a zároveň bude navýšen čas, aby bylo jisté, že vrstva byla dokonale prosvícena. Snížením tloušťky vrstev došlo k navýšení jejich počtu. Počet vrstev byl navýšen ze 100 na 200. Po dokončení tisku bylo možné na vzorcích pozorovat jejich velmi špatnou geometrii, jak je možné vidět obrázku 14. Kvůli špatné geometrii byl čas vytvrzování znovu navýšen. Výsledek byl opět stejný. Všechny parametry tisku jsou zobrazeny v tabulce 13. V tomto experimentu se z důvodu velmi špatné geometrie, která byla výsledkem zvýšení počtu vrstev, dále nepokračovalo, Pro další experimenty bylo potřeba vrátit se zpět na hodnotu 50 μm a výrazně změnit vytvrzovací čas pro jednu vrstvu.

Tabulka 13: Nastavení tiskárny pro výšku vrstvy 25 μm

	Hodnoty	
Tloušťka vrstvy	25 μm	25 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	40 s	50 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	30 s	40 s
Doba čekání před tiskem	5 s	5 s
Doba čekání po tisku	1 s	1 s
Doba čekání po zdvíhu	5 s	5 s

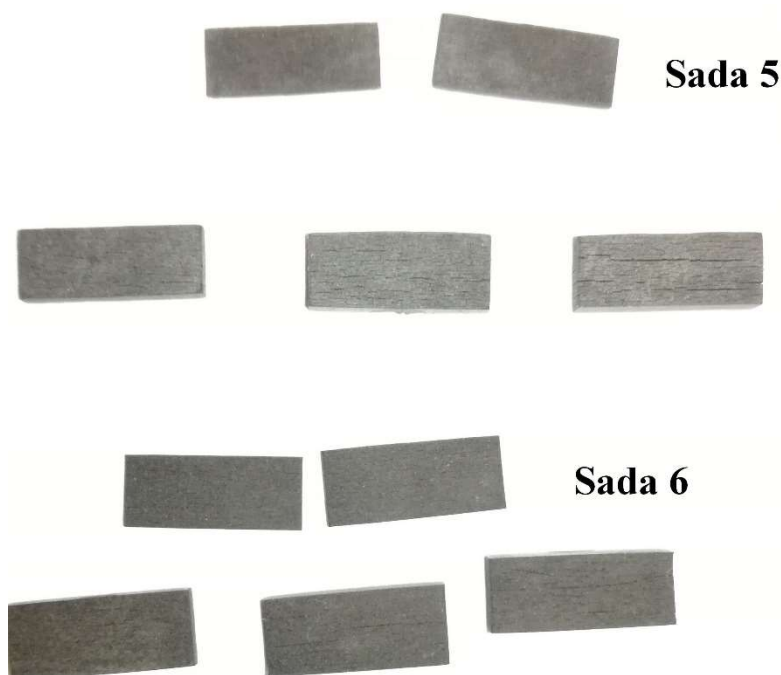


Obrázek 14: Modely s tloušťkou vrstvy 25 μm

V tomto experimentu bylo zkoumáno, zda navýšení vytvrzovací doby jedné vrstvy během tisku bude mít vliv na vypalování. Pro tento pokus byla vytištěna sada 6 s navýšeným časem vytvrzení. Doba vytvrzení byla zvýšena na 60 sekund, což je téměř trojnásobek původní hodnoty. Parametry tisku jsou uvedeny v tabulce 14. Sada 6 byla vytvrzena v UV komoře při teplotě 35 °C po dobu 60 minut. Pro vypalování byla použita celá sada 6. Parametry vypalování lze stejně jako parametry z předchozího experimentu nalézt v tabulce 12. Výsledkem bylo menší popraskání než u předchozích experimentů, a je tedy možné se domnívat, že zvýšený čas vytvrzení během tisku měl vliv na proces vypalování. Vrstvy byly lépe prosvícené, a tudíž méně náchylné k popraskání. Porovnání intenzity trhlin mezi sadou 5 a 6 je zobrazeno na obrázku 15. Pro další experiment byla zvýšena doba vytvrzení, protože tento experiment prokázal, že zvýšení doby vytvrzení má zásadní dopad na tvorbu trhlin během vypalování.

Tabulka 14: Parametry tisku pro sadu 6

	Hodnota
Číslo sady	6
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	80 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	60 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s



Obrázek 15: Porovnání sady 5 a 6

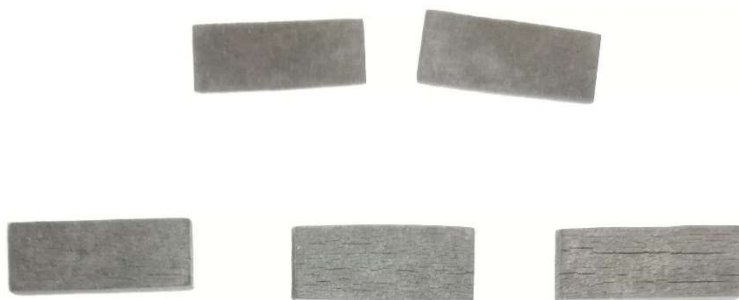
V tomto experimentu bylo zkoumáno, zda další zvýšení času vytvrzení bude mít pozitivní vliv na proces vypalování a zda se povede navýšením času vytvrzení zamezit vzniku trhlin při vypalování. Pro tento pokus byla vytisknuta sada 7 se zvýšeným časem vytvrzení na 100 sekund. Toto je velmi vysoký čas na DLP tiskárnu. Všechny parametry tisku jsou zobrazeny v tabulce 15. Tato sada byla vytvrzena v UV komoře při 35 °C po dobu 120 minut. Předchozí experimenty ukázaly, že vytvrzení jednotlivých vrstev má velký dopad na vznik trhlin. Z toho důvodu byl navýšen čas v UV komoře, aby tento efekt zesílil. Po tisku byla zjištěna poměrně velká míra usazení kovových částic na dně nádoby. Pro proces vypalování byly použity stejné hodnoty, jako jsou uvedeny v tabulce 11. K ohřevu bylo znovu přidáno udržení na teplotě 240 °C po dobu 360 minut, a to z důvodů otestování, zda prodloužení doby vytvrzení zvládne zajistit nepopraskání i u takto dlouhé doby udržení. Ve výsledku nebyl model s tloušťkou stěny 0,5 mm vůbec popraskaný a ostatní vzorky byly popraskané pouze velmi málo. Porovnání sady 5 a 7 je zobrazeno na obrázku 16. Pro tyto dvě sady byly použity stejné parametry vypalování při odlišných časech vytvrzení. Tímto se znovu potvrdilo, že vytvrzovací čas má zásadní vliv na tvorbu trhlin při vypalování. Na modelech o větší tloušťce se stále projevovala přítomnost drobných trhlin. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o provedení termogravimetrické analýzy (TGA), pomocí které bylo možné určit, při jakých teplotách dochází k úbytku materiálu

v modelech. Pomocí analýzy by bylo možné upravit teploty tak, aby byly co neoptimálnější. Vytvoření této analýzy trvalo téměř 2 týdny. Proto se během těchto dvou týdnů pokračovalo ve zkoumání a další úpravě hodnot. Doba tisku 100 sekund se zdála být téměř optimální, proto se na nějakou dobu zachovala tato hodnota a byly prováděny testy na vzorcích pro tyto podmínky.

