

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Katedra polygrafie a fotofyziky

Hodnocení dotvrzování výtisků z SLA tiskárny

Jiří Procházka

Bakalářská práce

2019

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Procházka**  
Osobní číslo: **C16164**  
Studijní program: **B3441 Polygrafie**  
Studijní obor: **Polygrafie**  
Název tématu: **Hodnocení dotvrzování výtisků z SLA tiskárny**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

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

- 1) Z dostupné literatury nastudujte a popište proces tvorby třírozměrných objektů pomocí stereolitografie.
- 2) Zmapujte, jakým způsobem se dají vytvrzovat výtisky z tiskárny Formlabs Form 2 a jak se dá dotvrzení výtisku monitorovat.
- 3) Připravte vhodné vzorky pro testování dotvrzení na vlastní aparatuře a využitím vhodných metod toto dotvrzení monitorujte.
- 4) Získané výsledky přehledně zpracujte ve formě závěrečné práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondrej Panák, Ph.D.**

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **27. února 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **4. července 2019**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.  
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 27. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona

č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne:

Jiří Procházka

Bakalářská práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16\_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

**MS  
MT**  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

## Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. za ochotu, pomoc a odborné vedení při vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za asistenci a umožnění měření pevnostních zkoušek.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce pojednává o dotvrzování výtisků ze stereolitografické 3D tiskárny *Formlabs Form 2* pomocí vlastní dotvrzovací aparatury. Takto zhotovené vzorky jsou dotvrzovány dvěma způsoby: UV zářením s teplotou, nebo pouze UV zářením po různou dobu. Pro jednotlivé doby je sledován stupeň vytvrzení pomocí pevnosti v tahu a infračervené spektroskopie. Ze získaných údajů jsou vyhodnocovány vlastnosti jako je modul pružnosti, pevnost v tahu, přetvoření v tahu nebo stupeň konverze.

## **Klíčová slova**

3D tisk, dotvrzovací aparatura, UV LED, stereolitografie, pevnost v tahu

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with post-curing prints from stereolithographic 3D printer *Formlabs Form 2* using own post-curing device. These printed samples are post-cured in two ways: UV radiation with temperature or using only UV radiation; and in different times. For each time a degree of curing is observed by utilising the tensile strength and infrared spectroscopy. From the obtained data several properties are evaluated; such as tensile modulus, ultimate tensile strength, elongation at break or conversion degree of acrylate groups.

## **Key words**

3D print, post-cure device, UV LED, stereolithography, tensile strenght

# Obsah

Úvod.....	13
1 Teoretická část .....	15
1.1 Co je 3D tisk .....	15
1.2 Techniky 3D tisku.....	15
1.2.1 Selective laser sintering (SLS) .....	15
1.2.2 Fused depolition modeling (FDM).....	16
1.2.3 ColorJet Printing (CJP) .....	17
1.2.4 PolyJet .....	18
1.2.5 Stereolitografie (SLA).....	20
1.3 Způsob dotvrzování 3D výtisků.....	22
1.4 Mechanické vlastnosti polymerů .....	24
1.4.1 Tahové vlastnosti polymerů .....	25
1.5 Materiály Formlabs .....	27
2 Praktická část .....	29
2.1 Použité materiály .....	29
2.2 Experimentální přístroje .....	30
2.2.1 3D tiskárna Formlabs .....	30
2.2.2 Dotvrzovací zařízení .....	31
2.2.3 Trhací stroj INSTRON 5500R .....	33
2.2.4 Profilometr KLA Tencor P-7 .....	34
2.2.5 Infračervený spektrofotometr Avatar 320 FT-IR .....	35
2.3 Experimentální postupy .....	36
2.3.1 Příprava vzorků .....	36
2.3.2 Zkouška pevnosti v tahu.....	38
2.3.3 Profilometrie .....	40
2.3.4 Infračervená spektroskopie .....	41

3	Výsledky a diskuze .....	42
3.1	Zkouška pevnosti v tahu .....	42
3.2	Infračervená spektroskopie .....	44
3.3	Profilometrie .....	46
4	Závěr .....	49
	Seznam použité literatury.....	51

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 SLS tiskárna Formlabs Fuse 1 [6]</i> .....	16
<i>Obrázek 2 PRUSA I3 MK3S [10]</i> .....	17
<i>Obrázek 3 ProJet CJP 860Pro [13]</i> .....	18
<i>Obrázek 4 Stratasys Objet1000 [16]</i> .....	19
<i>Obrázek 5 Formlabs Form 3 [21]</i> .....	22
<i>Obrázek 6 Form Cure [23]</i> .....	23
<i>Obrázek 7 UV LED dotvrzovací zařízení [26]</i> .....	24
<i>Obrázek 8 Deformační křivky polymerů [27]</i> .....	26
<i>Obrázek 9 Akrylát</i> .....	28
<i>Obrázek 10 tiskárna Form 2 [38]</i> .....	31
<i>Obrázek 11 Dotvrzovací aparatura</i> .....	32
<i>Obrázek 12 Emisní spektrum UV LED</i> .....	32
<i>Obrázek 13 INSTRON 5500R</i> .....	34
<i>Obrázek 14 KLA Tencor P-7 [43]</i> .....	35
<i>Obrázek 15 Nikolet Avatar 320 FT-IR [46]</i> .....	36
<i>Obrázek 16 2D model zkušebního vzorku</i> .....	37
<i>Obrázek 17 Zkušební vzorky</i> .....	38
<i>Obrázek 18 Grafické znázornění hodnot při tahové zkoušce pro vzorek Clear dotvrzovaný teplem a UV zářením po dobu 10 minut</i> .....	39
<i>Obrázek 19 Uchycení vzorku v čelistech</i> .....	40
<i>Obrázek 20 Grafické znázornění modulu pružnosti (a), pevnosti v tahu (b) a pretvoření v tahu (c), pro vytvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Grey</i> .....	42
<i>Obrázek 21 Grafické znázornění modulu pružnosti (a), pevnosti v tahu (b) a pretvoření v tahu (c), pro vytvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Clear</i> .....	43
<i>Obrázek 22 Absorpční pásy dotvrzené a nedotvrzené pryskyřice</i> .....	44
<i>Obrázek 23 Stupeň konverze v závislosti na době dotvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Clear</i> .....	45
<i>Obrázek 24 Stupeň konverze v závislosti na době dotvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Grey</i> .....	46

Obrázek 25 Profil vzorku tištěného s tloušťkou vrstvy 50 $\mu\text{m}$ .....	47
Obrázek 26 Profil vzorku tištěného s tloušťkou 100 $\mu\text{m}$ .....	48
Obrázek 27 3D sken povrchu vzorku s výškou vrstvy 100 $\mu\text{m}$ .....	48

## **Seznam tabulek**

<i>Tabulka 1 Pevnostní vlastnosti pryskyřic Clear a Grey [34]</i> .....	29
<i>Tabulka 2 Parametry 3D tiskárny [37]</i> .....	30
<i>Tabulka 3 Specifikace LED pásku [39]</i> .....	33

## Úvod

3D tisk je v dnešní době používán nejen v řadě průmyslových odvětví, ale i v domácnostech. Využívá se především v automobilovém průmyslu, zdravotnictví, architektuře, pro vzdělávací potřeby nebo v uměleckých oblastech. Náklady na vytvoření prototypu pomocí 3D technologie jsou daleko nižší než vytvoření prototypů klasickou technologií. V domácnosti slouží především pro zábavu a vytváření originálních modelů.

Ať už se jedná o jedny z prvních tiskáren nebo o současné typy, všechny mají jedno společné, potřebují základní 3D model podle kterého vědí jak pracovat. Tento model je poté v programu rozřezán na jednotlivé vrstvy o předem definované tloušťce. Program potom vezme souřadnice jednotlivých vrstev a používá je k vytvoření 3D objektu. Vytvořený 3D objekt může být dodatečně zpracován pomocí dokončovacích metod nebo dotvrzen pomocí UV záření a teploty. Další možností je ponechání objektu v původním stavu.

I přesto, že se technologie 3D tisku jeví jako poměrně mladé odvětví vývoje tiskových možností, opak je pravdou [1]. První popis stroje používajícího 3D technologii, který používal fotopolymer se objevil v roce 1981. Publikoval ho Hideo Kodama. Už tento stroj vytvářel objekt vrstvu po vrstvě a k tisku používal fotopolymer. O pouhé 3 roky později byla Charlesem Hullem vynalezena stereolitografie, která dovoluje vytvářet 3D modely přímo z digitálních dat. Stereolitografie byla inovační ve svém způsobu vytvrzení. K téměř okamžitému vytvrzení tekutého fotopolymeru zde dochází použitím UV laseru. Tato technologie vytvrzování snížila náklady na realizaci prototypů. Další zlom nastal až v roce 1992, kdy byl zhotoven první SLA stroj schopný vytvářet celé části vrstvu po vrstvě. Shodou okolností byl ve stejnou dobu představen první SLS stroj (selective laser sintering).

Další průlom nastal v roce 1999, kdy byl do lidského těla implantován první orgán vytištěný pomocí 3D tisku [1]. Povedlo se to vědcům z institutu ve Wake Forest pro regenerativní medicínu, kde vytiskli strukturní prvek močového měchýře, který poté pokryli lidskými buňkami a implantovali jej do lidského těla.

Tato bakalářská práce pojednává o vlivu parametrů dokončovacího zpracování na mechanické vlastnosti vzorků vytištěných pomocí stereolitografie. Především je zkoumán vliv teploty a doby dotvrzení na pevnost v tahu, modul pružnosti a přetvoření v tahu. Dalším cílem bylo sestrojení dotvrzovací aparatury, která by obstála v porovnání s originálním dotvrzovacím zařízením firmy Formlabs.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Co je 3D tisk

3D tisk je aditivní nanášení materiálu po tenkých vrstvách za pomoci 3D tiskárny [2]. To znamená, že se materiál přidává na sebe, a tím vzniká výsledný 3D objekt. Podklady pro 3D tiskárnu jsou vytvořeny pomocí nejrůznějších 3D programů např. 3ds Max, Maya nebo Blender. Důležité však je uložení těchto podkladů do formátu, který 3D tiskárna podporuje. Samotný tisk už je nanášení jednotlivých vrstev na sebe a jejich spojování pomocí různých technologií. Mezi tyto technologie patří zejména SLS, SLA, LOM, FDM a DLP.

## 1.2 Techniky 3D tisku

### 1.2.1 Selective laser sintering (SLS)

Tato metoda vytváří 3D objekty zapékáním práškového materiálu laserem [3]. Příkladem je tiskárna Formlabs Fuse 1, která je zobrazena na obrázku 1. Objekty vytištěné touto technologií jsou vyrobeny nejčastěji z plastu, který je rozptýlen na vrchu stavební platformy [4]. Roztavení materiálu zajišťuje laser řízený počítačem, který vysílá pulsy na platformu a vytváří tak jednu vrstvu objektu. Práškový materiál je zahříván laserem buď těsně pod bod varu nebo nad něj, a v této fázi dochází k tání práškového materiálu. Jakmile je jedna vrstva dokončena spojením jednotlivých částic, stroj posune plošinu směrem dolů (většinou o méně než 0,1 mm) a započne osvit další vrstvy. Tento proces se opakuje, dokud není celý 3D objekt vytištěn.

Stejně jako u jiných technik tisku, i zde je nejdříve potřeba vytvořit CAD soubor, který je následně převeden na formát STL [4]. Díky tomu mohou firmy uschovávat pouze STL soubory, které je možno kdykoliv upravit, a navíc fyzicky nezabírají žádné místo.

Velkou výhodou této technologie je absence podpůrného materiálu, tu zde tvoří nezapečený práškový materiál [5]. To je také důvod proč tuto technologii můžeme nazývat téměř bezodpadová. Prášek, který tvoří podporu se po dokončení části vysype a je možné ho všechn znovu použít. Absencí podpůrného materiálu se také výrazně zmenšuje riziko poškození objektu, které často vzniká při jeho odstraňování z modelu.

SLS tiskárny mohou tisknout z velké škály materiálů, jako např. plasty, keramika, sklo a kovy [4]. Z tohoto důvodu je tato technologie vhodná pro použití jak pro prototypy, tak pro výsledné produkty.



