



# 3D tisk foto-polymerních keramických materiálů s využitím technologie SLA

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T049– Výrobní systémy a procesy

*Autor práce:* **Bc. Veronika Truxová**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Šafka, Ph.D.





# 3D printing of a photopolymer ceramic materials by SLA technology

## Master thesis

*Study programme:* N2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2301T049– Manufacturing Systems and Processes

*Author:* **Bc. Veronika Truxová**  
*Supervisor:* Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Veronika Truxová**  
Osobní číslo: **S17000515**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**  
Název tématu: **3D tisk foto-polymerních keramických materiálů s využitím technologie SLA**  
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je otestovat vybrané foto-polymerní materiály s příměsí keramiky na technologii SLA (Stereolitografie), a to včetně následné sintrace.

1. Rešerše a popis aktuálního stavu problematiky.
2. Návrh a příprava 3D dat testovacích vzorků.
3. Realizace návrhu technologií 3D tisku (SLA).
4. Realizace sintrace dle zvolených parametrů.
5. Výbrusy a změření porozity a tvrdosti daných vzorků.
6. Diskuse výsledků a závěr.

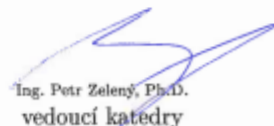
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 65 stran textu**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. ISBN: 9781493921126.  
[2] LIU, D., V.V. VALENCIA a A.B. BADIRU. Additive manufacturing handbook. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN: 9781482264081.  
[3] BRYDSON, J. A. Plastics materials. Boston: Butterworths, 1989. ISBN: 0408007214.  
[4] Příslušné mezinárodní normy

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů a automatizace  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Seidl, Ph.D.**  
Ostatní konzultanti: **Ing. Lukáš Voleský**  
Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2018**  
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2018

## **Prohlášení**

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala zejména panu Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, jeho cenné rady a zkušenosti v oblasti 3D tisku. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Martinu Seidlovi, Ph.D. a panu Ing. Lukáši Voleskému, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě této práce. V neposlední řadě děkuji také rodině za jejich podporu během studia.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se věnuje zpracování několika foto-polymerních materiálů s příměsí keramiky na technologiích SLA a DLP. V první části této práce jsou popsány technologie umožňující 3D tisk keramických materiálů, ale i vlastní použitelné materiály pro 3D tisk. V další praktické části je představen směr vlastních testů a jejich zhotovení. Jsou zde popsány a zobrazeny testovací modely, technologické parametry 3D tisku, ale i jednotlivé kroky post procesů. U nich byly detailně zanalyzovány postupy k debindingu a vlastní sintraci materiálů. Tyto technologické parametry jednotlivých operací byly optimalizovány k dosažení požadovaných výsledků vzorků. V závěru práce byly získané vzorky změřeny a komplexně zhodnoceny pod elektronovým a optickým mikroskopem. Byly získány hodnoty chemických prvků, velikosti částic, stupeň sintrace, které jsou detailně popsány v závěru této diplomové práce.

## **Klíčová slova:**

3D tisk, SL, SLA, DLP, keramika

## **Abstract**

This thesis deals with processing of several photopolymer materials with admixture of ceramics on SLA and DLP technologies. In the first part of this thesis there are described technologies enabling 3D printing of ceramic materials, as well as custom usable materials for 3D printing. In the next practical part is introduced the direction of tests and their production. There are described test models, technological parameters of 3D printing as well as individual steps of post processes. The debinding and sintering processes of the materials were analyzed in detail. These technological parameters of the individual operations were optimized to achieve the desired sample results. At the end of the work the obtained samples were measured and comprehensively evaluated under electron and optical microscope. The values of chemical elements, particle sizes, degree of sintering were obtained, which are described in detail at the end of this thesis.

## **Key words:**

3D printing, SL, SLA, DLP, ceramics

## Obsah

1	3D tisk .....	15
1.1	Historie.....	15
1.2	Průběh tisku.....	16
1.3	Využití.....	17
2	3D tisk keramiky .....	18
2.1	Průběh 3D tisku keramiky.....	19
2.2	Technologie založené na suspenzním vstupním materiálu .....	20
2.3	Stereolitografie (SL).....	21
2.4	SLA tiskárna.....	23
2.5	Digital light processing (DLP) .....	25
2.6	DLP tiskárna.....	27
3	Materiály.....	29
3.1	Formlabs – Ceramic Resin .....	30
3.2	Tethon3D - Vitrolite.....	34
3.3	Tethon3D - Porcelite .....	37
3.4	Souhrn chemického složení materiálů .....	40
4	3D data.....	43
4.1	Postup přípravy dat pro tisk .....	45
5	Proces vypalování.....	47
5.1	Formlabs – Ceramic Resin .....	49
5.2	Tethon3D – Vitrolite .....	51
5.3	Tethon3D – Porcelite .....	54
6	Měření.....	60
6.1	TGA analýza .....	60
6.2	Mikroskop .....	65
6.3	Metalografické výbrusy .....	66
7	Výsledky praktické části.....	69
8	Literatura .....	94



## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Proces vzniku 3D keramické části při užití polymerních materiálů pro technologie SLA a DLP. ....	19
Obr. 2.2: Technologie SLA a DLP [10]. ....	20
Obr. 2.3: Schématický diagram SL technologie [14]. ....	21
Obr. 2.4: SLA tiskárna Form 2 od společnosti Formlabs [21]. ....	24
Obr. 2.5: Schématický diagram DLP technologie [33]. ....	26
Obr. 2.6: DLP tiskárna sestavená na Technické univerzitě v Liberci. ....	27
Obr. 3.1: Přehled základních keramických materiálů [40]. ....	29
Obr. 3.2: Grafické znázornění polymerace [40]. ....	29
Obr. 3.3: Snímek materiálu Ceramic Resin před vypálením. ....	32
Obr. 3.4: Snímek materiálu Ceramic Resin po vypálení. ....	33
Obr. 3.5: Snímek materiálu Vitrolite před vypálením. ....	35
Obr. 3.6: Snímek materiálu Vitrolite po vypálení. ....	36
Obr. 3.7: Snímek materiálu Porcelite před vypálením. ....	38
Obr. 3.8: Snímek materiálu Porcelite po vypálení. ....	39
Obr. 3.9: Snímek materiálu Porcelite z elektronového mikroskopu. ....	41
Obr. 3.10: Velikost zrn jednotlivých chemických prvků pro materiál Porcelite před vypálením. ....	41
Obr. 4.1: Přehled použitých modelů. Zleva C1-C18, Model 1 – Model 4. ....	44
Obr. 4.2: Připravený model C2 z CAD softwaru. ....	45
Obr. 4.3: Připravené modely C1-C5 pro tisk na DLP tiskárně. ....	45
Obr. 4.4: Jednotlivé vrstvy modelů B1-B4. Zobrazeno po dvaceti vrstvách. ....	46
Obr. 5.1: Proces sintrace [43]. ....	48
Obr. 6.1: Digitální mikroskop Leica DVM6. ....	65
Obr. 6.2: Vlevo je materiál PolyFast a vpravo lis od firmy Struers. ....	66
Obr. 6.3: Zalisované vzorky do černé bakelitové pryskyřice s uhlíkovým plnivem (vlevo). Snímek z optického mikroskopu vzorku B5 (vpravo). ....	67
Obr. 6.4: UV pec s připravenými vzorky před vytvrzením (vlevo). Průběh vytvrzování vzorků (vpravo). ....	67
Obr. 6.5: Vytvrzené vzorky v průhledné pryskyřici (vlevo). Snímek z optického mikroskopu vzorku B4. ....	68

Obr. 6.6: Metalografická bruska Tegramin-25 od společnosti Struers.....	68
Obr. 7.1: Vytisknuté modely po sintraci A6 (vlevo) a A8 (vpravo). .....	69
Obr. 7.2: Měření úhlů na modelu A8 po sintraci. ....	70
Obr. 7.3: Vzorky materiálu Vitrolite z SLA tiskárny. ....	71
Obr. 7.4: Model B1 (vlevo) a B2 (vpravo) po tisku na DLP tiskárně. ....	72
Obr. 7.5: Snímky z mikroskopu modelů po výbrusech. Model B8 (vlevo) a B2 (vpravo). .....	75
Obr. 7.6: Měření hloubky (vlevo) a vzdálenosti děr (vpravo). ....	75
Obr. 7.7: Model C8 (vlevo) a C10 (vpravo) po procesu vypálení. ....	76
Obr. 7.8: Model C11 (vlevo) a C14 (vpravo) po procesu vypálení. ....	78
Obr. 7.9: Model C15 (vlevo) a C18 (vpravo) po procesu vypálení. ....	79
Obr. 7.10: Model A11 (vlevo) a A14 (vpravo) po procesu vypálení.....	80
Obr. 7.11: Model A15 (vlevo) a A18 (vpravo) po procesu vypálení.....	81
Obr. 7.12: Příprava vzorků C1 na výbrusy po sintraci na 1400°C - zalité pryskyřicí. ...	82
Obr. 7.13: Výbrus modelu C1 po sintraci na 1400°C.....	83
Obr. 7.14: Výbrus modelu C1 po sintraci na 1600°C.....	84
Obr. 7.15: Příprava modelu Model 1 – Model 4 k tisku na DLP tiskárně.....	85
Obr. 7.16: Model 1 – Model 4 po tisku na DLP tiskárně. ....	85
Obr. 7.17: Model 1 po výbrusu.....	86
Obr. 7.18: Model 2 po výbrusu.....	86
Obr. 7.19: Model 3 po sintraci. ....	87
Obr. 7.20: Model 4 po sintraci. ....	88
Obr. 7.21: Výbrus modelu C8 po sintraci.....	90

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: 3D technologie pro tisk keramiky [2].	18
Tab. 2.2: Technická specifikace tiskárny Form 2, Formlabs [21].	23
Tab. 3.1: Přehled chemického složení jednotlivých materiálů.	40
Tab. 4.1 Přehled modelů použitých pro tisk.	43
Tab. 5.1 : Tabulka průběhu sintrace pro materiál Ceramic Resin od společnosti Formlabs [21].	50
Tab. 5.2: Tabulka procesu sintrace pro materiál Vitrolite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny 1 mm [41].	52
Tab. 5.3: Tabulka procesu sintrace pro materiál Vitrolite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm [41].	53
Tab. 5.4: Tabulka procesu sintrace pro materiál Porcelite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny 1 mm [41].	55
Tab. 5.5: Tabulka procesu sintrace pro materiál Porcelite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm [41].	56
Tab. 5.6: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1400°C [41].	57
Tab. 5.7: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1600°C [41].	58
Tab. 5.8: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm s pomalejším průběhem zahřívání [41].	59
Tab. 6.1: Výsledky termogravimetrické analýzy.	61
Tab. 6.2: Doporučené parametry pro zalisování vzorků od výrobce Struers.	66
Tab. 7.1: Použité parametry tisku pro modely A1-A10 na SLA tiskárně.	69
Tab. 7.2: Naměřené hodnoty úhlů po sintraci.	70
Tab. 7.3: Použité parametry tisku pro modely B1-B10 na SLA tiskárně.	71
Tab. 7.4: Použité parametry tisku pro modely B1-B10 na DLP tiskárně.	72
Tab. 7.5: Objemové smrštění u modelu B1 a B2.	73
Tab. 7.6: Použité parametry tisku pro modely B1,B2,B4,B5 a B8 na DLP tiskárně.	74
Tab. 7.7: Použité parametry tisku pro modely C1-C10 na DLP tiskárně.	76
Tab. 7.8: Objemové smrštění pro modely C8 a C10.	77
Tab. 7.9: Použité parametry tisku pro skořepiny C11-C18 na DLP tiskárně.	78
Tab. 7.10: Objemové smrštění pro modely C11, C14, C15 a C18.	79

Tab. 7.11: Použité parametry tisku pro skořepiny A11-A18 na SLA tiskárně.....	80
Tab. 7.12: Objemové smrštění pro modely A11, A1, A15 a A18. ....	81
Tab. 7.13: Použité parametry tisku pro sintraci 1400°C na DLP tiskárně.....	82
Tab. 7.14: Použité parametry tisku pro sintraci 1600°C na DLP tiskárně.....	84
Tab. 7.15: Použité parametry tisku pro tenkostěnné modely na DLP tiskárně.....	85
Tab. 7.16: Objemové a hmotnostní smrštění pro Model 1 - Model 4.....	89
Tab. 7.17: Použité parametry tisku pro čas vytvrzování 7s na DLP tiskárně. ....	90
Tab. 7.18: Objemové a hmotnostní smrštění modelů. ....	91

## Seznam grafů

Graf 3.1: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Ceramic Resin, Formlabs před vypálením.....	32
Graf 3.2: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Ceramic Resin, Formlabs po vypálení.....	33
Graf 3.3: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Vitrolite před vypálením. ....	35
Graf 3.4: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Vitrolite po vypálení. ....	36
Graf 3.5: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Porcelite před vypálením.....	38
Graf 3.6: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Porcelite po vypálení.....	39
Graf 5.1 : Graf průběhu sintrace pro materiál Ceramic Resin od společnosti Formlabs [21].....	50
Graf 5.2 : Graf průběhu sintrace pro materiál Vitrolite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny 1mm [41]......	52
Graf 5.3: Graf průběhu sintrace pro materiál Vitrolite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm [41]......	53
Graf 5.4: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny 1 mm [41]......	55
Graf 5.5: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm [41]......	56
Graf 5.6: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1400°C [41]......	57
Graf 5.7: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1600°C [41]......	58
Graf 5.8: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm s pomalejším průběhem zahřívání [41]......	59
Graf 6.1: TGA pro materiál Ceramic Resin, Formlabs.....	62
Graf 6.2: TGA pro materiál Vitrolite, Tethon3D.....	63
Graf 6.3: TGA pro materiál Porcelite, Tethon3D. ....	64

## Seznam zkratek

2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
3DP	Trojrozměrný tisk - „Three-Dimensional Printing“
3MF	Grafický formát – „3D Manufacturing Format“
AM	Aditivní technologie – „Additive manufacturing“
CAD	Počítačem podporované projektování – „Computer Aided Design“
CNC	Číslicové řízení počítačem – „Computer Numeric Control“
CT	Výpočetní tomografie – „Computed Tomography“
DIW	„Direct Ink Writing“
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digitální mikrozrcátková jednotka - „Digital Micromirror Device“
FDM	„Fused Deposition Modeling“
IJP	„Inkjet Printing“
LED	Elektroluminiscenční dioda – „Light-Emitting Diode“
LCD	Displej z tekutých krystalů – „Liquid Crystal Display“
LOM	„Laminated Object Manufacturing“
MIT	Massachusettský Technologický Institut
OBJ	Grafický formát – „Object file“
PμSL	Projekční mikro stereolitografie – „Projection Micro Stereolithography“
SL/SLA	Stereolitografie – „Stereolithography“
SLM	„Selective Laser Melting“
SLS	„Selective Laser Sintering“
STL	Formát stereolitografického programu
TPP	„Two-Photon Polymerisation“
TGA	Termogravimetrická analýza – „Thermal Gravimetric Analysis“
VRML	Grafický formát – „Virtual Reality Modeling Language“
WWW	Celosvětová síť – „World Wide Web“

## 1 3D tisk

Technologie 3D tisku je progresivní technologie, která ve výzvě Průmysl 4.0. bývá označována jako hlavní výrobní technologie budoucnosti. V zahraničních odborných publikacích se tato technologie definuje jako „additive manufacturing“.

Vznik tří-dimenzionálních (3D) technologií tisku, označované také jako „additive manufacturing“ (AM), se považuje za výrobní revoluci. 3D tisk je skupina pokročilých výrobních technologií používaných k výrobě fyzických částí v diskretním provedení bod po bodu, řada po řadě či vrstva po vrstvě a to přídavným způsobem z 3D CAD modelů. 3D tisk je unikátní výrobní technologie, která umožňuje snadnou výrobu velmi složitých a přesných struktur, které je obtížné realizovat použitím standardních konvenčních výrobních metod, jako je odlévání nebo obrábění [1]. S využitím této technologie, může být také významně zvýšena produktivita či efektivita výsledného výrobku. V jedné tiskové sestavě je možné tisknout i mnoho rozličných produktů. Výsledkem toho je, že od svého vzniku v roce 1980, 3D tisk rychle získal pozornost ve vědeckých a inženýrských komunitách [2].

### 1.1 Historie

Počátky technologie 3D tisku spadají do druhé poloviny 20. století, kdy si Chuck Hull nechal v roce 1986 patentovat technologii stereolitografie [3]. Tato technika spočívá v trojrozměrném laserovém tisku s využitím UV laseru a tekutého fotopolymeru. Už v roce 1980 se pokusil podat patent Hideo Kodama [4]. Před koncem 90. let pak Chuck Hull pod hlavičkou jeho nové firmy 3D Systems vytvořil první zařízení tisknoucí v 3D formátu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1. V té době se tomuto zařízení ještě neříkalo 3D tiskárna, nicméně modely SLA se také staly základem vývoje dnešních 3D tiskáren či CNC strojů. SLA-1 byl využíván pouze beta zákazníky a postupně upravován až přišla na svět podoba SLA-250, která byla nabídnuta široké veřejnosti. StereoLithography Apparatus SLA-1 je doposud k vidění ve Fordově muzeu v Dearborn, Michigan [5].

Nástup konkurence na trh přinesl nové technologie, např. modelování depozicí taveniny (FDM, Fused Deposition Modeling) využívající termoplast či selektivní laserové spékání (SLS, Selective Laser Sintering) pracující s CO<sub>2</sub> laserem a práškovým materiálem. 3D Systems si však dlouho držela vedoucí pozici na trhu. Pro

ukázkou, do roku 1996 se po celém světě prodalo přes 600 různých přístrojů SLA. V roce 1993 Massachusettský technologický institut (MIT) patentoval technologii trojrozměrných tiskařských technik, která pracovala s práškovým materiálem a tekutým spojovačem. Licenci k této technologii poté koupila firma Z Corporation a na její bázi započala vývoj 3D tiskáren jako takových [5].

## 1.2 Průběh tisku

Před započítím tisku je třeba provést několik kroků. Nejprve je zapotřebí vytvořit 3D model, který se bude následně tisknout. Model lze získat několika způsoby. Nejrozšířenější a nejjednodušší je vytvoření trojrozměrné konstrukce modelu v příslušném softwaru, v tzv. CAD softwaru. Druhou možností je využití metod reverzního inženýrství jako například 3D skeneru k naskenování fyzické části modelu. V tomto případě se získá digitální podoba části, která ale obsahuje chyby a je nutné tento model ještě upravit v CAD softwaru. Další způsoby, jak získat 3D model je pomocí digitální kamery a fotogrammetrie nebo za pomoci výpočetní tomografie, tzv. CT „Computed Tomography“.

Dalším krokem k získání fyzického modelu je převod dat do univerzálního formátu STL nebo OBJ, VRLM, 3MF [6]. Vstupní formát dat je závislí na použitém softwaru tiskárny, s kterým formátem dokáže pracovat. Dále je zapotřebí vytvořit instrukce pro tiskárnu, tzv. G-kód, který určuje pohyb motorů, ovládání trysky, nastavení teploty a další nutné technologické parametry. U technologie SLA, SLS, DLP či MJF není zapotřebí tento kód separátně vytvářet z důvodu použití odlišné technologie. Následně dojde k rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy (podrobný popis celého procesu je popsán níže v kapitole 0). Po samotném tisku je zapotřebí objekt upravit. Obecně dochází k odlomení podpůrných konstrukcí, opílování nebo vyčištění. Nutné dokončovací operace záleží na použité technologii tisku.



### 1.3 Využití

V posledních letech se 3D tisk vyvinul natolik, že v mnoha aplikacích hraje zásadní roli. Nejdůležitější z nich jsou strojírenská výroba, letectví, lékařství, architektura, zakázkové umění a design. Některé firmy dokonce používají 3D tiskárny k výrobě dalších 3D tiskáren [7].

Rozptyl velikostí modelů, které je možné zpracovat, je opravdu velký. Můžeme vytisknout objekty v nanometrických velikostech až po objemné - stavby domů. Například čínská firma dokázala vytisknout za jeden den deset domů. V České republice je největším výtiskem sousoší Generála Laudona na koni spolu s jeho psem. Tento objekt je umístěn v Novém Jičíně.

V odvětví zdravotnictví vědci tisknou části lidských kostí či protetických náhrad a podařilo se již vytisknout umělou čelist či lidské ucho. Lékaři věří, že tato technologie jednou umožní tisknout „živé“ objekty. Cílem je tisk skutečných buněk daného pacienta, tyto buňky musí zůstat po nanesení funkční - aktivní. U tohoto postupu by se používala náplň z embryonálních kmenových buněk. Tento materiál je však vysoce citlivý a tak je potřeba tisknout v prostředí, které je pro tento typ buněk uzpůsobeno. Tato technologie by otevřela cestu k vytváření celých orgánů pro transplantace [5].

## 2 3D tisk keramiky

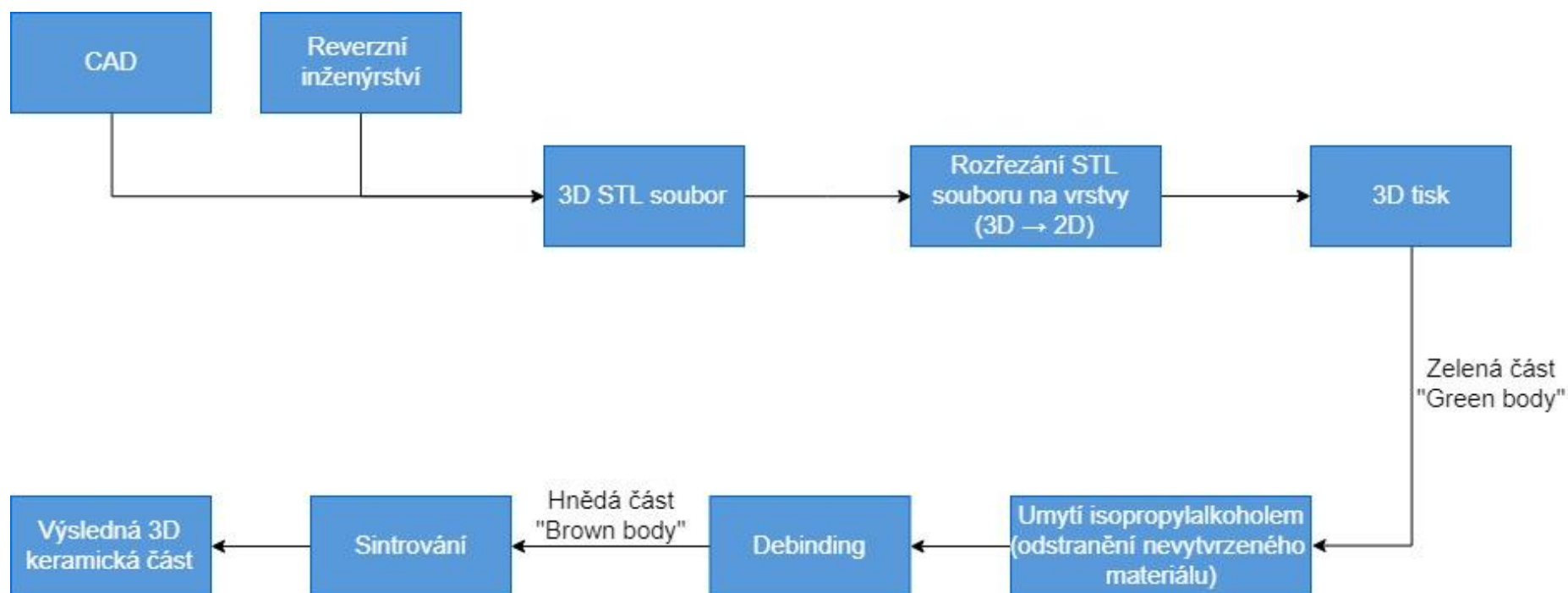
Zavedení 3D tisku do výroby keramických komponent nabízí zcela nové možnosti pro řešení. 3D tisk keramiky byl poprvé oznámen v 90. letech – Marcus [8], Sachs a kolektiv [9]. S nejnovějšími pokroky v oblasti vědy o materiálech a počítačích, byla speciálně vyvinuta technologie 3D tisku keramiky. Podle formy předem zpracovaného vstupního materiálu před tiskem, můžeme rozdělit technologie tisku dle tabulky (Tab. 2.1). Technologie založené na výchozím materiálu, který je v kapalném stavu, používají keramické/polymerní směsi s viskozitou v rozmezí od nízko viskózních ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) inkoustů s nízkým keramickým obsahem (do 30% objemu), po vysoce viskózní ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) pasty s mnohem vyšším obsahem keramiky (až 60% objemu), [2].

Tab. 2.1: 3D technologie pro tisk keramiky [2].

Vstupní materiál	Typ technologie 3D tisku keramiky	Zkratka
Suspenzní materiál	Stereolithography	SL, SLA
	Digital light processing	DLP
	Two-photon polymerisation	TPP
	Inkjet printing	IJP
	Direct ink writing	DIW
	Práškový materiál	Three-dimensional printing
Selective laser sintering		SLS
Selective laser melting		SLM
Pevný materiál	Laminated object manufacturing	LOM
	Fused deposition modeling	FDM

## 2.1 Průběh 3D tisku keramiky

Přehled celého procesu tisku včetně operací, které jsou zapotřebí k získání výsledné keramické části je uveden na obrázku (Obr. 2.1) pro technologie SLA a DLP.

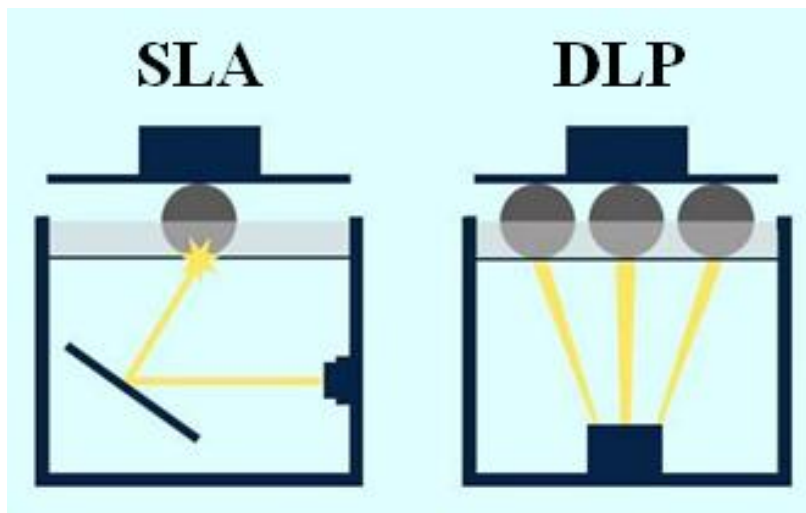


Obr. 2.1: Proces vzniku 3D keramické části při užití polymerních materiálů pro technologie SLA a DLP.

