



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Vliv prostředí na vybrané vlastnosti dílů na bázi fotopolymeru zhotovené technologií PolyJet

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Václav Pich**
Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Pich**
Osobní číslo: **S16000287**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Vliv prostředí na vybrané vlastnosti dílů na bázi
fotopolymeru zhotovené technologií PolyJet**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše na dané téma.
2. Výběr fotopolymerů, příprava 3D modelu, zhotovení dílů 3D tiskem technologií PolyJet.
3. Studium tahových, ohybových a rázových vlastností materiálů kondicionovaných při standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291 a v prostředí se zvýšenou vlhkostí.
4. Expozice vzorků fotopolymerů zvýšené teplotě (teplotní zatížení).
5. Studium tahových, ohybových a rázových vlastností exponovaných vzorků.
6. Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků, závěr.



Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. ISBN: 9781493921126.
- [2] Liu, D., Valencia, V. V., Badiru, A. B. *Additive manufacturing handbook*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN: 9781482264081.
- [3] Grote, K.H., Feldhusen, J. *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 9783642173059.
- [4] Mezinárodní normy.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lanfekl
děkan




doc. Ing. Jaromír Muravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen 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 vědom 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 a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych v první řadě rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za věcné připomínky a rady při vypracovávání práce, dále také Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za pomoc při výrobě zkušebních těles a poskytnutí veškerých potřebných materiálů.

Po osobní stránce patří velké díky rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost po celou dobu studia, především při psaní závěrečných prací.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21122 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu a projektu Ministerstva vnitra ČR (VI20172020052) "Aplikovaný výzkum v oblasti osobních ochranných prostředků nové generace pro potřeby IZS".

Název diplomové práce

Vliv prostředí na vybrané vlastnosti dílů na bázi fotopolymeru zhotovené technologií PolyJet

Master's thesis title

Impact of ambient on selected properties of part base on photopolymer made by PolyJet technology

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá studiem vlivů prostředí na vybrané mechanické vlastnosti dílů s ohledem na směr orientace vrstev zhotovených 3D tiskem technologií PolyJet. Prototypové díly byly zhotoveny s různými směry orientace vrstev a vystaveny standardnímu prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291, prostředí zvýšené vlhkosti (relativní vlhkost 80 %) při teplotě 30 °C po dobu 2 týdnů a byly také exponovány teplotnímu zatížení až 100 °C po dobu 510 min. Hodnoceny byly základní mechanické charakteristiky fotopolymerů při tahovém, ohybovém a rázovém namáhání dílů.

Klíčová slova: 3D tisk, PolyJet, fotopolymer, vliv prostředí

Abstract

The diploma thesis is focused on studying the impact of ambient on the selected mechanical properties of parts affected by the directional orientation of layers made by the 3D printing Polyjet technology. The prototype parts were prepared with different layer orientations, and exposed to the standard ambient 23/50 by CSN EN ISO 291, the ambient with increased humidity (a relative humidity of 80%) at a temperature of 30 °C for 2 weeks, and exposed to a thermal load of up to 100 °C for 510 minutes. The primary mechanical properties of photopolymers evaluated during the testing were the tensile, bend and notched strains of evaluated parts.

Keywords: 3D printing, PolyJet, photopolymer, impact of ambient

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretická část	11
2.1	Definice Rapid Prototypingu	11
2.1.1	Historie metod RP	13
2.1.2	Rozdělení metod systému RP	15
2.2	Stereolitografie	16
2.3	Solid Ground Curing	17
2.4	PolyJet printing.....	19
2.5	Selective Laser Sintering	22
2.6	Fused Deposition Modeling.....	24
2.7	Laminated Object Manufacturing.....	27
3	Experimentální část.....	29
3.1	Charakteristika použitých materiálů	29
3.2	Příprava 3D modelu a výroba zkušebních těles technologií PolyJet.....	32
3.3	Popis vybraných prostředí, kterým byla zkušební tělesa vystavena.....	35
3.4	Analýza užitečných vlastností fotopolymerů	37
3.4.1	Stanovení vrubové houževnatosti.....	37
3.4.2	Stanovení ohybových vlastností.....	40
3.4.3	Stanovení odrazové pružnosti	43
3.4.4	Stanovení tahových vlastností	44
4	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.....	48
4.1	Vyhodnocení vrubové houževnatosti Charpy.....	48
4.2	Vyhodnocení ohybových vlastností a odrazové pružnosti	51
4.3	Vyhodnocení tahových vlastností.....	57
5	Závěr.....	63
	Použitá literatura	65
	Seznam příloh.....	69

Seznam zkratek a symbolů

E_f	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
HDT	Teplota průhybu při zatížení	[°C]
R	Odrazová pružnost	[%]
a_{cA}	Vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]
σ_{fM}	Mez pevnosti v ohybu	[MPa]
σ_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
ABS	Akrylonitril-butadien-styren	
PC	Polykarbonát	
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen	
PEI	Polyetherimid	
PLA	Kyselina polylaktidová (polymléčná)	
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	
FDM	Fused Deposition Modeling	
LOM	Laminated Object Manufacturing	
MJM	Multi-Jet Modeling System	
MJS	Multiphase Jet Solidification	
RP	Rapid Prototyping	
SCS	Solid Creation System	
SGC	Solid Ground Curing	
SLA	Stereolitografie	
SLM	Selective Laser Melting	
SLS	Selective Laser Sintering	

1 Úvod

Technologie Rapid Prototyping jsou metody, které se používají pro rychlou prototypovou výrobu součástí. Principem všech metod je tvorba součástí po vrstvách. Metody se liší chemickým složením i skupenstvím stavebních materiálů, způsobem výstavby prototypových dílů a spojováním jejich jednotlivých vrstev. Základními materiály jsou fotopolymery, termoplasty, speciálně upravený papír nebo kovové a keramické prášky. Snadná, rychlá a levná výroba prototypových součástí, úspora výrobních nákladů, ověření vyrobitelnosti, smontovatelnosti a vhodnosti konstrukčního řešení dílu pro sériovou výrobu, posouzení jeho vzhledu i ergonomičnosti, přímá výroba tvarově složitých součástí a další aspekty vedly k tomu, že se tento systém stal velmi rychle součástí mnoha průmyslových odvětví.

Předložená diplomová práce se zabývá dílčím úkolem výzkumné činnosti týmu katedry strojírenské technologie a Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace při TUL zabývající se aplikovaným výzkumem v oblasti osobních ochranných prostředků nové generace pro potřeby integrovaného záchranného systému. Hlavním úkolem výzkumného týmu je vývoj ochranných osobních prostředků se zvýšenou účinností a spolehlivostí využívaných v krizových situacích při ohrožení nebezpečnými chemickými či biologickými látkami a faktory. Řešení dané problematiky vyžaduje komplexní přístup, který zahrnuje všechny nezbytné dílčí kroky od konstrukčního výzkumu, přes materiálový výzkum zohledňující technologické možnosti, až po specificky zaměřené funkční testy. Výrobě dílů v sériové výrobě předchází řada kroků, které kromě konstrukčního řešení a technologičnosti výroby souvisí i s jejich funkčností. Z tohoto důvodu jsou vyráběny prototypové prvky, u nichž se hodnotí nejen ergonomie, vzhled, smontovatelnost, ale snahou je zhotovit díly, u kterých lze hodnotit funkční testy odpovídající požadavkům kladeným na finální díly. V rámci vývojové fáze je k výrobě prototypových dílů využívána technologie PolyJet, která je založena na bázi tryskání fotopolymerních materiálů v ultratenkých vrstvách. Technologie umožňuje vyrábět díly s různou geometrií při různé orientaci vrstev, z měkkých materiálů přes tuhé, transparentní a neprůhledné. Pro funkční simulaci prototypových dílů je kromě řady dalších faktorů třeba znát také vliv geometrie tvorby vrstev dílů i prostředí (např. zvýšené vlhkosti), kterým mohou být díly vystavovány.

Cílem diplomové práce je studium materiálových charakteristik dílů na bázi fotopolymerů, které jsou zhotoveny technologií PolyJet s různou orientací vrstev („naležato“

a „nastojato“), a které jsou vystavovány různému prostředí kondicionace. Pro experimentální měření jsou vybrány fotopolymery na bázi akrylátů od firmy Stratasys, jejichž výběr vychází z předvývojové fáze výzkumného týmu katedry strojírenské technologie. Prototypové díly jsou kondicionovány ve standardním prostředí 23/50 definované předpisem ČSN EN ISO 291, v prostředí zvýšené vlhkosti (s ohledem na přítomnost polárních skupin v chemické struktuře fotopolymeru) a v prostředí zvýšené teploty, u něhož je předpoklad dodatečných strukturních změn materiálu s cílem nárůstu teploty tvarové stálosti a tuhosti materiálu.

2 Teoretická část

2.1 Definice Rapid Prototypingu

Pod pojmem „Rapid Prototyping“ (rychlá výroba prototypových součástí a modelů) jsou zařazeny veškeré technické, metodické a organizační opatření, které vedou od specifikace požadavků na výrobek až k jeho sériové výrobě [1].

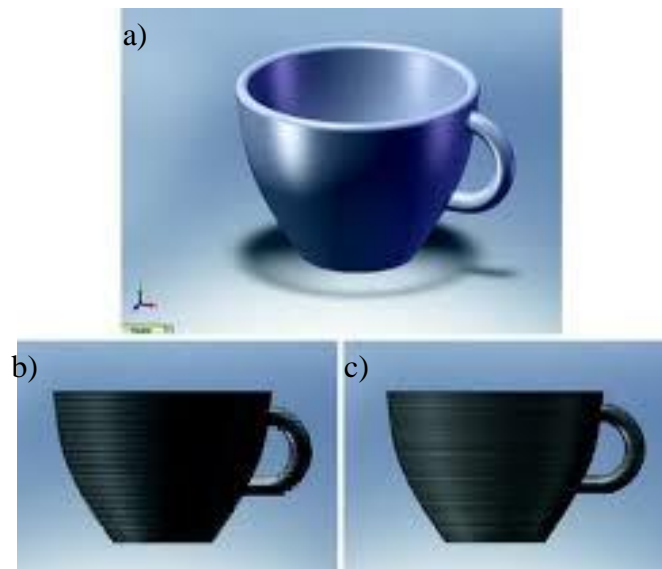
Charakteristickým rysem všech technologických metod systému Rapid Prototyping (dále jen RP) je rychlá výroba modelů, vzorků a prototypů z 3D geometrického modelu vytvořeného v CAD programu, které jsou plně funkční a svými mechanickými vlastnostmi se blíží finálnímu výrobku, který mohou v některých případech nahradit. Principem všech metod je tvorba součástí po vrstvách. Toho se docílí v postupných krocích, kdy dojde ke zjednodušení 3D modelu pomocí trojúhelníkové aproximace. Následně je model uložen ve formátu STL. Data STL jsou poté odeslána do speciálního softwaru, který je součástí RP systému a rozloží model na jednotlivé příčné řezy s definovanou tloušťkou, odpovídající vrstvám tisku. Tím se také změní formát z modelu STL na Slicen, SLI (viz obr. 1). Takovýmto způsobem vytvořené údaje o jednotlivých řezech jsou odeslány do zařízení pro RP. V programu lze snadno nastavit různé parametry pro korekci tisku, např. průměr trysky, tloušťku jednotlivých vrstev, druh materiálu, teplotu a rychlost tisku ad. Tím odpadá nutnost přípravy forem a nástrojů. Technologie RP umožňuje vytvářet vnější i vnitřní tvary součástí, které mohou být jakkoli složité, což v konečném důsledku přináší:

- přímou výrobu tvarově komplexních dílů (zhotovení součásti najednou),
- snadnou, rychlou a levnou výrobu prototypových součástí,
- úsporu výrobních nákladů,
- zkrácení doby kompletace,
- zvýšení spolehlivosti [2,3].

Hlavními důvody tvorby prototypových součástí jsou:

- nalezení chyb ve výrobní dokumentaci (chyby konstruktéra),
- nalezení chyb v koncepci (chyby realizačního týmu),

- ověření vyrobitelnosti a smontovatelnosti dílu,
- posouzení designu navrhnuté součásti (z hlediska zájmu zákazníka),
- ověření vhodnosti dílu pro sériovou výrobu [2].

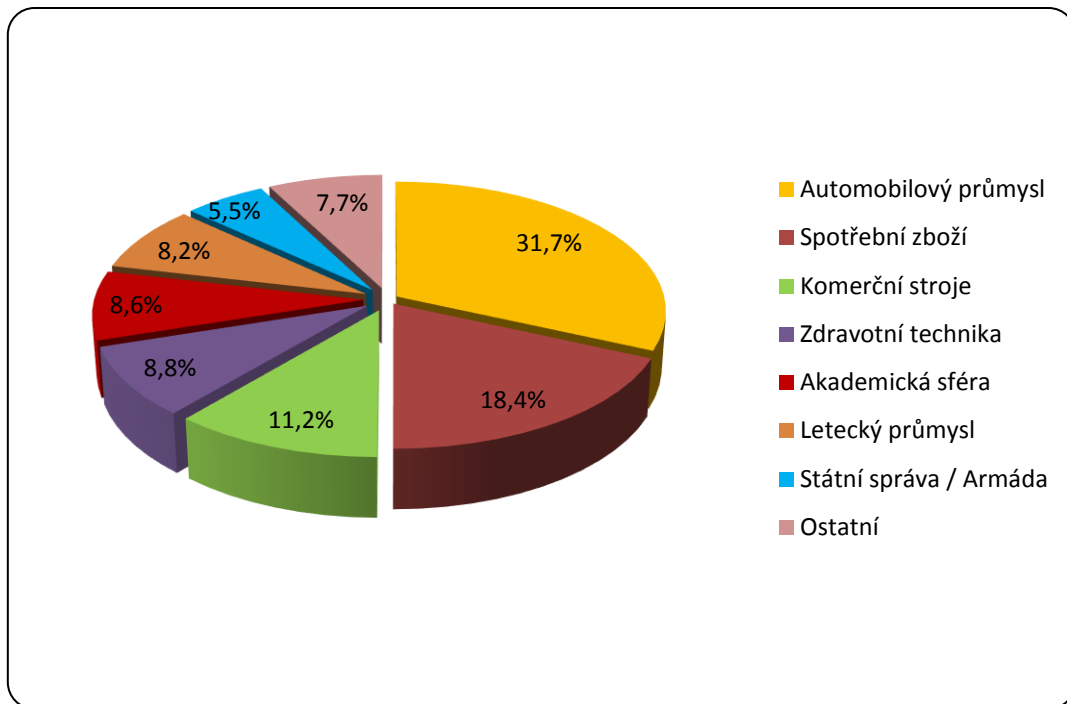


Obr. 1 Ukázka rozdělení původního modelu a), na modely s příčnými řezy s různou tloušťkou vrstvy b) a c) [3]

Při porovnání s běžnými technologickými postupy lze u technologií Rapid Prototypingu za nevýhody považovat:

- zatím nedosažitelnou rozměrovou přesnost dílů oproti výrobkům vyráběných tradičními technologickými postupy (např. obráběním, kde lze dosáhnou přesnosti až 0,001 mm [4]),
- povrch výrobku je hrubší (záleží i na použité RP technologii).

Všechny tyto výše zmíněné aspekty vedly k tomu, že RP se velmi rychle stal více či méně součástí všech průmyslových odvětví, ale i vývojových a vzdělávacích center (viz obr. 2) [1].



Obr. 2 Procentuální zastoupení RP v jednotlivých odvětví [5]

2.1.1 Historie metod RP

Počátky technologie 3D tisku se začínají psát v roce 1984, kdy Charles Hull proměnil technologii inkoustového na tisk fotopolymerem. V roce 1986 získává pro tuto technologii patent a vzniká tak první komerčně využívaná technologie 3D tisku nazývaná Stereolitografie. Od vynálezu a zkonstruování první 3D tiskárny již uplynula spousta let. I přesto lze říct, že vynález Charlese Hulla byl naprosto výjimečný a dal základ pro další vývoj 3D tisku [6].

Vývoj 3D tisku v letech

Rok 1984 - Charles Hull zkoumá fotopolymery inkoustových tiskáren. Zjišťuje, že k tuhnutí fotopolymeru dochází za působení UV záření. Začíná vyvíjet technologii pro tisk 3D objektů.

Rok 1986 - Charles Hull získává patent pro technologii, kterou pojmenovává Stereolitografie (SLA), zakládá společnost 3D Systems a pracuje na vývoji první skutečné 3D tiskárny, která nese označení SLA 1.

Rok 1988 - Společnost 3D Systems představuje první komerční 3D tiskárnu s názvem SLA 250. Současně jsou představeny další technologie systému RP:

- Fused Deposition Modeling (FDM) od Scotta Crumpa, zakladatele společnosti Stratasys,
- Selective Laser Sintering (SLS) od Dr. Carl Deckarda ve spolupráci s Dr. Joe Beamanem z UT ME [7].

Rok 1992 - 3D tisk je poprvé použit pro výrobu součástí v automobilovém průmyslu.

Rok 1999 - Technologií RP je vyrobena část lidského orgánu potaženého lidskými buňkami. Dochází tak k převratu v lékařském průmyslu a otvírají se nové možnosti při transplantaci orgánů.

Rok 2002 - Vytvořena je první funkční ledvina, která byla úspěšně transplantována u nemocného zvířete.

Rok 2005 - Je zlomovým rokem, kdy Dr. Adrian Bowyer zakládá na univerzitě v Bath „RepRap“ iniciativu. Snaží se iniciovat výrobu takové 3D tiskárny, která by dokázala replikovat většinu svých součástí.

Rok 2008 - Na trh se dostává první samoreplikační tiskárna Darwin vzniklá z iniciativy projektu RepRap. Dále proniká 3D tisk do protetiky (vytištění protézy nohy).

Rok 2009 - Je mimořádným rokem pro medicínský průmysl. Pomocí 3D biotiskárny jsou vytištěny organické cévy, které lze použít pro transplantaci u člověka.

Rok 2010 - Společnost Stratasys představuje první prototyp automobilu zhotoveného 3D tiskem v reálné velikosti.

Rok 2011 - Revoluce v potravinářském průmyslu. Začíná se s výzkumem 3D tiskárny na výrobu jídla. A současně jsou představeny tiskárny pro tisk ze zlata a stříbra.

Rok 2012 - Na 3D tiskárně je vytištěna spodní čelist, která je následně lékaři z Nizozemska transplantována pacientce.

Rok 2015 - Vznik technologie PolyJet matrix printing, která umožňuje tisk dílů s tvrdým obalem, ale houževnatým jádrem [6].

Rok 2017 - Firma Stratasys přichází s novou tiskárnou pro metodu FDM se softwarem, který usnadní všechny tři kroky: ověření konceptu, designu a vytvoření plně funkčního prototypu. Čas uvedení tiskárny do provozu od jejího vybalení z krabice netrvá více než 30 minut.

2.1.2 Rozdělení metod systému RP

Při vývoji aditivních technologií bylo vytvořeno několik metod, které se liší chemickým složením i skupenstvím stavebních materiálů, způsobem výstavby prototypových dílů a spojováním jednotlivých vrstev dílu, které zahrnuje tavení, tuhnutí, spékání a vytvrzování vstupního materiálu. Přehled základních metod RP je uveden v tab. 1. Základními materiály jsou:

- fotopolymery,
- termoplasty (např. PC/ABS, ABS, PEI, ad.)
- speciálně upravený papír,
- kovové a keramické prášky [2].

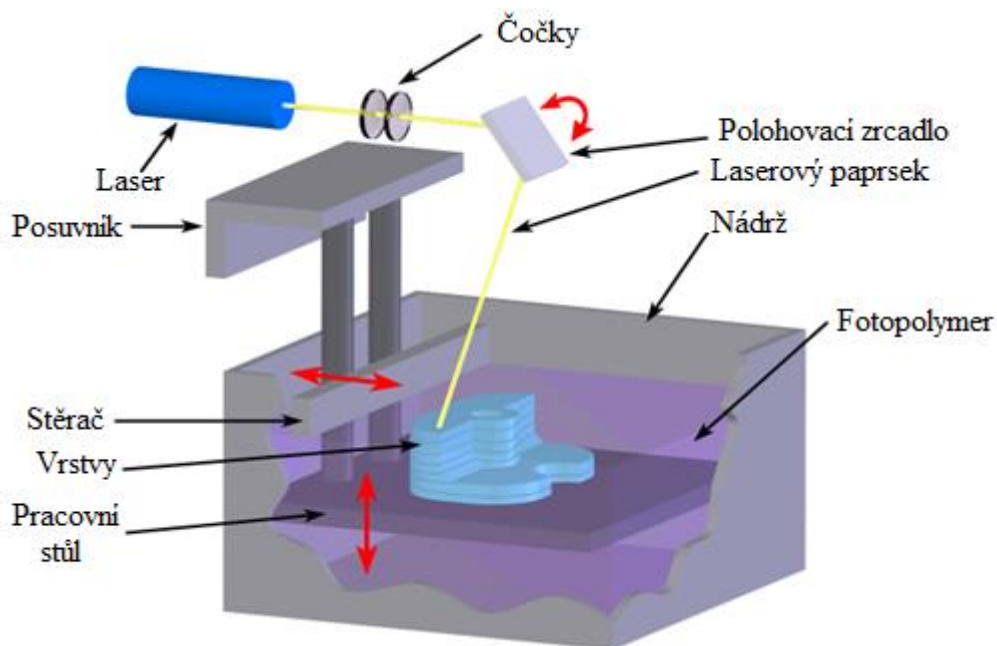
Tab. 1 Přehled základních metod systému RP [8, 9]

Název technologie	Zkratka	Použitý materiál
Základní materiál je v tekuté formě		
Stereolitografie	SLA	Fotopolymer
Solid Ground Curing	SGC	Fotopolymer, PA
Solid Creation Systém	SCS	Fotopolymer
PolyJet printing	PJP	Fotopolymer
Základním materiálem je prášek		
Selective Laser Sintering	SLS	PA, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Multiphase Jet Solidification	MJS	Kovové prášek, keramika
Selective Laser Melting	SLM	Kovové prášky
Základní materiál je v pevném stavu		
Fused Deposition Modeling	FDM	Termoplast
Multi-Jet Modeling Systém	MJM	Termoplast
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papírová folie s vrstvou PE

2.2 Stereolitografie

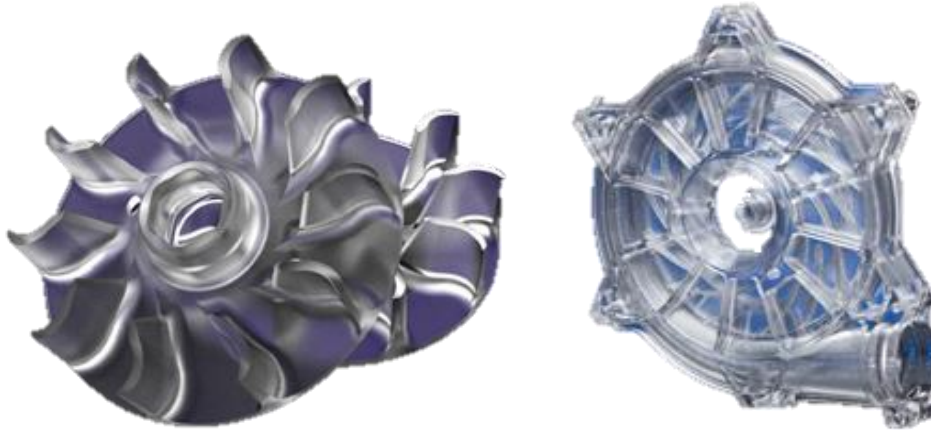
Stereolitografie (dále jen SLA) je nejstarší metodou systému Rapid Prototyping. Základním rysem této technologie je vstupní materiál, kterým je fotopolymer. Pod pojmem fotopolymer se rozumí polymer, který reaguje na světlo [10]. Vlivem světla (nejčastěji UV záření) dochází ke ztuhnutí a vytvrzení fotopolymeru (polymerizaci). Tento postup se opakuje po vrstvách od 0,05 mm do 0,25 mm do té doby, než dojde k vytvoření požadované součásti [6].