Obrázek 1 SLS tiskárna Formlabs Fuse 1 [6]

## 1.2.2 Fused deposition modeling (FDM)

Technologie FDM je v současné době nejvíce rozšířena [7]. Přispívá tomu velmi dobrá cenová dostupnost, kdy spodní hranice se pohybuje okolo 2 500 Kč a snazší obsluha než u technologií používajících pryskyřici nebo práškový materiál. Hlavním stavebním materiálem je zde roztavený plast, který se dodává navinutý ve formě struny tzv. filamentu (viz. obr. 2). Filament má nejčastěji průměr 1,75 mm, dříve se používal také filament o průměru 3 mm, ale jeho dávkování bylo méně přesné.

Před samotným započítím tisku je tiskárnu potřeba nechat nahřát na teplotu, která závisí na druhu filamentu a nakalibrovat neboli upravit vzdálenost mezi podložkou a tiskovou hlavou [8]. Je potřeba nahřát nejen hotend, tedy díly, které se starají o nahřátí a chlazení materiálu, ale i podložku.

Hlavní částí u této technologie je extrudér [7]. Pohyb extruderu zajišťují krokové motory, které jsou schopny se pohybovat ve směru X, Y, Z s tím že v ose Y se pohybuje podložka

a X a Z extrudér. Ten se skládá z několika dalších součástí: teflonová trubička, chladič, tiskový ventilátor, izolátor, Heater block a tryska. Filament jde nejdříve přes teflonovou trubičku do chladiče, který se stará aby bylo správně odváděno teplo šířené přes izolátor. Heater block je tvořen materiálem s dobrou tepelnou vodivostí, ve kterém je umístěno elektrické topné těleso. Zde už je filament roztavený a vytlačován tryskou. Takto vytlačovaný roztavený filament tvoří jednotlivé vrstvy, které jsou vrstveny na sebe. Tímto vrstvením vzniká postupně výsledný 3D objekt, který tuhne zchlazením filamentu. Používají se materiály nejčastěji na bázi termoplastu. Nabídka se však neustále rozrůstá vzhledem ke zvyšující se poptávce a možnostech využití [9].

Mírnou nevýhodou této technologie mohou být viditelné jednotlivé vrstvy na výsledném objektu, které jsou v rozmezí od 0,05 do 0,3 mm [7].



Obrázek 2 PRUSA i3 MK3S [10]

### 1.2.3 ColorJet Printing (CJP)

Tato technologie vychází z inkjetového tisku s tím rozdílem, že tiskne na tenkou vrstvu práškového materiálu [11]. Používaný inkoust je hlavním pojivem, které drží práškový materiál pohromadě a zároveň udává barevnost objektu. Třetí dimenze je zde dosahováno vrstvením na předchozí vrstvy.

Princip tisku spočívá v nanášení materiálu v tenkých vrstvách pomocí válečku přes konstrukční platformu [12]. Po nanesení vrstvy je inkjetovými hlavami selektivně vystřikován barevný inkoust, který způsobuje ztuhnutí práškového materiálu. Po dokončení vrstvy je posunutí konstrukční plošiny směrem dolů zhruba o 0.088 až 0.1 mm. Po dokončení tisku je objekt stále křehký a měkký. Je tedy potřeba, aby objekt prošel dodatečným zpracováním, které zlepší jeho vlastnosti.

Uplatnění této technologie se nachází zejména v architektuře, pro výrobu vědeckých a vzdělávacích modelů a modelů pro veletrhy a výstavy [11]. Jako příklad je uvedena tiskárna ProJet CJP 860Pro (viz. obr. 3).



*Obrázek 3 ProJet CJP 860Pro [13]*

#### **1.2.4 PolyJet**

Technologie PolyJet pracuje opět na principu inkoustového tisku [14]. Avšak místo vystřikování kapek na papír, vystřikují kapky UV tvrditelné pryskyřice přímo na konstrukční plošinu. Slouží jim k tomu jemné tiskové trysky. Stroje dokáží nanášet vrstvu tenkou až 16 mikrometrů, což zajišťuje tvorbu detailních objektů. Materiál, který dopadne na konstrukční plošinu je kontinuálně dotvrzován pomocí UV záření. Po dokončení vrstvy se konstrukční plošina

posune směrem dolů a celý proces se opakuje do konečného vytištění 3D objektu [15]. Tuto technologii využívá např. firma Stratasys viz. Obr.4.

Pro vytvoření převisů a otvorů je nutná podpůrná struktura, zajišťující stabilitu objektu. V případě nestability materiálu by mohlo dojít k nepřesnostem v tisku stěn a detailů. Výhodou podpůrného materiálu u PolyJetu je jeho vlastnost rozpouštění se v proudu vody. Tím se snižuje riziko poškození modelu [15].

Tato technologie umožňuje nejen možnost barevného tisku v celé ploše objektu, ale i jeho schopnost měnit v jednom dílu vlastnosti materiálu jako je pružnost nebo pevnost v tahu [14], [15]. Této vlastnosti je docíleno větším počtem trysek, které mohou vysílat kapky různého materiálu ve stejný čas.

Polyjet nachází uplatnění v mnoha odvětvích, především u automobilového průmyslu, v architektuře, v průmyslovém a vzdělávacím odvětví a další [15]. Velké uplatnění nachází také ve zdravotnictví, kde dovoluje vytvářet repliky orgánů, kloubů nebo protetické končetiny. Dále se hojně využívá ve stomatologii, kde se vytvářejí přesné korunky, můstky a také ortodontické přístroje.



*Obrázek 4 Stratasys Objet1000 [16]*

## 1.2.5 Stereolitografie (SLA)

Všechny stereolitografické stroje jsou postaveny víceméně na stejném principu. Používají UV zdroj nebo projektor k selektivnímu vytvrzení tekuté pryskyřice [17]. Hlavním rozdílem mezi stroji je různé uspořádání hlavních částí, jako je zdroj záření, konstrukční plošina a nádrž s pryskyřicí.

U SLA strojů můžeme nastavovat jen velmi málo parametrů, konkrétně výška vrstvy a orientace tištěné části [18]. Typická výška vrstvy ve SLA strojích je mezi 25 a 100  $\mu\text{m}$ . Čím je zvolena nižší výška vrstvy, tím přesnější jsou zakřivené části, bohužel se tím značně prodlouží čas potřebný k dokončení tisku ale zároveň se zvýší pravděpodobnost selhání tisku. Dalším parametrem je maximální velikost tištěného objektu, která závisí na použitém typu troje. Rozlišujeme dva základní typy v závislosti na pohybu konstrukční plošiny. Ta se může při začátku tisku nacházet v nejvyšší části a s časem klesat, tuto techniku nazýváme top-down. Naopak pokud začíná v nejnižší části a s časem stoupá, označujeme ji jako bottom-up.

Typ **top-down** je složený z velké nádrže naplněné pryskyřicí a konstrukční plošiny. UV laser, který je umístěn nad nádrží, se zaměřuje na povrch pryskyřice a sleduje průřez objektu. Po dotvrzení jedné vrstvy se plošina posune o výšku vrstvy a stěrač rozetře čerstvou pryskyřici přes nádrž. Tento proces se opakuje, dokud není vytvořena celá část. Tento typ můžeme nalézt převážně u větších průmyslových řešení, kde jsou velké objemy výroby. Jsou konstruovány pro větší části a jejich nádrž na pryskyřici dosahuje objemu od 10 do 100 litrů [17].

Typ **bottom-up** používá menší nádrže na pryskyřici, které mají průhledné dno. Je to z důvodu umístění UV zdroje, který je pod nádrží s pryskyřicí. Konstrukční plošina je spuštěna do nádrže s pryskyřicí, ale jen do výšky vrstvy od dna nádrže [17], [18]. UV laser, který je pod nádrží, míří na dva zrcadlové galvanometry, které usměrňují záření pomocí soustavy zrcadel na správné souřadnice. Odtud je paprsek zaostřován přes dno nádrže, kde poté vytvrzuje pryskyřici. Po vytvrzení jedné vrstvy se plošina posune směrem nahoru, aby zde mohla proudit čerstvá pryskyřice. U sofistikovanějších systémů je zde doplněn stěrač a vyhřívání nádrže k zajištění řízeného prostředí. Stěrač prochází přes nádrž, aby bylo zajištěno proudění pryskyřice [17]. Tento systém využívá i firma Formlabs pro své tiskárny, viz. obr. 5.

Výhodou tohoto typu je možnost modelovat objekty s větším objemem, než je objem nádrže, stačí mu pouze dostatek pryskyřice, aby byla stále pokrytá spodní část modelu [17]. To umožňuje podstatné zmenšení těchto strojů a jejich použití i mimo průmyslovou oblast.

Naopak nevýhodou zde mohou být podpůrné struktury, kterou vyžadují oba typy SLA [17]. Pouze malou část objektů je možno tisknout bez nich, zaleží na konkrétním 3D modelu. Podpůrné struktury jsou tištěny ze stejného materiálu jako je tištěný objekt [18]. Nevýhodou je nutnost manuálního odstranění, což zvyšuje šanci na poškození modelu. Je možno ovlivnit místo tvorby těchto struktur, a to orientací objektu.

Každý z dvou výše zmíněných typů SLA využívá podpůrné struktury k jinému účelu [17]. Typ top-down je využívá k držení částí na přesném místě z důvodu zajištění detailů objektu. Musí totiž odolávat bočnímu tlaku od stěrače. Typ bottom-up používá podpůrné struktury pro připojení přesahujících částí (převisů) ke konstrukční plošině. Dále také zabraňuje průhybu vlivem gravitace a zachovává nově vytvořené sekce během odlupování.

Po dokončení tisku se plošina zvedne z nádrže a je potřeba objekt vyjmout z plošiny a omýt od přebytků pryskyřice [19]. Aby objekt získal nejlepší možné mechanické vlastnosti je ještě zapotřebí umístit ho do UV dotvrzovací pece.

Materiály se dodávají ve formě tekuté pryskyřice. Existuje celá řada možných materiálů, které počínají klasickými pryskyřicemi jako je čirá nebo černá, přes dentální až po keramické pryskyřice. To je důvod proč stereolitografii využívá mnoho průmyslových odvětví, je možno ji nalézt od lékařských až po výrobní průmysl, kde je používána k tvorbě prototypů nebo i finálních produktů [20].



Obrázek 5 Formlabs Form 3 [21]

### 1.3 Způsob dotvrzování 3D výtisků

Po dokončení 3D objektu je potřeba provést dotvrzení, to má za úkol zlepšit mechanické a termální vlastnosti objektů [22], [17]. Vlastnosti doznají zlepšení z důvodu dokončení polymerizace, protože po vytištění ještě není polymerizace dokončená. K dotvrzení je potřeba UV záření o dané vlnové délce a určitá teplota, parametry dotvrzení jsou závislé na typu pryskyřice.

Dotvrzení objektů tedy potřebuje UV záření a teplo [22]. UV záření spouští tvorbu dalších chemických vazeb, které zvýšením počtu vazeb zlepšují vlastnosti objektu. Po vytištění nejsou všechny reaktivní skupiny zreagovány, cílem dotvrzování je spojit co nejvíce těchto skupin. Pomocí UV záření jsou aktivovány zbývající fotoiniciátory, které se rozpadnou a vytvoří radikály. Aby bylo dosaženo co nejvyššího počtu spojení reaktivních skupin, tak je využíváno teplo. Teplo zde zajistí zvýšení energie, a tedy i mobility v polymerní síti. Tato energie dává skupinám větší pravděpodobnost vzájemného nalezení a vytvoření vazby.

Většina společností nabízí své dotvrzovací stanice, např. společnost Formlabs má svou dotvrzovací stanici nazvanou *Form Cure*, která je na obr.6. S ohledem na cenu dotvrzovacích stanic je často hledána alternativa, která je cenově přijatelnější.