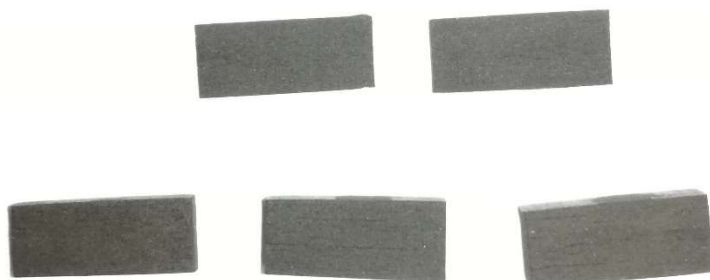
Tabulka 15: Parametry tisku pro sady 7-13

	Hodnota
Číslo sady	7–13
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	120 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	100 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Sada 5



Sada 7



Obrázek 16: Porovnání sady 5 a 7

Ve třetí fázi experimentů se čekalo na výsledky TGA analýzy, od které se očekávalo velká pomoc pro nastavování parametrů při vypalování. V mezičase bylo uskutečněno další testování. V této fázi výzkumu bylo testováno, jaký vliv má UV komora na tvorbu trhlin a jak se chovaly vzorky při přidání vypalování a spékání do celého procesu.

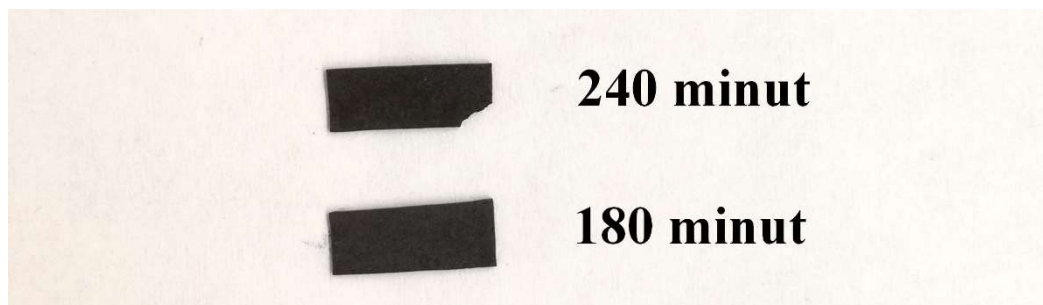
Prvním experimentem této fáze bylo ověření vlivu UV komory na proces vypalování. Zároveň v tomto pokusu byla navržena nová teplota pro ohřev. Pro tento experiment byly použity vzorky ze sady 8 a 9, které byly vytištěny za podmínek uvedených v tabulce 15. Tyto vzorky byly vystaveny vytvrzení v UV komoře. Sada byla rozdělena na dvě poloviny a pro každou tuto část byla použita jiná doba vytvrzení v UV komoře. Podmínky vytvrzení jsou uvedeny v tabulce 16. Vzorky ze sady 9 nebyly podrobeny vytvrzení v UV komoře a zůstaly tak vytvrzené pouze z tisku. Tyto tři skupiny vzorků byly porovnávány na intenzitu popraskání a tím byl zkoumán také pozitivní přínos UV komory na proces vypalování. Pro tento experiment byla změněna teplota ve fázi ohřevu, a to z důvodu vynechání doby udržení. Navýšením teploty se předpokládalo lepší prohrátí testovaných vzorků. Parametry vypalování jsou uvedeny v tabulce 17. Po podrobnějším prozkoumání všech skupin bylo zjištěno, že vzorky o tloušťce 0,5 mm nebyly téměř vůbec popraskané. Porovnání dvou skupin je zobrazeno na obrázku 17. Na obrázku je pouze sada 9, vzorky ze sady 8 byly poškozeny při manipulaci. Vzorky jiných tlouštěk byly silně popraskané, mezi jednotlivými skupinami nebyl žádný zásadní rozdíl v intenzitě popraskání. Porovnání všech skupin je zobrazeno na obrázku 18. Toto zjištění signalizuje, že UV komora nemá žádný vliv na tvorbu prasklin během vypalování. Pro další experimenty byla UV komora vynechána, protože se nepotvrdil její pozitivní efekt na proces vypalování. V dalším pokusu byla teplota ohřevu změněna zpět na 240 °C, protože se prokázal velmi špatný vliv navýšení teploty na proces vypalování.

Tabulka 16: Parametry vytvrzování v UV komoře pro sadu 8

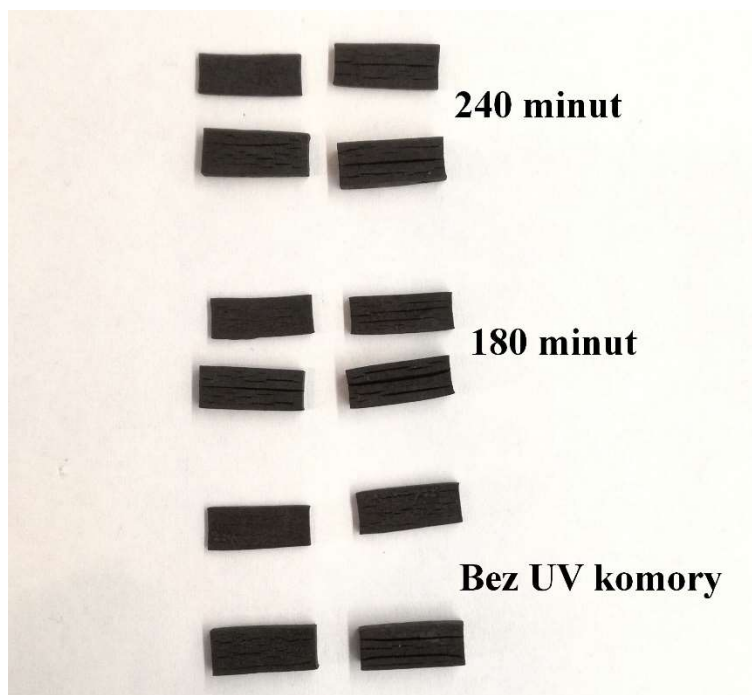
	Čas [min]	Teplota [°C]
První polovina	180	35
Druhá polovina	240	35

