

Vlastnosti 3D tištěných dílů připravených pomocí stereolitografie

Petr Bařinka

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Petr Bařinka
Osobní číslo:	T22524
Studijní program:	B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace:	Materiálové inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vlastnosti 3D tištěných dílů připravených pomocí stereolitografie

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
- Seznamte se s obsluhou stereolitografické 3D tiskárny.
- Připravte modely testovacích těles ve formátu STL a následně vytvořte soubory G-kódu pro tisk.
- Vytiskněte testovací tělesa z vybraného materiálu a zaměřte se především na parametry tisku a tvorbu podpěr.
- Otestujte a hodnotte mechanické a povrchové vlastnosti výtisků.
- Získané výsledky přehledně zpracujte a diskutujte.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. BRENT STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2015. ISBN 9781493921126.
2. NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering [online]. 2018, 143, 172-196.
3. THAKAR, Chetan M., Shailesh S. PARKHE, Ankit JAIN, Khongdet PHASINAM, G. MURUGESAN a Randy Joy Magno VENTAYEN. 3d Printing: Basic principles and applications. Materials Today: Proceedings. 2022, 51, 842-849. ISSN 22147853.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Markéta Kadlečková, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petr Smolka, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 20. ledna 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Hlavním tématem této práce je analýza vybraných mechanických vlastností dílů vyrobených metodou SLA 3D tisku s využitím fotopolymerního materiálu. Práce je zaměřena na vliv orientace tisku, struktury materiálu, postprocesních úprav jako je vytvrzení a jejich dopad na vybrané mechanické vlastnosti a smrštění výtisků. Pro orientační srovnání byla vyrobena zkušební tělesa pomocí FDM technologie z ABS filamentu, kde byla také sledována závislost mechanického chování na orientaci tisku. Mechanické zkoušky proběhly na univerzálním testovacím stroji Instron 3345. Výsledky ukázaly, že u SLA výtisků orientace tisku oproti FDM výtiskům nemá vliv na jejich vybrané mechanické vlastnosti. Naopak klíčovým faktorem u SLA je postprocesní vytvrzení, které výrazně ovlivňuje strukturu a mechanické chování materiálu. Tyto poznatky mohou přispět k optimalizaci výrobních parametrů a efektivnímu využití technologie 3D tisku v průmyslové praxi.

Klíčová slova: 3D tisk, Stereolitografie, izotropie, FDM, anizotropie

ABSTRACT

The main focus of this thesis is the analysis of the mechanical properties of parts produced by SLA 3D printing using Clear Resin material on the Formlabs Form 3 printer. The study concentrates on the influence of print orientation, material structure, and post-processing treatments including curing, and their effects on strength, accuracy, and shrinkage of the prints. For comparative purposes, samples produced by FDM technology using ABS filament were also tested, where the dependence of mechanical behavior on print orientation and uneven plastic deformation accompanied by the stress-whitening phenomenon was observed. Mechanical tests were conducted on a universal testing machine Instron 3345. The results show that print orientation has no impact on the selected mechanical properties of SLA prints compared to FDM prints. Conversely, curing plays a key role in SLA, significantly affecting the structure and mechanical behavior of the material. These findings are important for optimizing manufacturing parameters and effectively applying 3D printing in industry.

Keywords: 3D Printing, Stereolithography, Isotropy, FDM, Anisotropy

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Markétě Kadlečkové, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které jsem uplatnil při plnění pracovních povinností.

Dále bych rád bych poděkoval všem, kteří mě během tvorby této bakalářské práce pomáhali a podporovali. Děkuji své rodině, přátelům i spolužákům za jejich pomoc a povzbuzení. Zejména však mé přítelkyni za její maximální podporu, trpělivost a motivaci.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 ADITIVNÍ VÝROBA.....	15
1.1 STL FORMÁT V TISKU	15
2 VYBRANÉ TECHNOLOGIE 3D TISKU	17
2.1 MJS.....	17
2.2 DMLS A SLM.....	19
2.3 SLS	21
2.4 FDM	22
2.5 MJM A POLYJET	24
2.6 STEREOLITOGRAFIE	25
2.6.1 DLP	26
2.6.2 LCD.....	27
2.6.3 SLA	28
2.6.4 Materiály pro stereolitografický 3D tisk a jejich rozdělení	28
2.6.5 Chemické složení a fyzikální vlastnosti resinových materiálů pro SLA	30
2.6.6 Porovnání mechanických vlastností resinu pro SLA s filamentem pro FDM.....	32
2.6.7 Postproces čištění a vytvrzení výtisků	33
3 ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ.....	35
3.1 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	36
3.1.1 Princip	36
3.1.2 Výsledná data	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 PODSTATA ZKOUŠKY A CÍLE PRÁCE	40
4.1 PODSTATA ZKOUŠKY	40
4.2 CÍLE PRÁCE	40
5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MATERIÁLY	41
5.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	41
5.1.1 SLA tiskárna.....	41
5.1.2 FDM tiskárna	42
5.1.3 Univerzální testovací stroj.....	43
5.1.4 Optický mikroskop Dino Lite Edge	44
5.2 POUŽITÉ MATERIÁLY	45
6 PŘÍPRAVA A REALIZACE 3D TISKU	46
6.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESO	46
6.2 PROCES TVORBY 3D MODELU.....	47

6.2.1	Autodesk Inventor	47
6.3	3D TISK	48
6.3.1	Slicer Software	50
7	ROZMĚROVÁ PŘESNOST VÝTISKŮ	53
8	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM	55
8.1	PRŮBĚH ZKOUŠKY	55
9	VYHODNOCENÍ DAT TAHOVÉ ZKOUŠKY	56
9.1	FDM VÝTISKY	56
9.2	SLA VÝTISKY	57
9.2.1	Nevytvrzené výtisky z SLA tiskárny	57
9.2.2	Vytvrzené výtisky z SLA tiskárny	58
9.2.3	Srovnání Youngova modulu pro FDM a SLA výtisky	59
9.2.4	Analýza lomové plochy pomocí optické mikroskopie	60
	ZÁVĚR.....	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Aditivní výroba, známá také jako 3D tisk, se v posledních letech stala významnou technologií umožňující rychlou a přesnou výrobu složitých dílů s minimálním odpadem materiálu. Mezi nejrozšířenější metody patří stereolitografie (SLA) a modelování taveným depozitem (FDM), které se liší nejen principem zpracování materiálu, ale také mechanickými vlastnostmi výsledných výrobků. Zatímco u FDM je obecně známo, že mechanické vlastnosti dílů výrazně závisí na orientaci tisku, tedy vykazují anizotropii, u SLA se předpokládá vyšší míra izotropie díky způsobu sítování pryskyřic.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na zkoumání mechanických vlastností dílů vyrobených metodou stereolitografie, konkrétně na vliv orientace tisku na pevnost v tahu. Pro srovnání jsou do studie zařazeny také díly vyrobené technologií FDM. U SLA výtisků je navíc rozlišováno mezi postprocesně vytvrzenými a nevytvrzenými vzorky, přičemž materiály zahrnují fotopolymerní pryskyřice (pro SLA) a ABS termoplast (pro FDM). Měření pevnosti probíhá na univerzálním testovacím stroji formou zkoušky tahem, která umožňuje přesné a opakovatelné stanovení mechanických parametrů.

V teoretické části práce je uveden přehled nejpoužívanějších metod 3D tisku, včetně technik zpracování kovů a polymerů, který poskytuje širší kontext aditivní výroby a usnadňuje porozumění specifikům technologií SLA a FDM. Tento přehled pomáhá objasnit výhody a omezení jednotlivých metod a jejich vliv na výsledné vlastnosti výrobků.

Hlavním cílem práce je ověřit, zda jsou díly vyrobené pomocí stereolitografie skutečně izotropní – tedy zda jejich mechanické vlastnosti nejsou závislé na orientaci při tisku.

Význam této práce spočívá v přispění k lepšímu pochopení mechanického chování SLA dílů a v praktické aplikovatelnosti získaných poznatků. Potvrzení, že pomocí SLA tisku lze vytvořit výtisky s izotropními mechanickými vlastnostmi, by mohlo rozšířit možnosti využití této technologie v průmyslových odvětvích, jako jsou letectví, medicína nebo automobilový průmysl, kde je klíčová konzistence a spolehlivost mechanických vlastností. Tyto poznatky by navíc mohly usnadnit návrh a výrobu dílů, zkrátit dobu tisku a přispět ke zvýšení spolehlivosti výsledných produktů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ VÝROBA

Aditivní výroba, známá také jako 3D tisk, představuje moderní technologii, která umožňuje vytvářet trojrozměrné objekty postupným přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Na rozdíl od tradičních metod obrábění, které materiál odebírají, je aditivní výroba efektivnější z hlediska spotřeby materiálu a nabízí vysokou míru tvarové svobody. Využívá se v průmyslu, zdravotnictví i výzkumu a umožňuje rychlou prototypovou výrobu i individuálně přizpůsobené produkty.

1.1 STL FORMÁT V TISKU

Zkratka STL v 3D tisku má několik hlavních významů.

- Standard triangulation language nebo Standard tessellation language, oba významy jsou pojmenováním pro virtuální formát souborů při 3D modelování.
- Stereolitografie - Tiskařská metoda

Historie

Standard Triangulation Language je formát souborů, jenž vznikl v roce 1987 a stal se standardním formátem v 3D tisku a v CAD (Computer-Aided Design) aplikacích. Tento formát vyvinula společnost 3D Systems a Charles W. Hull, jako zakladatel společnosti původně pro stereolitografii.

Princip

STL soubory popisují geometrii povrchu trojrozměrného objektu pomocí trojúhelníkových plošek (viz Obr. 1) Jednotlivé trojúhelníky jsou definovány třemi vrcholy a normálovým vektorem určující orientaci povrchu. Formát neobsahuje informace o barvě, textuře, materiálu a měřítku. Existují dva typy kódování dat. Binární kódování je kompaktnější, ukládá data v binárním formátu a disponuje menší velikostí souboru. ASCII STL formát ukládá informace o trojúhelnících v čitelných textech.

Kvalitu modelu udává počet trojúhelníků, při nižším počtu mohou být viditelné hrany a nerovnosti u zakřivených a kulatých ploch.[1,2]

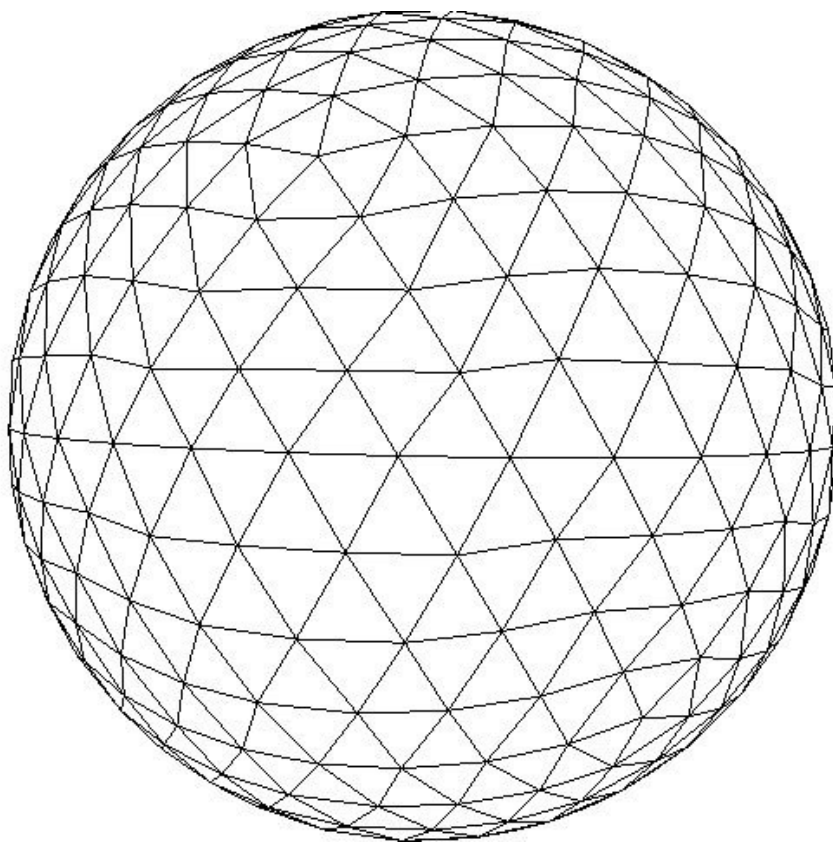
Použití

Model vytvořený v CAD softwaru (např. Autodesk) se exportuje do souboru ve formátu STL. Tento soubor je poté možné otevřít v tzv. sliceru. Slicing programy slouží k rozdělení

modelu na vrstvy podle osy Z, také generuje například dráhu extruderu a další instrukce pro tisk. Tyto vrstvy jsou následně použity při tiskovém procesu.

Výhody a nevýhody

Formát STL je standardem pro všechny 3D tiskárny díky své jednoduchosti a kompaktní velikosti souborů, naopak nevýhodou je, že přesnost modelů závisí na počtu trojúhelníků a soubory neobsahují informace o barvě ani materiálu.



Obr. 1 Zobrazení sférického objektu ve formátu STL

(zdroj: vlastní)

2 VYBRANÉ TECHNOLOGIE 3D TISKU

Technologie výroby modelu, podle materiálu, ze kterých tisknou můžeme rozdělit na:

a) 3D tisk z nepolymerních materiálů

- Multiphase Jet Solidification (MJS)
- Direct Laser metal Forming (DLMS)
- Selective laser melting (SLM)

b) 3D tisk z polymerních materiálů

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Multi Jet Modeling (MJM)
- PolyJet
- Digital Light Processing (DLP)
- LCD
- Stereo Lithography (SLA)

2.1 MJS

Multiphase Jet Solidification (MJS) – Nanášení pomocí trysky

Historie

Počátky Multiphase Jet Solidification (MJS) - nanášení materiálu pomocí trysky byly již v 90. letech 20. století, kdy se hledaly nové efektivní metody pro přímou výrobu kovových prototypů. V roce 1994 byla publikována první studie popisující principy MJS a jeho potenciál pro výrobu kovových a keramických dílů. První pokusy zahrnovaly slitiny cínu a bismutu s nízkým bodem tání. Výzkum MJS byl významně podporován Fraunhofer Institutem pro aplikovaný materiálůvý výzkum (IFAM) a institutem pro výrobní inženýrství a automatizaci (IPA), tyto dvě instituce vyvinuly a zdokonalily MJS do efektivní metody pro aditivní výrobu. V průběhu let byla snaha zlepšit kvalitu a přesnost dílů, proto byly testovány

různé práškové směsi a pojiva s cílem dosáhnout lepších mechanických vlastností a hladších povrchů.

Princip

Tento proces, podobný metodě FDM, spočívá ve výrobě součástí nejčastěji z kovů, keramiky i termopolymerů. Materiál, ve formě prášku (čistý kov, směsi kovů, keramika apod.) je zahříván na teplotu, při které se mění na nízkoviskózní. To usnadňuje jeho extruzi. Extruze probíhá přes zahřívanou trysku pístovým systémem vytlačování (viz Obr. 2). Jakmile se nízkoviskózní materiál dostane do kontaktu s již nanesenou vrstvou materiálu vytuhne a vytvoří tak požadovanou vrstvu.[3]

Rozlišení výtisků se pohybuje v rozmezí setin milimetru.

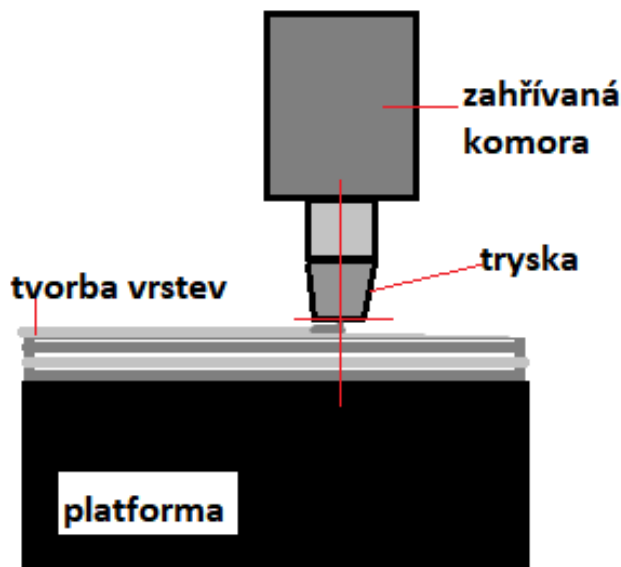
Výhody a nevýhody

Výhodami MJS jsou vysoká přesnost při výrobě geometrických tvarů a rychlost výroby, což je ideální pro prototypování a výrobu v malých sériích. Díky nanášení materiálů vzniká, ve srovnání s obráběcími metodami, méně odpadu.

Nevýhody MJS zahrnují vysoké provozní náklady, nutnost dodatečných úprav pro dosažení požadované kvality povrchu (frézováním, broušením), omezená tloušťka stěn z důvodů procesu odstranění pojiva, jelikož je nutné odstranit pojivový materiál, aby bylo docíleno potřebné pevnosti a kvality součásti, tento proces je časově náročný.

Využití

MJS má v průmyslu široké využití, jelikož umožňuje tvorbu dílů z kovů jako jsou nerezová ocel, hliník a měď, stejně tak keramiky jako je alumina a karbid křemíku. Tato technologie se využívá například v automobilovém či leteckém průmyslu, zdravotnictví. Uplatnění je tedy např. u automobilů v letectví i zdravotnictví, je vhodné také ke snížení výrobních nákladů.



Obr. 2 Schéma MJS tiskárny

(zdroj: vlastní)

2.2 DMLS a SLM

Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Slinování kovového prášku laserem

Selective Laser Melting (SLM) – Selektivní tavení kovového prášku laserem

Historie

DMLS technologie byla vyvinuta v roce 1995 v Německu společností Electro Optical Systems (EOS) ve spolupráci se společností Rapid Product Innovations (RPI). Jednalo se o jednu z prvních technologií, které umožnily 3D tisk kovových dílů pomocí laserového spékání prášku. V tomto období byla vyvinuta i technologie selective laser melting (SLM) která pracuje na podobném principu.

Princip

DMLS technologie stejně jako technologie SLM využívá vysoce výkonných laserů k úpravě kovového prášku. Laser, umístěný v komoře s inertní atmosférou, selektivně působí na nanesený prášek na pohyblivé platformě v přesně definovaných místech podle digitálního modelu (viz Obr. 3). Postupným spékáním (DMLS) nebo tavením (SLM) vzniká homogenní díl. Společně s dílem se tisknou i podpurné struktury jež fixují díl v prostoru a také odvádějí přebytečné teplo. Po dokončení každé vrstvy platforma poklesne o tloušťku vrstvy a proces

se opakuje. Po dokončení tisku a ochlazení jsou díly zbaveny přebytečného prášku a následně ještě tepelně zpracovány. Nejčastěji používané kovové materiály a slitiny pro DMLS technologii jsou nástrojová ocel, niklové superalloy, AlSi10Mg. U SLM jsou to čisté kovy, jako titan, nerezová ocel, hliník. [4,5]

Rozlišení DMLS, tedy tloušťka jedné vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,03 - 0,08 mm, u SLM je to 0,08 - 0,16 mm.

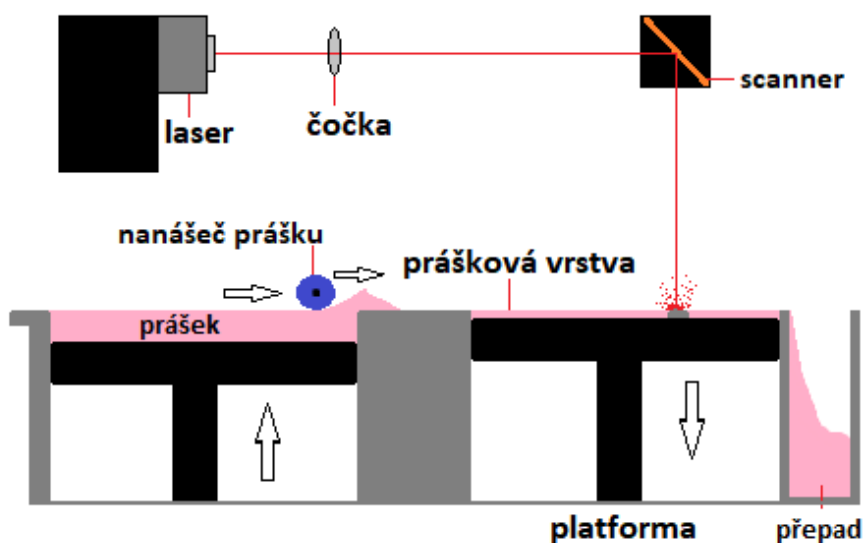
Výhody a nevýhody

Výhodou této technologie je, že na rozdíl od konvenčního obrábění DMLS výrazně šetří množství spotřebovaného materiálu a také při něm vzniká minimum odpadu. Konstrukční možnosti a tvarová složitost dílů jsou téměř neomezené a mechanické vlastnosti laserově slinovaných dílů jsou srovnatelné s obrobenými nebo odlitými výrobky.

Nevýhodou je, že díly vyžadují podpory při tisku a výsledný díl má zrnitý povrch s mírou drsnosti 5–20 μm v závislosti na použitém materiálu. Drsnost povrchu lze následně upravit tryskáním, omíláním nebo obráběním.

Využití

DMLS nachází uplatnění v medicíně a zubním lékařství, SLM je využíváno v leteckém a výrobním průmyslu k výrobě forem s vysokou přesností a komplexností tvaru. Obě technologie se uplatňují k rychlému prototypování specifických a malosériových dílů, dále ve vojenském obranném sektoru i zdravotnictví.



Obr. 3 Schéma DMLS a SLM tiskárny

(zdroj: vlastní, částečně převzato z Medium.com)

2.3 SLS

Selective Laser Sintering (SLS)- Selektivní laserové slinování

Historie

SLS technologie byla patentována v 80. letech 20. století v technologickém inkubátoru University of Texas v Austinu. Šlo o jednu z prvních metod 3D tisku. První komerční projekt univerzity byl nejprve realizován pod názvem Nova Automation a od roku 1989 jako DTM, která se stala velkým výrobcem dílů pro letecký průmysl. Prodeje prvních komerčních tiskáren nebyly příliš vysoké, a tak byla společnost DTM v roce 2001 odkoupena společností 3D Systems, Inc. která se specializovala na stereolitografii. V současnosti jsou SLS tiskárny cenově dostupnější a existuje mnoho společností, které je vyrábějí. Přesto se neočekává, že by se tato technologie rozšířila do segmentu hobby 3D tisku. SLS se však stává dostupnější pro poloprofesionální využití, ceny profesionálních tiskáren se stále pohybují v řádu tisíců eur v závislosti na doplňkových zařízeních na čištění výtisků, s nimiž se může pořizovací cena i zvýšit. SLS tiskárny jsou mezi firmami velmi rozšířené a očekává se i nadále růst jejich prodeje a využití. Roste také množství výrobců nových materiálů a firem zaměřených na barvení výtisků.

Princip

Zařízení SLS tiskárny je velmi podobně zařízení DMLS a SLM liší se jen v procesu spékání a ve zpracovávaném materiálu (viz zařízení Obr. 3). Při SLS tisku se polymerní materiál, nejčastěji nylon, nanáší na podložku ve formě prášku. V přesně definovaných bodech je poté spékán laserovým paprskem, čímž vzniká pevná vrstva. Následně se podložka posune níže a na již vzniklou vrstvu se nanese nová vrstva prášku, která je opět selektivně spékána. Touto metodou je možné vyrábět výtisky nejen z plastů, ale také z kovů a keramiky. SLS technologie je vhodná zejména pro prototypování a malosériovou výrobu.