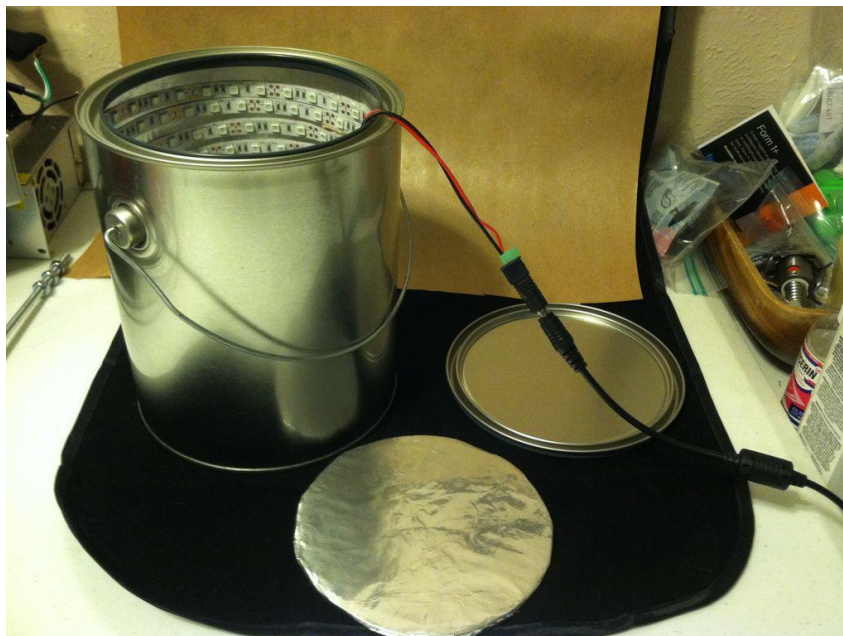
Obrázek 6 Form Cure [23]

Jsou dostupné návody na mnohá zařízení, některá jsou sofistikovaná zařízení, která využívají digitální nastavování parametrů, až po nejjednodušší, kdy se používají pouze led diody a karton [24], [25].

Nejsložitější zařízení pochází od uživatele vystupující pod přezdívkou Fablab\_Irbid, které je možné najít na webových stránkách [www.instructables.com](http://www.instructables.com) [24]. Jednotlivé stěny byly vyřezány pomocí laserové řezačky z 6 mm dřevěné desky. Do těchto desek byly vyvrtány jednotlivé otvory pro UV LED diody. Aby bylo možné používat nastavení doby osvitů pomocí ovládacích prvků, byla zde použita programovatelná deska Arduino Uno.

Další, méně složitá varianta je vytvořena z plechovky od barvy (1 galon) viz. obr. 7 [26]. Jako UV zdroj zde byly použity LED pásy přilepené oboustrannou páskou. Pod nimi je reflexní vrstva, aby se zvýšila intenzita záření.

Nejjednodušší zařízení se skládá z UV lampy na nehty, solárního otočného stojanu a větší krabice [25]. Lampa na nehty je zbarvena dna a z boku jsou přidělané kusy kartonové krabice pokryté odraznou fólií. Cely vnitřek krabice je pokryt odraznou fólií, opět ke zvýšení intenzity UV záření. Na horní části se nachází otvor pro položení lampy na nehty.



Obrázek 7 UV LED dotvrzovací zařízení [26]

## 1.4 Mechanické vlastnosti polymerů

Je mnoho mechanických charakteristik, díky kterým jsou získány důležité informace pro použití čtyř mechanických vlastností materiálů (pružnost, plasticita, pevnost a houževnatost) [27]. Mechanické veličiny jsou závislé na zkušebních podmínkách, tvaru a přípravě testovacích vzorků. Z tohoto důvodu je tvar a rozměry zkušebních těles normalizovány. Je tak zajištěno, že vzorky jsou vyrobeny za daných podmínek a z dané technologie. Mechanické charakteristiky můžeme dělit z několika hledisek, konkrétně z hlediska časového, dle charakteru působící síly a dle způsobu namáhání.

Pokud vzorky namáháme dochází ke změně tvaru, a tedy k deformaci [27]. Pokud síla přestane působit mohou nastat dva případy. V prvním případě, kdy se těleso po skončení působení síly vrátí do svého původního stavu nazýváme pružnou deformací. Pokud se vzorek do původního stavu nevrátí, nazýváme to plastickou deformací. Polymery mají složitější chování, jejich deformace při namáhání obsahuje obě složky deformace, tj. pružnou a plastickou deformaci. Takovouto deformaci poté nazýváme viskoelastickou deformací.

### 1.4.1 Tahové vlastnosti polymerů

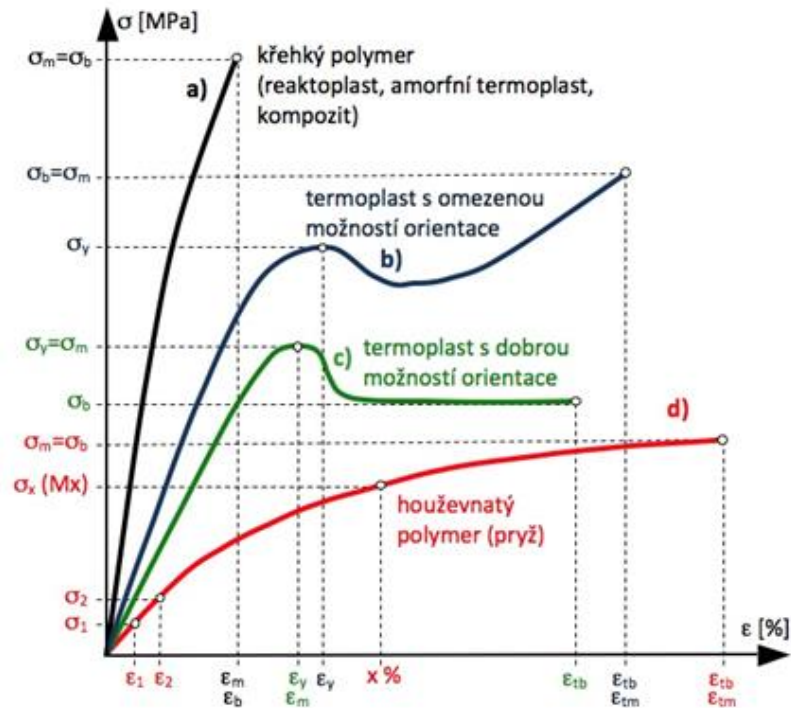
Jednou z nejzákladnějších mechanických charakteristik jsou právě tahové charakteristiky [27]. Pokud je zkušební vzorek namáhán v tahu, můžeme o sledovaném materiálu vyčíst informace z deformační křivky. Při průběhu tahových zkoušek se zapisuje působící síla v závislosti na poměrném prodloužení vzorku.

Pro tahové zkoušky jsou většinou používány vzorky tvaru tzv. psích kostí [27]. Přesné rozměry a tvar jsou stanoveny příslušnou normou. Tento tvar je ideální z důvodu dobrého uchycení v čelistech a soustředění napětí do zúžené části vzorku. Pro tahové zkoušky lze použít i jiné tvary, např. pro kaučuk mohou být použity vzorky ve tvaru kroužků. Pro fólie nebo desky se používají pásy.

Pevnostní charakteristiky daného materiálu jako napětí při přetržení, mez pevnosti, napětí v mezi kluzu nebo modul pružnosti je možno určit z deformační křivky viz. obr. 8 [27]. Napětí při přetržení ( $\sigma_b$ ) je charakterizováno jako napětí, při kterém dojde k porušení vzorku. Mez pevnosti ( $\sigma_m$ ) je největší napětí v tahu odpovídající maximální síle ( $F_{max}$ ), která působí v průběhu zkoušky. Mez pevnosti je možno vypočítat podle rovnice (1). Kde  $S_0$  je původní průřez vzorku. Není pravidlem, že se mez pevnosti vždy shoduje s napětím v době porušení vzorku.

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Napětí na mezi kluzu ( $\sigma_y$ ) je takové napětí, kdy vzniká plastická deformace [27]. Napětí, které je při mezi kluzu je považováno za maximální hranici napětí. Pokud by byla překročena vznikly by trvalé deformace.



Obrázek 8 Deformační křivky polymerů [27]

Z lineární části deformační křivky můžeme vyhodnotit i další charakteristiku, kterou je modul pružnosti [27]. Modul pružnosti vyjadřuje tuhost daného materiálu, tedy čím větší modul, tím vyšší je tuhost. V lineární části také platí Hookův zákon, tedy že deformace je přímo úměrná napětí, jak vyjadřuje rovnice (2). Kde  $E$  je modul pružnosti,  $\sigma$  je napětí a  $\epsilon$  je poměrné prodloužení. Pokud bude zatížení růst, bude docházet k zakřivení tahové křivky. Deformace je vratná pouze do místa označovaného jako mez pružnosti, poté i jemné zvýšení zatížení způsobí plastickou deformaci. Po překročení této hranice nastává mez kluzu a mez pevnosti, kdy dojde k přetržení.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Stanovení modulu pružnosti je u polymerů obtížné, již od počátku se totiž chovají nelineárně [27]. Proto se používá metoda, kdy je zkušební vzorek protáhnut na smluvenou hodnotu a z těchto

hodnot určeno smluvní napětí. Toto napětí je označováno jako modul protažení, vypovídá o tuhosti materiálu v jeho počáteční fázi.

Z deformační křivky lze dále určit poměrné prodloužení v mezi kluzu, poměrné prodloužení na mezi pevnosti a poměrné prodloužení při přetížení.

## 1.5 Materiály Formlabs

Formlabs nabízí celou řadu materiálů, které se liší svými vlastnostmi a použitím. Nabízí pryskyřice standartní, strojírenské, dentální, šperkařské a experimentální [17].

Standartní pryskyřice slouží k vytváření objektů, které mají ihned po vytištění hladký a jemný povrch. I když je doporučováno dotvrzení, není nutné pro všechny aplikace [17]. To činí standartní pryskyřici ideální pro rychlé prototypování a vývoj produktů. Standartní pryskyřice se nabízejí ve verzích: Clear, White, Grey, Black, Color Kit a Draft [28].

Strojírenská pryskyřice simulují vstřikované plasty. To může pomoci konstruktérům a designerům konceptualizovat, prototypovat, testovat a vyrábět výsledné produkty [17]. Tato pryskyřice disponuje materiálovými charakteristikami jako je tuhost, odolnost, pružnost nebo teplotní odolnost. Nabízejí se verze: Tough, Durable, Rigid, Grey Pro, Flexible, Elastic a High Temp [29].

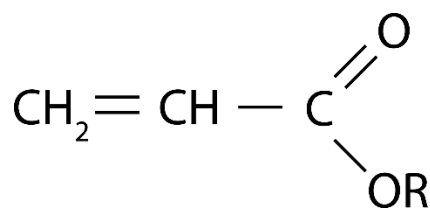
Dentální materiály umožňují vytvářet řadu personalizovaných dentálních produktů [17]. Tyto části jsou založeny na intraorálním nebo CBCT skenu pacienta. Specifické aplikace zahrnují diagnostické a vzdělávací modely. Nabízejí se verze: Dental SG, Dental LT Clear, Dental Model, Castable Wax, Grey a Digital Dentures [30].

Šperkařská pryskyřice je vhodná pro tvorbu prototypů a odlévání šperků se složitými detaily [17]. Pro tvorbu prototypů je doporučována standartní modelovací pryskyřice, a to z důvodu vytvoření levného zkušebního kusu. Odlévatelná pryskyřice je určena pro přímé odlévání, což dovoluje klenotníkům tvořit přímo z digitálních dat. Nabízejí se verze: Castable Wax, Castable V2, High Temp a Grey [31].

Experimentální pryskyřice má různé formulace, které používají přísady a kompozity k otevření možností pro nové experimentální materiály [17]. Keramika po dotvrzení produkuje výtisky

s typickou strukturou, která vypadá jako tradiční keramika. Po vypálení se objekt stává čistě keramickým a je možné ho glazovat. Probíhají i experimenty s přidáním vonného oleje pro vonné 3D tisky. V tuto dobu se nabízejí pouze verze Ceramics.

Výrobce bohužel neuvádí složení svých pryskyřic, ale je předpokládána polyakrylátová skupina, díky které je umožněno sesíťování. Polyakrylátová skupina je zobrazena na obr. 9



Obrázek 9 Akrylát

## 2 Praktická část

### 2.1 Použité materiály

Pro tuto práci byly použity materiály od firmy Formlabs. Oba jsou z řady standartních pryskyřic, a to Clear a Grey. Tyto pryskyřice jsou určeny k vytváření hladkých a jemných objektů.

Pryskyřice typu Clear je vhodná pro tvorbu objektů vyžadujících průsvitnost [32]. Pokud se použijí správné dokončovací metody, je možno dosáhnout průhlednosti. Průhledné části mohou být použity pro různé aplikace jako je např. optika nebo světlovody. Rozsah metod je od rychlých řešení pro průhlednost až po specializované techniky, které vytvářejí opticky čisté části. Je možno poté zobrazovat vnitřní části nebo LED diody. Mezi klasické dokončovací metody patří ruční leštění a broušení, rozprašovací nátěr nebo natírání pryskyřicí [32].

Pryskyřice typu Grey nabízí atraktivní vzhled, který je vhodný pro tištění složitých vzorů [33]. Její výhodou je matný vzhled a fakt, že není potřeba dokončovací zpracování. Pevnostní vlastnosti obou pryskyřic jsou uvedeny v tabulce č.1, tak jak jsou uváděny výrobcem.