Tabulka 17: Podmínky vypalování pro sadu 8 a 9

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	360	0,2	0	Ohřev



Obrázek 17: Porovnání vlivu UV komory pro vzorky s tloušťkou stěny 0,5 mm



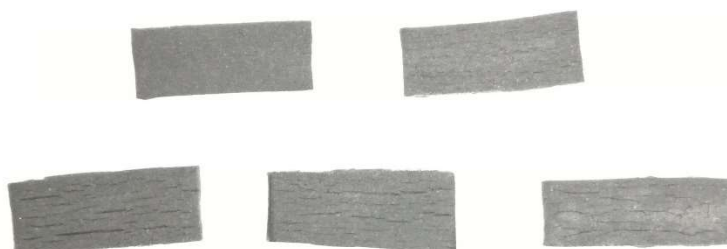
Obrázek 18: Porovnání vlivu UV komory na tvorbu trhlin v modelech

Druhým experimentem této fáze bylo vyzkoušeno, jaký vliv bude mít, pokud bude k ohřevu přidáno také vypalování. Pro experiment byla vytištěna sada vzorků 10. Parametry tisku jsou zobrazeny v tabulce 15. Pro tento pokus byla použita pouze jedna polovina vzorků ze sady 10. Při předchozím pokusu na sadě 7 bylo možné ve fázi ohřevu pozorovat drobné praskliny. Z toho důvodu byla ve fázi ohřevu snížena doba udržení na dané teplotě. Pro fázi vypalování byla použita teplota, kterou doporučuje výrobce. Rampa

byla v této fázi snížena o 50 %. Parametry celého procesu jsou uvedeny v tabulce 18. Výsledkem byla velmi vysoká intenzita popraskání na všech modelech, kromě vzorku s tloušťkou stěny 0,5 mm. Míru popraskání je možné pozorovat na obrázku 19. Výsledek tohoto experimentu nebyl uspokojivý, z toho důvodu bylo pro další experiment rozhodnuto o snížení rampy ve fázi vypalování.

Tabulka 18: Podmínky vypalování pro první polovinu sady 10

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,2	120	Ohřev
240	650	0,4	0	Vypalování



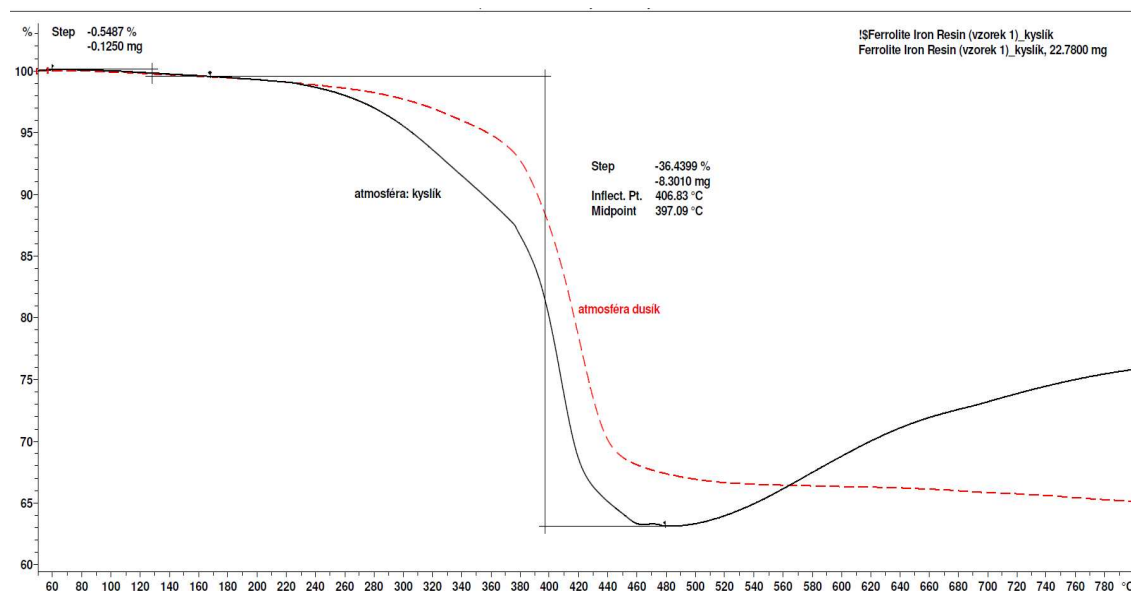
Obrázek 19: Sada 10 po vypálení

Třetí experiment v této fázi měl za úkol zjistit, zda snížení rampy ve fázi vypalování bude mít vliv na tvorbu trhlin. Pro tento experiment byla použita druhá polovina vzorků ze sady 10. Parametry, které byly nastaveny pro pec, jsou zobrazeny v tabulce 19. Výsledkem tohoto experimentu byla stejná intenzita popraskání jako v experimentu předchozím. Závěrem je možné říci, že snížení rampy nemělo téměř žádný vliv na tvorbu trhlin a tento problém způsobuje jiný parametr.

Tabulka 19: Podmínky vypalování pro druhou polovinu sady 10

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	240	0,2	120	Ohřev
240	650	0,2	0	Vypalování

Ve čtvrté fázi byly známy výsledky z TGA analýzy a mohla tedy začít úprava parametrů podle zjištěných výsledků. TGA analýza je zobrazena na obrázku 20. Součástí této analýzy bylo porovnání dvou ochranných atmosfér. První atmosférou je dusík a druhou kyslík. Jak je patrné z obrázku 19, když byl ochrannou atmosférou kyslík, byl okolo teploty 480 °C pozorován nárůst hmoty. Tento jev byl velmi zvláštní, protože se očekávalo, že hmota bude s narůstající teplotou pouze ubývat. U analýzy, ve které byla ochranná atmosféra dusík, tento jev nenastal. Porovnáním těchto dvou ochranných atmosfér bylo zjištěno, že přítomnost kyslíku ve vypalovací peci způsobila při nárůstu teploty oxidaci kovových částic. Na základě této analýzy bylo navrženo upravení parametrů pro vypalování.