Rozlišení SLS výtisků se obvykle pohybuje v rozmezí 0,1- 0,3 mm. [6]

Výhody a nevýhody

Výhody SLS tisku jsou, že nejsou potřebné při tisknutí podpory, jelikož je výtisk vždy obklopen zbytkovým nespečeným materiálem. Tato technologie umožňuje vytvářet složité geometrické tvary a zároveň poskytuje pevné a odolné výtisky s dobrou chemickou odolností. Další výhodou je široká možnost povrchových úprav, které umožňují přizpůsobit finální vlastnosti výrobku.

Nevýhodou SLS tisku je nákladné čištění stroje od jemného prášku. Výtisky mají na porézní povrch, což často vyžaduje postprocesní povrchovou úpravu. Při návrhu 3D modelu je nutné brát v úvahu smrštění materiálu, jenž nemusí být rovnoměrné. Omezený je také výběr použitelných materiálů. Dalším významným faktorem je vysoká cena tiskáren a spotřeba materiálu.

Využití

Technologie SLS nachází široké uplatnění v automobilovém, leteckém a strojírenském průmyslu. Díky možnosti použití široké škály materiálů a schopnosti tisknout složité geometrické tvary bez nutnosti podpěr je tato metoda 3D tisku velmi flexibilní. Uplatňuje se v mnoha výrobních odvětvích, kde splňuje vysoké požadavky moderního inženýrství a umožňuje výrobu prototypů i finálních produktů s vysokou přesností.

2.4 FDM

Fused Deposition Modeling (FDM) – Nanášení nataveného polymeru z vlákna

Historie

FDM technologie byla patentována v roce 1988 společností Stratasys Inc. V roce 2004 byla Dr. Adrian Bowyerem založena open-source iniciativa RepRap, která prosazovala výrobu levných samoreplikovatelných 3D tiskáren, což vedlo k nárustu FDM tisku mezi hobby uživateli. V roce 2008 byla vyrobena první takto plně samoreplikující se 3D tiskárna a v roce 2009 kdy vypršel patent chránící FDM technologii se tato metoda dostala do centra pozornosti. S tím se začal rozvíjet trh s FDM tiskárnami, vzniklo více výrobců a objevili se první poskytovatelé 3D tisku jako služby. Cena FDM tiskáren začala rychle klesat, což dále zvýšilo jejich popularitu. Dnes je FDM celosvětově nejrozšířenější a nejjednodušší technologií v 3D tisku. Existuje široké spektrum dodavatelů a výrobců jak už profesionálních, tak poloprofesionálních tiskáren, které se liší například velikostí tiskové plochy i možnostmi využití.

Princip

Technologie Fused deposition modeling spočívá ve zpracování různých druhů termoplastů a vosků, nejčastěji používanými materiály jsou ABS, PLA, PET, TPU nebo PA. Filament ve formě struny je v trysce zahříván do podoby taveniny a následně je vytlačován na tiskovou podložku (viz Obr. 4). Zde tuhne ve vrstvách, které se na sebe postupně nanášejí

a vytvářejí výsledný model. Výtisky jsou obvykle z vnitřní strany částečně duté, což snižuje spotřebu materiálu a urychluje tisk. U složitějších modelů je nutné tisknout podpůrné struktury, které se po dokončení tisku odstraňují. Rozlišení tisku se odvíjí od průměru trysky a množství vytlačeného filamentu závislé na výšce vrstvy. Na principu extruzního 3D tisku jako je tomu u FDM funguje více tiskařských technologií (např. MJS). Rozlišení se obvykle pohybuje v rozmezí 0,1-0,3 mm.[7–9]

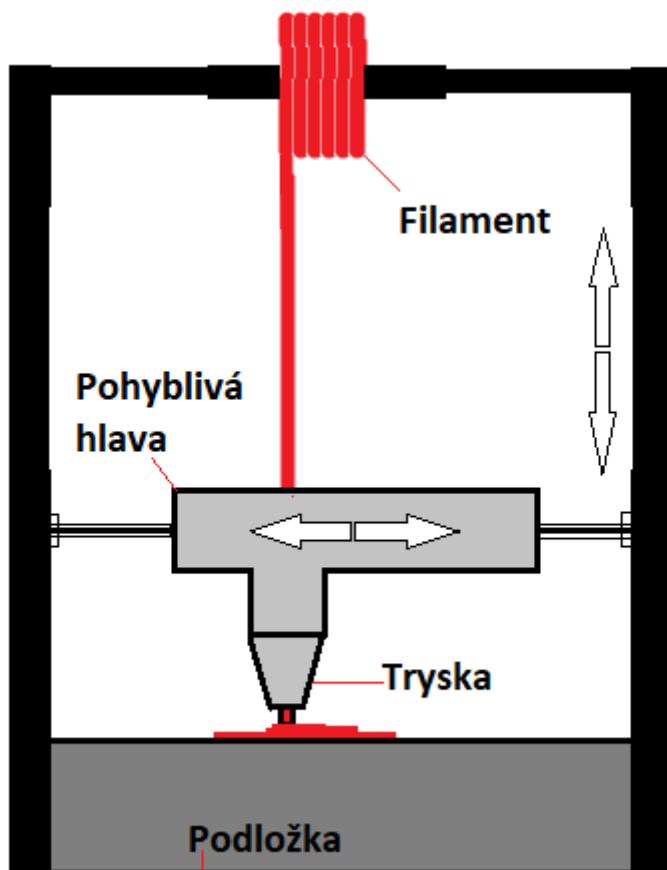
Výhody a nevýhody

FDM tiskárny jsou nejlevnější a nejjednodušší metoda 3D tisku. Při tisku vzniká minimum odpadu a díky čistému provozu, je možné tiskárny používat i v kancelářském prostředí. Další výhodou je snadná škálovatelnost na požadovanou velikost výtisků a vysoká flexibilita různých druhů termoplastů dle využití.

Nevýhody FDM tiskáren spočívají v nízké kvalitě a míře detailnosti výtisků. Relativně velká tloušťka vrstvy omezuje dosažení jemných detailů a povrch vodorovných vrstev nemusí být vždy dokonale hladký. U převážné většiny výtisků je nutnost dodatečných povrchových úprav. Dalším omezením je omezená životnost termoplastických materiálů, které časem degradují což není vhodné pro výrobu konečných výrobků.[10]

Využití

Jelikož výrobky vytvořené pomocí FDM 3D tisku nejsou příliš kvalitní, přesné a mají omezenou životnost nachází tato technologie využití zejména v poloprofesionálním, hobby domácím 3D tisku, architektuře, designu, vzdělávání, výzkumu a v rychlém prototypování nástrojů a přípravků zefektivňujících výrobní proces.



Obr. 4 Schéma FDM tiskárny

(zdroj: vlastní)

2.5 MJM a POLYJET

Multi Jet Modeling (MJM)- Tisk z více trysek

Polyjet – Tisk z více trysek s různými materiály

Historie

Počátky technologie Multi Jet Modeling (MJM) sahají do let 1994-1996, kdy společnost 3D Systems uvedla první systém pro material jetting, jenž využíval inkjetovou technologii k tisku pouze z voskových materiálů. V roce 1999 byl systém nahrazen platformou ThermoJet z níž se vyvinula dnešní technologie MJP.

V roce 1998 společnost Objet Geometries vyvinula vlastní technologii fotopolymerního tisku PolyJet, která umožňovala využití více materiálů současně. V roce 2012 došlo k fúzi se společností Stratasys.

Princip

Princip technologie Material Jetting Modeling a Polyjet spočívá v tryskání kapek tekutého polymerního materiálu z většího počtu trysek. Kapičky jsou následně vytvrzovány pomocí UV světla nebo jiného zdroje záření. Technologie Polyjet je specifická varianta MJM, která umožňuje tisk s použitím více materiálů současně, což umožňuje vytvářet díly s různými vlastnostmi, jako jsou flexibilita a tvrdost v různých oblastech výtisku. Celý stroj je velmi podobný inkoustovým tiskárnám, přičemž tisková hlava se pohybuje ve třech osách. Z vytištěného dílu je následně podpurný nosný materiál odstraněn pomocí tlaku vody nebo mechanicky. Rozlišení MJM se pohybuje okolo 0,016 mm a u Polyjet 0,014 mm, jedná se tedy o modely s vysokou přesností a hladkým povrchem.[11]

Výhody a nevýhody

Výhodami Multi Jet Modelingu je vysoká detailnost a hladkost povrchu a také rychlost tisku ve srovnání s ostatními metodami. Tento tisk umožňuje využití širokého spektra fotopolymerních materiálů a také disponuje možností snadného odstranění podpurného materiálu, což zjednodušuje následné zpracování. U PolyJet 3D tiskáren je navíc možnost kombinace různých materiálů, což umožňuje modifikaci fyzikální vlastností výtisku, včetně jeho barevnosti.[12]

Využití

MJM se využívá díky vysoké přesnosti u výroby elektroniky, ve zdravotnictví, leteckém průmyslu a při výrobě mikrokomponent. PolyJet nachází stejné oblasti využití, ale díky možnosti tisku funkčních dílů s kombinací průhledných, tuhých a flexibilních materiálů v jedné tiskové úloze nabízí v těchto aplikacích širší možnosti.[9]

2.6 Stereolitografie

Vytvrzování tekutého fotopolymery pomocí záření.

Historie

Stereolitografie je jednou z prvních technologií 3D tisku, jež byla objevena na počátku 80. let 20. století. V roce 1981 japonský vědec Hideo Kodama vyvinul první systém, ale nebyl schopen včas dokončit patentovou přihlášku. Později, v roce 1984, byl zamítnut neúspěšný patent francouzských vědců kvůli nedostatku obchodní perspektivy. Ve stejném roce však americký inženýr Charles W. Hull nechal patentovat stereolitografii pod názvem „Systém pro generování trojrozměrných objektů“, jeho proces využíval UV laser k

vytvrzování fotopolymerní pryskyřice po vrstvách. Následně, v roce 1986, založil společnost 3D Systems, která se stala průkopníkem v oblasti 3D tisku. V roce 1988 byla uvedena první komerční 3D tiskárna pod názvem SLA-1 umožňující tisk z digitálních modelů. V průběhu 90. let byla technologie zdokonalována a vznikaly různé modely tiskáren, přičemž formát STL, který 3D Systems vyvinul se stal standardem v oblasti 3D tisku.[13–15]

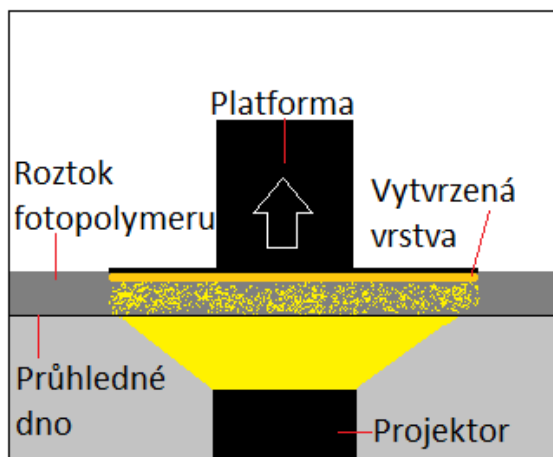
Princip

V tiskárně je umístěna nádoba se zásobním fotopolymerním roztokem pryskyřice, ve které je ponořena u hladiny plocha podložky pohyblivé ve směru osy z. Jakmile započne tisk, fotopolymer je ze spodní strany ozařován zdrojem energie ve směru podložky. Jakmile fotony záření dopadnou na konkrétní místa na povrchu podložky, dojde k chemické reakci fotopolymerizace, která způsobí polymerizaci pryskyřice v těchto ozářených oblastech. Tím vzniká první vrstva vytvrzeného materiálu na podložce. Poté co je vrstva dokončena se podložka posune o výšku vrstvy ve směru osy z a tím se vytvoří prostor k vytvoření další vrstvy. Tímto způsobem se postupně vytváří celý objekt vrstvu po vrstvě a s ním i podpory modelu, které pomáhají udržovat strukturu během tisku a redukují případné vnitřní pnutí dílu, po dokončení tisku je výtisk omýván a podpory jsou manuálně odstraněny.

Zdrojů záření existuje několik a podle nich se dělí jednotlivé metody stereolitografického tisku, jsou to LCD, DLP a SLA. Stereolitografický tisk má uplatnění ve všech průmyslových odvětvích, v medicíně i stomatologii.

2.6.1 DLP

DLP (Digital Light Processing) metoda stereolitografie využívá jako zdroj záření digitální projektor (lampu) (viz Obr. 5). Projektor osvětluje celou vrstvu najednou světlem o vlnové délce 385–405 nm, čímž umožňuje vytvoření velmi hladkého povrchu s vysokými detaily. Tisk bývá rychlejší než u SLA a srovnatelný s LCD tiskárnou, jelikož tiskne celou vrstvu najednou. Rozlišení vrstev bývá obvykle v rozmezí 0,035 mm až 0,1 mm, přičemž kvalita závisí na rozlišení projektoru. Náklady na DLP tiskárnu a údržbu jsou nižší než u SLA a vyšší než u LCD tiskáren. Nevýhodou DLP tiskáren je, že mohou tisknout jen v omezené velikosti a malé objekty.[15]

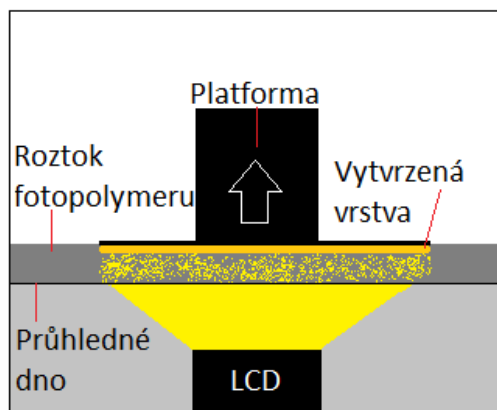


Obr. 5 Schéma DLP tiskárny

(zdroj: vlastní, částečně převzato z FormLabs Inc)

2.6.2 LCD

LCD (Liquid Crystal Display) stereolitografie vytvrzuje tekutý epoxidový fotopolymer pomocí LCD obrazovky, která osvětluje celou vrstvu najednou (viz Obr. 6) světlem o vlnové délce 405 nm. Proces tisku je velmi rychlý, rozlišení a velikost pixelů LCD panelu má přímý vliv na přesnost a detailnost výtisku. Obvykle bývá rozlišení vrstev okolo 0,035 - 0,05 mm. Povrch výtisku je hladký, ale může mít viditelné vrstvy nebo vzorování. LCD metoda má ve srovnání s ostatními stereolitografickými technologiemi nejnižší náklady na tiskárnu i provoz. Nevýhodou je, že LCD panel tiskárny se časem vypaluje a potřebuje výměnu a omezená velikost tisknutého objektu.[13,15]

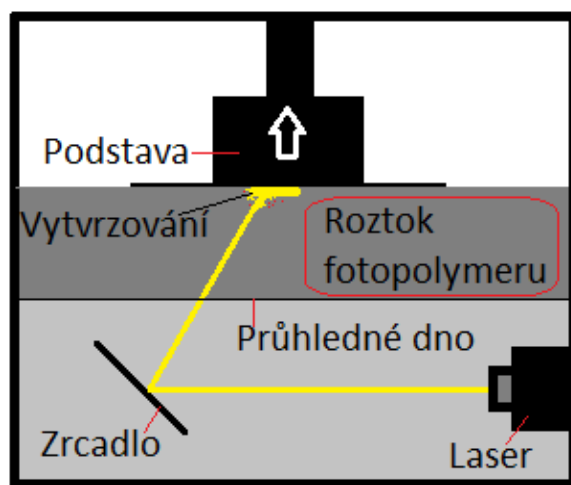


Obr. 6 Schéma LCD tiskárny

(zdroj: vlastní, částečně převzato z FormLabs Inc)

2.6.3 SLA

Stereolitografický tisk vytvrzuje tekutý epoxidový fotopolymer pomocí UV laserového paprsku (viz Obr. 7) o vlnové délce 355 nm. Vyznačuje se vysokou přesností, běžně 0,025 – 0,100 mm a detailností, avšak proces tisku je zdlouhavý, protože se každá vrstva vytvrzuje bod po bodu. Oproti ostatním metodám stereolitografie jsou laserové SLA tiskárny nejnákladnější, mají však největší detailnost a kvalitu povrchu bez viditelných vrstev a umožňuje tisk neomezeně velkých objektů. Nevýhodou je delší doba tisku. [15]



Obr. 7 Schéma SLA tiskárny

(zdroj: vlastní, částečně převzato z FormLabs Inc)

2.6.4 Materiály pro stereolitografický 3D tisk a jejich rozdělení

Materiály stereolitografického tisku lze dělit podle vlastností, odvětví využití a fyzikálně-chemických vlastností.

1. Podle vlastností to jsou:

- **Standardní resiny:** Používají se pro rychlé prototypování a obecné aplikace. Nabízejí hladký povrch a dobrou přesnost.
- **Technické resiny:** Jsou materiály s vyšší mechanickou odolností, jako jsou pevné, pružné nebo teplotně odolné resiny.
- **Biokompatibilní resiny:** Vhodné pro zdravotnické aplikace, jako jsou chirurgické nástroje nebo dentální modely.

- **Speciální resiny:** Resiny s unikátními vlastnostmi, mohou být například keramické, silikonové nebo elektrostaticky bezpečné (ESD) materiály.

2. Podle využití se dělí na:

- **Biomedicínské aplikace**
 - **Chirurgické nástroje:** Resiny s biokompatibilními vlastnostmi, například Surgical Guide Resin.
 - **Dentální aplikace:** Materiály pro výrobu korunek, můstků, zubních modelů nebo nočních dlah (např. Dental LT Clear Resin).
 - **Protetika:** Výroba protéz nebo ortotických pomůcek.
- **Technické aplikace**
 - **Prototypování:** Standardní a technické resiny pro návrh a testování konceptů.
 - **Výroba nástrojů a přípravků:** Pevné a odolné resiny pro výrobu forem, přípravků a montážních nástrojů.
 - **Automobilový průmysl:** Výroba funkčních prototypů, dílů na míru nebo montážních pomůcek.
- **Průmyslové aplikace**
 - **Aerospace:** Vysokoteplotní a žáruvzdorné resiny pro letecké komponenty.
 - **Elektronika:** ESD-safe resiny pro výrobu antistatických součástek a přípravků.
 - **Odlévání kovů:** Resiny s nízkou tepelnou roztažností pro výrobu odlévacích modelů.
 - **Spotřebitelské produkty**
 - **Šperky a designové předměty:** Resiny s vysokým rozlišením a možností barvení (např. Clear Resin nebo Color Resin).
 - **Hračky a dekorace:** Materiály vhodné pro estetické a detailní modely.

3. Rozdělení podle fyzikálně-chemických vlastností

- **Pevné resiny (rigid resins):** Odolné proti deformaci, vhodné pro náročné mechanické aplikace.
- **Pružné resiny (flexible and elastic resins):** Podobné gumě nebo silikonu, ideální pro ohýbatelné díly.
- **Vysokoteplotní resiny (high temp resins):** Odolávají vysokým teplotám, vhodné pro tepelné aplikace.
- **Keramické resiny (ceramic resins):** Pro výrobu technických keramických dílů.[16]

2.6.5 Chemické složení a fyzikální vlastnosti resinových materiálů pro SLA

Obecně lze resiny, česky pryskyřice popsat jako fotopolymerní látky, které tuhnou při kontaktu s UV světlem. Rozlišujeme více druhů resinů, jsou to akrylátové, methakrylátové, epoxidové (akrylát-free) pryskyřice, dále existují kompozitní a biokompatibilní. Nevytvrzená pryskyřice je vysoce viskózní lepkavá kapalina nebo křehká pevná látka v závislosti na molekulové hmotnosti (vyšší molekulové hmotnost způsobí vyšší teploty tání).

Akryláty (propenoáty) a methakryláty jsou soli a estery kyseliny akrylové a methakrylové. Akryláty obsahují vinylovou skupinu ($\text{CH}_2=\text{CH}-$) přímo navázanou na karbonylovou skupinu ($\text{C}=\text{O}$). Používají jako monomery při výrobě plastů. Vinylová skupina umožňuje akrylátům snadno polymerizovat za vzniku polymerních řetězců. Karboxylová nebo esterová skupina poskytuje chemickou reaktivitu a možnost modifikace vlastností. Methakrylát je derivátem akrylátů. Akryláty se vyznačují dobrou chemickou odolností a odolností vůči UV záření, mají nízkou tepelnou odolnost, po zahřátí je však lze snadno tvarovat, mají nižší houževnatost než polykarbonát, avšak stále pevnější než sklo, jejich povrch je neporézní, hladký, lesklý s odolností proti poškrábání.[17]

Epoxidy jsou sloučeniny uhlovodíků s cyklicky navázaným kyslíkem na dva sousední uhlíky, jedná se o cyklické ethery. Díky tomuto cyklickému tvaru trojúhelníku mají molekuly vyšší kruhové napětí. Toto napětí je druh nestability nejčastěji u cyklických molekul jejichž vazby vytvářejí neobvyklé úhly. Tyto úhly jsou mnohem menší, než je ideální hodnota (okolo 109°). v důsledku tohoto napětí jsou molekuly epoxidů reaktivnější než jiné ethery.

Polymery epoxidu tzv. polyethery, obsahující nezreagované epoxidové jednotky se nazývají epoxidové pryskyřice, ty jsou syntetického původu a patří mezi tzv. reaktoplasty, termosety. Jedná se o pryskyřičné látky s více než jednou epoxidovou vazbou, vynikají dobrou adhezí k materiálům a po vytvrzení chemickou odolností, tvarovou stálostí, malým smrštěním při vytvrzení a lepší tepelnou odolností v porovnání s termoplasty.[18,19]

SLA resiny mají specifické fyzikální a chemické struktury, které jim umožňují přeměnu z kapalného stavu na pevný pomocí světlem iniciované polymerace.

Proces polymerace

Polymerace je iniciována dodáním energie pomocí UV světla, které aktivuje fotoiniciátory k tvorbě volných radikálů. Tyto volné radikály napadají dvojné vazby monomerů a spojují je do polymerních řetězců, tento proces má za následek vznik zesíťované polymerní matrice s pevnou strukturou.[20,21]

Fyzikální vlastnosti

Resiny před tiskem a vytvrzením jsou v základním stavu kapalné pro rovnoměrné rozmístění na tiskovou platformu, viskozita závisí na složení, jelikož oligomery a jiné přísady ovlivňují jejich tokové vlastnosti. Po vytvrzení a vystavení UV záření se jednotlivé monomery a oligomery propojují do trojrozměrné polymerní sítě, jejíž struktura je pevná, homogenní, s hladkým povrchem s vysokou přesností. U kompozitních resinů jsou po vytvrzení do struktury polymerní matrice začleněny nanočástice (např. nanodrátky CuNi, polysiloxanové nanočástice), jenž vytvářejí náhodně rozptýlené agregáty. Tyto částice mohou zlepšit mechanické vlastnosti jako jsou tvrdost a modul pružnosti.