Tabulka 1 Pevnostní vlastnosti pryskyřic Clear a Grey [34]

	Nedotvrzené	Dotvrzené	Metoda
<b>Vlastnosti v tahu</b>			
Mez pevnosti v tahu	38 MPa	65 MPa	ASTM D 638-10
Modul pružnosti	1,5 GPa	2,8 GPa	ASTM D 638-11
Přetvoření v tahu	12%	6%	ASTM D 638-12

## 2.2 Experimentální přístroje

### 2.2.1 3D tiskárna Formlabs

K vytištění vzorků byla použita tiskárna Form 2 (viz. obr. 10) od společnosti Formlabs. V současné době již existuje novější model označený Form 3. Tiskárna, jejíž parametry jsou uvedeny v *tabulce č. 2*, je složena z několika základních částí. Nejpodstatnější částí je stavební plošina, ta je čtvercového tvaru a je odnímatelná pomocí jednoduchého úchyty. Je zde používán pouze vertikální pohyb, který zajišťuje závitová tyč umístěná uprostřed zadní části. Stavební plošina je opakovaně ponořována do vany napuštěné pryskyřicí. Aby byla zajištěna správná výška hladiny a promíchání pryskyřice nachází se zde stěrač. Ten vždy, když je plošina v horní části, promíchá pryskyřici.

Jak už popis napovídá tato tiskárna pracuje na principu stereolitografie, který byl popsán podrobně v teoretické části. Na rozdíl od jiných technologií zde nejsou viditelné jednotlivé vrstvy. Než se tiskárna spustí je potřeba do ní nahrát vlastní 3D model. K tomu slouží program PreForm, který podporuje dva základní formáty OBJ a STL.

Nahráný 3D model se rozkopíruje na požadovaný počet kusů. Software se postará o to, aby byl model rozřezán na jednotlivé tiskové vrstvy. Je důležité, aby každá sada vzorků byla na stavební plošině umístěna jinde, můžeme tak prodloužit životnost nádrže [35].

Po nakopírování a umístění modelů se nastaví parametry tisku, které jsou tloušťka vrstvy a typ pryskyřice. Pro tisk je důležitý zásobník, ve kterém je umístěna kapalná pryskyřice. Ta je podle potřeby vypouštěna do vany ve spodní části tiskárny. Doplnována je vždy tak aby byla zajištěna dostatečná výška hladiny. Zde je pak pomocí UV laseru vytvrzena jedna vrstva za druhou. [36]

*Tabulka 2 Parametry 3D tiskárny [37]*

Rozměry tiskárny [mm]	345 × 330 × 520
Rozměry tiskového prostoru [mm]	145 × 145 × 175
Tloušťka nanášené vrstvy [μm]	25 – 300
Velikost laserového bodu [μm]	140



Obrázek 10 tiskárna Form 2 [38]

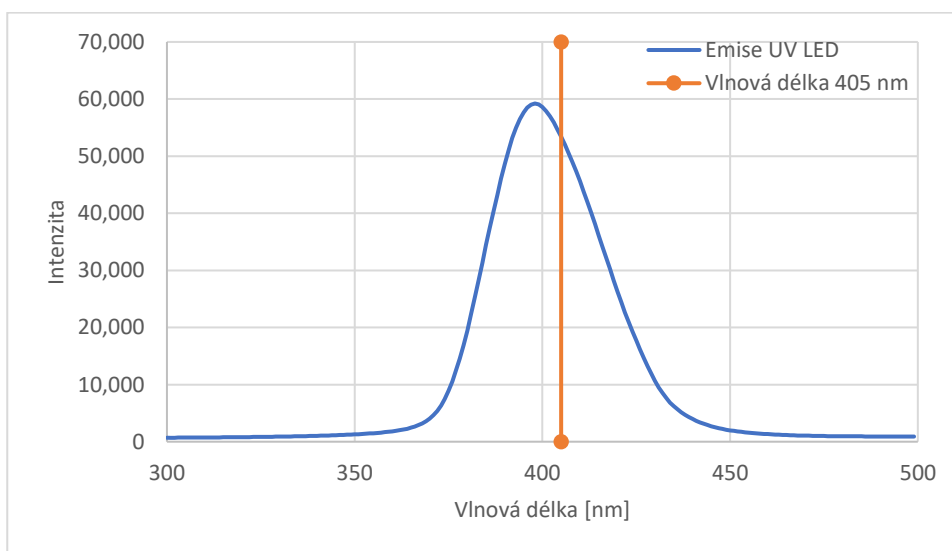
### 2.2.2 Dotvrzovací zařízení

Dotvrzovací aparatura byla sestavena v rámci bakalářské práce (viz. obr. 11). Hlavní částí dotvrzovací aparatury je horkovzdušná sušárna „Klarstein Fruitover D Dörrautomat Timer 5“ s možností nastavení teploty. Pro dotvrzovací zařízení byly použity 4 patra horkovzdušné sušárny a víko. Jednotlivá plata sušárny byla pomocí frézy zbavena mřížek a téměř na všech patrech. Důvodem je možnost vytvrzovat i větší modely než pouze zkušební vzorky. Na dno sušárny byla umístěna mřížka, která byla odstraněna z jednotlivých pater. Po odfrézování byla jednotlivá patra slepena k sobě a vyvrtány otvory pro uchycení UV LED pásku (6 m). Tyto pásy používají vlnovou délku 395-405 nm (viz obr.12). Specifikace LED diod jsou uvedeny v tabulce 3. LED pásy jsou uchyceny pomocí stahovacích pásků na místech mimo diody. Po uchycení a zapojení pásků se aparatura ovinula reflexní hliníkovou fólií, aby bylo zamezeno pronikání UV záření a tepla do okolí sušárny a k zesílení emitujícího záření. Pro zajištění optimálních parametrů při měření byl přidán automatický časovač, který po uplynutí nastavené doby vypne osvětlení. Jeho nastavení není nijak složité pouze je nutno zvolit, zda se jedná o vteřiny či minuty.

Samotné dotvrzování vzorků probíhalo za předem jasně stanovených podmínek, kdy se vycházelo z parametrů dodaných výrobcem jako optimální. Jako doporučené parametry pro pryskyřici typu Clear je udávána teplota 60 °C a doba 15 minut, pro pryskyřici typu Grey teplota 60 °C a doba 30 minut. Vzorky byly dotvrzovány jak při laboratorní teplotě, tak při teplotě udávanou výrobcem, a to v časových intervalech 10, 20, 30 a 40 minut.



Obrázek 11 Dotvrzovací aparatura



Obrázek 12 Emisní spektrum UV LED

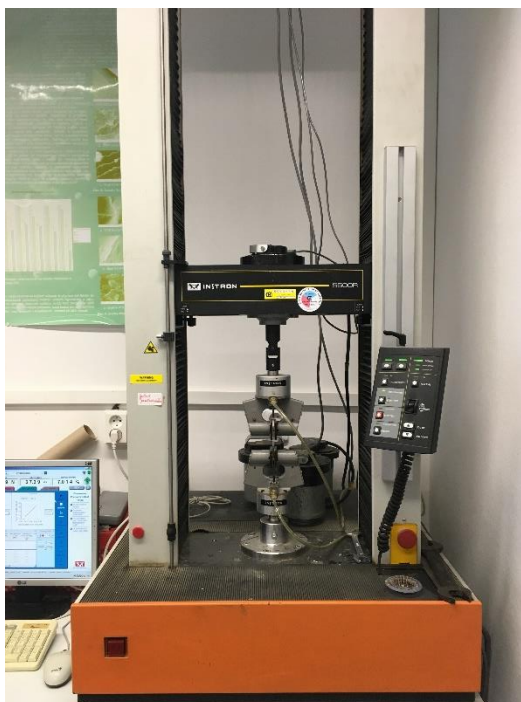
Tabulka 3 Specifikace LED pásku [39]

<b>Barevná varianta</b>	Ultrafialová
<b>Vlnová délka</b>	395 - 405 nm
<b>Vstupní napětí</b>	12V DC
<b>Příkon</b>	9,6W/m
<b>Počet LED</b>	120/m
<b>Úhel svitu</b>	120°
<b>LED čip</b>	3528 SMD
<b>Životnost</b>	až 50 000 h
<b>Šířka pásku</b>	8 mm
<b>Výška pásku</b>	2,6 mm
<b>Návin na kotouči</b>	5 m
<b>Krytí</b>	IP20
<b>Maximální délka zapojení</b>	10 m
<b>Dělitelnost</b>	každých 2,5 cm

### 2.2.3 Trhací stroj INSTRON 5500R

INSTRON 5500R (viz. obr. 13) je přístroj sloužící pro proměření materiálů, jejichž pevnost v tahu není vyšší než 5kN [40]. Přístroj může být ovládán pomocí počítače přes určený program, nebo pomocí manuálního ovládání. Je zde také velká škála možností pro připojení periferních zařízení.

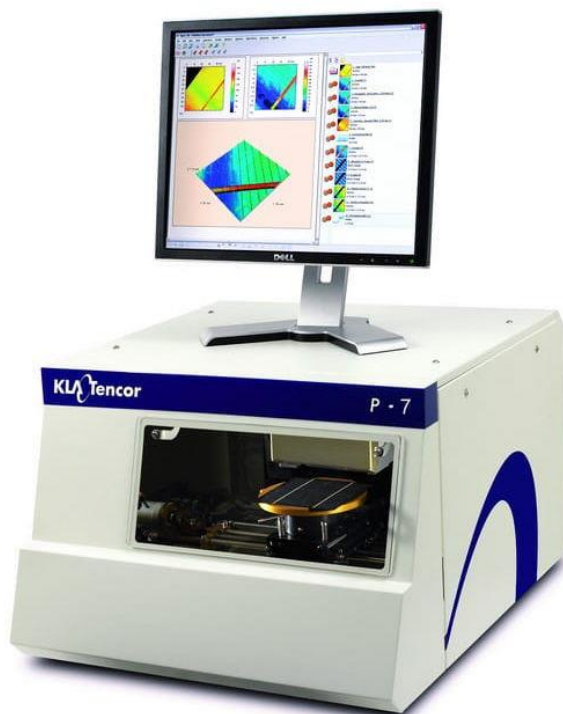
INSTRON 5500R měří zátěž 5 čidly, která jsou vzájemně zaměnitelné [40]. Tyto čidla jsou schopna měřit zátěž s přesností  $\pm 0,5\%$  z dané hodnoty a nebo  $0,1\%$  z plné výchylky čidla. Rychlost měření se pohybuje mezi 0,001 až 500 mm/min s přesností 0,1%. Rychlost návratu čidla do původní polohy je 500 mm/min. Charakteristickou vlastností přístroje jsou pneumatické čelisti s tlakem vzduchu 0,6 MPa. Přístroj pracuje dle norem NF. A03-501, třídy O, BS 1610 A1, DIN 51220 třída 0,5, a ASTM E4.



Obrázek 13 INSTRON 5500R

#### **2.2.4 Profilometr KLA Tencor P-7**

Pomocí profilometru KLA Tencor P-7 (viz. obr. 14) je možno měřit míry nerovnosti od několika nanometrů až po jeden milimetr [41]. Profilometr podporuje 2D a 3D měření míry nerovnosti, drsnosti a napětí. Skenovací délka přístroje je 150 mm, optimální nastavení síly, kterou je možno nastavit od 0,03 do 50 mg zajišťuje snímač Ultra Life [42].



Obrázek 14 KLA Tencor P-7 [43]

### 2.2.5 Infračervený spektrofotometr Avatar 320 FT-IR

Infračervená spektroskopie měří absorbanci elektromagnetického záření v rozsahu  $12\,500 - 100\text{ cm}^{-1}$  [44]. Toto záření je schopné vyvolat rotačně-vibrační změny energetických stavů molekul. Tuto oblast dělíme na blízkou ( $12\,500 - 5\,000\text{ cm}^{-1}$ ), střední ( $5\,000 - 500\text{ cm}^{-1}$ ) a vzdálenou ( $500 - 100\text{ cm}^{-1}$ ). Nejvíce používanou k hodnocení polymerů je Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací tzv. FTIR [45]. V našem případě byl použit přístroj Nikolet Avatar 320 FT-IR (viz. obr.15). FTIR měří absorpci záření sledovanou látkou. Nejčastěji používanou oblastí je oblast střední ( $5\,000 - 500\text{ cm}^{-1}$ ). S tím, že každá skupina má svůj absorpční pás, který je unikátní pro danou skupinu.

