

Univerzita Hradec Králové
Pedagogická fakulta
Katedra techniky a informatiky

Pevnost 3D tisku a jeho aplikace
Strenght of 3D printing and its applications

~

Autor: Tomáš Votřel

Studijní program: Základy techniky se zaměřením na vzdělávání (Jednoobor)

Vedoucí práce: Ing. Roman Loskot, Ph.D.

Oponent práce: Mgr. Štěpán Major, Ph.D.

Hradec Králové

2026

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ

Pedagogická fakulta

Akademický rok: 2025/2026

1. ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Tomáš Votřel
Osobní číslo: P23P0859
Studijní program: B0114A300056 Základy techniky se zaměřením na vzdělávání
Téma práce: Pevnost 3D tisku a jeho aplikace
Zadávající katedra: Katedra techniky

Zásady pro vypracování

V bakalářské práci budou popsány základní principy 3D tisku, nejčastější používané materiály a mechanické vlastnosti těchto materiálů. Budou provedeny testy některých těchto materiálů na trhačce. Výsledky testů budou poté vyhodnoceny s návazností, kde všude se mohou testované materiály při praktickém použití uplatnit.

Rozsah pracovní zprávy: 52 s.

Rozsah grafických prací: -

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN Iso 527-1 Plasty: Stanovení tahových vlastností, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012

ISO/ASTM 52900 - Aditivní výroba – Terminologie, klasifikace procesů a požadavky na kvalitu, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015

ISO 10618 - Tato norma se zaměřuje na měření geometrických charakteristik dílů vyrobených aditivními technologiemi, 2004

”Additive Manufacturing Technologies” od I. Gibsona, D. W. Rosenberga a B. Stuarta

”Handbook of 3D Printing” od B. Stuart, B. Derby a J. H. Beaman

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Loskot, Ph.D.
Katedra techniky a
informatiky
Oponent bakalářské práce: Mgr. Štěpán Major, Ph.D.
Katedra techniky a informatiky
Datum zadání bakalářské práce: 1. prosince 2024

L.S.

PhDr. Nella Mlsová, Ph.D. v.r.
Ph.D. v.r. děkanka
katedry

doc. Mgr. et Mgr. Marie Hubálovská,
vedoucí

V Hradci Králové dne 7. ledna 2025

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Seznámení s 3D tiskem	7
3. Historie 3D tisku	8
4. Formy 3D tisku.....	9
4.1 FDM	9
4.2 SLA, DLP a LCD	12
4.3 SLS	14
5. Materiály pro 3D tisk	16
5.1 FDM	16
5.1.1 PLA	16
5.1.2 PETG	17
5.1.3 ABS	18
5.1.4 ASA.....	19
5.1.5 TPU	20
5.1.6 Nylon.....	21
5.1.7 SLA, DLP a LCD	22
5.1.8 SLS	25
6. Zkoušky pevnosti tiskových materiálů.....	27
6.1 Jak bude zkouška probíhat?.....	27
6.1.1 Mez pevnosti	27
6.1.2 Bod zlomu	28
7. Data ze zkoušek materiálů.....	29
7.1 PLA	29
7.1.2 Závěr zkoušky materiálu	31
7.2 PETG	32

7.2.2	PETG – 15%.....	33
7.2.3	PETG – výplň 50%	35
7.2.4	PETG – výplň 100%	37
7.2.5	Závěr zkoušky materiálu	39
7.3	ABS	40
7.3.2	Závěr zkoušky materiálu	42
7.4	TPU	43
7.4.2	Závěr zkoušky materiálu	44
7.5	SLA	45
7.5.2	Závěr zkoušky materiálu	47
8.	Závěr.....	48
9.	Zdroje	50
9.1	Zdroje informací.....	50
9.2	Grafy.....	54

Použití Ai

V této bakalářské práci bylo použito služeb Ai za účelem sumarizace textu a sjednocení informací z více zdrojů za účelem projít průřezem tématu z nejvíce možných úhlů.

2. Úvod

Aditivní technologie, v běžné mluvě označované jako 3D tisk, prošly v posledním desetiletí fascinujícím vývojem. Z původně drahých průmyslových prototypovacích strojů se staly dostupné nástroje, které dnes tvoří nedílnou součást moderního strojírenství, medicíny i vzdělávání. Moje osobní cesta k této technologii začala již během středoškolského studia, kdy jsem poprvé dostal možnost nahlédnout pod pokličku tehdy se rodícího fenoménu stolních 3D tiskáren. Od prvních pokusů s tiskem jednoduchých modelů se můj zájem postupně transformoval v hlubokou technickou fascinaci, která mě provází celým mým profesním i pedagogickým životem.

Volba tématu mé bakalářské práce nebyla náhodná. Jako pedagog v technických oborech se denně setkávám s otázkami studentů, které se netýkají pouze toho, jak model vytisknout, ale především toho, co výsledný díl reálně vydrží. Právě tato praktická rovina – pochopení mechanických limitů a pevnostních charakteristik jednotlivých materiálů – je v dnešním školství i praxi často opomíjena na úkor čistě estetického vnímání 3D tisku. Cítím potřebu přiblížit studentům i odborné veřejnosti fakt, že aditivně vyrobená součástka není jen vizuální maketou, ale může být plnohodnotným funkčním dílem, pokud zvolíme správnou technologii a parametry.

Zásadním impulsem pro hlubší výzkum v této oblasti je moje působení v projektu EIVA. Tento projekt, zaměřený na konstrukci a vývoj systému pro integraci znevýhodněných osob v letectví, využívá aditivní technologie v každodenní praxi. Při návrhu prvků, které přicházejí do kontaktu s uživatelem nebo jsou součástí mechanických sestav, narážíme na nutnost garantovat bezpečnost a pevnost.

V teoretické části této práce se zaměřím na srovnání hlavních technologií 3D tisku, jako jsou FDM, SLA a SLS, a rozeberu specifika nejpoužívanějších polymerů. Praktická část pak bude věnována destruktivním zkouškám v tahu na profesionálním stroji Shimadzu. Mým cílem není pouze shromáždit řadu čísel, ale interpretovat je v kontextu reálného využití. Chci dokázat, že i při optimalizaci tiskových parametrů, jako je hustota výplně, lze dosáhnout výsledků, které posunou možnosti 3D tisku v technické výuce na novou úroveň. Pevně věřím, že poznatky získané během měření přispějí k hlubšímu porozumění této progresivní technologie a poslouží jako solidní základ pro další vývoj v oblasti aditivní výroby.

3. Seznámení s 3D tiskem

3D tisk, spadající pod pojem „**aditivní technologie výroby**“, představuje významný bod v evoluci výrobní technologie, který mění celá paradigma tradiční výroby. Zatímco konvenční metody, jako je frézování nebo soustružení, odebírají materiál z polotovaru, 3D tisk funguje na zcela opačném principu, **postupném přidávání a vrstvení materiálu**, dokud nevznikne požadovaný trojrozměrný objekt.

Jádrem celého procesu je **digitální 3D model**. Ten může být vytvořen v profesionálním CAD (Computer-Aided Design) softwaru, případně získán z existujícího objektu pomocí 3D skenování. Ať už je zdroj jakýkoli, digitální model slouží jako přesný plán, podle kterého tiskárna pracuje. Před samotným zhmotněním objektu, tiskem, následuje klíčový krok – **slicing**, neboli „rozřezání“ modelu. Speciální software tzv. Slicer, model virtuálně rozřeže na tisíce tenkých, horizontálních vrstev. Zároveň generuje detailní instrukce, tzv. G-code, které říkají tiskárně, jak se má pohybovat a kolik materiálu má v každém bodě nanést.

Samotný tisk probíhá tak, že tiskárna s přesností nanáší materiál vrstvu po vrstvě. Každá nová vrstva je uložena na tu předchozí a pevně se s ní spojí, až se postupně vybuduje celý objekt. Nejčastěji jsou spojovány s 3D tiskem **plasty** (ve formě filamentů nebo tekutých pryskyřic), moderní 3D tiskárny dokážou pracovat s kovy, keramikou, kompozitními materiály, ale i s bio-materiály nebo dokonce potravinami. Tato flexibilita umožňuje vytvářet předměty s různorodými vlastnostmi, od pružných prototypů po pevné součástky s vysokou odolností.

Výhody 3D tisku jsou mnohostranné. Jednou z největších je **schopnost vytvářet komplexní geometrie**, které by konvenčními metodami byly buď velmi drahé, nebo zcela nemožné. Vnitřní struktury, mřížky a dutiny, které optimalizují váhu a zároveň zachovávají pevnost, jsou pro 3D tiskárny jednoduché jako pro nás přejít ulici. Dále je to **personalizace a customizace**. Díky digitální povaze procesu lze každý objekt snadno upravit na míru individuálním potřebám, což je neocenitelné například v medicíně při výrobě protetiky nebo dentálních pomůcek. 3D tisk také významně **urychluje prototypování a vývoj produktů**, jelikož návrhy lze rychle a levně zhmotnit, testovat a iterovat (opakovat).

Od průmyslových aplikací, jako je výroba leteckých součástí a nástrojů, přes medicínu a umění, až po domácí použití a vzdělávání – 3D tisk je technologie, která demokratizuje výrobu a posouvá hranice inovace. Jeho neustálý vývoj a snižující se náklady naznačují, že jeho vliv na náš každodenní život a průmysl bude nadále narůstat nemajíc v plánu se zastavovat.

4. Historie 3D tisku

Historie 3D tisku, odborně nazývaného aditivní výroba, je fascinujícím příběhem o tom, jak se sci-fi vize proměnila v průmyslovou realitu. Přestože se nám dnes zdá jako moderní výstřelek, kořeny této technologie sahají až do počátku 80. let 20. století. Tehdy se zrodila myšlenka, že objekty nemusíme jen vyřezávat z bloku materiálu (subtraktivní metoda), ale můžeme je budovat přidáváním hmoty vrstvu po vrstvě.

První významný milník se odehrál v roce **1981**, kdy japonský vynálezce **Hideo Kodama** podal patent na zařízení využívající fotopolymery vytvrzované UV světlem. Kvůli nedostatku financí však projekt nedokončil. Skutečný průlom přišel v roce **1984**, kdy si Američan **Charles Hull** nechal patentovat technologii **SLA (Stereolitografie)**. Hull nebyl jen teoretik – založil společnost *3D Systems* a v roce 1987 uvedl na trh první komerční 3D tiskárnu SLA-1. Tím položil základní kámen celého odvětví.

Zatímco SLA ovládla první vlnu, koncem 80. let se objevily další klíčové metody, které dnes tvoří pilíře oboru. V roce 1988 si **Scott Crump** nechal patentovat technologii **FDM (Fused Deposition Modeling)**. Historky praví, že nápad dostal při pokusu vyrobit hračku pro dceru pomocí lepicí pistole a směsi vosku a plastu. Crump založil firmu *Stratasys*, která se stala hlavním hráčem v oblasti termoplastů. Ve stejném období, na Texaské univerzitě v Austinu, vyvinuli **Carl Deckard** a **Joe Beaman** metodu **SLS (Selective Laser Sintering)**, čímž otevřeli cestu k tisku z práškových materiálů.

Devadesátá léta a počátek nového tisíciletí byly ve znamení profesionalizace. 3D tisk se používal primárně pro „Rapid Prototyping“ – rychlou výrobu prototypů pro inženýry a designéry. Stroje byly tehdy obrovské, drahé a vyžadovaly vysoce odbornou obsluhu. Zásadní demokratizace přišla až v roce **2005** s projektem **RepRap** (Replicating Rapid Prototyper) na University of Bath. Dr. Adrian Bowyer tehdy inicioval vývoj open-source tiskárny, která by dokázala vytisknout většinu svých vlastních součástek.

Právě projekt RepRap a vypršení klíčových patentů na technologii FDM v roce 2009 odstartovaly „tiskovou revoluci“. Na trh vtrhly cenově dostupné stroje pro hobby uživatele a školy. Od té doby se vývoj zrychlil exponenciálně. Dnes již netiskneme jen z plastů, ale i z kovu, betonu, keramiky, a dokonce i z živých buněk (bioprinting). 3D tisk se přesunul od výroby pouhých prototypů k produkci koncových funkčních dílů v letectví, medicíně atd.

5. Formy 3D tisku

5.1 FDM

FDM neboli **Fused Deposition Modeling**, je zdaleka nejrozšířenější formou a pro mnoho lidí vstupní branou do světa 3D tisku. Je to technologie, kterou pravděpodobně potkáte jako první, pokud se do 3D tisku pustíte. Její princip je geniálně jednoduchý: tiskárna **nanáší roztavený termoplast vrstvu po vrstvě**, až se postupně vybuduje celý objekt.

Celý proces začíná podáváním **plastového filamentu** (tenké struny) z cívky do tiskové hlavy. V tiskové hlavě je topné těleso, které filament zahřívá a roztaví na polotekutou hmotu. Tato roztavená hmota je pak precizně protlačována tenkou tryskou. Tisková hlava se pohybuje ve vodorovné rovině (osy X a Y), podle digitálního modelu, a postupně nanáší tenkou stopu roztaveného plastu na tiskovou podložku. Jakmile je jedna vrstva dokončena, tisková podložka se nepatrně posune dolů (v ose Z) a proces se opakuje s další vrstvou. Rztavený plast během chvilky chladne a tuhne, pevně se spojuje s předchozí vrstvou. Tímto postupným vrstvením se objekt buduje zdola nahoru.

FDM tiskárny jsou oblíbené pro svou **spolehlivost, snadnou obsluhu a širokou škálu dostupných materiálů**, jako jsou PLA, ABS, PETG a mnoho dalších. Díky tomu jsou ideální pro prototypování, výrobu funkčních dílů, hraček, modelů nebo různých předmětů do domácnosti či pro hobby projekty. Jsou cenově dostupné a představují skvělý způsob, jak se s 3D tiskem seznámit.

[Gibson et al., Stratasys History, RepRap History, Vlastní zkušenosti]

5.1.1 Výhody a nevýhody metody FDM

Metoda 3D tisku FDM (Fused Deposition Modeling), často zaměňovaná s FFF (Fused Filament Fabrication), je nejrozšířenější a nejdostupnější technologií 3D tisku. Má své charakteristické výhody i nevýhody, které ovlivňují její vhodnost pro různé aplikace.