K vyrobení samotné prototypové součásti dochází tak, že celý pracovní stůl 3D tiskárny je ponořen v nádrži s fotopolymerem. Tisková hlava se pohybuje nad celou tiskovou plochou a ozařuje jen potřebná místa pro vznik dílu. Po ozáření určených míst se pracovní stůl posune směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a výše popsáný proces se znovu opakuje (viz obr. 3). Důležitým úkonem výrobního postupu je bezesporu i přejetí hladiny speciálním nožem, tzv. stěračem, který vyrovná nepřesnosti vzniklé nanášením fotopolymeru (zarovná vrstvu fotopolymeru na požadovanou tloušťku). V okamžiku, kdy je požadovaný díl hotov, je přebytečný fotopolymer odstraněn. Tím je celý proces SLA u konce.



Obr. 3 Schéma technologie SLA [13]

Výhodami této technologie jsou vysoká přesnost (standardně $\pm 0,2$ mm) a kvalita povrchu vyrobené součásti. Za nevýhodu lze považovat nutnost výstavby podpor, které mají za cíl zabránit zborcení součásti. Ty se po dokončení výroby musí ze součásti odstranit. Díl se může ještě zpracovat v UV komoře, kde získá požadovanou integritu povrchu, případně barvu (viz obr. 4) [2, 10, 11, 12, 14].



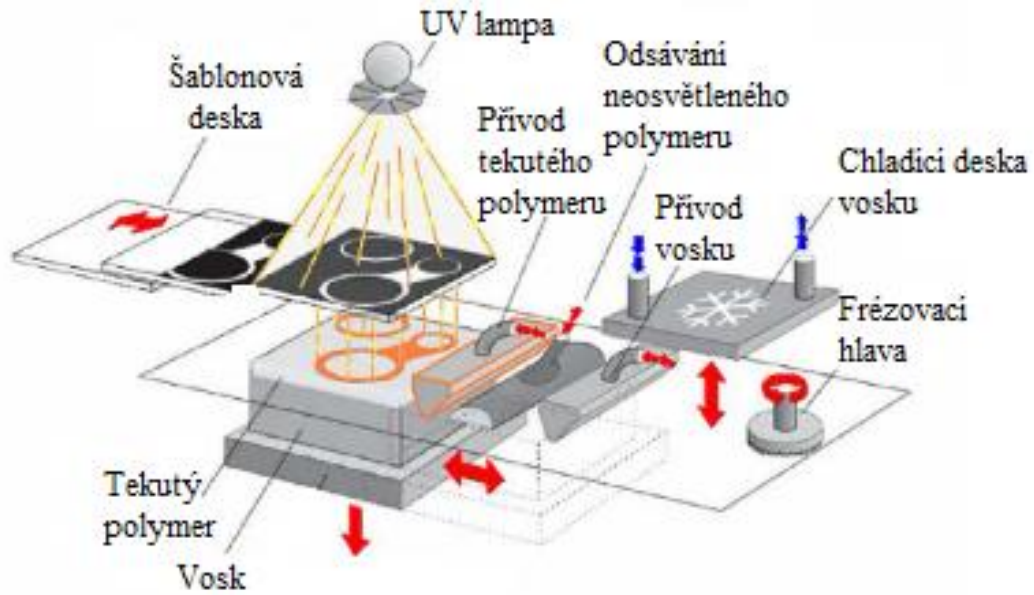
Obr. 4 Výrobky zhotovené metodou SLA [15, 16]

2.3 Solid Ground Curing

Další metodou systému RP, u které se jako vstupní materiál používá fotopolymer, je metoda Solid Ground Curing. V principu lze konstatovat, že jde o technologii velmi podobnou metodě SLA. Rozdíl je v tom, že na nosné desce je jen malá vrstva materiálu a zdroj UV záření nasvítí celý pracovní prostor tiskárny. Části, které nemají být vytvrzeny, jsou zakryty speciální maskou (skleněnou šablonovou deskou). Masku má tvar negativu aktuální vrstvy a je získána ikonografickým procesem nanášení speciálního toneru. Tloušťka jedné vytvrzené vrstvy modelu je v rozmezí mezi $0,1 \div 0,2$ mm. Osvícený fotopolymer zesílne a neosvícený přebytečný fotopolymer je vakuově odsán. Jeho místo zaujme roztavený výplňový vosk (viz obr. 5), který slouží jako podpora pro další vrstvu součásti a povrch je ofrézován na požadovanou výšku. Po dokončení procesu je z výsledného výrobku výplňový vosk chemicky odstraněn za pomoci kyseliny citrónové a součást je v některých případech ještě závěrečně vytvrzována pomocí ozařování speciální UV lampou [10].

Nejčastější využití metody SGC je v lékařském průmyslu, např. pro výrobu chirurgických pomůcek, zakázkových protéz a dalších kompenzačních pomůcek (viz obr. 6). Přestože u této

technologie je dosahováno velmi dobré rozměrové přesnosti dílu a výrobní časy nejsou příliš dlouhé, je aplikace metody spíše na ústupu. Důvodem jsou vysoké pořizovací a provozní náklady zařízení a jeho hlučnost [2].



Obr. 5 Princip metody SGC [17]



Obr. 6 Výrobek zhotovený metodou SGC [18]

2.4 PolyJet printing

Dalším zástupcem metod Rapid Prototypingu, který pro tvorbu součástí používá fotopolymer, je technologie PolyJet printing (PJP). Jelikož je tato technologie aplikována při experimentální studii diplomové práce, bude jí věnována zvýšená pozornost. Technologie PJP je založena na principu běžné inkoustové tiskárny. Fotopolymer je nanášen na základovou desku tiskárny pomocí tiskové hlavy ve velmi tenkých vrstvách až 0,016 mm (vznikají tak velmi hladké součásti i složitých tvarů) a to pouze na předem určená místa. Tím se zásadně liší od technologie SLA, u které je fotopolymerem naplněna celá nádrž (viz obr. 7). I zde je při stavbě modelu potřeba podpůrného materiálu (jeho množství závisí na tvaru modelu), který zaručuje stabilitu součástí v průběhu procesu (stavební materiál má omezenou životnost ca 1 rok). Každá vrstva fotopolymeru je po nanesení okamžitě vytvrzena UV světlem a výsledkem jsou plně vytvrzené modely bez potřeby dalších povrchových úprav.

Podpůrným materiálem určeným k podepření komplikovaných geometrií je u technologie PolyJet tzv. „podpůrný gel“, který je stejně jako hlavní materiál na bázi fotopolymeru, takže i u něho dojde vlivem UV světla k jeho vytvrzení, avšak je navržen tak, aby k požadovanému dílu nepřilnul úplně a po ukončení tisku mohl být následně snadno odstraněn. Toho je obvykle docíleno proudem vody. Po očištění je vhodné hotové výrobky vysušit, neboť fotopolymery používané u technologie PolyJet jsou na bázi polyakrylátů, které vzhledem k jejich chemickému složení (obsahují atomy kyslíku) navlhají. Výhodou technologie PJP je vysoká přesnost a kvalita povrchu dílu (standardní přesnost je $0,1 \div 0,3$ mm v závislosti na geometrii, orientaci a velikosti dílu) a možnost vytvářet geometricky velmi složité tvary (viz obr. 8) [19, 20].

Metoda využívá tiskové hlavy s více tryskami uspořádanými vedle sebe, které zajišťují rovnoměrné nanášení fotopolymeru na základovou desku. Jednotlivé trysky jsou řízeny samostatně a nejpoužívanější je dvou a více řadové uspořádání trysek tiskové hlavy. První řada slouží pro nanášení stavebního materiálu, další řady se používají pro podpůrný materiál, případně stavební materiál v jiné barvě. Trysky nanášejí materiál na základovou desku, případně předchozí vrstvu ve formě kapiček a pro snížení viskozity fotopolymeru je tisková hlava přehřívána, dle typu materiálu v teplotním rozmezí $60 \div 75$ °C. Tiskové hlavy zpravidla umožňují posuv v ose X a Y (je-li tisková hlava stejně široká jako pracovní plocha, je posuv hlavy pouze v ose X a celá vrstva je vytvořena na jeden její přejezd). Součástí

tiskové hlavy je jedna nebo dvě UV lampy v řazení: UV lampa (volitelná a pouze u větších zařízení), trysky, rotující váleček, který zarovnává tloušťku vrstvy fotopolymeru a UV lampa řízená na hodnotu intenzity záření [21].

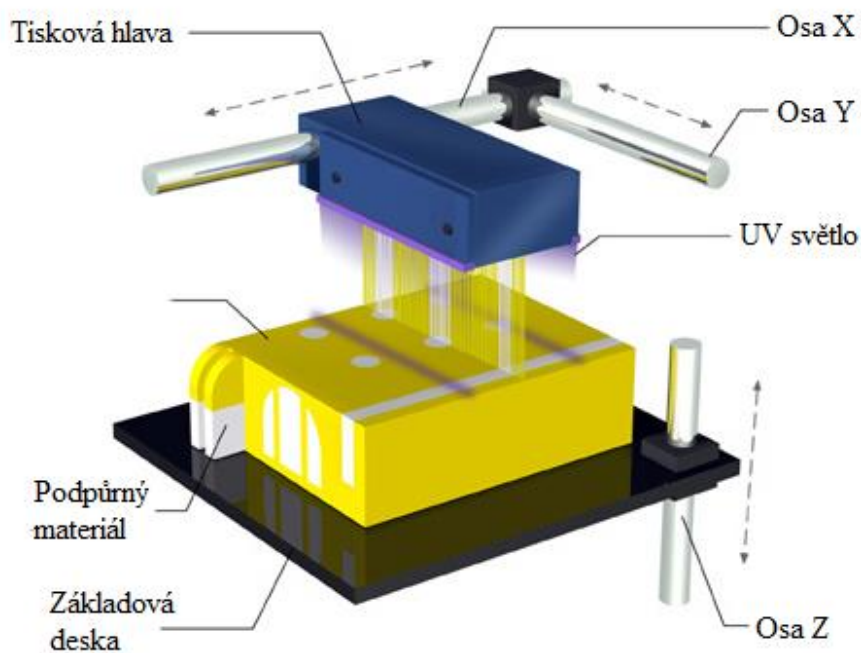
Tiskárny Objet jsou jedinými tiskárnami na světě, které umožňují tzv. multi-materiálový tisk (metoda Polyjet Matrix). Obrovskou předností a jedinečností této velmi mladé technologie (uvedené na trh společností Stratasys v roce 2015) je možnost kombinace více druhů fotopolymerů, či digitálních fotopolymerů ve stejném 3D tištěném modelu nebo ve stejné tiskové úloze v různých poměrech a tím dosáhnutí rozličných mechanických vlastností a aplikací. Rovněž lze během stavby kombinovat dva různé modelové materiály za vzniku tzv. digitálních materiálů se specifickými vlastnostmi, které umožňují výrobu součástí s tvrdým povrchem a houževnatým jádrem a simulovat tak materiálové charakteristiky, aby se prototypy co nejvíce přiblížily finálnímu produktu, ať už na pohled, dotyk nebo funkci.

Technologie multi-materiálového tisku umožňuje kombinovat až 14 materiálů v rámci jednoho modelu nebo tisk součástí z rozdílných materiálů při jedné tiskové úloze. Digitální materiály jsou vyráběny přímo v tiskárně, kdy jsou standardní PolyJet fotopolymery zkombinovány ve specifických koncentracích, které poskytují požadované mechanické i vizuální vlastnosti. Jedná se o tzv. dvoukomponentní tisk, kdy lze tisknout dva různé druhy materiálů v jednom tiskovém procesu [21, 22].

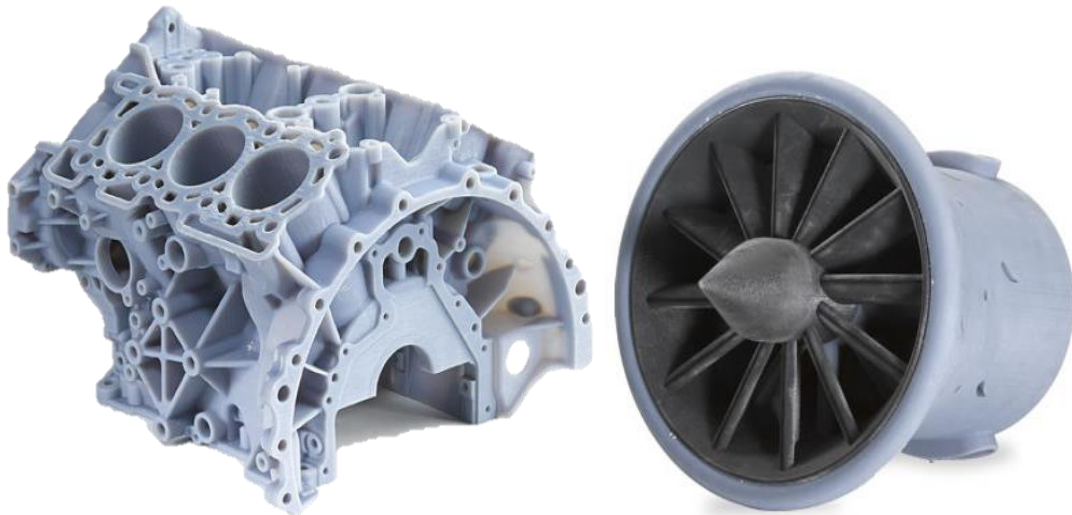
Pomocí technologie PolyJet nabízí 3D tisk širokou škálu materiálových možností a umožňuje stavbu realistických prototypů pro funkční simulace a vývojové účely, které se velmi podobají finálním součástem. Vznikají součásti z materiálů od pryže přes tuhé, transparentní, neprůhledné plasty, až po biokompatibilní materiály. Tato tisková metoda je velmi efektivní a tvorba součástí velmi rychlá. Výsledné díly se vyznačují jednou z nejvyšších rozměrových přesností z používaných technologií 3D tisku. Hlavními výrobci tiskáren a materiálů na bázi fotopolymerů jsou firmy DSM Somos s materiály řady Somos, Huntsman s materiály Renshape a Objet Geometries s materiály řady FullCure, Vero, Tango, Digital ABS plus a další. Přehled základních mechanických charakteristik těchto materiálů je uveden v tab. 2.

Tab. 2 Přehled mechanických vlastností vybraných materiálů pro technologii PolyJet [23]

	Digital ABS Plus	TangoBlackPlus	RGD 720	VeroWhitePlus	Rigur
Pevnost v tahu [MPa]	55 – 60	0,8 - 1,5	50 - 65	58	40
Prodloužení při přetržení [%]	25 – 40	170 – 220	15 - 25	10 – 25	20
Pevnost v ohybu [MPa]	65 – 75	-	80 - 110	93	52
Tvrдость podle Shore	85 - 87 (D)	26 -28 (A)	83 - 86 (D)	85 (D)	80 (D)
Modul pružnosti v tahu [MPa]	2600 – 3000	-	2000 – 3000	2500	1700
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	1700 – 2200	-	2700 - 3300	2700	1500



Obr. 7 Schéma technologie PolyJet printing



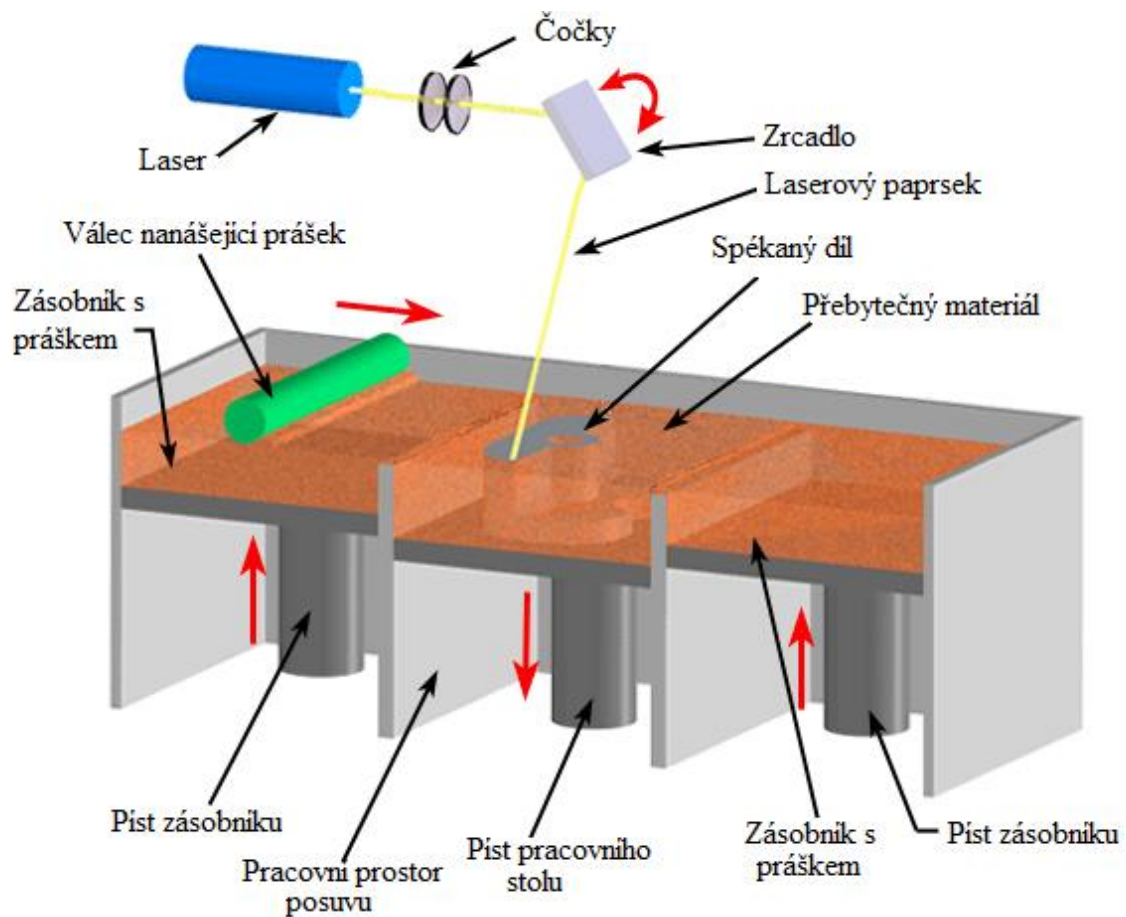
Obr. 8 Výrobky zhotovené metodou PolyJet a PolyJet – Metrix [24,25]

2.5 Selective Laser Sintering

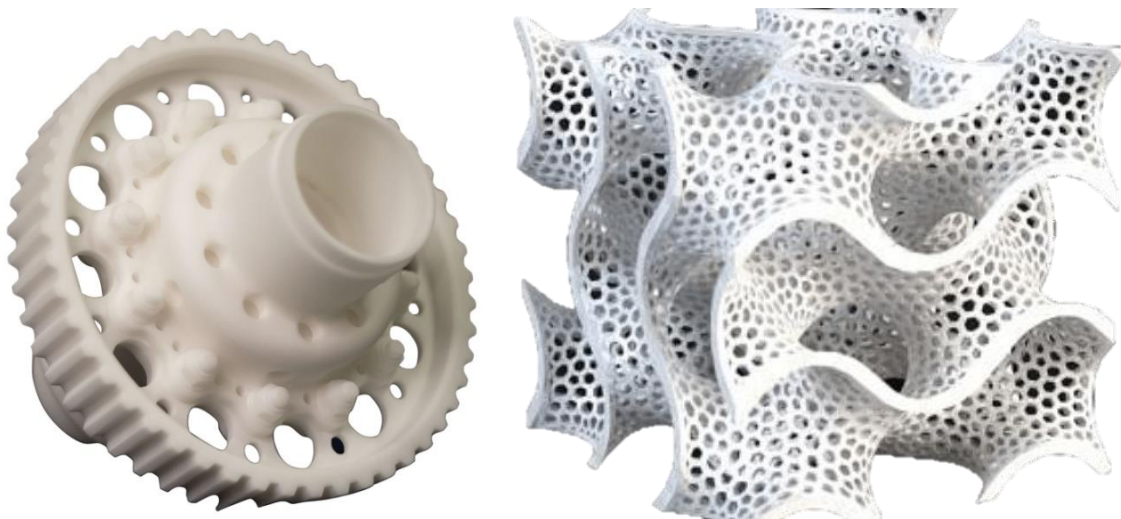
Selective Laser Sintering (SLS) je jedním z nejvyužívanějších a nejekonomičtějších způsobů 3D tisku. Základní princip se velmi podobá metodě SLA v kapitole 2.2 s rozdílem v použitém materiálu. U metody SLS se používají různé druhy práškových materiálů, které jsou spékány paprskem CO_2 . Tisková hlava tedy nenanáší stavební materiál, pouze vytváří laserový paprsek, který spéká a natavuje práškový materiál umístěný pod ní. Práškový materiál je nanášen na pracovní stůl v inertní atmosféře (dusíku nebo argonu) pomocí speciálního válce po vrstvách. Podle vypočítaných souřadnic bodů rovin řezů je řízena XY skenovací hlava, která vede paprsek laseru nad povrchem prášku uloženého ve vaně. V místě, kde laserový paprsek dopadne na prášek, dojde buď k jeho spečení, nebo se roztaví a ztuhne. Postupným vrstvením vznikají požadované díly (viz obr. 10). Přebytečný materiál okolo slouží jako podpurný materiál vyráběné součásti. Po vytvoření jedné vrstvy se pracovní stůl sníží o hodnotu odpovídající tloušťce jedné vrstvy, přičemž je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru. Po dokončení procesu je z hotového výrobku přebytečný materiál ofoukán [6, 11].