Aby molekuly projevily charakteristické vibrace, je zapotřebí, aby se energie vibrace hledané skupiny, výrazně lišila od okolních vibrací [45]. Tyto vibrace se projevují v určitém rozsahu vlnočtu, který závisí na struktuře zbytku molekuly. Pokud by byly tyto energie podobné, docházelo by k vibraci molekuly jako celku.

Pomocí FTIR je možno stanovit stupeň konverze:

$$K = 100 \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \quad (3)$$

$A_0$  je plocha pásu funkční skupiny před osvitem a  $A_t$  je plocha pásu funkční skupiny po expozici. Stupeň konverze značí procentuální přeměnu [45].



Obrázek 15 Nicolet Avatar 320 FT-IR [46]

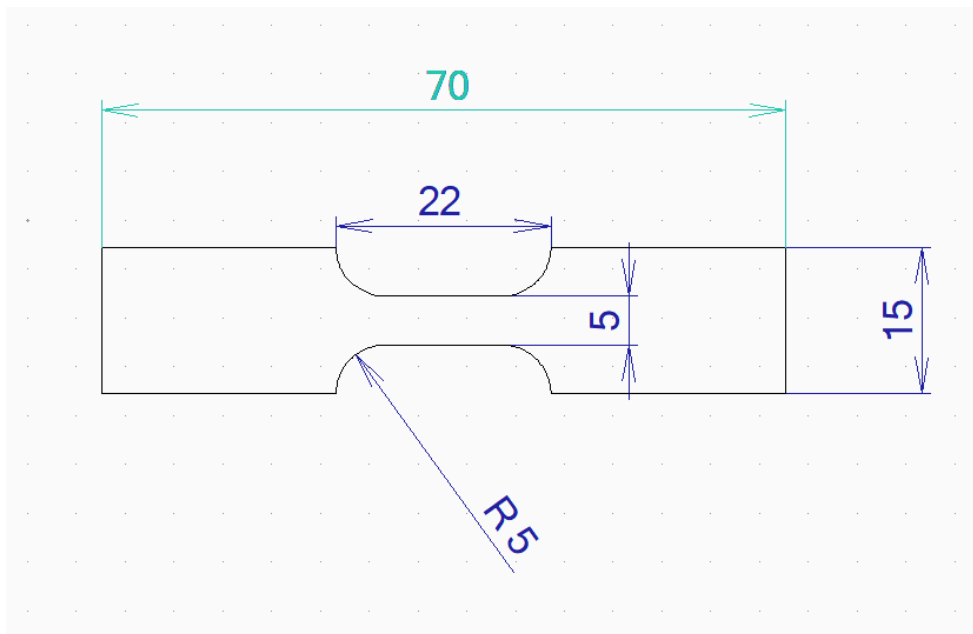
## 2.3 Experimentální postupy

V následujících podkapitolách jsou popsány experimentální postupy, které byly použity pro měření vzorků. Každý z použitých postupů má svá specifika a svým způsobem speciální. Jedná se o tyto postupy: zkouška pevnosti v tahu, profilometrie a infračervená spektroskopie.

### 2.3.1 Příprava vzorků

S ohledem na spotřebu pryskyřice byl pro testy pevnosti v tahu zvolen vzorek stanovený normou ASTM D 1708 – 02a, viz. obr. 16. Vzorek byl navržen v programu VariCAD, který slouží k vytváření technických 3D modelů. Jako základ modelu vytvoříme nejprve návrh ve 2D prostředí,

exportování do 3D modelu zajistí přidání šířky tomuto objektu. Posledním ale neméně důležitým krokem je uložení do formátu podporovaného 3D tiskárnou, v tomto případě do formátu STL.

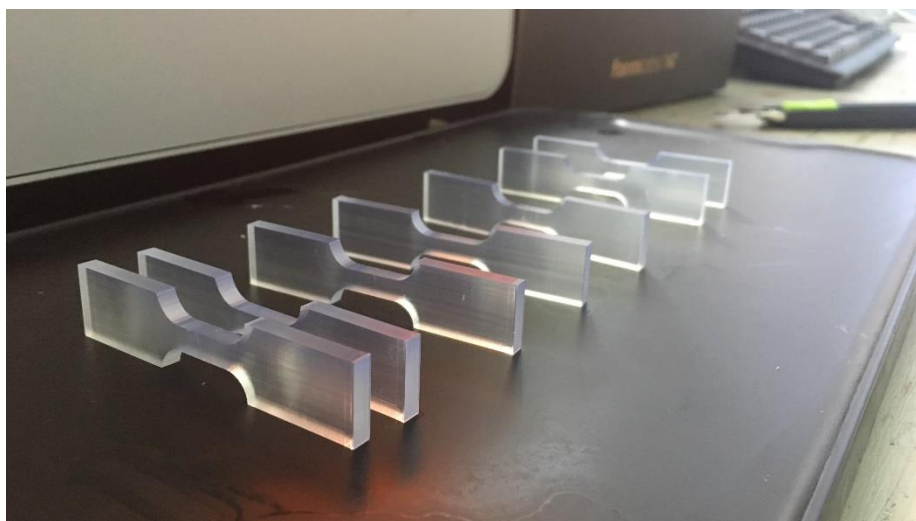


Obrázek 16 2D model zkušebního vzorku

Po otevření souboru v programu 3D tiskárny byla nastavena výška tiskové vrstvy a typ použité pryskyřice. Následně byl soubor rozmístěn na virtuální stavební plošinu a software provedl rozřezání na jednotlivé vrstvy.

Samotný tisk probíhal na 3D tiskárně Formlabs Form 2 s použitím pryskyřic typu Clear V02 a Grey V04. Pro tisk vzorku pomocí pryskyřice Clear V02 byla použita výška vrstvy 100 a 50  $\mu\text{m}$ . Vrstva 50  $\mu\text{m}$  byla použita z důvodu porovnání rozdílů drsnosti vzorků pomocí profilometru. Pro tisk vzorků pomocí pryskyřice Grey V04 byla použita výška pouze 100  $\mu\text{m}$ . Časy potřebné k vytištění vzorků se lišily v závislosti na použité pryskyřici. U pryskyřice Clear V02 činila doba potřebná k vytištění vzorku o výšce vrstvy 100  $\mu\text{m}$  4 hodiny 15 minut, u pryskyřice typu Grey V04 pouhé 4 hodiny. Při výšce vrstvy 50  $\mu\text{m}$  činila doba potřebná k vytištění vzorku pryskyřicí Clear V02 7 hodin a 45 minut.

Vytištěné vzorky bylo nutné promývat po dobu 10 minut v isopropylalkoholu, aby byly zbaveny zbytků tekuté pryskyřice (viz obr. 17). Následně se vzorky sušily 2 hodiny při laboratorní teplotě. Z důvodu zamezení vlivu UV záření z denního světla, bylo nutné sušení vzorků v temné místnosti.



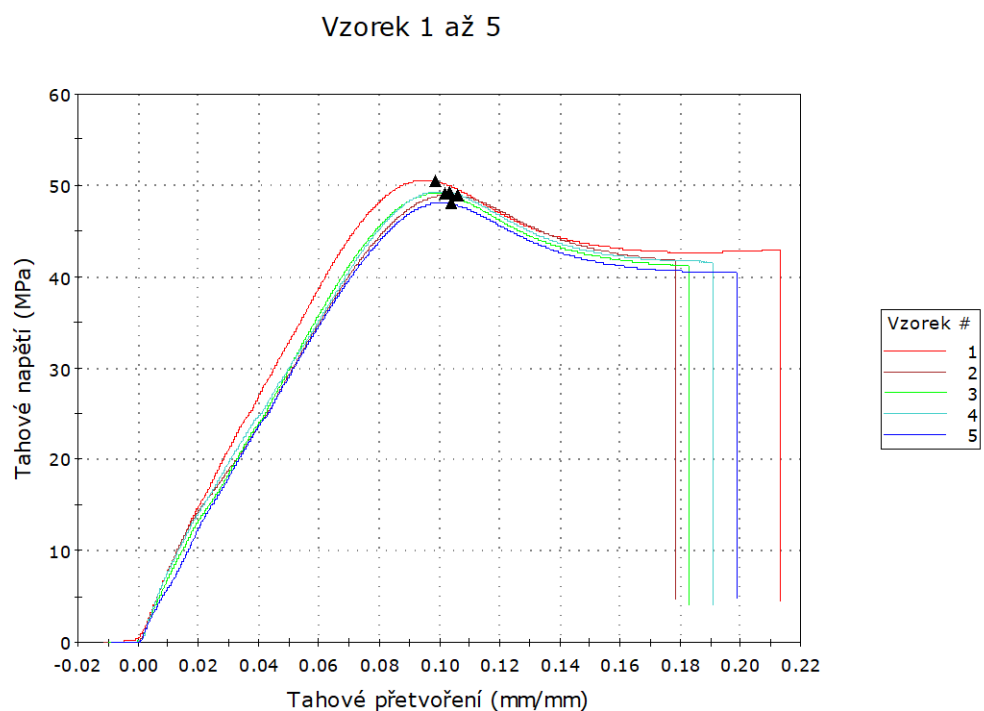
Obrázek 17 Zkušební vzorky

Dotvrzovací proces vycházel z parametrů daných výrobcem pryskyřic. Optimální teplota pro dotvrzení udávána výrobcem jako doporučená je 60 °C. V námi sestrojeném dotvrzovacím zařízení byla ovšem použita teplota o 5 °C vyšší, z důvodu vyššího úniku tepla při odebrání vzorků z dotvrzovacího zařízení. Doba potřebná k dotvrzení se liší dle typu pryskyřice. U pryskyřice Clear 15 minut a u pryskyřice Grey 30 minut. Dotvrzování probíhalo za působení UV záření a teploty doporučené výrobcem i za laboratorní teploty. Dotvrzování probíhalo v časových úsecích 10, 20, 30 a 40 minut. Dotvrzování v různých časových úsecích umožnilo porovnat hodnoty s hodnotami výrobce.

### 2.3.2 Zkouška pevnosti v tahu

Tahová zkouška probíhala na stroji INSTRON 5500R, který byl ovládán pomocí softwaru Bluehill v připojeném počítači. Každý vzorek byl před vlastní zkouškou proměřen v nejužší části,

a to jak šířka, tak hloubka. Tyto naměřené parametry byl poté zadány do programu a vzorek upevněn do čelistí (viz. obr. 19). Následně byla spuštěn stroj a probíhala vlastní zkouška, při které bylo účelem získat hodnoty modulu pružnosti, meze pevnosti v tahu a přetvoření v tahu. Při tahové zkoušce jsou stanoveny tahové vlastnosti materiálu. Průběh zkoušky je graficky znázorněn na obr. 18.



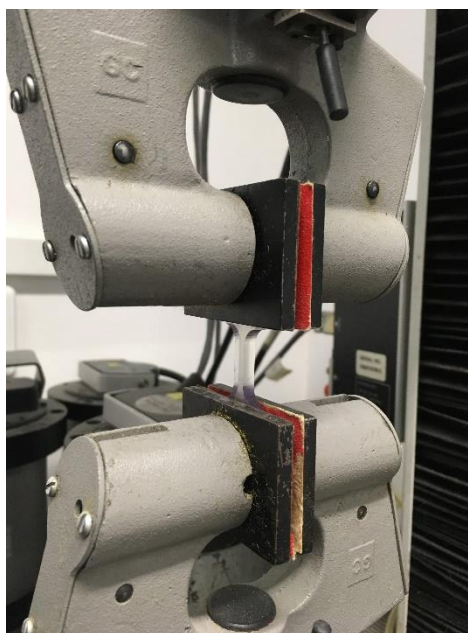
Obrázek 18 Grafické znázornění hodnot při tahové zkoušce pro vzorek Clear dotvrzovaný teplem a UV zářením po dobu 10 minut

Stanovení probíhalo za podmínek daných normou:

upínací hlava: 1 kN (pneumatické upínání – 0,6 MPa); upínací délka: 22 mm;  
měřicí rychlost: 1 mm/min“ [40]

Pro měření pevnosti v tahu bylo vytvořeno celkem 16 sad vzorků. Tyto sady se dále dělily do dvou skupin podle použité pryskyřice: 8 sad vzorků pro pryskyřici typu Clear a 8 sad vzorků pro pryskyřici Grey. Dotvrzování probíhalo dvěma způsoby a to jen pomocí UV záření, a nebo UV zářením s předem definovanou teplotou.