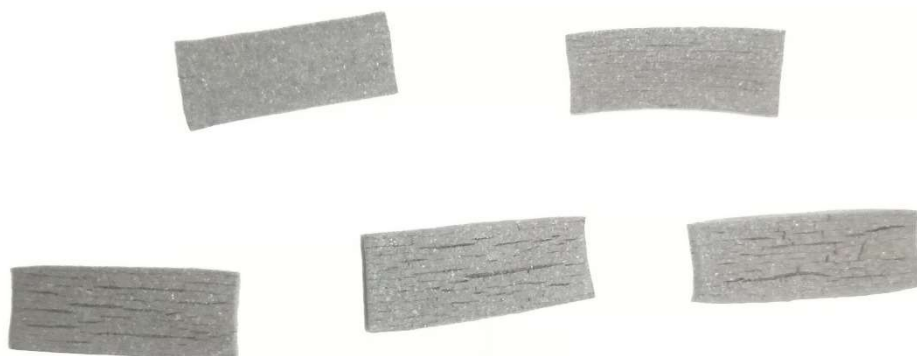
Obrázek 20: TGA analýza. Porovnání ochranné atmosféry

První experimentem v této fázi bylo otestování nově navržených parametrů. Tyto parametry byly testovány na jedné polovině vzorků ze sady 11, která byla vytisknuta za podmínek uvedených v tabulce 15. V nově navržených parametrech vypalování byla zásadním údajem teplota v jednotlivých fázích. V první fázi byla snížena teplota ohřevu na 120 °C. Tato teplota byla zvolena, protože podle TGA analýzy přibližně při této teplotě dochází k vypalování polymeru. V druhé fázi byla rovněž snížena teplota, a to na 500 °C. Při této teplotě se zastavuje proces vypalování. Z procesu vypalování byla pro tuto chvíli vynechána fáze spékání. Parametry celého procesu je možné vidět v tabulce 20. Výsledkem bylo velmi silné popraskání vzorků. To je možné pozorovat na obrázku 21. Po vyjmutí vzorků z pece byl k vzorkům přiložen magnet, aby bylo zjištěno, zda jsou

magnetické. Vzorčky na magnet nereagovaly. To potvrdilo hypotézu, že při vypalování vzorků za přítomnosti kyslíků dochází k oxidaci kovových částí. Tato oxidace zabraňuje magnetismu. V této době probíhala komunikace se zástupcem firmy Tethon3D. Z rozhovoru s ním bylo zjištěno, že materiál je možné vytvrzovat během tisku klidně i 200–300 sekund. V dalším experimentu bylo provedeno porovnání intervalu, který byl doposud používán, a intervalu 200 sekund, který byl doporučen od zástupce firmy. Cílem experimentu bylo zjistit, jaký vliv bude mít tento čas na tvorbu trhlin.

Tabulka 20: Podmínky vypalování pro první polovinu sady 11

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	160	0,2	120	Ohřev
120	500	0,1	60	Vypalování



Obrázek 21: Sada 11 po vypálení

V druhém experimentu bylo potřeba zjistit, jaký vliv má vytvrzovací čas na tvorbu trhlin při nově vytvořených vypalovacích podmínkách. Pro tento pokus byla použita druhá polovina vzorků ze sady 11 a byla vytištěna nová sada 14 za upravených podmínek uvedených v tabulce 21. V sadě 14 byly vytištěny 4 skupiny modelů o tloušťce 0,5 mm a 1 mm. Bylo rozhodnuto, že tyto rozměry vrstev jsou nejdůležitější a je potřeba je optimalizovat přednostně, než budou optimalizovány širší modely. V tomto experimentu byl testován celý proces vypalování i se všemi jeho fázemi. Pro poslední fázi spékání byla zachována teplota 1100 °C. Parametry vypalování jsou uvedeny v tabulce 22. Ve výsledku byly

vzorky s vyšším vytvrzovacím časem méně popraskané. Vzorek s tloušťkou stěny 0,5 mm nebyl popraskaný téměř vůbec. Díky tomu bylo možné říci, že vyšší vytvrzovací čas během tisku má zásadní vliv na vypalování a ovlivňuje intenzitu tvorby trhlin. Vzorky, které měly vytvrzovací čas 200 sekund, byly stále nemagnetické. Z toho důvodu bylo pro další experiment navrženo použití vakuové pece, aby bylo možné ověřit vliv kyslíku na proces vypalování.

Tabulka 21: Parametry tisku pro sady 14-15

	Hodnota
Číslo sady	14
Tloušťka vrstvy	50 μm
Doba vytvrzování první vrstvy	220 s
Doba vytvrzení zbylých vrstev	200 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zdvihu	5 s

Tabulka 22: Podmínky vypalování pro 2/2 sady 11 a 1/4 vzorků ze sady 14

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	160	0,2	120	Ohřev
120	500	0,1	60	Vypalování
500	1100	1,1	0	Spékání
1100	20	-	-	Chladnutí

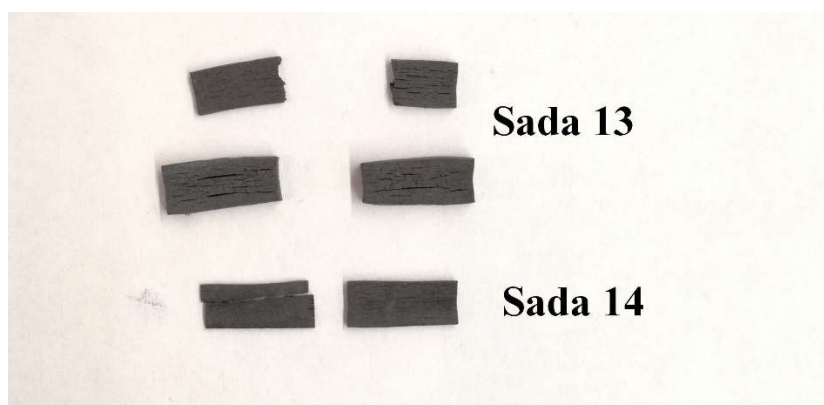
Pro třetí experiment bylo navrženo, že bude provedeno porovnání výsledků procesu vypalování ve vakuové a klasické peci. Tím mělo být ověřeno, jaký vliv má přítomnost kyslíku na vypalování. Dále během tohoto testu probíhalo porovnání s vytvrzovacím časem. Do každé pece byly umístěny 2 skupiny vzorků. První skupina byla s vytvrzovacím časem 100 sekund a druhá s vytvrzovacím časem 200 sekund. Pro tento experiment byla vytištěna sada 13 za podmínek uvedených v tabulce 15. Dále byla použita polovina vzorků ze sady 14. Pro normální i vakuovou pec byly nastaveny stejné parametry. Tyto parametry byly téměř totožné s těmi, které byly použity při předchozím pokusu. Použité parametry jsou zobrazeny v tabulce 23. Z hodnot byl odstraněn čas udržení, který se při

předchozích experimentech jevil jako problémový. Do normální pece byla vložena polovina vzorků ze sady 13 a čtvrtina vzorků ze sady 14. Do vakuové pece byla vložena druhá polovina vzorků ze sady 13 a čtvrtina vzorků ze sady 14.