Metoda SLS používá tři typy hlav. První typ hlavy se skládá z karbon-dioxidového zdroje paprsku, optiky a skenovacího zařízení. Celá tato soustava se pohybuje v osách X, Y a vytváří tištěný díl. Další hlavy se liší tím, že soustava navíc obsahuje zrcadlo, které je možné naklápět kolem dvou os. Hlava se tedy nepohybuje, pouze se natáčí zrcadlo a tím se mění poloha

dopadového bodu paprsku (viz obr. 9). Skenovací zařízení slouží pro kontrolu lázně, která vzniká při tavení práškového materiálu. Pomocí údajů získaných ze skenovacího zařízení se upravuje výkon laseru a rychlost pohybu tak, aby nedocházelo k přehřátí nebo nerovnoměrnému zahřátí materiálu. Poslední typ hlavy, používané u metody SLS je hlava nanášející pojivo, ta se však používá pouze pro výrobky z keramického prášku a nejedná se o laserový paprsek.



Obr. 9 Schéma technologie Selective laser sintering [26]



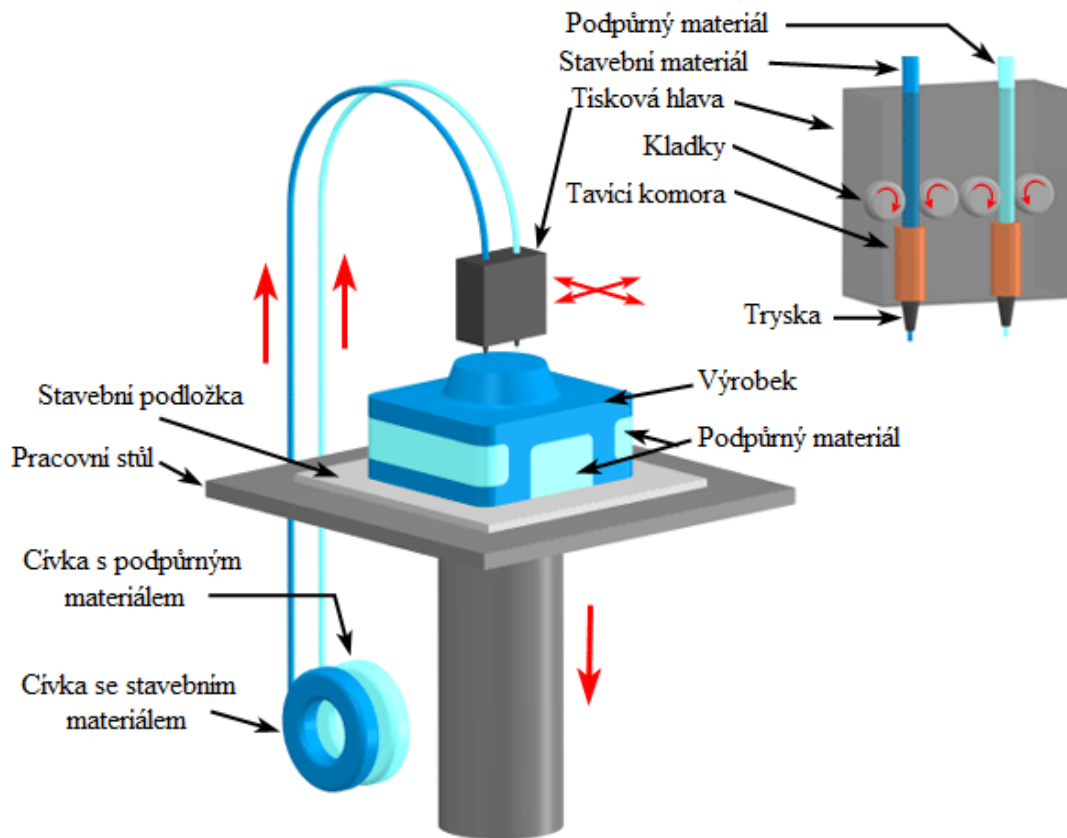
Obr. 10 Výrobky zhotovené technologií SLS [27]

2.6 Fused Deposition Modeling

Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) je díky své jednoduchosti jedna z nejrozšířenějších metod technologie RP, která má značný potenciál v řadě průmyslových odvětví. Tiskárny na principu metody FDM jsou oproti ostatním 3D tiskárnám cenově velmi příznivé, což má za následek jejich značné komerční využití [28].

Podstata této technologie, vyvinuté v devadesátých letech minulého století, spočívá v natavení plastu, který je dodáván nejčastěji ve formě drátu navinutého na cívce. Z cívky je materiál pomocí kladek dopraven do tavicí trysky tiskové hlavy, kde se pomocí elektrické cívky nebo laseru taví na teplotu o 1°C vyšší, než je jeho teplota tání. Základní částí tiskové hlavy je tzv. extruder, tavidlo, čidlo teploty a tryska. Extruder je zařízení, které vtlačuje stavební materiál do tavidla, kde se taví a dále je vytlačován přes trysku na pracovní plochu, kde tuhne. Pro hlavy lze použít trysky různého průměru od 0,2 mm do 0,5 mm. Velikost průměru trysky ovlivňuje velikost nejmenšího možného detailu výrobku a samozřejmě i dobu tisku. Materiál je nanášen na pracovní stůl ve vrstvách o tloušťce minimálně 0,127 mm. Z důvodu kompenzace teplotní dilatace je pracovní stůl vyhříván. Po nanesení požadované vrstvy materiálu, dojde k jeho ztuhnutí a následnému posunutí pracovního stolu o výšku jedné vrstvy (viz obr. 11). I zde je třeba uvést, že do procesu nevstupuje pouze stavební materiál dílce, ale také podpůrný materiál (tiskové hlavy obsahují dva extrudery, kdy jeden slouží pro tisk stavebního materiálu a druhý pro tisk materiálu podpůrného). Tím se vyplňují duté části výrobku. Je zřejmé, že tento materiál je u konečného výrobku nežádoucí a je nutné jej

odstranit. Toho se docílí například vymytím ve speciální pračce, do které se přidá roztok na vodní bázi, který podpůrný materiál rozpustí [6, 9, 17].



Obr. 11 Znárodnění principu technologie FDM [29]

Výhodami této technologie jsou nízká pořizovací cena a minimální odpad (pouze podpůrný materiál). Jednoznačnou nevýhodou proti výše zmíněným technologiím je malá rozměrová přesnost a doba výroby součásti, neboť je materiál u metody FDM nanášen pouze jednou tryskou a tisk je zdlouhavý. Navíc zde vzniká problém při použití běžného extruderu s kladkami (viz obr. 11). Pokud je použita tryska s malým průměrem a zároveň je zvýšena rychlost tisku, dochází k nepravidelnému tvoření vlákna materiálu za tryskou, neboť podávací kladky nejsou schopny vytvořit dostatečný tlak. Řešením je použití extruderu se šnekovým podavačem sypkého (granulovaného) materiálu. I přesto má své místo ve spoustě průmyslových odvětví (viz obr. 12, 13).



Obr. 12,13 Příklady výrobků pomocí technologie FDM [32, 33]

Nejběžnějšími polymerními materiály pro technologii FDM jsou akrylonitril-butadienstyren (ABS), kyselina polymléčná (PLA), vysokohustotní polyethylen (PE-HD) a polykarbonát (PC), jejichž typické vlastnosti a provozní podmínky při zpracování jsou uvedeny v tab. 3. Materiály pro technologii FDM musí splňovat tři hlavní kritéria:

- materiál musí být zpracovatelný tak, aby z něho bylo možné vyrobit tenkou strunu,
- součást po tisku musí splňovat vizuální, mechanické a rozměrové požadavky,
- materiál musí být schopen opětovného roztavení a zchladnutí [6, 9, 30, 31].

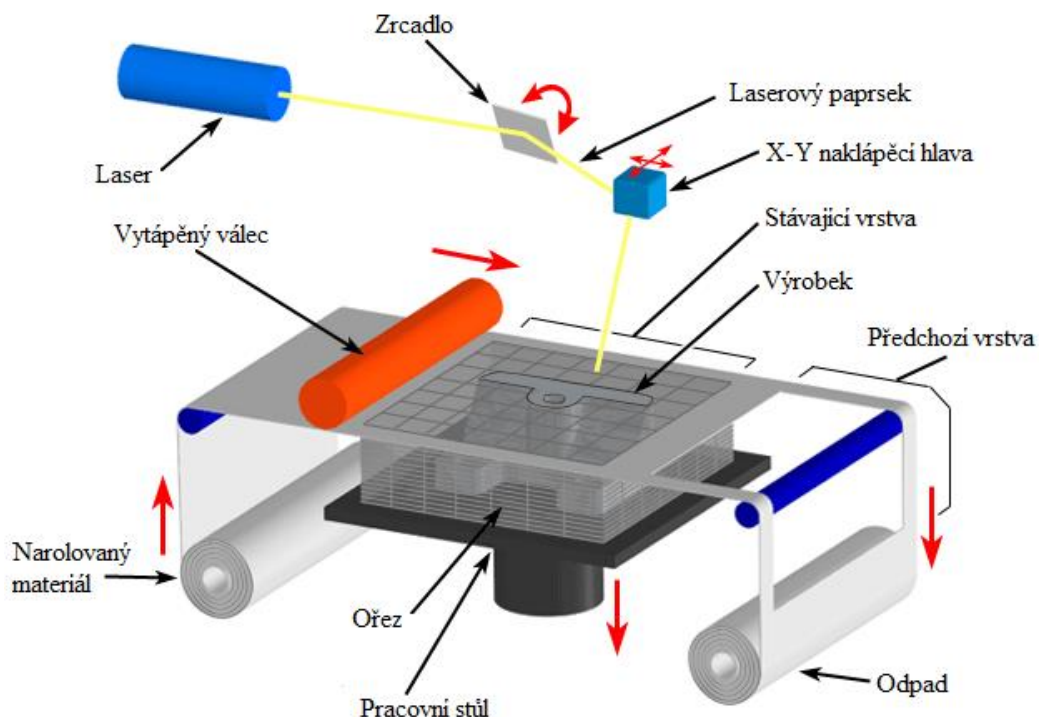
Tab. 3 Přehled materiálů používaných pro technologii FDM [31]

	ABS	PLA	PE-HD	PC
Pevnost v tahu [MPa]	45	58	15	70
Teplota zesklnění [°C]	108	65	-110	160
Teplota tání [°C]	-	178	135	-
Teplota trysky [°C]	210-250	160-220	230	300
Vyrobeno z	Ropy	Přírodních produktů	Ropy	Ropy
Vyhřívána stavební podložka	ANO	ANO	ANO	ANO

2.7 Laminated Object Manufacturing

Metoda Laminated Object Manufacturing (LOM) byla vyvinuta americkou firmou Helysis. Je založena na vrstvení lepidelného materiálu na sebe. Tato technologie se již na první pohled odlišuje použitým vstupním materiálem, kterým je nejčastěji papír potažený na spodní straně polyethylenem, jež slouží jako pojivo při tzv. „žehlení“ jednotlivých vrstev. Takto vytvořená fólie, která má minimální tloušťku 0,05 mm, je v každém kroku navinuta přes celý pracovní prostor. Pomocí vyhřívaných válců je přitlačena a zažehlena k postupně vytvářeným vrstvám dílu. Následně je do ní laserovým paprskem vyříznut požadovaný obrys modelu (viz obr. 14). Po vyřezání obrysu modelu jedné vrstvy je přebytečná fólie laserem rozdělena na čtverce, které jsou následně odstraněny. Po dokončení všech výše popsaných operací klesne pracovní stůl o tloušťku fólie a proces se znovu opakuje až do vyrobení konečné součásti (viz obr. 15) [2, 6, 9, 10].

Hlavním rozdílem od ostatních metod RP je způsob osvětlení materiálu. Laser nemusí osvětlit celou plochu řezu, ale jenom její obrys, což velmi urychluje výrobu. Pro díly vyhotovené technologií LOM se jako dokončovací operace používají běžné obráběcí metody. Pro stálost rozměrů lze na výrobek nanášet silikonový, uretanový nebo epoxidový nástřík, který zabrání absorpci vlhkosti.



Obr. 14 Schéma postupu výroby u technologie LOM [34]

Mezi hlavní výhody technologie LOM patří schopnost vyrábět součásti větších rozměrů a možnost zpracovat i další druhy materiálů, např. polymery, kovy atd. Další výhodou je rychlost výroby. Ta je dána tím, že laser pouze vyřezává obrys dané vrstvy a ke spojení vrstev dochází zažehlováním vyhřívanými válci.

Nevýhodou této technologie je velké množství odpadu, který je nutné po dokončení výroby odstranit. Konstrukci dílu je proto nutné navrhnout tak, aby přebytečné části fólie bylo možné odstranit. Další nevýhody jsou nevhodnost technologie pro výrobu tenkostěnných součástí (pevnost modelu je omezena použitým pojivem a liší se navíc v různých směrech, záleží na adhezi a kohezi lepidla a stavebním materiálu), nutnost přesného nastavení laseru, aby nedocházelo při ořezávání materiálu k porušení předešlých vrstev apod. [2, 10].



Obr. 15 Výrobky zhotovené technologií LOM [35, 36]

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na studium mechanických vlastností dílů vyrobených z fotopolymerů metodou PolyJet (viz kapitola 2.4) s ohledem na směr orientace jednotlivých vrstev dílů při jejich tisku a podmínkách následné kondicionace. Výběr použitého materiálu byl ovlivněn fází výzkumné činnosti na katedře strojírenské technologie a Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace v rámci projektu VI20172020052.

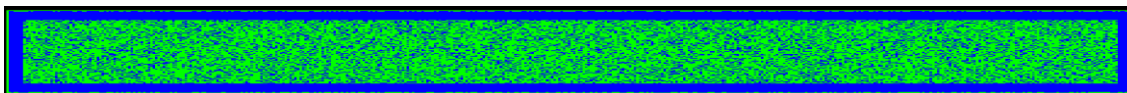
3.1 Charakteristika použitých materiálů

K experimentálnímu měření byly vybrány čtyři rozdílné typy fotopolymerů na bázi akrylátu s obchodním označením VeroWhitePlus, Digital ABS Plus, RGD8560-DM a FLX2195-DM, jejichž typické mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4a až tab. 4d. Na úvod je nutné poznamenat, že níže uvedené materiály s obchodním označením Digital ABS Plus, RGD8560-DM a FLX2195-DM jsou vytvořeny vždy směsí dvou materiálů, jejichž poměr je obchodním tajemstvím výrobce fa. Stratasys. U materiálů RGD8560-DM a FLX2195-DM se jedná o kombinaci materiálů VeroWhitePlus a TangoBlackPlus, u materiálu Digital ABS Plus se jedná o směs akrylátových plastů, které mají obchodní označení RGD531 a RGD515. S ohledem na obchodní tajemství jsou pro uživatele k dispozici pouze knihovny, kde je uvedena nabídka jednotlivých produktů, ze které si uživatel vybírá dle uvedených mechanických vlastností: tvrdosti Shore, poměrného prodloužení při přetržení, rázové houževnatosti ad. (viz obr. 16).

■	VeroBlack (General Purpose: e-Modulus 2192 MPa, HDT 47C)
■	RGD8555-DM (Balanced Rigidity, Impact 25 J/m, Elongation at Break 20%-30%)
■	RGD8560-DM (PP-like, Impact 30 J/m, Elongation at Break 25%-35%)
■	FLX2195-DM (Rubber-like, Shore A95, Elongation at Break 50%)
■	FLX2185-DM (Rubber-like, Shore A85, Elongation at Break 60%)
■	FLX2170-DM (Rubber-like, Shore A70, Elongation at Break 75%)
■	FLX2160-DM (Rubber-like, Shore A60, Elongation at Break 80%)
■	FLX2150-DM (Rubber-like, Shore A50, Elongation at Break 105%)
■	FLX2140-DM (Rubber-like, Shore A40, Elongation at Break 125%)
■	TangoBlack+ (Rubber-like, Shore A27, Elongation at Break 218%)

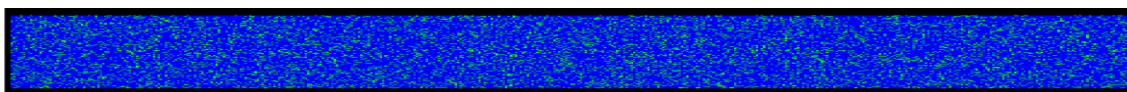
Obr. 16 Ukázka knihovny, ze které má možnost uživatel vybírat materiály pro technologii PolyJet

Pro kvalitativní vyhodnocení naměřených hodnot mechanických vlastností zkušebních těles, bylo nutné zjistit procentuální zastoupení jednotlivých materiálových složek fotopolymerů, které bylo provedeno výpočtem pixelů ze snímků obrazovky získaných z materiálové analýzy modelu v řezu před začátkem 3D tisku (viz obr. 17 až obr. 20). Pomocí programu MATLAB byl určen počet zelených pixelů, které u materiálu Digital ABS Plus znázorňuje materiál RGD531 a u materiálů RGD8560-DM a FLX 2195-DM materiál TangoBlackPlus. Tím byl stanoven přibližný poměr použitých materiálů.



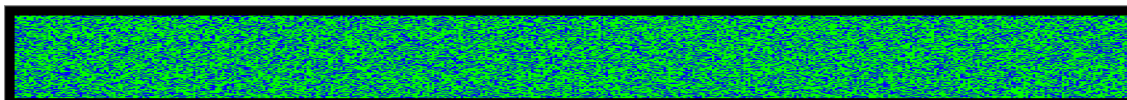
Obr. 17 Analýza obsahu komponent vzorku určeného pro 3D tisk z materiálu Digital ABS Plus

Z obr. 17 bylo vyhodnoceno, že materiál Digital ABS Plus je tvořen 58 % materiálem RGD531 a 42 % materiálem RGD515.



Obr. 18 Analýza obsahu komponent vzorku určeného pro 3D tisk z materiálu RGD8560-DM

Z obr. 18 bylo určeno, že materiál RGD8560-DM je tvořen 18 % materiálem TangoBlackPlus a 82 % materiálem VeroWhitePlus.



Obr. 19 Analýza obsahu komponent vzorku určeného pro 3D tisk z materiálu FLX2195-DM

Z obr. 19 bylo vyhodnoceno, že materiál FL2195-DM je tvořen 64 % materiálem TangoBlackPlus a 36 % materiálem VeroWhitePlus.

Pro ilustraci je na obr. 20 uveden případ 100% zastoupení materiálu VeroWhitePlus ve vzorku.



Obr. 20 Ukázka vzorku určeného pro 3D tisk z materiálu VeroWhitePlus.