Chemická struktura SLA resinů

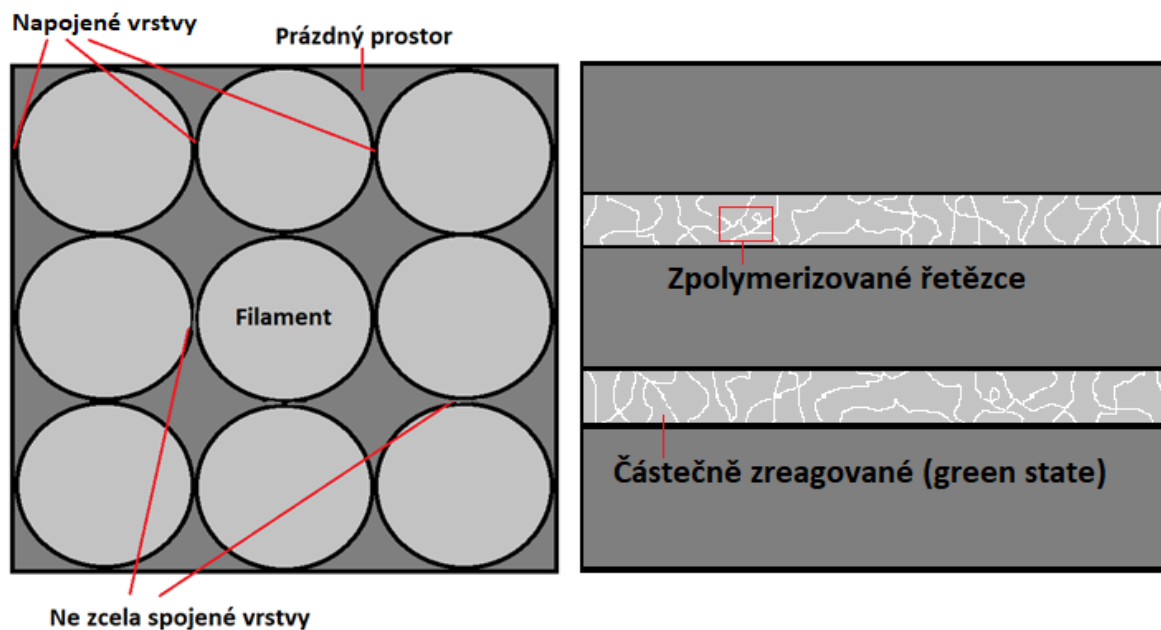
V resinech se nachází monomery, oligomery, fotoiniciátory a další přísady. Primární složkou jsou monomery, jedná se o reaktivní molekuly obsahující dvojné vazby (např. akryláty, methakryláty, epoxidy). Tyto monomery se po ozáření UV světlem propojují do dlouhých polymerních řetězců vlivem radikálové reakce. Další složkou jsou oligomery, jejichž větší molekuly ovlivňují viskozitu v kapalném stavu a stabilitu resinu, dále zajišťují mechanické a optické vlastnosti, ovlivňují pružnost, tvrdost a průhlednost. Fotoiniciátory jsou látky, jenž iniciují polymeraci monomerů, absorbují UV záření a uvolňují volné radikály, jsou klíčové složky pro přeměnu resinu z kapalného do pevného skupenství. Další přísady v resinech mohou být pigmenty, ty ovlivňují zbarvení výsledných objektů,

stabilizátory, jenž zlepšují skladovatelnost resinu a jiné modifikátory vlastností zlepšující mechanické vlastnosti.

2.6.6 Porovnání mechanických vlastností resinu pro SLA s filamentem pro FDM

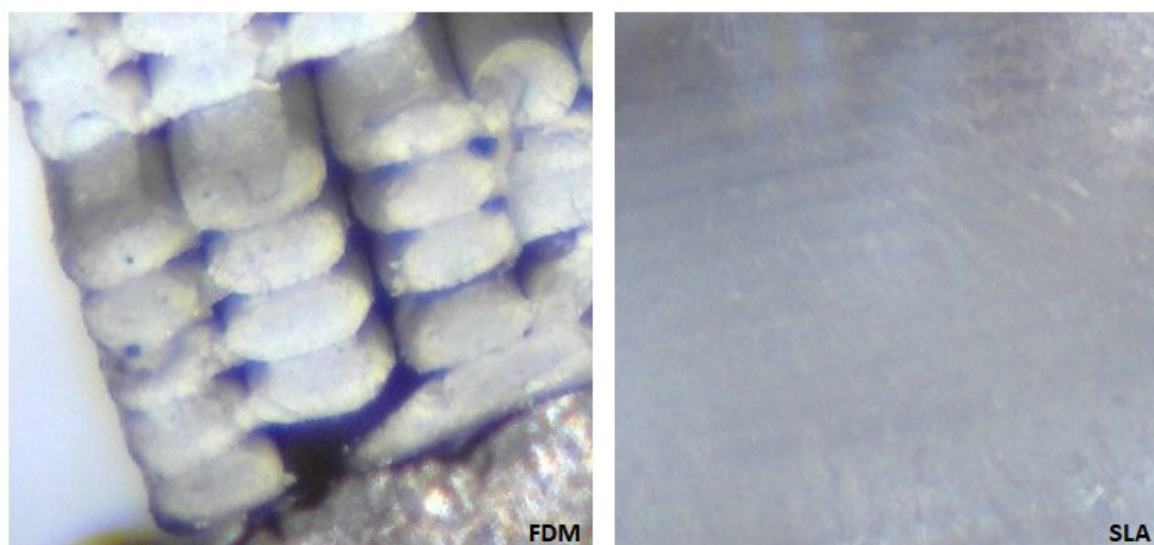
Hlavní rozdíl a zároveň výhoda tisku z resinu oproti FDM technologii spočívá v tom, že výtisky z resinu mají izotropní strukturu – tedy stejné vlastnosti ve všech směrech. Naproti tomu FDM tisk produkuje anizotropní objekty, jejichž mechanické vlastnosti se liší v závislosti na směru, což může omezovat jejich pevnost a využití v některých aplikacích.[22]

Tiskárny FDM natavují plastové vrstvy na horní části vrstvy předchozí vlivem teplot a gravitace. To vytváří mechanickou (ne chemickou) adhezi (přilnavost). Když je předchozí vrstva částečně roztavena, okolní vrstvy jsou jen částečně přilnuty k sousedním vrstvám a může tak vznikat prázdný meziprostor mezi vrstvami (viz Obr. 8 a Obr. 9 vlevo).[10] Takové materiály, jenž mají nestejnorodé (nehomogenní) prostředí (homogenní jsou jen v rámci jedné vrstvy) jsou označovány jako tzv. anizotropní látky. Anizotropní látky mají v určitém směru určité vlastnosti, jsou tedy orientačně ovlivněné z hlediska mechanických vlastností, důvodem je právě adheze vrstev a orientace vláken.[18,19,23] Naopak vytvrzená pryskyřice je látka homogenní (stejnorodá) a izotropní, tyto homogenní izotropní materiály mají v každém směru stejné určité vlastnosti bez ohledu na směr (mechanické, optické, tepelné, aj.). Fotopolymerní pryskyřice vytváří stejné vlastnosti ve všech směrech, protože proces vytvrzování UV světlem není směrově závislý. V 3D tisku z pryskyřice jsou silami, které drží vrstvy pohromadě, chemické vazby. Monomery v resinu reagují a vytvářejí kovalentní vazby poskytující vysokou strukturální pevnost materiálu. Polymerační reakce, která v průběhu tisku probíhá, však není zcela dokončená. Tiskový proces udržuje vrstvu v polozreagovaném stavu zvaném green state. To znamená, že na povrchu jsou stále polymerovatelné skupiny, ke kterým se mohou následující vrstvy kovalentně vázat (viz Obr. 8 a Obr. 9 vpravo).[11,24]



Obr. 8 Anizotropní (vlevo) a izotropní (vpravo) struktura FDM a SLA

(zdroj: vlastní, částečně převzato z FormLabs Inc)



Obr. 9 Foto z digitálního mikroskopu Dino Lite Edge pro porovnání vrstev FDM (vlevo, zvětšení 95x) a SLA (vpravo, zvětšení 90x)

(zdroj: vlastní, mikroskop Dino Lite Edge)

2.6.7 Postproces čištění a vytvrzení výtisků

Omývání a odstranění podpěr vytištěných dílů

Po dokončení tisku samotnou tiskárnou se vytištěné díly musí dodatečně manuálně očistit rozpouštědlem (izopropylalkoholem) od zbytkového resinu, ze kterého byly díly

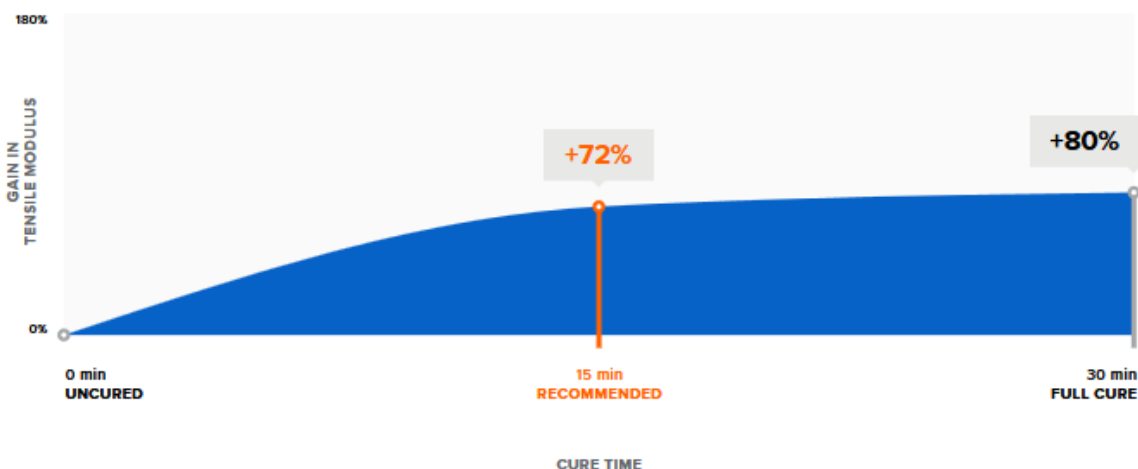
tištěny a postupně vytahovány v průběhu tiskového programu, jelikož čistý kapalný nezpolymerovaný resin je velmi adhezní a způsobuje lepkavost povrchu. Dále musí být odstraněny podpory, které v průběhu tisku napomáhaly stabilitě a odváděly přebytečné vnitřní pnutí.

UV-post curing a jeho vliv na mechanické vlastnosti výtisků

Po vytištění je vytvořený díl ještě ne zcela vytvrzený, pryskyřice je jen částečně vytvrzená a model tedy nemá ještě úplnou pevnost a stabilitu jakou může dosáhnout. K dokončení procesu a k zajištění úplné polymerace se používá UV vytvrzovačka. Očištěný výtisk od pryskyřice je vložen do vytvrzovačky využívající UV světlo o vlnové délce v rozmezí 385-405 nm, které aktivuje nezreagované fotoiniciátory v pryskyřici a dokončí polymerizaci. Otáčení podstavy pro výtisky a zrcadla ve vytvrzovačce zajišťují, že jsou modely vystaveny UV záření ze všech stran a dochází tak k rovnoměrnému vytvrzování. Tento post proces napomáhá vyšší pevnosti, hladšímu konzistentnějšímu povrchu a dlouhodobé stabilitě výtisků (nižší riziko deformace a praskání v průběhu času).[23] Na vytvrzovačce lze nastavit teplotu a dobu programu pro vytištěný díl, aby byl vytvrzen adekvátně, tyto parametry se můžou lišit v závislosti na použitém resinu. Na Obr. 10 jsou znázorněny grafy znázorňující navýšení modulu tahu v závislosti na čase ve vytvrzovačce pro vybrané pryskyřice, doporučené výrobcem Formlabs Inc.[20,25]

RECOMMENDED POST-CURE SETTINGS

Clear Resin



Obr. 10 Doporučené nastavení pro post cure vytvrzení pro Clear Resin od výrobce Formlabs Inc.

(zdroj: Formlabs Inc.)

3 ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

Fyzikální vlastnosti materiálu zahrnují charakteristiky, které popisují chování a stav materiálu bez změny chemického složení, mezi takové základní vlastnosti patří hustota, teplota tání a tuhnutí, tepelná a elektrická vodivost, délková a objemová roztažnost, magnetické a optické vlastnosti. Tyto vlastnosti určují chování materiálu a jsou klíčové při výběru vhodných materiálů pro konkrétní aplikace.

Metody měření fyzikálních a mechanických vlastností materiálů se dělí na dvě základní kategorie, statické a dynamické zkoušky, rozdělení je podle rychlosti a charakteru zatížení vzorku. V průběhu statické zkoušky je materiál zatěžován pomalu a plynule, obvykle až do porušení nebo stanovení deformace. Statické zkoušky probíhají při nízkých rychlostech. U dynamických zkoušek je materiál zatěžován rychle, cyklicky nebo rázově až do porušení nebo únavy materiálu.

Níže je uveden přehled vybraných metod nejčastěji používaných pro zjištění mechanických vlastností a jejich zástupce zařízení, tyto metody jsou rozděleny na statické a dynamické zkoušky.

Dynamické zkoušky měří:

- Rázovou houževnatost – rázové zkoušky pomocí rázového kladiva (např. Charpyho kladivo)
- Únavovou životnost – únavové zkoušky
- Chování materiálu při vysokorychlostním zatížení – vysokorychlostní testy (např. drop weight tester, vysokorychlostní zkušební stroj)

Statické zkoušky měří:

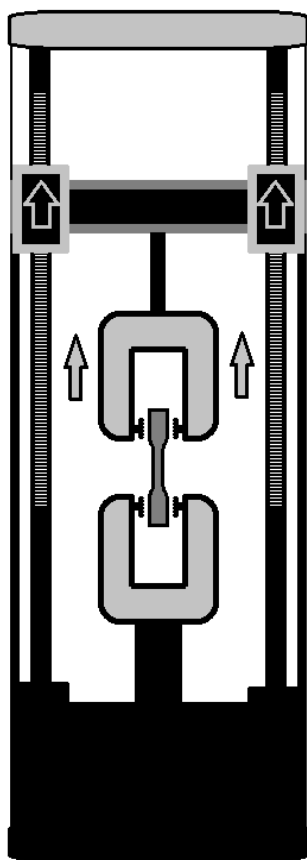
- Pevnost v tlaku – zkouška tlakem
- Pevnost v ohybu, modul pružnosti při ohybu – zkouška ohybem
- Smykovou pevnost – zkouška smykem
- Tvrdost materiálu – zkouška tvrdosti tvrdoměrem, odolnosti proti vniknutí (Rockwellův tvrdostní přístroj)
- Pevnost v tahu, prodloužení – trhací stroj (Univerzální testovací stroj)

3.1 Statická zkouška tahem

Univerzální testovací stroj je přístroj pro statické zkoušky tahem, který pomalu zatěžuje vzorek a zaznamenává působící sílu a míru prodloužení (deformace) testovacího tělesa až do jeho přetržení.

3.1.1 Princip

Zkušební těleso s normovanými rozměry je vertikálně vloženo mezi pneumatické či mechanické čelisti testovacího stroje kde je pevně sevřeno na obou koncích (viz Obr. 11). Po spuštění softwarového programu se čelisti začnou od sebe oddalovat. Na testovací těleso v tu chvíli pomalu působí stejná síla opačného směru s ohniskem ve středu tělesa. Sílu, kterou musí testovací stroj vynaložit, zaznamenává kalibrovaný program pomocí snímače síly (tenzometru). Zároveň průběžně zapisuje i vzdálenost (protažení tělesa), měřenou snímačem posunu pohybujících se čelistí. Měření je automaticky ukončeno po porušení (přetržení) testovacího tělesa.



Obr. 11 Trhací zařízení (Univerzální testovací stroj)

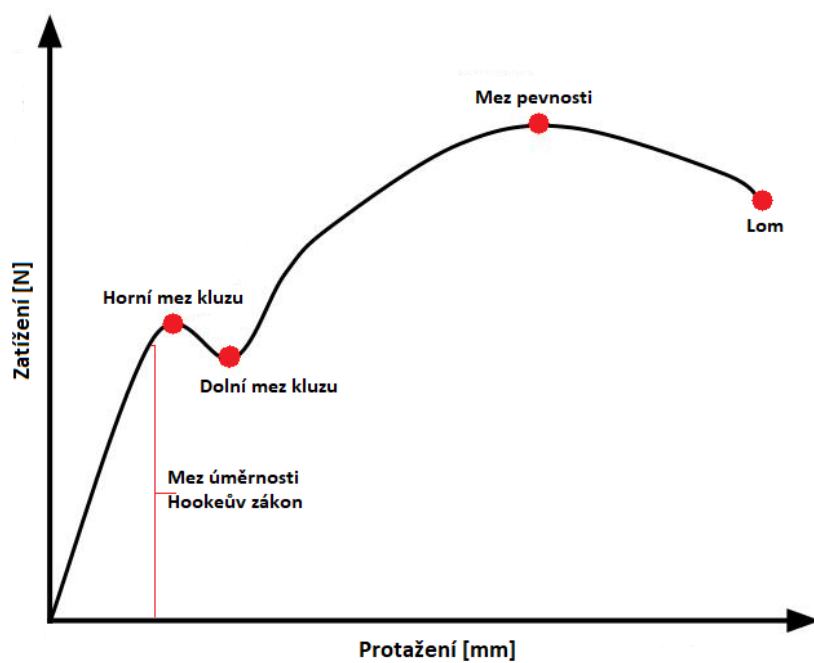
(zdroj: vlastní)

3.1.2 Výsledná data

S trhacím zařízením za pomoci softwaru, dat o zatěžovací síle měřené v newtonech (N) a hodnotě prodloužení měřeném v milimetrech (mm) je možné vyhodnotit následující informace:

- Maximální Zatížení – Maximální síla, kterou bylo při měření působeno na vzorek v newtonech.
- Napětí (σ) - Síla přepočtená na jednotku průřezu vzorku, obvykle v megapascálech (MPa).
- Modul pružnosti (E) - Youngův modul, poměr napětí k deformaci v elastické oblasti, v MPa nebo GPa. V oblasti pružné deformace vyjadřuje Hookův zákon vztah mezi skutečným napětím σ a poměrným prodloužením ϵ .
- Mez pevnosti v tahu ($\sigma_{\max}$) - Maximální napětí, které vzorek vydrží před přetržením (v MPa).
- Mez kluzu (σ_{yield}) - Je to smluvní napětí, po jehož překročení dochází k trvalým deformacím materiálu.
- Prodloužení při přetržení (ϵ_{break}) - celkové relativní prodloužení vzorku v okamžiku porušení, v procentech (%).

Z naměřených dat je sestrojen graf s křivkou. Tvar této křivky se liší v závislosti na testovaném materiálu. Z křivky lze zjistit veškeré informace od začátku testování, jeho průběhu až do konečného lomu (příklad tvaru křivky viz Obr. 12).



Obr. 12 Graf pevnost a lom materiálu

(zdroj: vlastní)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PODSTATA ZKOUŠKY A CÍLE PRÁCE

4.1 Podstata zkoušky

Celý experiment slouží k porozumění a pochopení rozdílů v kvalitě a struktuře výtisků FDM a SLA tiskáren, porovnání vlivu orientace výtisků stereolitografické tiskárny na mechanické vlastnosti, zejména pevnost materiálu v tahu. Zkouška je zaměřena zejména na SLA výtisky, ke kterým byla pro porovnání testována zkušební tělesa připravena pomocí FDM 3D tisku. Vzhledem k tomu, že výtisky vznikají pomocí procesu fotopolymerace, experiment zároveň umožňuje porovnat mechanické vlastnosti dílů dodatečně vytvrzených v UV vytvrzovače s těmi, které nebyly zcela vytvrzeny.

4.2 Cíle práce

1. Zhotovit v 3D modelovacím programu model tělesa odpovídající normě ISO
2. Ve slicer programu 3D tiskárny vytvořit kompozici těles pro tisk v různých rovinách
3. Vytisknout testovací díly a připravit je ke zkoušce tahem
4. Provést zkoušku tahem na připravených tělesech pomocí univerzálního testovacího stroje
5. Porovnat výsledky zkoušky tahem všech dílů, vyhodnotit je a uvést závěr

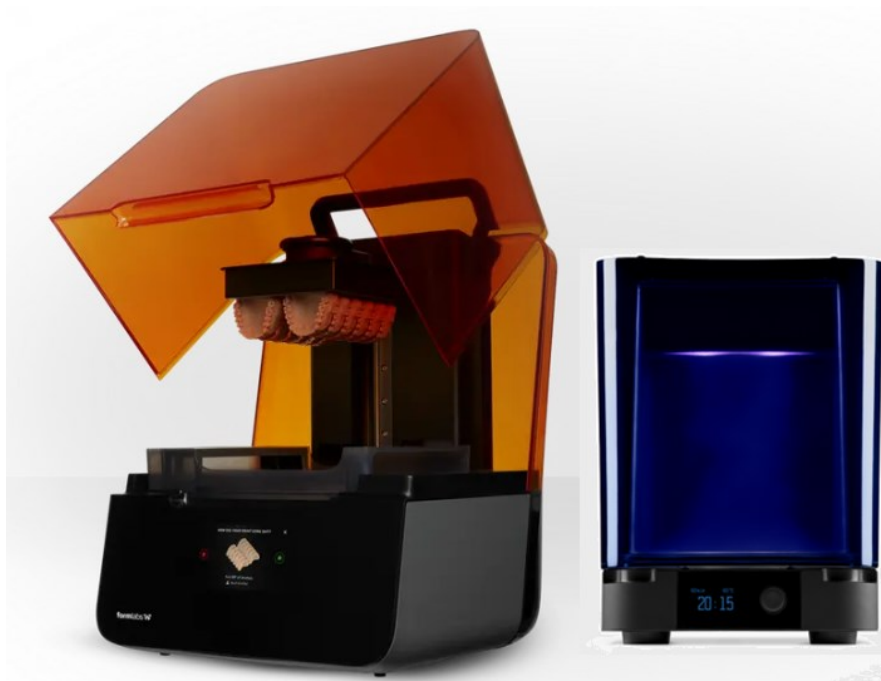
5 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MATERIÁLY

5.1 Použité přístroje

5.1.1 SLA tiskárna

SLA Tiskárna Formlabs Form 3 od společnosti Formlabs na Obr. 13 (vlevo) je průmyslová stereolitografická (SLA) 3D tiskárna využívající technologii Low Force Stereolithography, která minimalizuje síly působící na tisknuté díly během procesu. Tiskárna používá vysoce výkonný laser s výkonem 250 mW a laserovým bodem o velikosti 85 mikronů, což umožňuje vysokou přesnost a opakovatelnost tisku. Tloušťka vrstvy je nastavitelných 25 až 300 mikronů a objem tisku činí $145 \times 145 \times 185$ mm.

Form Cure na Obr. 13 (vpravo) je profesionální zařízení pro postprocesní vytvrzování SLA 3D výtisků od společnosti Formlabs, které maximalizuje mechanické vlastnosti a výkon tištěných dílů. Vytvrzuje UV zářením ze 13 diod o vlnové délce 405 nm a umožňuje nastavení teploty až do 80 °C. Dále disponuje možností nastavení časovače a otočným podstavcem zajišťující ozáření ze všech stran.



Obr. 13 Form 3 SLA tiskárna (vlevo) a Form Cure vytvrzovačka (vpravo)

(zdroj: Formlabs)

5.1.2 FDM tiskárna

Bambu Lab X1 Carbon na Obr. 14 je pokročilá FDM 3D tiskárna. Disponuje duálním extruderem s možností tisku více materiály a podporou barevného tisku. Tiskový objem činí $256 \times 256 \times 256$ mm, přičemž tiskárna pracuje s vrstvami o tloušťce od 0,05 do 0,4 mm. Konstrukce z uhlíkových vláken a pokročilý systém řízení teploty umožňuje spolehlivou výrobu přesných dílů. Tiskárna podporuje širokou škálu filamentů včetně PLA, ABS, PETG, TPU a dalších technických materiálů.