Každá sada obsahuje 7 vzorků, z nichž k měření bylo použito 5 kusů vzorků, zbylé dva kusy sloužili jako záložní pro případ, že by některý ze vzorků selhal.



Obrázek 19 Uchycení vzorku v čelistech

### 2.3.3 Profilometrie

K měření povrchu vzorku byl použit přístroj KLA Tencor P-7, kterým byla zaznamenávána míra nerovnosti povrchu. Byl měřen 2D i 3D sken povrchu vzorku s hrotem typu Green, který má poloměr 2  $\mu\text{m}$  a úhel 60°. 2D sken byl proveden pro tloušťku vrstvy 100 a 50  $\mu\text{m}$ . Pro tloušťku 100  $\mu\text{m}$  byl proveden příčný i podélný sken ke směru tisku, ale pro vrstvu 50  $\mu\text{m}$  nebylo provedeno měření v kolmém směru na směr tisku. Bylo by velmi obtížné umístit hrot na správné místo měření.

Pro 2D sken byly použity následující parametry:

Skenovací délka 1 mm, skenovací rychlost 20  $\mu\text{m/s}$ , vzorkovací frekvence 50 Hz, síla 0,15 mg a rozlišení 26  $\mu\text{m}$ . Vzorek byl skenován vícekrát na různých místech pro eliminování chyby.

### 2.3.4 Infračervená spektroskopie

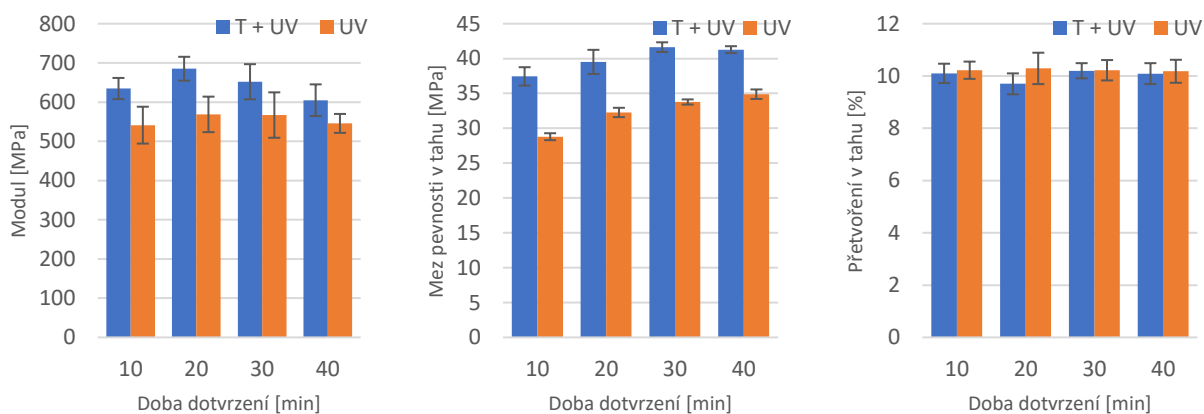
Pro měření byl použit přístroj Avatar 320 FT-IR od firmy Nicolet, který měří rozsah elektromagnetického záření od 4000 do 400  $\text{cm}^{-1}$  [47]. K měření byly použity již přetržené vzorky, které byly umístěny na ATR nástavec. Při měření bylo použito rozlišení 4  $\text{cm}^{-1}$  a 32 skenů. Byl použit ATR nástavec pro metodu zeslabeného úplného odrazu s diamantovým krystalem. U diamantového krystalu proniká záření do hloubky 1,6  $\mu\text{m}$ . Byla sledována plocha pro vlnčet 810  $\text{cm}^{-1}$ , který odpovídá dvojně vazbě a oblast okolo 1700  $\text{cm}^{-1}$  odpovídající ketonům sloužícím jako referenční pik. Konverze pro konkrétní způsob vytvrzení byla zprůměrována za tři naměřených spekter.

### 3 Výsledky a diskuze

#### 3.1 Zkouška pevnosti v tahu

Pro zkoušku pevnosti v tahu bylo vytvořeno celkem 112 vzorků. Tyto vzorky se dělily na 2 skupiny podle použitého materiálu a každá z těchto skupin se dále dělila na další dvě podskupiny podle způsobu dotvrzování. Každá z podskupin obsahovala 4 sady po 5 vzorcích.

Na obrázku 20 (a) je znázorněn graf, který ukazuje změnu modulu pružnosti s dobou dotvrzení při použití pryskyřice Grey. Již z prvního pohledu je patrné, že s použitím UV záření a teploty je možno dosáhnout lepších výsledků než dotvrzováním samotným UV zářením. Nejvyšších hodnot je dosaženo při dotvrzování po dobu 20 minut. Hodnoty pro dotvrzování pomocí UV záření a teploty měli stoupající tendenci, dokud nedosáhly doby dotvrzení 20 minut. Po dosažení této doby začal modul pružnosti klesat. Pokud by ovšem byly zohledňován interval spolehlivosti, nejvyšší hodnota by se při dotvrzování pouze UV zářením přikláněla k době 30 minut.

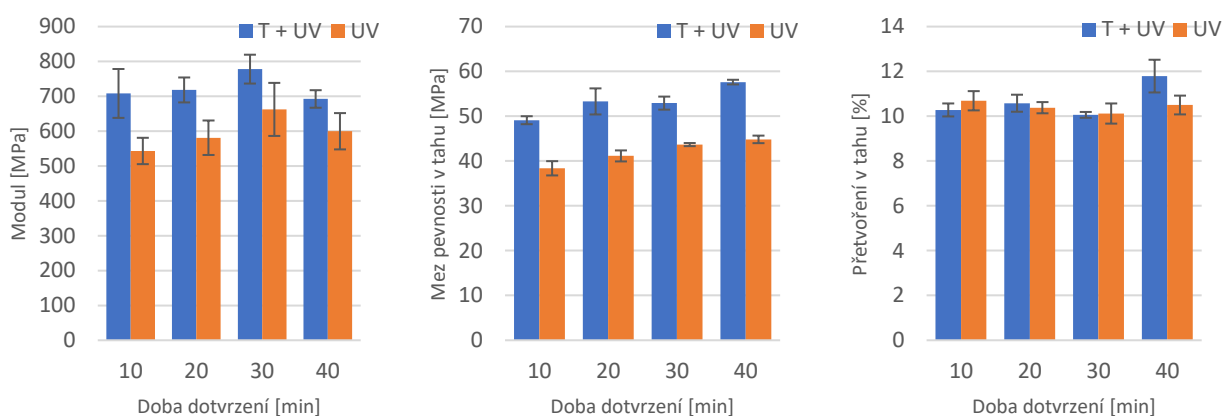


Obrázek 20 Grafické znázornění modulu pružnosti (a), pevnosti v tahu (b) a přetvoření v tahu (c), pro vytvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Grey

Na obrázku 20 (b) je možno pozorovat změnu meze pevnosti v tahu s dobou dotvrzování. Hodnota meze pevnosti v tahu jevila stoupající tendenci se zvyšující se dobou dotvrzení. Z obrázku je patrné, že vyšších hodnot je opět dosaženo použitím UV záření a teploty. Podle dat výrobce je optimálních hodnot dosaženo po 30 minutách. Mez pevnosti se po dosažení 30 minut zvyšovala jen velmi pozvolna.

Z obrázku 20 (c) je zřejmé, že přetvoření v tahu nezávisí na použité době dotvrzování. S ohledem na interval spolehlivosti, je možno označit přetvoření v tahu za víceméně konstantní.

Změna modulu pružnosti s dobou dotvrzení u pryskyřice typu Clear je zobrazena na obrázku 21 (a). U tohoto typu pryskyřice jasně převládá hodnota pro dobu dotvrzení 30 minut. Toto tvrzení platí pro oba použité typy dotvrzování. Po přesáhnutí doby 30 minut má modul pružnosti tendenci ke snižování. Opět je účinnější dotvrzování pomocí UV záření a teploty. Pokud přihlédneme k tolerancím, pohybuje se modul pružnosti ve velmi podobných mezích a s dobou dotvrzení se markantně nemění.



Obrázek 21 Grafické znázornění modulu pružnosti (a), pevnosti v tahu (b) a přetvoření v tahu (c), pro vytvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Clear

Na obrázku 21 (b) je možno sledovat závislost meze pevnosti v tahu na době dotvrzování. Stejně tak jako u pryskyřice Grey, i zde je tendence ke zvyšování meze pevnosti se zvyšující se dobou dotvrzování. Dle dat výrobce by u pryskyřice Clear po dosažení doby 30 minut, nemělo docházet ke změně parametrů. Z uvedeného grafu však vyplývá, že v tomto případě dochází ke zvýšení i po uplynutí této doby.

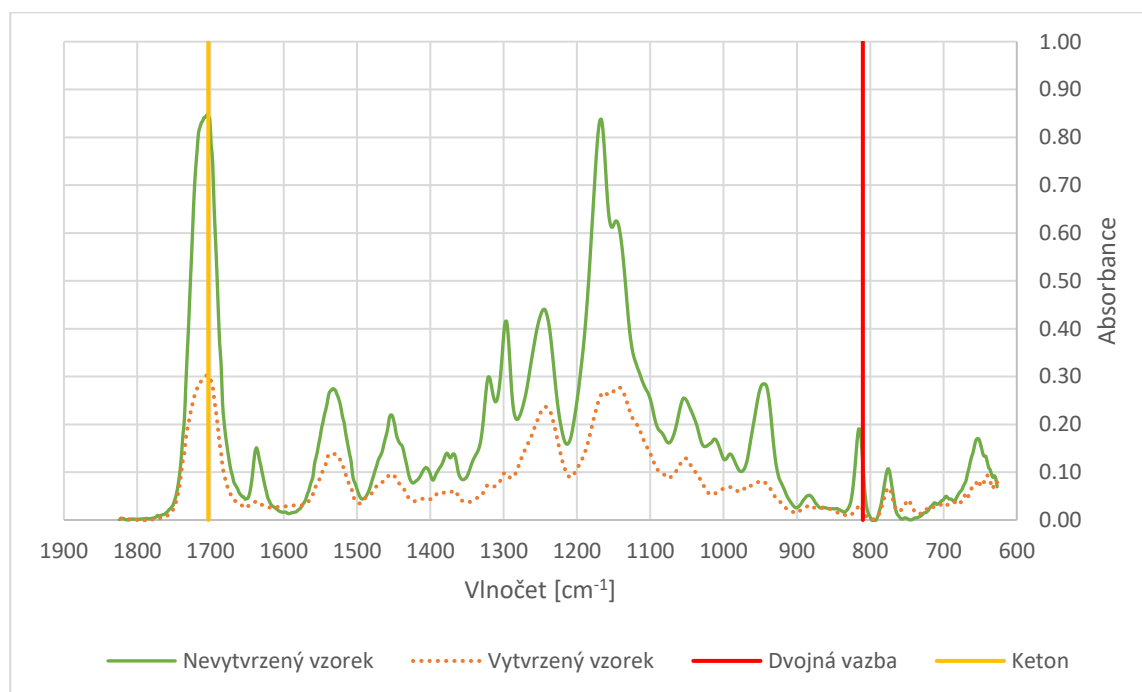
Z průběhu přetvoření v tahu (viz. obr. 21 (c)) lze pozorovat, že hodnoty jsou opět víceméně konstantní. Výjimkou je zde hodnota pro dobu dotvrzování 40 minut, která viditelně ostatní hodnoty převyšuje.

Pokud porovnáme oba typy pryskyřic, je očividné, že v obou případech je dosaženo lepších výsledků použitím UV záření společně s teplotou při době 40 minut. Nicméně nebylo dosaženo

parametrů udávaných výrobcem. Důvodem může být rozdílná orientace vzorků při tisku. Informace o výrobcem použité orientaci vzorku nebyla nalezena, ale výrobce v datasheetu udává, že výsledky mohou být závislé na tiskové orientaci vzorku. Dá se tedy předpokládat, že pokud by byly zkušební vzorky tištěny naležato, bylo by dosaženo výsledků bližších hodnotám udávaných výrobcem. Tato skutečnost je zmiňována i v bakalářské práci Kateřiny Foldynové o Mechanických vlastnostech 3D tisku na str. 23 [48]. V této práci je použita technologie Fused Deposition Modeling, ale tento princip by mohl být aplikován i ve stereolitografii.