Tab. 4a Vybrané mechanické vlastnosti fotopolymeru Digital ABS Plus [38]

Digital ABS Plus			
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Metoda
Pevnost v tahu	55 - 60	MPa	D-638-03
Modul pružnosti v tahu	2600 - 3000	MPa	D-638-04
Pevnost v ohybu	65 - 75	MPa	D-790-03
Modul pružnosti v ohybu	1700 – 2200	MPa	D-790-04
Tvrдость podle Shore D	85 - 87	-	D2240-05

Tab. 4b Vybrané mechanické vlastnosti fotopolymeru VeroWhitePlus [37]

VeroWhitePlus			
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Metoda
Pevnost v tahu	58	MPa	D-638-03
Modul pružnosti v tahu	2500	MPa	D-638-04
Pevnost v ohybu	93	MPa	D-790-03
Modul pružnosti v ohybu	2700	MPa	D-790-04
Tvrдость podle Shore D	85	-	D2240-05

Tab. 4c Vybrané mechanické vlastnosti RGD9560-DM [37]

RGD8560-DM			
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Metoda
Pevnost v tahu	29 - 38	MPa	D-638-03
Modul pružnosti v tahu	1100 - 1700	MPa	D-638-04
Pevnost v ohybu	35 - 45	MPa	D-790-03
Modul pružnosti v ohybu	1200 - 1500	MPa	D-790-04
Tvrдость podle Shore D	76,1 - 81,7	-	D2240-05

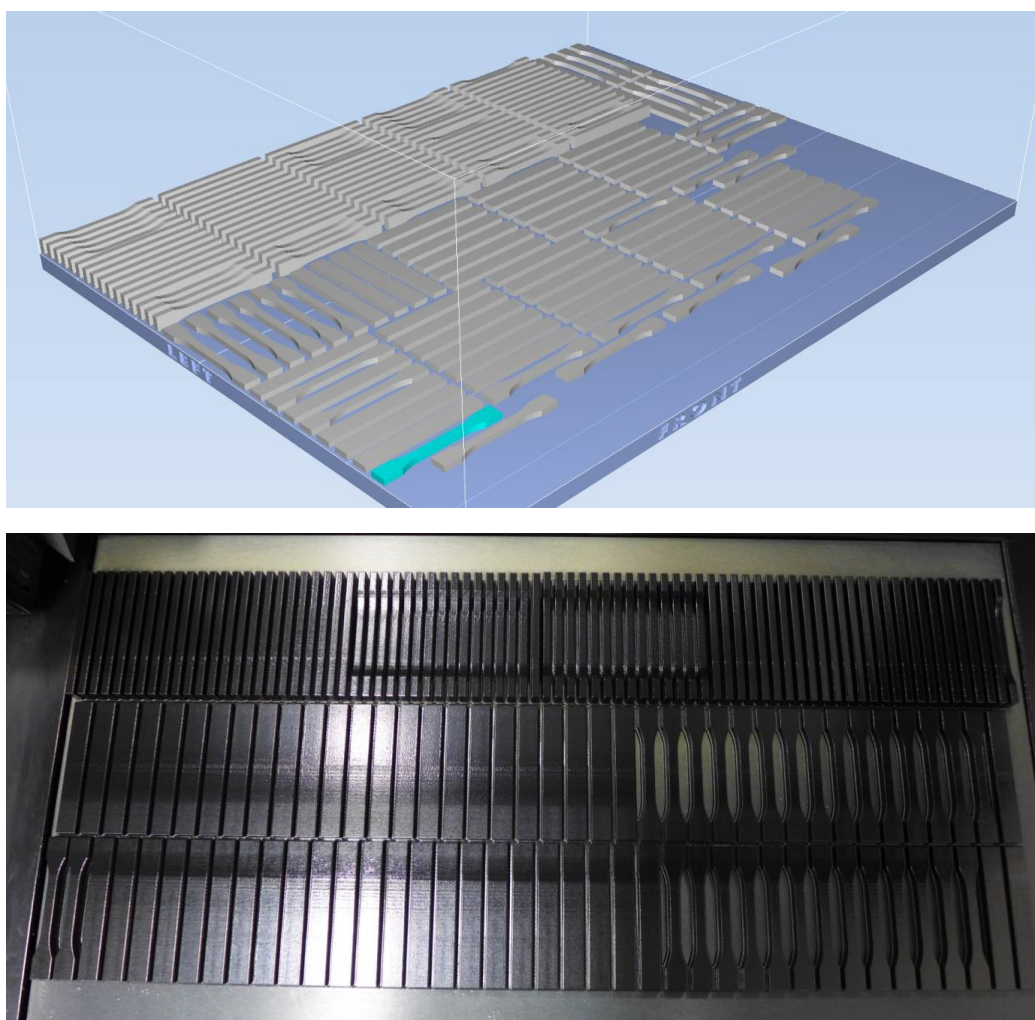
Tab. 4d Vybrané mechanické vlastnosti FLX2195-DM [37]

FLX2195-DM			
Vlastnosti	Hodnota	Jednotky	Metoda
Pevnost v tahu	8,5 - 10	MPa	ASTM D-412
Prodloužení při přetržení	35 - 45	%	ASTM D-412
Tvrдость podle Shore A	92 - 95	-	D2240-05
Odolnost proti přetržení	41 - 44	kg/cm	ASTM D-624

3.2 Příprava 3D modelu a výroba zkušebních těles technologií PolyJet

Prvním krokem pro proces 3D tisku dílů metodou PolyJet byla příprava modelů ve tvaru zkušebních těles. S ohledem na cíle diplomové práce a způsob zatěžování dílů při hodnocení jejich mechanických vlastností byly vytvořeny dva rozdílné modely. První

z nich byl ve tvaru pravoúhlého hranolu obdélníkového průřezu odpovídající předpisu ČSN EN ISO 179-1 (stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy) a ČSN EN ISO 178 (stanovení ohybových vlastností). Druhým 3D modelem bylo zkušební těleso typu 1BA ve tvaru oboustranných lopatek v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2 (stanovení tahových vlastností). Vytvořené modely zkušebních těles byly následně uloženy ve formátu STL a nahrány do softwaru Objet Studio verze 9.2.8.3, který je součástí 3D tiskárny. Tento software rozdělí model na jednotlivé řezy a vypočítá čas výroby, který je závislý na zvolené tloušťce jedné vrstvy. Před začátkem výroby těles bylo nutné definovat použitý materiál, umístění modelu a jeho orientace v prostoru vůči základové desce (viz obr. 21), teplotu materiálu v tiskové hlavě, tloušťku jedné vrstvy a intenzitu UV záření, která je volena v závislosti na materiálu a je ovlivněna použitím jedné nebo dvou UV lamp.

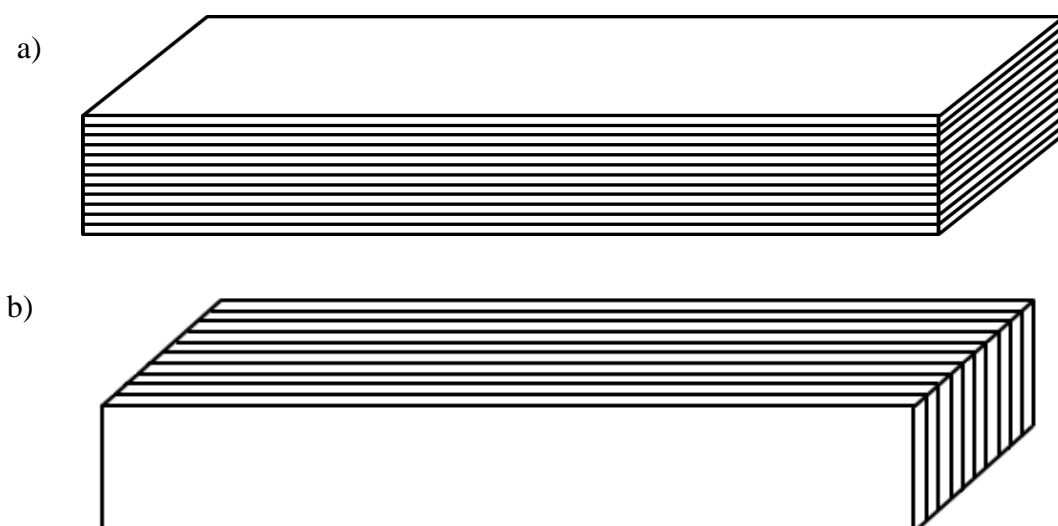


Obr. 21 Zkušební vzorky pro materiálovou analýzu plastů použitých při technologii PolyJet včetně příkladu orientace vrstev vůči základové desce: modely těles v řídicím programu zařízení J700 (nahore); zkušební tělesa (dole)

Výroba zkušebních těles technologií PolyJet byla provedena na tiskárně J700 od firmy Stratasys (viz obr. 22), která je vybavena zásobníkem materiálu, tiskovou hlavou a ventilátorem, který přivádí studený vzduch do pracovního prostoru a na druhé straně odsáváním, jež odvádí ohřátý vzduch z pracovního prostoru pro udržení konstantní teploty prostředí. Stavební a podpurné materiály byly pomocí sacího ústrojí přiváděny ze zásobníku do tiskové hlavy, kde se zahřály na potřebnou teplotu. Materiály byly následně přes trysky nanášeny na pracovní stůl ve formě kapiček, které byly pomocí speciálního válečku zarovnány na požadovanou tloušťku vrstvy a pomocí UV lampy, která je součástí tiskové hlavy, došlo k ozáření nanesené vrstvy materiálu, čímž došlo k jeho vytvrzení. Tento proces se opakoval do doby, než byla dokončena stavba těles. První vrstva na pracovním stole byla z podpurného materiálu, který sloužil jako podložka zaručující stabilitu vzorku během tisku a jeho snadné vyjmutí po dokončení výrobního procesu. Důležitou částí při výrobě zkušebních těles byla orientace kladených vrstev. U jedné sady vzorků byly vrstvy řezu skládány „naležato“, u druhé sady těles byly vrstvy řezu skládány „nastojato“ (viz obr. 23). Po vyjmutí zkušebních těles z tiskárny byl podpurný materiál odstraněn proudem vody. Z důvodu zvýšené nasákavosti použitých fotopolymérů, která je dána jejich chemickým složením (fotopolymery obsahují polární atomy kyslíku), byly vzorky uloženy na 24 hodin do sušící komory, aby byly zajištěny stejné výchozí podmínky pro všechny testované materiály. Technologické parametry 3D tisku jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 22 3D tiskárna pro metodu PJP s označením J700 od firmy Stratasys



Obr. 23 Ukázka orientace vrstev „naležato“ a „nastojato“

Tab. 5 Parametry 3D tisku zkušebních těles

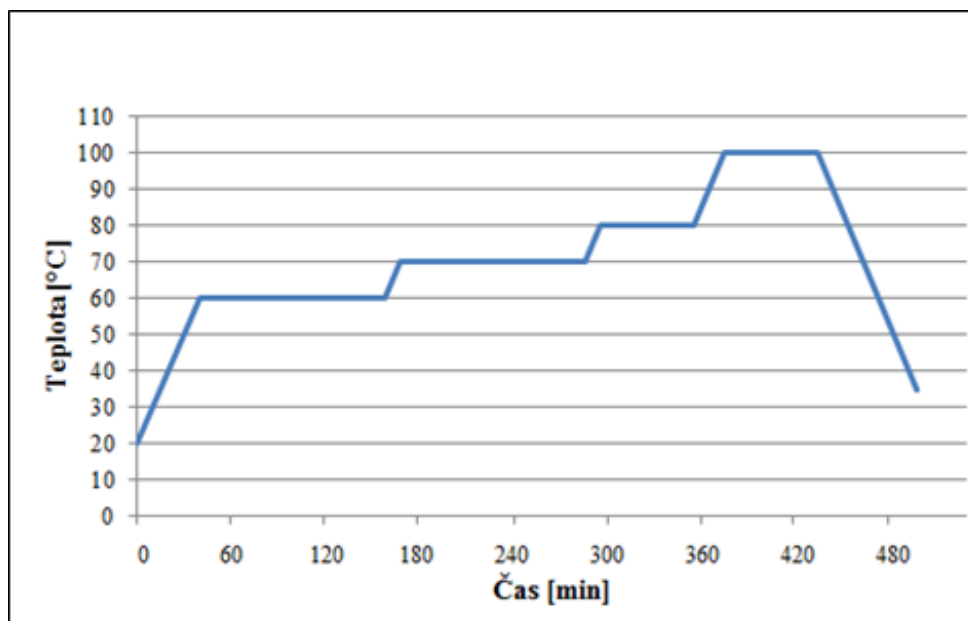
Materiál	Digital ABS Plus	VeroWhite Plus	RGD8560-DM	FLX2195-DM
Teplota materiálu v tiskové hlavě [°C]	75	75	77	78
Tloušťka vrstvy [mm]	0,033	0,033	0,033	0,033
Počet UV lamp [ks]	2	2	1	1

3.3 Popis vybraných prostředí, kterým byla zkušební tělesa vystavena

Pro porovnání mechanických vlastností těles byla vybrána tři prostředí, v nichž byla zkušební tělesa kondicionována. Prvním z nich bylo běžné laboratorní prostředí (teplota 23 °C a relativní vlhkost 50 %), nazývané dále jako standardní prostředí. Druhé prostředí, kterému byly vzorky vystaveny, bylo prostředí se zvýšenou vlhkostí. Tělesa byla uložena do klimatizační komory o teplotě 30 °C a relativní vlhkostí vzduchu 80 %. Tomuto prostředí byly vzorky vystaveny po dobu dvou týdnů. Vlhkost materiálu byla stanovena termogravimetrickou metodou pomocí halogenového analyzátoru HX 204 (viz tab. 6 a příloha 1). Třetím typem bylo prostředí, kde byly vzorky vystaveny postupně zvyšujícím se teplotám. Průběh teplotního zatěžování zkušebních těles byl nastaven podle teplotního cyklu doporučeného výrobcem pro materiál Digital ABS Plus za účelem zajištění rozměrové

a tvarové stálosti za zvýšených teplot, kdy výrobce tohoto materiálu deklaruje zvýšení teploty průhybu při zatížení (HDT) z hodnoty $(58 \div 68)$ °C na 100 °C (pravděpodobně z důvodu dodatečných změn ve struktuře materiálu). Průběh teplotního cyklu byl následující (viz obr. 24):

- díl byl vložen do pece a nastavena rychlost ohřevu 1 °C/min,
- ohřev na teplotu 60 °C,
- po dosažení teploty 60 °C následoval izotermický ohřev po dobu 2 hodin,
- ohřev na teplotu 70 °C,
- po dosažení teploty 70 °C následoval izotermický ohřev po dobu 2 hodin,
- ohřev na teplotu 80 °C,
- po dosažení teploty 80 °C následoval izotermický ohřev po dobu 1 hodiny,
- ohřev na teplotu 100 °C,
- po dosažení teploty 100 °C následoval izotermický ohřev po dobu 1 hodiny,
- v posledním kroku byly díly v peci ochlazeny a vyjmuty při $T < 35$ °C.



Obr. 24 Grafický průběh teplotního zatížení dílů [36]

Tab. 6 Relativní vlhkost zkušebních těles před a po expozici zvýšené vlhkosti

Materiál	Vlhkost ve standardním prostředí po výrobě 23/50 [%]	Vlhkost po expozici prostředí 30/80 [%]	Nárůst vlhkosti
Digital ABS Plus	0,41	1,43	3,5krát
VeroWhitePlus	0,50	1,70	3,4krát
RGD8560-DM	0,91	2,23	2,5krát
FLX2195-DM	1,05	2,60	2,5krát

3.4 Analýza užitečných vlastností fotopolymerů

V souladu se zadáním diplomové práce byly naměřeny a následně vyhodnoceny mechanické vlastnosti fotopolymerů na bázi akrylátů, které byly vystaveny vybraným vnějším vlivům, jež byly popsány v kapitole 3.3. Hodnocení vlastností fotopolymerů bylo provedeno v souladu s mezinárodními předpisy.

3.4.1 Stanovení vrubové houževnatosti

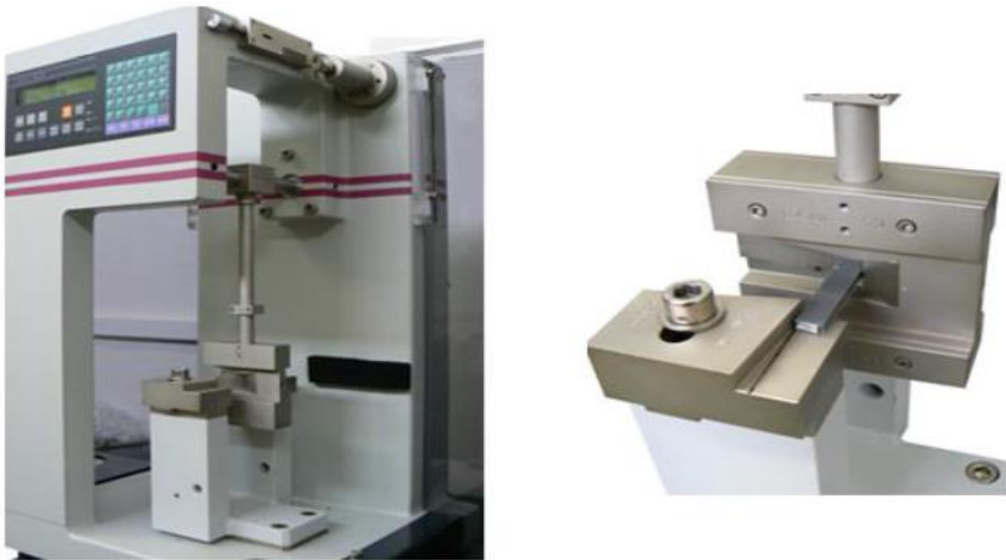
Stanovení vrubové houževnatosti (a_{cA}) bylo provedeno za standardních podmínek podle předpisu ČSN EN ISO179-1 metodou 179-1/1eA (ráz na užší stranu) na zařízení CeastResil 5.5 (viz obr. 25). Pro tuto metodu platí, že poloměr kořene vrubu $r_A = (0,25 \pm 0,05)$ mm a šířka pod vrubem $b_A = (8,0 \pm 0,2)$ mm. Před samotným začátkem zkoušky bylo nutné měřicí zařízení kalibrovat. V dalším kroku následoval ráz kladiva naprázdno, aby byla zjištěna ztrátová energie kladiva vzniklá mechanickým třením a odporem vzduchu. Pro stanovení vrubové houževnatosti u všech zkušebních těles bylo použito kladivo s nominální energií 0,5 J tak, aby energie spotřebovaná k přeražení tělesa ležela v toleranci (10 až 80) % jeho nominální energie. Směr rázu byl veden na opačnou stranu dílu, než na které byl obroben. Vrubová houževnatost byla stanovena na zkušebních tělesech o rozměrech (80 x 10 x 4) mm, která byla zhotovena metodou PJP ze čtyř různých materiálů. Samotný průběh zkoušky spočíval v nastavení kladiva do výchozí pozice a umístění zkušebního tělesa na podpěry tak, aby vrub ležel v jedné rovině s místem nárazu kladiva. Po jeho uvolnění došlo k úplnému přeražení tělesa a byla zaznamenána korigovaná energie spotřebovaná k jeho přeražení. Toto

měření bylo provedeno vždy na deseti vzorcích a z korigované energie byla následně vypočítána vrubová houževnatost Charpy (dle rovnice 1).

$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \times b_A} \times 10^3 \quad (1)$$

kde je:

a_{cA}	vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]
E_c	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa	[J]
h	tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
b_A	šířka zkušebního tělesa pod vrubem	[mm]



Obr. 25 Měřící zařízení CeastResil 5.5

Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti Charpy všech čtyř materiálů v závislosti na prostředí kondicionace a orientace vrstev v prostoru vůči základové desce jsou zaznamenány včetně jejich směrodatných odchylek v tab. 7a až tab. 7d v pořadí Digital ABS Plus, VeroWhitePlus, RGD8560-DM a FLX2195-DM.

Tab. 7a Vrubová houževnatost Charpy fotopolymeru Digital ABS Plus

Zkušební vzorek Digital ABS Plus		Vrubová houževnatost a_{cA} [kJ/m ²]
Digital ABS Plus "naležato"	Standardní	$1,5 \pm 0,5$
	Navlhlý	$0,9 \pm 0,1$
	Teplotně exponovaný	$1,0 \pm 0,2$
Digital ABS Plus "nastojato"	Standardní	$1,1 \pm 0,3$
	Navlhlý	$0,9 \pm 0,2$
	Teplotně exponovaný	$1,2 \pm 0,2$

Tab. 7b Vrubová houževnatost Charpy fotopolymeru VeroWhitePlus

Zkušební vzorek VeroWhitePlus		Vrubová houževnatost a_{cA} [kJ/m ²]
VeroWhitePlus "naležato"	Standardní	$1,3 \pm 0,2$
	Navlhlý	$1,2 \pm 0,2$
	Teplotně exponovaný	$1,4 \pm 0,2$
VeroWhitePlus "nastojato"	Standardní	$1,4 \pm 0,2$
	Navlhlý	$1,3 \pm 0,2$
	Teplotně exponovaný	$1,4 \pm 0,1$

Tab. 7c Vrubová houževnatosti Charpy fotopolymeru RGD8560-DM

Zkušební vzorek RGD8560-DM (82 % VeroWhitePlus, 18 % TangoBlackPlus)		Vrubová houževnatost a_{cA} [kJ/m ²]
RGD8560-DM "naležato"	Standardní	1,3 ± 0,1
	Navlhlý	1,9 ± 0,5
	Teplotně exponovaný	1,5 ± 0,2
RGD8560-DM "nastojato"	Standardní	1,3 ± 0,1
	Navlhlý	1,7 ± 0,5
	Teplotně exponovaný	1,2 ± 0,1

Tab. 7d Vrubová houževnatosti Charpy fotopolymeru FLX2195-DM

Zkušební vzorek FLX2195-DM (36 % VeroWhitePlus, 64 % TangoBlackPlus)		Vrubová houževnatost a_{cA} [kJ/m ²]
FLX2195-DM "naležato"	Standardní	1,6 ± 0,2
	Navlhlý	9,4 ± 3,4
	Teplotně exponovaný	1,6 ± 0,5
FLX2195-DM "nastojato"	Standardní	2,3 ± 0,3
	Navlhlý	36,0 ± 5,7 (8x P)
	Teplotně exponovaný	4,2 ± 1,0

3.4.2 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška se řadí mezi statické zkoušky a slouží k hodnocení zkušebního tělesa při ohybovém namáhání. Touto zkouškou se získává pevnost v ohybu a další závislosti mezi napětím a deformací při daných podmínkách dle ČSN EN ISO 178. Pevnost v ohybu

byla stanovena na zkušebních tělesech o rozměrech (80 x 10 x 4) mm, které byly zhotoveny metodou PJP ze čtyř různých materiálů. Samotná zkouška ohybem byla provedena na zařízení HOUNSFIELD H10KT s rozsahem snímací hlavy do 500 N, při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 % (viz obr. 26). Zkušební těleso bylo umístěno na dvou podporách ve vzdálenosti 64 mm a zatěžováno zkušebním trnem působícím uprostřed zkušebního tělesa rychlostí 2 mm/min do doby, než bylo dosaženo pevnosti v ohybu. Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu (σ_{fM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f), který byl vypočítán dle rovnice (2) jsou uvedeny včetně směrodatných odchylek v tab. 8a až tab. 8c v pořadí Digital ABS Plus, VeroWhitePlus, RGD8560-DM. Materiál FLX2195-DM nebylo možné podrobit ohybové zkoušce vzhledem k jeho vlastnostem podobným pryžovým materiálům, proto byla ohybová zkouška nahrazena zkouškou odrazové pružnosti (viz kap. 3.4.3).