Obr. 14 Bambu Lab X1-Carbon

(zdroj: Bambu Lab)

5.1.3 Univerzální testovací stroj

Instron 3345 je univerzální testovací stroj určený pro mechanické zkoušky materiálů a komponent s maximální silou až 5 kN (viz Obr. 15). Je vybaven přesným servomotorovým pohonem a vysoce citlivými snímači síly a deformace, což umožňuje testování v tahu, tlaku, ohybu či střížení s vysokou přesností. Stroj podporuje širokou škálu příslušenství a má intuitivní softwarové rozhraní pro řízení testů a analýzu dat.



Obr. 15 Zařízení testovacího stroje v laboratoři FT UTB U15

(zdroj: vlastní)

5.1.4 Optický mikroskop Dino Lite Edge

Dino-Lite Edge AM4815ZT (viz Obr. 16) je digitální optický mikroskop s přiblížením $20\times$ až $220\times$, který umožňuje detailní pozorování různých materiálů. Mikroskop je vybaven nastavitelným polarizačním filtrem, který pomáhá eliminovat odlesky a zlepšuje kvalitu obrazu při práci s lesklými nebo průhlednými objekty, dále má mikroskop stojan s možností výškového nastavení a kruhové LED osvětlení kolem objektivu. Součástí zařízení je specializovaný software DinoCapture, který po kalibraci umožňuje přesné měření vzdáleností a rozměrů přímo na snímaném obraze. Tento mikroskop je vhodný pro široké spektrum aplikací od průmyslové kontroly až po vědecký výzkum.



Obr. 16 Optický mikroskop Dino Lite Edge

(zdroj: vlastní)

5.2 Použité materiály

Pro FDM tisk

Při tisku na FDM tiskárně Bambu Lab X1 Carbon byl použitým filamentem ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) od společnosti Filamentum. Jedná se o černý termoplastický filament určený pro 3D tisk technologií FDM. Tento materiál kombinuje dobrou pevnost, houževnatost a odolnost vůči nárazům s relativně snadnou tisknutelností. ABS díky své odolnosti vůči teplotám a chemikáliím je vhodný pro výrobu funkčních prototypů i konečných dílů v průmyslových aplikacích.

Pro SLA tisk

Clear Resin od společnosti Formlabs, použitý při tisku na SLA tiskárně Form 3, je průhledná fotopolymerní pryskyřice navržena pro výrobu detailních a opticky čistých dílů. Tento materiál nabízí vysokou přesnost tisku, hladký povrch a průhlednost, což jej činí ideálním pro aplikace vyžadující optickou kvalitu. Clear Resin má dobré mechanické vlastnosti, včetně pevnosti a tuhosti, které lze dále zvýšit postprocesním UV vytvrzováním. Díky své chemické stabilitě a nízkému smrštění během vytvrzování umožňuje výrobu rozměrově přesných a stabilních dílů.

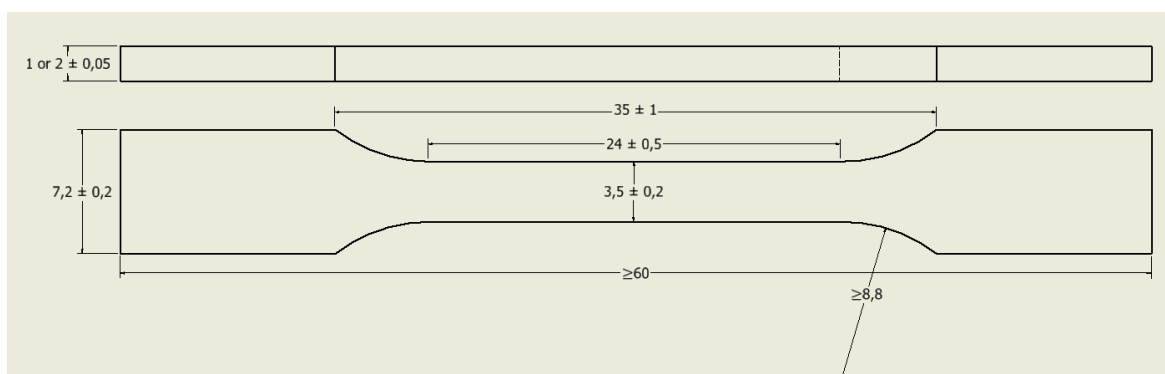
Isopropylalkohol (IPA) je běžně používané rozpouštědlo a čisticí médium v procesu postprocesingu u SLA výtisků. Slouží k odstranění nezreagované pryskyřice z povrchu tištěných dílů před jejich finálním vytvrzením. Pro tyto účely byl použit isopropylalkohol s vysokou čistotou, označovanou jako p.a., jedná se o čistotu minimálně 99,8 %. Takto vysoká čistota zajišťuje efektivní čištění bez zanechání nežádoucích nečistot a zbytků, které by mohly ovlivnit kvalitu povrchu.

6 PŘÍPRAVA A REALIZACE 3D TISKU

6.1 Zkušební těleso

Těleso určené k testování na zkoušku tahem musí mít určité normované rozměry a tvary dle typu zkoušky. V tomto případě se jedná o technickou normu pro zkoušku materiálů tahem označenou ČSN EN ISO 20753:2018 (E). [26] Podle této normy byly vybrány vhodné rozměry pro tisk na 3D tiskárně s ohledem na velikost tiskové plochy a spotřebu materiálu.

Vybrané rozměry jsou zobrazeny a popsány na Obr. 17 viz níže.



Obr. 17 Rozměry zkušebního tělesa, nárys a půdorys [mm]

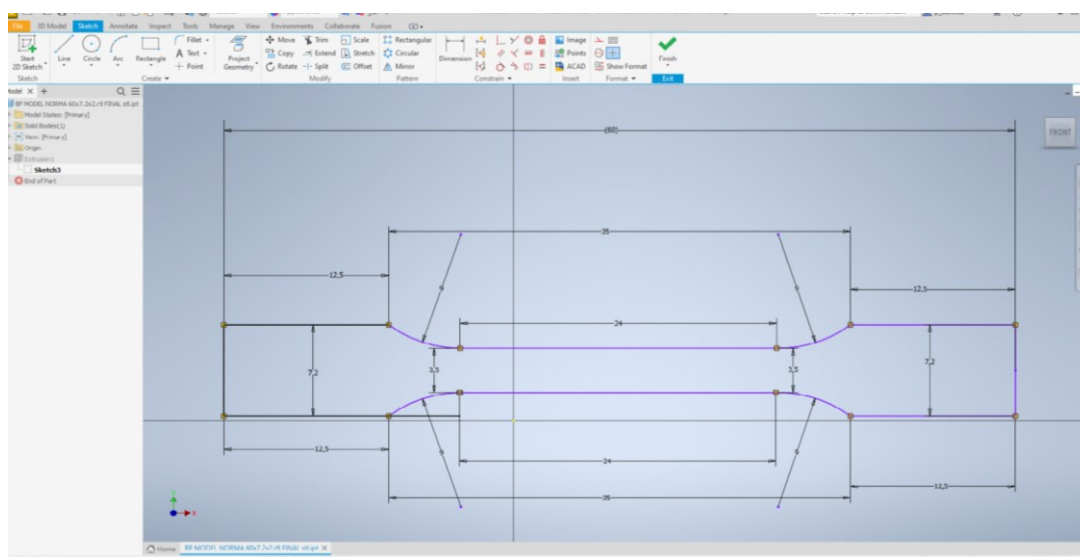
(zdroj: Vlastní obrázek z Autodesk Inventor Professional 2025)

- Maximální délka tělesa ≥ 60 mm.
- Výška tělesa v místech pro uchycení v trhacím přístroji $7,2 \pm 0,2$ mm.
- Tloušťka tělesa $2 \pm 0,05$ mm.
- Výška zúžené testované oblasti $3,5 \pm 0,2$ mm.
- Délka v zúžení v oblasti testování $24 \pm 0,5$ mm.
- Poloměr zúžení (radius ve zúžení) $\geq 8,8$ mm.

6.2 Proces tvorby 3D modelu

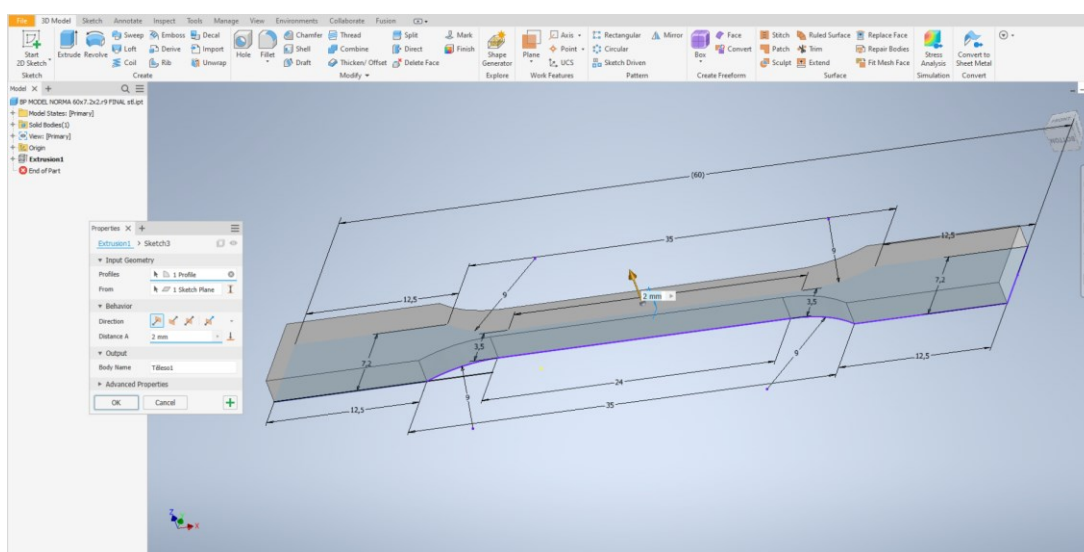
6.2.1 Autodesk Inventor

V programu Autodesk Inventor Professional 2025 byl vytvořen 3D model dle Obr. 17. Proces probíhal nejprve vytvořením 2D náčrtu (2D sketch viz Obr. 18) podle již uvedených rozměrů, a poté byla přes funkci vysunutí (extrude) vytvořena tří dimenzionální struktura s tloušťkou 2 mm (viz Obr. 19).



Obr. 18 2D sketch tělesa

(zdroj: vlastní, Autodesk Inventor Professional 2025)



Obr. 19 Extrudovaný 3D model tělesa

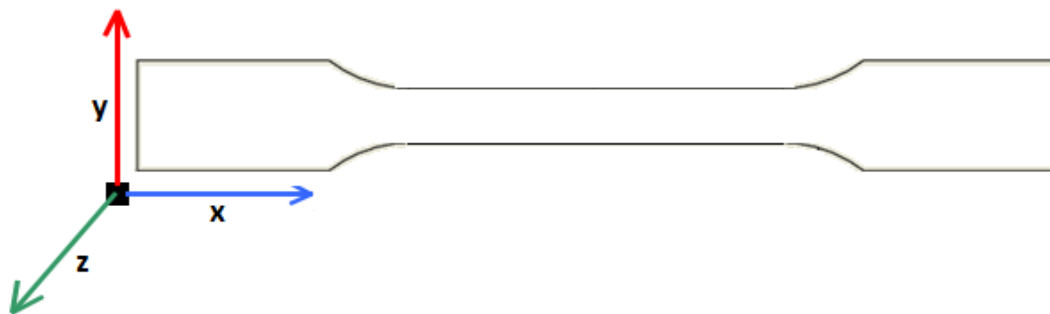
(zdroj: vlastní, Autodesk Inventor Professional 2025)

6.3 3D tisk

Před tiskem byly pro testovací těleso ve sliceru zvoleny základní tiskové úhly. Celkem se jednalo o 6 různých poloh tělesa, jež by mohly mít vliv na vlastnosti vytisknutého dílu. Orientace modelu v rovině xy byla ponechána u všech modelů stejná (viz Obr. 20), vzhledem k předpokladu, že vliv orientace v rovině tiskařské podložky je ve srovnání s rovinami xz a yz (viz Obr. 21 a Obr. 22) zanedbatelný (za předpokladu správného průběhu tisku).

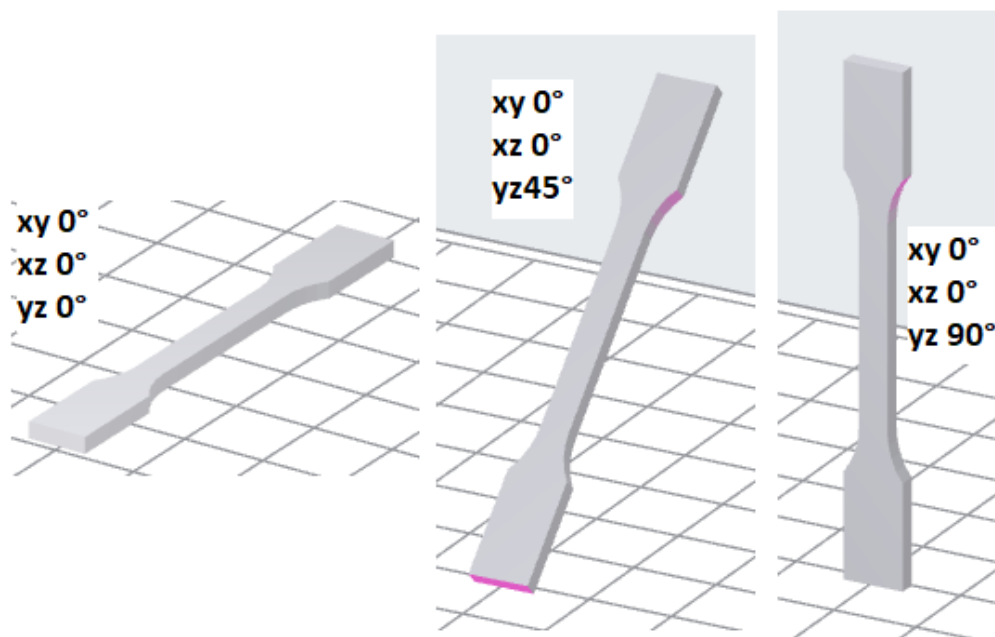
Bylo zvoleno celkem šest různých natočení modelu v osových rovinách:

- xy 0° , xz 0° yz 0°
- xy 0° , xz 0° yz 45°
- xy 0° , xz 0° yz 90°
- xy 0° , xz 90° yz 0°
- xy 0° , xz 90° yz 45°
- xy 0° , xz 45° yz 45°



Obr. 20 Těleso v osách xyz při orientaci xy 0° xz 0° yz 0°

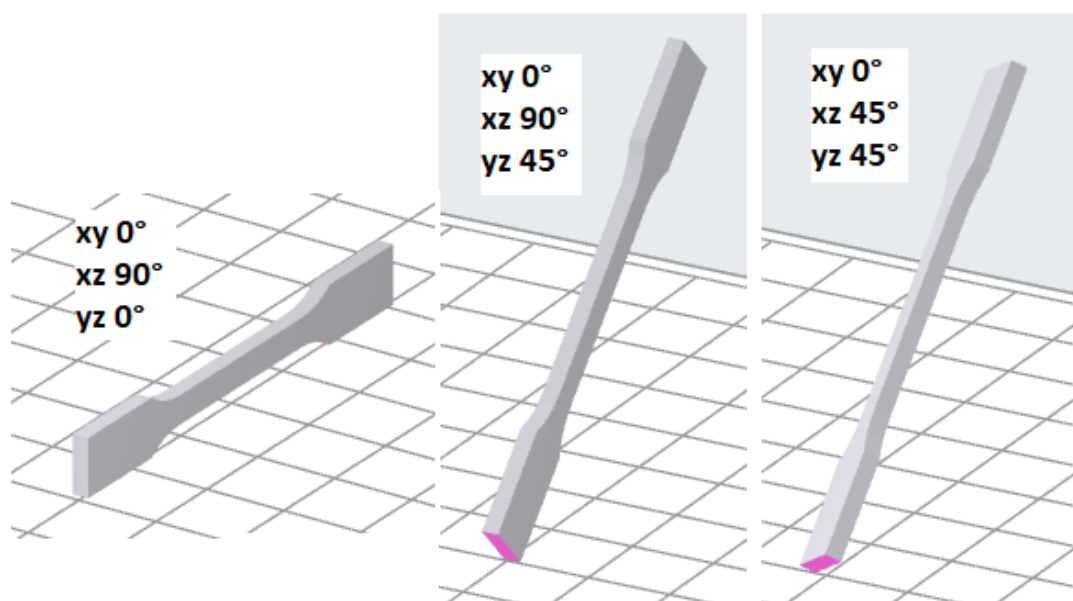
(zdroj: vlastní)



Obr. 21 Vybrané úhly,

vlevo $xy\ 0^\circ - xz\ 0^\circ - yz\ 0^\circ$, uprostřed $xy\ 0^\circ - xz\ 0^\circ - yz\ 45^\circ$, vpravo $xy\ 0^\circ - xz\ 0^\circ - yz\ 90^\circ$

(zdroj: vlastní, PreForm)



Obr. 22 Vybrané úhly,

vlevo $xy\ 0^\circ - xz\ 90^\circ - yz\ 0^\circ$, uprostřed $xy\ 0^\circ - xz\ 90^\circ - yz\ 45^\circ$, vpravo $xy\ 0^\circ - xz\ 45^\circ - yz\ 45^\circ$

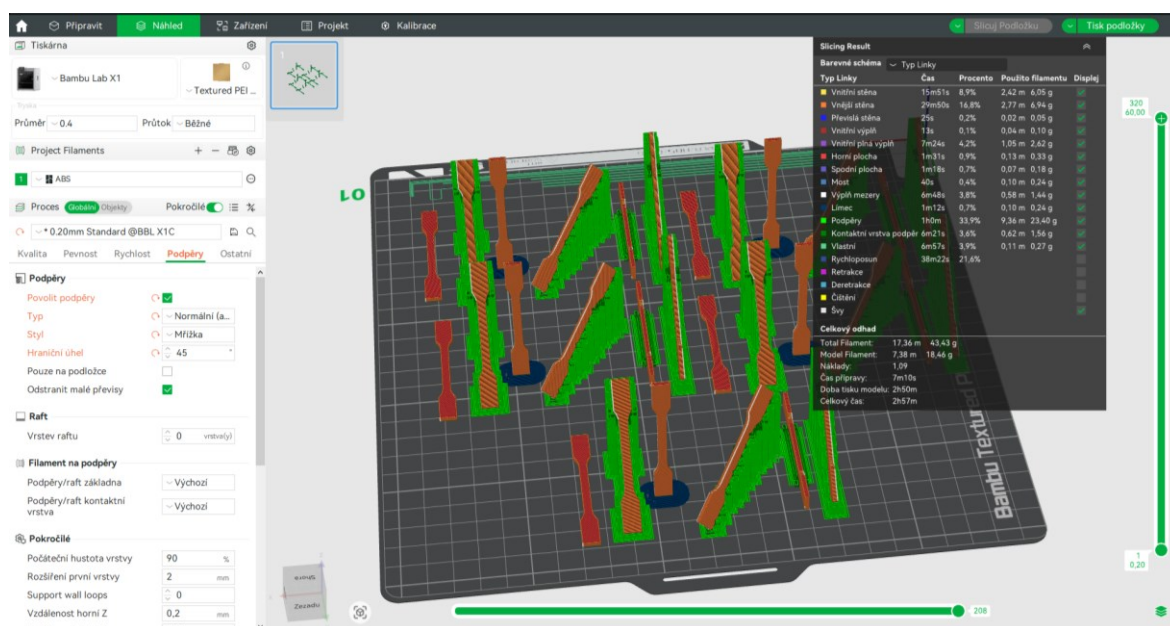
(zdroj: vlastní, PreForm)

6.3.1 Slicer Software

Na virtuální podložce slicer programu byla vytvořena kompozice pro Formlabs Form 3 SLA tiskárnu a Bambu Lab X1 FDM tiskárnu podle vybraných šesti úhlů, z nichž každá sada byla vytištěna nejméně 5× z důvodu zvýšení přesnosti a spolehlivosti výsledků naměřených hodnot.

6.3.1.1 Bambu Studio pro FDM tisk

Celkových 30 kusů testovacích těles bylo vytištěno v jednom tiskovém programu (viz Obr. 23) na texturované PEI podložce tiskárnou Bambu Lab X1 s rozměry pro tisk 256 x 256 x 256 mm. Zvoleným filamentem byl ABS. Byly zvoleny automatické mřížkové podpory, typ normální, tloušťka vrstvy byla 0,2 mm a průměr trysky byl 0,4 mm, hustota výplně byla zvolena 100 %. Celý tisk měl 320 vrstev trval 2 h 57 minut a bylo při něm spotřebováno celkové množství (včetně podpor) 43,4g ABS filamentu, samotný model 18,5g. Po vytištění bylo nutno díly odstranit z podložky a vylámat z podpor.

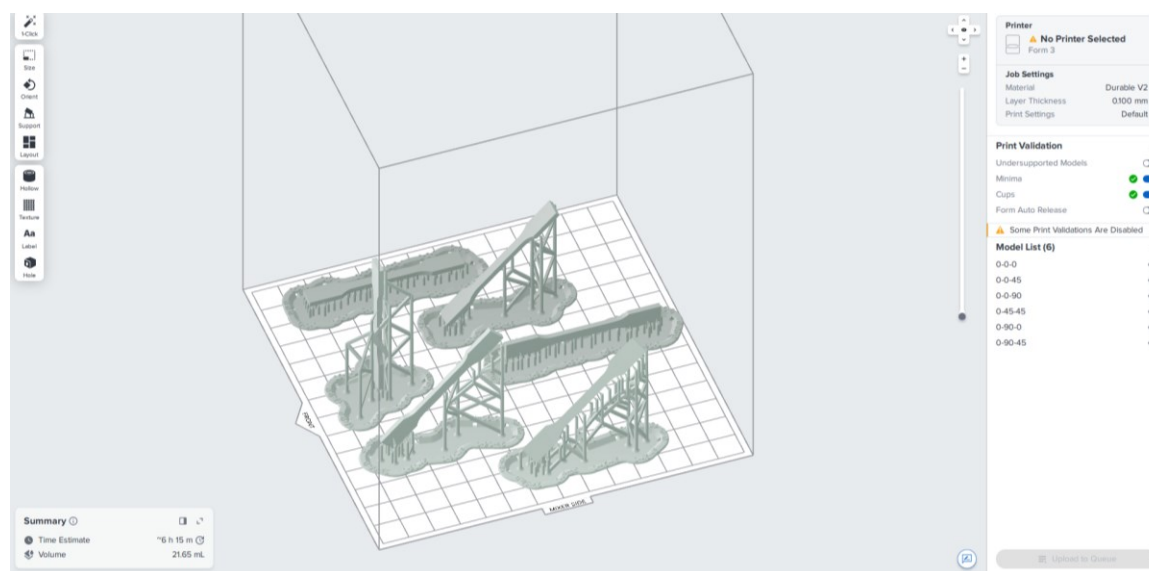


Obr. 23 Rozmístění FDM výtisků ve slicer programu Bambu Studio

(zdroj: vlastní, Bambu Studio)

6.3.1.2 PreForm pro SLA tisk

Při jednom tiskovém programu bylo vytištěno šest kusů testovacích těles (viz Obr. 24), přičemž celkem proběhlo pět cyklů tisku. Tisk probíhal na tiskárně Form 3, která nabízí tiskový prostor o rozměrech $145 \times 145 \times 185$ mm, a jako materiál byla použita pryskyřice Clear Resin V4.1. Nastavená tloušťka vrstvy byla 0,1 mm. Pro podporu modelů byly automaticky generovány podpěry typu Full Raft, které minimalizují deformace během tisku. Délka jednoho cyklu tisku činila přibližně 6 hodin a 15 minut, během kterého bylo vytištěno 666 vrstev. Spotřeba pryskyřice na jeden cyklus včetně podpor byla 21,71 ml, přičemž samotná tělesa bez podpor spotřebovala přibližně 3,9 ml materiálu. Celkem tedy tisk 30 těles, rozdělených do pěti kusů pro každý ze šesti úhlů, trval necelých 32 hodin a spotřeba pryskyřice dosáhla zhruba 110 ml, z čehož bez podpor připadalo přibližně 19,7 ml. Podpory tak tvořily značnou část spotřebovaného materiálu, což je dáno použitím plné podložky Full Raft a geometrií tisknutých těles. Nastavení parametrů odpovídalo standardním doporučením pro daný materiál a tiskárnu. Pro snížení spotřeby materiálu by bylo možné zvážit optimalizaci podpůrných struktur, což by mohlo vést ke zkrácení doby tisku a úspoře pryskyřice.