5.1.1.1 Výhody FDM tisku:

- **Cenová dostupnost:** FDM tiskárny jsou obecně nejlevnější na pořízení i provoz. To z nich dělá ideální volbu pro začátečníky, hobby tiskaře, školy a malé podniky. Filamenty (tiskový materiál) jsou také relativně levné v porovnání s pryskyřicemi pro SLA tisk nebo prášky pro SLS.
- **Široká škála materiálů:** FDM tiskárny podporují obrovské množství termoplastických materiálů, jako jsou PLA, ABS, PETG, Nylon, ASA, TPU a mnoho dalších. Každý materiál má jiné vlastnosti (pevnost, flexibilita, odolnost vůči teplotě, UV záření atd.), což umožňuje velkou flexibilitu při výběru materiálu pro konkrétní aplikaci.
- **Snadná obsluha a údržba:** FDM tiskárny jsou poměrně uživatelsky přívětivé. Nastavení a kalibrace jsou obvykle přímočaré a údržba není příliš náročná. Také manipulace s filamentem je jednodušší a bezpečnější než s tekutými pryskyřicemi.
- **Vhodné pro prototypování a funkční díly:** Díky relativně nízkým nákladům a rychlosti tisku jsou FDM tiskárny ideální pro rychlé prototypování. Vzhledem k mechanickým vlastnostem některých filamentů lze tisknout i funkční díly, které vydrží určité zatížení.
- **Odolnost a pevnost výtisků:** Mnoho materiálů používaných v FDM tisku, jako je ABS nebo PETG, nabízí dobrou mechanickou pevnost a odolnost, což je důležité pro díly určené k praktickému použití.
- **Bezpečnost a čistota:** FDM tisk je relativně čistá metoda, která obvykle nevyžaduje zvláštní ventilaci (i když pro některé materiály je doporučena). Nevznikají při něm tekuté odpady nebo silné výpary jako u pryskyřicových tiskáren.

5.1.1.2 Nevýhody FDM tisku:

- **Viditelné vrstvy a nižší kvalita povrchu:** FDM tisk vytváří objekty postupným vrstvením. To má za následek, že na povrchu výtisků jsou vždy patrné horizontální vrstvy. Pro dosažení hladkého povrchu je často nutné dodatečné post-processing (broušení, tmelení, chemické vyhlazování).
- **Omezená přesnost a detaily:** V porovnání s jinými technologiemi (např. SLA) mají FDM výtisky nižší rozlišení a nejsou tak vhodné pro tisk velmi jemných detailů nebo složitých miniaturních objektů.
- **Potřeba podpůrných struktur:** Pro tisk převislých částí nebo složitých geometrií jsou často nutné podpůrné struktury. Ty je nutné po tisku odstranit, což může zanechat stopy na povrchu a vyžaduje dodatečné úpravy.
- **Anizotropie (rozdílné vlastnosti v osách):** Díly vytištěné metodou FDM mají často nižší pevnost ve směru osy Z (kolmo na vrstvy) než v osách X a Y (rovnoběžně s vrstvami). To je dáno způsobem spojování jednotlivých vrstev.
- **Citlivost na deformace (warping):** Některé materiály, zejména ABS, mají tendenci se během chladnutí smršťovat, což může vést k deformaci nebo odloupení výtisku z tiskové podložky, zvláště u větších objektů. Tomu se předchází vyhříváním podložkou a uzavřenou komorou.
- **Rychlost tisku:** I když je FDM relativně rychlé pro prototypování, pro velkosériovou výrobu je stále pomalejší než tradiční metody jako vstřikování plastů. Tisk velkých objektů ve vysoké kvalitě může trvat i desítky hodin.

[Iso/Astm 52900, Prusa Research, Ashby, Chanda & Roy]

5.2 SLA, DLP a LCD

Technologie založené na bázi pryskyřice, souhrnně označované jako **Vat Photopolymerization**, představují pro mnohé další úroveň 3D tisku, kde se preciznost setkává s téměř dokonalým detailem. Zatímco FDM tiskne roztaveným plastem, tyto metody využívají tekutou fotocitlivou pryskyřici (resin), která tvrdne při vystavení světlu určité vlnové délky.

Princip je u všech tří (SLA, DLP, LCD) velmi podobný: v nádobce (vaničce) je tekutá pryskyřice, jejíž dno je průhledné. Tisková platforma se ponoří do této tekutiny těsně nad dno a světelný zdroj pod vaničkou osvítí přesně daný tvar první vrstvy. Tím dojde k jejímu vytvrzení a přichycení k platformě. Platforma se poté nepatrně zvedne, pod ni nateče čerstvá pryskyřice a proces se opakuje. Rozdíl mezi nimi spočívá pouze v tom, **jakým způsobem se světlo na pryskyřici promítá**.

- **SLA (Stereolitografie):** Využívá laserový paprsek, který vykresluje každý detail vrstvy bod po bodu, podobně jako když píšete perem na papír. Je to nejpreciznější, ale také nejpomalejší metoda.
- **DLP (Digital Light Processing):** Používá digitální projektor (podobný tomu v kině), který osvítí celou vrstvu najednou jako jeden obrázek složený z pixelů. Je mnohem rychlejší než SLA.
- **LCD (MSLA):** Dnes nejrozšířenější varianta. Jako masku využívá LCD displej, který propouští světlo z UV diod jen tam, kde má vrstva vzniknout. Je to efektivní, rychlé a cenově nej dostupnější řešení.

[Hideo Kodama, 3D Systems]

5.2.1 Výhody a nevýhody metod na bázi pryskyřice

Tyto technologie jsou vyhledávány tam, kde FDM naráží na své limity, zejména v oblasti detailů a hladkosti povrchu.

5.2.1.1 Výhody:

- **Extrémní detaily a přesnost:** Vrstvy jsou tak tenké (často i 0,02 mm), že jsou lidským okem prakticky nepostřehnutelné. To umožňuje tisk miniaturních figurek, šperků nebo zubních náhrad.
- **Hladký povrch:** Výtisky mají profesionální vzhled přímo z tiskárny, bez nutnosti zdoluhavého broušení. Povrch je izotropní, což znamená, že má stejné vlastnosti ve všech směrech.
- **Rychlost u složitých objektů:** U metod LCD a DLP nezáleží na tom, jak složitý nebo členitý objekt tisknete – celá vrstva se vytvrdí najednou, což dramaticky zkracuje čas u sériové výroby drobných dílů.
- **Vodotěsnost a vzduchotěsnost:** Díky chemickému spojování vrstev na molekulární úrovni jsou výsledné objekty dokonale lité a nepropustné.

5.2.1.2 Nevýhody:

- **Náročný post-processing:** Tiskem to nekončí. Model je nutné omýt v isopropylalkoholu od zbytků tekuté pryskyřice a následně nechat vytvrdit pod UV lampou.
- **Manipulace s chemií:** Tekutá pryskyřice je toxická, zapáchá a vyžaduje práci v rukavicích a v dobře větraném prostoru. Odpad (znečištěný alkohol) vyžaduje ekologickou likvidaci.
- **Křehkost materiálu:** Standardní pryskyřice bývají křehčí než termoplasty z FDM. Existují sice inženýrské resiny (odolné, pružné), ale ty jsou výrazně dražší.
- **Menší tiskový prostor:** Většina dostupných tiskáren má menší pracovní plochu než běžné FDM tiskárny, což limituje velikost vyráběných objektů.
- **Nutnost podpěr:** I zde jsou potřeba podpěry, které se sice odstraňují snadněji, ale mohou zanechat drobné body na povrchu, které je třeba začistit.

5.3 SLS

Technologie **SLS** neboli **Selective Laser Sintering** (selektivní laserové spékání), je v průmyslovém světě považována za pomyslný „svatý grál“ 3D tisku. Zatímco FDM vrství strunu a SLA vytvrzuje kapalinu, SLS pracuje s **jemným polymerovým práškem**. Je to metoda, která odbourává jedno z největších omezení 3D tisku – potřebu podpurných struktur.

Princip fungování připomíná precizní archeologii naruby: v uzavřené komoře, která je vyhřátá těsně pod bod tání použitého materiálu, nanese speciální válec (nebo čepel) velmi tenkou a rovnoměrnou vrstvu prášku na tiskovou plochu. Poté vysoce výkonný CO₂ laser vykreslí tvar dané vrstvy. Energie laseru způsobí, že se částice prášku v daném místě spečou (sinterují) v pevný celek. Poté se podložka posune o tloušťku jedné vrstvy dolů, nanese se nový prášek a proces se opakuje, dokud není objekt hotový.

Klíčovým kouzlem SLS je, že **nespečený prášek**, který obklopuje tištěný model, slouží jako **přirozená podpora**. Díky tomu můžete tisknout neuvěřitelně složité geometrie, pohyblivé mechanismy v jednom kuse nebo duté tvary, které by u jiných metod nebyly realizovatelné.

[Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker]

5.3.1 Výhody a nevýhody metody SLS

SLS je technologie určená především pro profesionální nasazení, výrobu funkčních prototypů a koncových součástek v automobilovém průmyslu či letectví.

5.3.1.1 Výhody SLS tisku:

- **Geometrická svoboda bez podpěr:** Jelikož prášek drží model ze všech stran, nemusíte řešit žádné podpůrné konstrukce. To šetří čas při navrhování i následném začišťování.
- **Vynikající mechanické vlastnosti:** Výtisky (nejčastěji z Nylonu/Polyamidu) jsou velmi pevné, houževnaté a teplotně odolné. Na rozdíl od FDM jsou téměř izotropní – drží stejně dobře ve všech směrech.
- **Efektivita při sériové výrobě:** Do tiskové komory můžete naskládat desítky nebo stovky různých dílů nad sebe a vedle sebe (tzv. nesting), čímž využijete celý objem tiskárny v jednom tiskovém cyklu.
- **Dlouhá životnost a stabilita:** Díly ze systému SLS nepodléhají degradaci tak rychle jako pryskyřice a jsou vhodné pro reálné nasazení v náročných podmínkách.

5.3.1.2 Nevýhody SLS tisku:

- **Vysoká pořizovací cena:** I „levné“ stolní SLS tiskárny stojí stovky tisíc korun, průmyslové stroje pak miliony. Pro běžného uživatele je tato technologie dostupná spíše přes zakázkové služby.
- **Dlouhé chladnutí:** Po dokončení tisku nemůžete díly hned vyndat. Celý „blok“ prášku musí pomalu chladnout (často i stejně dlouho, jako trval samotný tisk), aby nedošlo k deformacím.
- **Pórovitost povrchu:** Výtisky mají mírně drsný, zrnitý povrch. Pokud vyžadujete hladkost nebo nenasákavost, je nutné dodatečné těsnění nebo lakování.
- **Práce s práškem:** Manipulace s jemným prachem vyžaduje ochranné pomůcky (masky) a speciální stanice pro čištění dílů a recyklaci nespečeného prášku.
- **Omezená barevnost:** Většina SLS tisků je v základu bílá nebo šedá/černá. Pro jiné barvy je nutné díly dodatečně barvit v horké lázni.

6. Materiály pro 3D tisk

6.1 FDM

6.1.1 PLA

Materiál PLA neboli kyselina polymléčná, představuje v současnosti nejvyžívanější termoplast v oblasti aditivní výroby metodou FDM. Z chemického hlediska se jedná o alifatický polyester, který vyniká svým biologickým původem; vyrábí se procesem polymerace kyseliny mléčné, získané fermentací rostlinných cukrů, nejčastěji z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. Díky tomuto složení je PLA považován za ekologickou alternativu k ropným plastům, neboť je za specifických podmínek průmyslového kompostování biologicky odbouratelný. Pro technickou praxi je však klíčová především jeho snadná zpracovatelnost a vysoká rozměrová stabilita během tiskového procesu.

V mechanickém kontextu se PLA vyznačuje vysokou tuhostí a pevností v tahu, která se obvykle pohybuje v rozmezí 45 až 70 MPa, což překonává i běžně užívaný materiál ABS. Jeho nevýhodou je však značná křehkost a nízká rázová houževnatost, což znamená, že při překročení meze pevnosti dochází k náhlému lomu bez předchozí plastické deformace. Z termofyzikálního hlediska je nejdůležitějším parametrem teplota skelného přechodu, která se u PLA pohybuje mezi 60 a 65 °C. Jakmile teplota okolí nebo součástky dosáhne této hranice, materiál začíná měknout a ztrácí svou strukturální integritu, což limituje jeho použití v prostředích s vyšší pracovní teplotou, jako jsou interiéry automobilů v letních měsících nebo kryty elektrotechniky.

Samotný proces tisku z PLA je charakteristický minimálním tepelným smršťováním, což eliminuje riziko kroucení (warping) a odlepování modelu od podložky, a to i u rozměrných objektů. Materiál vykazuje vynikající adhezi k různým povrchům a při tavení nevylučuje dráždivý zápach, ale spíše nasládlé aroma. Pro dosažení vysoké estetické kvality a ostrých detailů je u PLA nezbytné intenzivní chlazení vytištěné vrstvy, které zajistí okamžitou fixaci tvaru. Ačkoliv je PLA náchylný k degradaci vlivem vlhkosti (hygroskopie), která může vést ke snížení kvality tisku a mechanických vlastností, zůstává díky kombinaci uživatelské přívětivosti a preciznosti ideálním materiálem pro prototypování, výrobu architektonických modelů a edukační účely.

[Donald Garlotta, NatureWorks LLC, B. Šafář]

6.1.2 PETG

Materiál PETG (polyethylentereftalát glykol) představuje v technické praxi 3D tisku nezbytný kompromis mezi snadno tisknutelným PLA a mechanicky odolným ABS. Z chemického hlediska jde o kopolyester, kde je standardní PET (známý z výroby nápojových lahví) modifikován přidáním glykolu. Tato modifikace zabraňuje krystalizaci materiálu, díky čemuž je výsledný plast čirší, méně křehký, a především lépe zpracovatelný při tavení v trysce 3D tiskárny.

Vlastnosti PETG jsou definovány především jeho houževnatostí a vysokou rázovou odolností. Na rozdíl od PLA, který při přetížení praskne, má PETG tendenci se nejprve deformovat, což z něj činí ideální materiál pro funkční díly vystavené mechanickému namáhání. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo **75–80 °C**, což je o cca 15 °C více než u PLA. Tato zvýšená tepelná stabilita umožňuje jeho nasazení v aplikacích, kde by běžné PLA již selhalo, například u držáků elektroniky nebo součástek v mírně zahřátých strojních prostorech.

Pro proces tisku je PETG charakteristické svou vynikající adhezí mezi vrstvami. Chemické spojení vrstev je u tohoto materiálu natolik silné, že výsledný objekt vykazuje vysokou míru izotropie (rovnoměrnost vlastností ve všech osách) a je v podstatě vodotěsný. Materiál má však i svá specifika: vykazuje vyšší viskozitu, což se projevuje takzvaným „stringováním“ (tvořením tenkých plastových nití při přejezdech tiskové hlavy). Na rozdíl od PLA také nevyžaduje tak agresivní chlazení, protože příliš rychlé ochlazení by mohlo paradoxně snížit soudržnost vrstev.

Z hlediska chemické odolnosti PETG exceluje, neboť odolává působení kyselin, louhů i alkoholů, což je klíčové pro průmyslové využití v dílnách a laboratořích. Je také vysoce transparentní a UV stabilní, což jej předurčuje pro venkovní aplikace. PETG je možno definovat jako univerzální inženýrský materiál, který díky kombinaci mechanické odolnosti, chemické stability a relativní snadnosti tisku vyplňuje mezeru mezi hobby modely a náročnými průmyslovými aplikacemi.