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (2)$$

kde je:

σ_{f1}	hodnota napětí v ohybu při deformaci ε_{f1}	[MPa]
σ_{f2}	hodnota napětí v ohybu při deformaci ε_{f2}	[MPa]
ε_{f1}	hodnota poměrného prodloužení 0,05 %	
ε_{f2}	hodnota poměrného prodloužení 0,25 %	



Obr. 26 Měřicí zařízení HOUNSFIELD H10KT

Tab. 8a Ohybové vlastnosti fotopolymeru Digital ABS Plus

Zkušební vzorek – Digital ABS Plus		Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]
Digital ABS Plus "naležato"	Standardní	90,8 ± 1,9	2362 ± 96
	Navlhlý	62,0 ± 3,2	1660 ± 78
	Teplotně exponovaný	91,6 ± 2,6	2294 ± 51
Digital ABS Plus "nastojato"	Standardní	89,7 ± 0,9	2320 ± 9
	Navlhlý	67,4 ± 2,5	1771 ± 99
	Teplotně exponovaný	91,8 ± 1,3	2156 ± 103

Tab. 8b Ohybové vlastnosti fotopolymeru VeroWhitePlus

Zkušební vzorek VeroWhitePlus		Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]
VeroWhitePlus "naležato"	Standardní	98,7 ± 7,7	2521 ± 209
	Navlhlý	39,1 ± 2,0	1197 ± 84
	Teplotně exponovaný	80,8 ± 2,1	2188 ± 97
VeroWhitePlus "nastojato"	Standardní	102,0 ± 4,7	2420 ± 194
	Navlhlý	38,6 ± 2,0	1110 ± 70
	Teplotně exponovaný	86,2 ± 1,7	2189 ± 58

Tab. 8c Ohybové vlastnosti fotopolymeru RGD8560-DM

Zkušební vzorek RGD8560-DM (82 % VeroWhitePlus, 18 % TangoBlackPlus)		Pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]
RGD8560-DM "naležato"	Standardní	22,2 ± 0,4	690 ± 53
	Navlhlý	2,8 ± 0,3	50,0 ± 5
	Teplotně exponovaný	33,2 ± 0,5	940 ± 19
RGD8560-DM "nastojato"	Standardní	27,4 ± 0,6	777 ± 65
	Navlhlý	4,1 ± 0,5	85 ± 22
	Teplotně exponovaný	31,2 ± 0,7	940 ± 41

3.4.3 Stanovení odrazové pružnosti

Stanovení odrazové pružnosti (R) bylo provedeno pouze u materiálu FLX2195-DM za standardních podmínek podle předpisu normy ČSN 62 1480 resp. ISO 4662 (kyvadlová metoda) z důvodu uvedeného výše v kap. 3.4.2. Zkouška byla provedena na přístroji POLYMERTEST s typem kyvadla podle SCHOBA (viz obr. 27). Podstatou zkoušky bylo stanovení vráceného podílu na nárazu kyvadla. Kyvadlo o hmotnosti 0,25 kg, sestávající se z pevného kladiva zakončeného nárazníkem kulovitěho tvaru o průměru 15 mm, se nechalo dopadnout na zkušební těleso rychlostí rázu 2 m/s. Na stupnici přístroje se určila výška (h), do které se kyvadlo vlivem pružnosti zkoušeného materiálu odrazilo. Poměr výšky odrazu kyvadla po nárazu (h) k výšce zdvihu kyvadla ve výchozím postavení (H), vyjádřený v procentech, udává hodnotu odrazové pružnosti (R), viz rovnice (3). Výška odrazu kyvadla je stanovována z vrácené energie nebo horizontální vzdálenosti odrazu. Hodnota odrazové pružnosti byla stanovena u každého tělesa třikrát, z těchto hodnot se určil medián a výsledek zkoušky byl stanoven jako aritmetický průměr hodnot mediánů pěti zkušebních těles pro danou šarži dle ČSN 62 1480, viz tab. 9.

$$R = \frac{h}{H} \times 100 \quad (3)$$

kde je:

h výška odrazu kyvadla po nárazu [mm]

H výška zdvihu nárazníku kyvadla ve výchozím stavu [mm]



Obr. 27 Měřicí zařízení POLYMERTEST typ SCHOB

Tab. 9 Odrazová pružnost materiálu FLX2195-DM

Zkušební vzorek FLX2195-DM (36 % VeroWhitePlus, 64 % TangoBlackPlus)		Odrazová pružnost R [%]
FLX2195-DM "naležato"	Standardní	17,9 ± 0,5
	Navlhlý	8,49 ± 0,6
	Teplotně exponovaný	17,8 ± 0,3
FLX2195-DM "nastojato"	Standardní	16,7 ± 0,6
	Navlhlý	7,78 ± 0,8
	Teplotně exponovaný	17,5 ± 0,5

3.4.4 Stanovení tahových vlastností

Zkouška tahem patří do skupiny statických zkoušek. Těleso je při ní namáháno jednoosým tahovým zatížením obvykle až do přetržení. Měření tahových vlastností

zkušebních těles bylo provedeno na trhacím zařízení TiraTest 2300 s průtahoměrem Epsilon (model 3542-010M-025-ST), který byl použit pro měření modulu pružnosti v tahu se snímací hlavou s rozsahem 10 kN (viz obr. 28). Jako zkušební vzorek bylo použito víceúčelové zkušební těleso ve tvaru oboustranných lopatek typu 1BA v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, které bylo protahováno ve směru podélné osy až do jeho přetržení. Zkušební rychlost pro měření meze pevnosti (σ_m) byla 50 mm/min. Měření modulu pružnosti v tahu (E_t) bylo provedeno při zkušební rychlosti 1 mm/min a modul pružnosti byl poté stanoven z naměřených hodnot napětí a poměrného prodloužení dle rovnice (4) v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2. Stanovení tahových vlastností (meze pevnosti, modulu pružnosti v tahu) bylo provedeno celkem na 10 vzorcích od každé šarže a výsledné hodnoty včetně jejich směrodatných odchylek jsou zaznamenány v tab. 10a až tab.10d.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4)$$

kde je:

σ_1	hodnota napětí v ohybu při deformaci ε_{f1}	[MPa]
σ_2	hodnota napětí v ohybu při deformaci ε_{f2}	[MPa]
ε_1	hodnota poměrného prodloužení 0,05 %	
ε_2	hodnota poměrného prodloužení 0,25 %	



Obr. 28 Měřicí zařízení TiraTest 2300

Tab. 10a Tahové vlastnosti fotopolymeru Digital ABS Plus

Zkušební vzorek Digital ABS Plus		Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
Digital ABS Plus "naležato"	Standardní	73,8 ± 1,5	2819 ± 50
	Navlhlý	52,6 ± 1,2	2033 ± 106
	Teplotně exponovaný	64,8 ± 1,2	2434 ± 48
Digital ABS Plus "nastojato"	Standardní	74,6 ± 0,7	2793 ± 52
	Navlhlý	53,9 ± 2,4	2016 ± 42
	Teplotně exponovaný	68,4 ± 1,5	2474 ± 37

Tab. 10b Tahové vlastnosti fotopolymeru VeroWhitePlus

Zkušební vzorek VeroWhitePlus		Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
VeroWhitePlus "naležato"	Standardní	74,1 ± 2,1	2992 ± 87
	Navlhlý	39,6 ± 0,9	1242 ± 54
	Teplotně exponovaný	66,6 ± 3,0	2608 ± 134
VeroWhitePlus "nastojato"	Standardní	74,0 ± 2,6	2859 ± 179
	Navlhlý	41,6 ± 5,6	1187 ± 201
	Teplotně exponovaný	68,1 ± 2,9	2518 ± 98

Tab. 10c Tahové vlastnosti fotopolymeru RGD8560-DM

Zkušební vzorek RGD8560-DM (82 % VeroWhitePlus, 18 % TangoBlackPlus)		Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
RGD8560-DM "naležato"	Standardní	29,7 ± 2,7	1197 ± 81
	Navlhlý	10,1 ± 1,0	123 ± 20
	Teplotně exponovaný	28,3 ± 1,5	1019 ± 87
RGD8560-DM "nastojato"	Standardní	29,8 ± 2,7	1422 ± 160
	Navlhlý	11,6 ± 1,1	231 ± 29
	Teplotně exponovaný	31,1 ± 1,4	1214 ± 31

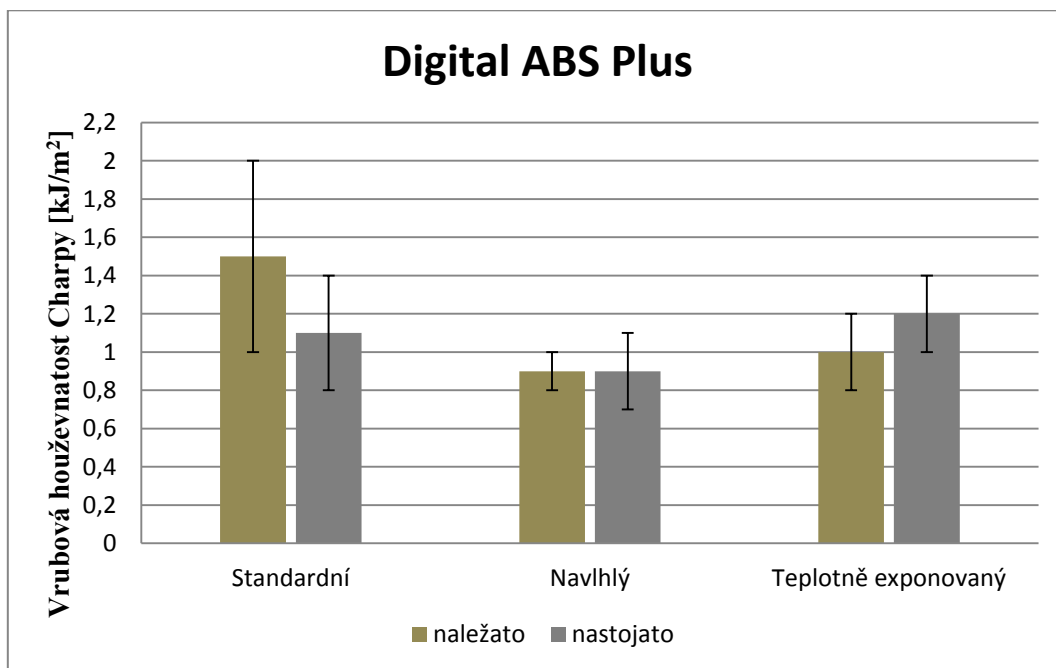
Tab. 10d Tahové vlastnosti fotopolymeru FLX2195-DM

Zkušební vzorek FLX2195-DM (36 % VeroWhitePlus, 64 % TangoBlackPlus)		Pevnost v tahu σ_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
FLX2195-DM "naležato"	Standardní	8,9 ± 0,8	N/A
	Navlhlý	3,4 ± 0,2	N/A
	Teplotně exponovaný	8,4 ± 0,5	N/A
FLX2195-DM "nastojato"	Standardní	9,4 ± 0,7	N/A
	Navlhlý	3,8 ± 0,2	N/A
	Teplotně exponovaný	8,6 ± 0,7	N/A

4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

4.1 Vyhodnocení vrubové houževnatosti Charpy

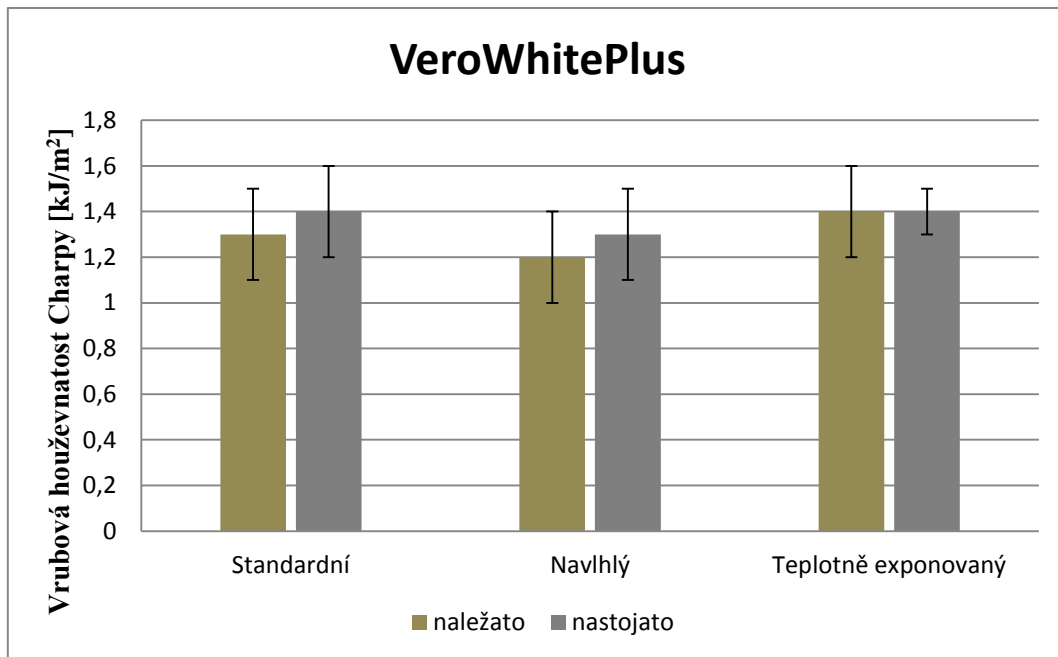
Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy bylo provedeno na zkušebních tělesech v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 179-1. Z naměřených hodnot vrubové houževnatosti Charpy (viz tab. 7a až tab. 7d) byly zhotoveny grafické závislosti vrubové houževnatosti na vlivu prostředí pro obě varianty orientace vrstev (viz obr. 29 až obr. 32). Pro materiál Digital ABS Plus z obr. 29 vyplývá, že u zkušebních těles vystavených zvýšené vlhkosti došlo vůči standardním dílům k poklesu vrubové houževnatosti u dílů „naležato“ o 41,5 %, vliv teplotního cyklu na vrubovou houževnatost materiálu se projevil pouze u dílů s orientací tisku „naležato“, kdy došlo k poklesu ca o 37 %. Z porovnání vlivu orientace jednotlivých vrstev na vrubovou houževnatost vyplývá, že u standardních vzorků tištěných „nastojato“ byla naměřena hodnota o 32 % nižší než u těles tisknutých „naležato“. Ačkoliv jsou procenta poklesu hodnot vrubové houževnatosti zdánlivě výrazná, lze s ohledem na rozptyl měřených hodnot (vyjádřených směrodatnou odchylkou) konstatovat, že vlivy prostředí a orientace tisku jednotlivých vrstev jsou statisticky nevýznamné.



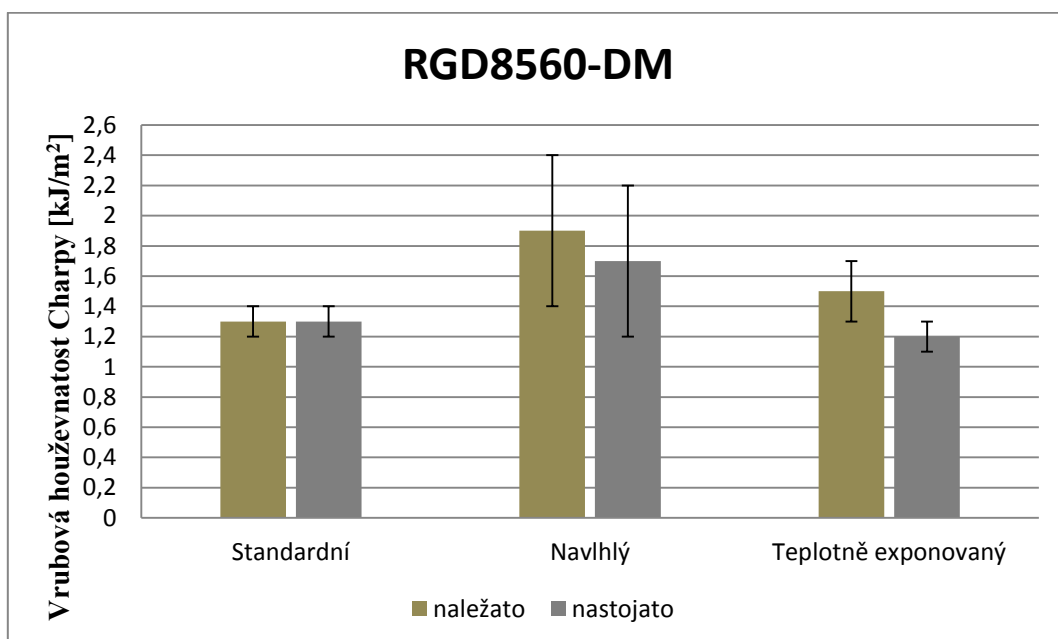
Obr. 29 Porovnání vrubové houževnatosti Charpy pro materiál Digital ABS Plus

Z naměřených hodnot vrubové houževnatosti Charpy pro materiál VeroWhitePlus (viz tab. 7b) byla zhotovena grafická závislost vrubové houževnatosti na vlivu prostředí pro obě varianty orientace vrstev (viz obr. 30), z níž je patrné, že dodatečná expozice dílů zvýšeným teplotám (až 100 °C) a zvýšené vlhkosti (prostředí 30/80) ani směr orientace jednotlivých vrstev neměly vliv na vrubovou houževnatost materiálu (s ohledem na velikost směrodatné odchylky). Při hodnocení zbylých dvou materiálů RGD8560-DM a FLX2195-DM, které jsou kombinací předcházejícího materiálu VeroWhitePlus s materiálem TangoBlackPlus, připomínající svými vlastnostmi pryže, lze konstatovat, že po expozici dílů prostředí se zvýšenou vlhkostí dochází k nárůstu jejich vrubové houževnatosti, s ohledem na rozptyl měřených hodnot zejména u fotopolymeru FLX2195-DM. Tuto změnu lze přisuzovat vyšší míře navlhavosti materiálu TangoBlackPlus, který však v rámci experimentálního měření nebyl v čisté podobě k dispozici. Svědčí o tom ale výsledky navlhnutí materiálu RGD8560-DM, který je tvořen z 82 % materiálem VeroWhitePlus a z 18 % materiálem TangoBlackPlus (viz kap. 3.1) a u něhož byla pomocí halogenového analyzátoru vlhkosti naměřena vlhkost 2,23 %, zatímco u materiálu FLX2195-DM (tvořeného z 64 % materiálem TangoBlackPlus) byl naměřen obsah vlhkosti 2,60 %. Obsah vlhkosti materiálu VeroWhitePlus po expozici prostředí 30/80 byl 1,70 %. Nejvyšší změna vrubové houževnatosti materiálu po jeho expozici zvýšené vlhkosti je u fotopolymeru FLX2195-DM, který obsahuje větší množství materiálu TangoBlackPlus, přičemž v případě orientace vrstev „naležato“ dochází ke zvýšení vrubové houževnatosti pětkrát, u materiálu s orientací vrstev „nastojato“ je tato změna téměř patnáctkrát větší. U materiálu RGD8560-DM jsou tyto změny statisticky nevýznamné. Příčinou většího nárůstu vrubové houževnatosti u navlhklých dílů „nastojato“ je skutečnost, že při mechanickém zhotovení vrubu dojde k porušení jen několika vrstev a zbylé neporušené vrstvy lépe snášejí rázové namáhání, než vzorky vytištěné „naležato“, u nichž dochází při tvorbě vrubu k narušení všech vrstev dílu a tím ke snížení jejich soudržnosti. Při posouzení vlivu teplotní expozice u fotopolymeru RGD8560-DM, lze konstatovat, že s ohledem na směrodatné odchylky nedochází ke změně vrubové houževnatosti. Při hodnocení vlivu teplotního zatížení na fotopolymer FLX2195-DM je zřejmý nárůst vrubové houževnatosti pouze u dílů „nastojato“ a to o 83 %. Důvod nárůstu vrubové houževnatosti vlivem teplotní expozice pouze u dílů vytisknutých „nastojato“ je obtížně diskutovatelný, neboť pokud by příčinou této změny mělo být zvýšené množství fotopolymeru TangoBlackPlus v materiálu FLX2195-DM nebo strukturní změna materiálu, je předpoklad, že obdobná změna by byla zaznamenána i při orientaci vrstev dílů „naležato“.

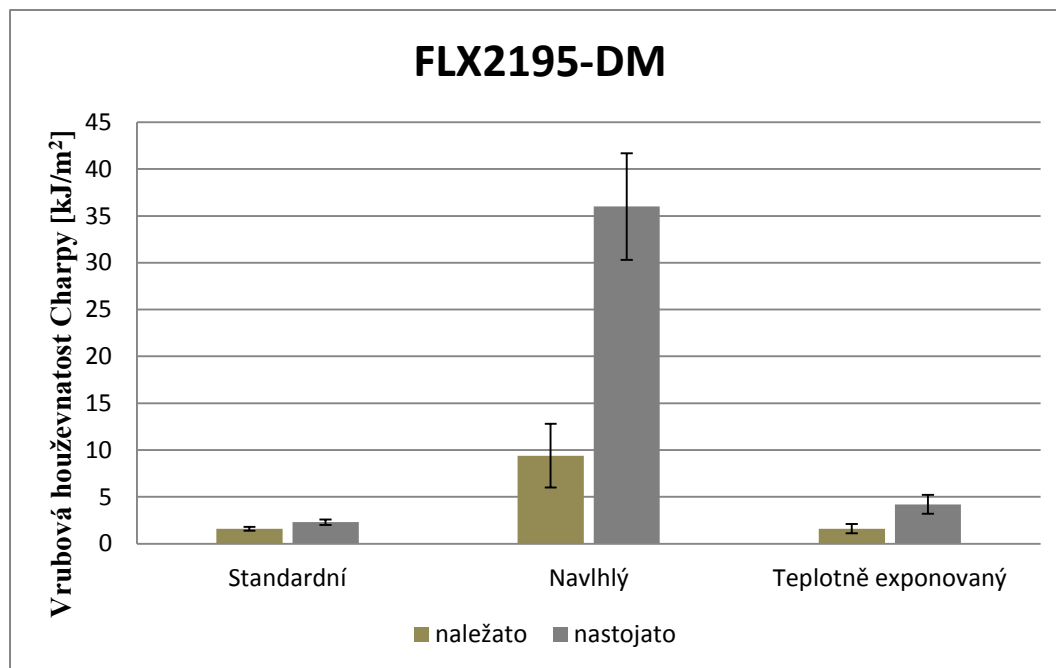
U materiálu FLX21985-DM je také patrný vliv orientace tisku jednotlivých vrstev, kdy díly vytištěné „naležato“ mají ve standardním prostředí vrubovou houževnatost nižší o 44 % po navlhnutí a po teplotní expozici nižší 2,5krát. To lze opět přisuzovat porušení všech vrstev při tvorbě vrubu.