Tabulka 23: Podmínky vypalování pro 1/2 sady 13 a 1/4 vzorků ze sady 14

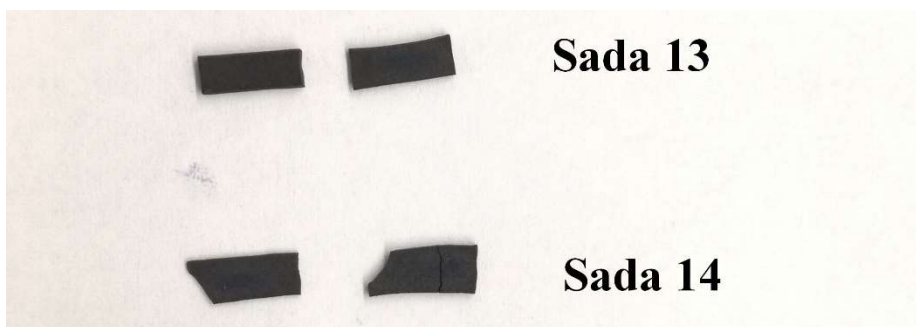
Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	160	0,2	0	Ohřev
120	500	0,1	0	Vypalování
500	1100	1,1	0	Spékání
1100	20	-	-	Chladnutí

Po vytažení vzorků z klasické pece bylo možné na nich pozorovat značné trhliny. Intenzita trhlin byla výrazně nižší než u sady 14, tedy u vzorků, které měly vyšší vytvrzovací čas. Porovnání vzorků je možné vidět na obrázku 22. To znovu potvrdilo, že vytvrzovací čas jedné vrstvy je klíčový parametr. Prasklina na vzorku s tloušťkou vrstvy 0,5 mm byla způsobena manipulací.



Obrázek 22: Vzorky vytažené z pece, kde byl přítomen kyslík

Vzorky, které byly vytaženy z vakuové pece, byly bez trhlin. Na obrázku 23 je možné vidět porovnání sady 13 a 14. Je zde možné pozorovat, že vzorky ze sady 14 jsou polámané. To bylo způsobeno manipulací. Je zde také možné vidět, že vzorky ze sady 14 mají lepší geometrii, než vzorky ze sady 13. Poté, co byly vzorky vytaženy z pece, byly testovány na magnetismus. Tento test byl úspěšný, modely byly magnetické.



Obrázek 23: Vzorky vytažené z pece, kde nebyl přítomen kyslík

Další součástí tohoto experimentu bylo porovnání vzorků vytažených z klasické a vakuové pece. Toto porovnání je možné vidět na obrázku 24. Při porovnání těchto vzorků bylo možné pozorovat spoustu odlišností. První viditelným aspektem byla barva. Modely vytažené z klasické pece, kde byl přítomen kyslík, jsou světlé. To značí přítomnost oxidu na povrchu. Vzorky, kde nebyl při vypalování přítomen kyslík, byly tmavé, bez známky přítomnosti oxidu. Druhým zřejmým rozdílem byla přítomnost trhlin. Na modelech, které byly vypalovány za přítomnosti kyslíku, bylo možné pozorovat velkou intenzitu popraskání. Na modelech, které byly vypalovány bez přítomnosti kyslíku, nebyly objeveny žádné trhliny. Třetím a posledním rozdílem mezi těmito modely je geometrie a smrštění. Vzorky, které byly vypalovány v peci za přítomnosti kyslíku, nejsou tolik prohnuté a nemají tak velké smrštění jako vzorky, které byly vypalovány ve vakuové peci bez přítomnosti kyslíku. Tímto experimentem bylo zjištěno, že vzorky vypalované bez přítomnosti kyslíku neobsahovaly trhliny, byly magnetické a měly horší geometrii a větší smrštění než vzorky, které byly vypalovány za přítomnosti kyslíku. Pokus také odhalil, že vzorky s delší dobou vytvrzení měly po vypálení lepší vlastnosti. Další experiment probíhal pouze ve vakuové peci. Tento experiment měl za úkol vylepšit časové podmínky vypalování.



Obrázek 24: Porovnání vzorků vypálených s přítomností a bez přítomnosti kyslíku

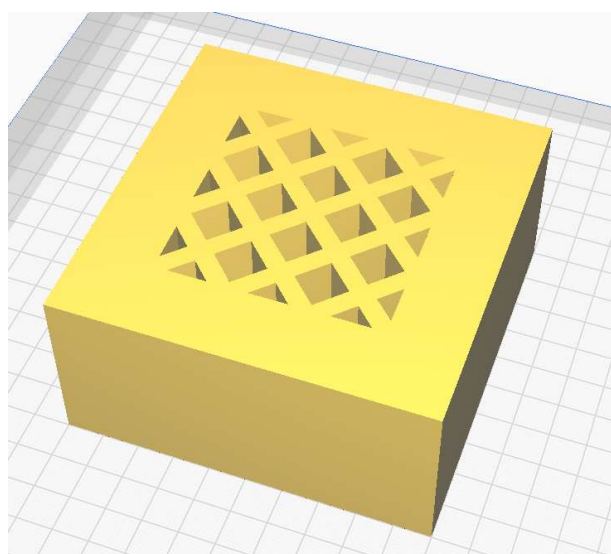
Čtvrtý experiment byl navržen tak, aby zajistil úsporu času při vypalování, a tedy i optimalizaci tohoto procesu. Pro tento pokus byla použita poslední čtvrtina vzorků ze sady 14. Pro experiment bylo navrženo zvýšení rampy ve fázi ohřevu a vypalování. Navýšení rampy je zobrazeno v tabulce 24. Výsledkem byly opět nepopraskané modely. Tyto podmínky bylo možné považovat za optimální do tloušťky stěny 2,5 mm.