[Eastman Chemical Company, Chanda & Roy, Ashby, B. Šafář]

6.1.3 ABS

Materiál ABS (akrylonitrilbutadienstyren) představuje tradiční pilíř průmyslového 3D tisku, který do světa aditivní výroby přinesl vlastnosti běžných plastů používaných v masové produkci. Jedná se o amorfnní termoplastický terpolymer, jehož vlastnosti jsou dány unikátní kombinací tří složek: akrylonitril zajišťuje chemickou a tepelnou stabilitu, butadien dodává rázovou houževnatost a styren propůjčuje materiálu tuhost a lesklý povrch. Díky této synergii je ABS materiálem volby pro aplikace vyžadující vysokou mechanickou odolnost a trvanlivost.

Z hlediska mechanických vlastností ABS dominuje svou houževnatostí a schopností absorbovat nárazy, aniž by došlo k okamžitému lomu. Na rozdíl od PLA vykazuje výraznější plastickou deformaci, což je v technické praxi žádoucí vlastnost pro funkční díly. Klíčovým parametrem je teplota skelného přechodu, která se u ABS pohybuje okolo **100–105 °C**. To jej předurčuje pro použití v náročných podmínkách, jako jsou komponenty v blízkosti motorů, elektronika s vysokým tepelným vyzařováním nebo díly vystavené přímému slunci v interiérech vozidel.

Proces tisku z ABS je však technicky výrazně náročnější než u předchozích materiálů. Hlavním úskalím je vysoký koeficient tepelné roztažnosti, který způsobuje výrazné smršťování materiálu při chladnutí. To vede k vnitřnímu pnutí, které se projevuje kroucením rohů výtisku nebo praskáním mezi vrstvami (delaminace). Úspěšný tisk proto vyžaduje vyhřívanou podložku na **100–110 °C**, a především uzavřenou tiskovou komoru, která udržuje stabilní teplotu okolí a zabraňuje průvanu. Specifickou vlastností ABS je také jeho rozpustnost v acetonu, což umožňuje provádět post-processing metodou acetonového vyhlazování, kdy se povrch modelu chemicky nataví do naprosto hladkého, zrcadlového lesku.

V technickém kontextu je nutné zmínit i zdravotní a bezpečnostní aspekty; při tavení ABS dochází k uvolňování styrenových výparů a ultra jemných částic (UFP), což vyžaduje tisk v dobře větraných prostorách nebo použití filtrů s aktivním uhlím. Přes tyto nároky zůstává ABS nenahraditelným materiálem tam, kde je vyžadována funkčnost, možnost mechanického opracování (vrtání, broušení) a dlouhodobá teplotní odolnost, kterou levnější alternativy nedokážou nabídnout.

[Chanda & Roy, Brydson, Ashby, Prusa Research]

6.1.4 ASA

Materiál ASA (akrylonitril-styren-akrylát) představuje v hierarchii FDM termoplastů funkční vrchol pro aplikace určené do venkovního prostředí. Z hlediska chemické struktury se jedná o kopolymer, který je přímým nástupcem materiálu ABS. Zásadní rozdíl spočívá v nahrazení butadienové složky (gumového segmentu) akrylátovým kaučukem. Tato zdánlivě drobná strukturní změna propůjčuje ASA klíčovou vlastnost, kterou ABS postrádá: extrémní odolnost vůči ultrafialovému (UV) záření a povětrnostním vlivům. Zatímco ABS na slunci během několika měsíců degraduje, žlutne a křehne, ASA si zachovává svou barvu a mechanickou integritu po dlouhá léta.

Mechanické vlastnosti ASA jsou velmi podobné vlastnostem ABS, což zahrnuje vysokou rázovou houževnatost a tuhost. Materiál vykazuje vynikající tepelnou stabilitu s teplotou skelného přechodu okolo **100 °C**, což umožňuje jeho nasazení v technicky náročných podmínkách. Specifickým rysem ASA je jeho estetická kvalita; výtisky mají obvykle matnější povrch než u ABS, což lépe maskuje přechody mezi jednotlivými vrstvami a dodává součástkám profesionální vzhled. Stejně jako jeho předchůdce je i ASA rozpustná v acetonu, což umožňuje chemické vyhlazování nebo spojování dílů.

Tiskový proces u ASA s sebou nese obdobné výzvy jako u ABS, především vysokou míru smršťování a náchylnost ke kroucení (warping). Pro úspěšnou výrobu je nezbytné použití vyhřívané podložky (**100–110 °C**) a uzavřené tiskové komory, která chrání model před průvanem a udržuje stabilní vnitřní teplotu. ASA je ideálním kandidátem pro výrobu venkovních komponent, jako jsou šasi dálkově ovládaných modelů nebo držáky kamer, kde materiál musí odolávat jak slunečnímu záru, tak mechanickému namáhání při provozu.

[Prusa Polymers, Laurence McKeen, Ashby, Votřel – vlastní zkušenosti]

6.1.5 TPU

Materiál TPU (termoplastický polyuretan) představuje v rámci FDM tisku specifickou kategorií elastomerů, které do světa tuhých plastů vnášejí flexibilitu a vysokou rázovou houževnatost. Z chemického hlediska se jedná o blokový kopolymer, který se skládá ze střídajících se měkkých a tvrdých segmentů. Měkké segmenty (polyether nebo polyester) zajišťují ohebnost a elastické chování, zatímco tvrdé segmenty (uretanové vazby) fungují jako krystalické body, které dodávají materiálu pevnost a strukturní integritu.

Nejvýraznější vlastností TPU je jeho tažnost a schopnost návratu do původního stavu po deformaci. Na rozdíl od běžných plastů se mechanické vlastnosti TPU nedefinují jen pevností v tahu, ale především **tvrdostí podle Shorea** (nejčastěji stupnice A, např. 95 A, 85 A). Čím nižší je hodnota, tím je materiál měkkší a poddajnější. Kromě pružnosti vyniká TPU extrémní odolností proti oděru a vysokou rázovou houževnatostí, což z něj činí ideální materiál pro součástky, které musí tlumit vibrace nebo odolávat mechanickému opotřebení třením.

Tiskový proces u TPU je však spojen s řadou technických výzev plynoucích právě z jeho flexibility. Protože je filament pružný, má tendenci se v podávacím mechanismu (extrudéru) ohýbat nebo namotávat. Pro úspěšný tisk je proto doporučeno použití takzvaných **Direct Drive** extrudérů, kde je vzdálenost mezi podávacím kolečkem a tryskou minimální. Materiál vykazuje vynikající adhezi mezi vrstvami, což prakticky eliminuje riziko delaminace, ale na druhou stranu může být velmi obtížné jej po tisku odstranit z podložky. TPU je také vysoce hygroskopické a vyžaduje skladování v suchu, jinak při tisku dochází k nadměrnému „stringování“ a porézности povrchu.

[Lubrizol Corporation, Chanda & Roy, ISO 7619-1, Prusa Research]

6.1.6 Nylon

Materiál Nylon, odborně označovaný jako polyamid (PA), představuje v aditivní výrobě kategorii vysoce výkonných inženýrských termoplastů. V průmyslu je Nylon ceněn pro svou mimořádnou kombinaci mechanické pevnosti, houževnatosti a nízkého koeficientu tření. Z chemického hlediska jde o semikrystalický polymer tvořený lineárními řetězci s amidovými vazbami. Pro 3D tisk se nejčastěji využívají varianty PA6, PA12 nebo PA11, které se liší svou molekulární strukturou a mírou absorpce vlhkosti.

Hlavní předností Nylonu je jeho odolnost proti únavě materiálu a schopnost snášet vysoké dynamické zatížení. Na rozdíl od PLA nebo ABS není Nylon křehký; vykazuje vysokou míru prodloužení při přetržení, což znamená, že se před případným selháním výrazně deformuje. Tato vlastnost, v kombinaci s vynikající ořezuvzdorností, jej činí ideálním pro výrobu kluzných ložisek, ozubených kol a namáhaných kloubů. Teplota skelného přechodu u Nylonu není tak jednoznačným ukazatelem jako u amorfních plastů, ale jeho provozní teplota běžně dosahuje **120–150 °C**, což jej řadí k teplotně nejodolnějším materiálům pro FDM tisk.

Tiskový proces u Nylonu je považován za jeden z nejnáročnějších. Zásadním problémem je jeho extrémní hygroskopie – Nylon dokáže absorbovat vlhkost ze vzduchu (až několik procent své hmotnosti) během několika hodin. Navlhlý filament při tisku v trysce degraduje, což způsobuje syčení, vznik bublin a dramatické oslabení soudržnosti vrstev. Materiál proto musí být před tiskem i během něj uchováván v aktivní sušičce. Nylon také vykazuje vysoké tepelné smršťování, což vyžaduje vysoké teploty podložky (nad **100 °C**) a ideálně uzavřenou vyhřívanou komoru, aby se předešlo deformacím a odlepování od tiskového plátu.

[Chanda & Roy, DuPont, Ashby, Prusa Research]

6.2 SLA, DLP a LCD

6.2.1.1 Standard resins (Standardní pryskyřice)

Standardní pryskyřice tvoří základní materiálovou skupinu pro technologie LCD, SLA a DLP. Z chemického hlediska se jedná o kapalnou směs monomerů a oligomerů, které obsahují specifické fotoiniciátory. Tyto látky reagují na světlo o vlnové délce (nejčastěji 405 nm) procesem fotopolymerizace, při kterém dochází k rychlému zesíťování molekul do pevné polymerní struktury.

Dominantní vlastností standardních pryskyřic je schopnost reprodukovat extrémně jemné geometrické detaily. Díky nízké viskozitě v tekutém stavu materiál precizně kopíruje tvar definovaný světelným zdrojem, což umožňuje tisk vrstev o tloušťce od **0,02 mm**. Výsledný povrch je izotropní a na pohled homogenní, což je zásadní rozdíl oproti technologii FDM, kde je vrstvení vždy patrné. Tato estetická a rozměrová dokonalost je však vykoupena specifickým mechanickým chováním.

Z hlediska mechaniky se tyto materiály řadí mezi tuhé a křehké polymery. Vykazují vysoký modul pružnosti, což znamená, že jsou velmi pevné v tahu a tlaku při statickém namáhání. Mají však minimální schopnost plastické deformace – mezní prodloužení se obvykle pohybuje pouze mezi **5 % a 10 %**. V praxi to znamená, že při nárazu, ohybu nebo překročení kritického zatížení nedojde k deformaci součástky, ale k jejímu náhlému a tříštivému lomu, podobně jako u skla nebo tvrdé keramiky.

Dalším důležitým aspektem je chování materiálu po samotném tisku. Standardní pryskyřice vyžadují důkladný post-processing, který zahrnuje omytí v isopropylalkoholu (IPA) pro odstranění nevytvrzených zbytků a následné dodatečné vytvrzení v UV komoře. Během tohoto procesu dochází k finálnímu zesíťování polymerních řetězců, čímž materiál dosahuje svých tabulkových mechanických hodnot. Bez řádného vytvrzení zůstává součástka měkká a náchylná k deformaci, naopak při nadměrném osvitu může dojít k degradaci a zvýšení křehkosti.

[J. Dušek, B. Šafář, Ashby]

6.2.1.2 Durable resins (Houževnaté pryskyřice)

Houževnaté a odolné pryskyřice, v technické praxi často označované termíny **Tough** nebo **Durable**, představují skupinu fotopolymerů vyvinutou pro simulaci mechanického chování standardních konstrukčních termoplastů, jako jsou ABS nebo polypropylen (PP). Zatímco standardní pryskyřice jsou optimalizovány především pro vysoký detail a tuhost, odolné varianty se zaměřují na potlačení přirozené křehkosti fotopolymerů a výrazné zvýšení schopnosti absorbovat energii nárazu. Z chemického hlediska je jejich struktura modifikována snížením hustoty síťování polymerních řetězců nebo integrací elastomerních složek přímo do polymerní matrice, což materiálu umožňuje vykazovat výraznou plastickou deformaci před samotným selháním.

Nejvýraznějším technickým rysem těchto materiálů je vysoká hodnota mezního prodloužení a rázové houževnatosti. U odolných pryskyřic se prodloužení při přetržení pohybuje v rozmezí **30 % až 50 %**, což je v přímém kontrastu se standardními pryskyřicemi, které obvykle selhávají již při 5 % deformaci. Tato vlastnost je kritická pro součástky, které musí v provozu čelit vibracím, dynamickým rázům nebo opakovanému ohýbání. Díky této houževnatosti jsou materiály ideální pro výrobu funkčních prvků, jako jsou zaklapávací mechanismy (snap-fits), u nichž se vyžaduje krátkodobé roztažení bez vzniku trhlin, nebo mechanické sestavy, které musí odolat vrtání a řezání závitů při následné montáži.

Proces tisku z odolných pryskyřic vyžaduje precizní nastavení expozičních parametrů. Vzhledem k modifikovanému složení bývají tyto kapaliny často viskoznější, což klade vyšší nároky na časy ustálení hladiny mezi jednotlivými vrstvami, aby nedocházelo k defektům v důsledku nedostatečného zatečení materiálu. Naprosto klíčovým krokem je však následný post-processing. Dosažení deklarovaných mechanických hodnot je přímo podmíněno správnou délkou a teplotou dodatečného vytvrzování v UV komoře; nedostatečně vytvrzený díl zůstává měkký a tvarově nestabilní, zatímco nadměrný osvit může vést k opětovnému zkrěhnutí materiálu. Určitým limitem těchto pryskyřic zůstává nižší teplota tepelné deformace (HDT), která se pohybuje kolem **50 °C**, což omezuje jejich nasazení v tepelně exponovaných prostředích.

[Formlabs Inc., J. Dušek, B. Šafář. Votřel – vlastní zkušenosti]

6.2.1.3 High-Temperature resins (Teplotně odolná pryskyřice)

Vysokoteplotní inženýrské pryskyřice představují technologický vrchol v oblasti fotopolymerů, navržený pro aplikace, kde součástky musí odolávat extrémnímu tepelnému namáhání bez ztráty tvarové stability. Zatímco běžné pryskyřice začínají měknout již při teplotách kolem 50 °C, tyto materiály jsou schopny si zachovat své mechanické vlastnosti i při teplotách přesahujících **200 °C**. Tohoto efektu je dosaženo extrémně vysokou hustotou síťování polymerních řetězců, čehož se v praxi docílí specifickým chemickým složením monomerů a povinným tepelným vytvrzováním v závěrečné fázi post-processingu.

Mechanický profil vysokoteplotních pryskyřic je charakterizován mimořádnou tuhostí a tvrdostí, ovšem za cenu velmi vysoké křehkosti. Materiály vykazují vysoký modul pružnosti v tahu a tlaku, což znamená, že se pod zatížením téměř nedeformují. Mezní prodloužení se však pohybuje na velmi nízkých hodnotách, často pod **2–3 %**, což v technické praxi znamená, že materiál postrádá jakoukoli pružnost a při překročení meze pevnosti dochází k náhlému lomu. Klíčovým parametrem je zde teplota tepelné deformace (HDT), která definuje hranici, při níž se testovací vzorek začne pod definovaným zatížením prohýbat. U špičkových inženýrských pryskyřic dosahuje tato hodnota až **238 °C** při tlaku 0,45 MPa.