## 2.2 Technologie založené na suspenzním vstupním materiálu

Technologie založené na 3D tisku tekutiny s pevnými částmi obecně zahrnují kapalně nebo částečně kapalně systémy s rozptýlenými jemnými keramickými částicemi, které jsou použity jako výchozí materiál a to převážně ve formě inkoustů nebo past. Dělení materiálu se řeší podle obsahu pevných částic a viskozitě systému. Suspenze může být zpracována buď fotopolymerizací, inkoustovým tiskem nebo vytlačováním. Technologie založená na fotopolymerizaci je stereolitografie (SL nebo SLA) a její deriváty. Těmi jsou: Digitální zpracování světla - DLP (Digital Light Processing), dvoufotonová polymerace – TPP (Two-Photon Polymerisation) spolu s inkoustovým tiskem IJP (Ink Jet Printing) a přímým tiskem inkoustu založeným na extruzi DIW (Direct Ink Writing), [2].

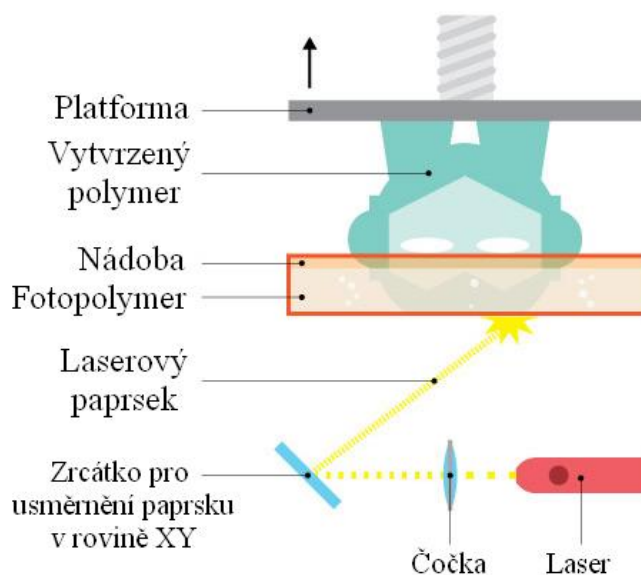
Rozdíl mezi SLA a DLP technologií je v použitém mechanismu vytvrzování (Obr. 2.2). SLA technologie pracuje na bázi laserového vytvrzování bod po bodu, kde dochází k zacílení paprsku do daného bodu za pomoci rotujícího zrcátka. Ovšem DLP technologie pracuje na bázi LED diod. Vytvrzování probíhá plošně, ne bodově a ve stejném čase je vytvrzena jedna celá vrstva.



Obr. 2.2: Technologie SLA a DLP [10].

## 2.3 Stereolitografie (SL)

Stereolitografie (dále jen SL) je považována za nejvýznamnější a nejoblíbenější 3D technologii tisku a je značně využívána po celém světě [11]. Poprvé byla navržena a vyvinuta v roce 1986 americkým vynálezcem Chuckem Hullem [12] a později byla komerčně použita firmou 3D Systems Inc. SL je proces, při kterém je světelný zdroj určité vlnové délky (obvykle v ultrafialovém rozsahu) používán k selektivnímu vytvrzení kapalného povrchu (vrstvy) v nádrži obsahující hlavně fotopolymerizovatelný monomer spolu s dalšími přísadami ve velmi malém množství, zejména fotoiniciátorů [13]. Polymerizace aktivována světlem (tj. kapalný monomer se mění na pevnou pryskyřici) obecně pokračuje bod – čára (linie), čára (linie) – vrstva, pak vrstva – vrstva spolu se světelným skenováním na povrchu kapaliny. Po dokončení polymerace jedné vrstvy, nádrž nebo platforma podporující vyráběnou součást je zvednuta nebo snížena o tloušťku vrstvy, proces se odvíjí od konstrukce celého systému. U některých konstrukčních řešení je třeba stírací lišty, aby se hladina kapaliny vyrovnala, případně promíchala polymer, než se vytiskne další vrstva. SL je schopen vyrábět části s vysokou kvalitou povrchu při jemném rozlišení až do měřítka mikrometru [2]. Schématický diagram SL technologie je znázorněn na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Schématický diagram SL technologie [14].

SL keramiky postupuje přidáním jemných keramických částic velikosti micro/nano do fotolabilního média, které může být vodné nebo nevodné [13; 15].

Tekutina se stává keramickou suspenzí poté, co byla v médiu dobře rozptýlena za pomoci základních povrchově aktivních látek a přísad [2].

Polymerace probíhá pouze v organické monomerní fázi za světelného ozáření, protože keramické částice jsou inertní vůči emisím světla. Keramické částice jsou potom jednotně obklopeny zesítenou organickou sítí, aby se vytvořil předem navržený tvar každé vrstvy až je vytvořena celá 3D keramická část. Zelené části musí být zpracované pomocí dalších procesů. Typickou pyrolýzou k odstranění organických látek je sintrování při vysokých teplotách, aby se dosáhlo plné hustoty (zhutnění). Stejně jako u běžných keramických způsobů zpracování, jako je vstřikování (CIM-Ceramic Injection Molding) nebo PIM (Powder Injection Molding) [16; 2].

Průkopníkem SL procesu pro keramiku a jeho intenzivním studiem se zabýval John W. Halloran od roku 1994 se svými spolupracovníky [13; 17; 18; 19; 20]. Počínaje používáním vysoce koncentrované keramické suspenze s obsahem až 65%, včetně křemíku, oxidu hlinitého a nitridu křemíku. K úspěšnému vykonání tohoto procesu musí být splněn velký počet požadavků. Zásadní význam na proces mají keramické suspenze. Měly by mít odpovídající reologické chování včetně dlouhodobé stability a vhodné viskozity.

Keramické částice musí být homogenně a efektivně rozptýleny ve fotopolymerizovatelném médiu a zůstat stabilní bez výrazné segregace částic po přiměřenou dobu (například hodiny až dny). Nestabilní suspenze s rychlou segregací může vést k nehomogenitě materiálu vyrobených částí. Jeden z možných zástupců na keramickou suspenzi by měl mít také dostatečnou viskozitu pro správnou funkci toku během procesu tisku. Na začátku vývoje keramiky pro SL, viskozita suspenze musela být srovnatelná s viskozitou komerčních suspenzí (méně než 3000 mPa·s) [13]. Zatímco současná SL je také schopna pracovat se suspenzemi o viskozitě v řádu desítek Pa·s a smykové rychlosti 1000 s<sup>-1</sup>. To je ovšem náročné, protože na jedné straně – vyšší objemový podíl keramických částic je příznivý pro menší smrštění a vyšší hustotu (a tedy i mechanickou pevnost) po sintrování. Zatímco na druhé straně – nižší obsah keramických částic je obvykle požadován, aby se minimalizovala viskozita a zabránilo se případné segregaci pevného obsahu. Proto je zapotřebí udělat kompromis při přípravě vhodné keramické suspenze pro SL [2].

## 2.4 SLA tiskárna

SLA tiskárna používaná pro tisk v této práci byla Form 2 od společnosti Formlabs. Tiskárna je určena pro methakrylátové světlocitlivé pryskyřice a maximální tisknutelný objem je 145x145x175 mm. Podrobná technická specifikace je uvedena v tabulce (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Technická specifikace tiskárny Form 2, Formlabs [21].

Tisková technologie	Stereolitografie
Stavební prostor	145 x 145 x 175 mm
Tloušťka vrstev	25, 50, 100 $\mu\text{m}$
Velikost laserového bodu	155 $\mu\text{m}$
Typ laseru	405 nm fialový, 250 mW
Podporované materiály	Methakrylátové světlocitlivé pryskyřice
Doplňování materiálu	Automatické
Objem balení materiálu	1 litr
Ovládání	dotykový displej, tlačítko
Konektivita	WiFi, ethernet, USB
Software	PreForm (Windows 7+, OS X 10.7+)
Rozměry zařízení	350 x 330 x 520 mm
Hmotnost zařízení	13 kg

Součástí tiskárny je také dodávaný software PreForm, který za pomoci automatického režimu provede orientaci modelu vůči stavební desce a přidá podpurné části. Následně modely rozmístí na tiskovou podložku. Pro tisk keramiky je předem nastavený režim tisku – Ceramic. Je možné upravit požadovanou tloušťku vrstvy (50, 100  $\mu\text{m}$ ) a měřítko zvětšení modelu v ose Z. Pro ostatní materiály je možné nastavit i nižší tloušťku vrstvy a to 25  $\mu\text{m}$ . Připravené modely pro tisk jsou zaslány do tiskárny přes bezdrátovou síť WiFi či kabelovou LAN, USB.

Před samotným tiskem je zapotřebí důkladně promíchat nádobu s materiálem. Případně také rozmíchat zbylý materiál, který je již v nádobě tiskárny za pomoci stěrky. Dalším nutným krokem je provést zdrsňení tiskové desky pomocí smirkového papíru a to z důvodu lepší adheze polymerního materiálů na tiskovou desku. Následně může být spuštěn tisk.



*Obr. 2.4: SLA tiskárna Form 2 od společnosti Formlabs [21].*

Po dokončení tisku lze z tiskárny jednoduše vyjmout platformu s vytisknutými modely. Následně model oddělit od platformy a vyčistit od zbylého, nevytvrzeného polymeru v nádobě s izopropylalkoholem.

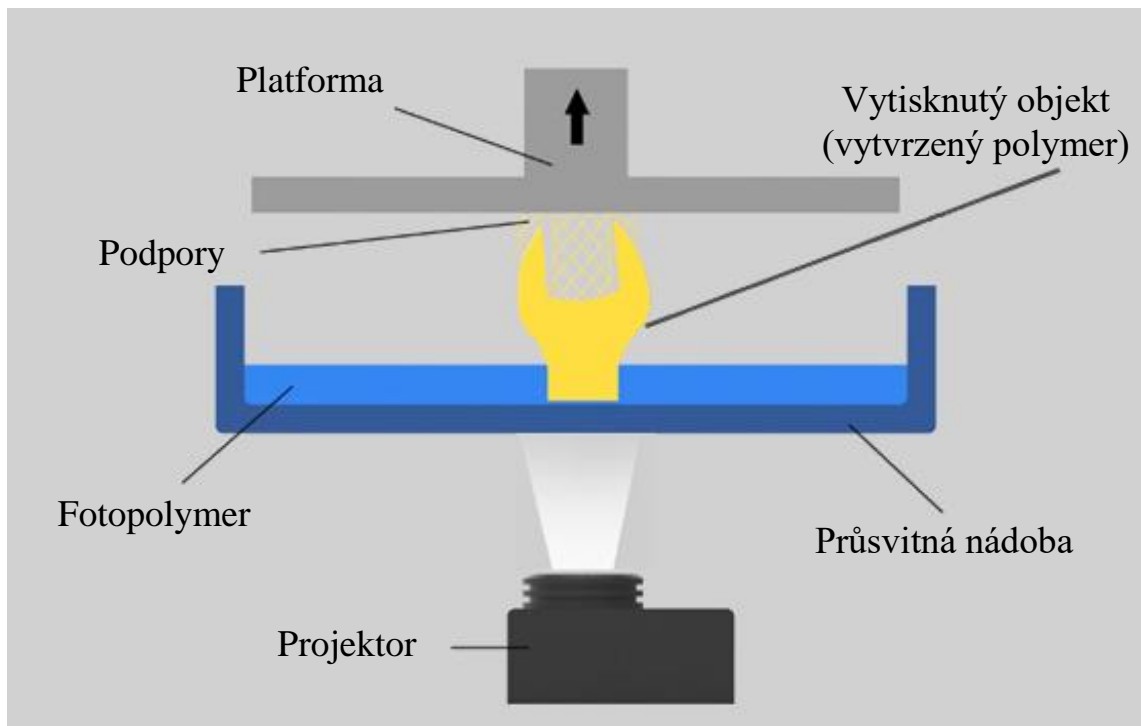


## 2.5 Digital light processing (DLP)

Technologie digitálního zpracování světla nebo digitální projekce světla (DLP) je ve skutečnosti SL technologie založená na masce, ve které se přenáší integrální obraz na fotopolymerizovatelný povrch kapaliny, vystavením světelného zdroje pouze jednou vzorovanou maskou. Původní koncept byl navržen dvojicí Nakamoto a Yamaguchi v roce 1996 [22] používající „physical mask“. Dále byl rozvíjen a vylepšen Bertschem a kol. v roce 1997 [23] s použitím tekutého krystalového displeje (LCD – Liquid Crystal Display) jako dynamického generátoru masky. Velký pokrok nastal kolem roku 2001, kdy došlo k nahrazení LCD na digitální mikro zrcátkové zařízení (DMD – Digital Micromirror Device) od Texas Instruments díky konkurenčnímu faktoru plnění a odrazivosti (výsledkem je vyšší rozlišení a kontrast na světelném displeji) [24; 25; 26]. DMD je čip, který obsahuje obdélníkové pole několika stovek tisíc mikroskopických zrcadel odpovídajících pixelům na obrázku, který se má zobrazit. Ovládané elektrostatickými silami mikroskopy fungují jako ultra-rychlé světelné spínače a lze je individuálně otáčet o  $\pm 10\text{-}12^\circ$  do stavu „zapnuto“ a „vypnuto“. Příhodné světelné paprsky s prostorovým rozlišením  $1,1\ \mu\text{m}$  jsou tedy odraženy tak, že prochází skrz / odchýlí se od čočky, čímž se pixely objeví na projekčním povrchu (tj. obrazovce/plátnu) jasně/temně (černě) [27].

Velmi rychlé přepínání světla a integrovaná projekce umožňují, že čas procesu DLP 3D tisku je výrazně snížen. Rychlost tisku je mnohem větší než u konvenčního způsobu SL procesu bod-linie-vrstva. Kromě toho lze dosáhnout velmi dobrého rozlišení v řádech několik mikrometrů.

Tyto nevšední výhody technologie DLP přitahují značnou pozornost v odvětví 3D tisku a byly prozkoumány pro výrobu dílů s ještě větší rychlostí a přesností [28; 29; 30; 31; 32]. Technika DLP je také označována jako projekční mikro-stereolitografie nebo P $\mu$ SL. Na Obr. 2.5 je znázorněn schématický diagram DLP procesu.



*Obr. 2.5: Schématický diagram DLP technologie [33].*

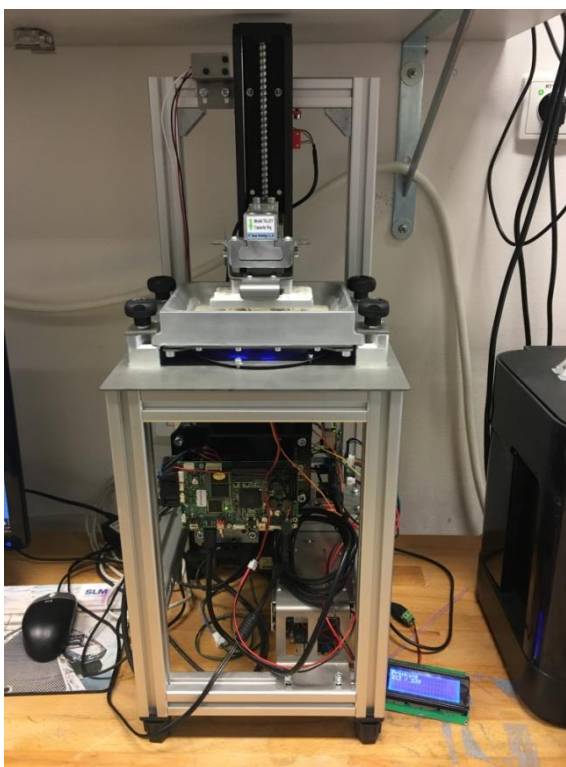
Použití technologie DLP jako nástroje 3D tisku v keramické výrobě bylo široce prozkoumáváno. Vysoká hustota zirkonia (97-99%) a strukturní části oxidu hlinitého s tvrdostí Vickerse (13,1 a 17,5 GPa) jsou srovnatelné s těmi, které byly připraveny za použití konvenčních přístupů [34; 35].

Od roku 2012 vynaložil značné úsilí výzkumný tým na Technické univerzitě ve Vídni využívající technologii DLP pro výrobu složitých keramických struktur s velmi jemnými vlastnostmi/rysy založenými na materiálech včetně oxidu hlinitého a bioaktivního skla s výslednou relativní hustotou nad 90% a mechanickou pevností srovnatelnou s běžně zpracovanými vzorky [36; 37; 38; 39].

## 2.6 DLP tiskárna

K této práci je použita DLP tiskárna, která byla navržena a sestavena na Technické Univerzitě v Liberci. Tiskárna využívá DLP projektoru od společnosti EKB s čipsetem DLP4500 od firmy Texas Instruments, který má rozlišení 912x1140 pixelu. UV LED světlo má výkon 5,5 W a vlnovou délku v rozsahu od 385 do 405 nm.

Nad DLP projektorem je umístěna hliníková nádoba o velikosti 170x130 mm, do které se následně nalije tekutý fotopolymer (suspenze). Ve spodní části platformy je FEP fólie, přes kterou se promítá obraz dané vrstvy. Horní hliníková platforma, na které je realizován tisk je velikosti 80x50 mm a její pohyb je zaručen pomocí krokového motoru a lineární jednotky s celkovou délkou 470 mm.



*Obr. 2.6: DLP tiskárna sestavena na Technické univerzitě v Liberci.*

Model navržený v příslušném 3D software je následně rozšířen o stavební podpory, aby byl zajištěn bezproblémový tisk modelu – fixace modelu při tisku. Takto připravený model je ve formátu STL nahrán do webového rozhraní tiskárny, připojeného na základě IP adresy stroje. Po importu modelu dojde k jeho rozřezání na jednotlivé vrstvy s předem definovanou tloušťkou vrstvy. Je tedy možné prohlédnout si, jak se budou jednotlivé vrstvy tisknout a zkontrolovat tak i správnost modelu (např. ověřit přítomnost vnitřní struktury). WWW aplikace zajistí automatické přeložení

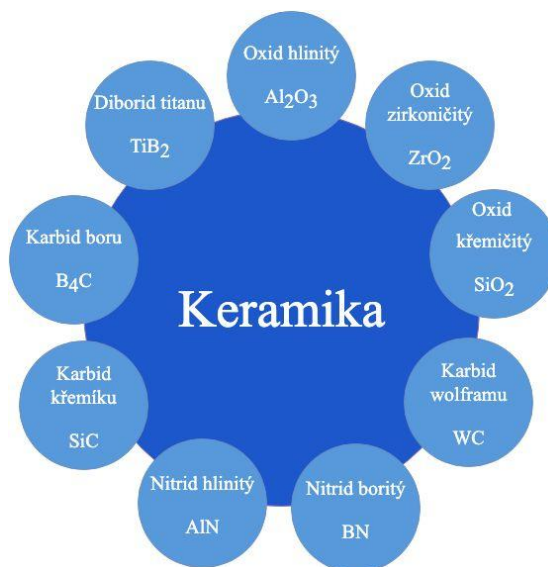
jednotlivých vrstev do G-kódu, což je numerický řídicí programovací jazyk, který ovládá pohyb tiskárny. Ve chvíli, kdy je model připravený, je možné začít s tiskem. Předtím, než se spustí samotný tisk je zapotřebí ještě připravit tiskárnu k tisku a to následujícím způsobem. Nejprve je třeba zkontrolovat, zda je správně nastavena vzdálenost osy Z. Platforma se manuálně napolohuje do prázdné nádrže. Je zapotřebí, aby mezi platformou a fólií byla mezera menší než tloušťka standardního kancelářského papíru, pomocí kterého je možné tuto podmínku ověřit. Tím je zaručeno přilnutí první vrstvy na platformu. Aby byla tato podmínka splněna, platforma musí lehce propnout fólii. Poté již stačí vrátit polohu osy Z do výchozí pozice a během toho si tiskárna odměří Z-tovou vzdálenost. Tato hodnota je výchozí vzdálenost pro první vrstvu.

Důkladným promícháním je třeba si připravit polymerní materiál a vlít dostatečné množství do nádrže. Pro lepší přilnutí první vrstvy se provede i namočení platformy materiálem. Je také důležité zkontrolovat, zda je zapnutý DLP projektor a je zavřena klapka, aby nedocházelo k ozáření a zbytečné degradaci materiálu. První vrstvy mají zpravidla delší průběh tisku a to díky tomu, že je nastaven delší čas vytvrzování a také delší čas čekání mezi jednotlivými vrstvami.

Na konci tisku je zapotřebí oddělit vytištěné modely od platformy a vložit je do nádoby s izopropylalkoholem, aby došlo k jejich očištění od přebytečného polymeru. Výrobce materiálů použitých v této práci nedoporučuje nechávat modely v izopropylalkoholu po dobu delší než je deset minut. Jinak by se mohl model zdeformovat. Po vyjmutí z nádoby je potřeba modely vysušit a to za pomoci tlakového vzduchu. Další operací je změření a zvážení, aby bylo možné vypočítat, k jakému došlo smrštění a deformaci po sintraci. Takto připravené modely se umístí do sintrační pece a provede se vlastní sintrační proces dle teplotního profilu poskytnutého výrobcem jednotlivých polymerních materiálů. Proces vypalování je detailněji popsán v kapitole 5.

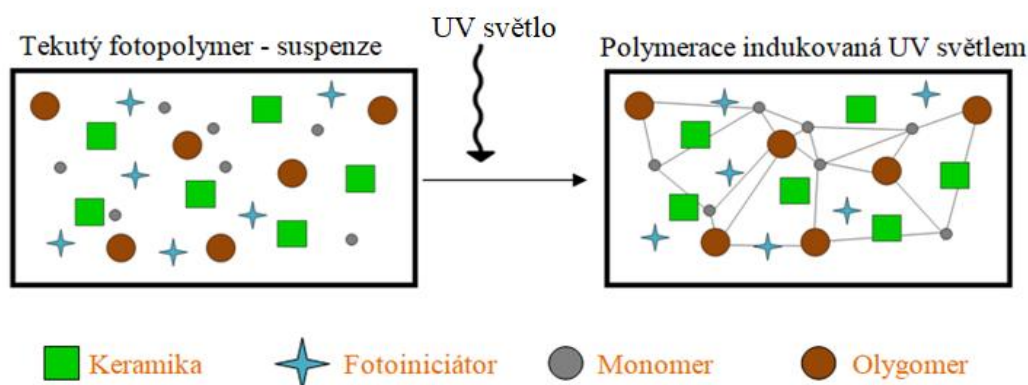
### 3 Materiály

Materiály použité v této práci jsou průmyslově vyráběné keramické suspenze, které obsahují fotosenzitivní polymer a keramické částice. Chemické složení materiálů není výrobce zveřejněno. Obecný přehled keramických materiálů je uveden na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Přehled základních keramických materiálů [40].

Olygomerní a monomerní složka suspenze spolu s fotosenzitivním síťovadlem, je po expozici UV zářením zesíťována. Při procesu vznikají dodatečné kovalentní vazby za vzniku vyššího molekulárního celku na bázi polymeru. Tento proces probíhá vrstvu po vrstvě, až je získán celý model. Proces polymerace je znázorněn na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Grafické znázornění polymerace [40].

### 3.1 Formlabs – Ceramic Resin

Keramická pryskyřice je unikátní materiál v knihovně společnosti Formlabs. Tato kompozitní pryskyřice byla vyvinuta pro tiskárnu Form 2. Keramika je určena k vypalování v peci, kde se polymerní matrice vypálí a model se transformuje na křemičitou keramickou část. Pomocí 3D tisku s keramickou pryskyřicí je možno vytvořit komplexní keramické předměty, které by se nedaly odlévat. Po vypálení je keramika: odolná vůči teplotě nad 1000°C, odolná vůči deformaci a stolní nádoby je bezpečné po glazování. Jako experimentální produkt společnosti Formlabs má keramická pryskyřice nižší úspěšnost tisku v porovnání se standardními materiály této společnosti a vyžaduje vyšší úroveň dovedností a pozornosti. Keramická pryskyřice má speciální požadavky na konstrukci dílů a plánování tisku. Některé modely vyžadují dobrou tepelnou úpravu [21].

#### Konstrukce modelů

Keramická pryskyřice je nejvhodnější pro tisk malých a tenkých částí. Tloušťka stěny pro části, které budou následně vypalovány, by měla být mezi 2 až 10 mm. Silnější části mají větší pravděpodobnost k prasklinám během vypalování a větší pravděpodobnost k oddělení od podpor během tisku. Minimální tloušťka stěny jsou 2 mm, ideální tloušťka je 3-6 mm a maximální doporučená tloušťka je 10 mm. Aby se zabránilo koncentraci napětí a snížilo se praskání, je vhodné zaoblit vnitřní hrany. Minimální doporučený poloměr zaoblení je 1 mm a ideální jsou 2 mm a více. Smrštění, které je způsobeno sintrováním, zvětšuje pevnost modelu díky zvýšení hustoty. Většinou dochází k celkovému smrštění rovnoměrně po celém dílu a modely se smršťují přibližně o 15% během sintrování. Nicméně modely se smršťují více podél tištěné osy Z než osy X a Y vzhledem k nižší koncentraci keramických částic mezi vrstvami. Pokud je model vytisknut pod úhlem, způsobí to zešikmení modelu po vypálení. Aby se tento efekt napravil, je zapotřebí zvětšit model v ose Z během tisku. Po tisku bude „zelený“ model zkosený, ale tvar modelu se zkoriguje během procesu vypalování [21].

Keramické částice se mohou pohybovat během sintrování, což znamená, že tvar modelu je ovlivněn vlivem gravitace. Samonosné konstrukce udržují svůj tvar, ale převisy bez podpor mají sklon k poklesu nebo deformaci. Proto je vhodné navrhnout modely, které jsou samonosné, aby se minimalizoval objem podpůrných struktur [21].

## Podpory

Vzhledem k vysokému obsahu plniva je keramika křehká v „zeleném“ – nevypáleném stavu a vyžaduje více podpor než jiné polymerní materiály. Výchozí nastavení podpor bude obvykle fungovat pro malé objekty. Větší objekty mohou vyžadovat větší podpěrné body a vyšší hustotu podpor. Zejména u dílů s velkými průřezy. Velmi malé objekty mohou být naopak tisknutelné s méně podporami nebo menšími podpěrnými body. Po tisku a odstranění podpor je vhodné použít brusný papír zrnitosti 120 a vyhladit povrch dílu po stopách podpor [21].