Tabulka 24: Optimální podmínky sintrace

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Rampa [°C/min]	Doba udržení [min]	Fáze
20	160	0,8	-	Ohřev
160	500	0,4	-	Vypalování
500	1100	1,1		Spékání
1100	20	-	-	Ochlazení

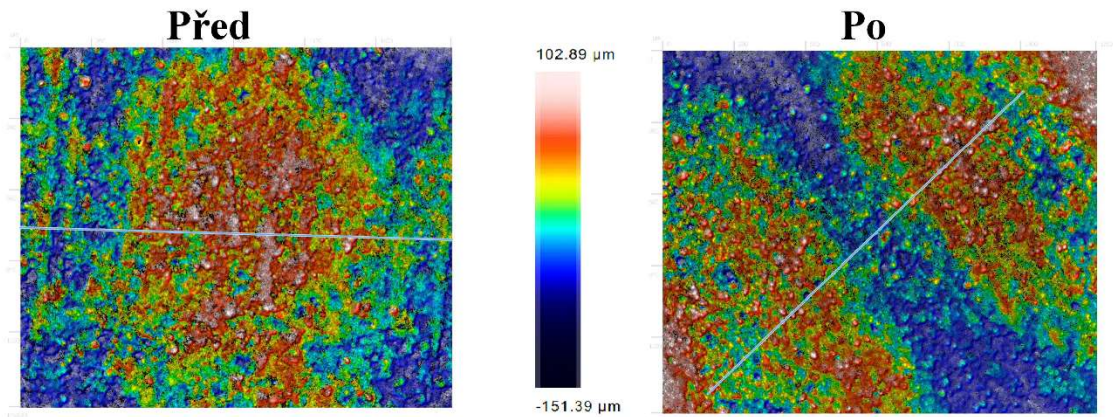
4.7 Testy tvrdosti, drsnosti a pórovitosti

Poslední úkolem v praktické části práce bylo otestovat vytištěné vzorky. Pro vytištěné vzorky byly navrženy tři testy: test tvrdosti, drsnosti a pórovitosti. Tyto údaje měly sloužit při návrhu použití. Testy byly prováděny na nově navrženém modelu. Tento typ modelu je zobrazen na obrázku 25. Test tvrdosti materiálu nemohl být proveden, protože vzorky vytištěné z tohoto typu materiálu byly příliš měkké pro testování.

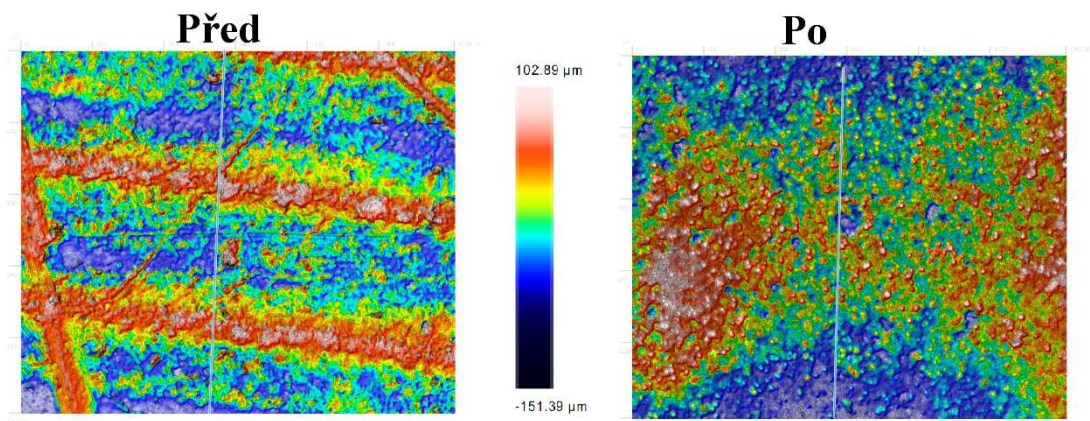


Obrázek 25: Model použitý pro testy tvrdosti, drsnosti a pórovitosti

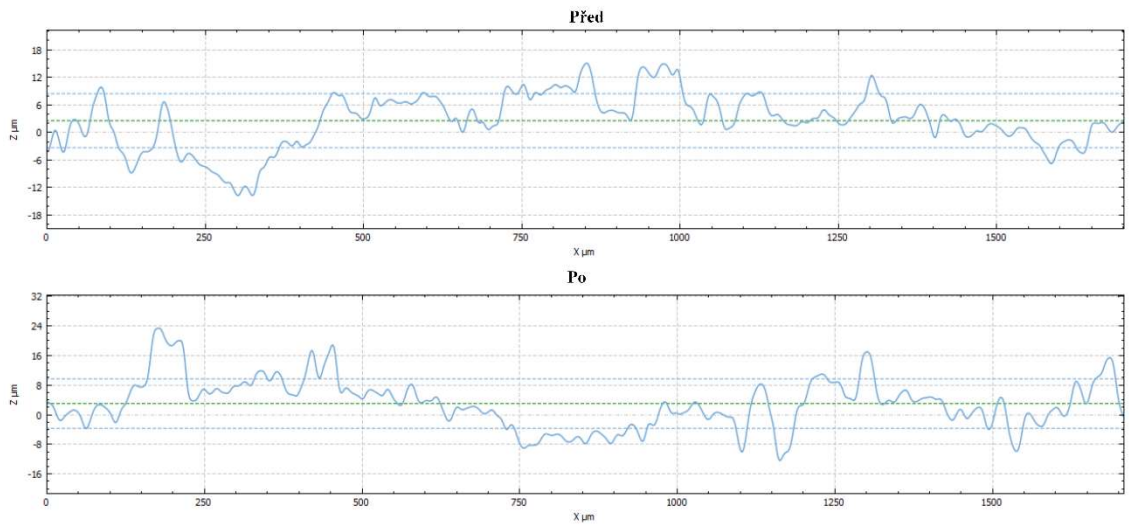
Test drsnosti byl prováděn na 2 stejných modelech, které byly vytištěny při optimálních podmínkách. Polovina z těchto modelů byla vypálena za optimálních podmínek. Test drsnosti povrchu probíhal na čele a na boku modelu. Při testech byl porovnáván vliv vypalování na výslednou kvalitu povrchu.



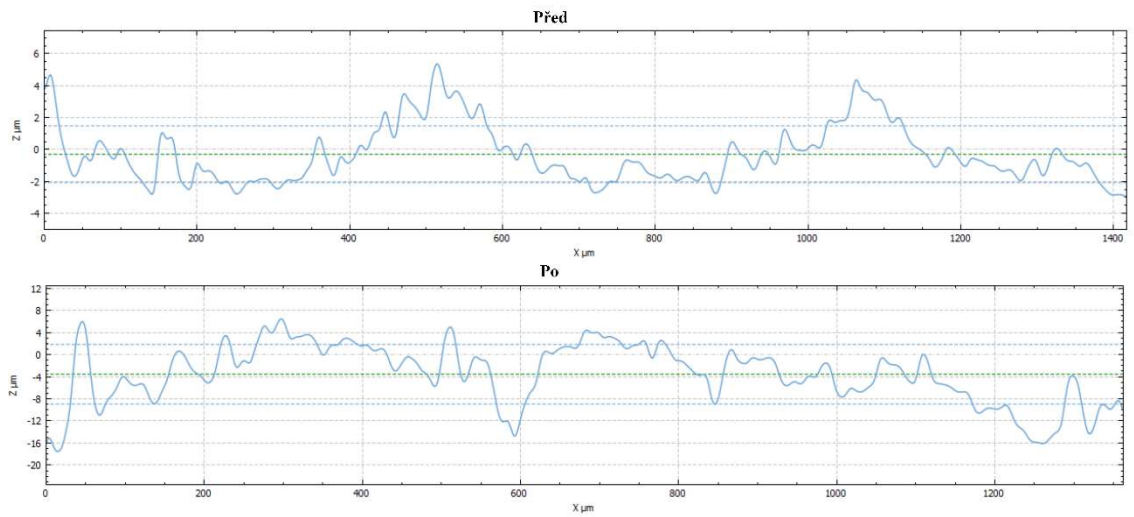
Obrázek 26: Porovnání drsnosti povrchu na boku modelu před a po vypálení