Díky těmto vlastnostem nacházejí vysokoteplotní pryskyřice uplatnění v náročných průmyslových testech a výrobních procesech. Jsou využívány pro výrobu nízko objemových forem pro vstřikování plastů, kde musí materiál odolat tlaku a teplotě taveniny vstřikovaného termoplastu. Další významnou oblastí jsou testy v aerodynamických tunelech, součástky pro horkovzdušné rozvody, statické komponenty motorových prostorů nebo formy pro odlévání kovů s nízkým bodem tání. Vzhledem k vysoké viskozitě a specifickým nárokům na vytvrzování je tisk z těchto materiálů náročnější a vyžaduje přesné dodržování technologických postupů výrobce, včetně stupňovaného ohřevu během post-processingu pro uvolnění vnitřního pnutí.

[Formlabs Inc., J. Dušek, B. Šafář, V. P. Zahariev]

6.2.2 SLS

U technologie SLS (Selective Laser Sintering) je výběr materiálu vázán na schopnost polymeru přejít z pevného stavu do polotekutého a následně se opět spojit v homogenní strukturu bez přítomnosti lepidel. Zatímco u FDM máme stovky variant, SLS se soustředí na menší portfolio vysoce výkonných inženýrských prášků, kde dominuje rodina **Polyamidů (PA)**.

[S. M. Sauter]

6.2.2.1 Polyamid 12 (PA 12) – Průmyslový standard

PA 12 je nejčastěji používaným materiálem v SLS tisku díky své vynikající stabilitě během procesu sinterování. Vykazuje minimální nasákavost vlhkosti (na rozdíl od PA 6 používaného ve FDM), což zaručuje rozměrovou přesnost a konstantní mechanické vlastnosti i v proměnlivém prostředí.

- **Vlastnosti:** Vysoká pevnost, vynikající chemická odolnost vůči olejům a palivům, dlouhodobá trvanlivost.
- **Využití:** Funkční prototypy, kryty převodovek, nádrže na provozní kapaliny a finální díly v automobilním průmyslu.

[EOS GMBH, S. M. Sauter, DuPont]

6.2.2.2 Polyamid 11 (PA 11) – Houževnatost a ekologie

PA 11 je bio-polymer vyráběný z ricinového oleje. Ve srovnání s PA 12 nabízí vyšší tažnost a rázovou houževnatost. Je to materiál volby pro díly, které nesmí za žádných okolností prasknout tříštivým lomem.

- **Vlastnosti:** Extrémní odolnost proti nárazu, vysoká flexibilita (při tenké stěně funguje jako pružina), excelentní biokompatibilita.
- **Využití:** Mechanicky namáhané panty, sportovní vybavení (části bot, přileb), protetika a ortoptické pomůcky.

[Arkema, EOS GMBH, Ashby]

6.2.2.3 Kompozitní prášky (Plněné materiály)

Pro zvýšení specifických vlastností se základní nylonové prášky míchají s aditivy. Tím vznikají materiály pro extrémní podmínky:

- **PA 12 Glass Filled (GF):** Prášek plněný skleněnými mikrokuličkami. Výrazně zvyšuje tuhost a tepelnou odolnost součástky. Ideální pro formy nebo díly v motorovém prostoru.
- **PA 12 Aluminum Filled (Alumide):** Obsahuje hliníkový prach. Výsledné díly mají kovový vzhled, dobrou tepelnou vodivost a jsou velmi snadno mechanicky opracovatelné (broušení, vrtání).
- **Carbon Filled (CF):** Nylon vyztužený uhlíkovými vlákny pro maximální pevnost při zachování nízké hmotnosti.

[EOS GMBH, Ashby]

6.2.2.4 TPU (Termoplastický polyuretan)

V SLS variantě umožňuje tisk složitých mřížkových struktur (lattices), které by byly s FDM nebo odlitím nevyrobitelné.

- **Vlastnosti:** Vysoká elasticita, schopnost návratu do původního tvaru a skvělé tlumení vibrací.
- **Využití:** Ochranné mřížky, těsnění, podrážky bot na míru nebo měkké úchopy nástrojů.

[Lattices, Gibson, Rosen and Stucker, Ashby]

7. Zkoušky pevnosti tiskových materiálů

7.1 Jak bude zkouška probíhat?

Všechny zkušební vzorky byly podrobeny tahové zkoušce v souladu s mezinárodní normou ISO 527, která definuje geometrii těles a procesní parametry pro testování plastů. Výroba zkušebních těles byla realizována tak, aby plně splňovala požadavky na přesnost a kvalitu povrchu stanovené touto normou.

K měření byl využit elektromechanický zkušební stroj Shimadzu EZ-LX. Tento přístroj umožňuje přesné řízení zatěžování a snímání silové odezvy materiálu. Pro sběr a následné statistické zpracování naměřených dat byl použit specializovaný software Trapezium X (verze 1.5.2), který umožnil detailní analýzu tahových diagramů a výpočet sledovaných mechanických charakteristik.

Zkouška bude vynechána u metody tisku SLS. Důvodem pro tento krok je nedostupnost SLS tiskárny a finanční náročnosti tohoto tisku, proto byla vyřazena z výzkumné části. Dále ze zkoušek byly vyřazeny materiály ASA a Nylon u metody FDM, tepelně odolné pryskyřice u metody SLA, tyto všechny rovněž z finančních důvodů byly vyřazeny.

7.1.1 Mez pevnosti

Mez pevnosti v tahu představuje v technické praxi maximální napětí, které materiál snese, než dojde k jeho strukturálnímu selhání. V rámci naší zkoušky, vycházející z normy ISO 527, reprezentuje tento bod na pracovním diagramu absolutní silové maximum, kterému zkušební těleso dokázalo vzdorovat. Pro konstruktéra je to výchozí parametr, od kterého se odvíjí stanovení koeficientu bezpečnosti pro reálné provozní zatížení.

Zatímco u konvenčně litého plastu je tato hodnota dána primárně jeho chemickým složením, u aditivní výroby technologií FDM je situace složitější. Mez pevnosti zde neodráží pouze limity samotného polymeru, ale je kriticky závislá na anizotropii výrobního procesu. Reálná únosnost součástky je tak přímo limitována kvalitou spojení a adhezí mezi jednotlivými tiskovými vrstvami.

[Iso 527-1, Iso 527-2]

7.1.2 Bod zlomu

Bod zlomu (anglicky **Break Point**) definuje v materiálových vědách konečný stav, kdy dochází k úplnému porušení kontinuity materiálu a k jeho fyzickému rozdělení na samostatné části. V technické dokumentaci je tento moment vyjádřen souřadnicemi napětí při přetržení a poměrného prodloužení při přetržení. Zatímco mez pevnosti udává maximální napětí, které materiál během zkoušky vydržel, bod zlomu zaznamenává moment definitivního mechanického selhání.

Vlastní mechanismus lomu u polymerů je silně závislý na jejich vnitřní struktuře a teplotě, přičemž se rozlišují dva základní typy selhání. **Křehký lom** je typický pro materiály s vysokou hustotou síťování nebo pro termoplasty pracující pod jejich teplotou skelného přechodu. U tohoto typu selhání mez pevnosti v podstatě splývá s bodem zlomu, protože dochází k minimální nebo zcela nulové plastické deformaci. Trhlina se v materiálu šíří vysokou rychlostí kolmo na směr působícího napětí, což zanechává lomovou plochu obvykle hladkou a lesklou.

Naproti tomu **houževnatý lom** je charakteristický pro materiály schopné rozsáhlé plastické deformace. Před dosažením bodu zlomu zde dochází k přeskupení polymerních řetězců a materiál se v místě největšího namáhání začne viditelně zužovat, čímž vzniká takzvaný krček. Tento proces vede k poklesu nominálního napětí těsně před roztržením. V rámci technických listů se tento stav interpretuje skrze hodnotu prodloužení při přetržení. Nízká tažnost pod 10 % signalizuje křehký materiál, zatímco vysoká tažnost nad 20 % značí houževnatý materiál schopný pohlcovat energii a varovat před selháním viditelnou změnou tvaru.

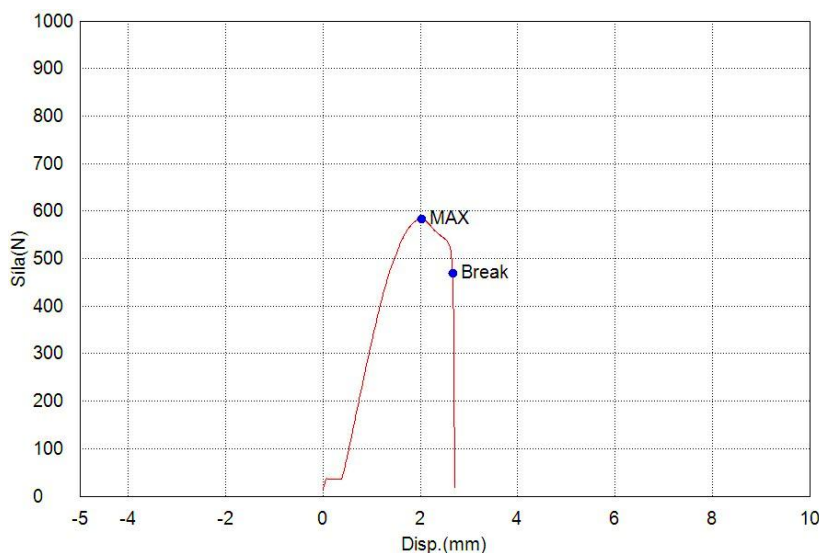
U 3D tisku není bod zlomu ovlivněn pouze samotným polymerem, ale také anizotropií výrobního procesu. U technologie FDM dochází v bodě zlomu nejčastěji k adheznímu selhání, tedy k oddělení jednotlivých vrstev od sebe, nikoliv k přetržení samotného materiálu. Proto je prodloužení při přetržení v ose Z u těchto tisků výrazně nižší než v osách X a Y. Naopak u metod SLA a SLS, kde dochází k chemickému provázání nebo homogennímu spečení, je bod zlomu v různých směrech konzistentnější a lépe odpovídá vlastnostem litého plastu.

[ISO 527]

8. Data ze zkoušek materiálů

8.1 PLA

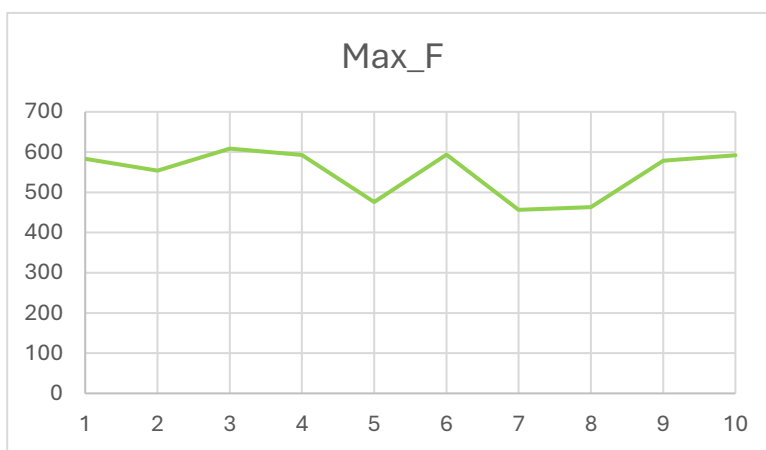
8.1.1.1 Průběh zkoušky v grafu



Graf 1 - Průběh zkoušky PLA

8.1.1.2 Maximální zatížení

Doprovodný graf vizualizuje naměřenou **mez pevnosti** pro jednotlivé vzorky, přičemž jsou vyneseny výhradně maximální dosažené hodnoty napětí. V těchto výsledcích je patrná určitá **variabilita**, která je u aditivních technologií s nízkým stupněm výplně běžná. Tento rozptyl hodnot pravděpodobně souvisí s lokálními

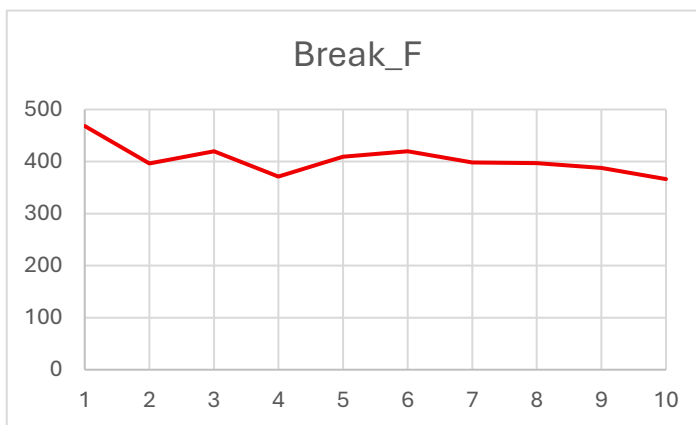


Graf 2 - Maximální síla PLA

nehomogenitami v tiskové struktuře a drobnými odchylkami v adhezi vrstev u jednotlivých kusů. I přes pozorovanou variabilitu však naměřená data jasně definují průměrnou únosnost infillu a identifikují mezní bod, za kterým již vnitřní struktura nebyla schopna odolávat narůstajícímu tahovému zatížení. Velmi překvapil vzorek č. 3, který unesl zatížení 608,3N, což činí přibližně 61 kg zátěže.

8.1.1.3 Bod zlomu

Následující graf zachycuje hodnoty napětí naměřené v **bodě zlomu**, tedy v okamžiku definitivního rozdělení zkušebního tělesa. Na rozdíl od předchozího grafu meze pevnosti je zde nepatrná variabilita naměřených výsledků. Tato nekonzistence je způsobena povahou selhání 3D tištěných struktur, kdy

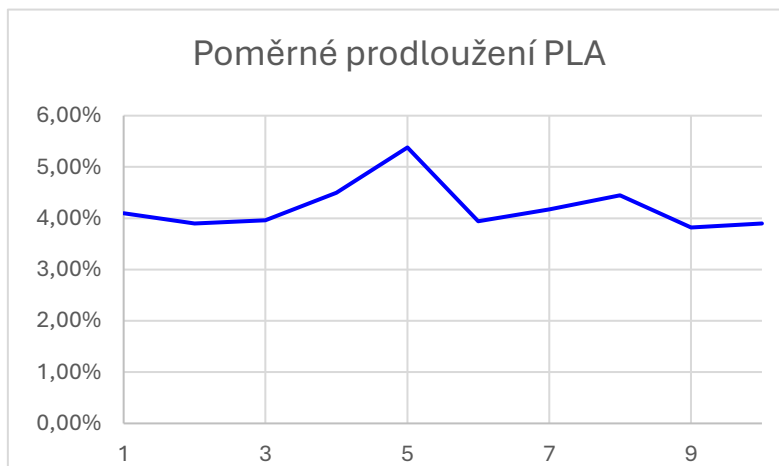


Graf 3 - Bod zlomu PLA

samotný proces prasknutí silně ovlivňují lokální nehomogenity v 15 % výplni, drobné defekty v adhezi jednotlivých vrstev nebo náhodné šíření trhliny v oslabeném místě. Zatímco maximální přenesená síla (mez pevnosti) vypovídá o celkové únosnosti vzorku, hodnota napětí v bodě zlomu je mnohem citlivější na tyto nahodilé vnitřní vlivy, což vysvětluje pozorovaný rozptyl dat mezi jednotlivými měřeními.