## Proces tisku

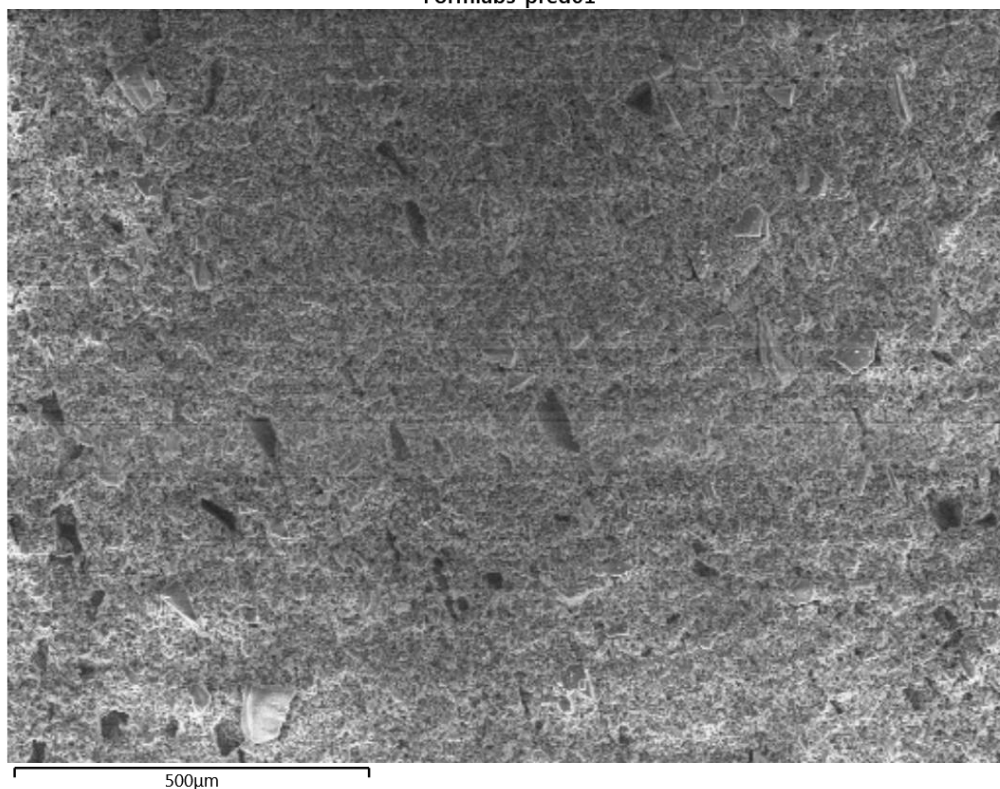
Keramická pryskyřice se odděluje a usazuje, když je uložena v zásobníku nebo nádrži po delší dobu. Proto je zapotřebí promíchat pryskyřici před každým tiskem alespoň po dobu 1 minuty. Před každým tiskem je zapotřebí také promíchat pryskyřici v nádrži za použití stěrky. Nedostatečné promíchání pryskyřice v zásobníku či nádrži může mít za následek nekonzistentní obsah keramiky uvnitř pryskyřice a může způsobit nekonzistentní smrštění mezi prvním a posledním tiskem z tohoto zásobníku. Vytištěnou část je zapotřebí promýt v izopropylalkoholu po dobu 5 minut. Keramická pryskyřice nevyžaduje dodatečné vytvrzování, avšak části musí být před vypálením zcela suché [21].

## Chemické složení materiálu

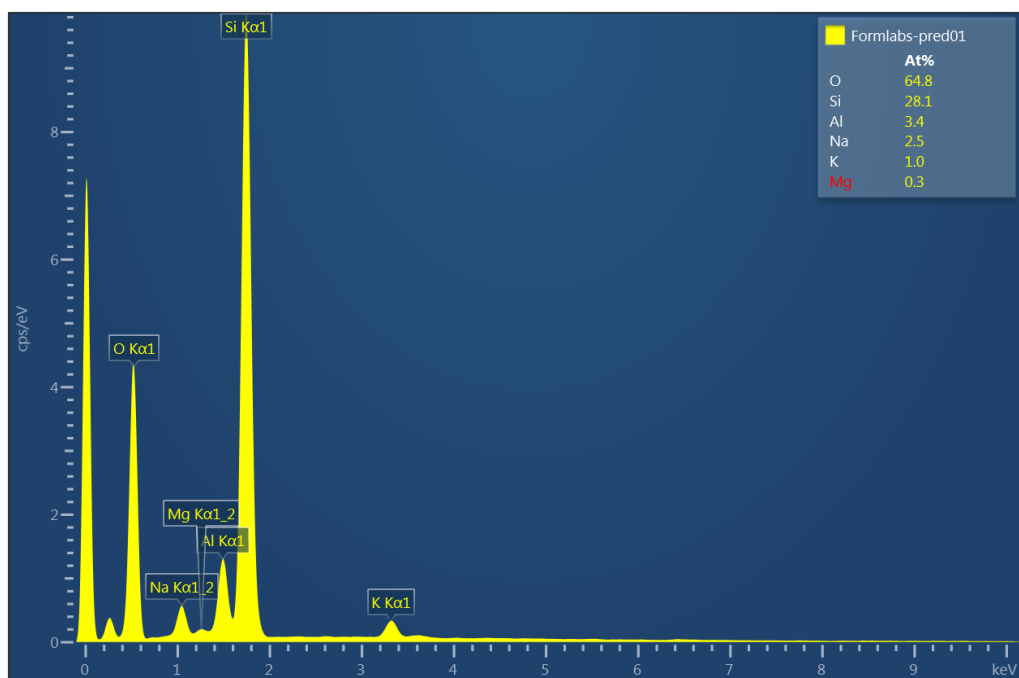
Tab. 3.1: Chemické složení materiálu Ceramic Resin.

Chemický prvek	Obsah před vypálením [%]	Obsah po vypálení [%]
O	64,8	64,9
Si	28,1	27,2
Al	3,4	4,2
Na	2,5	2,7
K	1,0	0,9
Mg	0,3	-

Formlabs-pred01



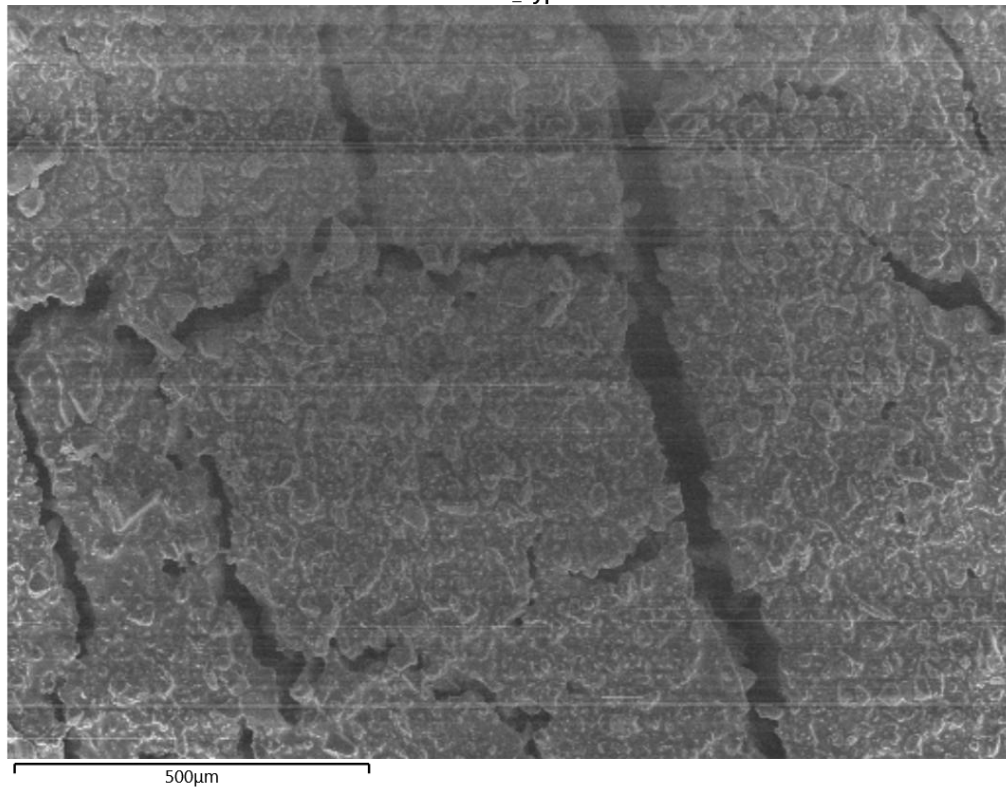
Obr. 3.3: Snímek materiálu Ceramic Resin před vypálením.



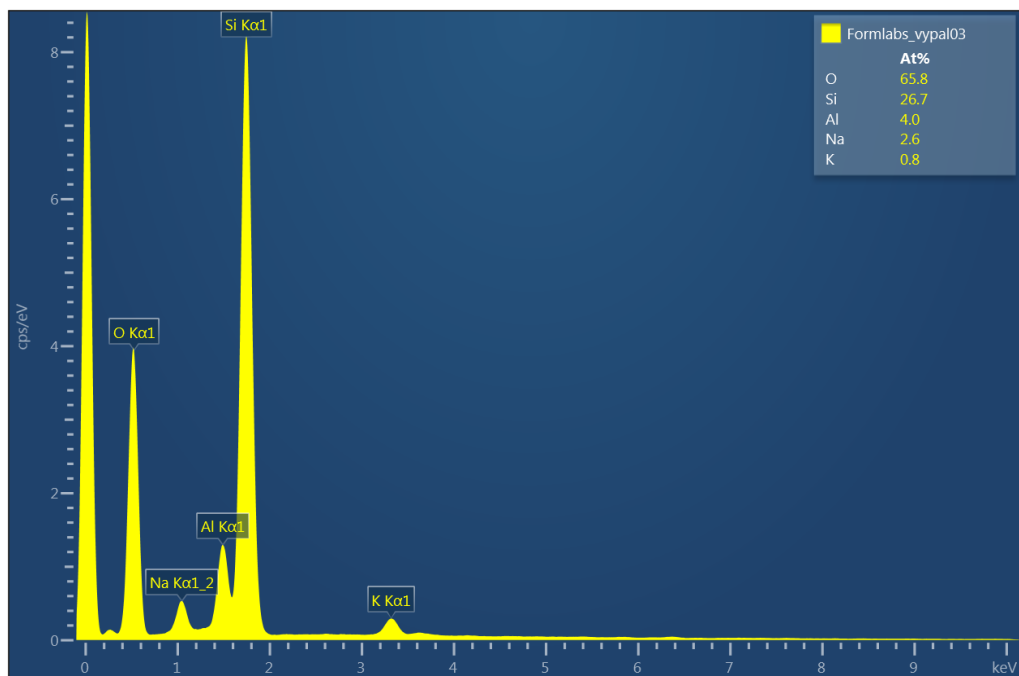
Graf 3.1: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Ceramic Resin před vypálením.



Formlabs\_vypal03



Obr. 3.4: Snímek materiálu Ceramic Resin po vypálení.



Graf 3.2: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Ceramic Resin po vypálení.

### 3.2 Tethon3D - Vitrolite

Vitrolite je fotocitlivý polymerní pryskyřice pro použití v tiskárnách SLA nebo DLP. Po vypálení je Vitrolite sklokeramika s vysokou pevností, nízkou pórovitostí a vysokou tepelnou odolností. Materiál nevede teplo ani elektřinu a je chemicky odolný [41].

#### Konstrukce modelů

Pevné objekty by měli být duté s doporučenou tloušťkou stěny 1-3 mm a uvnitř modelu by neměla zůstat tekutá pryskyřice. Proto je zapotřebí modely doplnit o otvory, díky kterým může pryskyřice vytéci. V opačném případě by mohla způsobit praskliny na modelu. V případě mřížek je vhodné umístit silnější stěny mřížky na spodní část. Mřížky mohou být také použity jako výplně modelů. Pro snížení potenciálního vzniku prasklin může pomoci zaoblení rohů a hran [41].

#### Podpory

Vitrolite je těžší než většina pryskyřic. To může vyžadovat zvětšení kontaktní plochy modelů s podporami. Úspěšný tisk zajistí také zvýšení hustoty podpor [41].

#### Proces tisku

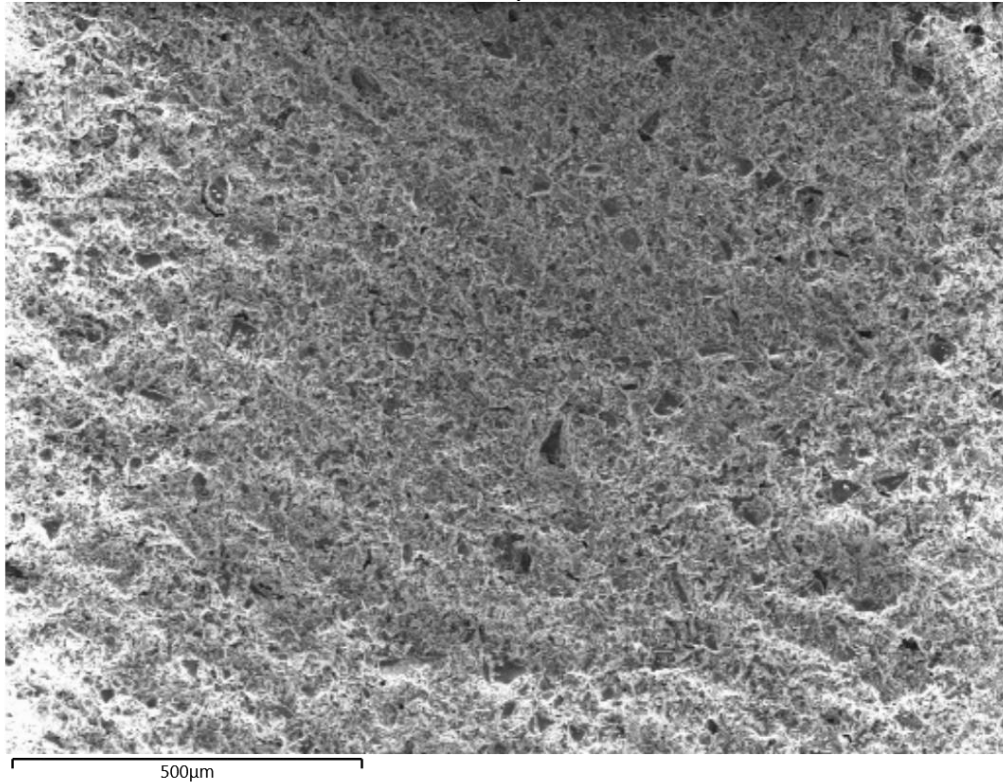
Před tiskem je zapotřebí rozmíchat láhev s pryskyřicí po dobu 5 minut a ujistit se, že je všechn keramický materiál dobře rozmíchán. Zároveň je zapotřebí očistit platformu izopropylalkoholem, aby na platformě nebyla žádná pryskyřice, která by mohla nepříznivě ovlivnit přilepení modelů k platformě. Po prvních pěti vrstvách je doporučeno zastavit tisk a zkontrolovat, zda jsou modely přilnuty k platformě. Následně je možné s tiskem pokračovat [41].

#### Chemické složení materiálu

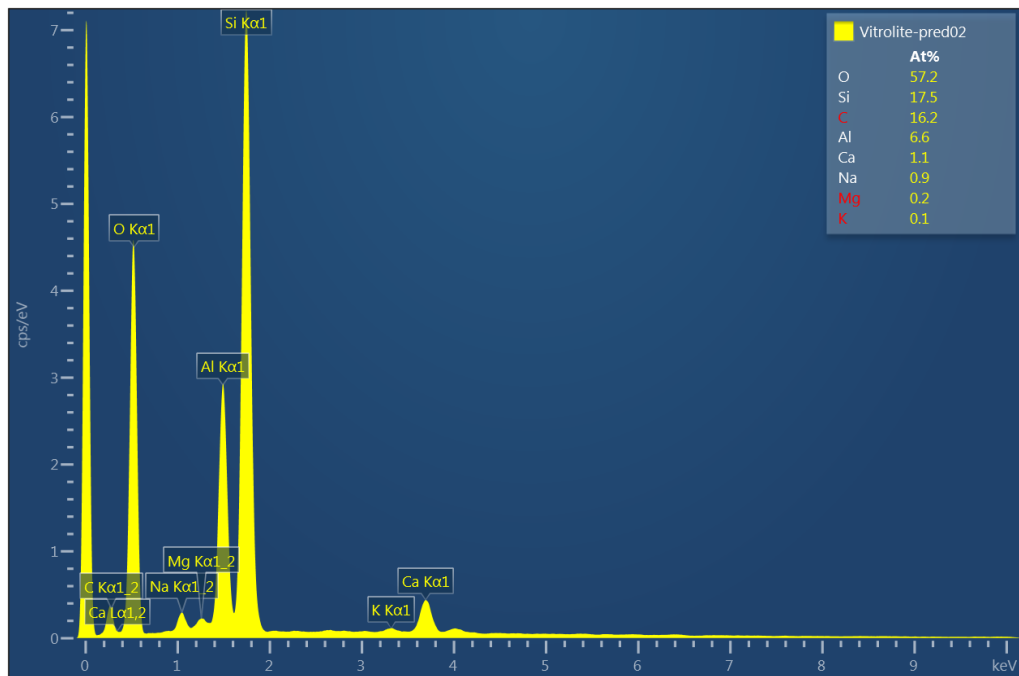
Tab. 3.2: Chemické složení materiálu Vitrolite.

Chemický prvek	Obsah před vypálením [%]	Obsah po vypálení [%]
O	57,2	65,2
Al	6,6	8,0
Si	17,5	23,4
Na	0,9	1,5
Ca	1,1	1,4
Mg	0,2	0,4
K	0,1	0,1
C	16,2	-

Vitrolite-pred02

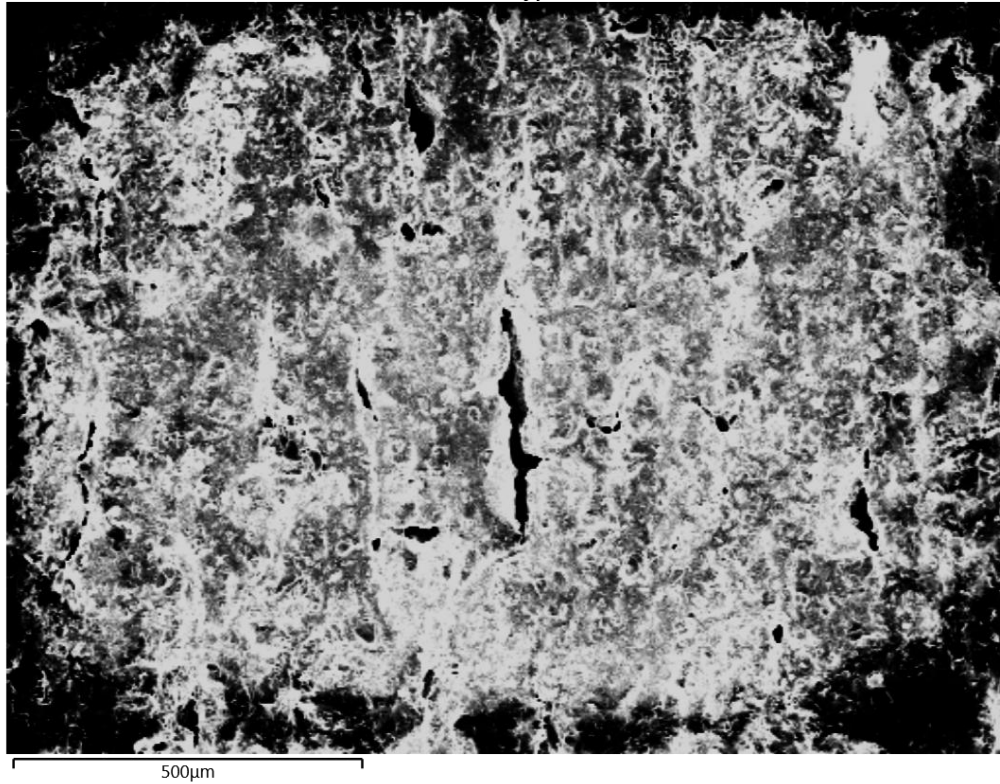


Obr. 3.5: Snímek materiálu Vitrolite před vypálením.

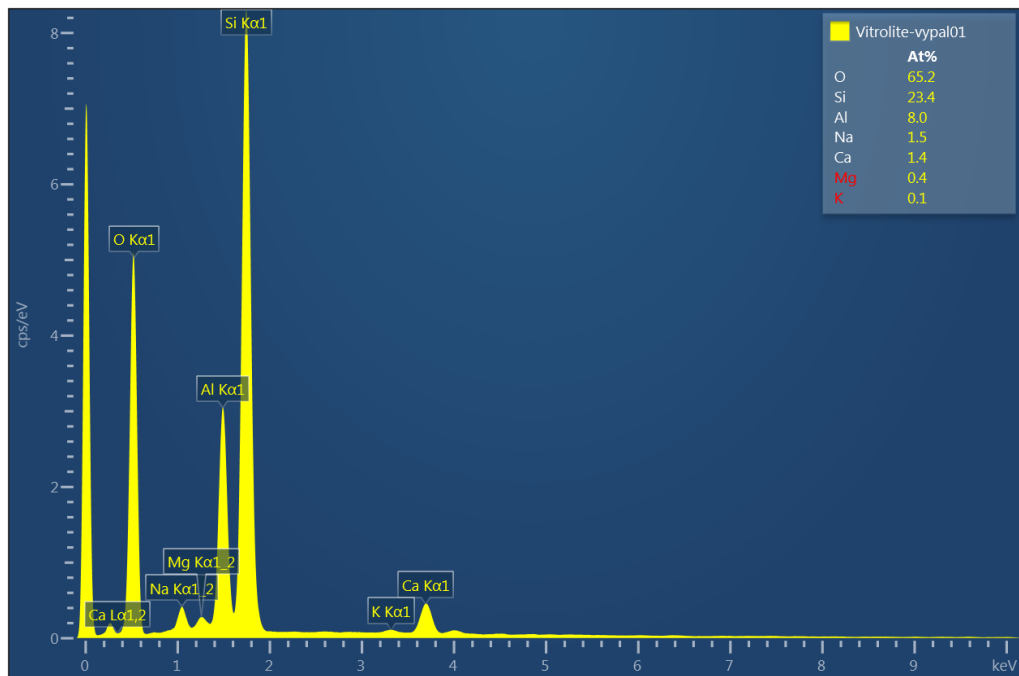


Graf 3.3: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Vitrolite před vypálením.

Vitrolite-vypal01



Obr. 3.6: Snímek materiálu Vitrolite po vypálení.



Graf 3.4: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Vitrolite po vypálení.

### **3.3 Tethon3D - Porcelite**

Porcelite, jedná se o porcelánovou pryskyřici vytvrditelnou UV zářením, vhodná pro 3D tiskárny využívající SLA, DLP nebo CLIP technologie s UV vlnovými délkami 350 – 450 nm. Tento materiál je vhodný pro objekty vyžadující vysoké rozlišení. Je schopen tisku při tloušťce vrstvy 25  $\mu\text{m}$ . Po vypálení mohou být předměty glazovány komerčně dostupnými glazurami. Glazované předměty jsou bezpečné pro potraviny, mikrovlnnou troubu, troubu, myčku a mrazák. Aplikace pro Porcelite zahrnují specializovanou výrobu, výtvarné umění, architekturu, design a další [41].

#### **Konstrukce modelů**

Pevné objekty by měli být duté s doporučenou tloušťkou stěny 1-3 mm a uvnitř modelu by neměla zůstat tekutá pryskyřice. Proto je zapotřebí modely doplnit o otvory, díky kterým může pryskyřice vytéci. V opačném případě by mohla způsobit praskliny na modelu. V případě mřížek je vhodné umístit silnější stěny mřížky na spodní část. Mřížky mohou být také použity jako výplně modelů. Pro snížení potenciálního vzniku prasklin může pomoci zaoblení rohů a hran [41].

#### **Podpory**

Porcelite je těžší než většina 3D pryskyřic. To může vyžadovat zvětšení kontaktní plochy modelů s podporami. Úspěšný tisk zajistí také zvýšení hustoty podpor [41].

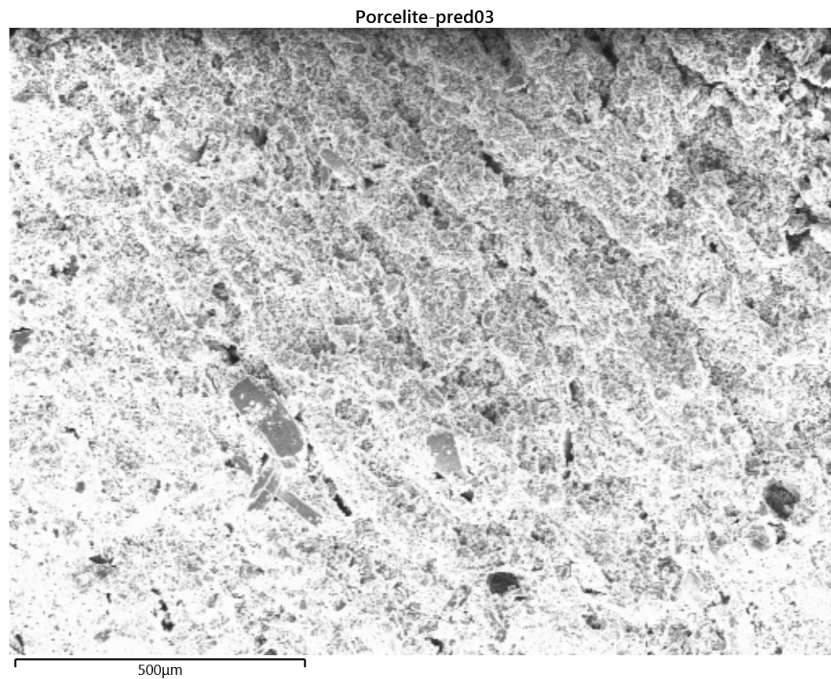
#### **Proces tisku**

Před tiskem je zapotřebí rozmíchat láhev s pryskyřicí po dobu 5 minut a ujistit se, že je všechn keramický materiál dobře rozmíchán. Zároveň je zapotřebí očistit platformu izopropylalkoholem, aby na platformě nebyla žádná pryskyřice, která by mohla nepříznivě ovlivnit přilepení modelů k platformě. Po prvních pěti vrstvách je doporučeno zastavit tisk a zkontrolovat, zda jsou modely přilnuty k platformě. Následně je možné s tiskem pokračovat [41].

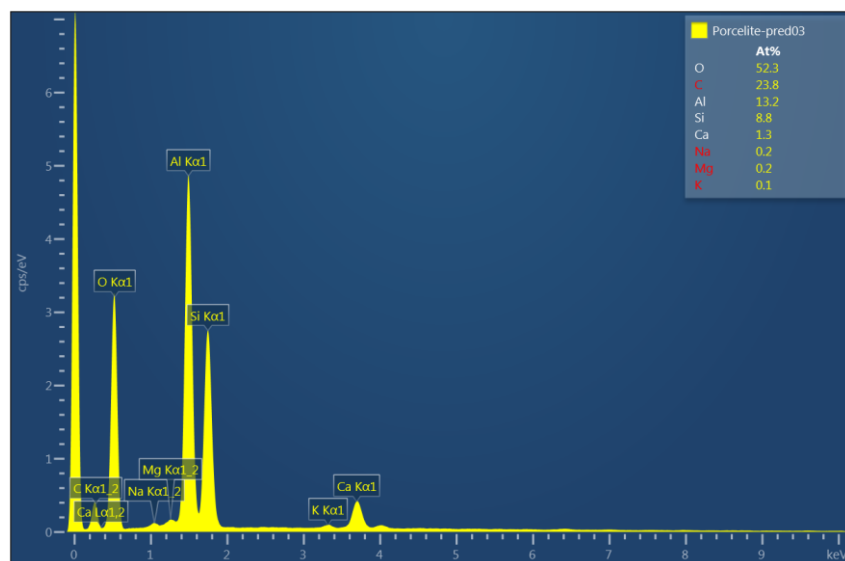
## Chemické složení materiálu

Tab. 3.3: Chemické složení materiálu Porcelite, Tethon3D.