Obr. 24 Rozmístění SLA výtisků ve slicer programu PreForm

(zdroj: vlastní, PreForm)

6.3.1.3 Postproces

Po dokončení tisku bylo nutné díly opatrně odlepit z tiskové podložky a následně je očistit v lázni s izopropylalkoholem, aby se odstranil přebytečný resin a zabránilo se lepkavému povrchu. Po vyčištění byly díly zbaveny podpůrných struktur. U odstraňování podpěr bylo dbáno na to, aby nedošlo k vyštípnutí podpěry i s materiálem z testovacího tělesa, což by mohlo způsobit nepřesné výsledky při následném testování mechanických vlastností

6.3.1.4 Vytvrzování

Pro porovnání zcela vytvrzených, a ne zcela vytvrzených 3D tištěných dílů byla jedna testovací sada těles vytvrzena v zařízení vytvrzovačky (viz Obr. 25) Form Cure od společnosti Formlabs dle doporučení výrobce (viz doporučení na Obr. 10) byly díly vytvrzovány po dobu 30 minut a teplota ve vytvrzovačce byla nastavena na 60 °C.



Obr. 25 Vytvrzování těles ve vytvrzovačce Form Cure

(zdroj: vlastní)

7 ROZMĚROVÁ PŘESNOST VÝTISKŮ

Před zahájením zkoušek pevnosti byla změřena geometrická přesnost výtisků z FDM, SLA před vytvrzením a SLA po vytvrzení. U každého tělesa byly sledovány tři rozměry (dle Obr. 20): délka (osa x), výška (osa y) a tloušťka (osa z). Měření probíhalo digitálním posuvným měřidlem s rozlišením 0,01 mm a odchylkou měření $\pm 0,02$ mm.

Níže je uvedena tabulka s průměrnými rozměry testovacích těles vyrobených z ABS metodou FDM a z Clear resin (pryskyřice) pro SLA tiskárny. U SLA vzorků jsou uvedeny hodnoty jak pro nevytvrzené, tak pro tělesa po postprocesu vytvrzení (v Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3). K jednotlivým hodnotám jsou připojeny i příslušné odchylky.

Tab. 1 Naměřené hodnoty rozměrů výtisků z **FDM** tiskárny

Úhel xy/xz/yz	Délka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]
0/0/0	59,74 $\pm$ 0,02	2,01 $\pm$ 0,02	3,73 $\pm$ 0,04
0/0/45	59,60 $\pm$ 0,02	2,10 $\pm$ 0,01	3,46 $\pm$ 0,03
0/0/90	59,79 $\pm$ 0,06	1,96 $\pm$ 0,07	3,83 $\pm$ 0,05
0/90/0	59,81 $\pm$ 0,07	2,00 $\pm$ 0,02	3,54 $\pm$ 0,03
0/90/45	59,80 $\pm$ 0,03	1,97 $\pm$ 0,03	3,48 $\pm$ 0,03
0/45/45	59,78 $\pm$ 0,06	2,00 $\pm$ 0,02	3,5 $\pm$ 0,03

Tab. 2 Naměřené hodnoty rozměrů **nevytvrzených** výtisků z **SLA** tiskárny

Úhel xy/xz/yz	Délka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]
0/0/0	60,30 $\pm$ 0,02	2,37 $\pm$ 0,03	3,68 $\pm$ 0,02
0/0/45	60,30 $\pm$ 0,04	2,19 $\pm$ 0,02	3,69 $\pm$ 0,01
0/0/90	60,22 $\pm$ 0,07	2,21 $\pm$ 0,02	3,66 $\pm$ 0,02
0/90/0	60,35 $\pm$ 0,06	2,13 $\pm$ 0,02	3,78 $\pm$ 0,03
0/90/45	60,35 $\pm$ 0,06	2,18 $\pm$ 0,03	3,62 $\pm$ 0,03
0/45/45	60,35 $\pm$ 0,04	2,19 $\pm$ 0,04	3,68 $\pm$ 0,06

Tab. 3 Naměřené hodnoty rozměrů vytvrzených výtisků z SLA tiskárny

Úhel xy/xz/yz	Délka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]
0/0/0	60,11 ± 0,04	2,35 ± 0,03	3,68 ± 0,02
0/0/45	60,23 ± 0,02	2,14 ± 0,04	3,66 ± 0,01
0/0/90	60,17 ± 0,06	2,16 ± 0,09	3,64 ± 0,02
0/90/0	60,18 ± 0,06	2,11 ± 0,03	3,77 ± 0,03
0/90/45	60,20 ± 0,05	2,15 ± 0,02	3,61 ± 0,03
0/45/45	60,24 ± 0,04	2,18 ± 0,03	3,67 ± 0,06

Na základě tabulek naměřených rozměrů testovacích těles vyrobených metodou SLA lze jednoznačně pozorovat, že po vytvrzení v UV vytvrzovače dochází u všech sledovaných rozměrů ke zmenšení hodnot oproti nevytvrzeným vzorkům (viz Tab. 2 a Tab. 3). Nejvýraznější změna byla zaznamenána u tloušťky těles, kde smrštění dosahuje přibližně 1,3 %, zatímco u délky a výšky se smrštění pohybuje kolem 0,2 % a 0,3 %. Tento jev odpovídá očekávanému chování fotopolymerních materiálů, kdy během dodatečné polymerace dochází k dalšímu zesíťování a následnému objemovému smrštění materiálu.

Z dat rovněž vyplývá, že rozdíly v rozměrových změnách nejsou výrazně závislé na orientaci tisku, což potvrzuje stabilitu procesu bez ohledu na zvolený úhel. Všechny sledované rozměry vykazují po vytvrzení konzistentní pokles bez výraznějších odchylek mezi jednotlivými orientacemi. Lze tedy konstatovat, že smrštění po vytvrzení je u běžných rozměrů testovaných těles předvídatelné a rovnoměrné.

Rozměry z FDM tiskáren (viz Tab. 1) nejsou celkově tak přesné a konzistentní jako u SLA tiskáren, kde díky technologii fotopolymerace a přesnému řízení vytvrzování dochází k vyšší rozměrové přesnosti a opakovatelnosti.

Z praktického hlediska je třeba s tímto jevem počítat zejména při návrhu dílů s vyššími nároky na rozměrovou přesnost. U menších těles může mít relativní smrštění větší vliv na výslednou přesnost, zatímco u větších dílů je tento efekt v absolutních číslech méně významný. Celkově výsledky potvrzují, že postprocesní vytvrzení má na rozměrovou přesnost SLA výtisků měřitelný, ale predikovatelný vliv.

8 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

8.1 Průběh zkoušky

Univerzální testovací stroj Instron 3345 (viz Obr. 11) byl nastaven tak, aby hodnoty prodloužení a zatížení byly nulové, do pneumatických čelistí byl rovněž vložen testovací díl a byl spuštěn program měření, jenž probíhal až do přetržení. Byly testovány díly z FDM a SLA tiskárny, přičemž u SLA dílů byly testovány díly vytvrzené na 30 min a 60 °C ve vytvrzovačce a díly nevytvrzené. Všechny díly byly označeny podle orientace, ve které byly vytištěny. Celkem šlo o 6 různých orientací, z nichž každá byla vytištěna celkem 5×.

9 VYHODNOCENÍ DAT TAHOVÉ ZKOUŠKY

V této kapitole jsou prezentovány a analyzovány výsledky mechanické zkoušky provedené na testovacích tělesech vyrobených FDM a SLA technologiemi 3D tisku. Hlavními sledovanými parametry byly pevnost v tahu (maximální napětí, které materiál vydrží před přetržením), Youngův modul pružnosti (míra tuhosti materiálu), protažení při maximálním zatížení a maximální zatížení (nejvyšší dosažená síla při zkoušce). Tyto hodnoty poskytují komplexní přehled o mechanickém chování materiálu při namáhání tahem a umožňují vzájemné porovnání různých technologií i nastavení tisku.

Naměřené hodnoty jsou přehledně uvedeny v tabulkách v jednotlivých podkapitolách, kompletní data, ze kterých se vycházelo jsou uvedena v příloze. Tab. 4 obsahuje výsledky testů výtisků z FDM tiskárny při různých orientacích tisku. V dalších částech jsou uvedeny výsledky pro výtisky ze SLA tiskárny, a to jak pro nevytvrzené, tak vytvrzené vzorky (viz Tab. 5 a Tab. 6). Každá tabulka zahrnuje průměrné hodnoty jednotlivých mechanických parametrů včetně odchylek, což umožňuje podrobné srovnání vlivu technologie, materiálu i orientace tisku na výsledné vlastnosti výtisků.

V následujících podkapitolách jsou jednotlivé výsledky podrobněji rozebrány a diskutovány s ohledem na zjištěné trendy a případné rozdíly mezi jednotlivými skupinami vzorků.

9.1 FDM výtisky

V Tab. 4 jsou uvedeny získané výsledné průměrné hodnoty pro šest úhlů. Z dat je patrné, že mechanické vlastnosti FDM výtisků jsou výrazně ovlivněny úhlem tisku. Nejvyšších hodnot pevnosti a tuhosti je dosaženo při orientaci $xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$, zatímco při jiných úhlech dochází k poklesu těchto parametrů a ke zvýšení deformace, což potvrzuje anizotropii materiálu vyrobeného FDM technologií. Nejhorší vlastnosti měly výtisky tištěné pod úhly $xy\ 0^\circ$, $xz\ 45^\circ$, $yz\ 45^\circ$. Výsledky ukazují, že orientace vrstev má zásadní vliv na celkové mechanické chování výtisků. Tato skutečnost vyplývá z anizotropní povahy materiálu vyrobeného technologií FDM, kdy jednotlivé vrstvy nejsou mezi sebou chemicky vázány jako u SLA, ale jsou pouze mechanicky spojeny v důsledku natavení a následného ochlazení materiálu. V důsledku toho dochází ke snížení pevnosti a tuhosti ve směru kolmém na vrstvy, což se projevuje zejména při nevýhodných orientacích tisku. Skutečnost, že orientace tisku, má vliv na tyto vlastnosti výtisků je nutné zohlednit při návrhu dílů pro praktické použití.

Při testování výtisků z FDM tiskárny bylo potvrzeno, že anizotropní struktura výtisku negativně ovlivňuje jeho fyzikální vlastnosti a testovací tělesa mají vlastnosti podmíněné úhlu, při kterém jsou vytištěna.

Tab. 4 Výsledné hodnoty výtisků z FDM tiskárny

Úhel tisku xy/xz/yz	Youngův modul pružnosti (MPa)	Pevnost v tahu (MPa)	Tahová deformace (%)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Maximální Zatížení (N)
0/0/0	1120 ± 30	26 ± 3	7 ± 1,3	3,7 ± 0,3	210 ± 10
0/0/45	800 ± 150	13 ± 1	2,7 ± 0,5	2,7 ± 0,5	105 ± 10
0/0/90	800 ± 150	9 ± 1	1,9 ± 0,3	1,9 ± 0,3	74 ± 10
0/90/0	1040 ± 60	30 ± 2	8 ± 3	4,3 ± 0,2	260 ± 20
0/90/45	1010 ± 40	8 ± 2	1,8 ± 0,3	1,8 ± 0,3	70 ± 10
0/45/45	950 ± 70	10 ± 4	2,2 ± 0,5	2,2 ± 0,5	80 ± 30

9.2 SLA výtisky

Níže jsou uvedeny výsledky měření mechanických vlastností SLA výtisků v různých stavech a orientacích tisku (v Tab. 5 a Tab. 6). U technologie SLA během vytvrzování vznikají chemické vazby mezi jednotlivými vrstvami, což způsobuje, že mechanické vlastnosti jsou téměř stejné ve všech směrech a méně závislé na orientaci tisku než u FDM. Dále bylo pozorováno, že postprocesní UV vytvrzování má významný vliv na zlepšení pevnosti a tuhosti vzorků.

9.2.1 Nevytvrzené výtisky z SLA tiskárny

Tab. 5 shrnuje výsledky mechanických zkoušek nevytvrzených vzorků vyrobených pomocí SLA tiskárny při různých orientacích tisku. U všech sledovaných parametrů – Youngův modul pružnosti, pevnost v tahu, tahová deformace, protažení při maximálním zatížení a maximální zatížení – jsou hodnoty poměrně konzistentní napříč různými úhly tisku. Rozdíly v jednotlivých hodnotách jsou nízké a pohybují se v rámci rozptylové odchylky měření. Youngův modul pružnosti se pohybuje v rozmezí 1050–1110 MPa, pevnost v tahu kolísá mezi 37 a 39 MPa. Tahová deformace a protažení při maximálním zatížení vykazují pouze malé rozdíly. Při porovnání protažení při maximálním zatížení u vytvrzených (Tab. 6) a nevytvrzených (Tab. 5) těles je zřejmé, že nevytvrzené SLA výtisky dosahují vyšších hodnot tohoto parametru než vzorky vytvrzené, což svědčí o jejich větší

tažnosti a nižší křehkosti. Maximální zatížení se pohybuje kolem 300 N. Celkově nevytvrzené výtisky vykazují stabilní mechanické vlastnosti bez významné anizotropie.

Tab. 5 Výsledné hodnoty **nevytvrzených** výtisků z SLA tiskárny

Úhel tisku xy/xz/yz	Youngův modul pružnosti (MPa)	Pevnost v tahu (MPa)	Tahová deformace (%)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Maximální Zatížení (N)
0/0/0	1110 ± 80	37 ± 3	17 ± 4	6,7 ± 0,2	300 ± 20
0/0/45	1050 ± 150	38 ± 3	24 ± 7	6 ± 3	310 ± 20
0/0/90	1010 ± 120	37 ± 3	24 ± 4	9 ± 3	290 ± 30
0/90/0	1070 ± 70	38 ± 2	24 ± 4	7 ± 0,4	300 ± 20
0/90/45	1030 ± 140	39 ± 4	25 ± 5	7 ± 3	310 ± 30
0/45/45	1060 ± 80	38 ± 3	24 ± 4	7 ± 0,2	300 ± 20

9.2.2 Vytvrzené výtisky z SLA tiskárny

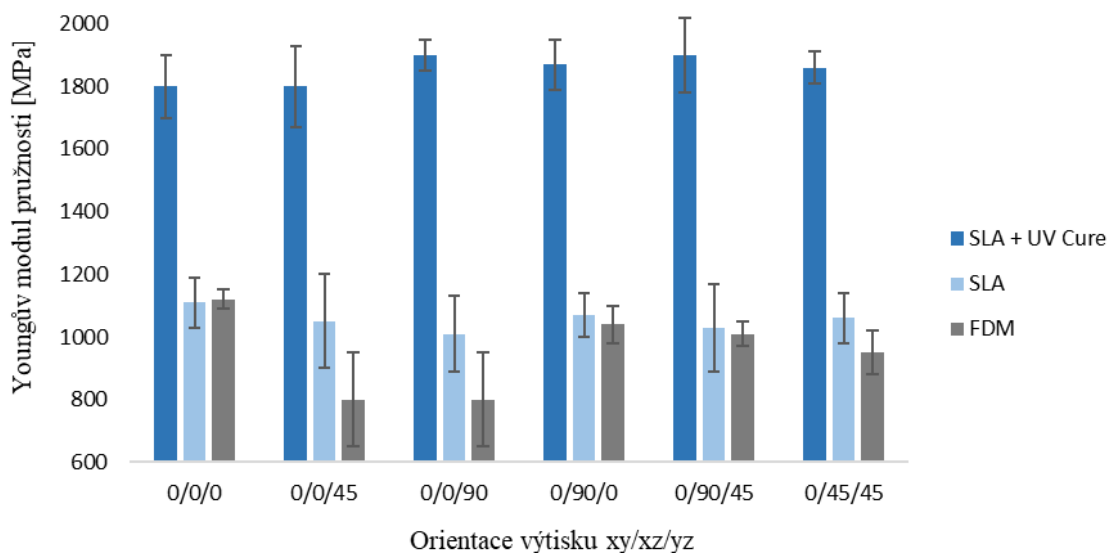
Tab. 6 obsahuje výsledky mechanických zkoušek na vzorcích, které byly po tisku dodatečně vytvrzeny v UV vytvrzovačce. Ve srovnání s nevytvrzenými vzorky je patrný výrazný nárůst všech sledovaných mechanických parametrů. Přestože výrobce materiálu (Formlabs) deklaruje nárůst mechanických vlastností až o 80 % po vytvrzení (viz Obr. 10), v našem případě došlo ke zlepšení Youngova modulu pouze o 53 %. Tento rozdíl může být způsoben rozdílnými podmínkami tisku nebo metodikou měření. Celkově však i takto dosažený nárůst potvrzuje pozitivní vliv UV postprocesingu na mechanické vlastnosti materiálu. Pevnost v tahu dosahuje 75–79 MPa, což je zhruba dvojnásobek oproti nevytvrzeným vzorkům. Tahová deformace a protažení při maximálním zatížení se snížily, což svědčí o zlepšení houževnatosti materiálu po vytvrzení. Maximální zatížení se pohybuje kolem 630 N, což potvrzuje významný vliv postprocesního vytvrzení na mechanickou odolnost. Rozdíly mezi jednotlivými orientacemi tisku jsou i zde minimální, což opět dokazuje, že vytvrzené SLA výtisky vykazují velmi dobrou izotropii mechanických vlastností.

Tab. 6 Výsledné hodnoty vytvrzených výtisků z SLA tiskárny

Úhel tisku xy/xz/yz	Youngův modul pružnosti (Mpa)	Pevnost v tahu (Mpa)	Tahová deformace (%)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Maximální Zatížení (N)
0/0/0	1800 ± 100	75 ± 2	7,0 ± 1,5	6,4 ± 0,9	600 ± 20
0/0/45	1800 ± 130	76 ± 3	10 ± 2	7,1 ± 0,7	610 ± 20
0/0/90	1900 ± 50	76 ± 7	7,0 ± 1,9	6,4 ± 1,1	620 ± 40
0/90/0	1870 ± 80	79 ± 2	8,5 ± 1	7,2 ± 0,3	630 ± 10
0/90/45	1880 ± 120	78 ± 2	10,0 ± 1,7	7,0 ± 0,4	620 ± 20
0/45/45	1860 ± 50	76 ± 6	9 ± 3	6,6 ± 1,1	630 ± 10

9.2.3 Srovnání Youngova modulu pro FDM a SLA výtisky

Bylo provedeno srovnání Youngova modulu pružnosti u všech testovaných vzorků, a to jak pro výtisky z FDM tiskárny, tak pro výtisky ze SLA tiskárny v různých stavech (nevytvrzené a vytvrzené v UV vytvrzovače). Porovnávány byly vzorky vytištěné při různých orientacích vrstev, aby bylo možné vyhodnotit vliv technologie tisku, postprocesního vytvrzení a orientace na výslednou tuhost materiálu.



Graf 1 Srovnání Youngova modulu testovaných výtisků

Z grafu je patrné, že nejvyšších hodnot Youngova modulu dosahují vzorky SLA po vytvrzení v UV vytvrzovače, a to napříč všemi orientacemi tisku. Tyto hodnoty se pohybují kolem 1800–1900 MPa, což je téměř dvojnásobek oproti nevytvrzeným SLA vzorkům a výrazně více než u FDM výtisků. U nevytvrzených SLA vzorků se Youngův modul

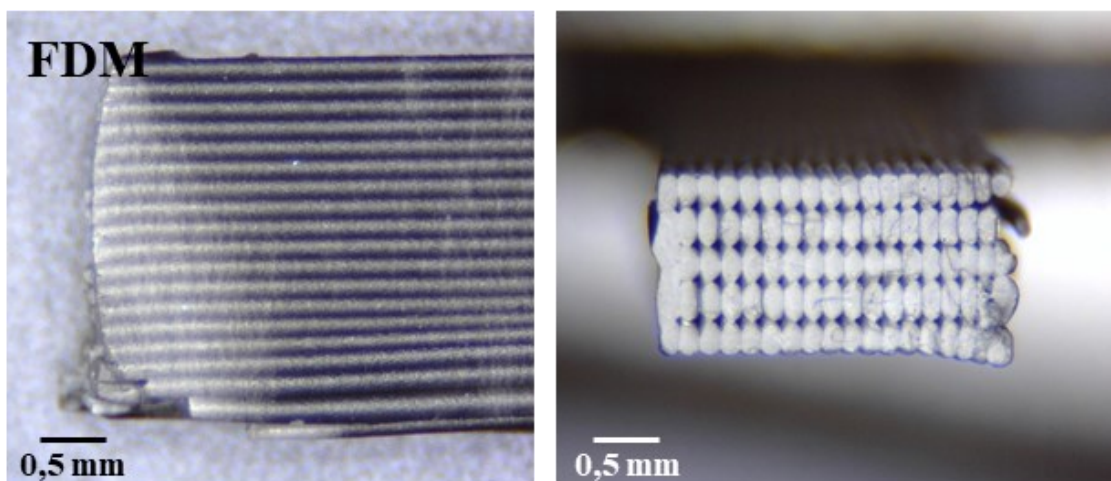
pohybuje kolem 1010–1110 MPa, zatímco u FDM výtisků jsou hodnoty ještě nižší, přibližně v rozmezí 800–1120 MPa. U SLA technologie, a to jak u vytvrzených, tak nevytvrzených vzorků, není orientace tisku zásadním faktorem ovlivňujícím tuhost materiálu, protože během fotopolymerizačního procesu vznikají chemické vazby mezi jednotlivými vrstvami, které zajišťují téměř izotropní mechanické vlastnosti v tahu.[22] Naproti tomu u FDM technologie vrstvy nejsou chemicky spojeny, ale pouze mechanicky přiléhají k sobě, což vede k výrazné anizotropii a větší závislosti mechanických vlastností na orientaci vrstev.[22] Celkově výsledky potvrzují, že postprocesní vytvrzení má zásadní pozitivní vliv na mechanické vlastnosti SLA výtisků v tahu a že SLA technologie nabízí vyšší a stabilnější tuhost materiálu ve srovnání s FDM tiskem.