8.1.1.4 Prodloužení

Tento graf se zaměřuje výhradně na hodnoty **poměrného prodloužení** (tažnosti) v okamžiku definitivního přetržení vzorku. Naměřená data vykazují v porovnání s pevnostními charakteristikami velmi nízkou míru rozptylu, kdy se



Graf 4 - Poměrné prodloužení PLA

maximální variabilita mezi jednotlivými měřeními pohybuje v úzkém rozmezí přibližně 1,5 %. Kdy k největšímu prodloužení došlo u vzorku č. 5, zde došlo k 5,38 % prodloužení délky vzorku.

Tato vysoká podobnost výsledků, až na výjimky, svědčí o stabilitě tiskového procesu a homogenní kvalitě adheze mezi jednotlivými vrstvami. U vzorků s nízkou hustotou výplně je takto úzký rozptyl tažnosti indikátorem toho, že vnitřní mřížková struktura i samotný polymerní řetězec reagovaly na tahové zatížení předvídatelným způsobem. Nízká variabilita v tomto grafu

potvrzuje, že mechanické selhání nebylo iniciováno náhodnými tiskovými chybami, ale bylo přímým důsledkem materiálových limitů při zvolené geometrii infillu. Pro technickou praxi je tento údaj zásadní, neboť umožňuje s vysokou přesností predikovat, o kolik se součástka deformuje, než dojde k jejímu totálnímu zničení.

8.1.2 Závěr zkoušky materiálu

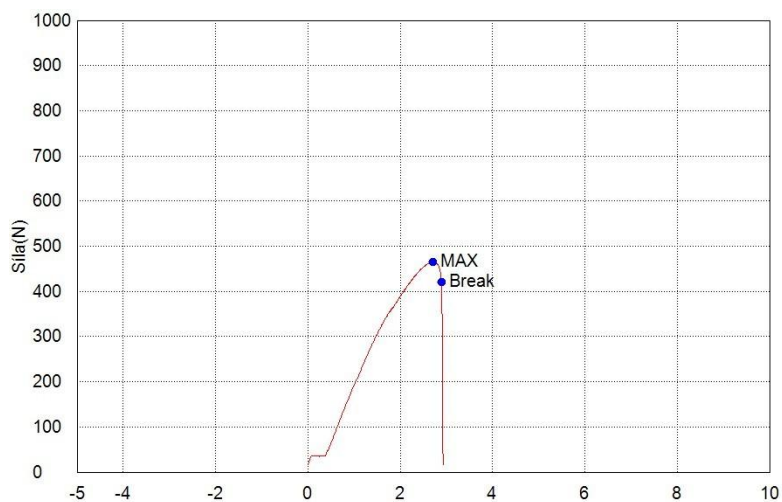
Materiál PLA nám v testech potvrdil, že si zachovává stabilní mechanické vlastnosti napříč různými konfiguracemi tisku. Zkoušky probíhaly s výplněmi 15 %, 50 % a 100 %, přičemž výsledná data vykazovala vysokou míru shody u všech těchto hustot. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl výsledky sjednotit do jedné společné kapitoly, což nám umožní i přehlednější srovnání s materiálem PETG v následující části [7.2].

Co se týče samotné pevnosti, tahovou zkoušku jsme realizovali v orientaci délky vrstev. Tímto postupem jsme měřili nejvyšší možný potenciál materiálu, protože výsledky nemohla negativně ovlivnit adheze mezi vrstvami. Pokud bychom vzorky namáhali napříč vrstvami (v ose Z), došlo by k selhání vazeb pravděpodobně dříve než k porušení materiálu samotného a výsledné síly by byly znatelně menší.

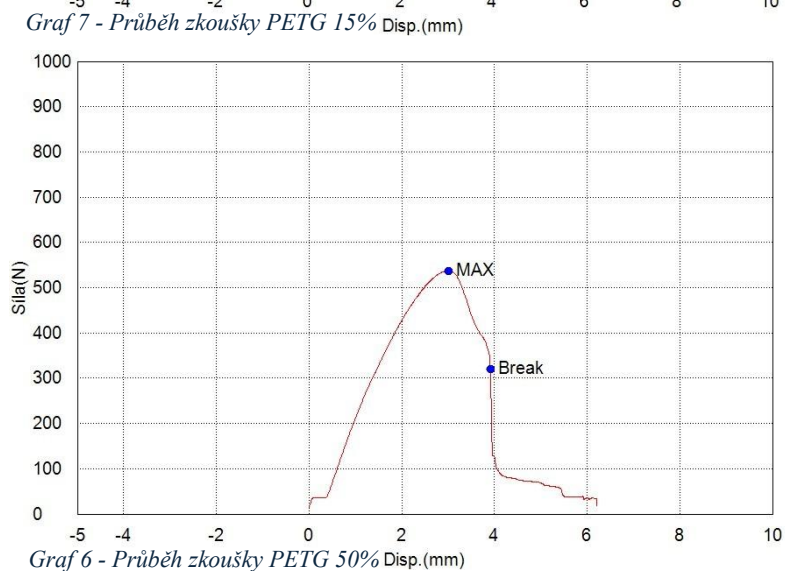
Z naměřených dat lze vyvodit, že pro technickou praxi je PLA ideální volbou v případech, kdy je vyžadována vysoká tuhost a minimální deformace před samotným selháním. I při nízkém stupni výplně (15 %) materiál vykazuje předvídatelné chování, což z něj činí efektivní řešení pro výrobu tvarově stálých komponentů, u kterých není prioritou vysoká rázová houževnatost, ale spíše statická únosnost a rozměrová přesnost. V těchto mezích nám materiál poslouží kvalitně nebude-li vystaven teplotám vyšším než 60°C.

8.2 PETG

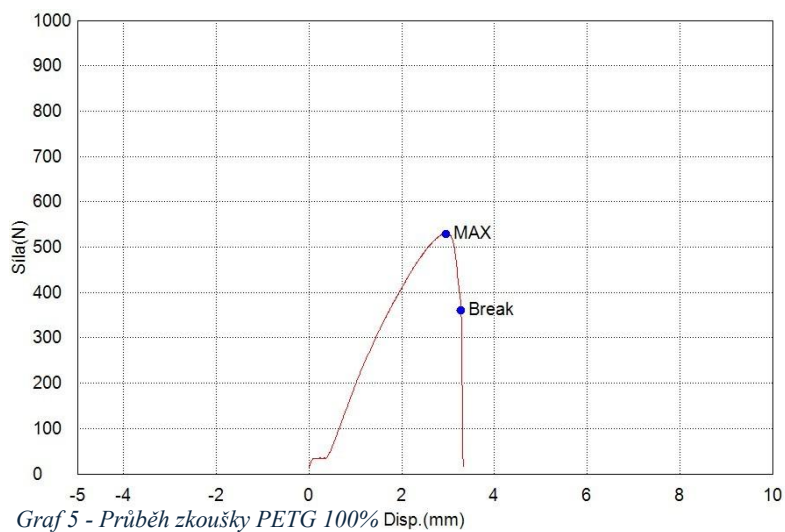
8.2.1.1 Záznam průběhu zkoušek



PETG – 15 % infill



PETG – 50 % infill



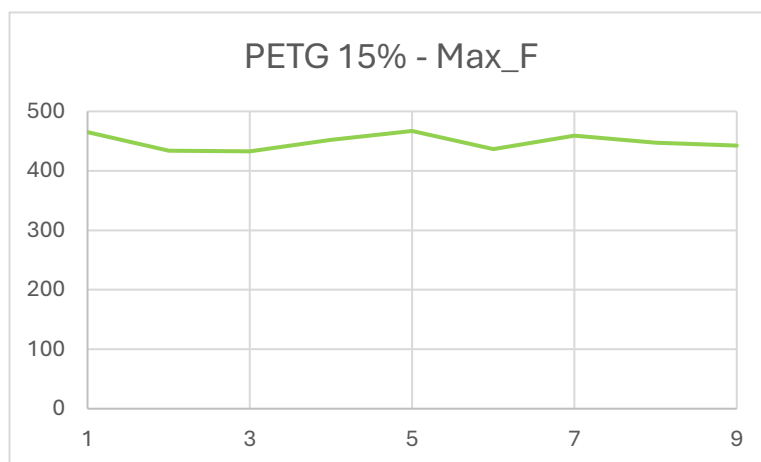
PETG – 100 % infill

8.2.2 PETG – 15%

8.2.2.1 Maximální zatížení

U vzorků s nejnižší hustotou výplně se naměřená mez pevnosti pohybuje ve velmi stabilním rozmezí mezi 432 N a 467 N. Tato data ukazují na vysokou efektivitu zvoleného tiskového vzoru, kdy i při pouhé 15 % hustotě dokáže vnitřní mřížka efektivně přenášet tahové zatížení. Drobná variabilita

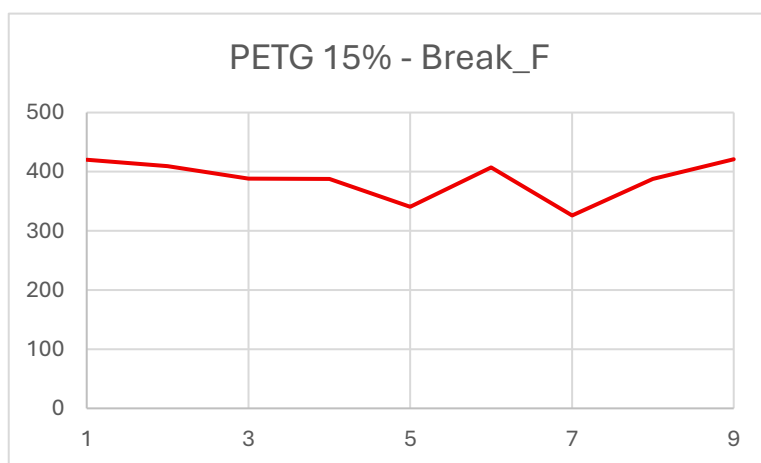
výsledků je pravděpodobně způsobena lokálním rozložením tiskových cest v úzkém průřezu zkušebního tělesa, což je u aditivních technologií s nízkým stupněm výplně běžný jev. Pro technickou praxi tento údaj potvrzuje, že pro odlehčené komponenty, které nejsou namáhány na absolutní mez, je tento typ infillu z hlediska poměru hmotnosti a únosnosti plně dostačující.



Graf 8 - Maximální síla PETG 15%

8.2.2.2 Bod zlomu

Naměřené hodnoty v bodě zlomu vykazují u 15% výplně relativně nízký rozptyl, přičemž se ve většině případů nacházejí v těsné blízkosti meze pevnosti. Tento jev naznačuje, že u řidší vnitřní struktury dochází po překonání maximální únosnosti k rychlému šíření trhliny a okamžitému selhání celého

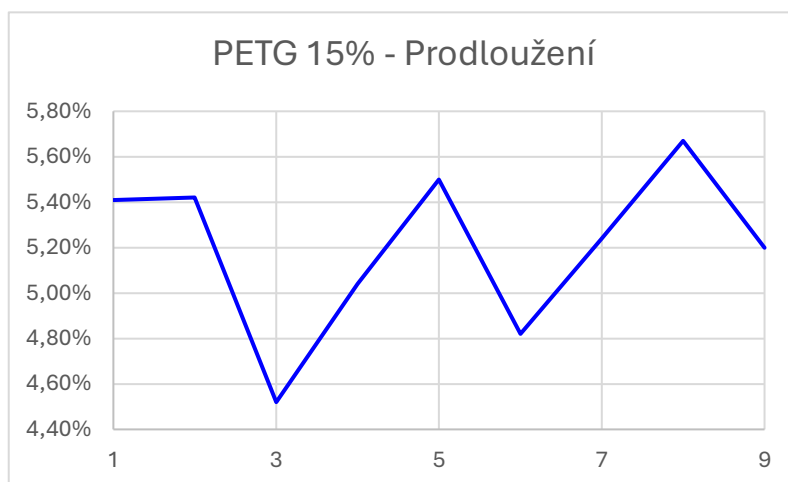


Graf 9 - Bod zlomu PETG 15%

průřezu bez výraznější fáze plastického přetvoření, která je typická pro houževnaté materiály s vyšší hustotou. Z hlediska bezpečnosti konstrukce je tato prediktabilita výhodou, neboť materiál neselhává náhodně, ale v jasně definovaném úzkém pásmu sil.

8.2.2.3 Prodloužení

Graf poměrného prodloužení u 15% výplně ukazuje na vysokou míru plasticity materiálu PETG, kdy se hodnoty tažnosti průměrně pohybují kolem hranice 5,2 %. Přestože je vnitřní struktura tvořena pouze lehkým infillem, polymerní řetězce vykazují schopnost se



Graf 10 - Poměrné prodloužení PETG 15%

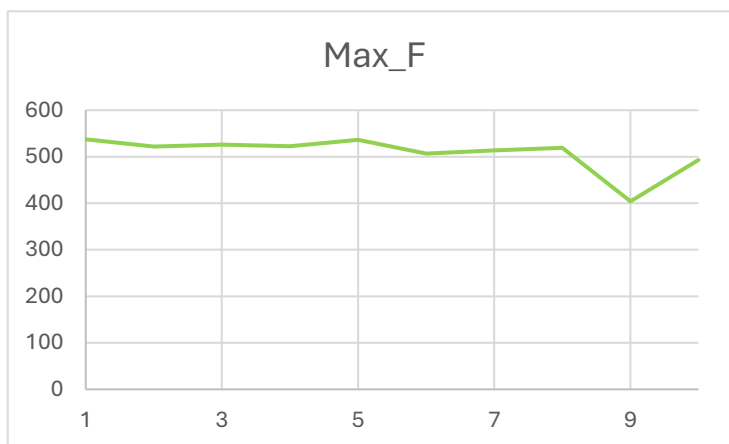
před finální separací vzorku výrazně deformovat. Nejnižší naměřená hodnota 4,52 % u vzorku č. 3 může signalizovat drobnou nehomogenitu v tiskové dráze, nicméně celkový trend potvrzuje, že i při nízké hustotě výplně si materiál zachovává svou charakteristickou houževnatost. Pro technické výpočty je tento údaj klíčový, neboť definuje bezpečnou zónu deformace součásti před jejím totálním selháním.