Obr. 30 Porovnání vrubové houževnatosti Charpy pro materiál VeroWhitePlus



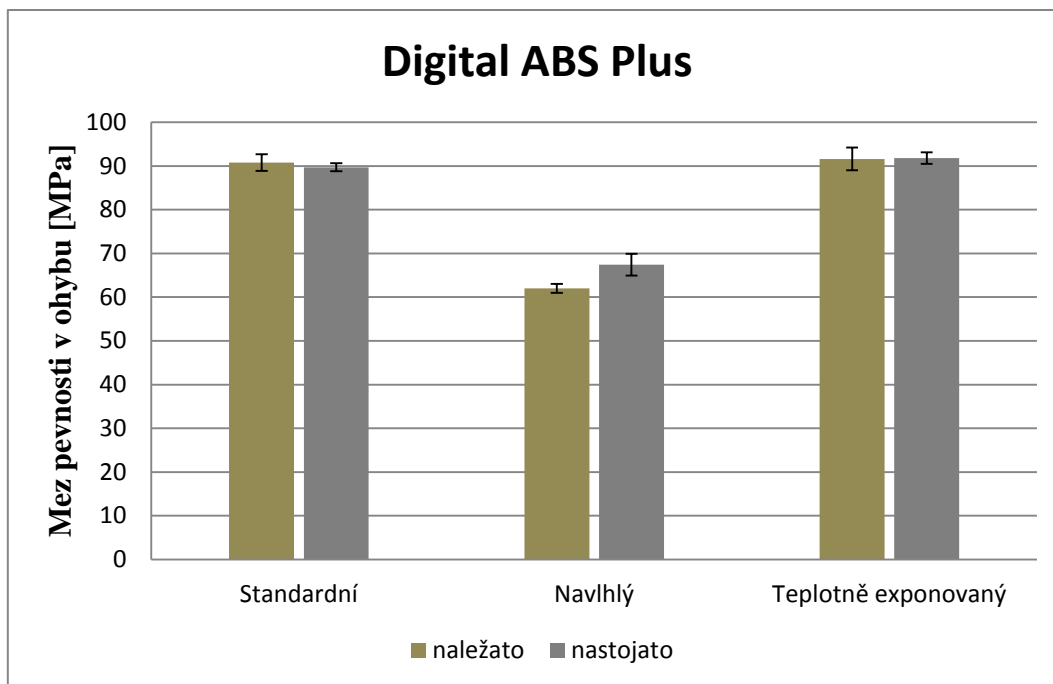
Obr. 31 Porovnání vrubové houževnatosti Charpy pro materiál RGD8560-DM



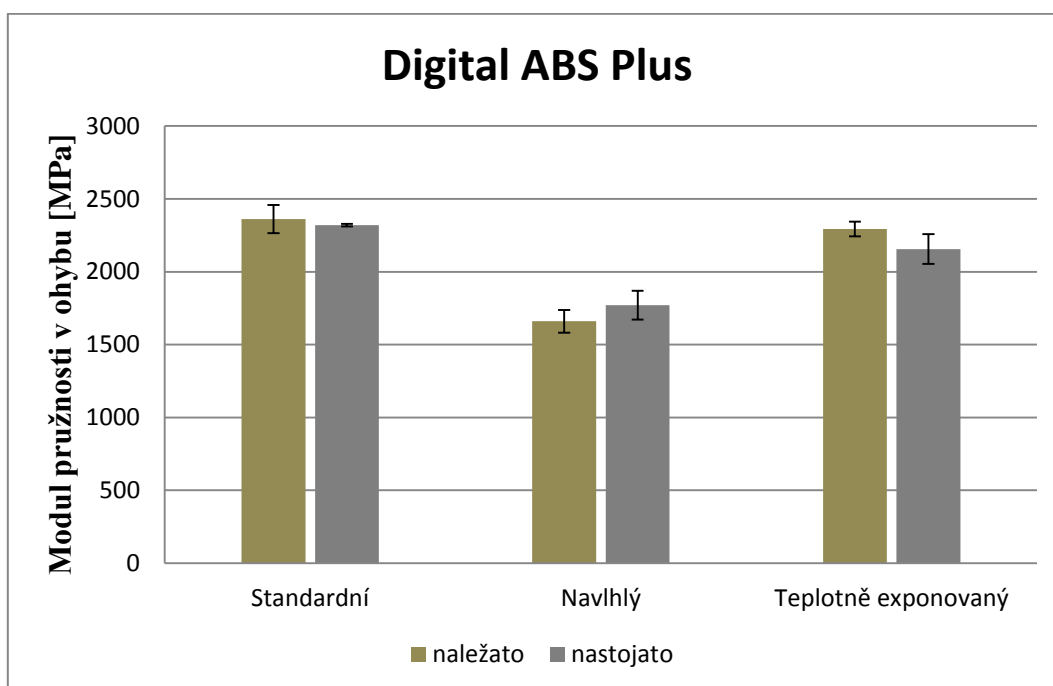
Obr. 32 Porovnání vrubové houževnatosti Charpy pro materiál FLX2195-DM

4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností a odrazové pružnosti

Měření ohybových vlastností zkušebních vzorků bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 178. Z naměřených hodnot (viz tab. 7a až tab. 7d) byly zhotoveny grafické závislosti pevnosti a modulu pružnosti v ohybu na vlivu prostředí a orientaci vrstev (viz obr. 33 až obr. 36, obr. 38 a obr. 39). Pro materiál Digital ABS Plus z obr. 33 vyplývá, že vystavením vzorků zvýšené vlhkosti došlo k poklesu pevnosti v ohybu ca o 32 % (díly „naležato“), resp. o 25 % (díly „nastojato“) a poklesu modulu pružnosti v ohybu ca o 30 % (díly „naležato“), resp. o 24 % (díly „nastojato“). Příčinou je navázání molekul vody na polární prvky makromolekulárního řetězce fotopolymeru způsobující pokles mezimolekulárních sil. Při hodnocení vlivu teplotní expozice je u tohoto materiálu zřejmé, že s ohledem na velikost směrodatné odchylky nedochází ke změnám hodnot pevnosti a modulu pružnosti v ohybu. Při hodnocení vlivu orientace jednotlivých vrstev pro materiál Digital ABS Plus lze s ohledem na rozptyl měřených hodnot (vyjádřený směrodatnou odchylkou) konstatovat, že vliv směru orientace jednotlivých vrstev je zanedbatelný.



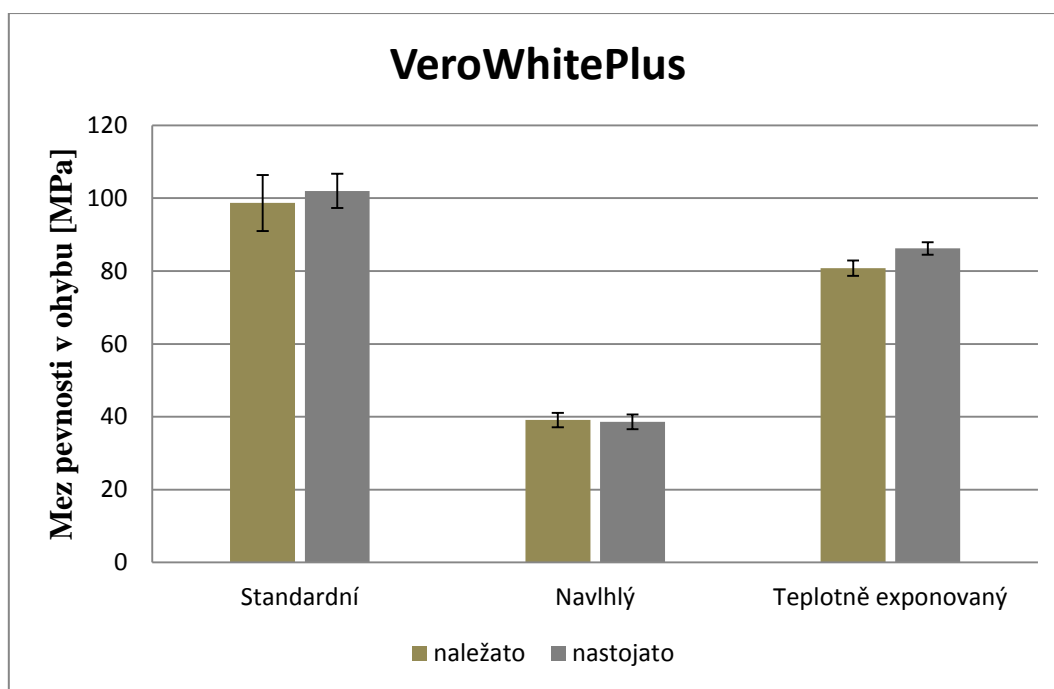
Obr. 33 Porovnání pevnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



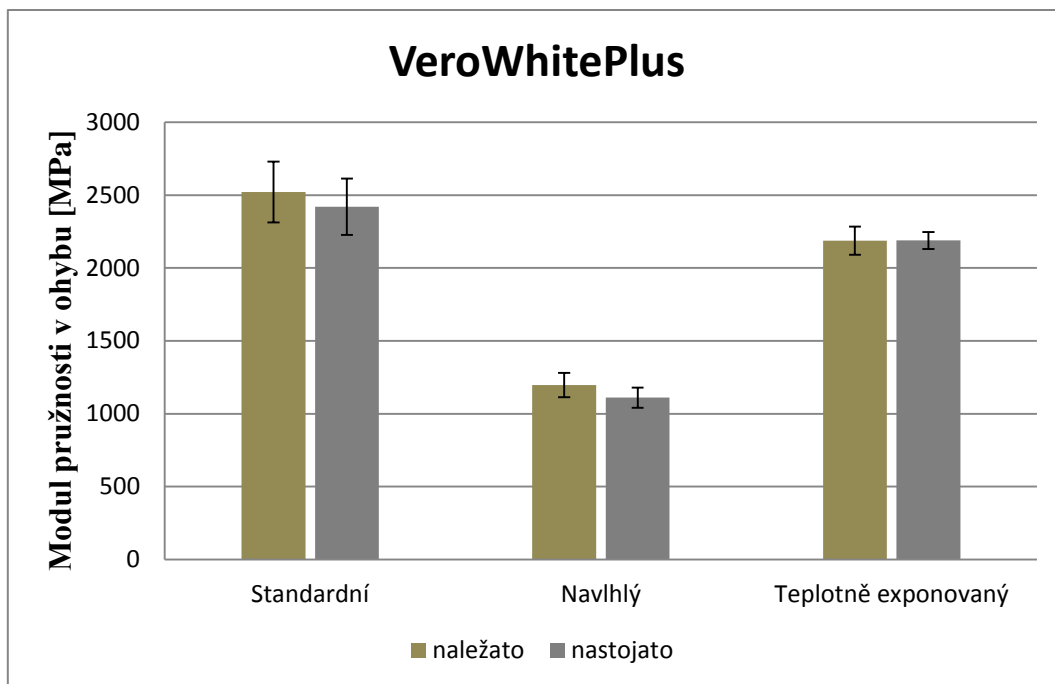
Obr. 34 Porovnání modulu pružnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev

Z naměřených hodnot pevnosti a modulu pružnosti v ohybu je u materiálu VeroWhitePlus vystaveného zvýšené vlhkosti zaznamenán výraznější pokles ohybových

vlastností než u materiálu Digital ABS Plus, v důsledku vyšší vlhkosti materiálu VeroWhitePlus, u něhož byl pomocí halogenového analyzátoru naměřen obsah vlhkosti 1,70 %. Obsah vlhkosti materiálu Digital ABS Plus po expozici prostředí 30/80 byl 1,43 %. Hodnota pevnosti v ohybu se vlivem navlhnutí snížila o 60 % (díly „naležato“) resp. o 62 % (díly „nastojato“) a modul pružnosti v ohybu klesl o 53 % (díly „naležato“), resp. o 54 % (díly „nastojato“). U materiálu VeroWhitePlus se projevil vliv teplotní expozice, kdy ohybová pevnost klesla ca o 18 % (díly „naležato“), resp. o 16 % (díly „nastojato“) a modul pružnosti v ohybu ca o 13 % (díly „naležato“), resp. o 10 % (díly „nastojato“), nicméně pokles modulu pružnosti v ohybu je (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) zanedbatelný. K poklesu pevnosti v ohybu po teplotní expozici došlo vznikem mikrotrhlin ve zkušebním tělese při ohřevu a jeho následném ochlazení (viz obr. 37).



Obr. 35 Porovnání pevnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



Obr. 36 Porovnání modulu pružnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev

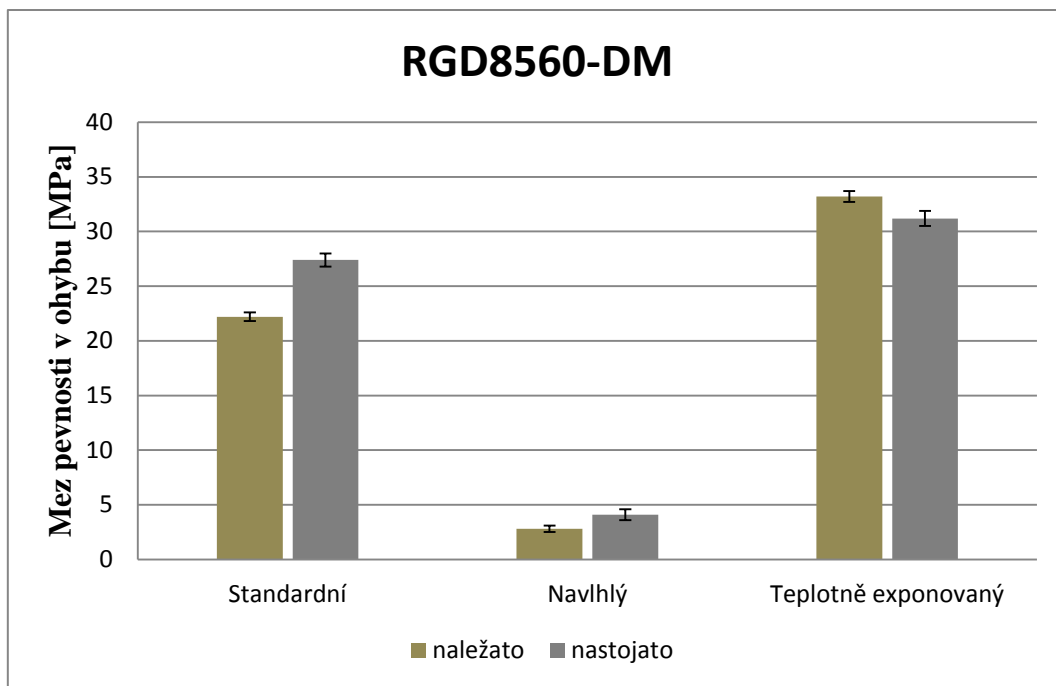


Obr. 37 Mikroskopický snímek materiálu VeroWhitePlus po teplotním zatížení

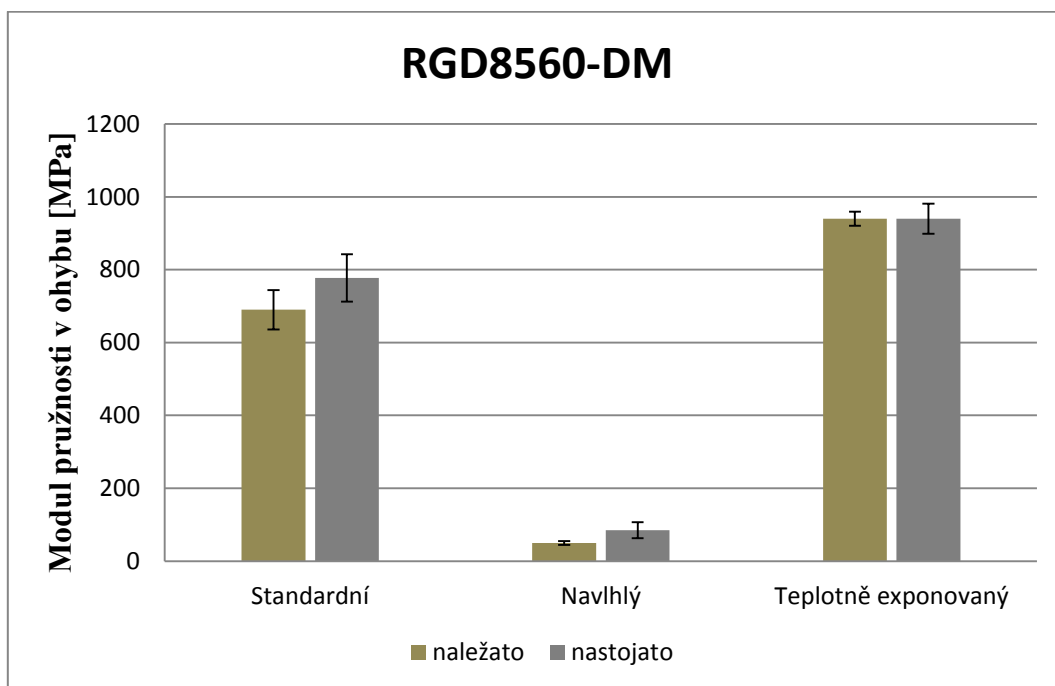
Při hodnocení materiálu RGD8560-DM, který je směsí materiálu VeroWhitePlus s materiálem TangoBlackPlus, je zřejmé, že vlivem fotopolymeru TangoBlackPlus, připomínající svými vlastnostmi pryže, dojde u materiálu RGD8560-DM ve srovnání s materiálem VeroWhitePlus k prudkému poklesu pevnosti v ohybu o 77,5 % (díly

„naležato“) resp. o 73 % (díly „nastojato“) a poklesu modulu pružnosti v ohybu ca o 93 % (díly „naležato“), resp. o 89 % (díly „nastojato“). Přítomnost vysoce navlhavého fotopolymeru TangoBlackPlus v materiálu RGD8560-DM se projevil jak u navlhých, tak u teplotně exponovaných dílů. U vzorků vystavených zvýšené vlhkosti se projevil poklesem ohybové pevnosti ca o 87,5 % (díly „naležato“), resp. o 85,5 % (díly „nastojato“), což je zapříčiněno snížením mezimolekulárních sil vlivem navlhnutí. U zkušebních těles po teplotní expozici došlo naopak k nárůstu pevnosti v ohybu ca o 49,5 % (díly „naležato“), resp. o 14 % (díly „nastojato“) a nárůstu modulu pružnosti v ohybu ca o 36 % (díly „naležato“), resp. o 21 % (díly „nastojato“). Příčinou nárůstu hodnot pevnosti a modulu pružnosti v ohybu u teplotně exponovaných vzorků je změna struktury materiálu, kterou by bylo třeba analyzovat po chemické stránce. Vzhledem k dostupným možnostem přístrojového vybavení fakulty strojní a fyzikálně-chemické laboratoře Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace nebylo možné analyzovat materiály z hlediska molekulární struktury. Z porovnání vlivu orientace jednotlivých vrstev na ohybovou pevnost u materiálu RGD8560-DM je zřejmé, že u standardních těles tištěných „nastojato“ je pevnost vyšší ca o 23 %, u navlhnutých těles je pevnost u dílů tištěných „nastojato“ vyšší o 44,5 % a rozdíl pevnosti v ohybu zkušebních těles vystavených teplotnímu vytvrzení je vzhledem k rozptylu naměřených hodnot (vyjádřený směrodatnou odchylkou) zanedbatelný. Příčina horších ohybových vlastností u standardních vzorků vytisknutých „naležato“ byla nejspíše způsobena při tisku zkušebních těles, kdy současně s polymerací materiálu působením UV záření, došlo k exotermní reakci a vlivem menší plochy pro uvolnění tepla u těles „naležato“ došlo ke strukturální změně, kterou nebylo možné z důvodu přístrojového vybavení analyzovat.

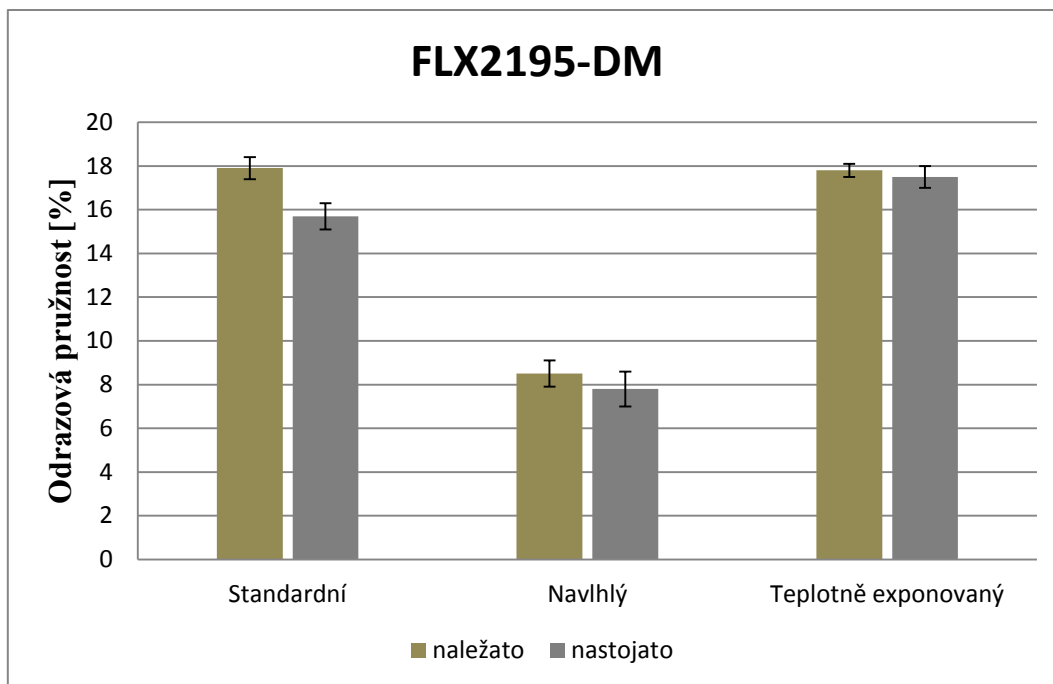
Ohybové vlastnosti materiálu FLX2195-DM nebylo vzhledem k vyššímu zastoupení materiálu TangoBlackPlus (64 %) možné měřit. Místo ohybové zkoušky byla na materiálu provedena zkouška odrazové pružnosti dle ČSN 62 1480. Z obr. 40 je zřejmé, že vlivem zvýšené vlhkosti dojde u obou orientací k poklesu odrazové pružnosti ca o 9,5 % (díly „naležato“) resp. o 8 % (díly „nastojato“). U těles po teplotní expozici narostla hodnota odrazové pružnosti ca o 2 % (díly „nastojato“), což by potvrzovalo trend z průběhu pevnosti a modulu pružnosti v ohybu u materiálu RGD8560-DM, který je také směsí materiálu VeroWhitePlus s materiálem TangoBlackPlus. Důvodem je opět změna struktury, kterou by bylo třeba analyzovat z hlediska molekulární struktury.