9.2.4 Analýza lomové plochy pomocí optické mikroskopie

Na optickém mikroskopu Dino Lite Edge (viz Obr. 16) byla provedena detailní analýza lomových ploch roztržených 3D výtisků při zvětšení 75×. Na Obr. 26 a Obr. 27 jsou uvedeny fotografie lomových ploch vzorků vyrobených technologií FDM a SLA s orientací tisku v rovinách $xy\ 0^\circ$, $xz\ 90^\circ$ a $yz\ 0^\circ$, zachycené jak z pohledu z vrchní strany, tak přímo čelem k lomové ploše.

Na levé fotografii Obr. 26 je patrné bělavé zabarvení původně černého ABS filamentu v blízkosti lomové plochy. Toto zabarvení je důsledkem plastické deformace materiálu při protažení a porušení vzorku. Při mechanickém namáhání dochází k mikroskopickému narušení struktury polymerních řetězců a jejich orientaci. Tato orientace a deformace způsobí, že dochází k mikroskopickým změnám v indexu lomu v namáhané části materiálu. Tento jev, zvaný jako stress-whitening (napětím indukované bělení) je charakteristický pro amorfní termoplasty, jako je ABS, a indikuje oblasti s intenzivní plastickou deformací před samotným lomením.[27]

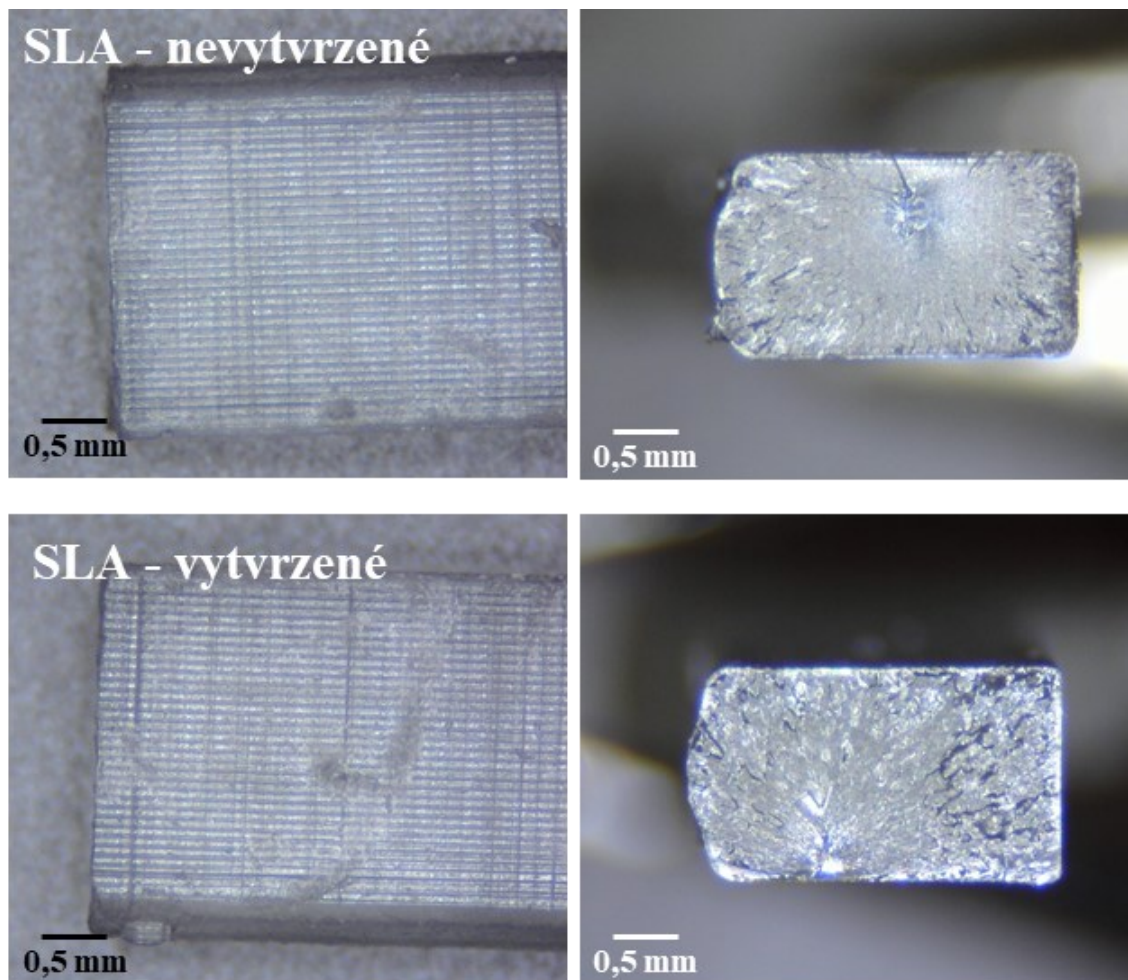
Na fotografiích vpravo jsou patrné jednotlivé vrstvy filamentu, které byly během FDM tisku spojeny tavením. Je možné identifikovat oblasti, kde je materiál plně vyplněn filamentem, ale také místa s drobnými mezerami či nedostatky, které pravděpodobně vznikly v důsledku drobných chyb během tisku. Takové anizotropní nerovnoměrnosti mají zásadní dopad na mechanické vlastnosti výsledného výtisku.



Obr. 26 Foto lom u FDM při zvětšení 75×

(zdroj: vlastní, mikroskop Dino Lite Edge)

Na Obr. 27 jsou zobrazeny lomové plochy SLA výtisků. V horní řadě nevytvrzené vzorky, ve spodní řadě vzorky po UV vytvrzení. U vytvrzených vzorků je patrný výrazně křehký, tříštivý lom, který působí dojem celoplošného popraskání. Povrch lomu je výrazněji strukturovaný a při zvýšeném osvětlení se jeví třpytivý, což je způsobeno odrazem světla od mnoha drobných lomových ploch vzniklých křehkým porušením materiálu. Tento charakter lomu je důsledkem vyšší míry zesíťování polymerních řetězců po vytvrzení, což snižuje schopnost materiálu se plasticky deformovat a vede ke křehkému porušení. Naopak u nevytvrzených vzorků je lomová plocha hladší, méně členitá, s minimálními známkami tříštivosti.



Obr. 27 SLA výtisky, nevytvrzené (nahore) vytvrzené (dole) za různého osvětlení při zvětšení 75×

(zdroj: vlastní, mikroskop Dino Lite Edge)

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat vlastnosti 3D tištěných dílů vyrobených pomocí stereolitografie (SLA), se zaměřením na mechanické vlastnosti, strukturu a vliv vytvrzení. Pro srovnání byla zahrnuta také technologie FDM, což umožnilo poukázat na klíčové rozdíly v materiálových a mechanických vlastnostech výtisků.

U FDM tisku byla prokázána anizotropie mechanických vlastností v závislosti na orientaci tisku zkušebních těles. Mikroskopická analýza odhalila nedokonalé spojení vláken filamentu, mezery ve vrstvách a nerovnoměrné porušení vláken materiálu. Zbělení v okolí lomových ploch potvrdilo plastickou deformaci polymerních řetězců.

U SLA výtisků byla potvrzena izotropie mechanických vlastností, které lze přisuzovat chemickému zesíťování během fotopolymerace. Nevytvrzené vzorky vykazovaly více než dvojnásobné protažení před porušením a průhlednost, což souvisí s neúplnou polymerací materiálu. Po UV vytvrzení došlo k nárůstu Youngova modulu až o 53 %, což neodpovídá údajům, které uvádí výrobce pryskyřice. Tento rozdíl může být způsoben rozdílnými podmínkami tisku nebo metodikou měření. Pevnost v tahu se zvýšila na dvojnásobek původních hodnot. Zároveň bylo u vytvrzených výtisků pozorováno smrštění rozměrů v důsledku dodatečné polymerace.

Mikroskopická analýza vytvrzených SLA vzorků ukázala křehký, tříštivý lom s členitou strukturou, zatímco nevytvrzené vzorky měly hladší lomovou plochu a vyšší plasticitu.

Z výsledků vyplývá, že SLA technologie poskytuje díky izotropní struktuře a postprocesnímu vytvrzování předvídatelné mechanické vlastnosti, což ji činí vhodnou pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a pevnost. FDM technologie je naopak vhodnější pro rychlou výrobu s nižšími nároky na mechaniku, avšak s nutností zohlednit anizotropii a možné defekty ve vrstvení.

Práce splnila stanovené cíle, byla potvrzena izotropie SLA výtisků z pohledu mechanických vlastností a význam vytvrzování pro jejich zlepšení. Zároveň bylo poukázáno na důležitost vhodné orientace modelu při tisku modelů na FDM tiskárně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] I. Nishida, E. Yamada, H. Nakatsuji, Automated Process Planning System for Machining Injection Molding Dies Using CAD Models of Product Shapes in STL Format, *International Journal of Automation Technology* 17 (2023) 619–626. <https://doi.org/10.20965/ijat.2023.p0619>.
- [2] M. Szilvási-Nagy, G. Mátyási, Analysis of STL Files, in: *Math Comput Model*, Elsevier Ltd, 2003: pp. 945–960. [https://doi.org/10.1016/s0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/s0895-7177(03)90079-3).
- [3] M. Geiger, W. Steger, M. Greul, M. Sindel, Multiphase Jet Solidification - a new process towards metal prototypes and a new data interface, 1994. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/2152/68581>.
- [4] F.E. Jabri, A. Ouballouch, L. Lasri, R. El Alaiji, A comprehensive review of polymer materials and selective laser sintering technology for 3D printing, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 118 (2023) 5–17. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7286>.
- [5] B. Gao, H. Zhao, L. Peng, Z. Sun, A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM), *Micromachines* (Basel) 14 (2023). <https://doi.org/10.3390/mi14010057>.
- [6] I. Campbell, D. Bourell, I. Gibson, Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age, *Rapid Prototyp J* 18 (2012) 255–258. <https://doi.org/10.1108/13552541211231563>.
- [7] P. Kamble, P.D. Scholar, S. Chavan, K.P. Karunakaran, Multi-jet Fluid Deposition in 3D Printing: A Review, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/328019378>.
- [8] N.S.S. Manoj, S. Akhil, ED 3152 Precision Processes and Systems Literature Review Hybrid Additive Manufacturing Contents, 2018. https://akhilsathuluri.github.io/pdfs/hybrid_manufacturing.pdf.
- [9] R. Udriou, I.C. Braga, Polyjet technology applications for rapid tooling, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011>.
- [10] D. Syrlybayev, B. Zharylkassyn, A. Seisekulova, M. Akhmetov, A. Perveen, D. Talamona, Optimisation of strength properties of FDM printed parts—A critical review, *Polymers* (Basel) 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13101587>.
- [11] R. Chand, V.S. Sharma, R. Trehan, M.K. Gupta, M. Sarikaya, Investigating the Dimensional Accuracy and Surface Roughness for 3D Printed Parts Using a Multi-jet Printer, *J Mater Eng Perform* 32 (2023) 1145–1159. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07153-0>.
- [12] X. Wei, N. Zou, L. Zeng, Z. Pei, PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network, *Annals of 3D Printed Medicine* 5 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2022.100049>.
- [13] J. Huang, Q. Qin, J. Wang, A review of stereolithography: Processes and systems, *Processes* 8 (2020). <https://doi.org/10.3390/PR8091138>.
- [14] M. Mukhtarkhanov, A. Perveen, D. Talamona, Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting, *Micromachines* (Basel) 11 (2020). <https://doi.org/10.3390/mi11100946>.
- [15] H. Quan, T. Zhang, H. Xu, S. Luo, J. Nie, X. Zhu, Photo-curing 3D printing technique and its challenges, *Bioact Mater* 5 (2020) 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>.
- [16] K. Han, N.F. Aktaş, Properties and Applications of Resin Types Used in Sla 3D Printers, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/388715653>.
- [17] L. Schittecatte, V. Geertsens, D. Bonamy, T. Nguyen, P. Guenoun, From resin formulation and process parameters to the final mechanical properties of 3D printed

- acrylate materials, *MRS Commun* 13 (2023) 357–377. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00352-3>.
- [18] H. Sukanto, W.W. Raharjo, D. Ariawan, J. Triyono, M. Kaavesina, Epoxy resins thermosetting for mechanical engineering, *Open Engineering* 11 (2021) 797–814. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0078>.
 - [19] A. Shundo, S. Yamamoto, K. Tanaka, Network Formation and Physical Properties of Epoxy Resins for Future Practical Applications, *JACS Au* 2 (2022) 1522–1542. <https://doi.org/10.1021/jacsau.2c00120>.
 - [20] C. Riccio, M. Civera, O. Grimaldo Ruiz, P. Pedullà, M. Rodriguez Reinoso, G. Tommasi, M. Vollaro, V. Burgio, C. Surace, Effects of Curing on Photosensitive Resins in SLA Additive Manufacturing, *Applied Mechanics* 2 (2021) 0. <https://doi.org/10.3390/applmech2040055>.
 - [21] X. He, L. Zang, Y. Xin, Y. Zou, An overview of photopolymerization and its diverse applications, *Applied Research* 2 (2023). <https://doi.org/10.1002/appl.202300030>.
 - [22] FormLabs Inc, Validating Isotropy in SLA 3D Printing, <https://formlabs.com/eu/blog/isotropy-in-sla-3d-printing/> (2014).
 - [23] J.C. Moller, R.J. Berry, H.A. Foster, On the nature of epoxy resin post-curing, *Polymers (Basel)* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/polym12020466>.
 - [24] FormLabs Inc, FDM vs. SLA vs. SLS: 3D Printing Technology Comparison, https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/?Srsltid=AfmBOoosCvujDGLEElSjmw9VHF0Do5ySa_Xg-TgfnuESXdDd2Kbt8eT2 (2024).
 - [25] FormLabs Inc, A Guide to Post-Curing Stereolithography (SLA) 3D Prints, 2022.
 - [26] Česká Agentura pro Standardizaci, ČSN EN ISO 20753 (640226), Plasty - Zkušební Těleso (2024).
 - [27] I.M. Ward, J. Sweeney, Mechanical Properties of Solid Polymers, 3rd ed., Wiley, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119967125>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zobrazení sférického objektu ve formátu STL	16
Obr. 2 Schéma MJS tiskárny.....	19
Obr. 3 Schéma DMLS a SLM tiskárny	20
Obr. 4 Schéma FDM tiskárny	24
Obr. 5 Schéma DLP tiskárny	27
Obr. 6 Schéma LCD tiskárny	27
Obr. 7 Schéma SLA tiskárny	28
Obr. 8 Anizotropní (vlevo) a izotropní (vpravo) struktura FDM a SLA	33
Obr. 9 Foto z digitálního mikroskopu Dino Lite Edge pro porovnání vrstev FDM (vlevo, zvětšení 95x) a SLA (vpravo, zvětšení 90x)	33
Obr. 10 Doporučené nastavení pro post cure vytvrzení pro Clear Resin od výrobce Formlabs Inc.....	34
Obr. 11 Trhací zařízení (Univerzální testovací stroj)	36
Obr. 12 Graf pevnost a lom materiálu.....	38
Obr. 13 Form 3 SLA tiskárna (vlevo) a Form Cure vytvrzovačka (vpravo)	41
Obr. 14 Bambu Lab X1-Carbon.....	42
Obr. 15 Zařízení testovacího stroje v laboratoři FT UTB U15	43
Obr. 16 Optický mikroskop Dino Lite Edge.....	44
Obr. 17 Rozměry zkušebního tělesa, nárys a půdorys [mm]	46
Obr. 18 2D sketch tělesa	47
Obr. 19 Extrudovaný 3D model tělesa.....	47
Obr. 20 Těleso v osách xyz při orientaci xy 0° xz 0° yz 0°	48
Obr. 21 Vybrané úhly,.....	49
Obr. 22 Vybrané úhly,.....	49
Obr. 23 Rozmístění FDM výtisků ve slicer programu Bambu Studio.....	50
Obr. 24 Rozmístění SLA výtisků ve slicer programu PreForm	51
Obr. 25 Vytvrzování těles ve vytvrzovačce Form Cure.....	52
Obr. 26 Foto lom u FDM při zvětšení 75×	61
Obr. 27 SLA výtisky, nevytvrzené (nahore) vytvrzené (dole) za různého osvětlení při zvětšení 75×	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Naměřené hodnoty rozměrů výtisků z FDM tiskárny	53
Tab. 2 Naměřené hodnoty rozměrů nevytvrzených výtisků z SLA tiskárny	53
Tab. 3 Naměřené hodnoty rozměrů vytvrzených výtisků z SLA tiskárny	54
Tab. 4 Výsledné hodnoty výtisků z FDM tiskárny	57
Tab. 5 Výsledné hodnoty nevytvrzených výtisků z SLA tiskárny	58
Tab. 6 Výsledné hodnoty vytvrzených výtisků z SLA tiskárny	59

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

STL Zkratka pro stereolitografie; označuje také formát souboru

MJS Material Jetting System

DMLS Direct Metal Laser Sintering

SLM Selective Laser Melting

SLS Selective Laser Sintering

FDM Fused Deposition Modeling

MJM Material Jetting Manufacturing

DLP Digital Light Processing

LCD Liquid Crystal Display

SLA Stereolithography Apparatus

UV Ultrafialové záření

MPa Megapascal

N Newton

σ Sigma

ε Epsilon

SEZNAM PŘÍLOH

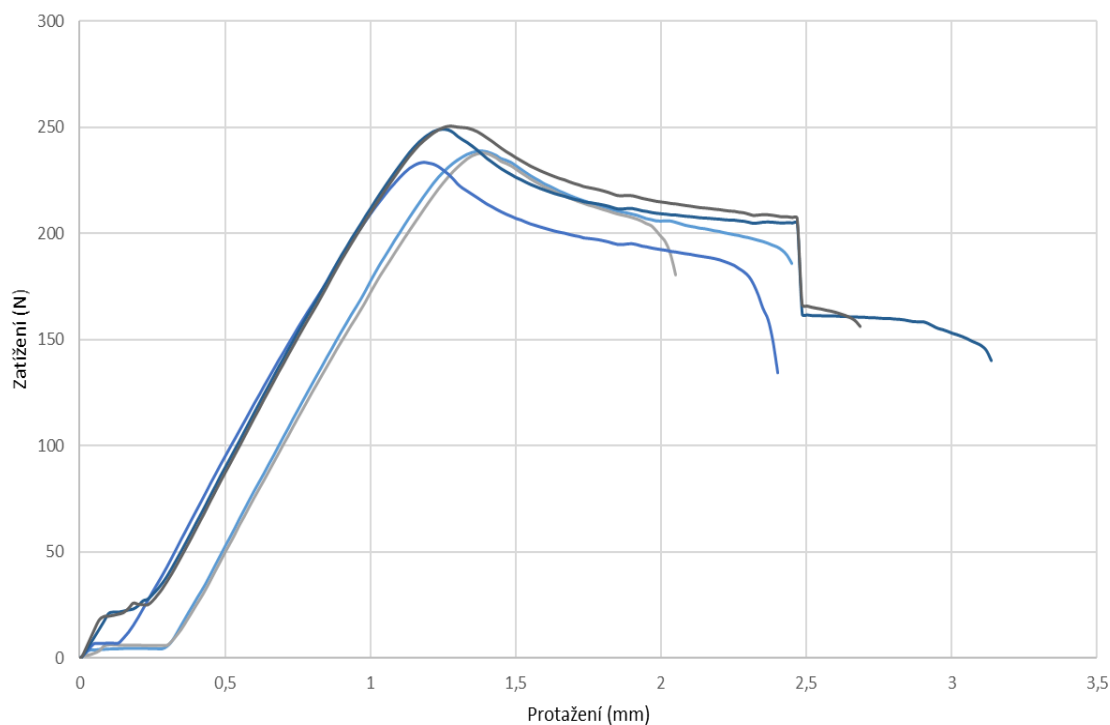
Příloha P I: Grafy a hodnoty testovaných těles

PŘÍLOHA P I: GRAFY A HODNOTY TESTOVANÝCH TĚLES

Grafy závislosti zatížení [N] na protažení [mm] a hodnoty FDM výtisků:

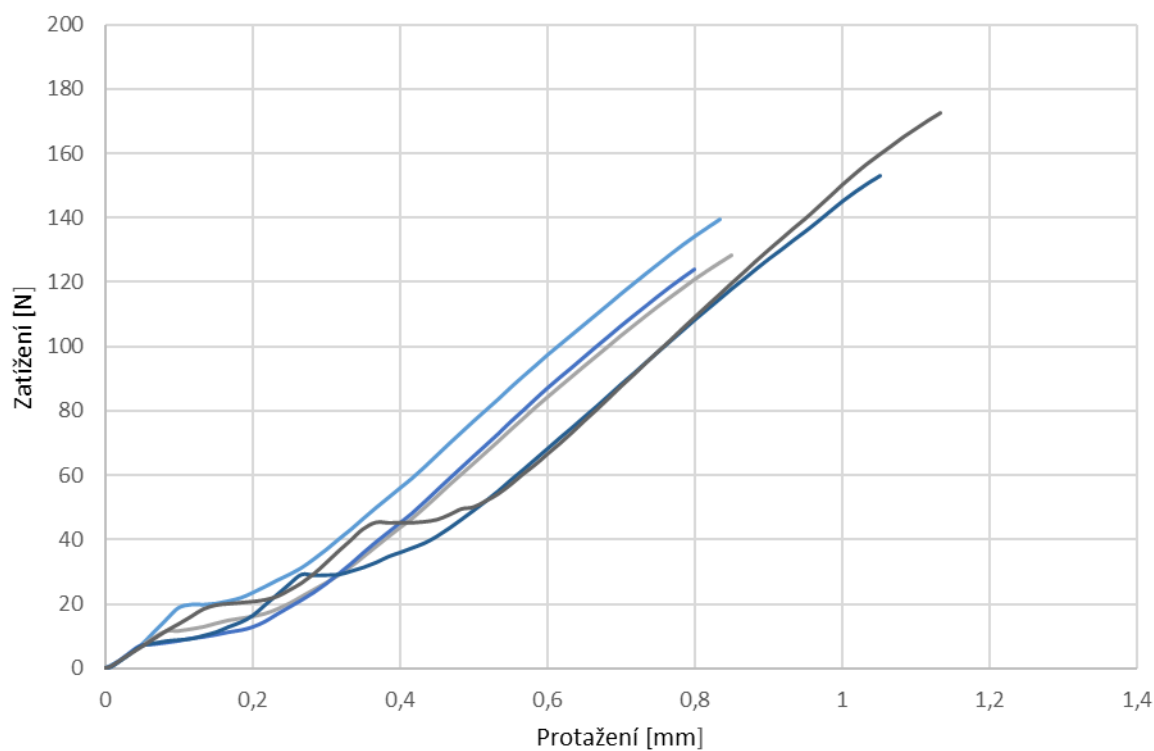
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	222,1606	3,95	1144,8	7	27,77
2	219,4353	3,95	1130,6	5,76	27,14
3	210,1284	3,38	1084,2	6,48	26,27
4	206,5193	3,57	1131	8,96	21,7
5	210,2378	3,62	1126,8	7,67	26,28
Střední hodnota	213,6963	3,694	1123,48	7,174	25,832
Standardní odchylka	6,722762	0,25026	22,99852	1,219336	2,394404