Chemický prvek	Obsah před vypálením [%]	Obsah po vypálení [%]
O	52,3	58,6
Al	13,2	17,7
Si	8,8	11,7
C	23,8	10,1
Ca	1,3	1,6
Mg	0,2	0,4
K	0,1	-

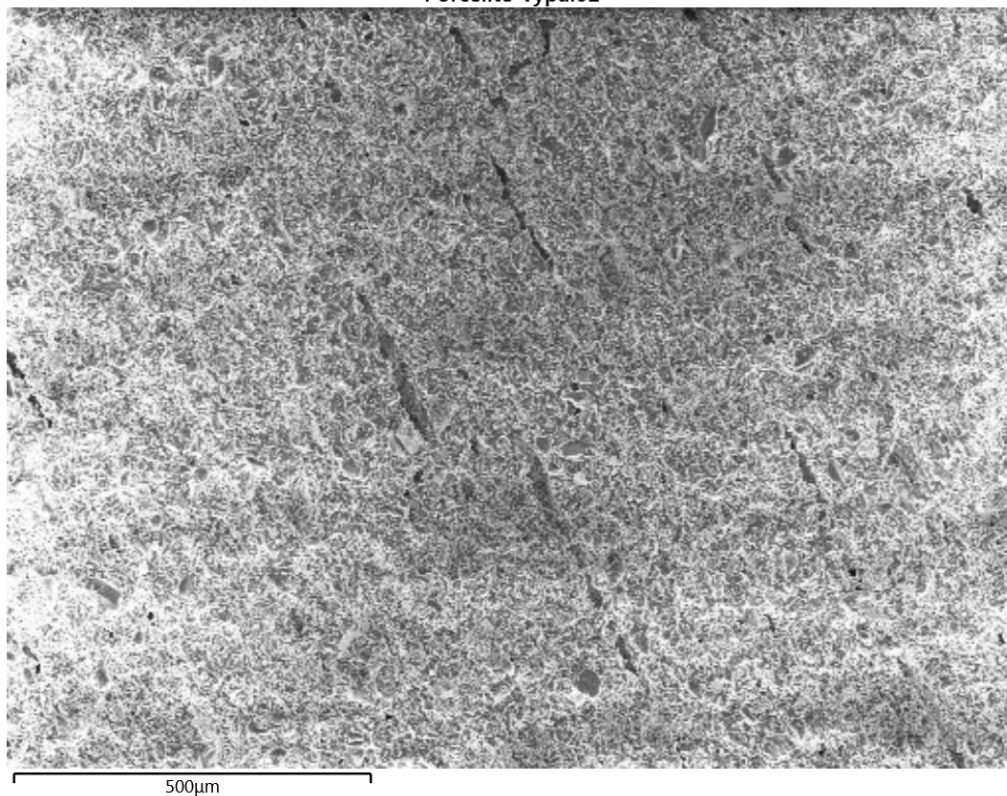


Obr. 3.7: Snímek materiálu Porcelite před vypálením.

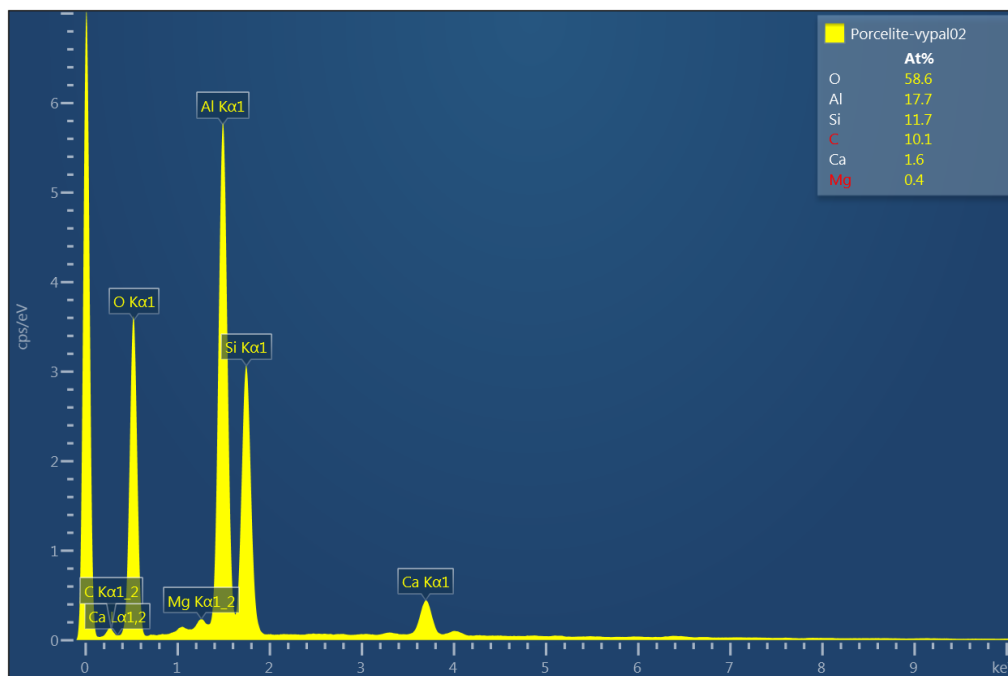


Graf 3.5: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Porcelite před vypálením.

Porcelite-vypal02



Obr. 3.8: Snímek materiálu Porcelite po vypálení.



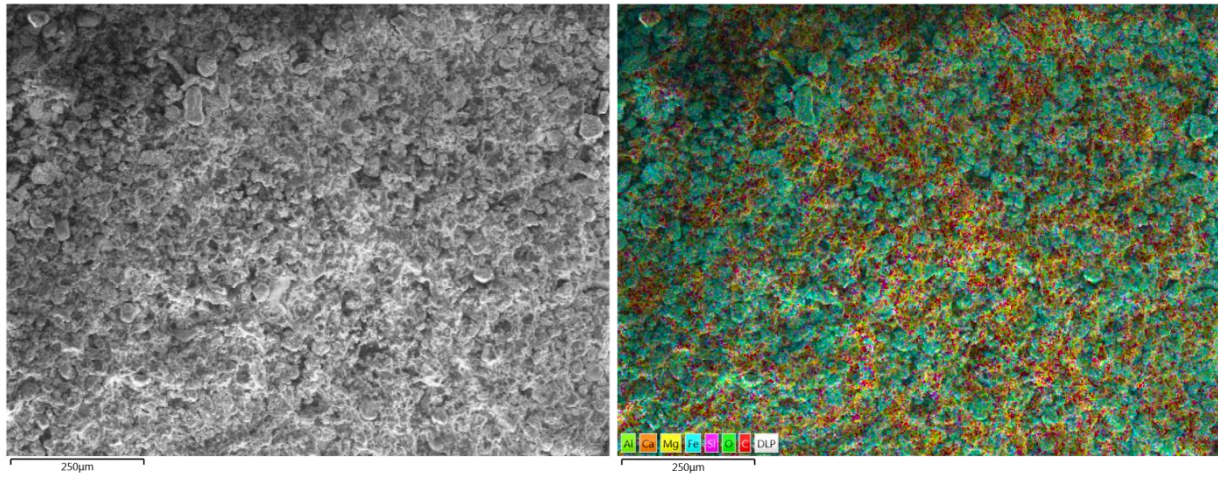
Graf 3.6: Graf zastoupení chemických prvků v materiálu Porcelite po vypálení.

### 3.4 Souhrn chemického složení materiálů

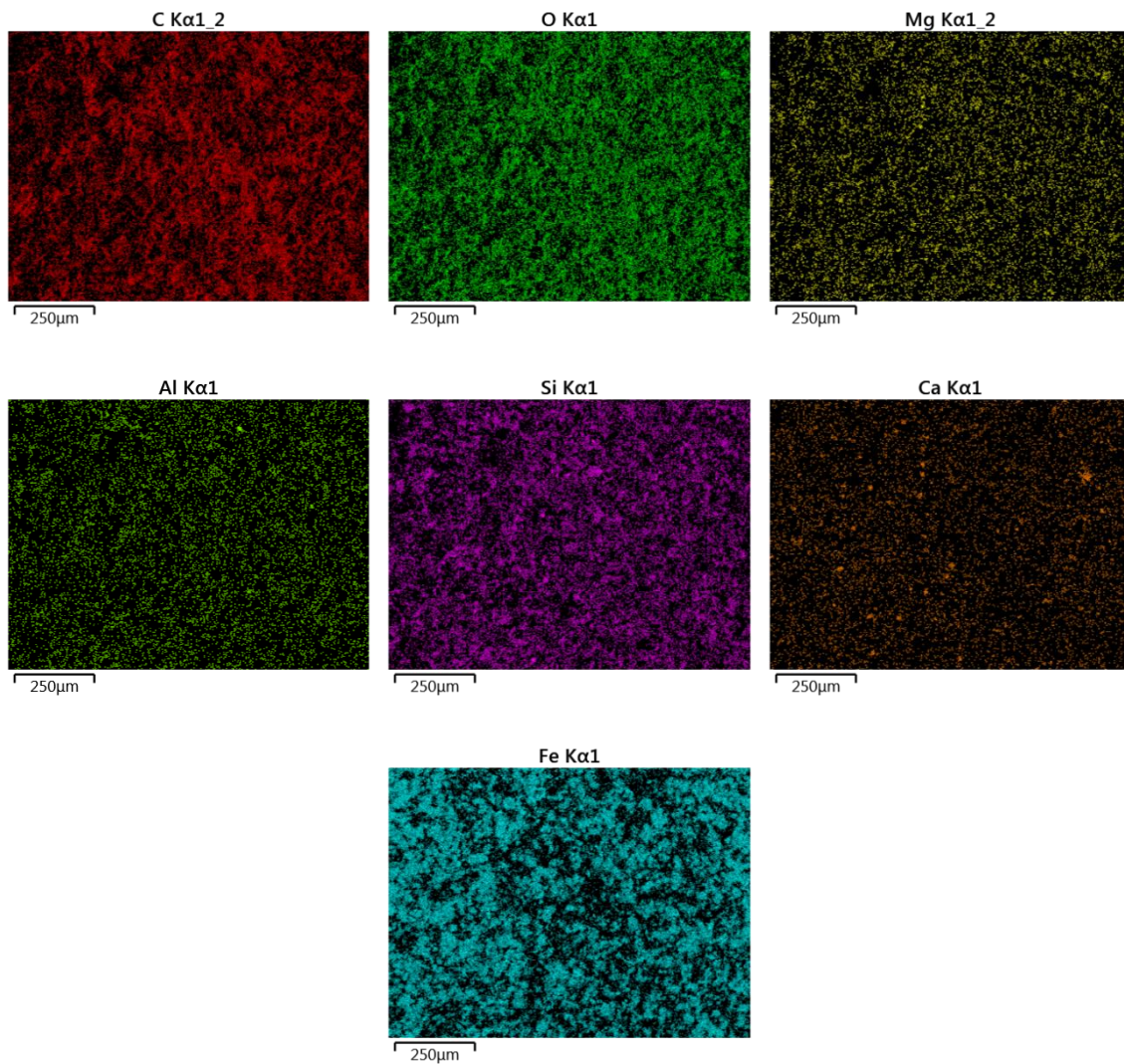
Tab. 3.4: Přehled chemického složení jednotlivých materiálů.

	C [%]	O [%]	Na [%]	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	K [%]	Ca [%]	Cr [%]	Fe [%]
Formlabs_před01	-	51,38	2,79	0,36	4,48	39,16	1,84	-	-	-
Formlabs_před02	14,11	47,31	2,56	-	3,90	30,33	1,50	0,11	-	0,19
Formlabs_před03	17,49	46,41	2,41	-	3,76	28,22	1,50	-	-	0,20
Formlabs_výpal01	-	51,42	3,24	-	5,55	37,69	2,10	-	-	-
Formlabs_výpal02	-	51,55	3,10	-	5,57	37,69	1,82	-	-	-
Formlabs_výpal03	-	52,55	3,03	-	5,32	37,44	1,65	-	-	-
Vitrolite_před01	10,04	49,31	0,91	0,44	9,82	26,95	0,18	2,35	-	-
Vitrolite_před02	10,50	49,29	1,13	0,33	9,54	26,50	0,25	2,48	-	-
Vitrolite_před03	16,45	47,68	0,74	0,37	9,51	23,34	-	1,90	-	-
Vitrolite_výpal01	-	51,59	1,66	0,53	10,63	32,54	0,23	2,83	-	-
Vitrolite_výpal02	-	52,21	1,71	0,62	9,96	32,31	0,21	2,74	0,24	-
Vitrolite_výpal03	-	51,76	1,56	0,45	10,45	32,64	0,30	2,84	-	-
Porcelite_před01	13,94	47,64	-	-	18,49	15,06	0,19	4,68	-	-
Porcelite_před02	14,16	47,15	-	-	20,22	15,14	0,24	2,69	-	0,39
Porcelite_před03	15,89	46,62	0,31	0,24	19,90	13,82	0,32	2,89	-	-
Porcelite_výpal01	-	49,93	-	-	27,97	18,20	0,21	3,68	-	-
Porcelite_výpal02	6,25	48,46	-	0,53	24,63	16,91	-	3,23	-	-
Porcelite_výpal03	7,95	48,57	-	0,44	22,72	16,21	0,19	3,92	-	-





*Obr. 3.9: Snímek materiálu Porcelite z elektronového mikroskopu.*



*Obr. 3.10: Velikost zrn jednotlivých chemických prvků pro materiál Porcelite před vypálením.*

Chemický rozbor všech materiálů poskytl údaje o zastoupení jednotlivých chemických prvků včetně procentuálního podílu látek. Z výsledků, které jsou souhrnně uvedeny v Tab. 3.4, je možné určit, že materiály Ceramic Resin, Formlabs a Vitrolite, Tethon3D jsou na bázi oxidu křemičitého. Materiál Porcelite, Tethon3D je na bázi oxidu hlinitého.

Snímky jednotlivých modelů před vypálením (Obr. 3.3, Obr. 3.5, Obr. 3.7) poukazují na ne zcela celistvou strukturu, která vzniká po procesu tisku modelů. Což by mohlo být zapříčiněno nedostatečným rozmícháním materiálu. Snímky vzorků po vypálení (Obr. 3.4, Obr. 3.6, Obr. 3.8) obsahují trhliny, které vznikly po procesu vypalování vlivem vnitřního pnutí v materiálu a nerovnoměrného promíchání materiálu během procesu tisku.

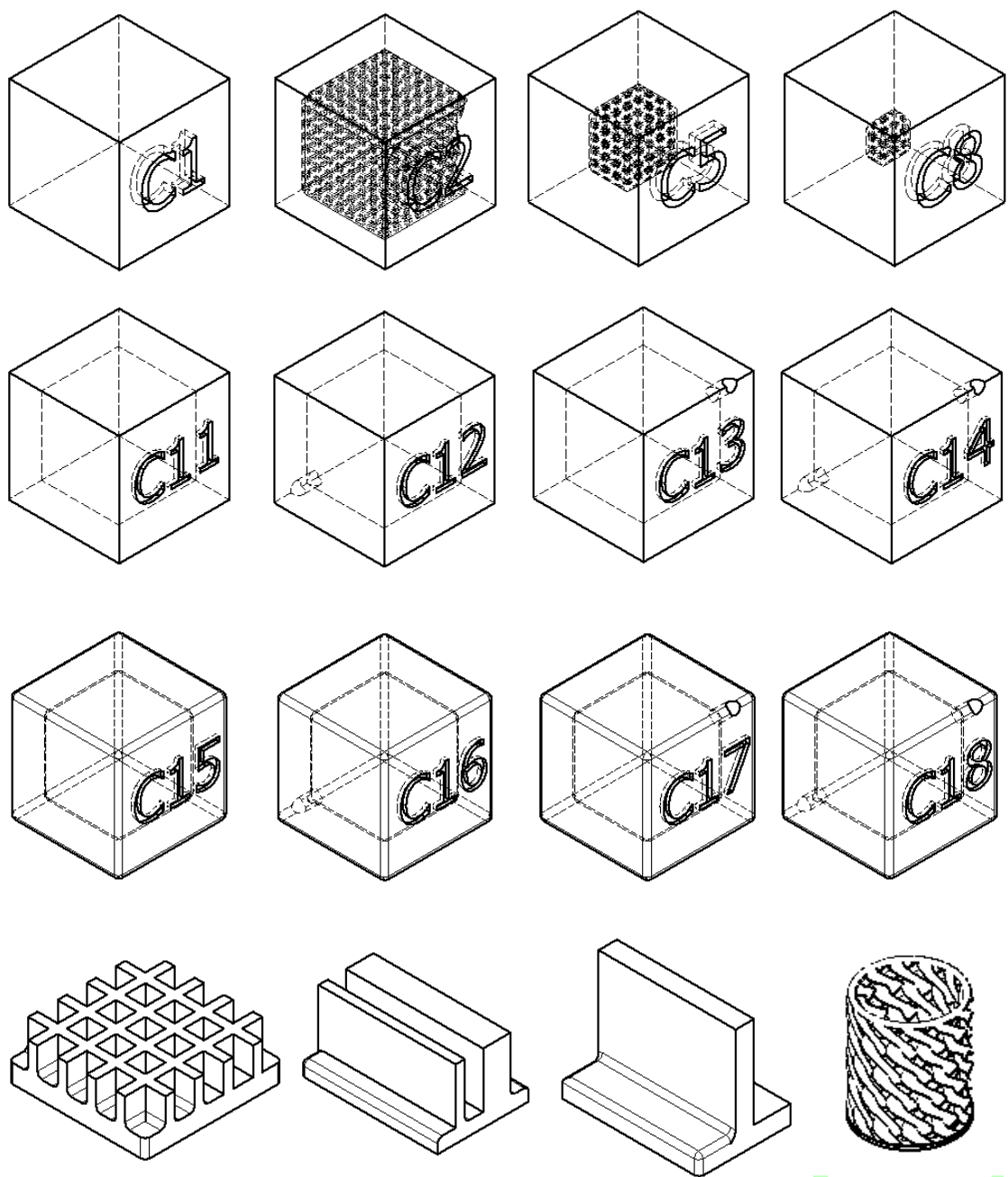
Na elektronovém mikroskopu byla provedena analýza (Obr. 3.9) zobrazující velikosti zrn jednotlivých chemických prvků a jejich distribuci v prostoru pro materiál Porcelite před vypálením. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 3.10. Tyto snímky jsou vhodné pro kvantitativní měření pomocí obrazové analýzy.

## 4 3D data

Modely součástí, které jsou v této práci využity a na kterých se testovaly jejich vlastnosti, nastavení tisku a proces vypalování, byly pro všechny tři materiály shodné. Pracovní označení jednotlivých modelů bylo: **A** pro materiál od společnosti Formlabs, **B** pro materiál Vitrolite od společnosti Tethon3D a poslední označení skupiny modelů bylo **C**, které bylo použito pro materiál Porcelite od společnosti Tethon3D. Během celého experimentu bylo použito více modelů, aby se mohl hodnotit vliv nastavení tisku, procesu vypalování a také samotné konstrukce dílů vzhledem k vlastnostem konečného modelu. Pro lepší přehlednost je seznam modelů s popisem uveden v tabulce (Tab. 4.1) a na obrázku (Obr. 4.1). Důvody a vysvětlení významu použitých modelů je popsán níže v kapitole 7.

*Tab. 4.1 Přehled modelů použitých pro tisk.*

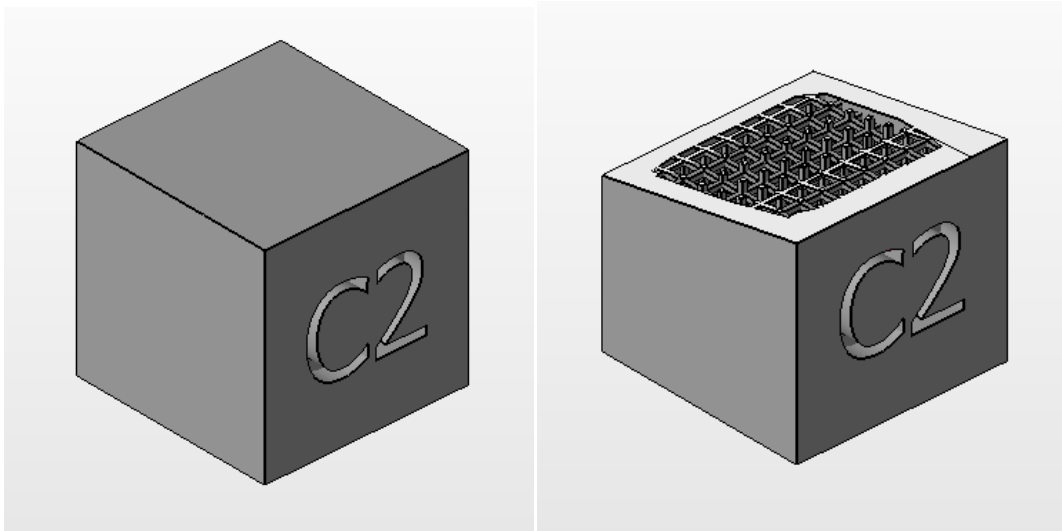
Označení modelu	Tvar modelu	Velikost modelu [mm]	Vnitřní struktura	Poznámka
A1	krychle	10x10x10	plný model	
A2-A4	krychle	10x10x10	mřížka	1 mm tloušťka stěny
A5-A7	krychle	10x10x10	mřížka	2,5 mm tloušťka stěny
A8-A10	krychle	10x10x10	mřížka	3,5 mm tloušťka stěny
A11	skořepina	10x10x10	dutý model	ostré hrany
A12	skořepina	10x10x10	dutý model	ostré hrany, díra dole $\varnothing 1$ mm
A13	skořepina	10x10x10	dutý model	ostré hrany, díra nahoře $\varnothing 1$ mm
A14	skořepina	10x10x10	dutý model	ostré hrany, díra dole i nahoře $\varnothing 1$ mm
A15	skořepina	10x10x10	dutý model	zaoblené hrany
A16	skořepina	10x10x10	dutý model	zaoblené hrany, díra dole $\varnothing 1$ mm
A17	skořepina	10x10x10	dutý model	zaoblené hrany, díra nahoře $\varnothing 1$ mm
A18	skořepina	10x10x10	dutý model	zaoblené hrany, díra dole i nahoře $\varnothing 1$ mm
Model 1	-	-	-	Mřížka
Model 2	-	-	-	Tenká a tlustá stěna
Model 3	-	-	-	Jedna stěna
Model 4	-	-	-	Spirála



Obr. 4.1: Přehled použitých modelů. Zleva C1-C18, Model 1 – Model 4.

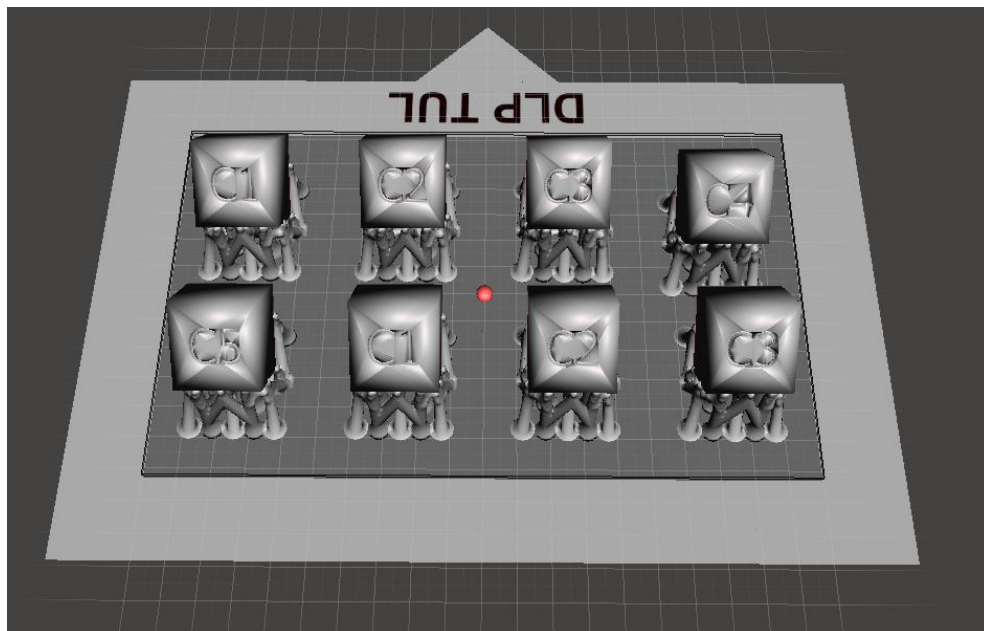
## 4.1 Postup přípravy dat pro tisk

Prvním krokem je příprava každého modelu v CAD softwaru (Obr. 4.2).

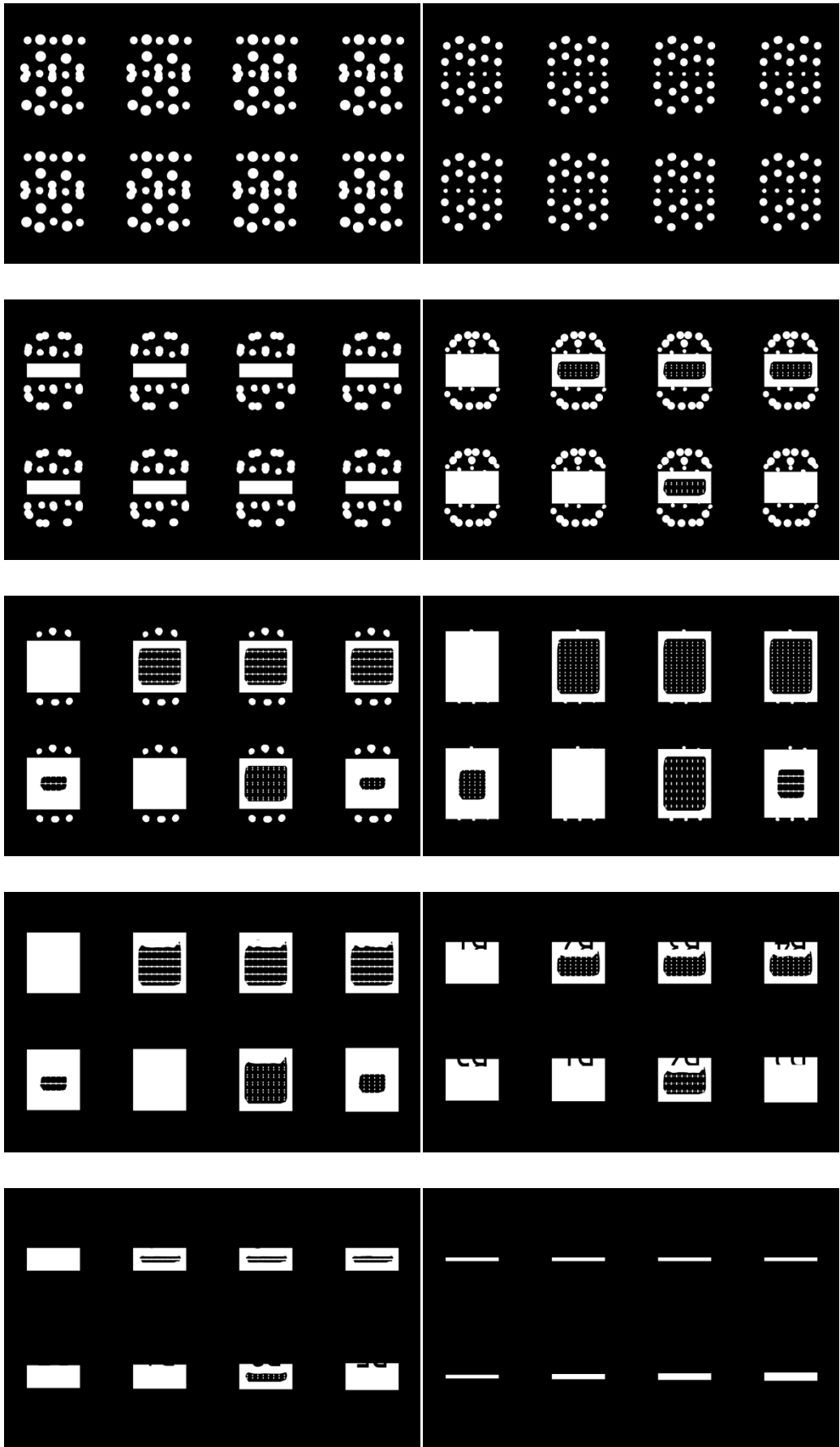


*Obr. 4.2: Připravený model C2 z CAD softwaru.*

Připravené modely jsou doplněny o podpory a umístěny na platformu (Obr. 4.3). Následně je vygenerován STL formát, který se nahraje do WWW aplikace. Dojde k rozřezání modelů na jednotlivé vrstvy v závislosti na zvolené tloušťce vrstvy pro tisk (Obr. 4.4).