Obr. 38 Porovnání pevnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



Obr. 39 Porovnání modulu pružnosti v ohybu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev

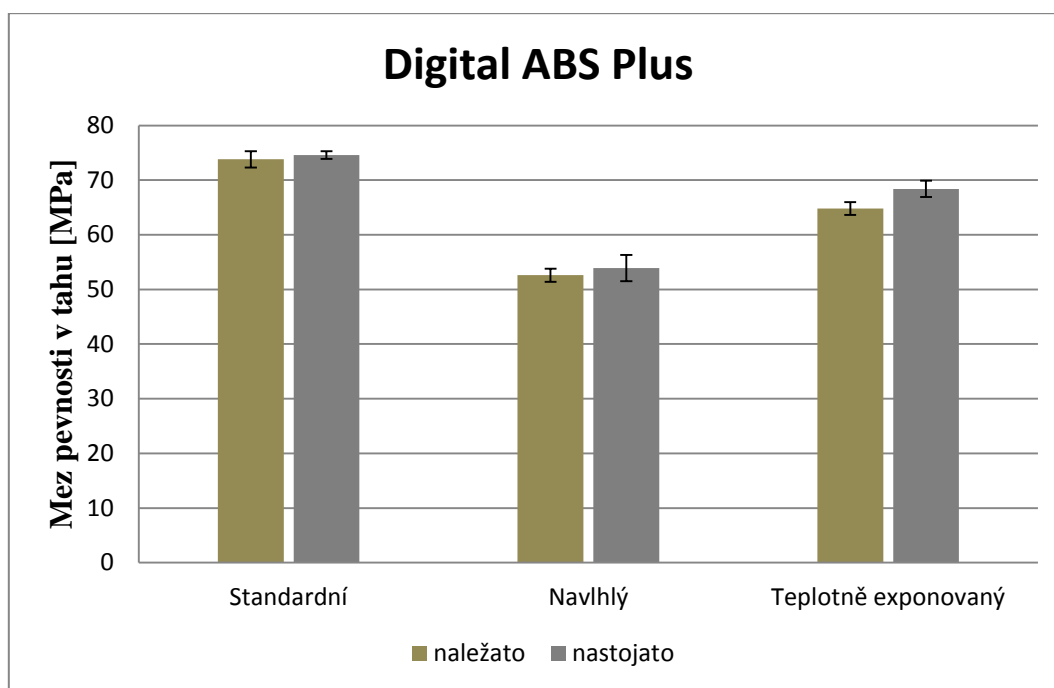


Obr. 40 Porovnání odrazové pružnosti v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev

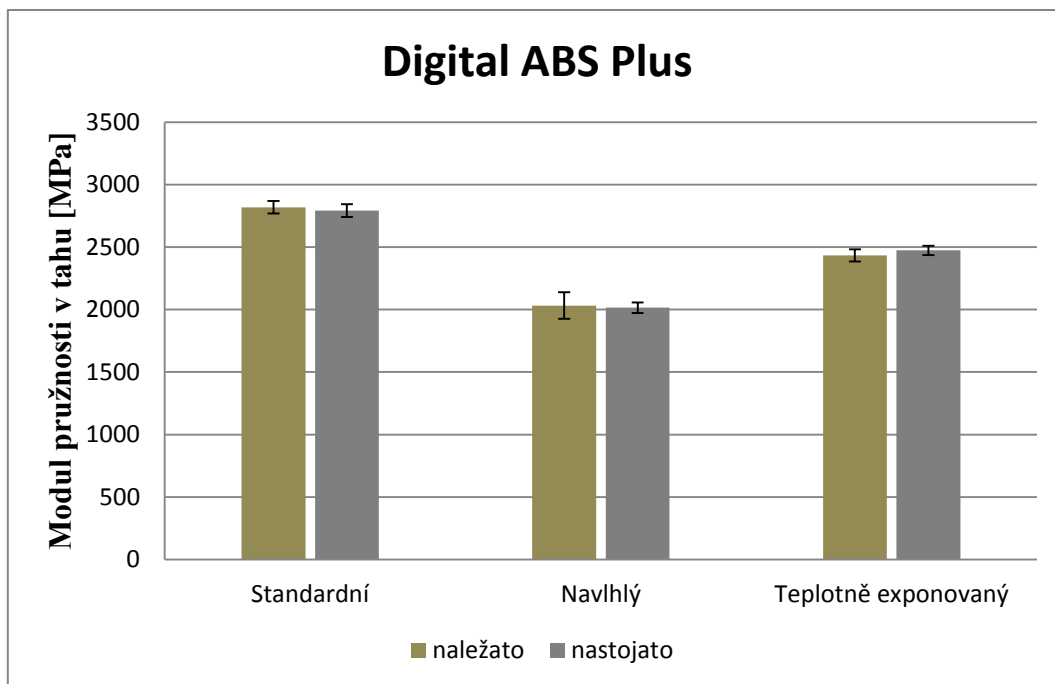
4.3 Vyhodnocení tahových vlastností

Měření tahových vlastností zkušebních vzorků typu 1AB bylo provedeno v souladu s předpisem normy ČSN EN ISO 527-2. Z naměřených hodnot (viz tab. 10a až tab. 10d) byly zhotoveny grafické závislosti pevnosti a modulu pružnosti v tahu na vlivu prostředí a orientaci vrstev (viz obr. 41 až obr. 47), z nichž vyplývá, že u materiálu Digital ABS Plus, stejně jako u všech ostatních, došlo vlivem vystavení dílů zvýšené vlhkosti k poklesu pevnosti a modulu pružnosti v tahu. Největší změna pevnosti v tahu při srovnání se standardními vzorky je u materiálu RGD8560-DM ca o 64 %, resp. FLX2195-DM ca o 62 %, což je u těchto materiálů zapříčiněno obsahem materiálu TangoBlackPlus, který je silně navlhavý. Následuje materiál VeroWhitePlus s poklesem pevnosti v tahu ca o 47 % a materiál Digital ABS Plus, u kterého klesla pevnost v tahu o 28 %. Důvodem poklesu pevnosti v tahu u dílů vystavených zvýšené vlhkosti je snížení mezimolekulárních sil vlivem navázáním molekul vody ve struktuře fotopolymerů. Vlivem zvýšené vlhkosti došlo také k poklesu modulu pružnosti v tahu. Nevýraznější pokles byl zaznamenán opět u materiálu RGD8560-DM ca o 90 %, další v pořadí jsou VeroWhitePlus s poklesem ca o 59 % a Digital ABS Plus o 28 %. Modul pružnosti v tahu u materiálu FLX2195-DM nebylo možné stanovit vzhledem k jeho vlastnostem připomínající pryže. Z hodnocení vlivu teplotní expozice materiálu

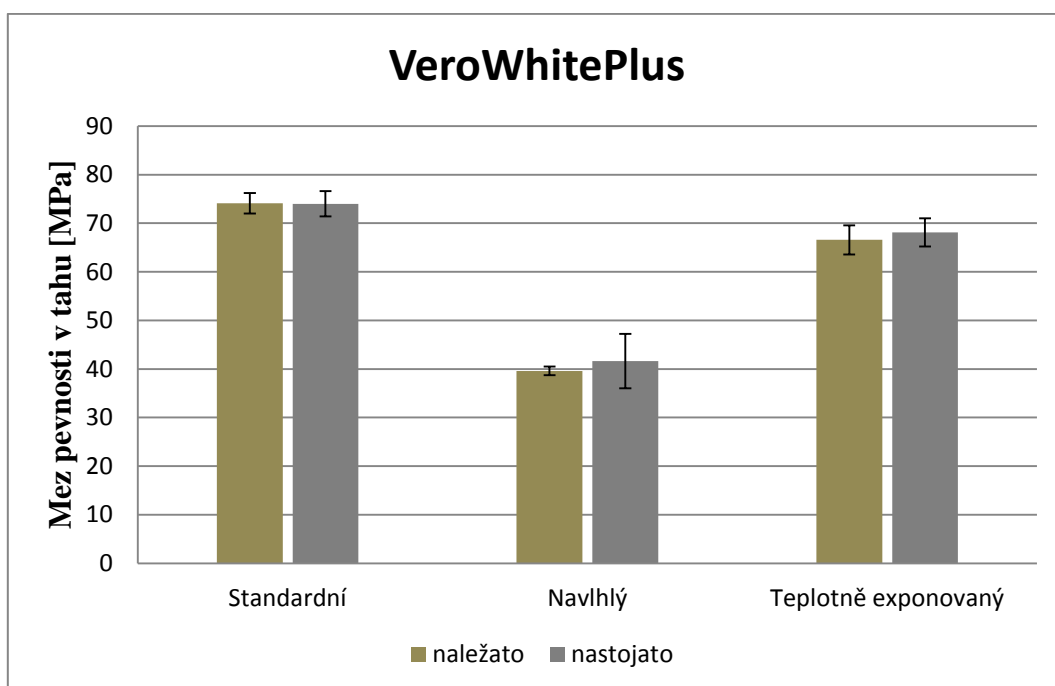
Digital ABS Plus, u kterého byl očekáván (s ohledem na výrobcem doporučený teplotní cyklus pro zvýšení HDT) nárůst pevnosti a modulu pružnosti v tahu, vyplývá, že u dílů po teplotní expozici došlo ke strukturní změně, která měla za následek pokles pevnosti v tahu o 12 % a snížení modulu pružnosti v tahu o 14 %. Vliv vystavení dílu teplotnímu cyklu se negativně projevil i u materiálu VeroWhitePlus, kdy došlo k poklesu pevnosti v tahu o 10 % a ke snížení modulu pružnosti v tahu o 13 %, tato skutečnost je přisuzována vzniku mikrotrhlin ve zkušebním tělese při ohřevu a jeho následném ochlazení. U materiálu RGD8560-DM došlo vlivem teplotnímu zatížení k poklesu modulu pružnosti v tahu ca o 15 %, s ohledem na velikost směrodatných odchylek je tento rozdíl statisticky nevýznamný. Vliv orientace tisku se zdánlivě projevil u materiálu RGD8560-DM, kde byla hodnota modulu pružnosti v tahu u standardních dílů tištěných „nastojato“ o 28 % a u navlhých dílů o 87 % vyšší než u dílů vytisknutých „naležato“. Ve skutečnosti je však příčinou průběh rychlosti deformace, která u houževnatých materiálů není v oblasti Hookova zákona konstantní, při navlhnutí materiálu je tento efekt ještě větší (viz obr. 48).



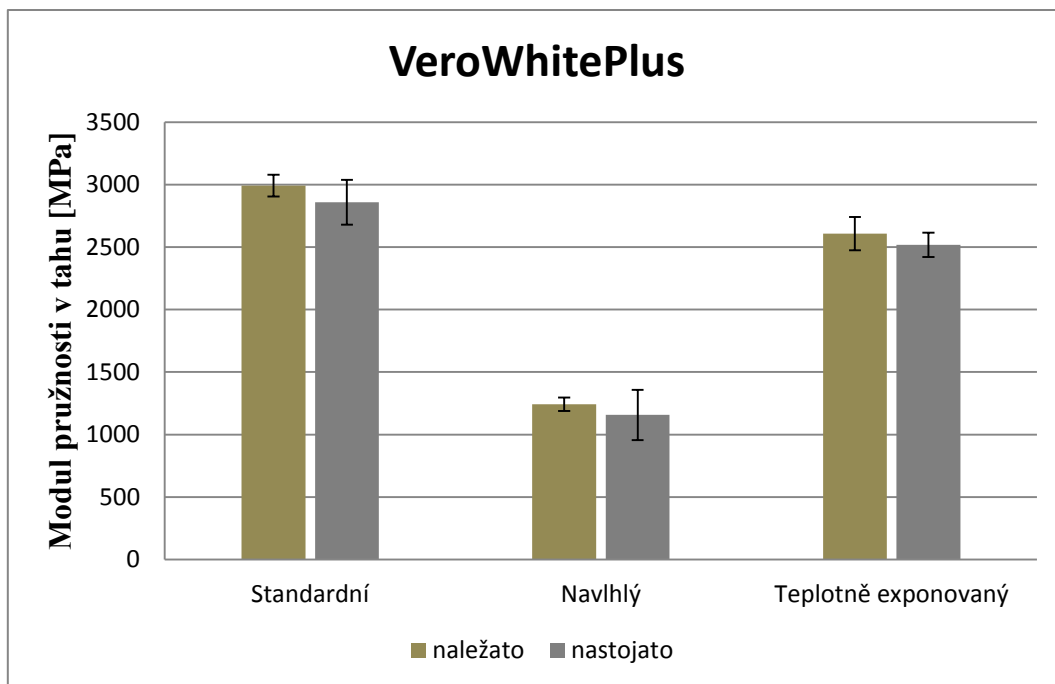
Obr. 41 Porovnání pevnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



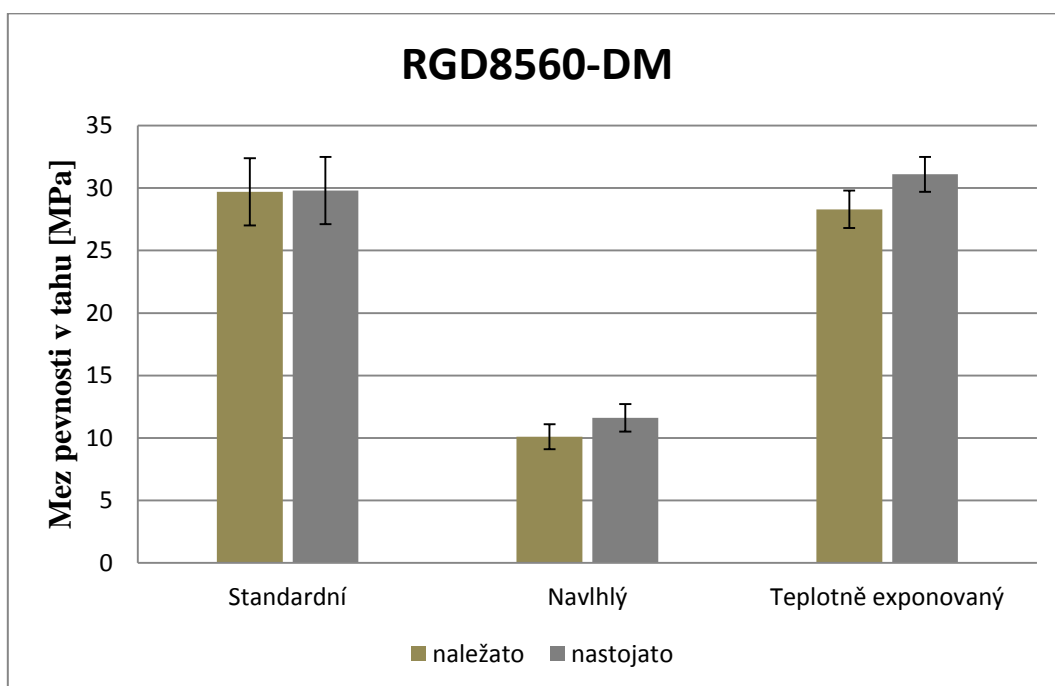
Obr. 42 Porovnání modulu pružnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



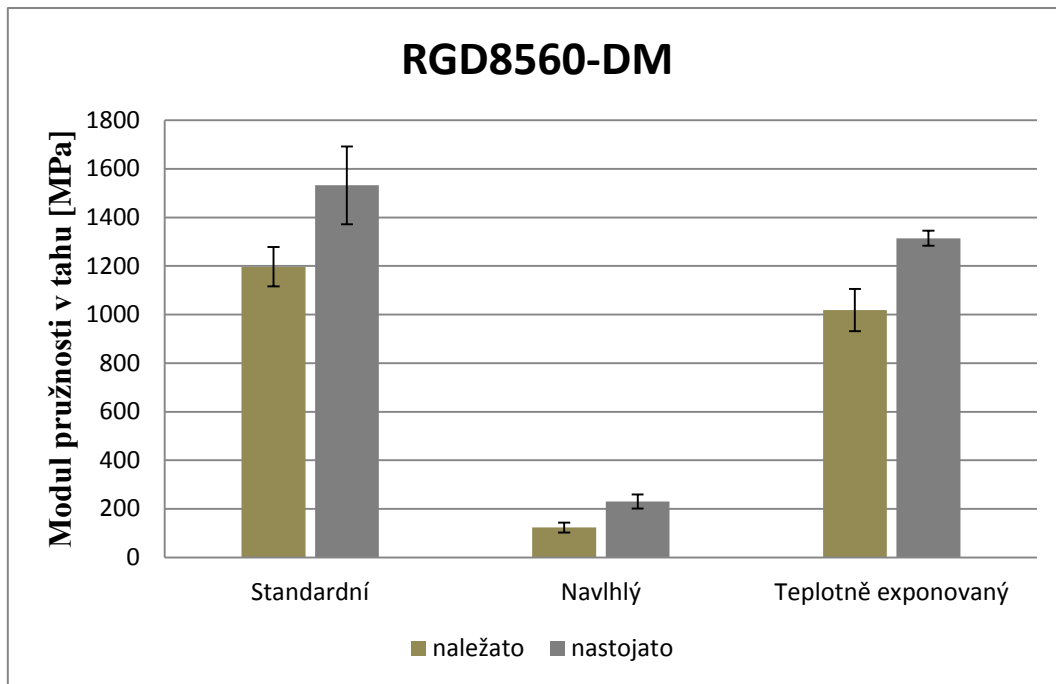
Obr. 43 Porovnání pevnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



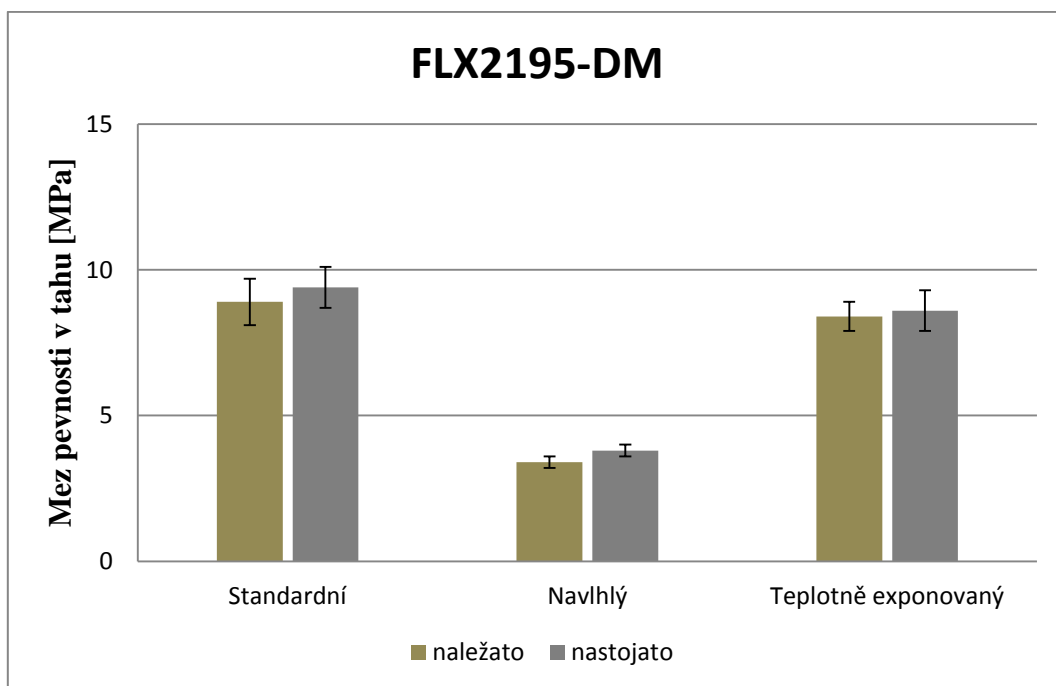
Obr. 44 Porovnání modulu pružnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



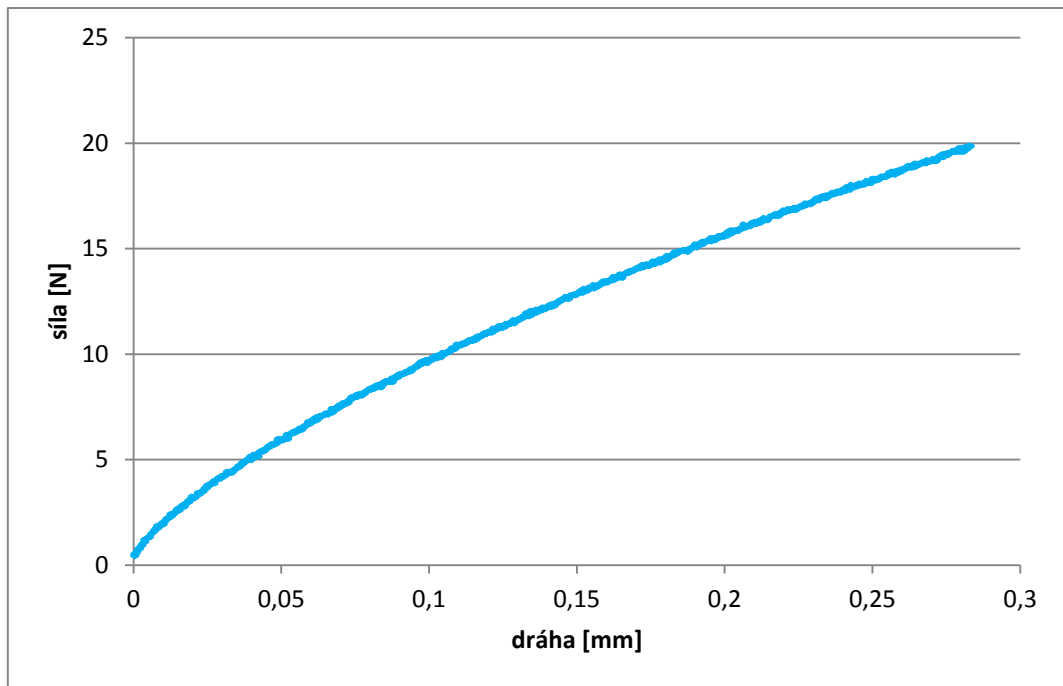
Obr. 45 Porovnání pevnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



Obr. 46 Porovnání modulu pružnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



Obr. 47 Porovnání pevnosti v tahu v závislosti na vlivu prostředí a orientaci vrstev



Obr. 48 Pracovní křivka tahové zkoušky materiálu RGD8560-DM

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo studium vybraných mechanických vlastností dílů z fotopolymerů Digital ABS Plus, VeroWhitePlus, RGD8560-DM a FLX2195-DM zhotovených 3D tiskem metodou PolyJet a exponovaných standardnímu prostředí (23/50), zvýšené vlhkosti (prostředí 30/80) a zvýšeným teplotám (až 100 °C) v závislosti na orientaci směru jednotlivých vrstev.