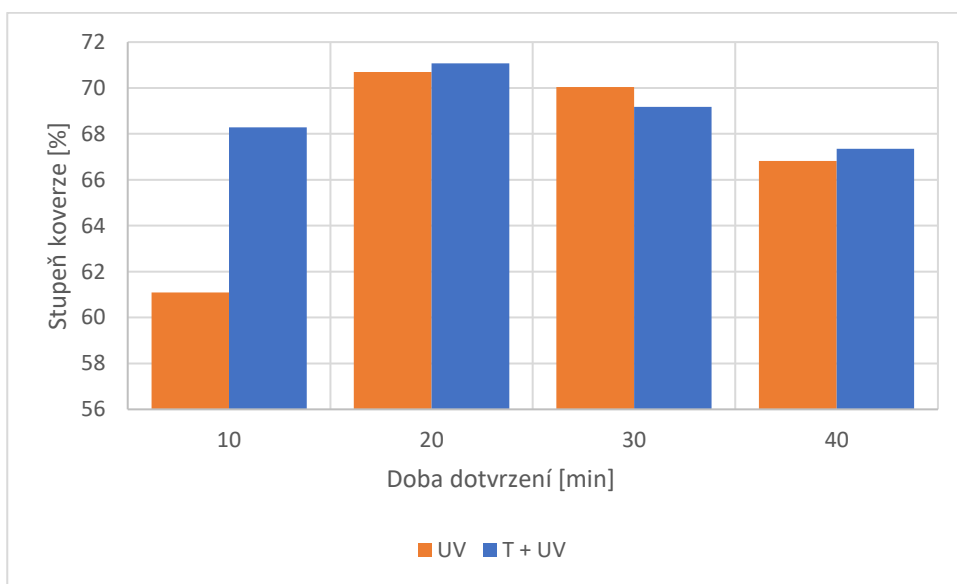
### 3.2 Infračervená spektroskopie

V infračervené spektroskopii byl zkoumán stupeň konverze dvojných vazeb pomocí tzv. píků. Tyto píky jsou charakteristické pro funkční skupiny. Absorpční spektrum vytvrzeného a nevytvrzeného vzorku je zobrazeno na obr. 22. V grafu je vyznačen pík pro dvojnou vazbu, který činí  $810\text{ cm}^{-1}$ , a pík  $1703\text{ cm}^{-1}$  pro ketonovou skupinu. Pro každou dobu vytvrzení byly provedeny 3 měření, ze kterých byl vypočítán stupeň konverze.



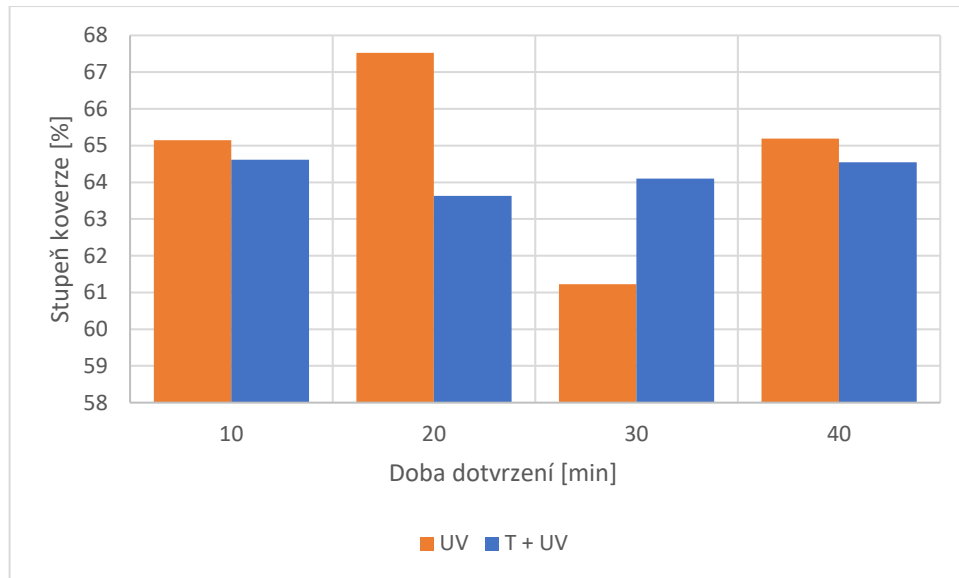
Obrázek 22 Absorpční pásy dotvrzené a nedotvrzené pryskyřice

U vzorků, pro které byla použita pryskyřice Clear lze z obrázku 23 usoudit, že většího stupně konverze je dosaženo při použití UV záření a teploty. Nejmarkantnější rozdíl je vidět při době 10 minut, při použití samotného UV záření bylo dosaženo stupně konverze 61 %, kdežto při použití UV záření a teploty 68 %. Tyto rozdíly se dále vyrovnávají a při době dotvrzení 30 minut dokonce převažují ve prospěch dotvrzování jen pomocí UV záření. Toto grafické znázornění doplňuje výsledky získané v tahových zkouškách. Z obrázku je dále vidět tendence k poklesu hodnot po přesažení doby 20 minut.



Obrázek 23 Stupeň konverze v závislosti na době dotvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Clear

Při použití pryskyřice typu Grey, jejíž stupeň konverze je zobrazen na obrázku 24, lze pozorovat pozoruhodný vývoj. Tento vývoj nekoresponduje s výsledky z tahových zkoušek a ukazuje vyšší stupeň konverze při použití dotvrzování pouze s UV zářením. Pokud by se vycházelo z tohoto grafu, v tahových zkouškách by měli mít lepší vlastnosti vzorky, které jsou dotvrzovány pouze UV zářením bez teploty. Z grafů tahových zkoušek je však výsledek opačný. Z těchto dat tudíž nelze vyvodit závěry.

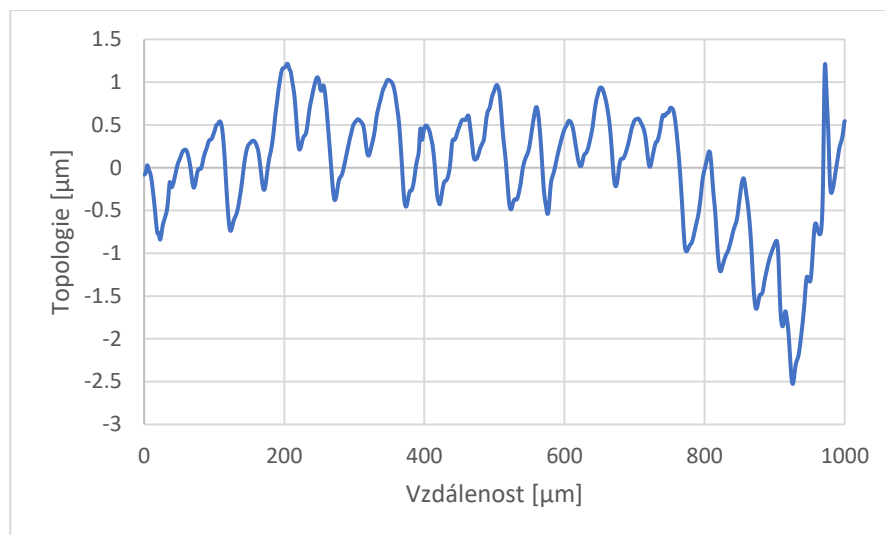


Obrázek 24 Stupeň konverze v závislosti na době dotvrzování při zvýšené teplotě (T+ UV) a bez zvýšené teploty (UV) pryskyřice Grey

### 3.3 Profilometrie

Pomocí profilometru byly měřeny dva vzorky. Oba byly vyrobeny z pryskyřice typu Clear, ale lišily se ve výšce vrstvy. První vzorek měl výšku vrstvy 50  $\mu\text{m}$  a druhý 100  $\mu\text{m}$ . Vzorek s 50  $\mu\text{m}$  byl měřen pouze ve směru podélném se směrem tisku. Vzorek s výškou 100  $\mu\text{m}$  byl měřen jak v příčném, tak v podélném směru ke směru tisku.

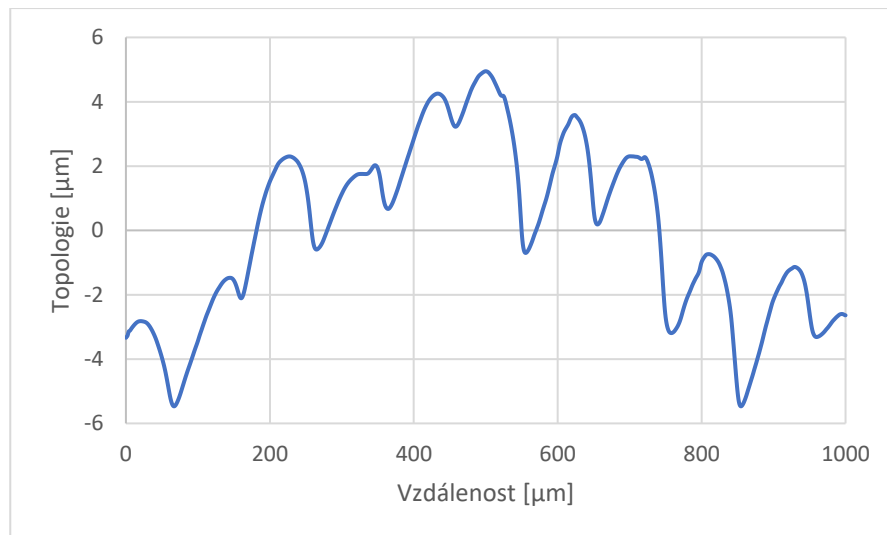
Na obrázku 25 je zobrazen profil povrchu vzorku, který byl tištěn s výškou vrstvy 50  $\mu\text{m}$ . Měření probíhalo pouze v podélném směru ve směru tisku, kde vrcholky píků značí jednotlivé vrstvy. V příčném směru ke směru tisku nebylo provedeno měření z důvodu nesnadného natočení vzorku s ohledem na posun hrotu. Z naměřených dat byla vyhodnocena vzdálenost vrcholků píků a z nich určena průměrná výška vrstvy, která činí 50,42  $\mu\text{m}$ . Dále byla vyhodnocena drsnost pomocí programu Gwyddion. Průměrná drsnost byla vypočítána z pěti měření opět pouze ve směru podélném ke směru tisku. Tato drsnost činí 1,064  $\mu\text{m}$ .



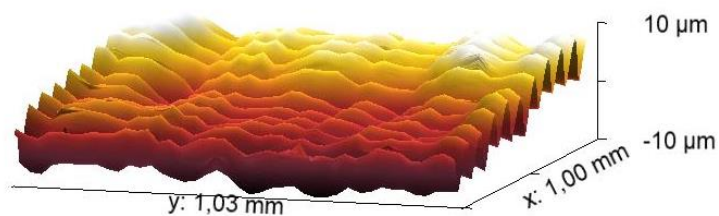
Obrázek 25 Profil vzorku tištěného s tloušťkou vrstvy 50 µm

Profil pro vzorek s výškou vrstvy 100 µm je zobrazen na obrázku 26. Tento vzorek byl proměřen jak ve směru podélném, tak ve směru příčném ke směru tisku. Z dat získaných z podélného měření byla opět vyhodnocena průměrná výška vrstev na základě vzdálenosti vrcholků píků. Průměrná výška vrstvy je 101,11 µm. Dále byla hodnocena drsnost povrchu, a to v obou směrech tzn. ve směru příčném i podélném ke směru tisku. Průměrná drsnost ve směru podélném ke směru tisku činí 1,853 µm, ve směru kolmém ke směru tisku 1,083 µm. Pro tuto výšku vrstvy byl zhotoven také 3D sken, který je zobrazen na obrázku 27.

Pokud porovnáme jednotlivé vzorky je patrné, že nastavená výška vrstva před spuštěním tisku je téměř totožná s reálnou výškou vrstvy. Z drsnosti v podélném směru ke směru tisku je vidět velký rozdíl v drsnosti pro 50 µm a 100 µm, kde je rozdíl téměř 800 nm. Nutno podotknout, že doba potřebná k tisku se výrazně liší podle rychlosti. Je tedy potřeba zvážit, zda je vhodné použít nižší tloušťku za cenu vyššího času či nikoliv.



Obrázek 26 Profil vzorku tištěného s tloušťkou 100 μm



Obrázek 27 3D sken povrchu vzorku s výškou vrstvy 100 μm, osa x je posun ve směru tisku, osa y je směr kolmý na směr tisku

## 4 Závěr

Pro měření byly vyrobeny zkušební vzorky, jejichž vlastnosti byly monitorovány pomocí pevnosti v tahu a infračervené spektroskopie. K výrobě vzorků byly použity dvě pryskyřice Clear V02 a Grey V04.