*Obr. 4.3: Připravené modely C1-C5 pro tisk na DLP tiskárně.*



Obr. 4.4: Jednotlivé vrstvy modelů B1-B4. Zobrazeno po dvaceti vrstvách.

## 5 Proces vypalování

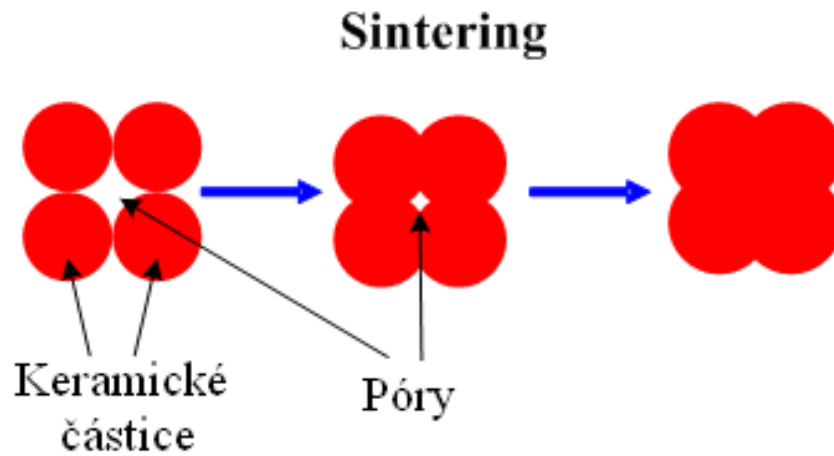
Po samotném 3D tisku se získají tzv. zelené části („green bodies“), které je zapotřebí následně sintrovat (neboli spékat). Prostřednictvím působení tepla dojde k odstranění polymerního materiálu a také ke zhutnění a získání požadovaných mechanických vlastností tištěných částí. Celý proces vypalování je rozdělen na dvě části – debinding a sintrování.

Nejprve se polymer-keramické kompozity teplotně ovlivní při 240°C až 600°C. Během tohoto procesního kroku tzv. „debindingu“, jsou vypáleny organické složky polymeru. Výsledná část, která se skládá z částic prášku stabilizovaných fyzikálními interakcemi, se dále zahřeje. Dojde k sintrování částic dohromady a získá se konečná, zcela hustá keramická část [42].

„Debinding“ je nejkritičtější proces zpracování polymerního materiálu. Použité komponenty mají různé teploty či chování při odpařování nebo rozkladu. Tímto dochází ke snížení hmotnosti i rozměru, což závisí na podílu a složení organických složek a zejména na teplotním cyklu. Kromě toho mají také vliv na chování při debindingu fyzikální charakteristiky keramického prášku, jako je velikost a rozložení částic [42].

Skutečný úspěch debindingu je velmi určen vlastnostmi použitého keramického prášku, jmenovitě geometrií částic a rozložením velikosti – frakce materiálu. Prášek s malým průměrem částic ( $D_{50} < 1 \mu\text{m}$ ) významně zvyšuje riziko interlaminárních trhlin během debinding procesu. Může to být kvůli omezené difuzi vypálených plynů. Póry o velikosti mikrometru vytvářejí síť podobnou síti, která zachycuje unikající plyny uvnitř objemných konstrukcí. Vypálení všech organických látek vede ke snížení hmotnosti, stejně jako ke zmenšení rozměrů [42].

Po procesu debindingu jsou části dále zahřívány na teplotu sintrace použitého keramického prášku, aby se snížila pórovitost a získala se výsledná, zhutněná část. Proces sintrace je znázorněn na Obr. 5.1.



*Obr. 5.1: Proces sintrace [43].*

Pro každý materiál je zapotřebí použít jiný teplotní profil vypalování. Výchozím procesem byl doporučený teplotní profil, který poskytuje výrobce ke každému materiálu. Více informací v kapitole 5.



## 5.1 Formlabs – Ceramic Resin

Doporučený proces vypalování výrobcem Formlabs je zobrazen v grafu (Graf 5.1) a tabulce (Tab. 5.1). Tento materiál by měl být vypalován na teplotu 1271°C. Níže jsou podrobněji popsány jednotlivé fáze a k čemu během nich dochází dle výrobce Formlabs [21].

### Rampa 1

Během procesu „Rampa 1“ jsou modely teplotně ovlivněny na teplotu 240°C [21].

### Vypalování

Keramická pryskyřice je vytištěna s polymerní matricí. Ta je odstraněna během fáze vypalování při teplotě 240°C. Keramické částice ještě nebyly roztaveny a jsou volně drženy pohromadě jako práškové těleso. Fáze vypalování by měla být dostatečně dlouhá, aby se zcela odstranila polymerní matrice. Částečné vypálení během první fáze způsobí zvýšení tlaku par, což má za následek vznik trhlin a zkroucení jak páry unikají. Tenčí stěny (<6 mm) vyžadují kratší čas vypalování a mají tendenci mít lepší kvalitu povrchu a vyšší přesnost. Silné části (>10 mm) vyžadují velmi dlouhé doby vypalování. Výdrž na teplotě 240°C by měla být nastavena na základně maximální tloušťky příčného řezu jakéhokoliv modelu. Bez problémů mohou být modely být drženy na teplotě vypalování po delší dobu. Krátká sekundární výdrž při teplotě 300°C zajišťuje, že je všechen polymer vypálen ještě před fází „Rampa 2“ [21].

### Rampa 2

Během této fáze dojde ke zvýšení teploty, která předchází sintrování. Formlabs doporučuje rampu rychlosti 3°C za minutu, aby se modely rovnoměrně zahřály. Modelům s velkými rozdíly v tloušťkách stěn prospívají pomalejší rychlosti rampy [21].

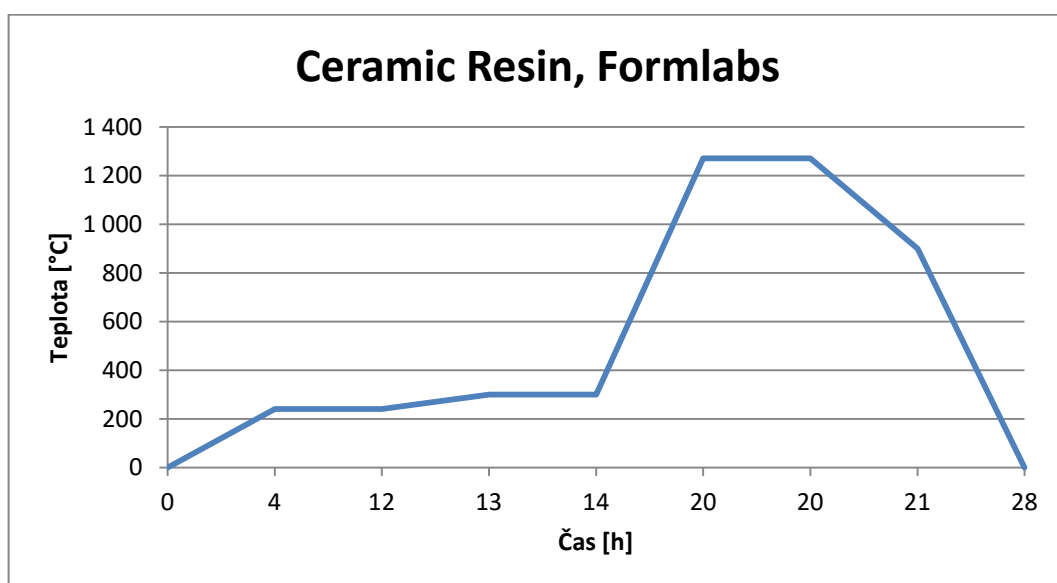
### Sintrování

Během procesu sintrování tvoří částice oxidu křemičitého v keramické pryskyřici pevnou část. Částice se stanou částečně tekuté, což jim dovoluje se smrštít dohromady a stát se hustější. Keramické smrštění během procesu sintrace je 15%, dosahující až 90% hustoty. Když je keramická pryskyřice správně sintrována, materiál je lehce průsvitný a vodotěsný. Vytištěné modely jsou vypalovány při teplotách mezi 1250 – 1300 °C. Formlabs doporučuje výdrž na teplotě 1271°C po dobu 5 minut. Snížení maximální

teploty nebo doby výdrže na teplotě bude mít za následek poréznější a méně sklovité modely [21].

## Ochlazování

Mezi maximální teplotou a 900°C dochází k volnému ochlazení. Tato rychlá fáze chlazení zamezuje dalšímu propadu modelů. Kontrolované ochlazení rychlostí 1°C za minutu mezi teplotami 900°C a pokojovou teplotou zabraňuje vzniku strukturálních prasklin [21].



Graf 5.1 : Graf průběhu sintrace pro materiál Ceramic Resin od společnosti Formlabs [21].

Tab. 5.1 : Tabulka průběhu sintrace pro materiál Ceramic Resin od společnosti Formlabs [21].

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
0	240	240	Rampa 1
240	240	480	
240	300	60	Vypalování
300	300	60	
300	1271	333	Rampa 2
1271	1271	5	Sintrování
1271	900	60	Ochlazování
900	0	450	

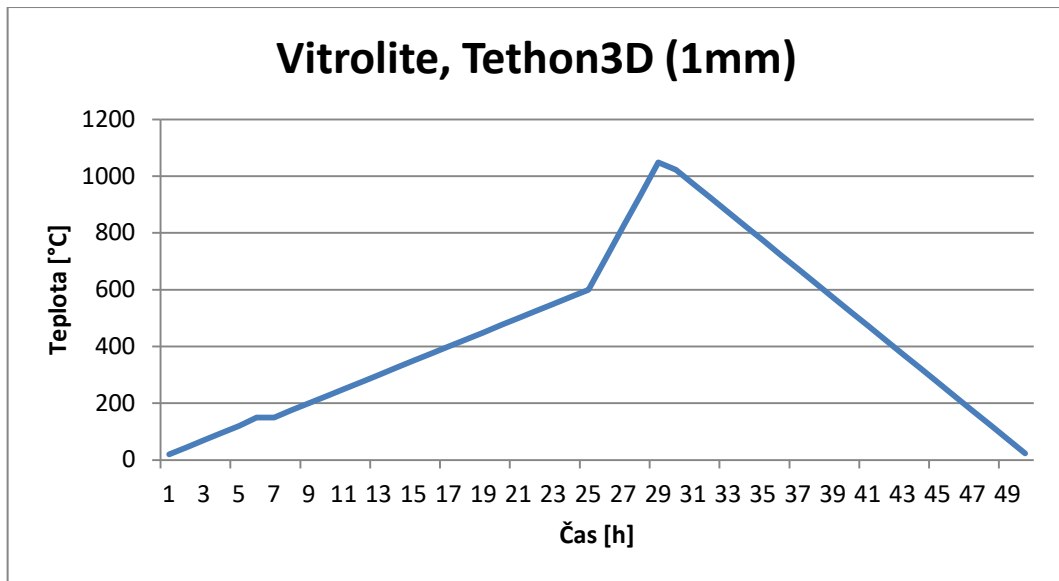
## 5.2 Tethon3D – Vitrolite

Výrobce materiálu-Tethon3D udává doporučený teplotní profil pro vypalování dílů. Doporučený průběh je uveden v grafu (Graf 5.2) a tabulce (Tab. 5.2) pro modely s tloušťkou stěny 1 mm. Modely s tloušťkou stěny větší než 5 mm mají teplotní profil zobrazený v grafu (Graf 5.3) a tabulce (Tab. 5.3) [41].

Tento materiál by měl být vypalován na teplotu 1060-1093°C. Konečná teplota závisí na požadované povrchové úpravě. Pro matný bílý povrch je zapotřebí dosáhnout teploty 1060°C, pro pololesklý povrch je potřeba minimálně teplota 1076°C. Pro Vitrolite není vhodné používat redukční spalovací prostředí. Během procesu vypalování je zapotřebí používat oxidované prostředí. Smrštění, které probíhá při vypalování, závisí na geometrii modelu a tloušťce stěn [41].

Vitrolite musí být vypalován pomalu v rozmezí teplot 176-483°C. Tím je zajištěno, že veškerý plyn unikne z objektů. Příliš rychlé vypalování způsobí, že objekt bude nafouknut a objeví se praskliny. Během vypalování musí být zaručeno dobré odvětrávání prostoru pece a zabráněno vdechování vzniklých výparů. Vytištěné modely mohou být podepřeny během vypalování, aby se předešlo jejich deformaci. Je také možné nechat na modelech podpory, které jsou použity pro proces tisku a / nebo je umístit na tenkou nízkoteplotní hliněnou desku. Volba závisí na konstrukci modelů (nebezpečí deformace, základní konstrukce, celkové velikosti). Nízkoteplotní hliněná deska nebo podpůrná konstrukce pomáhá objektům při smrštění a zabraňuje jejich rozbití a deformaci [41].

**Teplotní profil pro modely s tloušťkou stěny 1 mm.**

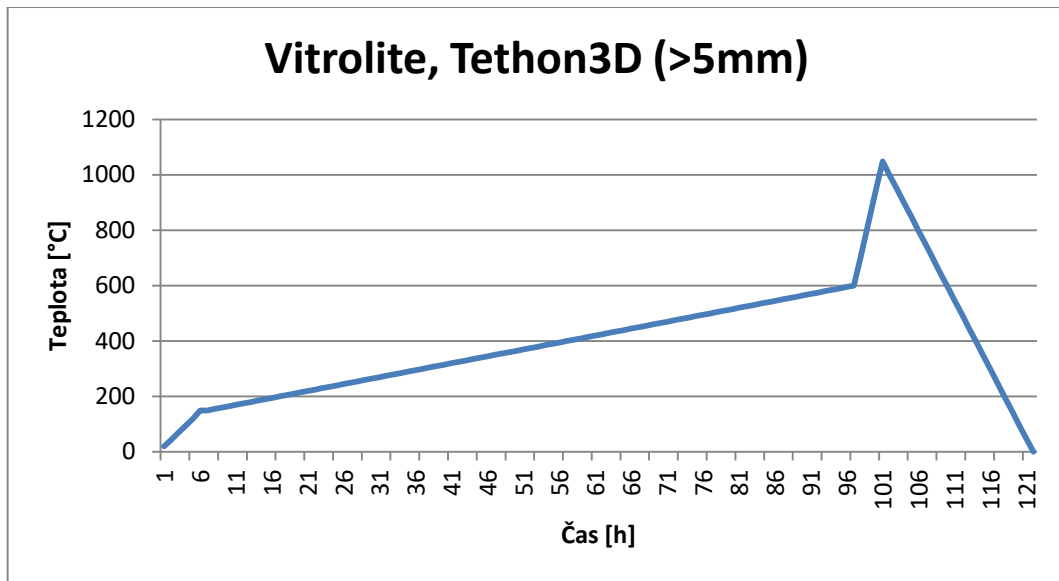


*Graf 5.2 : Graf průběhu sintrace pro materiál Vitrolite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny 1mm [41].*

*Tab. 5.2: Tabulka procesu sintrace pro materiál Vitrolite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny 1 mm [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	1080	Vypalování
600	1060	246	Sintrování
1060	20	-	Ochlazování

**Teplotní profil pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm.**



*Graf 5.3: Graf průběhu sintrace pro materiál Vitrolite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm [41].*

*Tab. 5.3: Tabulka procesu sintrace pro materiál Vitrolite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	5400	Vypalování
600	1060	246	Sintrování
1060	20	-	Ochlazování

### 5.3 Tethon3D – Porcelite

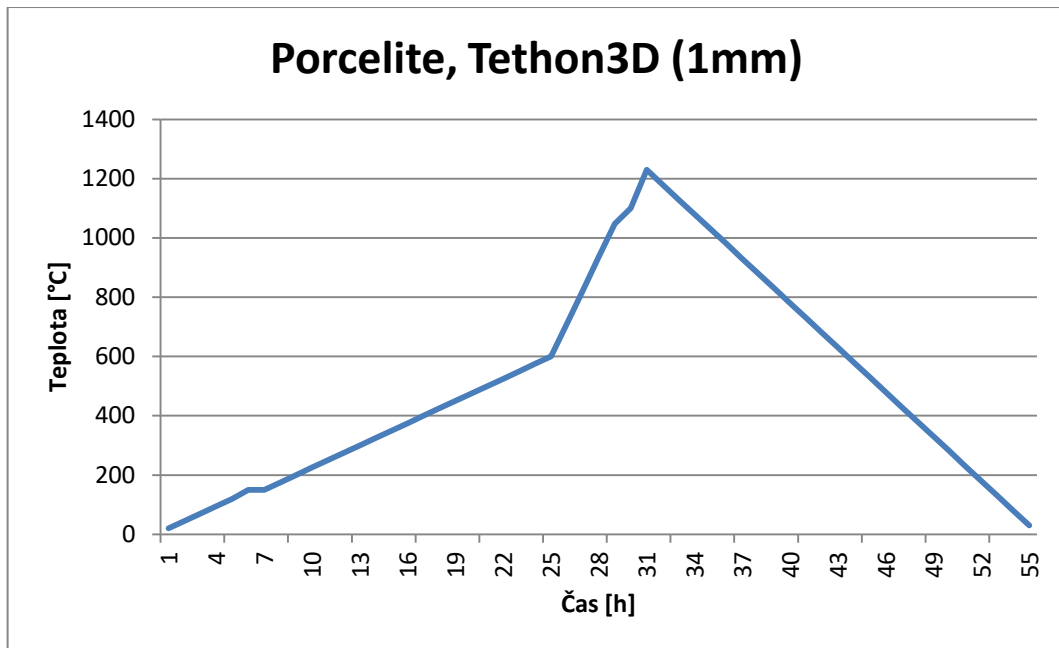
Pro materiál Porcelite je uveden specifický teplotní profil pro vypalování. Doporučený proces vypalování od výrobce Tethon3D pro Porcelite a modely s tloušťkou stěny 1 mm je uveden v grafu (Graf 5.4) a tabulce (Tab. 5.4). Pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm je určený teplotní profil v grafu (Graf 5.5) a tabulce (Tab. 5.5) [41].

První proces vypalování po tisku musí být v oxidovaném prostředí (ne v redukčním vypalovacím prostředí). Porcelite se během vypalování smršťuje a díly dosahují smrštění mezi 13%-17%. To závisí na geometrii modelů a tloušťce vrstvy [41].

Porcelite musí být vypalován pomalu mezi 176-483°C. To zaručí, že všechny plyny unikne z modelů. Naopak příliš rychlé vypalování způsobí nafouknutí a trhliny na modelech. Během vypalování musí být zaručeno dobré odvětrávání prostoru pece a zabráněno vdechování vzniklých výparů. Vytisknuté modely mohou být podepřeny během vypalování, aby se zabránilo jejich deformaci. Je také možné nechat na modelech podpory, které jsou použity pro proces tisku a / nebo je umístit na tenkou hliněnou desku. Volba závisí na konstrukci modelů (nebezpečí deformace, základní konstrukce, celkové velikosti). Přírodní hliněná deska nebo podpůrná konstrukce pomáhá objektům při smrštění a zabraňuje jejich rozbití a deformaci [41].

Pro materiál Porcelite byl upraven teplotní profil pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm. V grafu (Graf 5.6) a tabulce (Tab. 5.6) je upravený profil na maximální hodnotu 1400°C. V grafu (Graf 5.7) a tabulce (Tab. 5.7) je upravený profil na maximální hodnotu 1600°C. Více informací o upravených teplotních profilech v kapitole 7 [41].

**Teplotní profil doporučený výrobcem pro modely s tloušťkou stěny 1mm.**

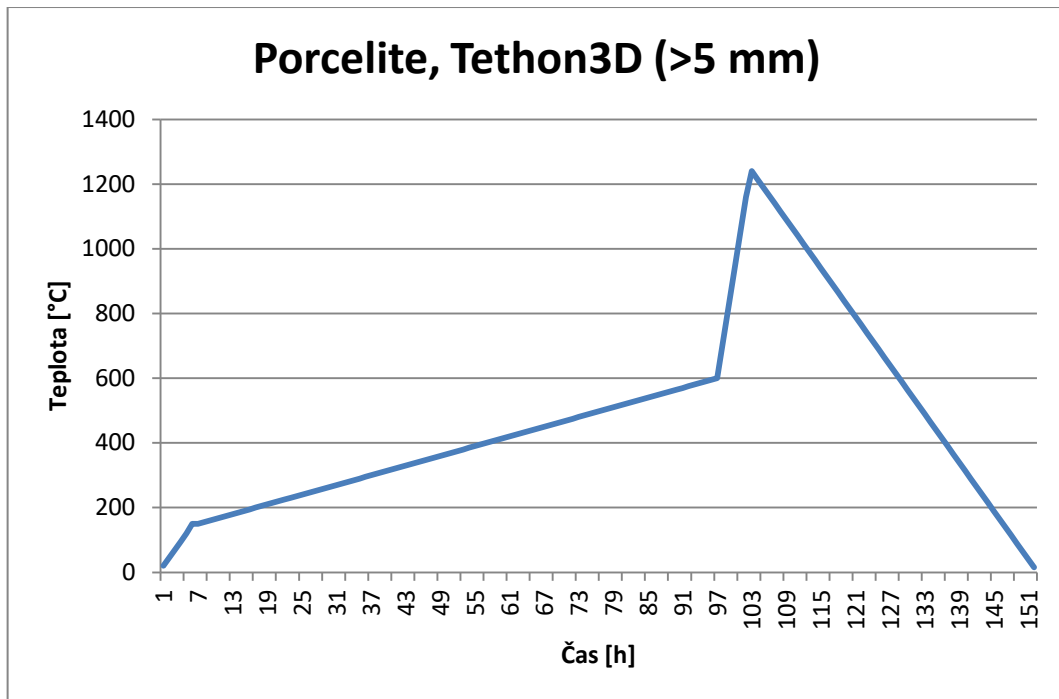


*Graf 5.4: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny 1 mm [41].*

*Tab. 5.4: Tabulka procesu sintrace pro materiál Porcelite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny 1 mm [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	1080	Vypalování
600	1100	268	Rampa 2
1100	1240	65	Sintrování
1240	20	-	Ochlazování

**Teplotní profil doporučený výrobcem pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm.**



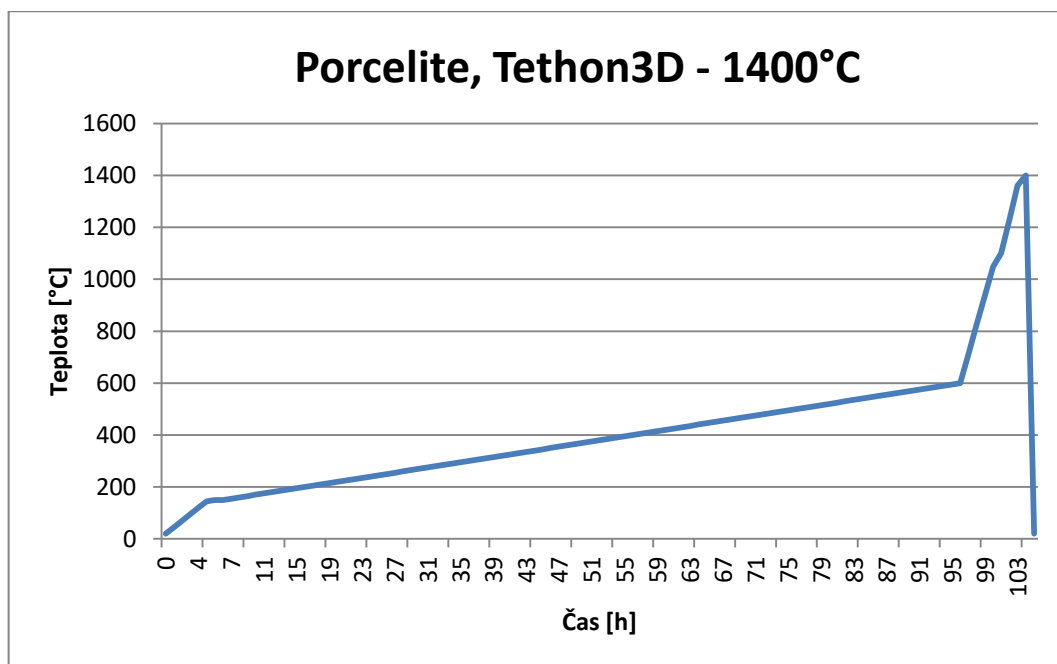
*Graf 5.5: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm [41].*

*Tab. 5.5: Tabulka procesu sintrace pro materiál Porcelite od společnosti Tethon3D pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	5400	Vypalování
600	1100	268	Rampa 2
1100	1240	65	Sintrování
1240	20	-	Ochlazování



**Upravený teplotní profil doporučený výrobcem pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm na maximální teplotu 1400°C.**