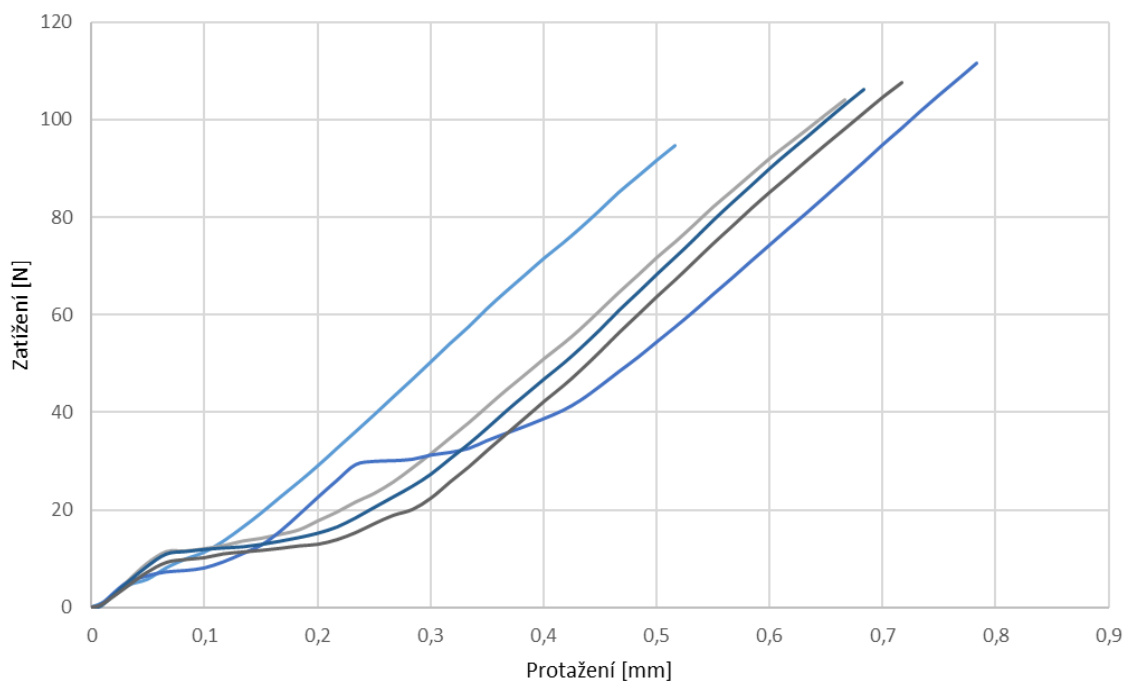
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	103,947	2,38	1024	2,38	12,99
2	100,4896	2,43	705,9	2,43	12,56
3	99,84857	2,29	728,2	2,29	12,48
4	108,2172	3	722,2	3	13,53
5	110,9115	3,24	942,8	3,24	13,86
Střední hodnota	104,6828	2,668	824,62	2,668	13,084
Standardní odchylka	4,816169	0,424229	147,9865	0,424229	0,601939



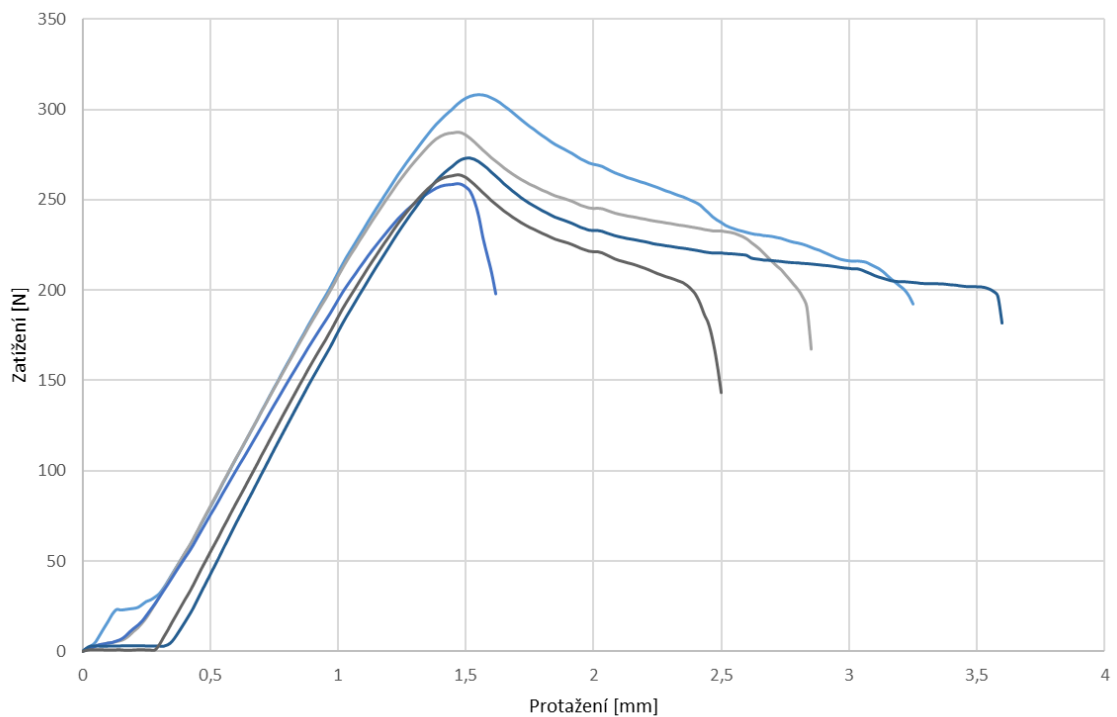
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 90°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	74,62042	1,48	943	1,48	9,33
2	75,52775	1,91	774,7	1,91	9,44
3	64,85079	2,24	932,2	2,24	8,11
4	77,48846	1,95	659,1	1,95	9,69
5	79,20597	2,05	623,1	2,05	9,9
Střední hodnota	74,33868	1,92	786,42	1,92	9,29
Standardní odchylka	5,59296	0,28109	148,9885	0,28109	0,69912



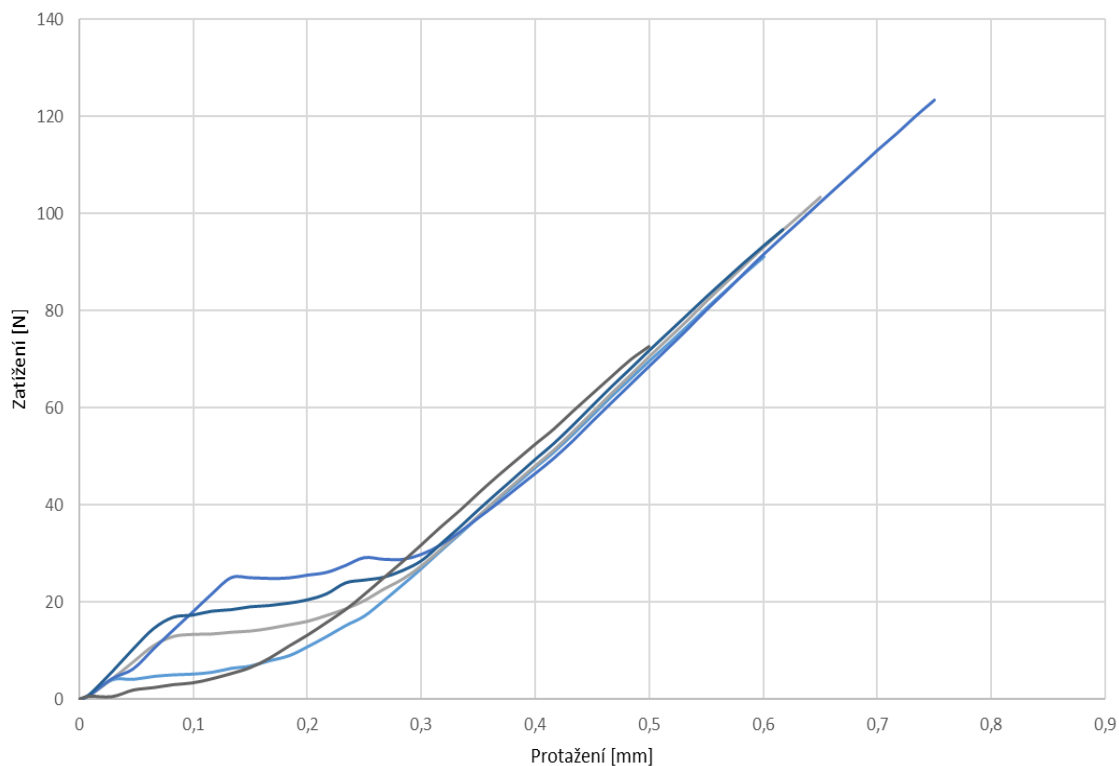
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	267,2918	4,43	1068	9,29	30,37
2	265,4096	4,19	1059	8,1	33,18
3	237,8974	4,19	953,9	4,62	29,74
4	256,4174	4,34	1076	10,24	27,75
5	249,2784	4,19	1053	6,95	31,16
Střední hodnota	255,2589	4,268	1039,225	7,84	30,44
Standardní odchylka	12,10742	0,111445	57,30564	2,18464	1,984754



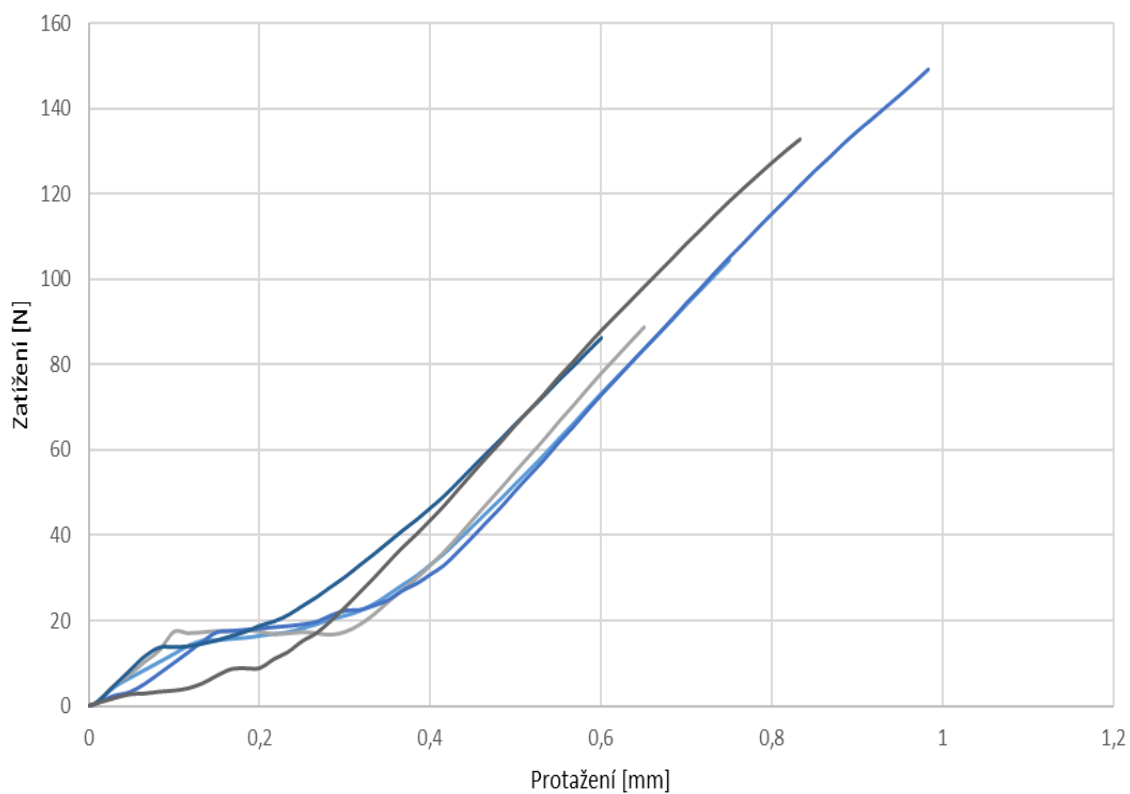
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	68,99203	1,72	1017	1,72	8,62
2	72,59121	1,86	1031	1,86	9,07
3	81,72803	2,14	1026	2,14	10,22
4	60,53429	1,76	1027	1,76	7,57
5	53,24129	1,43	958	1,43	6,66
Střední hodnota	67,41737	1,78	1011,8	1,78	8,43
Standardní odchylka	10,98159	0,25813	30,50738	0,25813	1,3727



Pro těleso v rovině xy 0°, xz 45°, yz 45°:

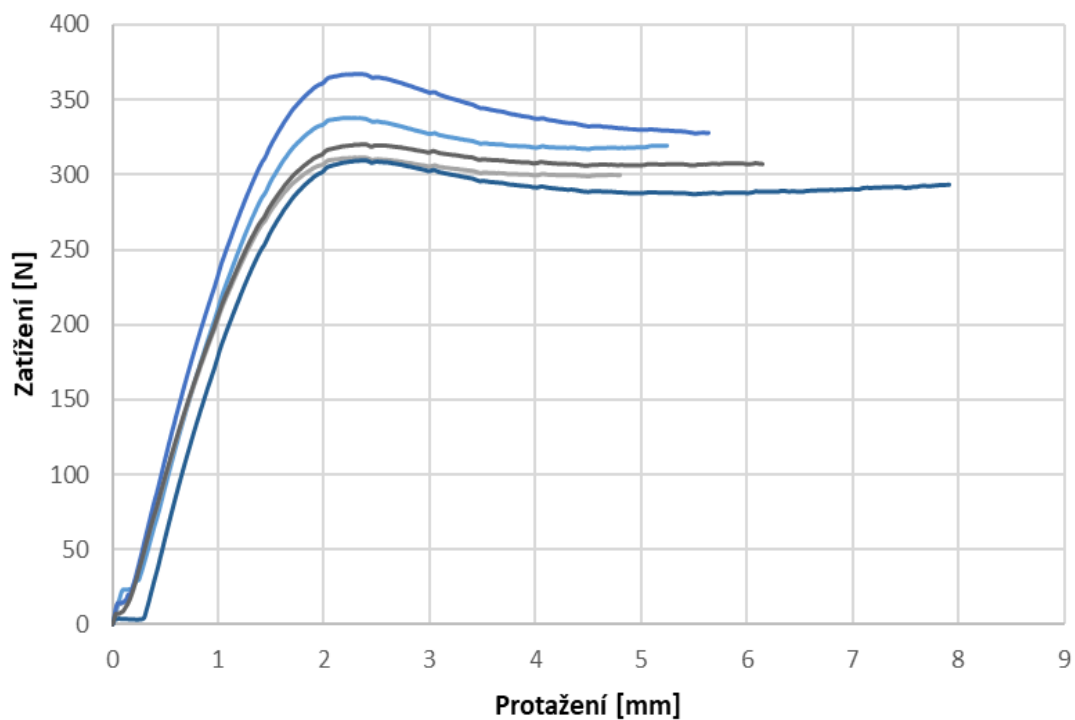
Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	69,32469	2,14	873,7	2,14	8,67
2	56,17913	1,86	994	1,86	7,02
3	110,9922	2,81	1001	2,81	13,87
4	54,04092	1,72	888,5	1,72	6,76
5	109,7412	2,38	984,5	2,38	13,72
Střední hodnota	80,05563	2,18	948,34	2,18	10,01
Standardní odchylka	28,28564	0,43563	61,88177	0,43563	3,5357



Grafy závislosti zatížení [N] na protažení [mm] a hodnoty SLA nevytvrzených výtisků:

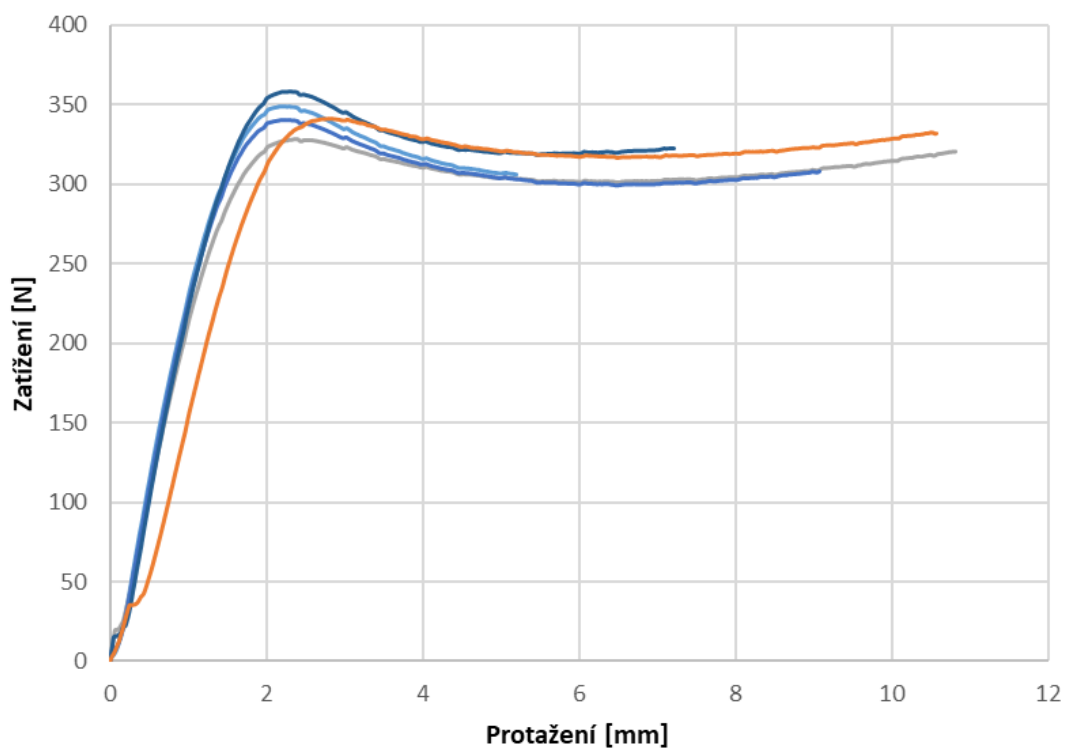
Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	295,1763	6,52	1131,1	15	36,87
2	278,7715	6,72	1033,2	13,71	34,85
3	333,5892	6,52	1185,3	16,1	41,68
4	290,0402	6,76	1178,4	22,62	36,25
5	292,8593	6,81	1037,9	17,57	36,61
Střední hodnota	298,0873	6,67	1113,2	17	37,25
Standardní odchylka	20,82096	0,13496	73,87813	3,44709	2,59411



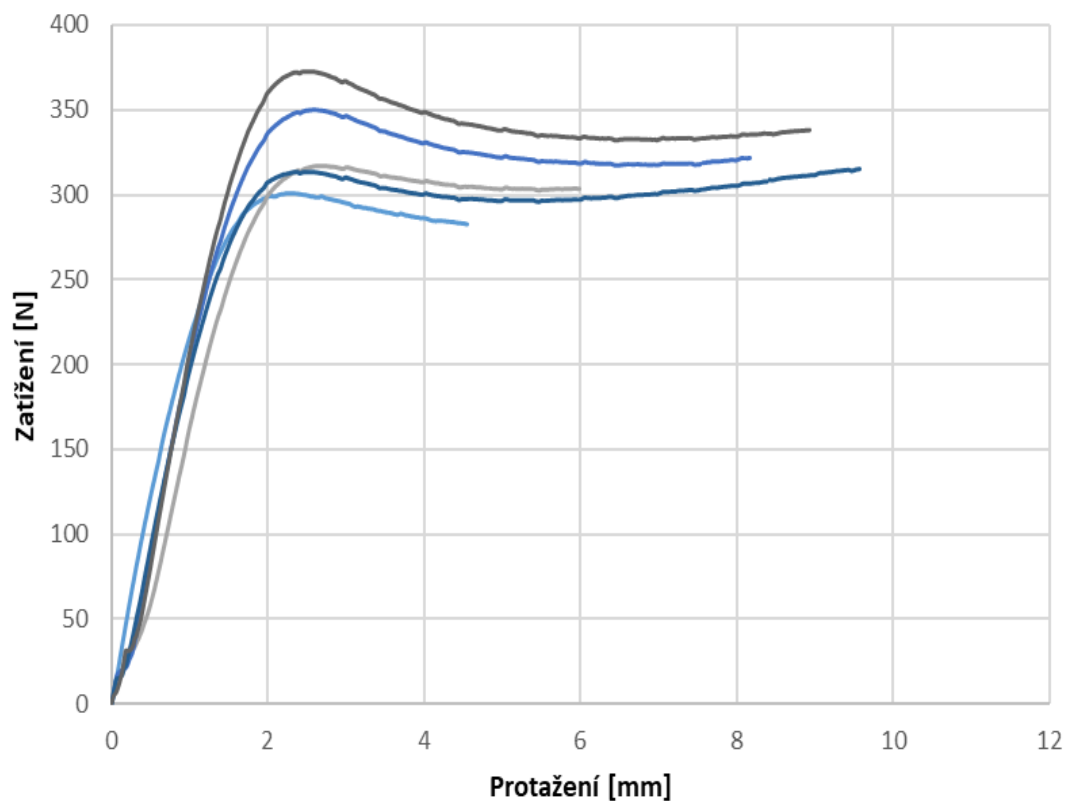
Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	326,5319	6,29	1131,101	14,86	40,81
2	289,4825	6,81	1033,231	30,86	36,18
3	314,1951	6,43	1185,265	25,95	39,26
4	322,3496	6,57	1178,405	20,62	40,29
5	284,7149	1,38	1037,892	29,62	35,16
Střední hodnota	307,4548	5,496	1113,179	24,382	38,34
Standardní odchylka	19,17894	2,308913	73,87812	6,646068	2,526252



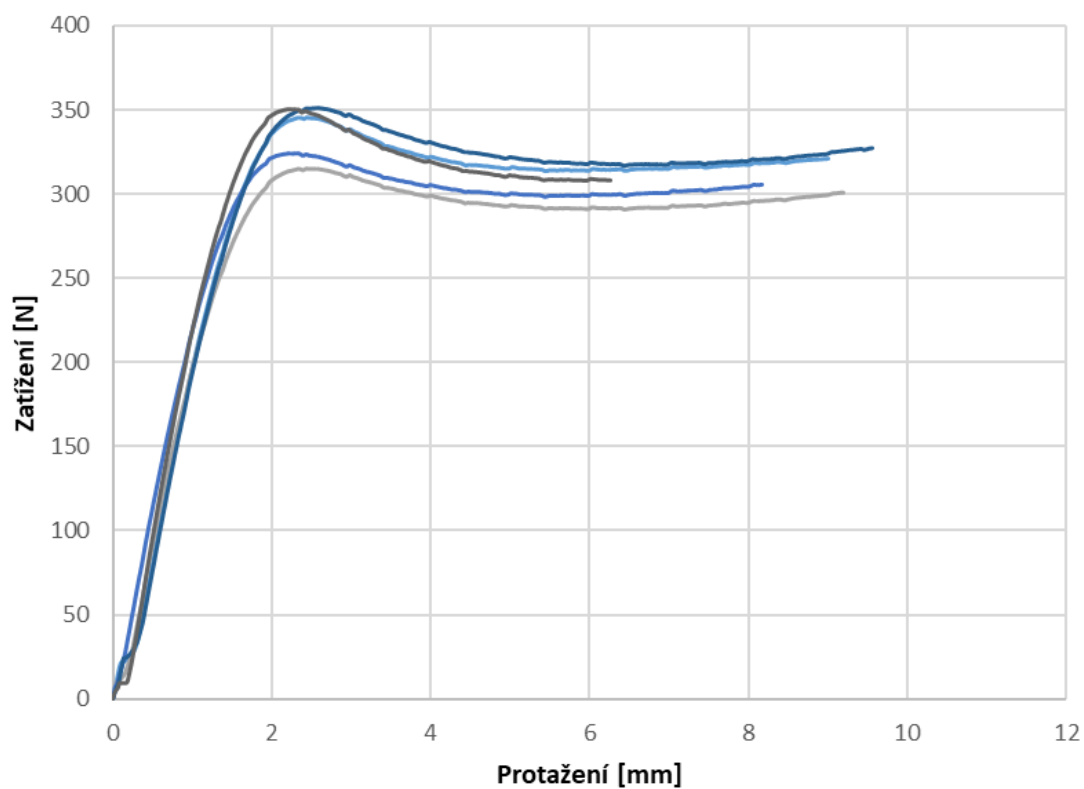
Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 90°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	284,9618	13,21	1092,792	19,73	35,62
2	269,7165	7,81	1009,131	17,1	33,71
3	309,9844	7,38	1006,58	21,52	38,74
4	280,629	7,38	1091,073	23,95	35,07
5	323,9554	7,38	1167,812	25,52	40,49
Střední hodnota	293,8494	8,63	1073,478	21,57	36,73
Standardní odchylka	22,37675	2,56406	67,44882	3,34379	2,79688