8.2.3 PETG – výplň 50%

8.2.3.1 Maximální zatížení

Při polovičním stupni výplně dosahovaly vzorky meze pevnosti nejčastěji v pásmu **510 N až 537 N**. Je patrné, že zvýšení hustoty infillu z 15 % na 50 % přineslo nárůst únosnosti o přibližně 15–20 %, což potvrzuje efektivní provázání vnitřní struktury s obvodovými stěnami. Výrazněji zde vybočuje pouze vzorek č. 9 s hodnotou

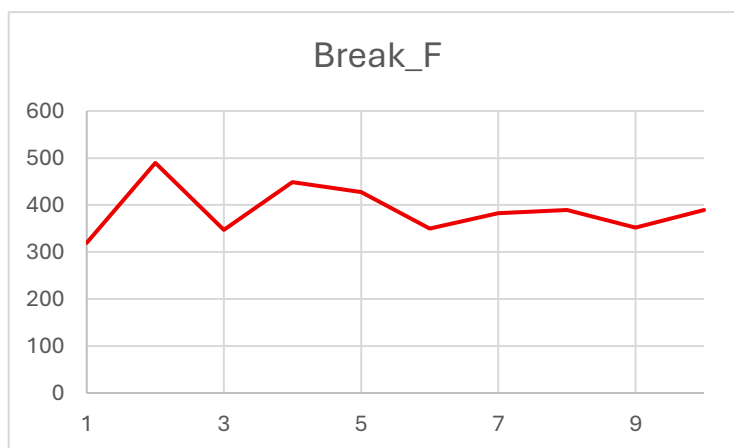
404 N, což může indikovat lokální deficit v adhezi nebo drobnou nehomogenitu v tiskové dráze. Celkově však data pro 50% výplň vykazují vysokou stabilitu a naznačují, že pro většinu technických aplikací představuje tato hustota optimální kompromis mezi spotřebou materiálu a výslednou mechanickou odolností.



Graf 11 - Maximální síla PETG 50%

8.2.3.2 Bod zlomu

Hodnoty naměřené v bodě zlomu vykazují u 50% výplně značnou nekonzistenci, kdy se výsledky pohybují v širokém rozpětí od **319 N až po 489 N**. Tento rozptyl je přímým důsledkem způsobu selhávání houževnatých polymerů s poloplnou strukturou. Po dosažení meze pevnosti nedochází

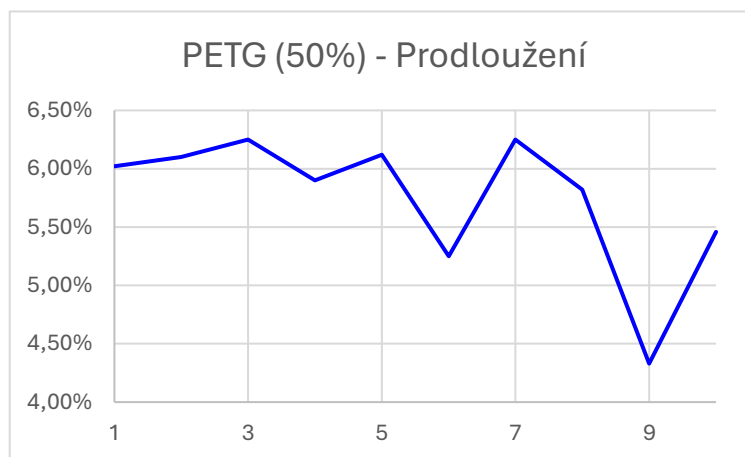


Graf 12 - Bod zlomu PETG 50%

k okamžité destrukci, ale k postupnému přetrhávání jednotlivých vnitřních mostů infillu a deformaci obvodových stěn. Finální bod zlomu je pak silně závislý na lokálních podmínkách v místě vzniku trhliny a kvalitě adheze konkrétních vrstev, což vysvětluje, proč jsou naměřená data u tohoto parametru méně predikovatelná než u meze pevnosti.

8.2.3.3 Prodloužení

Naměřená data tažnosti u 50% výplně se většinou pohybují v rozmezí **5,2 % až 6,2 %**, což potvrzuje vysokou schopnost materiálu PETG absorbovat energii deformací. Výrazným výkyvem je vzorek č. 9, u kterého bylo naměřeno prodloužení pouze **4,33 %**. Tento pokles, v kombinaci s jeho nižší mezí



Graf 13 - Poměrné prodloužení PETG 50%

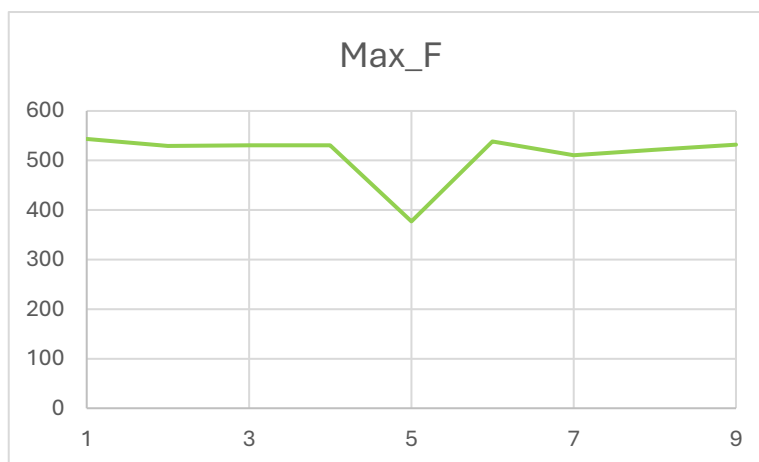
pevnosti, naznačuje přítomnost tiskové chyby nebo lokálního oslabení adheze, které vedlo k předčasnému selhání. Celkově však 50% výplně vykazuje srovnatelnou, a v některých případech i vyšší elasticitu než plná výplň, což z tohoto nastavení dělá velmi efektivní variantu pro díly vyžadující houževnatost při zachování nižší hmotnosti.

8.2.4 PETG – výplň 100%

8.2.4.1 Maximální zatížení

U plné výplně se hodnoty maximálního zatížení stabilně pohybují v úzkém pásmu mezi **510 N a 543 N**, což představuje technologické maximum pro danou geometrii vzorku. Výraznou anomálií je vzorek č. 5, který vykázal pokles na **377 N**. Tento propad u jinak homogenní struktury může být

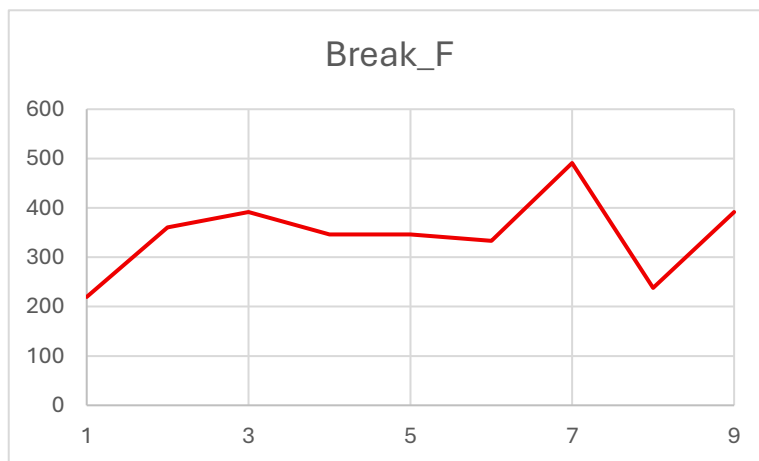
způsoben vnitřní vadou, například drobnou dutinou vzniklou podextruzí nebo nečistotou v materiálu, která oslabila vazbu mezi sousedními drahami. Celkově však 100% výplň potvrzuje předpoklad, že úplné vyplnění objemu vede k nejvyšší a nejvíce konzistentní mezi pevnosti, i když rozdíl oproti 50 % výplni není u PETG tak radikální jako u jiných materiálů.



Graf 14 - Maximální síla PETG 100%

8.2.4.2 Bod zlomu

U plné výplně vykazují naměřené hodnoty v bodě zlomu extrémní variabilitu, což je patrné zejména u vzorků č. 1 (**219,6 N**) a č. 8 (**238,2 N**) v porovnání se zbytkem sady. Tento jev je způsoben kumulací vnitřního pnutí v plně homogenní struktuře. Zatímco u

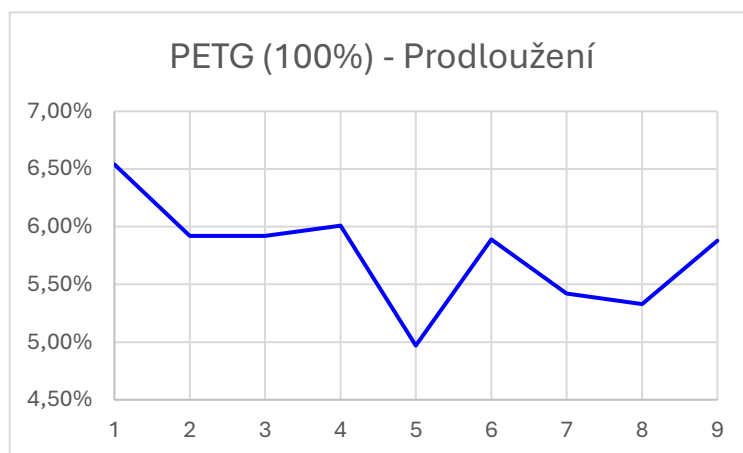


Graf 15 - Bod zlomu PETG 100%

nižších výplní může materiál částečně relaxovat v mezerách infillu, u 100% výplně se trhлина šíří napříč celým tělesem a její finální progresa je silně ovlivněna i sebemenší lokální nehomogenitou. Nízké hodnoty u některých vzorků naznačují, že po překonání meze pevnosti došlo k řetězovému selhání vazeb, zatímco u jiných (např. vzorek č. 7 s **491 N**) se struktura dokázala deformovat až do téměř úplného roztržení.

8.2.4.3 Prodloužení

Graf tažnosti u plné výplně vykazuje vysoké hodnoty s maximem **6,54 %** u vzorku č. 1. Průměrné prodloužení se stabilně pohybuje nad hranicí **5,5 %**, což je v porovnání s materiálem PLA výrazný nárůst plasticity. Tato schopnost deformace před finálním selháním potvrzuje, že 100% výplň u PETG



Graf 16 - Poměrné prodloužení PETG 100%

maximalizuje využití houževnatosti materiálu. I přes mírný pokles u vzorku č. 5 (**4,97 %**), který koresponduje s jeho nižší naměřenou pevností, jsou výsledky velmi konzistentní. Pro praktické strojírenské aplikace tato data definují PETG jako materiál schopný odolávat rázům a deformacím, které by u křehčích polymerů vedly k okamžité destrukci.

8.2.5 Závěr zkoušky materiálu

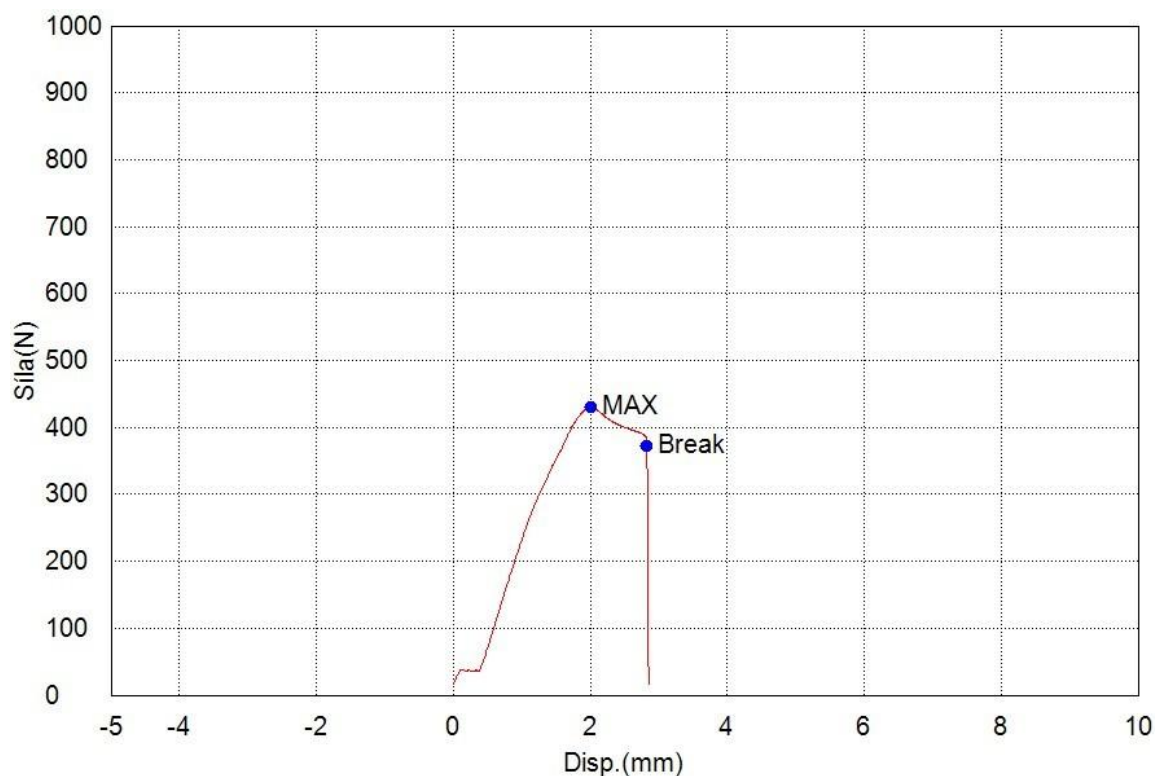
Materiál PETG v rámci tahových zkoušek potvrdil svou roli houževnatého a technologicky tvárného polymeru. Na rozdíl od PLA vykazuje PETG výraznější deformační zónu a schopnost absorbovat energii i po dosažení meze pevnosti. Z naměřených dat je patrné, že se zvyšující se hustotou výplně dochází k nárůstu maximálního zatížení, avšak rozdíl mezi 50 % a 100 % výplní je méně dramatický, než by odpovídalo nárůstu spotřeby materiálu. To naznačuje vysokou efektivitu vnitřních struktur při rozkladu tahového napětí.

Klíčovým poznatkem u tohoto materiálu je značná variabilita v bodě zlomu (Break_F), zejména u plné výplně, kde se hodnoty pohybovaly v širokém rozpětí. Tento jev je způsoben houževnatou povahou materiálu a postupným selháváním vazeb, kdy finální destrukci ovlivňují lokální nehomogenity v tiskových drahách. Vysoká hodnota prodloužení (tažnosti), která se stabilně pohybovala nad 5 %, definuje PETG jako spolehlivou volbu pro součásti, kde je vyžadována odolnost proti náhlému křehkému lomu.