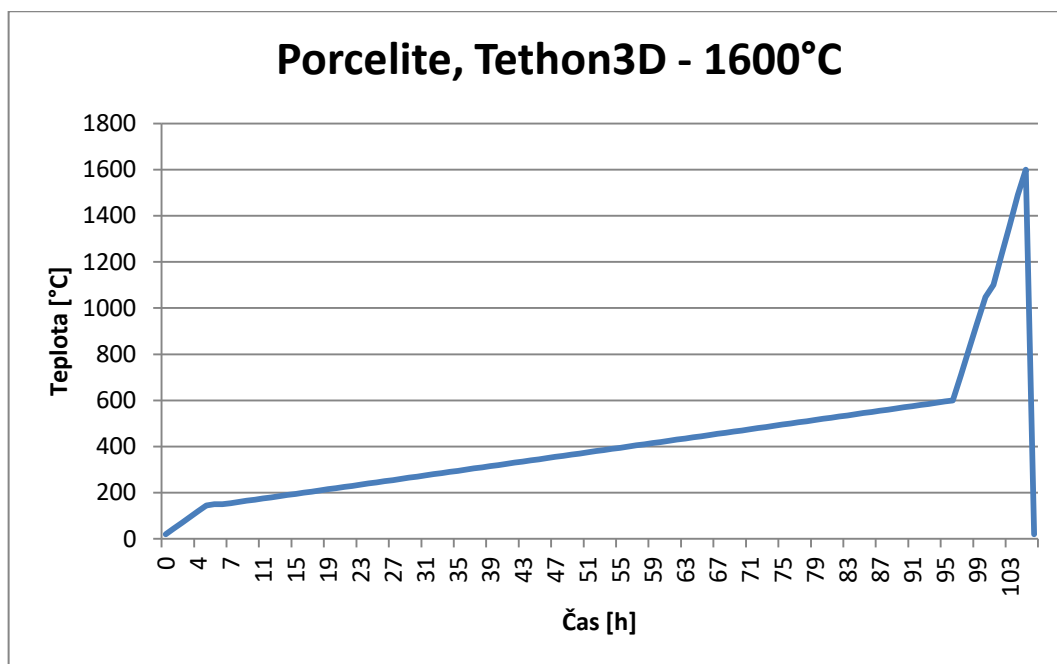


*Graf 5.6: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1400°C [41].*

*Tab. 5.6: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1400°C [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150	150	60	
150	600	5400	Vypalování
600	1100	268	Rampa 2
1100	1400	138	Sintrování
1400	20	-	Ochlazování

**Upravený teplotní profil doporučený výrobcem pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm na maximální teplotu 1600°C.**

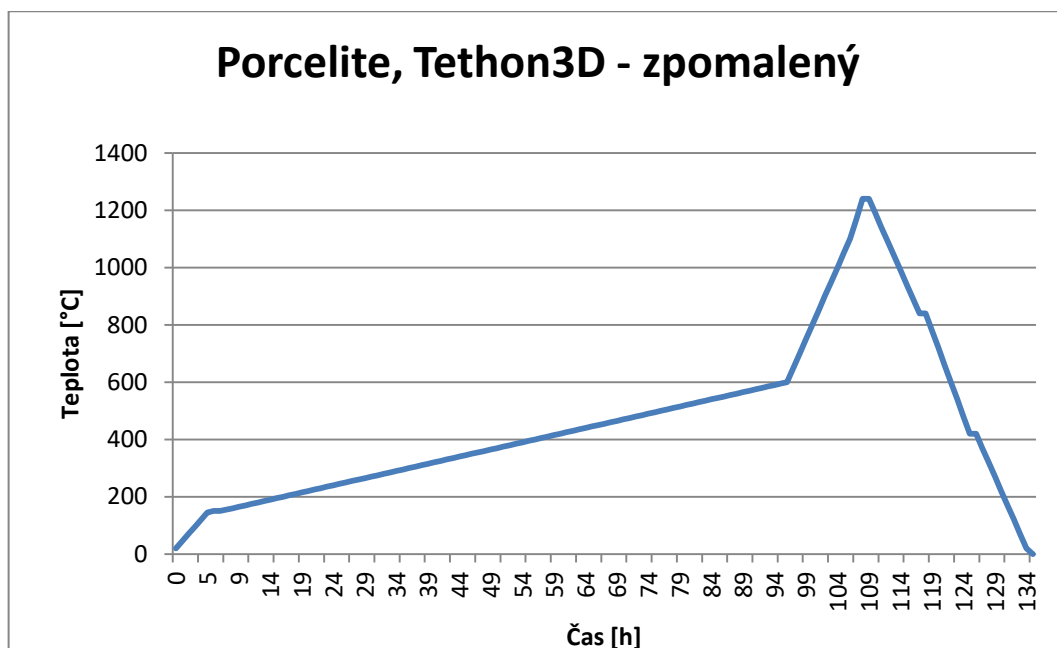


*Graf 5.7: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1600°C [41].*

*Tab. 5.7: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm upravený na maximální teplotu 1600°C [41].*

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	5400	Vypalování
600	1100	268	Rampa 2
1100	1600	231	Sintrování
1600	20	-	Ochlazování

Upravený teplotní profil doporučený výrobcem pro modely s tloušťkou stěny nad 5 mm s pomalejším průběhem zahřívání.



Graf 5.8: Graf průběhu sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm s pomalejším průběhem zahřívání [41].

Tab. 5.8: Průběh sintrace pro materiál Porcelite (Tethon3D) pro části s tloušťkou stěny více než 5 mm s pomalejším průběhem zahřívání [41].

Počáteční teplota [°C]	Koncová teplota [°C]	Čas [min]	Fáze
20	150	312	Rampa 1
150		60	
150	600	5400	Vypalování
600	1100	600	Rampa 2
1100	1240	120	Sintrování
1240		60	
1240	840	480	Ochlazování
840	420	420	
420	20	480	

## 6 Měření

### 6.1 TGA analýza

Metody termické analýzy jsou jedny z nejdůležitějších fyzikálně-chemických technik sloužících k analýze širokého spektra materiálů, mezi které patří například kovy, polymery, organické i anorganické látky, biologické molekuly a biopolymery a další. Princip těchto metod je jednoduchý – zkoumaný materiál je podroben teplotnímu režimu (ohřev, chlazení, konstantní teplota nebo jejich kombinace) a monitorována je změna vlastnosti materiálu (teplota, hmotnost, rozměry a další), [44].

Mezi metody termické analýzy patří termogravimetrická analýza (TGA), nebo-li termogravimetrie. Vzorek materiálu je vystaven tepelnému namáhání a na mikrováhách je pozorována změna jeho hmotnosti. Atmosféra, ve které měření probíhá je volitelná. Volíme buďto inertní prostředí (např. dusík, argon) nebo oxidační prostředí (nejjednodušší je použití vzduchu). Termogravimetrie tedy snadno a rychle stanovuje tepelnou nebo tepelně-oxidační stabilitu vzorku, pomocí analýzy kroků degradace materiálu je pak možno usuzovat jeho složení, obsah vlhkosti, obsah organické hmoty a anorganické hmoty. Složitější experimenty pak umožňují také odhad časové stability některých materiálů při zvolené teplotě. Měřit lze od laboratorní teploty do vysokých teplot, 1000 až 1600°C podle typu přístroje. Novější přístroje umožňují tzv. vysoce rozlišovací termogravimetrie, při níž je rychlost ohřevu závislá na chování samotného vzorku a umožňuje efektivněji rozlišit případný průběh dvou procesů naráz. Je-li potřeba zjistit, jaké látky se ze vzorku v průběhu tepelného namáhání uvolňují, lze s výhodou použít termogravimetrii kombinovanou s infračervenou spektrometrií [44].

Termogravimetrická analýza byla provedena na materiálech – Ceramic Resin, Vitrolite a Porcelite. Teplotní program byl prováděn v inertním prostředí (N<sub>2</sub>) pro teploty 50-600°C, následně bylo zvoleno aktivní prostředí (O<sub>2</sub>) pro rozsah teplot 600-800°C.

Pro materiál Ceramic Resin (Formlabs) byla zjištěna střední hodnota degradační teploty 427,40°C, s počátkem degradace při 224,64°C a konec degradace při 594,47°C. Množství nespalitelného zbytku, tedy keramiky je 69,63%.

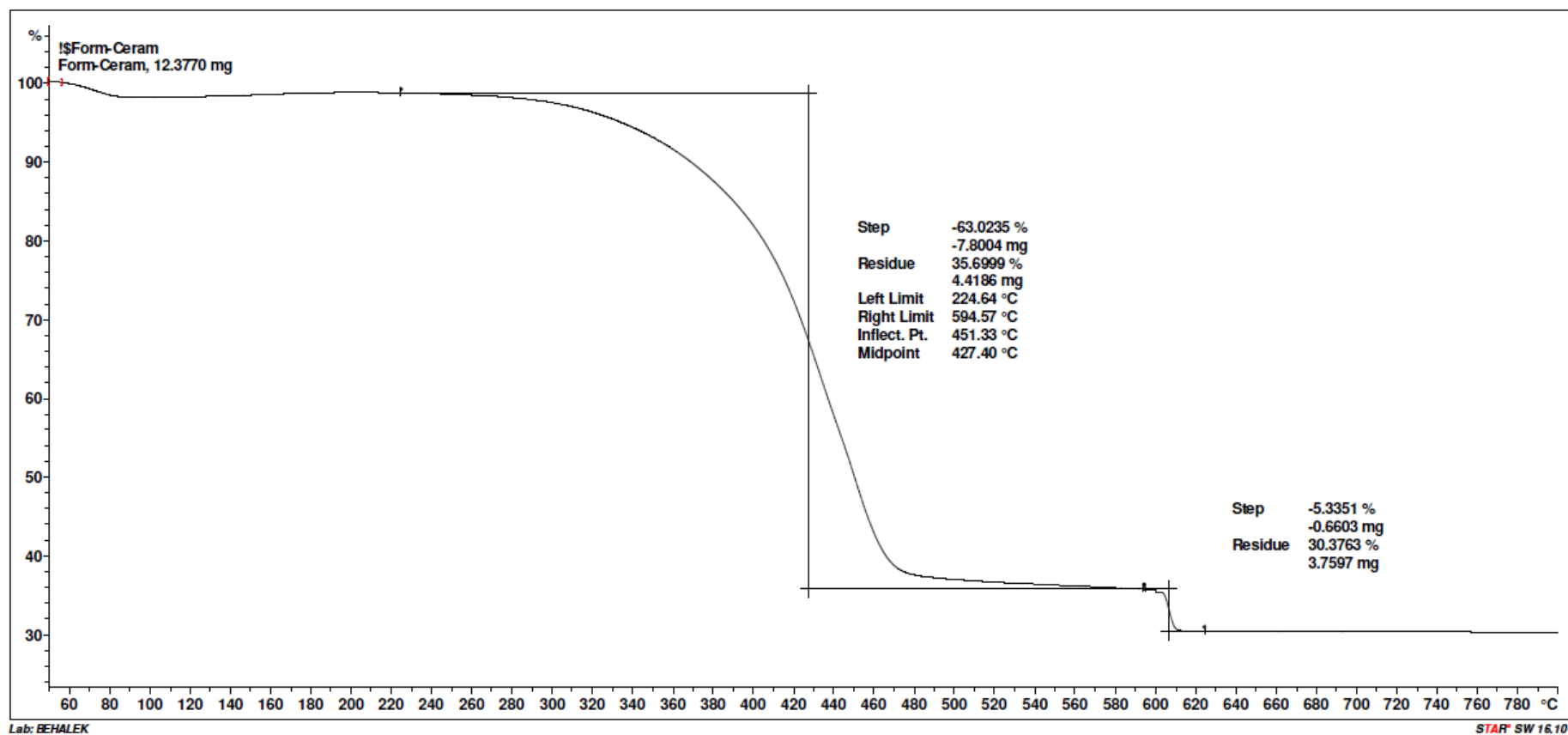
Materiál Vitrolite (Tethon3D) má střední hodnotu degradační teploty 420,31°C. Počátek degradace je při teplotě 221,80°C a konec degradace při 592,14°C. Množství zbylého nespalitelného zbytku, tedy keramiky je 62,69%.

U materiálu Porcelite (Tethon3D) bylo zjištěno, že střední hodnota degradační teploty je při 426,41°C. Počátek degradace je již při teplotě 210,86°C, konec degradace při 599,03°C. Množství nespalitelného zbytku-keramiky je 63,07%. Všechny zjištěné hodnoty jsou pro lepší přehlednost shrnuty v tabulce (Tab. 6.1).

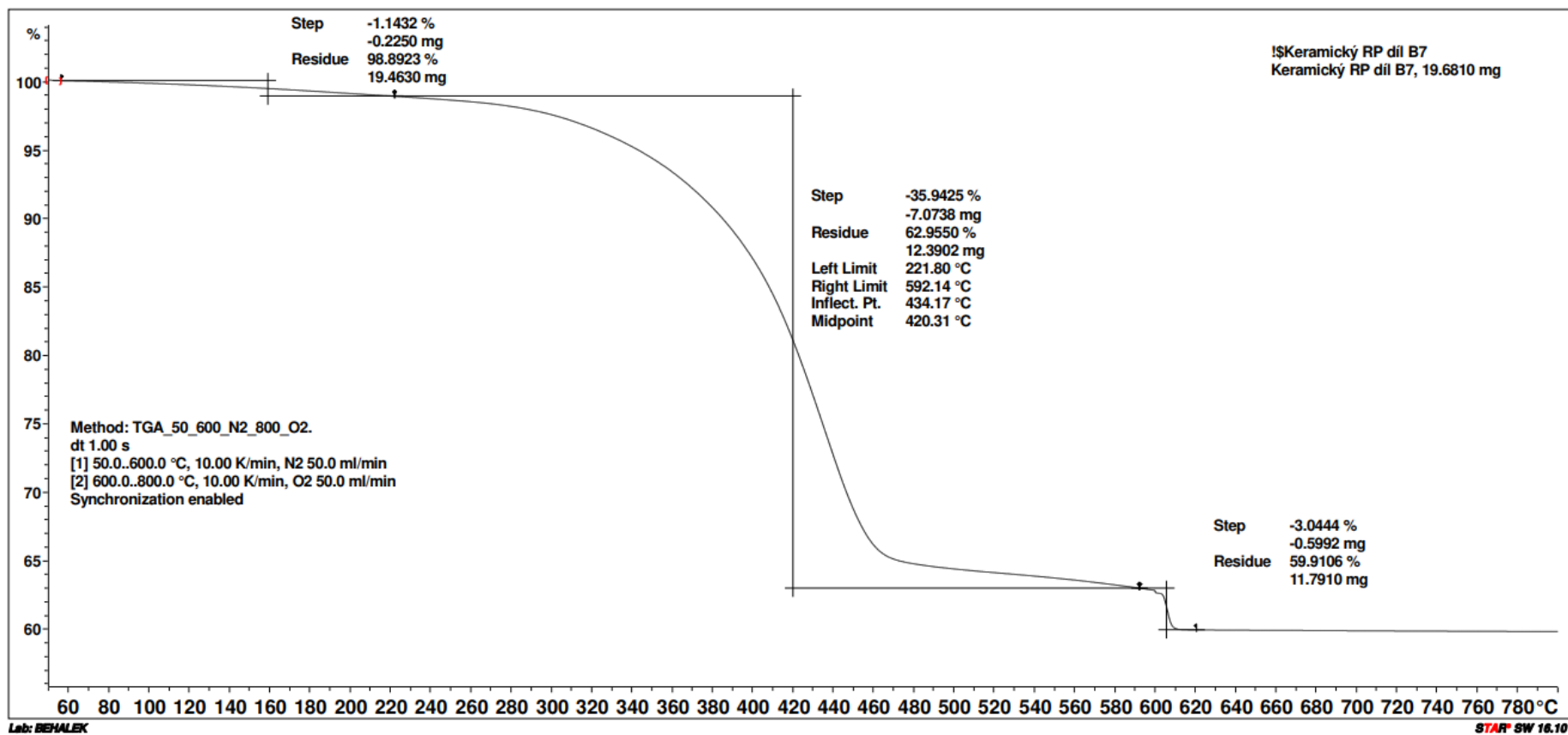
*Tab. 6.1: Výsledky termogravimetrické analýzy.*

	Ceramic Resin (Formlabs)	Vitrolite (Tethon3D)	Porcelite (Tethon3D)
Počátek degradace [°C]	224,64	221,80	210,86
Střední hodnota degradační teploty [°C]	427,40	420,31	426,41
Konec degradace [°C]	594,57	592,14	599,03
Množství keramiky [%]	69,63	62,96	63,07
Množství polymeru [%]	30,37	35,94	36,93

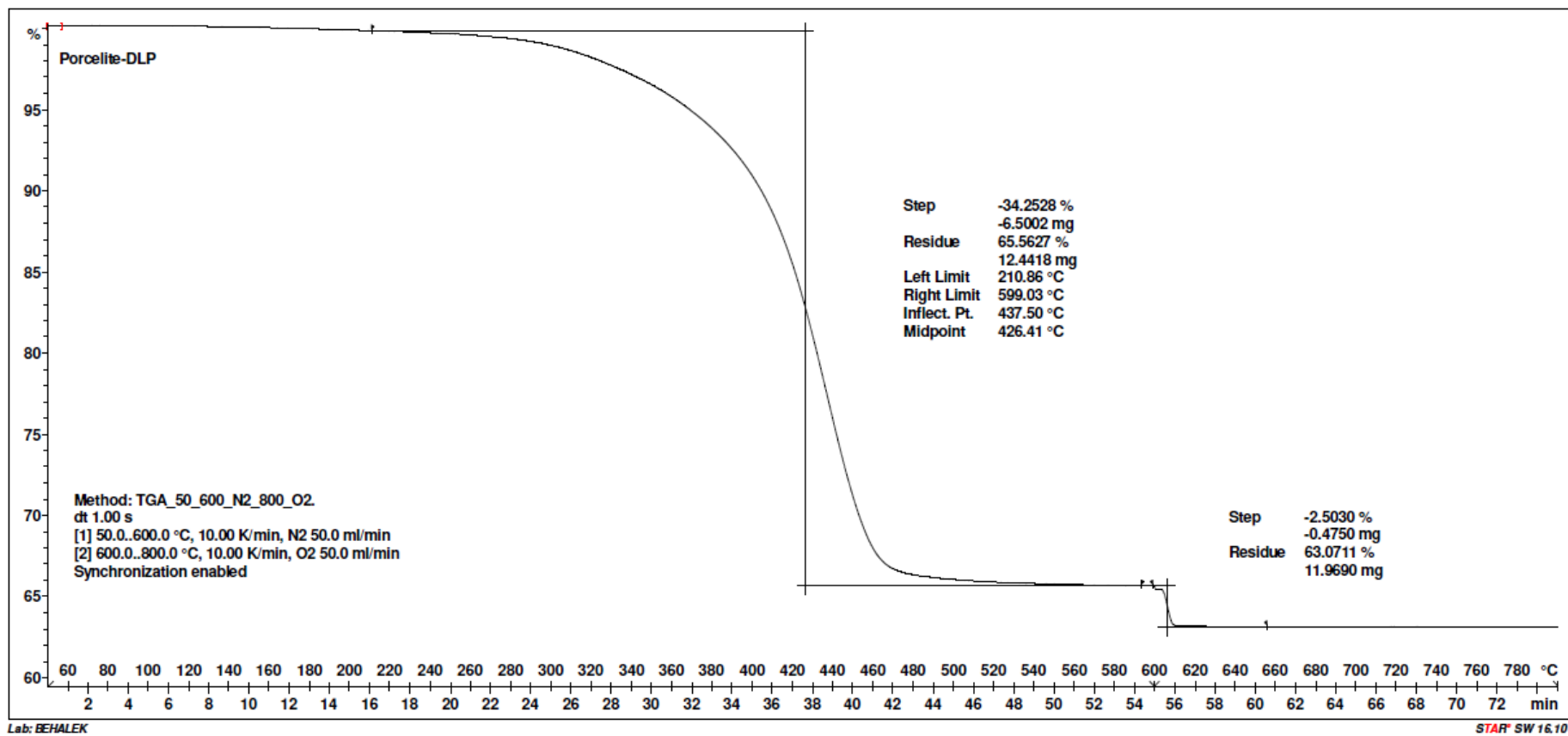
Podrobné výsledky provedené analýzy jsou uvedeny v grafu (Graf 6.1) pro materiál Ceramic Resin od firmy Formlabs. V grafu (Graf 6.2) jsou vidět výsledky pro materiál Vitrolite a v grafu (Graf 6.3) pro Porcelite od firmy Tethon3D.



Graf 6.1: TGA pro materiál Ceramic Resin, Formlabs.



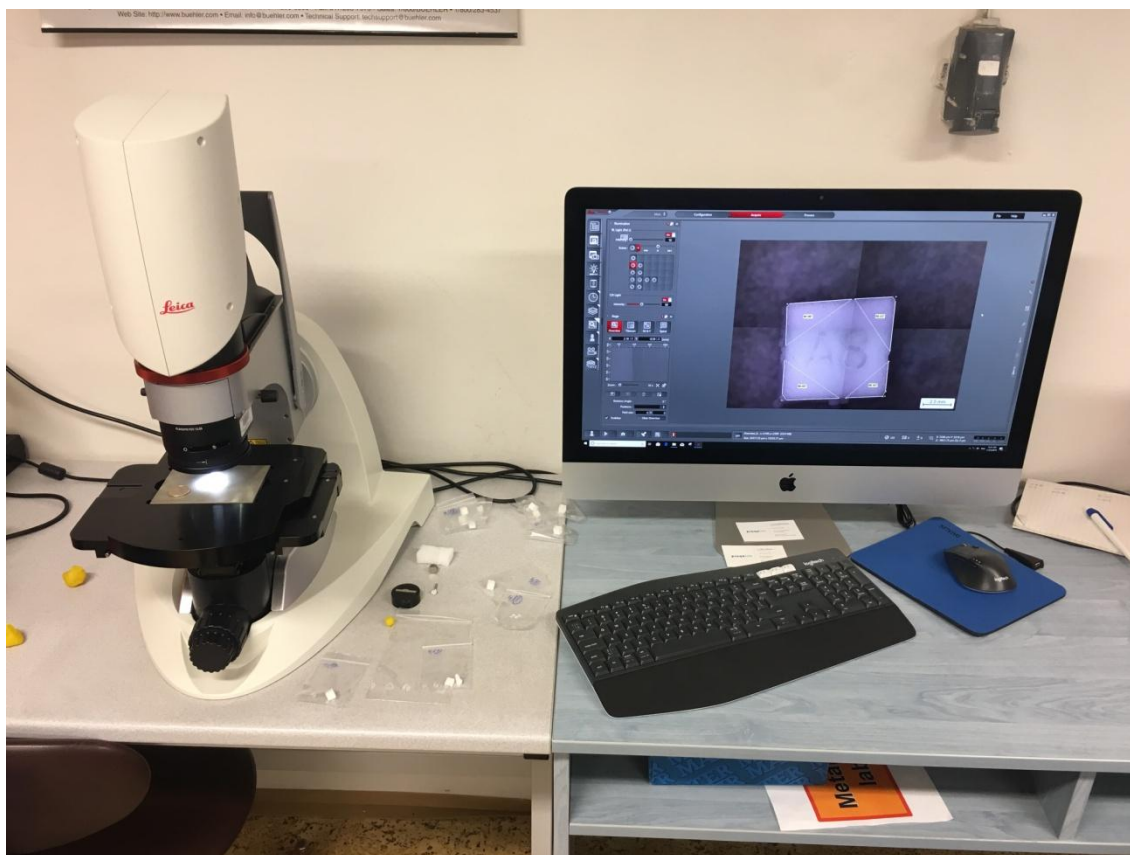
Graf 6.2: TGA pro materiál Vitrolite, Tethon3D.



Graf 6.3: TGA pro materiál Porcelite, Tethon3D.



## 6.2 Mikroskop



*Obr. 6.1: Digitální mikroskop Leica DVM6.*

Digitální mikroskop Leica DVM6 (Obr. 6.1) je vysoce univerzální a snadno ovladatelný digitální mikroskop pro prohlížení, dokumentování a analýzu mikroskopických vzorků. Optika mikroskopu ukazuje detaily v rozlišení 425 nm a zorný úhel pole se pohybuje v rozmezí 35 mm do 0,18 mm [45].

Hlava mikroskopu Leica DVM6 se naklání do úhlů  $+60^\circ$  až  $-60^\circ$  vzhledem k její neutrální svislé poloze. Stolek se otáčí kontinuálně mezi  $+180^\circ$  a  $-180^\circ$ , a to v celém rozsahu. Integrované LED prstencové světlo a koaxiální osvětlení umožňují několik typů kontrastních metod. S těmito typy osvětlení lze snadno pozorovat jemné detaily na vzorku, které jsou při běžném osvětlení špatně vidět [46].

### 6.3 Metalografické výbrusy

Pro první výbrusy byla použita černá bakelitová pryskyřice s uhlíkovým plnivem PolyFast od firmy Struers (Obr. 6.2). Do pryskyřice byly zasypany jednotlivé vzorky a následně na lisu CitoPress-1 od stejné firmy (Obr. 6.2), došlo k zalisování vzorku za působení teploty a tlaku. Parametry teploty, tlaku a další byly použity v souladu s doporučenými hodnotami od dodavatele materiálu a lisu.



Obr. 6.2: Vlevo je materiál PolyFast a vpravo lis od firmy Struers.

Tab. 6.2: Doporučené parametry pro zalisování vzorků od výrobce Struers.

	<b>Polyfast</b>	
	Množství pryskyřice [ml]	20
Zahřívání	Čas [min]	3,5
	Teplota [°C]	180
	Tlak [bar]	250
Ochlazování	Čas [min]	1,5
	Ochlazovací rychlost	High
	Celkový čas [min]	5

Po samotném zalisování došlo k odbroušení několika milimetrů materiálu tak, aby bylo dosaženo vnitřní struktury. Již po samotném výbrusu bylo zřetelné, že modely nemají vnitřní strukturu. To se potvrdilo i po důkladném prozkoumání na mikroskopu (Obr. 6.3). Vnitřní struktura, který měla mít velikost 5x5x5mm, byla zborcena. Dalším zjištěním bylo, že použitá technologie zalisování modelů poškozuje samotný model. Tlak použitý pro zalisování způsobuje trhliny na okrajích modelů a může také rozšířit původní trhliny. Z tohoto důvodu došlo ke změně materiálu a vlastní technologie pro zalisování zkušebních vzorků.



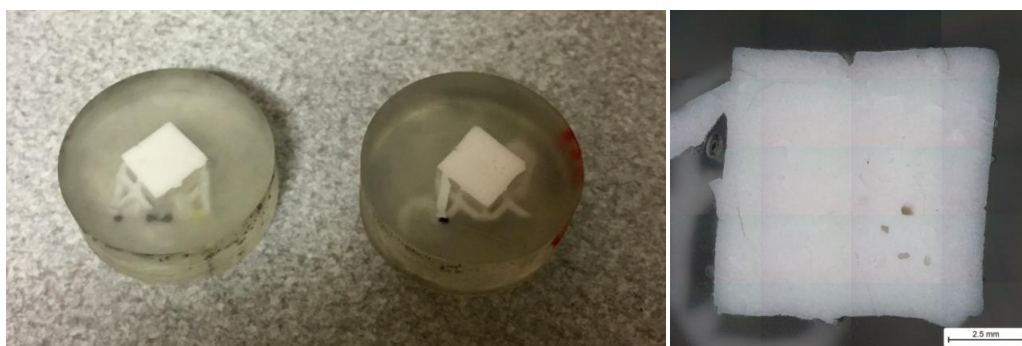
Obr. 6.3: Zalisované vzorky do černé bakelitové pryskyřice s uhlíkovým plnivem (vlevo). Snímek z optického mikroskopu vzorku B5 (vpravo).