Obrázek 27: Porovnání drsnosti povrchu na čele modelu před a po vypálení



Obrázek 28: Grafické porovnání drsnosti povrchu na boku modelu

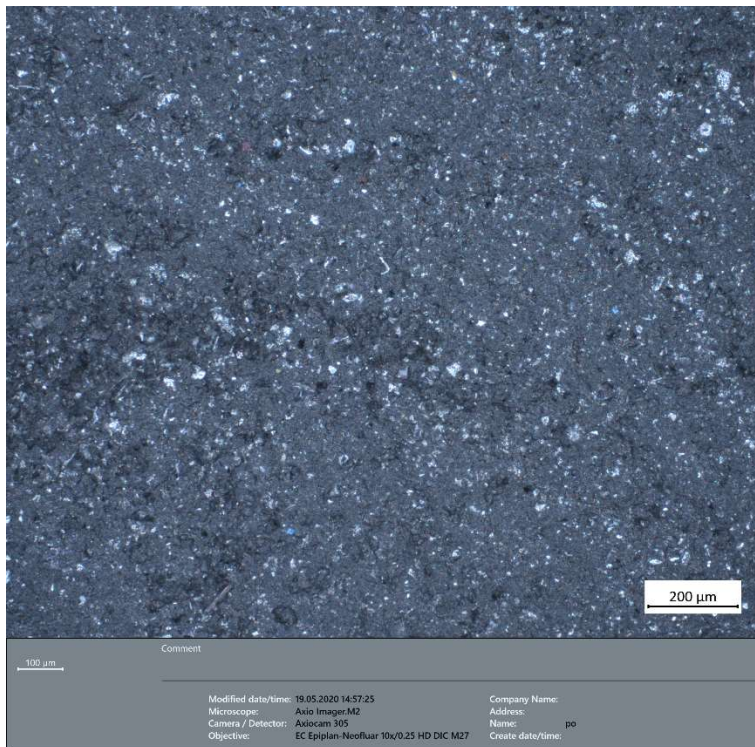


Obrázek 29: Grafické porovnání drsnosti povrchu na čele modelu

Pro testování pórovitosti byly použity dva vzorky. První vzorek byl nevypálený a druhý byl vypálený. Opět byla porovnávána pórovitost vypáleného a nevypáleného modelu.



Obrázek 30: Test pórovitosti na vzorku před vypálením



Obrázek 31: Test pórovitosti na vzorku po vypálení

Při testu tvrdosti bylo zjištěno, že materiál je příliš měkký před vypalováním a příliš křehký po vypalování. To bylo pozorováno po celou dobu práce s modely. Křehkost vzorků je možné pozorovat na některých obrázcích, kde jsou některé modely vlivem manipulace rozlomené. Z výsledku testu drsnosti je možné vidět, že vzorky po vypálení mají větší drsnost povrchu, než vzorky před vypálením. Tento jev je dobře viditelný především na grafickém zobrazení na obrázcích 28 a 29, kde zelená čára udává střední hodnotu drsnosti. Dalším sledovaným jevem byla maximální odchylka dosažená při testu. Modely, které byly vypálené, mají maximální odchylku větší než modely nevypálené. To je pravděpodobně možné odůvodnit tím, že vzorky po vypálení obsahují čistý kov, který má hrubější povrch než polymer. Při testu pórovitosti bylo odhaleno, že model po vypálení obsahuje více pórovitých míst než vzorky před vypálením. Je to způsobeno tím, že póry vznikají při vypalování vytvrzeného polymeru a během sintrace nedochází k úplnému spečení částic příměsi dohromady.

Závěr

Výsledky testování ukázaly, že materiál s příměsí kovu je možné poměrně úspěšně tisknout i vypalovat. Pro dokonalý tisk by bylo potřeba k tiskárně přidat systém, který by zajišťoval průběžné míchání materiálu během tisku. Konstrukční návrh míchání je nad rámec této práce. Kromě drobné nehomogenity modelů byl materiál tisknut úspěšně a bez větších potíží. Materiál je vhodný pro malé tenkostěnné modely. Výška modelu 5 mm byla tisknuta přibližně po dobu 8 hodin. To je na takto malý objekt velmi dlouhá doba. Podmínky tiskárny, kterými byly dosaženy nejlepší výsledky, jsou znázorněny v tabulce 21.

Po optimalizaci podmínek tisku bylo zjištěno, že izopropylalkohol materiálu neškodí. Je ovšem potřeba s ním pracovat opatrně a vzorky nenechávat v nádobě s izopropylalkoholem příliš dlouho. Odhadovaná vhodná doba pro ponechání vzorku v nádobě je 5–10 minut. Poté by mohlo dojít k jejich degradaci a poškození. Po vytažení vzorků z nádoby je potřeba je dobře osušit ubrouskem, případně stlačeným vzduchem. Takto omyté vzorky by při správných tisknoucích podmínkách na sobě neměly zanechat známky trhlin.

Potřeba UV komory pro vytvrzení vzorků po tisku byla vyvrácena také dosažením optimálních podmínek tisku. Optimálně vytisknuté vzorky na sobě po umytí nezanechaly trhliny. To je způsobeno dostatečným vytvrzením fotopolymeru v jednotlivých vrstvách. Při hledání optimálních podmínek vypalování bylo zkoumáno, zda má UV komora vliv na tento proces. Jak ukázal jeden z experimentů, další vytvrzování vzorků v UV komoře nemá žádný vliv na proces vypalování. To je možné odůvodnit tím, že pokud je materiál dobře vytvrzen během tisku, nemůže být poté více vytvrzen v UV komoře, protože již dosáhl svého maximálního možného vytvrzení.