Pro technickou praxi se PETG jeví jako nejvšestrannější materiál z testované sady. Nabízí optimální poměr mezi tuhostí a houževnatostí, přičemž jeho mechanické chování je i při středních hodnotách výplně dostatečně predikovatelné pro konstrukční aplikace namáhané v ose tiskových vrstev.

8.3 ABS

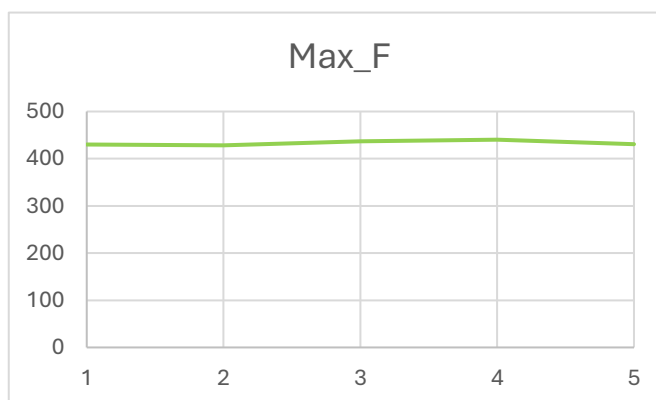
8.3.1.1 Záznam průběhu zkoušky



Graf 17 - Průběh zkoušky ABS

8.3.1.2 Maximální zatížení

U materiálu ABS se naměřená mez pevnosti pohybuje ve velmi úzkém a stabilním pásmu mezi **428 N a 440 N**. Tato minimální variabilita výsledků potvrzuje vysokou homogenitu vnitřní struktury vzorků a stabilitu tiskového procesu. I přes to, že ABS vykazuje nižší absolutní hodnoty maximální síly než

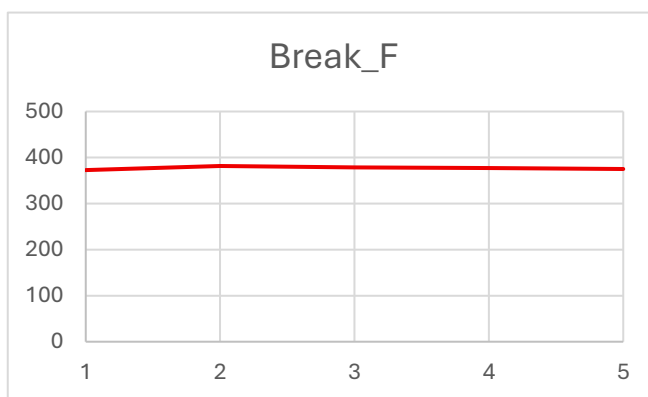


Graf 18 - Maximální síla ABS

PLA nebo PETG, jeho hlavní devízou zůstává konzistence mechanických vlastností, což je pro technické výpočty v konstrukci zásadní parametr.

8.3.1.3 Bod zlomu

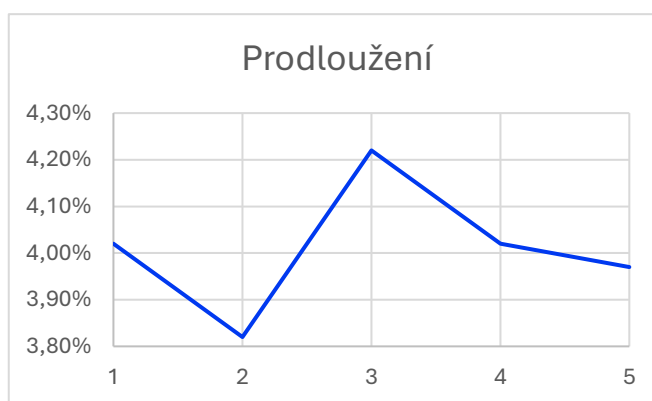
Hodnoty v bodě zlomu u ABS vykazují podobnou stabilitu jako u meze pevnosti, nejčastěji v rozmezí **372 N až 381 N**. Rozdíl mezi maximální silou a silou v okamžiku zlomu je poměrně malý, což ukazuje na to, že po překonání meze pevnosti dochází k poměrně rychlé degradaci struktury, ovšem stále s určitou mírou kontrolované deformace. Na rozdíl od PETG zde nenalézáme žádné extrémní výkyvy, což naznačuje, že tiskové vady měly na tento materiál minimální vliv.



Graf 19 - Bod zlomu ABS

8.3.1.4 Prodloužení

V grafu poměrného prodloužení vyazuje ABS nejnížší míru tažnosti z testovaných FDM polymerů, kdy se hodnoty pohybují kolem hranice **4 %**. Tato nízká variabilita (rozptyl pouze 0,4 %) potvrzuje, že ABS je materiál s vysokou tvarovou stálostí. Přestože nedosahuje houževnatosti PETG, jeho deformační chování je velmi předvídatelné, což umožňuje přesnou predikci mezního stavu součásti před jejím porušením.



Graf 20 - Poměrné prodloužení ABS

8.3.2 Závěr zkoušky materiálu

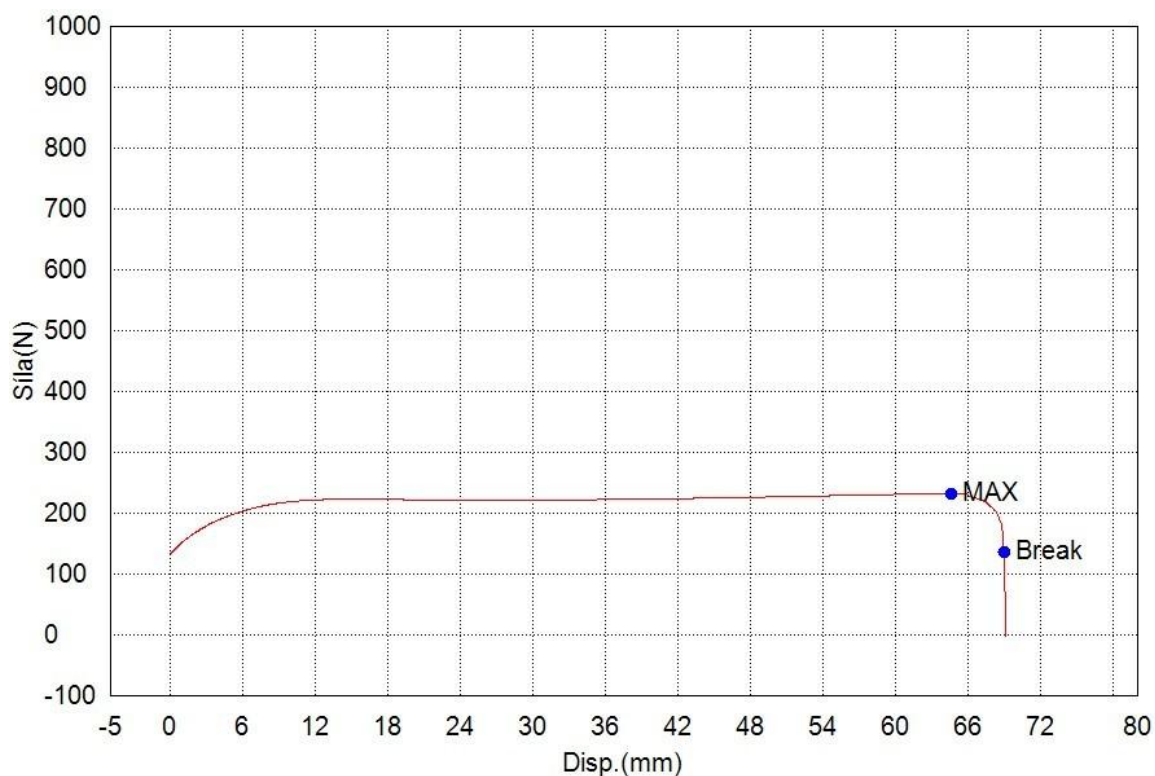
Materiál ABS v testech potvrdil svou pověst stabilního inženýrského polymeru. Ačkoliv v absolutních hodnotách zaostává za mezí pevnosti PLA, jeho hlavní přednost spočívá v mimořádné vyrovnanosti výsledků napříč všemi vzorky. Naměřené maximální zatížení v úzkém pásmu **428 N až 440 N** demonstruje, že tiskový proces byl v kontrolovaném prostředí velmi stabilní a vnitřní struktura nevykazovala kritické defekty.

Z hlediska deformačního chování se ABS projevuje jako materiál s vysokou tvarovou stálostí. Nízká tažnost pohybující se kolem **4 %** je jasným indikátorem tuhosti, která je však vykoupena nižší houževnatostí oproti PETG. Relativně malý rozdíl mezi maximální silou a silou v bodě zlomu (**372 N až 381 N**) ukazuje na to, že po překonání meze pevnosti dochází k poměrně rychlému, ale predikovatelnému selhání.

Pro technickou praxi, a zejména pro aplikace vyžadující přesné lícování a rozměrovou stálost, je ABS díky své minimální variabilitě mechanických vlastností optimální volbou. Nízký rozptyl dat umožňuje konstruktérovi pracovat s nižším koeficientem bezpečnosti, což je v aditivní výrobě, často bojující s anizotropií, velmi cenný parametr.

8.4 TPU

8.4.1.1 Záznam průběhu zkoušky



Graf 21 - Průběh zkoušky TPU

Komentář

Předběžné zatížení činilo 140 N a maximální zatížení činilo 235,4 N. K finálnímu prodloužení je potřeba přičíst 150 mm.

8.4.1.2 Maximální zatížení

U materiálu TPU byla naměřena maximální síla **235,4 N**. Ve srovnání s tuhými polymery (PLA, ABS) je tato hodnota nižší, což je dáno vysokou elasticitou materiálu, kdy dochází k masivnímu prodlužování a zužování průřezu vzorku (tzv. krčkování) ještě před dosažením meze pevnosti. Pro technickou praxi tato hodnota definuje mez, za kterou již vnitřní struktura elastomeru přestává plnit svou nosnou funkci.

8.4.1.3 Bod zlomu

V bodě zlomu byla zaznamenána síla **134,6 N**. Výrazný rozdíl mezi maximální silou a silou při zlomu je typický právě pro vysoce houževnaté elastomery. Materiál se po dosažení maxima dále deformuje a k definitivnímu přetržení dochází až při výrazně nižším napětí, kdy už jsou polymerní řetězce extrémně orientovány a dochází k jejich postupné separaci.

8.4.1.4 Prodloužení

U zkoušeného vzorku bylo dosaženo prodloužení **219 mm**, což po přepočtu na normovanou délku vzorku představuje enormní tažnost v řádech stovek procent, konkrétně **730 %**. Tato hodnota potvrzuje, že TPU je ideální pro aplikace vyžadující tlumení rázů a vysokou flexibilitu. Na rozdíl od křehkého selhání PLA je selhání TPU pozvolné a doprovázené výraznou tvarovou změnou, což z něj činí materiál s vysokou pasivní bezpečností.

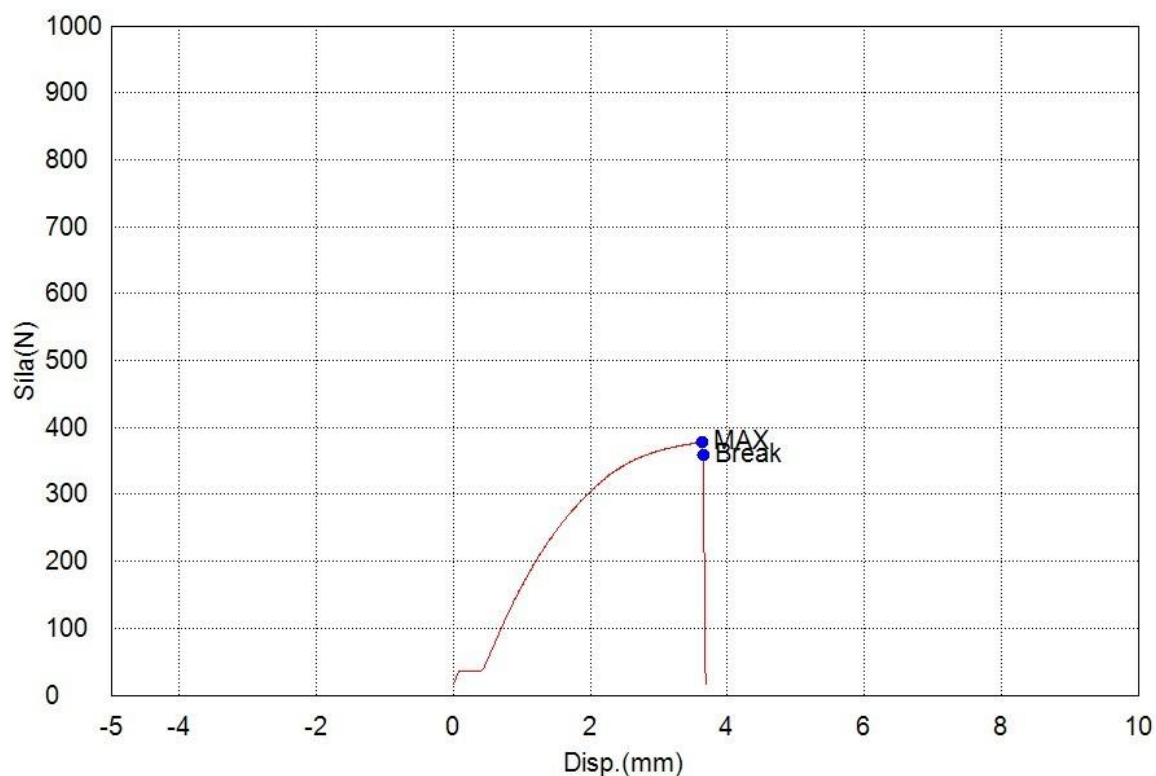
8.4.2 Závěr zkoušky materiálu

Zkouška materiálu TPU (Flex) potvrdila jeho unikátní postavení mezi testovanými polymery, kdy se svými vlastnostmi zcela vymyká tuhým termoplastům jako PLA nebo ABS. I přes velmi omezený počet jednoho vzorku z důvodu nedostatku materiálu jsou naměřená data jasným indikátorem chování elastomerů v aditivní výrobě. Maximální síla **235,4 N** představuje mez, při které se plně projevuje elasticita materiálu, přičemž následný pokles k bodu zlomu na hodnotu **134,6 N** je doprovázen extrémním zúžením průřezu vzorku.

Hlavním technickým závěrem je enormní tažnost, která při prodloužení **219 mm** dosahuje po přepočtu na normovanou délku hodnoty přes **700 %**. Tento výsledek dokazuje, že TPU je díky své houževnatosti a postupnému selhávání ideální pro aplikace vyžadující tlumení rázů a vysokou tvarovou paměť. Na rozdíl od křehkého lomu u PLA poskytuje tento materiál širokou deformační zónu a vysokou pasivní bezpečnost, neboť nedochází k náhlému katastrofickému rozdělení součásti, ale k její postupné plastické deformaci. V technické praxi je tak TPU nezastupitelný všude tam, kde je prioritou flexibilita a odolnost proti mechanickému poškození na úkor absolutní tuhosti.