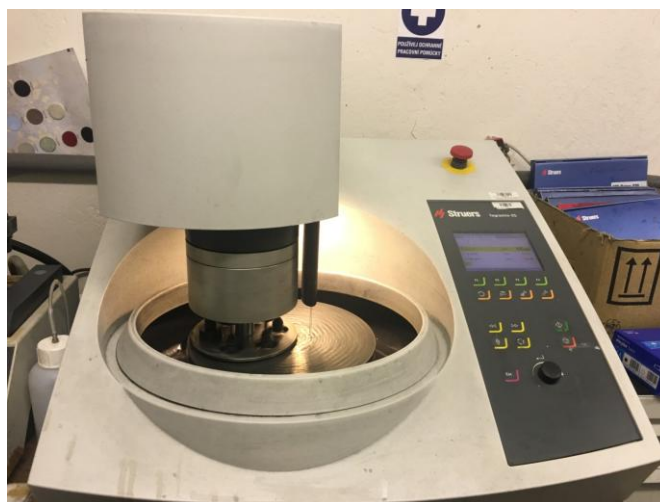
Obr. 6.4: UV pec s připravenými vzorky před vytvrzením (vlevo). Průběh vytvrzování vzorků (vpravo).

Šetrnější technologie vzhledem k povaze vzorků se jeví vytvrzování pomocí UV světla (Obr. 6.4). Použitá zalévací hmota – Technovit 2000 LC je čirá pryskyřice vytvrditelná UV světlem. Vytvrzený vzorek byl ještě zalit krycím lakem Technovit 2000 LC v tloušťce několik milimetrů, který zajistil nelepivý, tvrdý a vysoce průhledný vzorek.

Jak je vidět na Obr. 6.5., oproti předchozí metodě zde nejsou malé trhlinky na stranách vzorků, které byly způsobeny zalisováním za působení tlaku (a teploty). Zároveň došlo k ověření zborcení vnitřní struktury (Obr. 6.5). U vzorku B4 byla před vypalování struktura o velikosti 8x8x8mm.



*Obr. 6.5: Vytvrzené vzorky v průhledné pryskyřici (vlevo). Snímek z optického mikroskopu vzorku B4.*



*Obr. 6.6: Metalografická bruska Tegamin-25 od společnosti Struers.*

Metalografická bruska a leštička Tegamin-25 od firmy Struers byla použita k broušení a leštění vytvrzených vzorků. Na brusce je možné nastavit přítlak vzorků od 5 N do 400 N, úběr materiálu s přesností 50  $\mu\text{m}$  a měnit rychlost otáček od 40 do 600 ot./min. Za pomoci držáku je možné brousit 6 vzorků najednou o průměru 40mm.

## 7 Výsledky praktické části

### I. Popraskané vzorky po vrstvách – Ceramic Resin

**Materiál:** Ceramic Resin, Formlabs

**Modely:** A1-A10 (více v kapitole 0.)

**Parametry tisku:** SLA tiskárna

*Tab. 7.1: Použité parametry tisku pro modely A1-A10 na SLA tiskárně.*

Profil tisku	Ceramic
Tloušťka vrstvy	50 $\mu\text{m}$

### Proces vypalování:

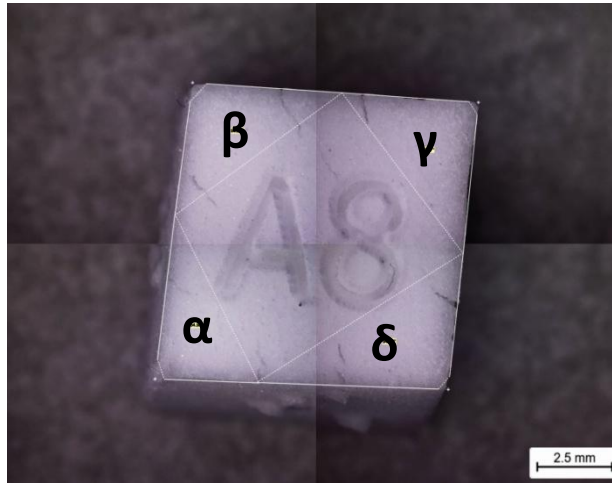
Teplotní profil určený výrobcem – Formlabs. Viz kapitola 5, tabulka Tab. 5.1.



*Obr. 7.1: Vytištěné modely po sintraci A6 (vlevo) a A8 (vpravo).*

### Výsledky měření:

Všechny prozkoumané vzorky pod mikroskopem obsahovaly praskliny. Dále byly změřeny úhly rohů modelů, aby se zjistila míra deformace modelů (Obr. 7.2).



Obr. 7.2: Měření úhlů na modelu A8 po sintraci.

Tab. 7.2: Naměřené hodnoty úhlů po sintraci.

	Model	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]	$\delta$ [°]
1. série	A1	90,31	91,32	88,37	90,58
	A2	88,45	92,41	86,69	91,89
	A6	91,35	90,53	87,84	92,91
	A8	89,72	90,77	88,49	90,63
2. série	A1	88,72	92,92	88,40	93,82
	A2	87,1	93,63	88,70	94,51
	A6	89,78	93,27	87,96	94,28
	A8	88,60	97,97	89,64	93,72
3. série	A1	89,77	92,57	87,88	93,61
	A2	85,38	94,73	89,20	96,34
	A6	88,59	93,96	87,97	95,06
	A8	84,98	94,22	87,97	94,49

### Závěr:

Jako hlavní problém se jeví praskliny v modelech, které se objevily po procesu vypalování. Praskliny jsou viditelné na všech modelech (Obr. 7.1). Dále byly na mikroskopu změřeny úhly rohů modelů. Dochází zde k deformaci jak je vidět na Obr. 7.2, v Tab. 7.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty úhlů po sintraci.

## II. Tisk materiálu Vitrolite na SLA tiskárně

**Materiál:** Vitrolite, Tethon3D

**Modely:** B1-B10 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** SLA tiskárna

*Tab. 7.3: Použité parametry tisku pro modely B1-B10 na SLA tiskárně.*

Profil tisku	Ceramic
Tloušťka vrstvy	50 $\mu\text{m}$



*Obr. 7.3: Vzorky materiálu Vitrolite z SLA tiskárny.*

### **Proces vypalování:**

Vypalování neproběhlo.

### **Výsledky měření:**

Měření neproběhlo.

### **Závěr:**

Tisk materiálu Vitrolite od společnosti Tethon3D byl neúspěšný při všech pokusech o tisk na SLA tiskárně. Důvodem je použití materiálu od jiného výrobce, než je SLA tiskárna. Tento materiál má rozdílné požadavky na parametry tisku a vytvrzuje se při jiné vlnové délce UV světla než je tomu tak u materiálu Ceramic Resin od společnosti Formlabs. Proto byla dále použita DLP tiskárna pro materiály od společnosti Tethon3D (Vitrolite, Porcelite).

### III. Popraskané vzorky po vrstvách

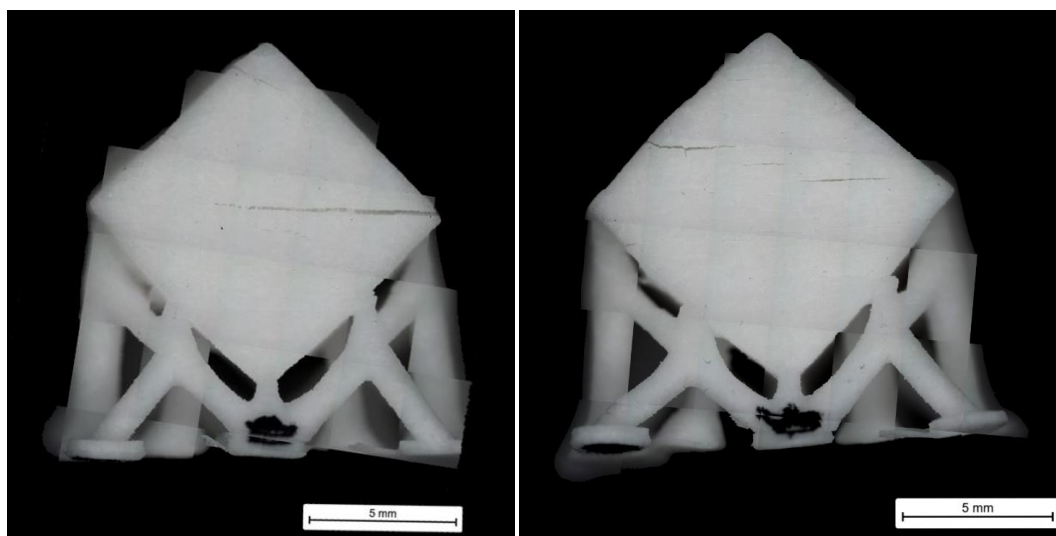
**Materiál:** Vitrolite, Tethon3D

**Modely:** B1-B10 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

*Tab. 7.4: Použité parametry tisku pro modely B1-B10 na DLP tiskárně.*

Tloušťka vrstvy	100 $\mu\text{m}$
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s



*Obr. 7.4: Model B1 (vlevo) a B2 (vpravo) po tisku na DLP tiskárně.*

#### **Proces vypalování:**

Teplotní profil určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Vitrolite. Zvolený profil pro modely s tloušťkou stěny  $>5\text{mm}$ . Viz kapitola 5, Tab. 5.3.

#### **Výsledky měření:**

Vzorky byly detailně prozkoumány pod mikroskopem. Všechny modely mají praskliny ve směru vrstev tisku.



Tab. 7.5: Objemové smrštění u modelu B1 a B2.

Model	Objem – po tisku [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
B1	1207,764	616,58	<b>51</b>
B2	1302,17	599,09	<b>46</b>

**Závěr:**

Z důvodu prasklin, které jsou po vrstvách je možnost řešení změna tloušťky vrstvy tisku. Použitá tloušťka vrstvy u těchto modelů 100  $\mu\text{m}$  - při dalším tisku byla použita tloušťka vrstvy 50  $\mu\text{m}$ .

#### IV. Chybí vnitřní struktura - mřížka

**Materiál:** Vitrolite, Tethon3D

**Modely:** B1, B2, B4, B5, B8 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

Tab. 7.6: Použité parametry tisku pro modely B1, B2, B4, B5 a B8 na DLP tiskárně.

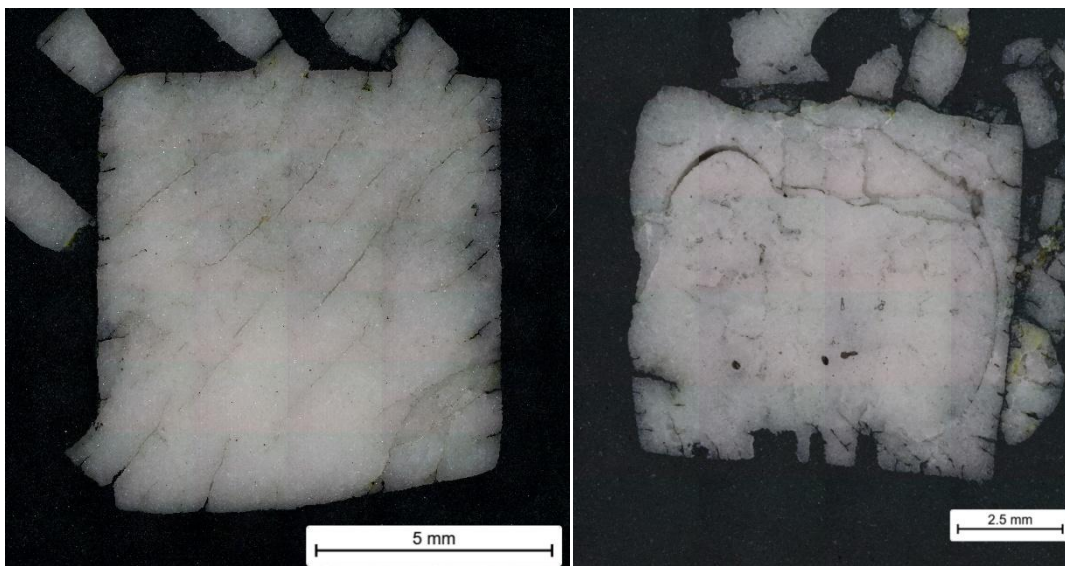
Tloušťka vrstvy	100 $\mu\text{m}$
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

#### Proces vypalování:

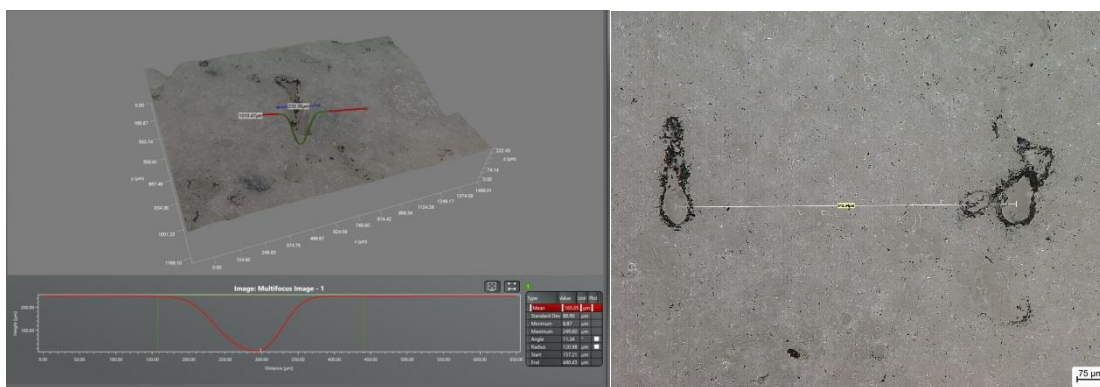
Teplotní profil určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Vitrolite. Zvolený profil pro modely s tloušťkou stěny >5mm. Viz kapitola 5, Tab. 5.3.

#### Výsledky měření:

Během výbrusů došlo nadále k zjištění, že modely po sintraci neobsahují vnitřní strukturu (Obr. 7.5). Mřížka uvnitř je zdeformovaná a v modelech se nachází pouze několik děr (Obr. 7.6). Hloubka měřené díry je 249,6  $\mu\text{m}$  a vzdálenost děr je 913,6  $\mu\text{m}$ . Následně byly modely rozříznuty ještě před sintrací, aby se zkontrolovala přítomnost struktury po tisku. Vnitřní mřížka byla přesně vytisknuta dle 3D modelu, ale uvnitř zůstal tekutý polymer. Během sintrace tedy nedošlo k dostatečnému vypálení polymeru, ten zůstal uvnitř a zapříčinil tak deformaci struktury.



*Obr. 7.5: Snímky z mikroskopu modelů po výbrusech. Model B8 (vlevo) a B2 (vpravo).*



*Obr. 7.6: Měření hloubky (vlevo) a vzdálenosti děr (vpravo).*

### **Závěr:**

Pro další tisk budou použity nové modely ve tvaru skořepin, které nebudou mít vnitřní struktury. Přidat otvory skrz modely, které by mohly napomoci s vypálením polymeru uvnitř modelu.

Z důvodu prasklin, které často začínají v místě styku podpor a modelu, použít druhou sadu modelů, které budou mít radiusy v místě napojování podpor a modelu. Zároveň zaoblit hrany modelů.

## V. Tloušťka vrstvy tisku 50 $\mu$ m

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** C1-C10 (více v kapitole X.)

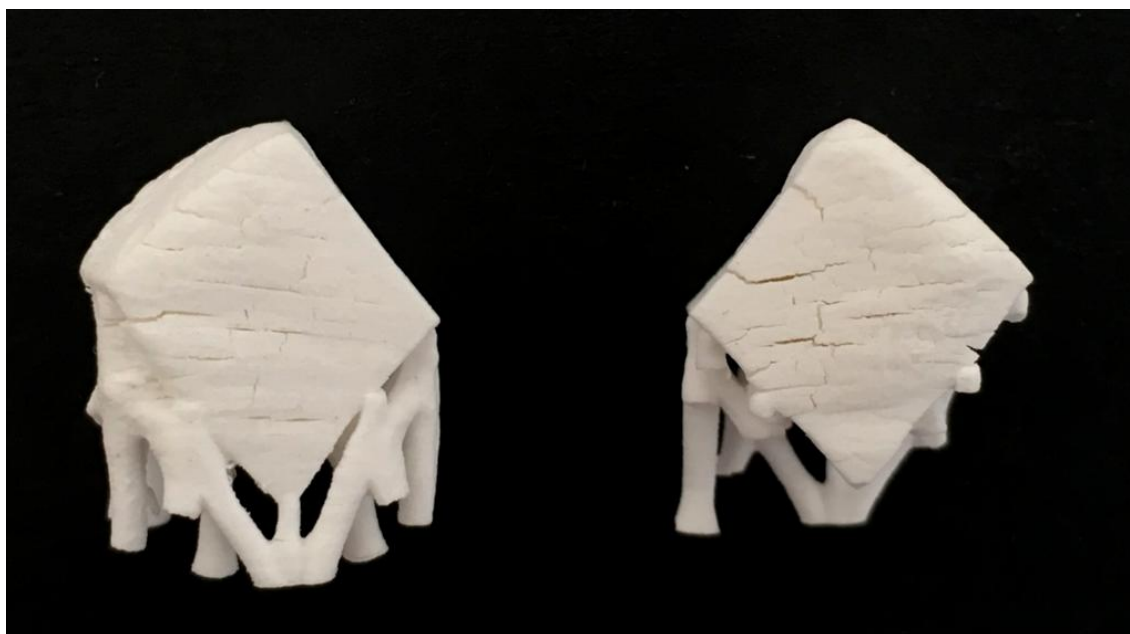
**Parametry tisku:** DLP tiskárna

*Tab. 7.7: Použité parametry tisku pro modely C1-C10 na DLP tiskárně.*

Tloušťka vrstvy	50 $\mu$ m
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

### Proces vypalování:

Teplotní profil určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite. Zvolený profil pro modely s tloušťkou stěny >5mm. Viz kapitola 5, Tab. 5.5.



*Obr. 7.7: Model C8 (vlevo) a C10 (vpravo) po procesu vypálení.*

## Výsledky měření:

Tab. 7.8: Objemové smrštění pro modely C8 a C10.

Model	Objem – po tisku [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
C8	1525	1030	<b>32</b>
C10	1475	946	<b>36</b>

## Závěr:

Modely vytištěné s tloušťkou vrstvy 50μm jsou po sintraci popraskané více než původní modely s tloušťkou vrstvy tisku 100μm. Snížení tloušťky vrstvy tisku se jeví jako nevhodné. Pro další tisk použít tloušťku vrstvy tisku 100μm. Zároveň došlo k výrazné deformaci tvaru modelu.

## VI. Skořepiny - DLP tiskárna

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** C11-C18 (více v kapitole X.)

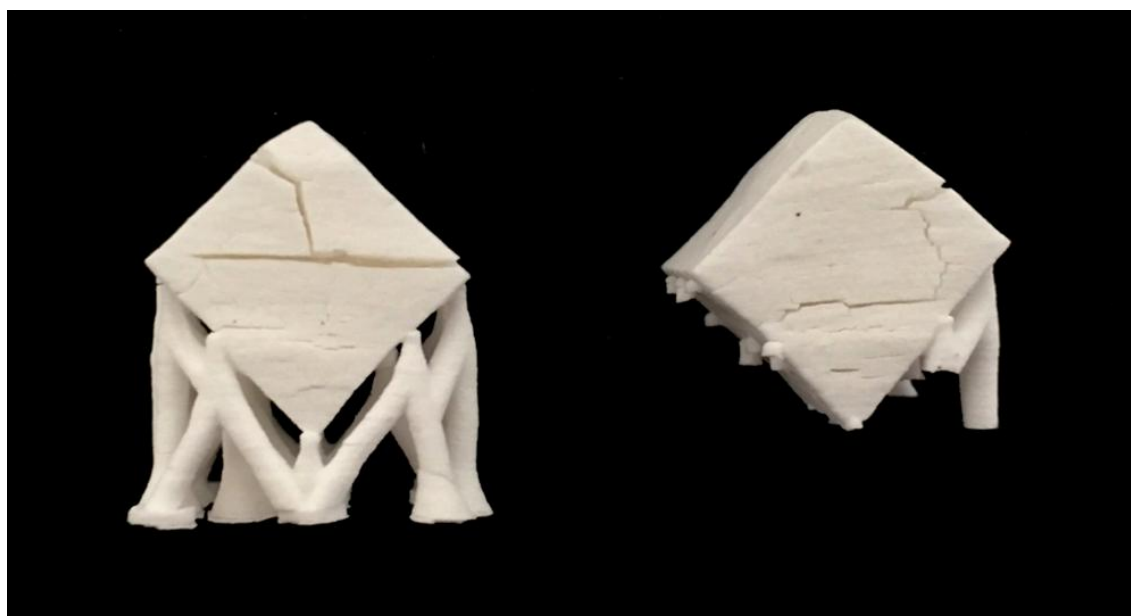
**Parametry tisku:** DLP tiskárna

*Tab. 7.9: Použité parametry tisku pro skořepiny C11-C18 na DLP tiskárně.*

Tloušťka vrstvy	100 $\mu\text{m}$
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

### Proces vypalování:

Teplotní profil určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite. Zvolený profil pro modely s tloušťkou stěny >5mm. Viz kapitola 5, Tab. 5.5.



*Obr. 7.8: Model C11 (vlevo) a C14 (vpravo) po procesu vypálení.*



Obr. 7.9: Model C15 (vlevo) a C18 (vpravo) po procesu vypálení.

### Výsledky měření:

Tab. 7.10: Objemové smrštění pro modely C11, C14, C15 a C18.

Model	Objem – po tisku [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
C11	1220	875	<b>28</b>
C14	1220	887	<b>27</b>
C15	1190	823	<b>31</b>
C18	1189	586	<b>28</b>

### Závěr:

Modely ve tvaru skořepin bez vnitřní struktury jsou výrazně popraskané po procesu vypalování (Obr. 7.8, Obr. 7.9). Vnitřní struktura je tedy žádoucí jako podpůrná konstrukce dutých modelů a napomáhá snížení vzniku prasklin. V tomto kroku nebylo možné ověřit vliv zaoblených hran a rádiusů v místě styku podpor s modelem.

## VII. Skořepiny - SLA tiskárna

**Materiál:** Ceramic Resin, Formlabs

**Modely:** A11-A18 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** SLA tiskárna

*Tab. 7.11: Použité parametry tisku pro skořepiny A11-A18 na SLA tiskárně.*

Profil tisku	Ceramic
Tloušťka vrstvy	50 $\mu\text{m}$

### Proces vypalování:

Teplotní profil určený výrobcem – Formlabs pro materiál Ceramic Resin (Tab. 5.1.).



*Obr. 7.10: Model A11 (vlevo) a A14 (vpravo) po procesu vypálení.*





*Obr. 7.11: Model A15 (vlevo) a A18 (vpravo) po procesu vypálení.*

### **Výsledky měření:**

*Tab. 7.12: Objemové smrštění pro modely A11, A1, A15 a A18.*

Model	Objem – po tisku [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
A11	1057	786	<b>25</b>
A14	1102	717	<b>35</b>
A15	1059	798	<b>25</b>
A18	1051	714	<b>32</b>

### **Závěr:**

Vzorky jsou výrazně popraskané po procesu sintrace. Vnitřní struktura je tedy žádoucí jako podpurná konstrukce dutých modelů a napomáhá snížení vzniku prasklin. V tomto kroku nebylo možné ověřit vliv zaoblených hran a rádiusů v místě styku podpor s modelem.

### VIII. Změna teplotního profilu procesu vypalování – 1400 °C

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** C1 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

Tab. 7.13: Použité parametry tisku pro sintraci 1400°C na DLP tiskárně.

Tloušťka vrstvy	100 μm
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

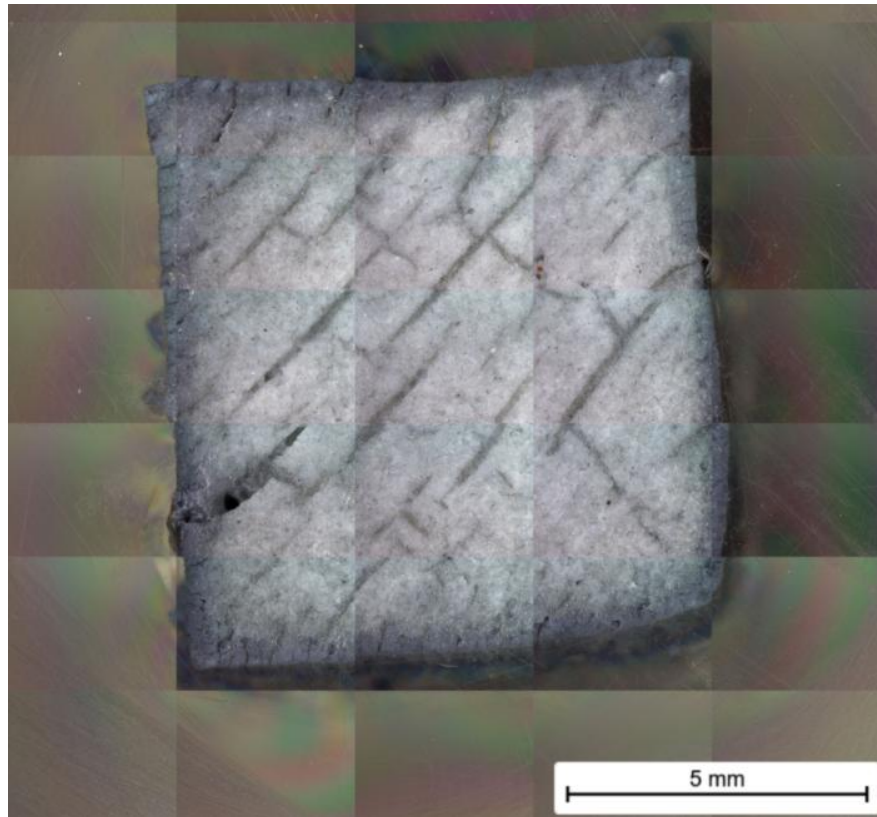
#### Proces vypalování:

Teplotní profil (modely s tloušťkou stěny >5mm) určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite upravený na konečnou teplotu 1400°C. Viz kapitola 5, Tab. 5.6.

#### Výsledky měření:



Obr. 7.12: Příprava vzorků C1 na výbrusy po sintraci na 1400°C - zalité pryskyřicí.



*Obr. 7.13: Výbrus modelu C1 po sintraci na 1400°C..*

**Závěr:**

Upravený teplotní profil na maximální teplotu 1400°C nepomohl k eliminaci vzniku trhlin ve vrstvách po směru tisku (Obr. 7.13). Vzorky byly vypalovány společně s jiným materiálem – Ferrolite Iron Resin, kde došlo k uvolnění látek, které nejspíše zapříčinily zčernání vzorků Porcelite (Obr. 7.12).

## IX. Změna teplotního profilu procesu vypalování – 1600 °C

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** C1

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

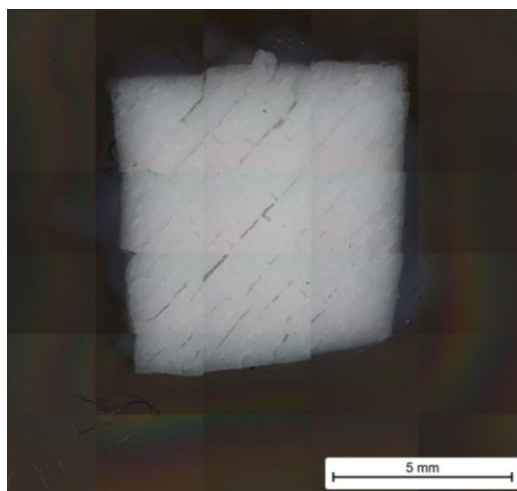
*Tab. 7.14: Použité parametry tisku pro sintraci 1600°C na DLP tiskárně.*

Tloušťka vrstvy	100 μm
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

### Proces vypalování:

Teplotní profil (modely s tloušťkou stěny >5mm) určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite upravený na konečnou teplotu 1600°C. Viz kapitola 5, Tab. 5.7.