Z experimentálního výzkumu lze konstatovat, že u materiálu Digital ABS Plus nedošlo k potvrzení, že by dodatečné vystavení dílů zvýšeným teplotám (na základě doporučení výrobce) mělo příznivý vliv na pevnostní charakteristiky, naopak došlo ke snížení pevnosti v tahu o 12 % a k poklesu modulu pružnosti v tahu o 14 %. Negativní vliv teplotního zatížení se také projevil na pevnosti v ohybu a tahu u materiálu VeroWhitePlus, což bylo zapříčiněno vznikem mikrotrhlin ve zkušebním tělese. Pevnost v tahu klesla ca o 10 % a ohybová pevnost klesla ca o 17 %. Pozitivně se vliv teplotní expozice projevil nárůstem ohybové pevnosti a modulu pružnosti v ohybu u fotopolymeru RGD8560-DM, což bylo způsobeno pravděpodobně strukturálními změnami v materiálu, které bohužel nebylo možné s ohledem na přístrojové vybavení fyzikálně-chemických laboratoří TUL analyzovat. V rámci pokračující etapy materiálového výzkumu projektu VI20172020052, v jehož rámci diplomová práce vznikla, by bylo vhodné se zaměřit na studium těchto strukturálních změn ve spolupráci s odborníky z oblasti chemického inženýrství, např. VŠCHT v Praze, Univerzity Pardubice apod.

U všech studovaných fotopolymerů se jednoznačně projevila jejich náchylnost k navlhání. Největší vliv navlhavosti byl zaznamenán u materiálů RGD8560-DM a FLX2195-DM, jež obsahují houževnatý fotopolymer TangoBlackPlus. U těchto fotopolymerů došlo po expozici v prostředí se zvýšenou vlhkostí k poklesu pevnosti v tahu ca o 64 % (RGD8560-DM), resp. ca o 62 % (FLX2195-DM). Ohybová pevnost se u fotopolymeru RGD8560-DM snížila ca o 86 % a modul pružnosti v ohybu ca o 90 %. K poklesu pevnosti a modulu pružnosti v tahu i ohybu dochází vlivem navázání molekul vody na makromolekulární řetězce fotopolymeru, které způsobí pokles mezimolekulárních sil.

Vliv orientace směru tisku jednotlivých vrstev se projevil pouze u fotopolymerů RGD8560-DM a FLX2195-DM, které jsou směsí materiálu VeroWhitePlus s materiálem TangoBlackPlus. Vzhledem k tomu, že u čistého fotopolymeru VeroWhitePlus nebyl

zaznamenán rozdíl naměřených hodnot v závislosti na směru orientace jednotlivých vrstev, je tato skutečnost přisuzována přítomnosti materiálu TangoBlackPlus. Z tohoto důvodu by bylo vhodné doplnit materiálovou studii fotopolymerů RGD8560-DM a FLX2195-DM o charakterizaci samotného materiálu TangoBlackPlus, který by vnesl komplexnější pohled na jeho vliv ve výše uvedených dílech zhotovených 3D tiskem (v době řešení diplomové práce nebyl tento fotopolymer bohužel dostupný).

Použitá literatura

- [1] HAVRILA, Michal. *Progresívne technologie*. Prešov, 2002. ISBN 80-7099-891-1.
- [2] *Aditivní technologie - metody Rapid Prototyping* [online]. 35 [cit. 2018-05-13].
Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [3] 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 9781493921126.
- [4] *Přesnost CNC stroje? Dnes dokáže pracovat i na nanometry* [online]. 14. února 2015 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/presnost-cnc-stroje-dnes-dokaze-pracovat-i-na-nanometry/>
- [5] *INFOGRAFIKA: Kdy se 3D tisk rozšíří mezi domácí uživatele?* [online]. 18. října 2012 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2012/10/18/infografika-kdy-se-stane-3d-tisk-dostupnym-stejne-jako-osobni-pocitace/>
- [6] CHLEBO, Martin. *Historie 3D tisku* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
- [7] LINDSTROM, Ashley. *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry* [online]. 6. prosinec 2012 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [8] CHUA, C.K, *Rapid Prototyping: Principles and applications*, 2nd ed. Hackensack: WorldScientific, 2005, 420 s. ISBN 981-238-120-1
- [9] *MM Průmyslové spektrum: Nekonvenční metody obrábění* [online]. 2008 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [10] *3D tisk metody* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>

- [11] *MM Průmyslové spektrum: Nekonvenční metody obrábění* [online]. 2008 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [12] ŘEŘUCHOVÁ, Ivana. *Porovnání vlastností dílů vyrobených obráběním a pomocí technologie RP*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [13] *Stereolithography* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [14] *Jak stereolitografie funguje?* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/stereolitografie>
- [15] *Stereolithography (SLA)* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.fit-prototyping.de/stereolithografie.php?language=2&title=Stereolithography>
- [16] *3D PRINTING* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.padtinc.com/services/rapid-prototyping/index.html>
- [17] *Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/4617611/>
- [18] *An Introduction to Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.ielm.ust.hk/dfaculty/ajay/courses/ieem513/RP/RPlec.html>
- [19] *PolyJet technologie* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-polyjet>
- [20] *What is PolyJet Technology?* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/polyjet-technology>
- [21] TASKA, Abraham. *NÁVRH ROZŠÍŘENÍ 3D FRÉZKY NA 3D TISKÁRNU*. 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. FRANTIŠEK BRADÁČ Ph.D.

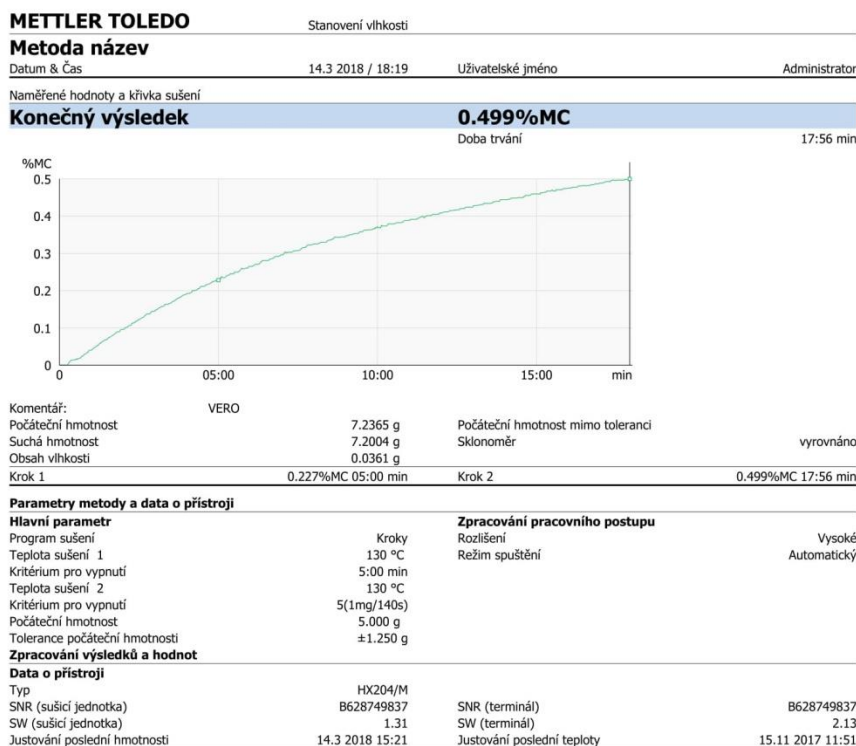
- [22] *PolyJet Digital Materials* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/polyjet-materialy/polyjet-digital-materials>
- [23] [Http://www.stratasys.com](http://www.stratasys.com) [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com>
- [24] *PolyJet technology* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://drukarki3d.pl/wp-content/uploads/2015/12/3.jpg>
- [25] *3D printing* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/wp-content/uploads/2013/06/design-series-example85.jpg>
- [26] *SLS technology* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://i2.wp.com/www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/sls.png>
- [27] *Selective Laser Sintering (SLS)* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/selective-laser-sintering-sls-technology-overview/>
- [28] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [29] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>
- [30] *Fused Deposition Modeling* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
- [31] ŽMOLÍK, Ondřej. *Recyklace termoplastů pro potřeby FDM 3D tisku*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.
- [32] *What is FDM Technology?* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/fdm-technology>
- [33] *3D printing* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.makexyz.com/printer/tamer200>
- [34] *Laminated Object Manufacturing* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/lom.png>

- [35] *Laminated Object Manufacturing product* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://sc01.alicdn.com/kf/HTB1jXzvOVXXXXXTXXXXq6xXFXXXXx/custom-laminated-object-manufacturing-plastic-injection-mold.jpg>
- [36] *Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://jj204teknologiworkshop2.blogspot.cz/p/rapid-prototyping.html>
- [37] *Digital materials for PolyJet* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.alphacam.at/fileadmin/user_upload/products/polyjet-materialien/Datenblaetter/Materialdatenblatt-Digitale-Materialien-2016-03-02.pdf
- [38] *Digital ABS Plus* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/digital-abs-plus>
- [39] *Digital ABS* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Best%20Practices_BP/BP_PJ_DigitalABS.pdf?v=635817315234043539
- [40] ČSN EN ISO 179-1 (640612). *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. 2010
- [41] ČSN EN ISO 178 (640607). *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. 2011
- [42] ČSN EN ISO 527-1,2 (640604). *Plasty – Stanovení tahových vlastností*. 2012
- [43] ČSN 62 1480. *Pryže – Stanovení odrazové pružnosti*

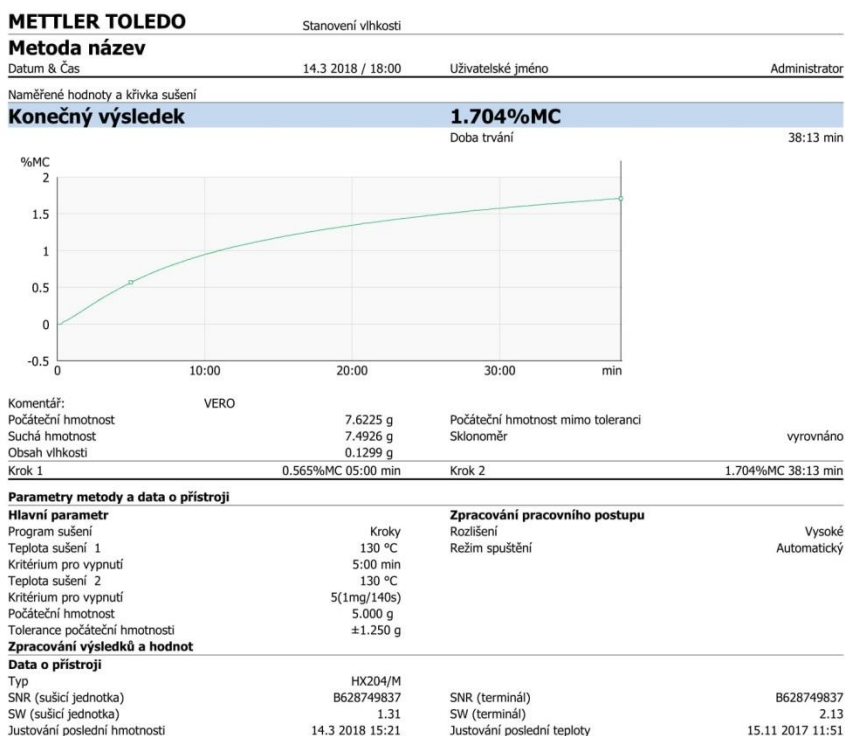
Seznam příloh

Příloha č. 1: Záznamové protokoly z měření vlhkosti vzorků před a po vystavení prostředí se zvýšenou vlhkostí

Příloha č. 1: Záznamové protokoly z měření vlhkosti vzorků před a po vystavení prostředí se zvýšenou vlhkostí



Obr. P1 Záznam z měření materiálu VeroWhitePlus před expozicí



Obr. P2 Záznam z měření materiálu VeroWhitePlus po expozici

METTLER TOLEDO

Stanovení vlhkosti

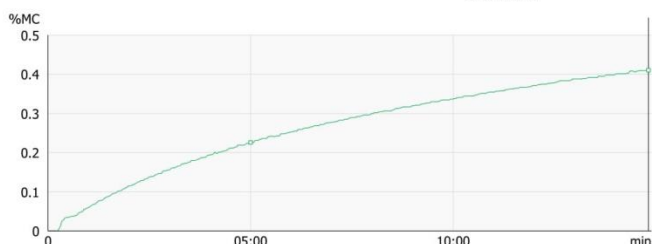
Metoda název

Datum & Čas 14.3 2018 / 18:37 Uživatelské jméno Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek**0.409%MC**

Doba trvání 14:49 min



Komentář:

ABS LIKE

Počáteční hmotnost	7.0645 g	Počáteční hmotnost mimo toleranci	
Suchá hmotnost	7.0356 g	Skonoměr	vyrovnáno
Obsah vlhkosti	0.0289 g		
Krok 1	0.225%MC 05:00 min	Krok 2	0.409%MC 14:49 min

Parametry metody a data o přístroji

Hlavní parametr		Zpracování pracovního postupu	
Program sušení	Kroky	Rozlišení	Vysoké
Teplota sušení 1	130 °C	Režim spuštění	Automatický
Kritérium pro vypnutí	5:00 min		
Teplota sušení 2	130 °C		
Kritérium pro vypnutí	5(1mg/140s)		
Počáteční hmotnost	5.000 g		
Tolerance počáteční hmotnosti	±1.250 g		
Zpracování výsledků a hodnot			
Data o přístroji			
Typ	HX204/M		
SNR (sušící jednotka)	B628749837	SNR (terminál)	B628749837
SW (sušící jednotka)	1.31	SW (terminál)	2.13
Justování poslední hmotnosti	14.3 2018 15:21	Justování poslední teploty	15.11 2017 11:51

*Obr. P3 Záznam z měření materiálu Digital ABS Plus před expozicí***METTLER TOLEDO**

Stanovení vlhkosti

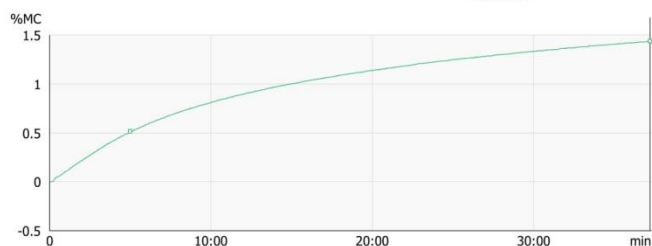
Metoda název

Datum & Čas 14.3 2018 / 17:20 Uživatelské jméno Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek**1.433%MC**

Doba trvání 37:13 min



Komentář:

ABS LIKE

Počáteční hmotnost	7.3347 g	Počáteční hmotnost mimo toleranci	
Suchá hmotnost	7.2296 g	Skonoměr	vyrovnáno
Obsah vlhkosti	0.1051 g		
Krok 1	0.510%MC 05:00 min	Krok 2	1.433%MC 37:13 min

Parametry metody a data o přístroji

Hlavní parametr		Zpracování pracovního postupu	
Program sušení	Kroky	Rozlišení	Vysoké
Teplota sušení 1	130 °C	Režim spuštění	Automatický
Kritérium pro vypnutí	5:00 min		
Teplota sušení 2	130 °C		
Kritérium pro vypnutí	5(1mg/140s)		
Počáteční hmotnost	5.000 g		
Tolerance počáteční hmotnosti	±1.250 g		
Zpracování výsledků a hodnot			
Data o přístroji			
Typ	HX204/M		
SNR (sušící jednotka)	B628749837	SNR (terminál)	B628749837
SW (sušící jednotka)	1.31	SW (terminál)	2.13
Justování poslední hmotnosti	14.3 2018 15:21	Justování poslední teploty	15.11 2017 11:51

Obr. P4 Záznam z měření materiálu Digital ABS Plus po expozici

METTLER TOLEDO

Stanovení vlhkosti

Metoda název

Datum & Čas

14.3 2018 / 19:14

Uživatelské jméno

Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek**0.911%MC**

Doba trvání

31:47 min



Komentář:

RGD

Počáteční hmotnost

7.4195 g

Počáteční hmotnost mimo toleranci

vyrovnáno

Suchá hmotnost

7.3519 g

Sklonoměr

Obsah vlhkosti

0.0676 g

Krok 1

0.295%MC 05:00 min

Krok 2

0.911%MC 31:47 min

Parametry metody a data o přístroji**Hlavní parametr**

Program sušení Krok 1
 Teplota sušení 1 130 °C
 Kritérium pro vypnutí 5:00 min
 Teplota sušení 2 130 °C
 Kritérium pro vypnutí 5(1mg/140s)
 Počáteční hmotnost 5.000 g
 Tolerance počáteční hmotnosti ±1.250 g

Zpracování pracovního postupu

Rozlišení Vysoké
 Režim spuštění Automatický

Zpracování výsledků a hodnot**Data o přístroji**

Typ HX204/M
 SNR (sušící jednotka) B628749837 SNR (terminál) B628749837
 SW (sušící jednotka) 1.31 SW (terminál) 2.13
 Justování poslední hmotnosti 14.3 2018 15:21 Justování poslední teploty 15.11 2017 11:51

*Obr. P5 Záznam z měření materiálu RGD8560-DM před expozicí***METTLER TOLEDO**

Stanovení vlhkosti

Metoda název

Datum & Čas

14.3 2018 / 15:18

Uživatelské jméno

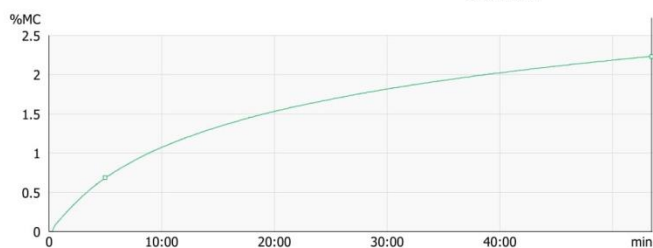
Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek**2.228%MC**

Doba trvání

53:29 min



Komentář:

RGD

Počáteční hmotnost

7.5400 g

Počáteční hmotnost mimo toleranci

vyrovnáno

Suchá hmotnost

7.3720 g

Sklonoměr

Obsah vlhkosti

0.168 g

Krok 1

0.684%MC 05:00 min

Krok 2

2.228%MC 53:29 min

Parametry metody a data o přístroji**Hlavní parametr**

Program sušení Krok 1
 Teplota sušení 1 130 °C
 Kritérium pro vypnutí 5:00 min
 Teplota sušení 2 130 °C
 Kritérium pro vypnutí 5(1mg/140s)
 Počáteční hmotnost 5.000 g
 Tolerance počáteční hmotnosti ±1.250 g

Zpracování pracovního postupu

Rozlišení Vysoké
 Režim spuštění Automatický

Zpracování výsledků a hodnot**Data o přístroji**

Typ HX204/M
 SNR (sušící jednotka) B628749837 SNR (terminál) B628749837
 SW (sušící jednotka) 1.31 SW (terminál) 2.13
 Justování poslední hmotnosti 14.3 2018 09:01 Justování poslední teploty 15.11 2017 11:51

Obr. P6 Záznam z měření materiálu RGD8560-DM po expozici

METTLER TOLEDO

Stanovení vlhkosti

Metoda název

Datum & Čas

14.3.2018 / 20:15

Uživatelské jméno

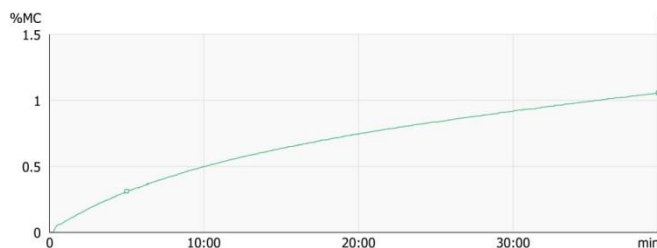
Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek
1.053%MC

Doba trvání

39:24 min



Komentář:

FLX

Počáteční hmotnost

7.2361 g

Počáteční hmotnost mimo toleranci

Suchá hmotnost

7.1599 g

Sklonoměr

vyrovnáno

Obsah vlhkosti

0.0762 g

Krok 1

0.310%MC 05:00 min

Krok 2

1.053%MC 39:24 min

Parametry metody a data o přístroji
Hlavní parametr

Program sušení

Kroky

Teplota sušení 1

130 °C

Kritérium pro vypnutí

5:00 min

Teplota sušení 2

130 °C

Kritérium pro vypnutí

5(1mg/140s)

Počáteční hmotnost

5.000 g

Tolerance počáteční hmotnosti

±1.250 g

Zpracování pracovního postupu

Rozlišení

Vysoké

Režim spuštění

Automatický

Zpracování výsledků a hodnot
Data o přístroji

Typ

HX204/M

SNR (sušící jednotka)

B628749837

SNR (terminál)

B628749837

SW (sušící jednotka)

1.31

SW (terminál)

2.13

Justování poslední hmotnosti

14.3.2018 19:21

Justování poslední teploty

15.11.2017 11:51

Obr. P7 Záznam z měření materiálu FLX2195-DM před expozicí
METTLER TOLEDO

Stanovení vlhkosti

Metoda název

Datum & Čas

14.3.2018 / 16:41

Uživatelské jméno

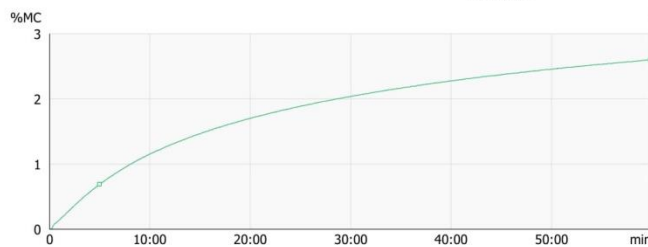
Administrator

Naměřené hodnoty a křivka sušení

Konečný výsledek
2.597%MC

Doba trvání

59:51 min



Komentář:

FLX

Počáteční hmotnost

7.3522 g

Počáteční hmotnost mimo toleranci

Suchá hmotnost

7.1613 g

Sklonoměr

vyrovnáno

Obsah vlhkosti

0.1909 g

Krok 1

0.688%MC 05:00 min

Krok 2

2.597%MC 59:51 min

Parametry metody a data o přístroji
Hlavní parametr

Program sušení

Kroky

Teplota sušení 1

130 °C

Kritérium pro vypnutí

5:00 min

Teplota sušení 2

130 °C

Kritérium pro vypnutí

5(1mg/140s)

Počáteční hmotnost

5.000 g

Tolerance počáteční hmotnosti

±1.250 g

Zpracování pracovního postupu

Rozlišení

Vysoké

Režim spuštění

Automatický

Zpracování výsledků a hodnot
Data o přístroji

Typ

HX204/M

SNR (sušící jednotka)

B628749837

SNR (terminál)

B628749837

SW (sušící jednotka)

1.31

SW (terminál)

2.13

Justování poslední hmotnosti

14.3.2018 15:21

Justování poslední teploty

15.11.2017 11:51

Obr. P8 Záznam z měření materiálu FLX2195-DM po expozici