Optimalizovat parametry vypalování byl nejzdlouhavější a nejtěžší úkol této práce. Podmínky vypalování byly několikrát upraveny a změněny. Při prvních pokusech nebylo dosaženo dobrých výsledků a modely po vytažení z pece byly často hodně popraskané. Od začátku bylo pozorováno, že proces vypalování je velmi citlivý na tloušťku stěny. Vzorky, které měly tloušťku stěny pouhých 0,5 mm, bylo daleko lehčí vypalovat i při hůře nastavených parametrech než vzorky, které měly tloušťku stěny 2,5 mm. Důležitým prvkem v celé práci bylo provedení TGA analýzy. Díky tomu bylo zjištěno, při jakých

teplotách se začíná odpařovat polymer, a také to, že za přítomnosti kyslíku dochází na kovových částicích k oxidaci. Ta po vypálení zabraňuje tomu, aby byl materiál magnetický. V návaznosti na tuto analýzu byly navrženy optimální podmínky vypalování zobrazené v tabulce 24. Nejproblematictější prvkem během celého tepelného zpracování byla přítomnost kyslíku. Ve chvíli, kdy byl kyslík z procesu odstraněn, modely přestaly prskat a vypalování bylo úspěšné. V této práci byla použita pec, ve které bylo vytvořeno vakuum. To mohlo zapříčinit pokroucení vzorků. Z toho důvodu by bylo pravděpodobně nejlepší, kdyby celý proces vypalování probíhal v ochranné atmosféře tvořené z dusíku. To v této práci nebylo z kapacitních důvodů možné otestovat.

Využití testovaného materiálu je v tuto chvíli velmi omezené. To je způsobeno skutečností, že materiál je zatím pouze experimentální a že je nutný jeho další vývoj. Výbornou vlastností materiálu je jeho magnetická přitažlivost. To je možné využít v různých odvětvích, jako jsou strojní průmysl, letectví či automobilový průmysl. Použití materiálu je omezeno jeho křehkostí. Pro rozšíření aplikace materiálu by byla potřeba aplikovat úpravu, díky které by byla zajištěna jeho větší tvrdost. Důležitým faktorem pro aplikaci je také cena. Ta v současnosti není příliš vysoká, láhev o velikosti 500 ml stojí 200 \$. Do ceny výsledného produktu je třeba započítat také dobu tisku a dobu vypalování. Tato doba dohromady činí kolem 24 hodin. To je pro výrobu jednoho produktu velmi mnoho času. S rostoucím časem výroby narůstá také výsledná cena produktu.

Literatura

- [1] WOHLERS, Terry T., Tim CAFFREY a Ian CAMPBELL. *Wohlers report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, c2016. ISBN 978-0-9913332-2-6.
- [2] GIBSON, Ian. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. ISBN 978-1441911193.
- [3] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- [4] Asnafi, N., Shams, T., Aspenberg, D., & Öberg, C. (2019). 3D Metal Printing from an Industrial Perspective---Product Design, Production, and Business Models. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(3), 91–100. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-0827-z>
- [5] Jamróz, W., Szafraniec, J., Kurek, M., & Jachowicz, R. (2018). 3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications -- Recent Achievements and Challenges. *Pharmaceutical Research*, 35(9), 176. <https://doi.org/10.1007/s11095-018-2454-x>
- [6] Owen, D., Hickey, J., Cusson, A., Ayeni, O. I., Rhoades, J., Deng, Y., ... Zhang, J. (2018). 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1), 3–9. <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0037-3>
- [7] Nachal, N., Moses, J. A., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D Printing in Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 11(3), 123–141. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09199-8>
- [8] Borrello, J., & Backeris, P. (2017). Rapid Prototyping Technologies. In K. M. Farooqi (Ed.), *Rapid Prototyping in Cardiac Disease: 3D Printing the Heart* (pp. 41–49). https://doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4_5

- [9] Rahman, Z., Barakh Ali, S. F., Ozkan, T., Charoo, N. A., Reddy, I. K., & Khan, M. A. (2018). Additive Manufacturing with 3D Printing: Progress from Bench to Bedside. *The AAPS Journal*, 20(6), 101. <https://doi.org/10.1208/s12248-018-0225-6>
- [10] Ferrolite® Iron Resin – 500ml || Tethon 3D. *Tethon 3D* [online]. Copyright ©2019 Tethon3D. Website design and development by [cit. 5.03.2020]. Dostupné z: <https://tethon3d.com/product/ferrolite-iron-resin-500ml/>
- [11] Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2019). 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 245–267. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00077-7>
- [12] *Learn and Discover Best 3D Printer Practices and Prices* [online]. [cit. 15.04.2020] Dostupné z: <https://pick3dprinter.com/3d-printer-types/#3--fused-deposition-modeling-fdm>
- [13] SLS 3D printing services | makexyz.com. 2020. SLS 3D printing services | makexyz.com. [online] [cit. 21.04.2020] Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/SLS-3D-printing-services>.
- [14] Shah, P., & Chong, B. S. (2018). 3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. *Clinical Oral Investigations*, 22(2), 641–654. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2338-9>
- [15] Dehghanghadikolaei, A., Namdari, N., & Mohammadian, B. (2018). Available online *www.jsaer.com Journal of Scientific and Engineering Research*, 2018, 5 (8): 123-131 *Additive Manufacturing Methods : A Brief Overview*. (September).
- [16] Suresh, G., Narayana, K. L., & Mallik, M. K. (2017). A Review on Development of Medical Implants by Rapid Prototyping Technology. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 117(21), 257–276. Retrieved from <http://www.ijpam.eu>
- [17] A Complete Guide about Support Structures in SLA/DLP/LCD 3D Printing. *CHITUBOX SLA/DLP/LCD 3D Slicer Software* [online]. Copyright © 2019 CHITUBOX. All

rights reserved. [cit. 3.5.2020]. Dostupné z: https://www.chitubox.com/article/howto_17839_4_41.html

[18] Yi, R., Wu, C., Liu, Y. J., He, Y., & Wang, C. C. L. (2018). Delta DLP 3-D Printing of Large Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(3), 1193–1204. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2751664>

[19] *Polymer Innovation Blog - Practical tips and advice for polymer, innovation and product development professionals* [online]. Dostupné z: <https://polymerinnovationblog.com/polymers-electronic-packaging-types-polymers-used/>

[20] Tethon 3D Announces New UV Curable Metal Resin for SLA and DLP 3D Printers. *Additive Manufacturing Today* [online]. Copyright © 2019 Additive Manufacturing Today. All rights reserved. [cit. 12.05.2020]. Dostupné z: <https://additivemanufacturing-today.com/tethon-3d-announces-new-uv-curable-metal-resin-for-sla-and-dlp-3d-printers>

[21] Nm, D. (2018). *International Journal of Nanomaterials , Sintering process and catalysis*. 4, 1–3.

[22] Wang, J. C., Dommati, H., & Hsieh, S. J. (2019). Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), 2627–2647. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03669-3>