### Výsledky měření:



*Obr. 7.14: Výbrus modelu C1 po sintraci na 1600°C.*

### Závěr:

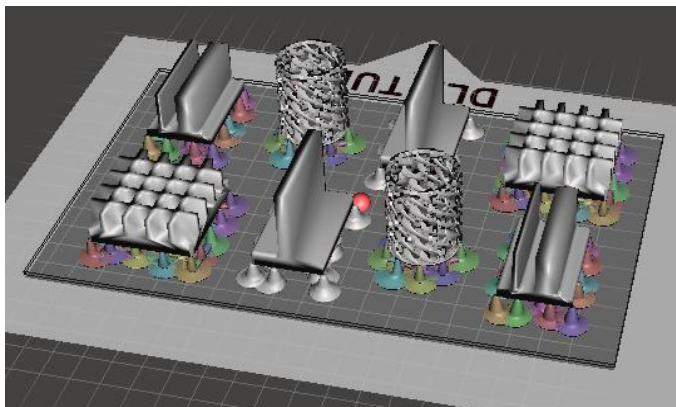
Upravený teplotní profil na maximální teplotu 1600°C také nepomohl k eliminaci vzniku trhlin ve vrstvách po směru tisku (Obr. 7.14).

## X. Tenkostěnné modely pro Porcelite

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 (více v kapitole X.)

(Mřížka, Tenká a tlustá stěna, Jedna stěna, Spirála)

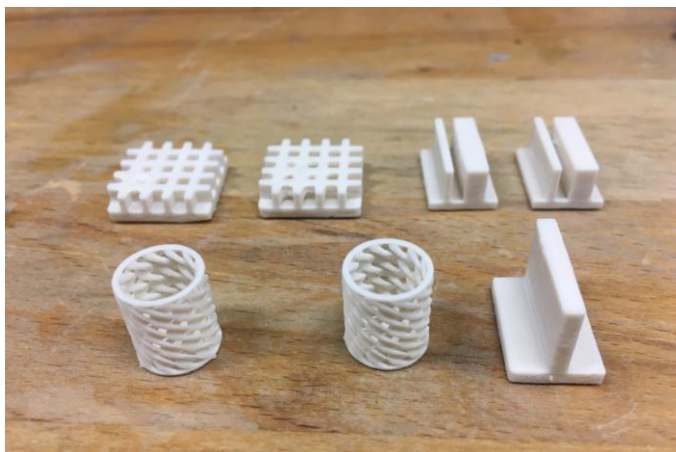


Obr. 7.15: Příprava modelu Model 1 – Model 4 k tisku na DLP tiskárně.

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

Tab. 7.15: Použité parametry tisku pro tenkostěnné modely na DLP tiskárně.

Tloušťka vrstvy	100 $\mu\text{m}$
Čas ozařování první vrstvy	8 s
Čas ozařování druhé vrstvy	7 s
Čas ozařování zbylých vrstev	5 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

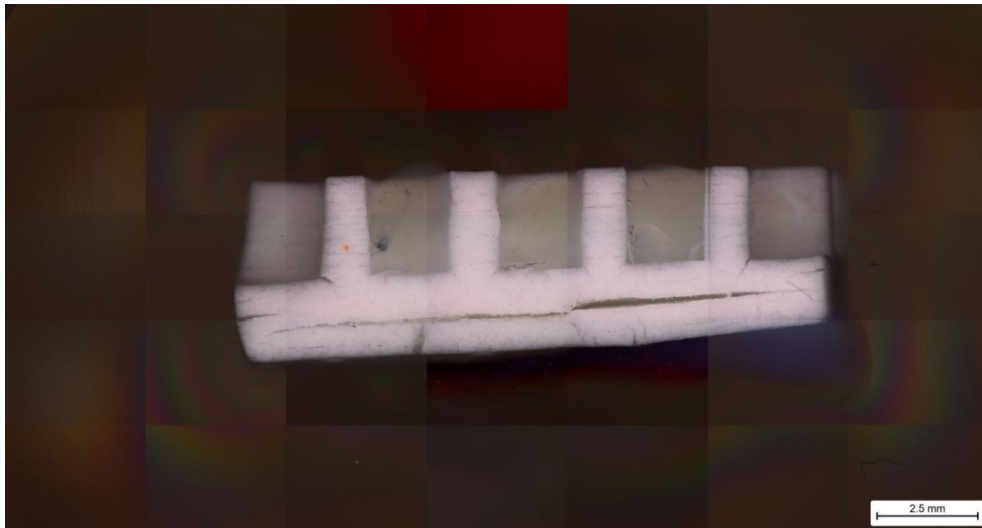


Obr. 7.16: Model 1 – Model 4 po tisku na DLP tiskárně.

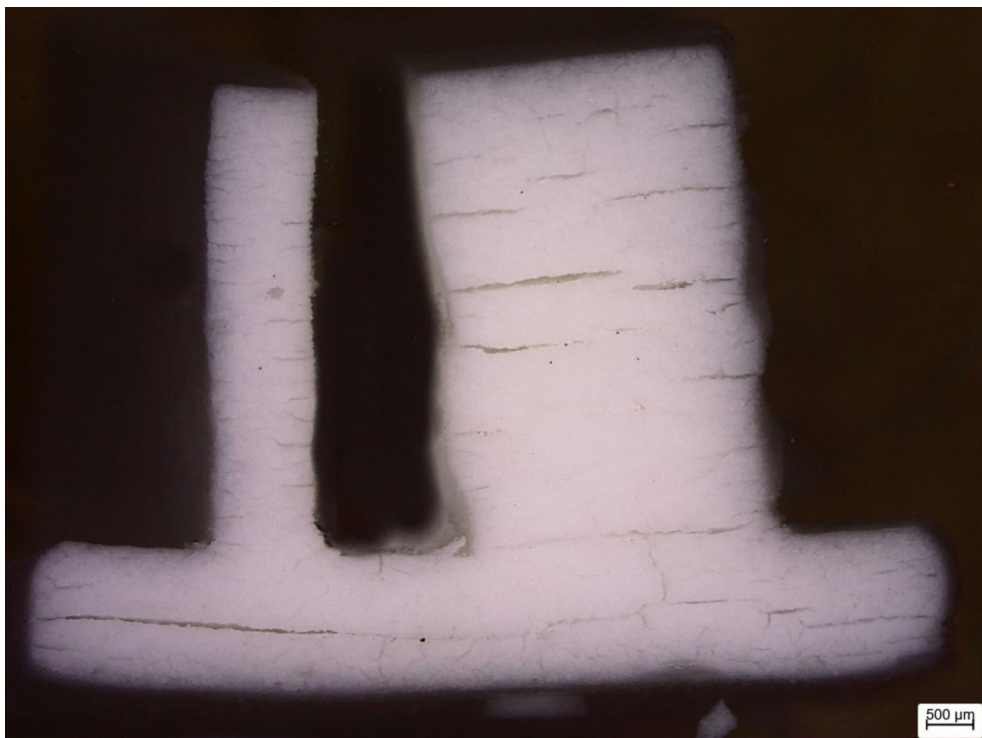
### Proces vypalování:

Upravený teplotní profil (modely s tloušťkou stěny  $>5\text{mm}$ ) určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite. Proces sintrace zpomalený a ochlazování je odstupňované s výdrží na dané teplotě. Teplotní profil viz. kapitola 5, Tab. 5.8.

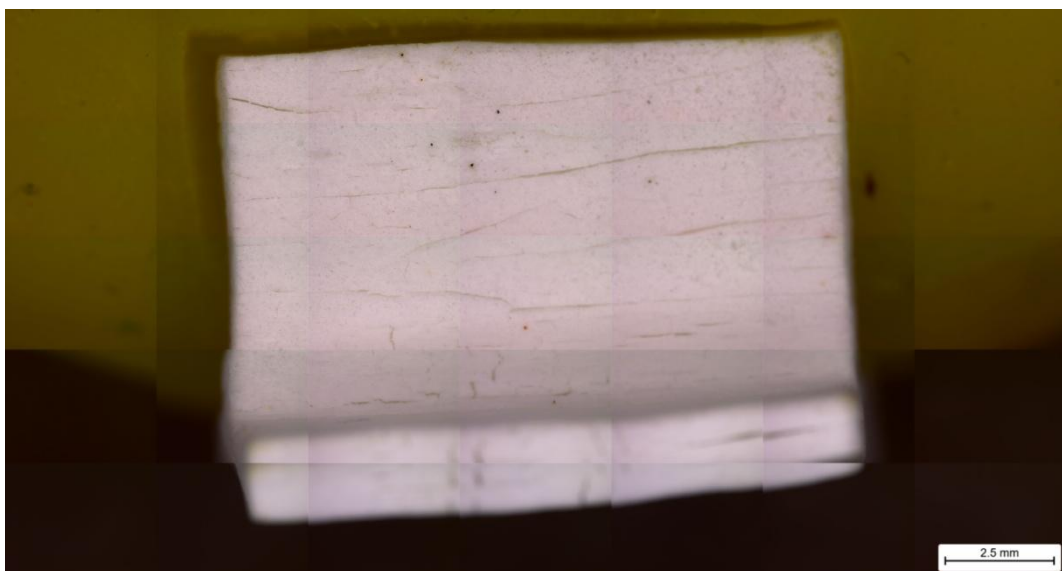
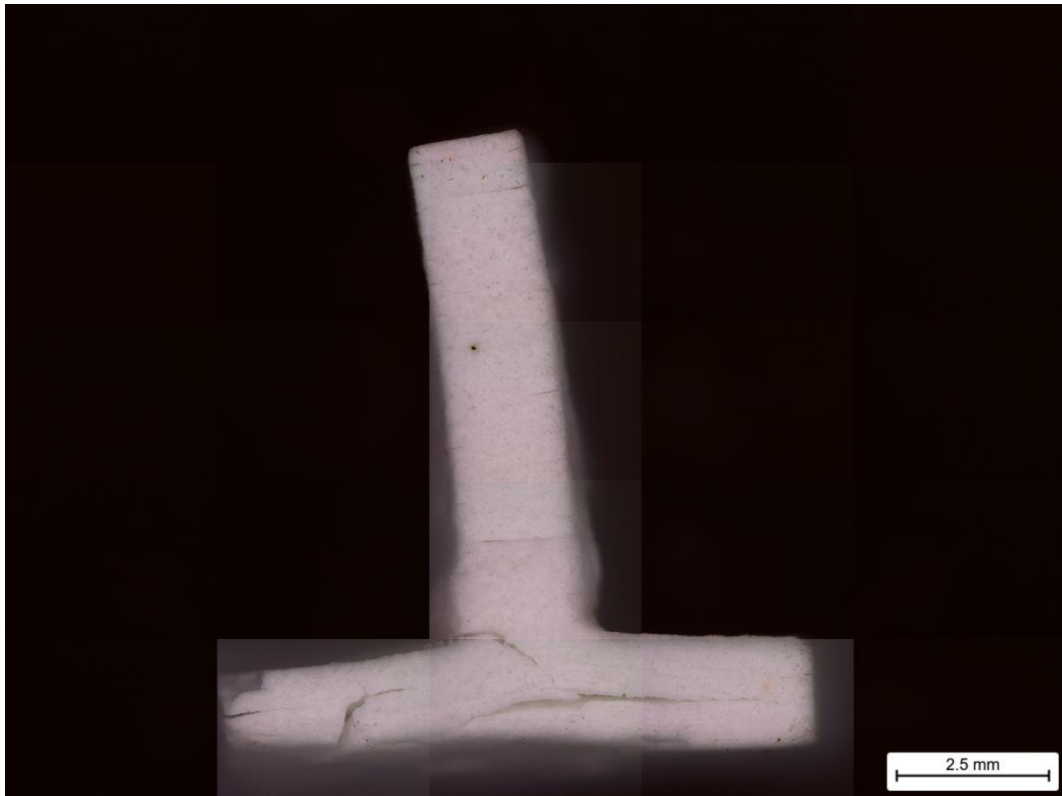
### Výsledky měření:



*Obr. 7.17: Model 1 po výbrusu.*



*Obr. 7.18: Model 2 po výbrusu.*



*Obr. 7.19: Model 3 po sintraci.*



*Obr. 7.20: Model 4 po sintraci.*



Tab. 7.16: Objemové a hmotnostní smrštění pro Model 1 - Model 4.

Model	Objem – po tisku [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
Model 1	565,77	575,54	<b>29,29</b>
Model 2	783,64	499,75	<b>36,22</b>
Model 3	799,60	527,95	<b>33,97</b>
Model 4	189,60	127,28	<b>32,87</b>

**Závěr:**

Všechny modely jsou popraskané zejména po vrstvách tisku. Nejméně popraskaný je model Spirála. Tenké zatočené části jsou téměř bez prasklin. Dno tohoto modelu je popraskané. Pro další tisk je vhodné připravit tenkostěnné modely.

## XI. Změna času vytvrzování na 7s

**Materiál:** Porcelite, Tethon3D

**Modely:** C8 (více v kapitole X.)

**Parametry tisku:** DLP tiskárna

Tab. 7.17: Použité parametry tisku pro čas vytvrzování 7s na DLP tiskárně.

Tloušťka vrstvy	100 $\mu\text{m}$
Čas ozařování všech vrstev	7 s
Doba čekání před tiskem	5 s
Doba čekání po tisku	1 s
Doba čekání po zvednutí	5 s

### Proces vypalování:

Upravený teplotní profil (modely s tloušťkou stěny  $>5\text{mm}$ ) určený výrobcem – Tethon3D pro materiál Porcelite. Proces sintrace zpomalený a ochlazování je odstupňované s výdrží na dané teplotě. Teplotní profil viz kapitola 5, Tab. 5.8.

### Výsledky měření:



Obr. 7.21: Výbrus modelu C8 po sintraci.

Tab. 7.18: Objemové a hmotnostní smrštění modelů.

Model	Objem – po tisk [mm <sup>3</sup> ]	Objem – po sintraci [mm <sup>3</sup> ]	<b>Objemové smrštění</b> [%]
C8	1073,7	700,23	<b>34,78</b>

**Závěr:**

Vyzkoušena změna času vytvrzování. Čas prodloužen z 5s na 7 s. Dle výbrusu na Obr. 7.21 je zřejmé, že tato změna není vhodná. Praskliny ve směru tisku vrstvy jsou výrazné. Vhodné ponechat původní čas vytvrzování 5s pro další tisk modelů. Změřeno objemové smrštění (Tab. 7.18), které je výrazně vyšší (34,78%), než jaké udává výrobce materiálu (17%).

## 8. Závěr

V této práci byly testovány polymerní keramické materiály, které jsou prodávány jako experimentální materiály od firmy Formlabs (Ceramic Resin) a Tethon3D (Vitrolite, Porcelite). Zároveň bylo možno porovnat dvě technologie 3D tisku – SLA a DLP.

Během prvních testování bylo zjištěno, že materiály nemají požadované výsledné vlastnosti i přesto, že byly dodrženy pokyny výrobců poskytované k jednotlivým materiálům. Z toho důvodu došlo postupně ke změně modelů, parametrů tisku a také k úpravě teplotního profilu pro proces vypalování. Bohužel ani jedna změna nevedla k úplnému odstranění hlavního problému - praskání vzorků zejména po vrstvách tisku.

Největší vliv na snížení prasklin měla změna vzorků na tenkostěnné modely. Dále bylo zjištěno, že skutečné smrštění modelů je vyšší, než jaké udávají výrobci daných materiálů. To způsobuje vnitřní pnutí během procesu vypalování a tedy praskání vzorků zejména u modelů s větší tloušťkou stěny.

Doba tisku u DLP tiskárny je přibližně o 30-50% času kratší v porovnání s dobou tisku SLA tiskárny. Celkový čas tisku je u DLP tiskárny závislý na výšce modelů, resp. na celkovém počtu vrstev, zvolených časech ozařování jednotlivých vrstev, době čekání mezi vrstvami a také na tloušťce tisku vrstvy. Oproti SLA tiskárně není celkový čas závislý na počtu modelů na platformě, jelikož probíhá ozáření celé jedné vrstvy v jednom čase. U SLA tiskárny je doba tisku závislá na počtu modelů. Čím více modelů se tiskne, tím je čas tisku delší vzhledem k použité technologii, kdy se vytvrzuje každý model bod po bodu. Také závisí na zvolené tloušťce tisku vrstvy a velikosti modelů. Dále bylo zjištěno, že DLP tiskárna je schopna lépe tisknout malé modely s větší přesností tisku oproti SLA tiskárně.

Pro další výzkum v oblasti tisku polymerních keramických materiálů je vhodné se zaměřit na využití nekomerčních materiálů, u kterých bude přesně znám obsah a podíl jednotlivých chemických prvků včetně velikosti zrn. Další zajímavé možnosti se jeví při použití materiálů na bázi nanovláken.

Nadále by bylo vhodné rozdělit proces debindingu a sintrace a následně vyhodnotit, který z procesů má vliv na praskání modelů. Adekvátně upravit teplotní profil s ohledem na předešlé výsledky a chemické složení materiálů. Zároveň by bylo nápomocné vypalovat ve stejný čas několik sad vzorků s různými parametry tisku a sledovat závislost mezi parametry tisku a upraveným teplotním profilem.

## 8 Literatura

1. GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 1493921126.
2. ZIYONG, Li, Zhangwei CHEN, Ziyong LI, et al. 3D printing of ceramics: A review. Journal of the European Ceramic Society [online]. 2018, 2018(4) [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221918306782>.
3. THAYER, Jeffrey. Competitive strategic advantage through disruptive innovation. M.S. Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management 1996, 1996. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology.
4. LONJON, Capucine. The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication. Sculpteo [online]. 2017 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>.
5. 3D tisk. Wikipedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné také z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk).
6. 3MF Specification [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [www.3mf.io/specification/](http://www.3mf.io/specification/).
7. Applications of 3D printing. In: Wikipedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Applications\\_of\\_3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_3D_printing).
8. MARCUS, Harris, Joseph BEAMAN, Joel BARLOW a David BOURELL. Solid freeform fabrication. Powder processing. American Ceramic Society Bulletin [online]. 1990, (6) [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0025447893>.

9. SACHS, E., M. CIMA a J. CORNIE. Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model. *CIRP Annals* [online]. 1990, 39(1), 201-204 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61035-X. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkin>.
10. CHERDO, Ludivine. SLA, DLP, and LCD 3D printing technologies. In: Aniwaa [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/the-best-resin-3d-printer-sla-and-dlp/>.
11. JACOBS, Paul F. a David T. REID. *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography* [online]. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers in cooperation with the Computer and Automated Systems Association of SME, 1992 [cit. 2019-04-23]. ISBN 978-087-2634-251. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=y33AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=gXiAA\\_7cOm&sig=Oll62kC7cTYRhipYd-9GLcJkQdU&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=y33AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=gXiAA_7cOm&sig=Oll62kC7cTYRhipYd-9GLcJkQdU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false).
12. HULL, Charles W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.
13. GRIFFITH, M.L. a J.W. HALLORAN. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 1996, (10) [cit. 2019-04-23]. DOI: 00027820. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0030259832&origin=inward>.
14. Sla-technology. In: *Print3dd* [online]. 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.print3dd.com/technologies/sla-technology/>.
15. CHEN, Z, D LI, W ZHOU a L WANG. Curing characteristics of ceramic stereolithography for an aqueous-based silica suspension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2009, 224(4), 641-651 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1243/09544054JEM1751. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1751>.

16. S.J. Lombardo, Minimum Time Heating Cycles for Diffusion-Controlled Binder Removal from Ceramic Green Bodies, *Journal of the American Ceramic Society* 98 (1) (2015) 57–65.
17. GRIFFITH, Michelle L. a John W. HALLORAN. Ultraviolet curable ceramic suspensions for stereolithography of ceramics. American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED [online]. Chicago, IL, USA, 1994 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0028746142&origin=inward>.
18. ALLEN BRADY, G. a John W. HALLORAN. Stereolithography of ceramic suspensions. *Rapid Prototyping Journal* [online]. MCB UP, 1997, 3(2), 61-65 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1108/13552549710176680. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552549710176680>.
19. HALLORAN, John W., Vladislava TOMECKOVA, Susan GENTRY, et al. Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2011, 31(14), 2613-2619 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.003. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221910005613>.
20. BAE, Chang-Jun, Arathi RAMACHANDRAN a John W. HALLORAN. Quantifying particle segregation in sequential layers fabricated by additive manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2018, 38(11), 4082-4088 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.02.008. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221918300827>.
21. Formlabs [online]. Massachusetts, USA [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://formlabs.com/>.
22. NAKAMOTO, T., K. YAMAGUCHI a P. ABRAHA A. Consideration on the producing of high aspect ratio micro parts using UV sensitive photopolymer. MHS'96 Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science [online]. IEEE, 1996, , 53-58 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1109/MHS.1996.563401. ISBN 0-7803-3596-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/563401/>.



23. BERTSCH, A., S. ZISSI, J. Y. JÉZÉQUEL, S. CORBEL a J. C. ANDRÉ. Microstereophotolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator. *Microsystem Technologies* [online]. 1997, 3(2), 42-47 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1007/s005420050053. ISSN 0946-7076. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s005420050053>.
24. KANEKO, Ysasuyoshi a Kohrou TAKAHASHI. UV exposure system for photolithography and rapid prototyping using DMD projector. *SID Conference Record of the International Display Research Conference* [online]. 2002 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0035782542&origin=inward>.
25. HADIPOESPITO, G., Y. YANG, H. CHOI, G. NING a X. LI. Digital micromirror device based microstereolithography for micro structures of transparent photopolymer and nanocomposites. Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison [online]. 2003 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/285995681\\_Digital\\_micromirror\\_device\\_based\\_microstereolithography\\_for\\_micro\\_structures\\_of\\_transparent\\_photopolymer\\_and\\_nanocomposites](https://www.researchgate.net/publication/285995681_Digital_micromirror_device_based_microstereolithography_for_micro_structures_of_transparent_photopolymer_and_nanocomposites).
26. SUN, C., N. FANG, D.M. WU a X. ZHANG. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2005, 121(1), 113-120 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.sna.2004.12.011. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424704008672>.
27. HORNBECK, L.J. Digital light processing for high-brightness high-resolution applications, *Projection Displays III*. International Society for Optics and Photonics [online]. 1997 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85056632023&origin=inward>.
28. CHI, Zhou a Chen YONG. Calibrating Large-area Mask Projection Stereolithography for Its Accuracy and Resolution Improvements. Epstein Department of Industrial and Systems Engineering University of Southern California [online]. Los Angeles, CA, 2009 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2009/2009-09-Zhou.pdf>.

29. CHOI, Jae-Won, Ryan WICKER, Seok-Hee LEE, Kyung-Hyun CHOI, Chang-Sik HA a Ildoo CHUNG. Fabrication of 3D biocompatible/biodegradable micro-scaffolds using dynamic mask projection microstereolithography. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, 209(15-16), 5494-5503 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.004. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360900185X>.
30. PAN, Yayue, Chi ZHOU a Yong CHEN. A Fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in Minutes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2012, 134(5) [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1115/1.4007465. ISSN 10871357. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1484473>.
31. ZHANG, A. Ping, Xin QU, Pranav SOMAN, Kolin C. HRIBAR, Jin W. LEE, Shaochen CHEN a Sailing HE. Rapid Fabrication of Complex 3D Extracellular Microenvironments by Dynamic Optical Projection Stereolithography. *Advanced Materials* [online]. 2012, 24(31), 4266-4270 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1002/adma.201202024. ISSN 09359648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201202024>.
32. LEE, Michael P., Geoffrey J. T. COOPER, Trevor HINKLEY, Graham M. GIBSON, Miles J. PADGETT a Leroy CRONIN. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography. *Scientific Reports* [online]. 2015, 5(1) [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1038/srep09875. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep09875>.
33. 3D Printing and Design [online]. 2017 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/>.
34. HE, Rongxuan, Wei LIU, Ziwei WU, et al. Fabrication of complex-shaped zirconia ceramic parts via a DLP- stereolithography-based 3D printing method. *Ceramics International* [online]. 2018, 44(3), 3412-3416 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.135. ISSN 02728842. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217325932>.

35. ZHOU, Maopeng, Wei LIU, Haidong WU, et al. Preparation of a defect-free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography – Optimization of the drying and debinding processes. *Ceramics International* [online]. 2016, 42(10), 11598-11602 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.04.050. ISSN 02728842. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884216304448>.
36. FELZMANN, Ruth, Simon GRUBER, Gerald MITTERAMSKOGLER, Passakorn TESAVIBUL, Aldo R. BOCCACCINI, Robert LISKA a Jürgen STAMPFL. Lithography-Based Additive Manufacturing of Cellular Ceramic Structures. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2012, 14(12), 1052-1058 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1002/adem.201200010. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.201200010>.
37. TESAVIBUL, Passakorn, Ruth FELZMANN, Simon GRUBER, Robert LISKA, Ian THOMPSON, Aldo R. BOCCACCINI a Jürgen STAMPFL. Processing of 45S5 Bioglass® by lithography-based additive manufacturing. *Materials Letters* [online]. 2012, 74, 81-84 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.01.019. ISSN 0167577X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X12000390>.
38. HATZENBICHLER, M., M. GEPPERT, S. GRUBER, E. IPP, R. ALMEDAL, J. STAMPFL, Michael R. DOUGLASS a Patrick I. ODEN. DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts [online]. 2012-2-9, , 82540E- [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1117/12.907113. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.907113>.
39. GMEINER, Robert, Gerald MITTERAMSKOGLER, Jürgen STAMPFL a Aldo R. BOCCACCINI. Stereolithographic Ceramic Manufacturing of High Strength Bioactive Glass. *International Journal of Applied Ceramic Technology* [online]. 2015, 12(1), 38-45 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1111/ijac.12325. ISSN 1546542X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/ijac.12325>.
40. Spring School: 3D Printing and ceramic processes: European Ceramic Society AISBL. Maubeuge, 2019. Dostupné také z: <https://ecers.org/documents/spring-school-programme.pdf>.

41. Tethon 3D [online]. Omaha, Nebraska [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://tethon3d.com/>.
42. PFAFFINGER, Markus, Gerald MITTERAMSKOGLER, Robert GMEINER a Jürgen STAMPFL. Thermal Debinding of Ceramic-Filled Photopolymers. Materials Science Forum [online]. 2015, 825-826, 75-81 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.75. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.825-826.75>.
43. SubSTech (Substances&Technologies) [online]. 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [www.substech.com](http://www.substech.com).
44. ChemPoint [online]. 1999 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/>
45. Pragolab [online]. 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.pragolab.cz/opticke-mikroskopy/digitalni-mikroskopy/leica-dvm6>.
46. CHEMAGAZÍN [online]. 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [http://www.chemagazin.cz/4-2016-\(Pevne-latky\)-C992/](http://www.chemagazin.cz/4-2016-(Pevne-latky)-C992/).