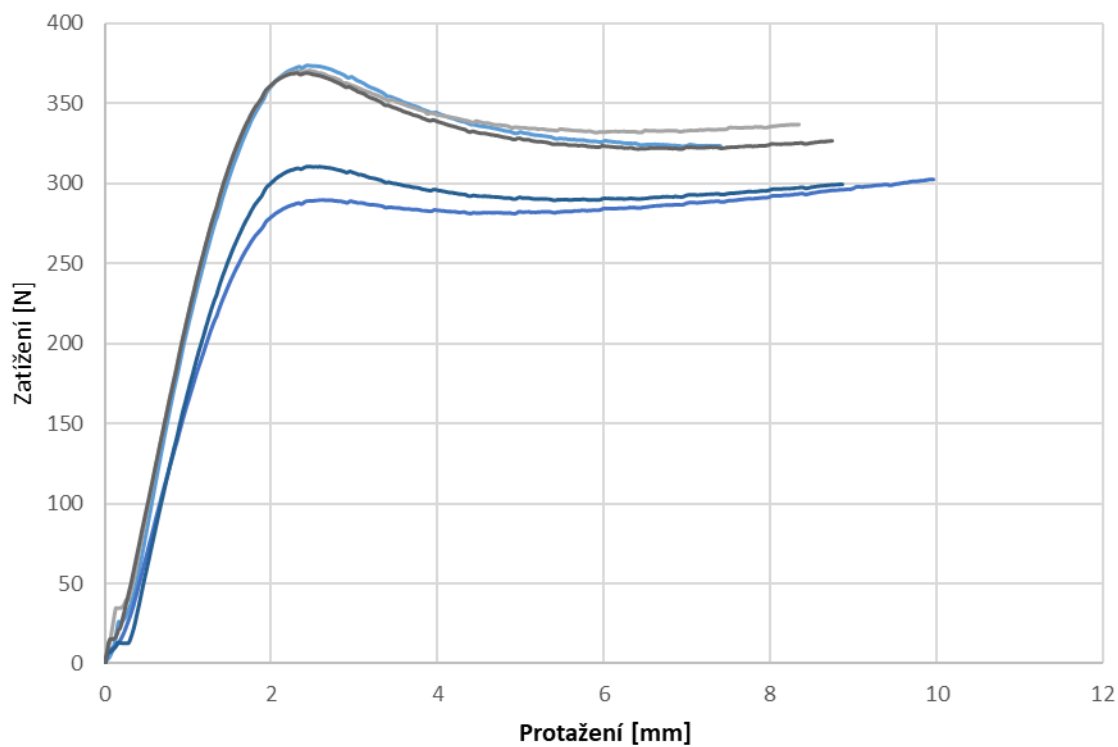
Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	302,5679	6,95	1092,8	25,72	37,79
2	283,6935	6,95	1009,1	26,29	35,43
3	300,1209	6,67	1006,6	23,34	37,51
4	306,3219	7,38	1091,1	27,33	38,28
5	325,8221	6,34	1167,8	17,9	40,73
Střední hodnota	303,7053	6,86	1073,5	24,12	37,95
Standardní odchylka	15,0882	0,38785	67,44882	3,76903	1,8983



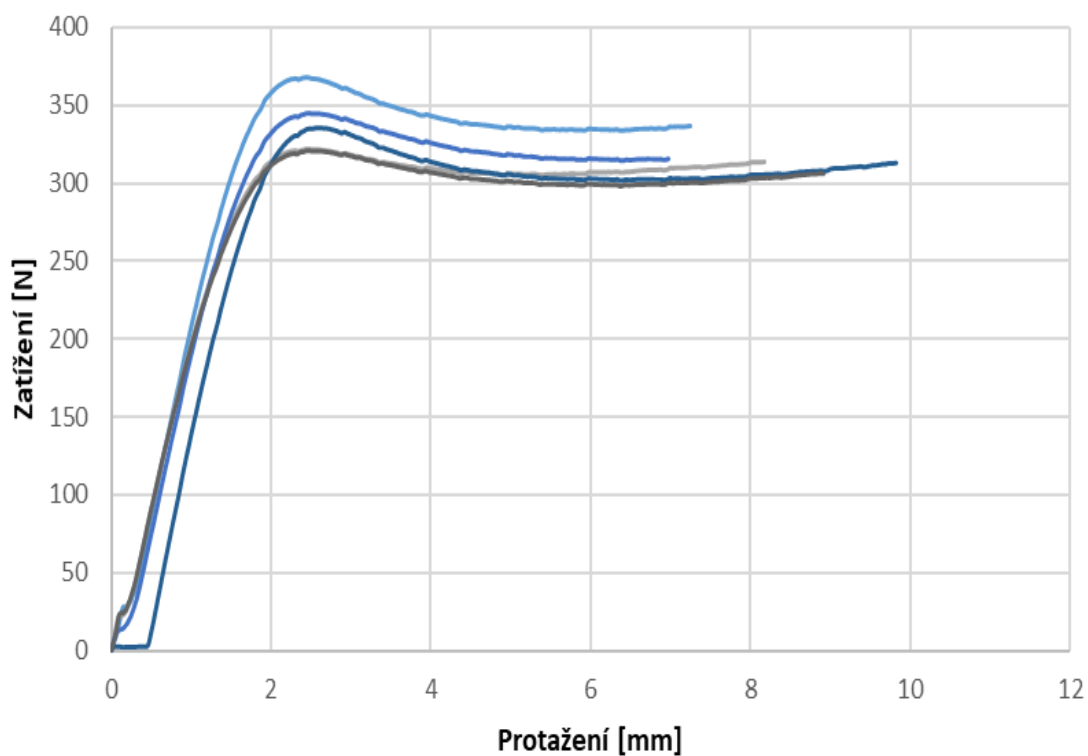
Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	329,1129	6,95	1118,9	21,15	41,13
2	316,5783	2,73	930,7	19,54	39,57
3	281,84	10,35	885,4	31,72	34,78
4	282,8152	7	1039,7	25,33	35,35
5	333,8768	6,95	1087,1	25	41,73
Střední hodnota	308,8446	6,796	1012,36	24,55	38,51
Standardní odchylka	25,02	2,704271	100,5877	4,71261	3,24976



Pro nevytvrzené těleso v rovině xy 0°, xz 45°, yz 45°:

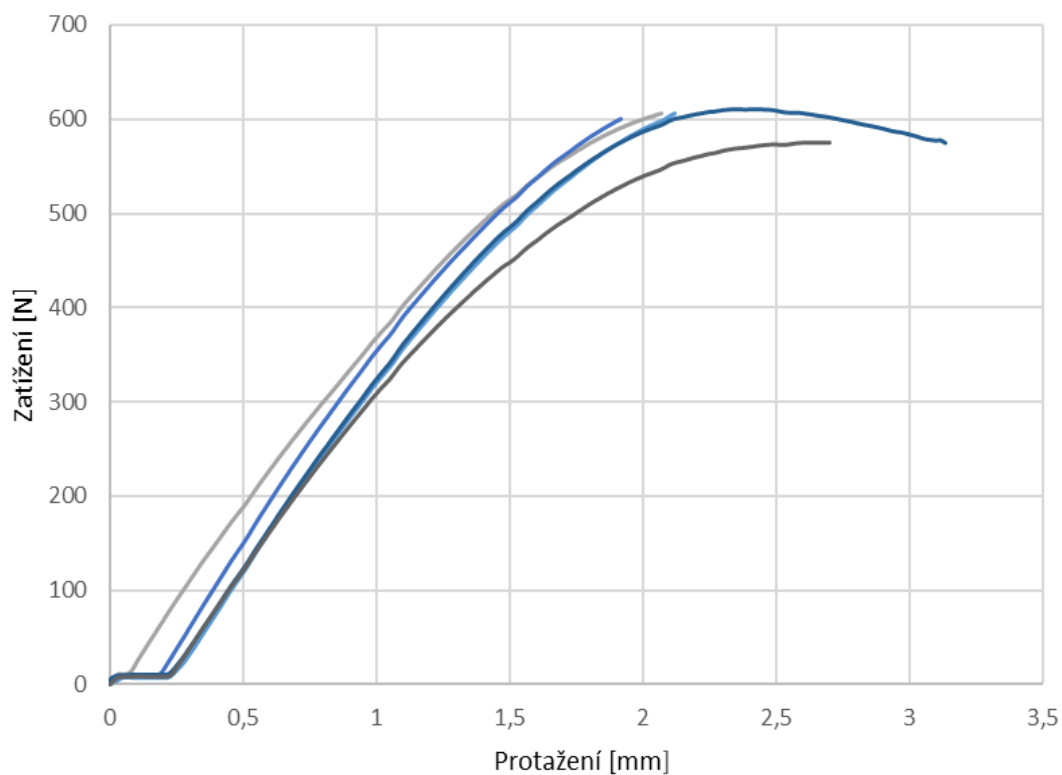
Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	321,7589	6,95	1110,3	20,72	40,22
2	281,1214	7	985,6	23,33	35,14
3	310,7239	7,1	1044,7	19,9	38,84
4	316,1524	7,38	1148	28,05	39,52
5	279,0001	7,1	992,2	25,48	34,87
Střední hodnota	301,7513	7,11	1056,2	23,5	37,72
Standardní odchylka	20,19538	0,1661	71,72807	3,36585	2,52354



Grafy závislosti zatížení [N] na protažení [mm] a hodnoty SLA vytvrzených výtisků:

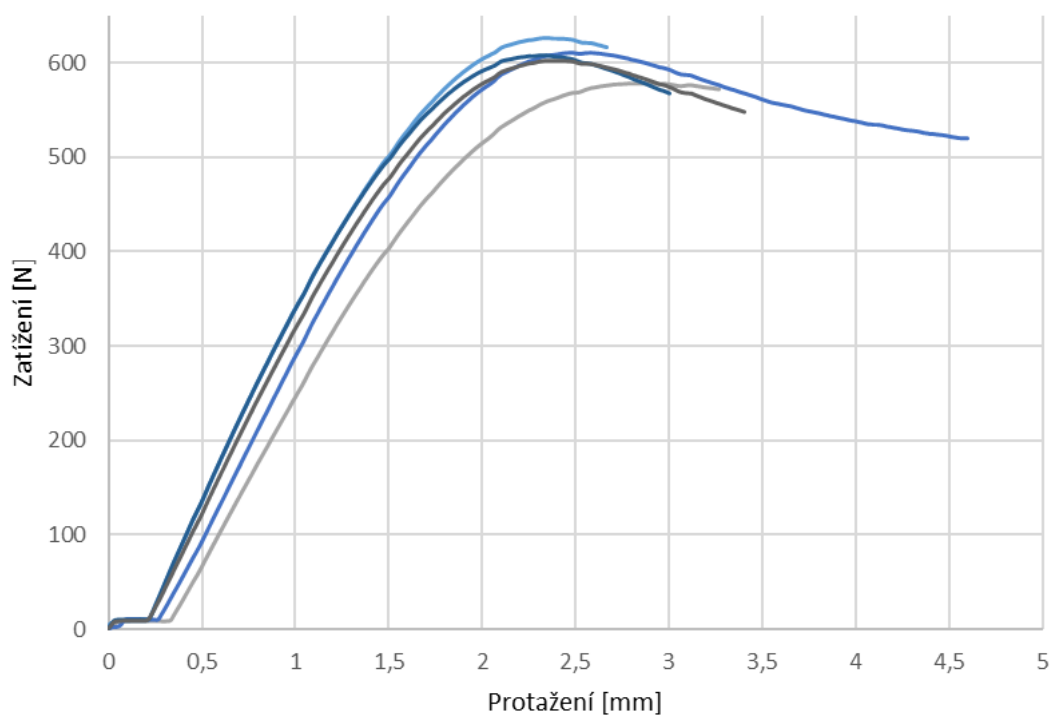
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	606,3803	6,05	1906	6,05	75,8
2	600,7824	5,48	1962,3	5,48	75,1
3	605,7338	5,9	1694,6	5,9	75,72
4	610,5267	6,72	1876,6	8,96	76,3
5	575,4907	7,67	1783,7	7,72	71,94
Střední hodnota	599,7828	6,36	1844,64	6,82	74,97
Standardní odchylka	14,0132	0,85412	105,8962	1,46645	1,74937



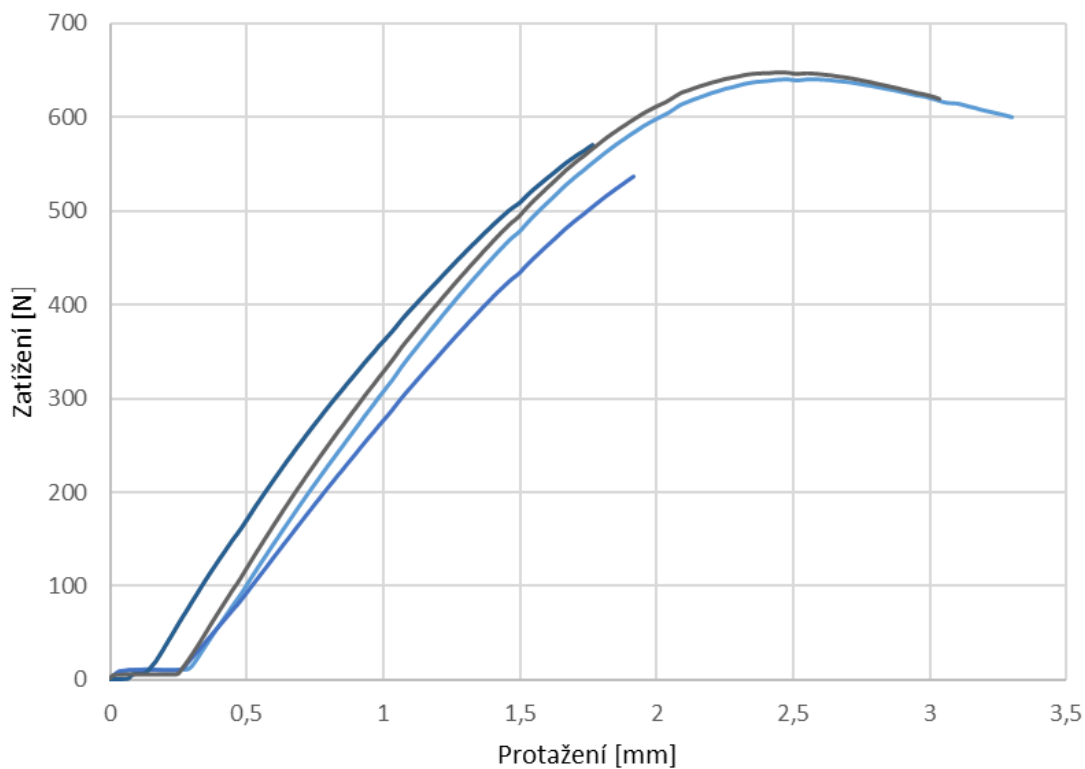
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (Mpa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (Mpa)
1	626,9493	6,72	1910,9	7,62	78,37
2	608,6436	6,62	1895,6	8,62	76,08
3	602,477	6,72	1810,7	9,76	75,31
4	610,6883	7,1	1738,4	13,14	76,33
5	577,8199	8,19	1613	9,33	72,22
Střední hodnota	605,3156	7,07	1793,72	9,7	75,66
Standardní odchylka	17,83278	0,65452	122,5959	2,09098	2,23145



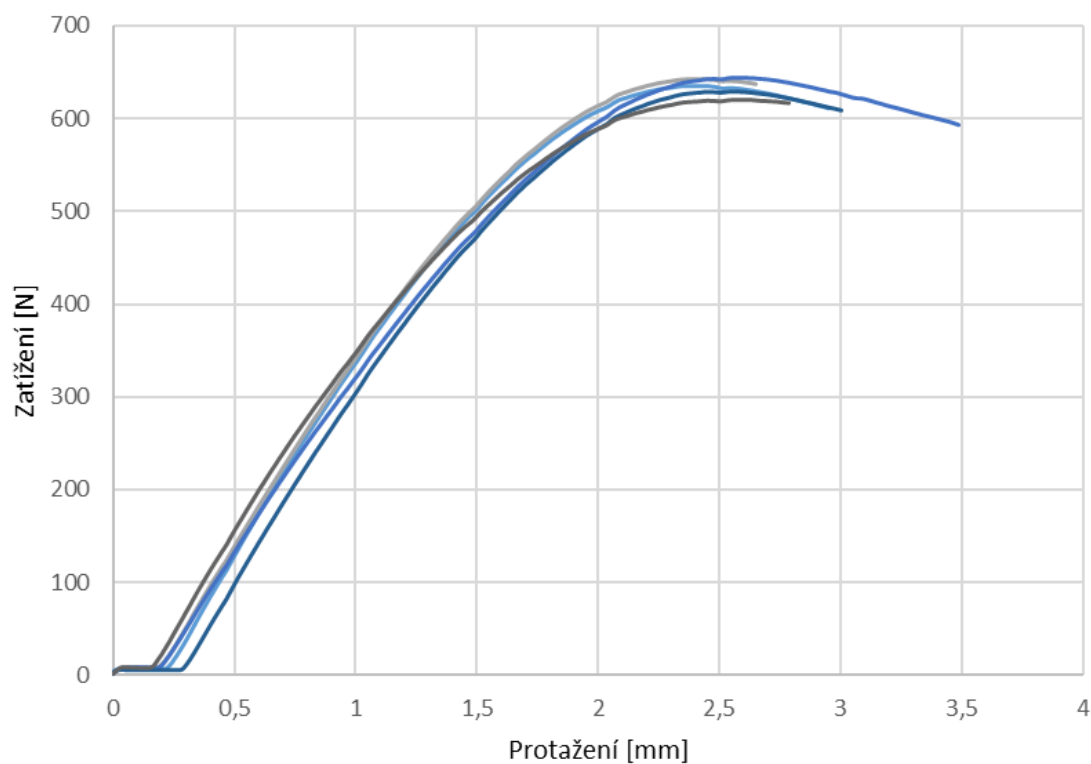
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 0°, yz 90°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	637,18	7,05	1878,979	7,48	79,65
2	569,9966	5,05	1860,6	5,05	71,25
3	640,7244	7,38	1917,081	9,43	80,09
4	536,2361	5,48	1878	5,48	67,03
5	647,5856	7	1985,471	8,67	80,95
Střední hodnota	606,3445	6,392	1904,026	7,22	75,79
Standardní odchylka	50,17467	1,050176	49,98569	1,92287	6,2713



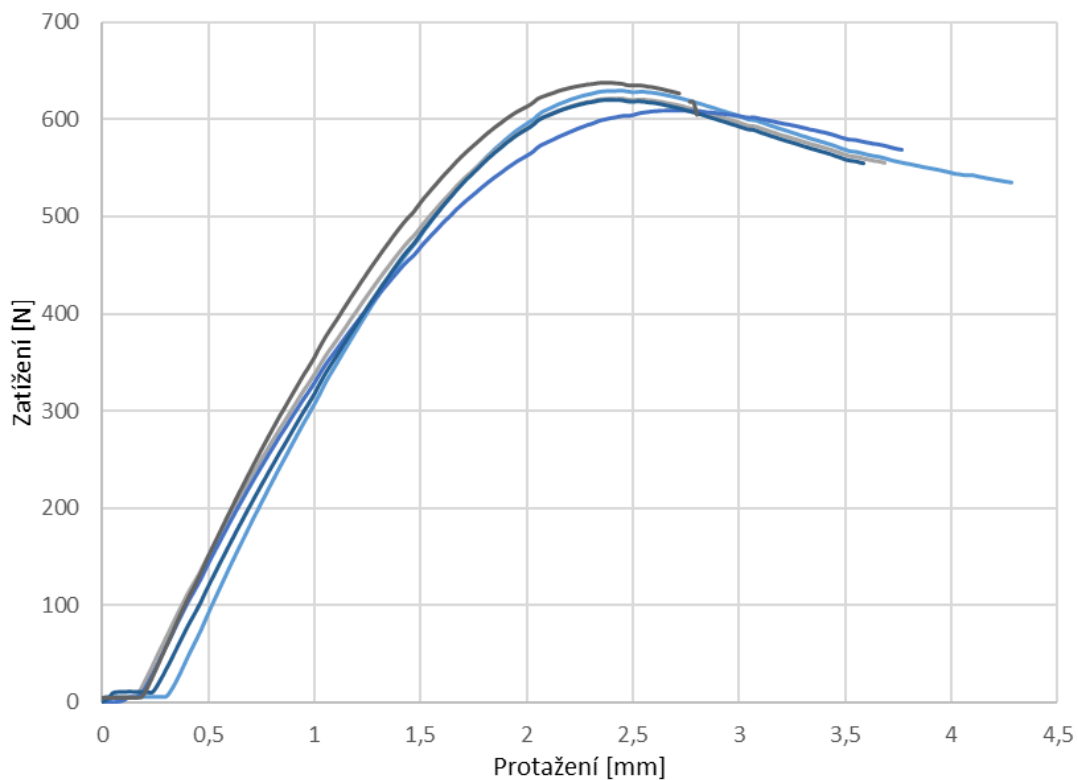
Pro těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 0°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	635,1389	6,76	1957,1	8,43	79,39
2	643,1945	6,95	1859,8	7,57	80,4
3	644,3976	7,38	1768,1	10	80,55
4	628,5164	7,29	1917,2	8,62	78,53
5	620,8152	7,38	1852,2	7,95	77,6
Střední hodnota	634,4125	7,15	1870,9	8,52	79,29
Standardní odchylka	9,96249	0,28003	71,77657	0,92626	1,25044



Pro těleso v rovině xy 0°, xz 90°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	630,1489	6,95	2022,6	12,43	78,75
2	620,9874	6,95	1756,5	10,53	77,62
3	609,5391	7,72	1787	10,76	76,19
4	620,3015	6,81	1852,1	10,24	77,54
5	637,4515	6,76	1957,2	7,76	79,68
Střední hodnota	623,6857	7,04	1875,08	10,34	77,96
Standardní odchylka	10,60814	0,38722	112,7533	1,67607	1,32263



Pro těleso v rovině xy 0°, xz 45°, yz 45°:

Číslo měření	Maximální Zatížení (N)	Protažení při maximálním zatížení (%)	Youngův modul pružnosti (MPa)	Tahová deformace (%)	Pevnost v tahu (MPa)
1	632,3277	6,95	1890,7	8,86	78,91
2	628,6465	7,24	1845,2	11,95	78,57
3	637,3107	7,38	1893,6	9,95	79,66
4	621,756	6,86	1886,8	8,76	77,52
5	538,405	4,71	1782,5	4,71	67,3
Střední hodnota	611,6892	6,628	1859,76	8,85	76,4
Standardní odchylka	41,35783	1,092735	47,47287	2,64394	5,14197