Pokud jsou porovnávány vlastnosti získané z měření pevnosti v tahu, je patrné, že průběhy mají velmi podobný průběh. Modul pružnosti v tahu jeví stoupající tendenci, jehož maximum se pohybuje mezi 20 a 30 minutami v závislosti na použitém typu dotvrzování a pryskyřice. Toto tvrzení koresponduje s daty výrobce, uvedené pro pryskyřici Clear V02, která dosahuje maxima při době dotvrzení 30 minut. Zatímco u pryskyřice Grey V04 výrobce udává maximální modul pružnosti při době dotvrzení 60 minut, námi naměřené maximum nastává při době 20 minut a s přibývajícím dobou dotvrzení klesá. Maximální hodnoty získané pro pryskyřici Clear V02 pro dotvrzování pomocí UV záření a teploty jsou 777,94 MPa a pouze pomocí UV záření 662,38 MPa. Výrobce udávané hodnoty pro dotvrzené vzorky jsou GPa. Takto velká odchylka může být způsobena rozdílnou orientací vzorku při tisku. Toto tvrzení uvádí také výrobce v datasheetu.

Při porovnání meze pevnosti v tahu se její hodnota zvyšuje s přibývajícím dobou dotvrzení. Tento průběh je shodný u obou typů pryskyřic. Při dotvrzení u pryskyřice Clear V02 pomocí UV záření a teploty je dosaženo hodnot 57,61 MPa a pouze pomocí UV záření 44,83 MPa. Při použití pryskyřice Grey V04 dotvrzované UV zářením s teplotou 41,28 MPa a pouze pomocí UV záření 34,89 MPa. Výrobce udávané hodnoty dotvrzených vzorků jsou 65 MPa. Této hodnotě se blíží i naše naměřené výsledky, především pryskyřice Clear V02. Možným důvodem pro vyšší rozdíl mezi hodnotami výrobce a naměřenými hodnotami u pryskyřice typu Grey V04, je fakt, že zatímco maximum udávané výrobcem je při době 60 minut, naše vzorky byly dotvrzovány pouze po dobu 40 minut.

Přetvoření v tahu je u obou pryskyřic více méně konstantní a nezávislé na době dotvrzení. U obou pryskyřic se prodloužení pohybuje okolo 10,5 %. Výrobce udávaná hodnota přetvoření v tahu je 6 %, od této hodnoty se získané výsledky liší.

Mírnou odchylku od výrobcem udávaných parametrů může způsobovat rozdíl mezi emisí použitého UV zdroje a absorpcí vzorku, kdy emisní maximum použitých LED diod je 397 nm, kdežto absorpční maximum vzorku činí 405 nm. I přes tento rozdíl je v oblasti 405 nm vysoká intenzita záření.

Při vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že lepších vlastností je dosaženo při dotvrzování pomocí UV záření s teplotou 60 °C. U pryskyřice Clear V02 toto tvrzení podporují výsledky získané pomocí infračervené spektroskopie, které udává vyšší stupeň konverze při použití UV záření a teploty. Toto tvrzení se nadá použít u pryskyřice Grey V04, kde námi naměřené hodnoty pomocí infračervené spektroskopie nekorespondují s hodnotami z tahových zkoušek.

Lze předpokládat, že při době dotvrzení 60 minut a rozdílnou orientací vzorku při tisku, by se dané hodnoty přiblížily hodnotám udávaných výrobcem.

Při porovnávání drsnosti pryskyřic o rozdílné tloušťce vrstvy 50 a 100  $\mu\text{m}$ . Z měření bylo zjištěno, že drsnost povrchu závisí na zvolené výšce vrstvy. Hodnoty drsnosti se při výšce vrstvy 50 a 100  $\mu\text{m}$  mění zhruba o 800 nm.

V budoucnu by bylo vhodné otestovat delší časy dotvrzení a jinou orientaci vzorku při tisku. Změnou těchto parametrů by mohlo být dosaženo lepších pevnostních vlastností.

## Seznam použité literatury

- [1] GOLDBERG, Dana. History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30). Redshift: by Autodesk [online]. San Rafael: Autodesk, 2014, September 2014 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>
- [2] 3D TISK V KOSTCE. MATERIALPRO 3D [online]. Brno: MATERIALPRO 3D, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [3] HOMOLA, Jan. Selective Laser Sintering. 3D-tisk.cz [online]. Brno: 3D-tisk.cz, 2013, 30. 4. 2013 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [4] PALERMO, Elizabeth, ed. What is Selective Laser Sintering?. Live Science [online]. Live Science, 2013, August 13, 2013 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- [5] 3D Systems' Selective Laser Sintering (SLS) 3D Nylon Printers. 3D SYSTEMS [online]. Rock Hill: 3D SYSTEMS, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/selective-laser-sintering/sls>
- [6] Formlabs představil dostupnou SLS tiskárnu Fuse 1 a robotické pracoviště Form Cell. 3D-tisk.cz [online]. Brno: 3D-tisk.cz, 2017, 6. 6. 2017 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/formlabs-predstavil-dostupnou-sls-tiskarnu-fuse-1-a-roboticke-pracoviste-form-cell/>
- [7] Základy 3D tisku: s Josefem Průšou. PRUSA RESEARCH [online]. Praha: PRUSA RESEARCH, 2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [8] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?: Jak tedy FFF tiskne?. Svět Hardware [online]. Brno: Svět Hardware, 2019, 21.2.2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-3>
- [9] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. Svět Hardware [online]. Brno: Svět Hardware, 2019, 21.2.2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>

- [10] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK3S. PRUSA RESEARCH: by JOSEF PRUSA [online]. Praha: PRUSA RESEARCH, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>
- [11] Colorjet 3D Printing. 3Faktur [online]. Jena: 3Faktur, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/colorjet-3d-printing-technology-overview/#1481032334093-9c9cb5b4-6e92>
- [12] ColorJet Printing. 3D SYSTEMS [online]. Rock Hill: 3D SYSTEMS, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/colorjet-printing>
- [13] ProJet CJP 860Pro. 3D SYSTEMS [online]. Rock Hill: 3D SYSTEMS, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/projet-cjp-860pro>
- [14] POLYJET. Stratasys: DIRECT MANUFACTURING [online]. Los Angeles: Stratasys, 2017 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.gsc-3d.com/articles/2017/11/what-polyjet-3d-printing-technology>
- [15] Working of PolyJet 3D Printers. DesignTech: Technology for designing the future [online]. Pune: DesignTech [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.designtechsys.com/articles/polyjet-printers-working>
- [16] Polyjet 3D printing: Different Colors in the Final Prints. Sculpteo [online]. San Francisco: Sculpteo, c2009-2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/polyjet-definition/>
- [17] The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Jessica Vasconcellos [online]. Canada: Formlabs, 2017 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: [http://www.jvasconcellos.com.br/fat/FAT\\_TI/wp-content/uploads/2017/08/SLA\\_Guide.pdf](http://www.jvasconcellos.com.br/fat/FAT_TI/wp-content/uploads/2017/08/SLA_Guide.pdf)
- [18] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to SLA 3D Printing. 3D HUBS [online]. Amsterdam: 3D HUBS, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing#what>

- [19] Stereolithography (SLA) – 3D Printing Simply Explained. All3DP [online]. Munich: All3DP, 2018, Sep 22, 2018 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- [20] PALERMO, Elizabeth, ed. What is Stereolithography?. Live Science [online]. Live Science, 2013, July 16, 2013 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>
- [21] Formlabs Form 3. 3D wiser: power of 3D printing [online]. Olomouc: 3D wiser, c2018 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/sla-dlp/formlabs-form-3/>
- [22] An Introduction to Post-Curing SLA 3D Prints. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/introduction-post-curing-sla-3d-prints/>
- [23] Formlabs Form Cure (vytvrzovací stanice). 3D wiser: power of 3D printing [online]. Olomouc: 3D wiser, c2018 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/prislusenstvi/formlabs-form-cure/>
- [24] Post-curing Box for SLA 3D Prints. Instructables workshop [online]. Instructables workshop, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Post-curing-Box-for-SLA-3D-Prints/>
- [25] Hack of the Day: Build Your Own UV Cure Box for Under \$30, Courtesy of Formlabs. 3DPrint.com: The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing [online]. 3DPrint.com, 2015, December 30, 2015 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://3dprint.com/113283/formlabs-uv-cure-box/>
- [26] UV LED Oven for Curing DLP Resin 3D Prints. Instructables workshop [online]. Instructables workshop, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Make-a-VU-LED-Oven-for-curing-DLP-Resin-3D-prints/>
- [27] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Liberec: publi.cz, 2016 [cit. 2019-07-01]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [28] Materials for High Resolution Rapid Prototyping. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/standard/>

- [29] 3D Printing Materials for Engineering, Manufacturing, and Product Design. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/engineering/>
- [30] High-Accuracy 3D Printing Materials for Dental Labs and Practices. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/dental/>
- [31] High-Detail 3D Printing Materials for Jewelry Design and Manufacturing. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/jewelry/>
- [32] Guide to Transparent 3D Printing with Clear Resin. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-transparent-parts-techniques-for-finishing-clear-resin/>
- [33] The New Grey Resin: Our First Matte Material. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, 2017, January 9, 2017 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/introducing-matte-grey-resin/>
- [34] Materials Data Sheet. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, 2018, 09 . 18 . 2018 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://archive-media.formlabs.com/upload/XL-DataSheet.pdf>
- [35] Orienting a Model. Formlabs: Support [online]. Somerville: Formlabs, 2019, Apr 8, 2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: [https://support.formlabs.com/s/article/Model-Orientation?language=en\\_US](https://support.formlabs.com/s/article/Model-Orientation?language=en_US)
- [36] Form 2. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>
- [37] Formlabs Stereolithography. Formlabs [online]. Somerville: Formlabs, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/tech-specs/>
- [38] Form 2. 3D HUBS [online]. Amsterdam: 3D HUBS, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/form-2>
- [39] UV LED pásek 9,6W original UV čip. T-LED [online]. Praha: T-LED [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.t-led.cz/p/uv-led-pasek-96w-original-uv-cip-7802>

- [40] RESL, Petr. Studium vlivů parametrů 3D tisku na fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerů. Pardubice, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Luboš Prokůpek, Dr.
- [41] P-7 Stylus Profiler. KLA: Keep Looking Ahead [online]. Milpitas: KLA, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: [https://www.kla-tencor.com/products/surface-profilers/p-7-stylus-profiler?fbclid=IwAR1FtXjVvOCsBTPZYCKbSXPAnI-VMKiZ2fzHEEA\\_lfS1pMnULI\\_OgW77QFs#related](https://www.kla-tencor.com/products/surface-profilers/p-7-stylus-profiler?fbclid=IwAR1FtXjVvOCsBTPZYCKbSXPAnI-VMKiZ2fzHEEA_lfS1pMnULI_OgW77QFs#related)
- [42] Přístrojové vybavení. Univerzita Pardubice: Fakulta chemicko-technologická [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://fcht.upce.cz/fcht/kpf/pristrojove-vybaveni.html>
- [43] STYLUS PROFILOMETER. Direct Industry [online]. Marseille: Direct Industry, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/kla-tencor/product-113449-2029567.html>
- [44] JANDERA, Pavel a Jaroslav CHURÁČEK. Identifikace a stanovení cizorodých toxikologicky významných látek v materiálech a prostředí. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1999. Vzdělávání v oblasti kontroly životního prostředí a ochrany zdraví člověka. ISBN 80-719-4201-4.
- [45] VLČKOVÁ, Kateřina. Vliv iononiových fotoinicítorů na vytvrzování kationtově polymerujících pojiv pomocí UV LED. Pardubice, 2019. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Bohumil Jašúrek, Ph.D.
- [46] Nicolet Avatar 320 FT-IR Spectrometer. American Laboratory Trading [online]. East Lyme: American Laboratory Trading, c2019 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: [https://americanlaboratorytrading.com/lab-equipment-products/nicolet-avatar-320-ft-ir-spectrometer\\_11374](https://americanlaboratorytrading.com/lab-equipment-products/nicolet-avatar-320-ft-ir-spectrometer_11374)
- [47] VLČKOVÁ, Kateřina. Kationtová polymerace epoxidů indukovaná UV LED. Pardubice, 2017. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Bohumil Jašúrek, Ph.D.
- [48] FOLDYNOVÁ, Kateřina. Mechanické vlastnosti 3D tisku. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Vladimír Zbožínek.