8.5 SLA

8.5.1.1 Záznam průběhu zkoušky

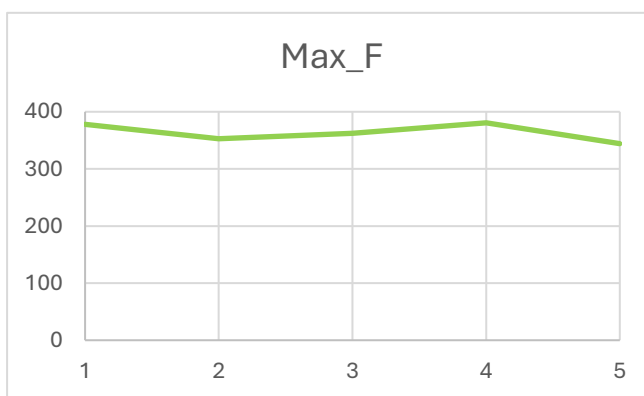


Graf 22 - Průběh zkoušky SLA

8.5.1.2 Maximální zatížení

U technologie SLA se naměřená mez pevnosti pohybuje ve velmi vyrovnaném pásmu mezi **344,2 N a 380,6 N**. Tato stabilita výsledků potvrzuje vysokou kvalitu polymerizace v celém objemu vzorku, kdy na rozdíl od FDM technologií nedochází k oslabení vlivem adheze tiskových strun. Naměřené maximum

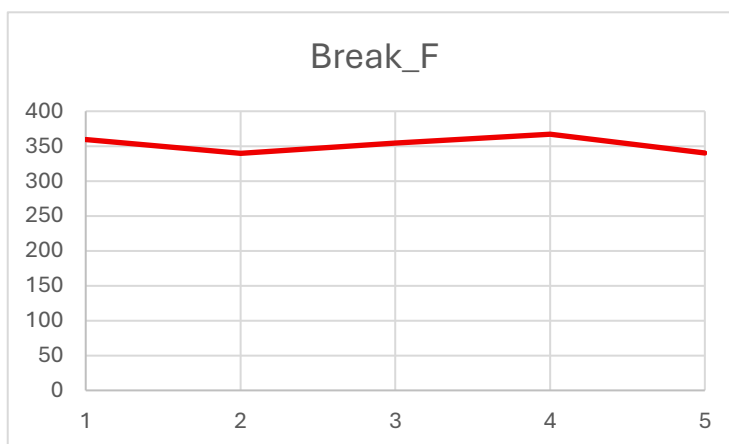
380,6 N (vzorek č. 4) dokazuje, že moderní pryskyřice jsou schopny konkurovat běžným termoplastům i v oblasti statické únosnosti.



Graf 23 - Maximální síla SLA

8.5.1.3 Bod zlomu

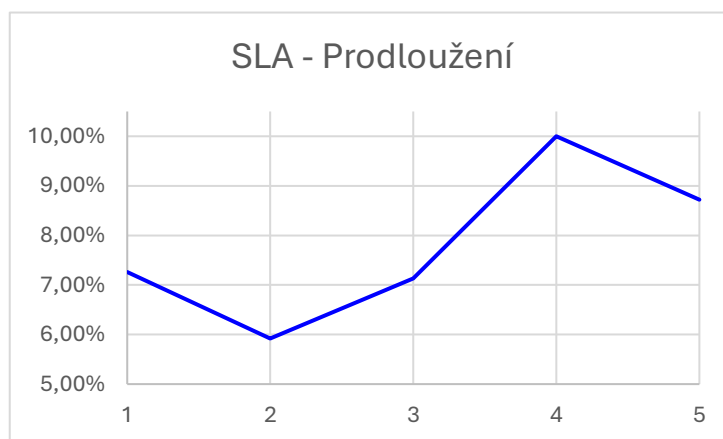
Hodnoty zaznamenané v bodě zlomu jsou u testované pryskyřice velmi blízké maximálnímu zatížení, nejčastěji v rozmezí **340 N až 367 N**. Tento jev jasně indikuje izotropní chování fotopolymery; jakmile vnitřní struktura dosáhne svého limitu, dochází k rychlému šíření trhliny bez výrazné fáze plastického tečení, kterou jsme pozorovali například u materiálu PETG. Minimální rozdíl mezi maximální silou a silou v okamžiku separace vzorku potvrzuje vysokou homogenitu materiálu, což je pro technologii vytvrzování UV světlem typické.



Graf 24 - Bod zlomu SLA

8.5.1.4 Prodloužení

V grafu tažnosti vykazuje SLA technologie zajímavou variabilitu, kdy se hodnoty pohybují od **5,92 % až po 10 %** u vzorku č. 4. Průměrné prodloužení kolem **7–8 %** je na poměry pryskyřic vynikajícím výsledkem a naznačuje, že zvolený materiál není čistě křehký, ale disponuje značnou mírou



Graf 25 - Poměrné prodloužení SLA

houževnatosti. Pro technickou praxi je tento údaj klíčový, protože definuje schopnost součásti absorbovat mikrodeformace před vznikem trvalého poškození.

8.5.2 Závěr zkoušky materiálu

Technologie SLA/DLP potvrdila v testech svou specifickou mechanickou charakteristiku, která se výrazně liší od vrstveného FDM tisku. Z naměřených dat je patrná vysoká homogenita vnitřní struktury, což se projevuje minimálním rozptylem mezi maximálním zatížením (**344 N až 380 N**) a bodem zlomu. Na rozdíl od termoplastů zde nedochází k postupnému tečení materiálu, ale k vysoce konzistentnímu přenosu sil v celém objemu vzorku.

Hlavním technickým přínosem této technologie je izotropní chování materiálu. Jelikož vzorky vznikají vytvrzováním UV světlem v celých vrstvách, nevykazují kritické slabiny v adhezi drah, které jsou typické pro anizotropní FDM struktury. Překvapivým zjištěním je vysoká houževnatost testované pryskyřice, kdy naměřená tažnost dosahující až **10 %** (vzorek č. 4) dokazuje, že moderní fotopolymery již nejsou pouze křehké, ale nabízejí mechanickou odolnost srovnatelnou s technickými plasty jako PETG.

Pro praktické využití, zejména při výrobě složitých funkčních dílů, představuje SLA/DLP technologii s nejvyšší mírou prediktability selhání. Stabilní mechanické vlastnosti v kombinaci s vysokou rozměrovou přesností z ní dělají optimální volbu pro aplikace, kde je nepřijatelná variabilita pevnosti způsobená směrem tisku.

9. Závěr

V této práci jsem si potvrdil to, co v technické praxi všichni tušíme, ale málokdy máme podložené tvrdými daty: 3D tisk není jen o vizuálních modelech, ale o pochopení mechanických limitů, které jsou u aditivních technologií specifické. Skrze tahové zkoušky na stroji Shimadzu EZ-LX podle normy ISO 527 jsem získal jasný přehled o tom, jak se různé polymery chovají pod reálným zatížením. I když jsem musel technologii SLS a materiály jako Nylon nebo ASA z finančních důvodů z měření vyřadit, zbývající data mi poskytla ucelený obraz pro většinu strojírenských aplikací.

Materiál PLA se v testech ukázal jako „strojní beton“ – je neuvěřitelně tuhý a pevný (u 15 % výplně unesl až 608,3 N), ale jeho křehkost je limitující. Na grafech je jasně vidět, že jakmile dosáhne maxima, následuje okamžitý lom bez varování. To je klíčové zjištění pro výuku: studentům musíme vštěpovat, že vysoká pevnost neznamena automaticky bezpečnost tam, kde hrozí rázy.

PETG pro mě v testech vyšel jako největší dříč. Potvrdil svou roli houževnatého materiálu, který se před selháním umí „ozvat“ deformací. Zajímavé je, že zvyšování výplně nad 50 % u něj nepřináší takový nárůst pevnosti, aby to ospravedlnilo dvojnásobnou spotřebu materiálu a času tisku. Pro efektivní konstrukci funkčních dílů je tedy 50 % infill tou nejrozumnější cestou.

U ABS mě potěšila hlavně konzistence výsledků. Rozptyl hodnot mezi 428 N a 440 N je minimální, což z něj dělá velmi spolehlivý inženýrský polymer pro díly, kde potřebujeme přesně počítat s deformací a lícováním. Ačkoliv je proces tisku náročný na stabilitu teploty v komoře, výsledná tvarová stálost za to stojí.

Zcela jiný svět představuje TPU. Tažnost přes 700 % a schopnost absorbovat energii z něj dělají materiál s nejvyšší pasivní bezpečností. Selhání je pozvolné a doprovázené masivní tvarovou změnou, což je přesně to, co v technické praxi chceme u součástí vystavených vibracím nebo nárazům.

Technologie SLA mi pak potvrdila výhodu izotropie. Díky UV vytvrzování jsou vlastnosti vzorku stejné ve všech směrech, což u FDM kvůli vrstvení nikdy úplně nedosáhneme. Moderní pryskyřice s pevností kolem 380 N už nejsou jen na ozdobu, ale snesou srovnání s technickými termoplasty.

Celkově mě tyto zkoušky naučily, že v aditivní výrobě je nejdůležitější souhra materiálu a tiskových parametrů. Anizotropie je u FDM fakt, se kterým musíme v konstrukci počítat, a správná volba orientace tisku v ose Z je často důležitější než samotná hustota výplně. Tato data mi teď umožňují navrhovat součástky ne podle pocitu, ale s vědomím skutečné meze pevnosti a bodu zlomu. Je to solidní základ pro to, abychom i ve školství učili studenty navrhovat díly, které v reálném provozu prostě udrží to, co mají.

10. Zdroje

10.1 Zdroje informací

10.1.1.1 Obecné informace a historie

[1] VOTŘEL, Tomáš. *Informace z vlastních zkušeností*. Hradec Králové, 2026.

[2] KODAMA, Hideo. *Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer*. *Review of Scientific Instruments*. 1981, roč. 52, č. 11, s. 1770–1773.

[3] 3D SYSTEMS. *Our Story*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>

[4] STRATASYS. *History*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/about-us/history>

[5] REPRAP PROJECT. *RepRap History*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: https://www.reprap.org/wiki/RepRap_History

[6] WOHLERS ASSOCIATES. *Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates, 2024.

[7] ČSN EN ISO/ASTM 52900. *Aditivní výroba – Obecné principy – Terminologie*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.

[8] PRUSA RESEARCH. *Oficiální stránky*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com>

10.1.1.2 Normy a metodika měření

[9] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

[10] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[11] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

[12] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná zkouška rázem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[13] ČSN EN ISO 180. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti Izod*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.

[14] ČSN EN ISO 604. *Plasty – Stanovení tlakových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[15] ČSN EN ISO 75-1. *Plasty – Stanovení teploty průhybu při zatížení – Část 1: Obecná zkušební metoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

[16] ČSN EN ISO 11357-1. *Plasty – Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) - Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[17] ČSN EN ISO 7619-1. *Přez, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti vtlačováním – Část 1: Metoda s tvrdoměrem (tvrdost Shore)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[18] ČSN EN ISO 4892-2. *Plasty – Metody vystavení laboratorním zdrojům světla – Část 2: Xenonové lampy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[19] STN EN ISO 17249. *Aditívna výroba – Práškové materiály – Špecifikácie*. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2013

10.1.1.3 Materiálové listy (Data Sheets)

[20] NATUREWORKS LLC. *Technical Data Sheet: Ingeo Biopolymer 3052D for 3D Printing*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.natureworksllc.com>

[21] EASTMAN CHEMICAL COMPANY. *Spectar™ PETG Copolymer: Technical Data Sheet*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.eastman.com>

[22] BASF FORWARD AM. *Technical Data Sheet: Ultrafuse® ABS*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.forward-am.com>

[23] PRUSA POLYMERS. *Technical Data Sheet: Prusament ASA*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.prusament.com>

- [24] LUBRIZOL CORPORATION. *Estane® TPU Technical Data Sheet*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.lubrizol.com>
- [25] DUPONT. *Zytel® Nylon Resin Technical Data Sheet*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.dupont.com>
- [26] FORMLABS INC. *Technical Data Sheet: Standard, Tough, and High Temp Resins*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24]. Dostupné z: <https://www.formlabs.com>
- [27] FORMLABS. *Technical Data Sheet: Tough 2000 Resin*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24].
- [28] ANYCUBIC / ELEGOO RESEARCH LAB. *Standard Resin Technical Data Sheet*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24].
- [29] EOS GMBH. *Material Data Sheet: PA 12 (PA 2200)*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24].
- [30] ARKEMA. *Rilsan® PA11 for Additive Manufacturing: Technical Data*. [online]. 2026 [cit. 2026-02-24].

10.1.1.4 Odborné publikace a literatura

- [31] ASHBY, Michael F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. vydání. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-1856176637.
- [32] CHANDA, Manas a Salil K. ROY. *Industrial Plastics: Theory and Applications*. 4. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 978-0849370397.
- [33] BRYDSON, John Anthony. *Plastics Materials*. 7. vydání. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 978-0750641326.
- [34] FRICK, Achim a Claudia STERN. *Practical Testing and Properties of Plastics*. Munich: Hanser Publishers, 2013. ISBN 978-1569905432.
- [35] MCKEEN, Laurence. *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers*. 4. vydání. Norwich: William Andrew, 2019. ISBN 978-0128164570.
- [36] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies*. 3. vydání. New York: Springer, 2021. ISBN 978-3030561260.
- [37] GARLOTTA, Donald. *A Literature Review of Poly(Lactic Acid)*. *Journal of Polymers and the Environment*. 2001, roč. 9, s. 63–84.

[38] LIGON, Sebastian C., et al. *Polymers for 3D Printing and Customization in Medical Devices*. *Chemical Reviews*. 2017, roč. 117, č. 15, s. 10212–10290.

[39] ZAHARIEV, V. P. *Polymerization of Photocurable Resins*. *Journal of Materials Science*. 2018, roč. 53, s. 112–125.

[40] ŠAFÁŘ, B. *Mechanické zkoušení aditivně vyráběných polymerů*. *Strojírenská technologie*. 2021, roč. 25, s. 45–52.

[41] DUŠEK, J. *Pokročilé fotopolymery pro průmyslové aplikace*. *Journal of Additive Manufacturing Technology*. 2022, roč. 2, s. 15–23.

[42] SAUTER, S. M. *Sintering processes of polymer powders*. Austin: University of Texas, 2010.

10.2 Grafy

Graf 1 - Průběh zkoušky PLA	29
Graf 2 - Maximální síla PLA	29
Graf 3 - Bod zlomu PLA	30
Graf 4 - Poměrné prodloužení PLA	30
Graf 5 - Průběh zkoušky PETG 100%	32
Graf 6 - Průběh zkoušky PETG 50%	32
Graf 7 - Průběh zkoušky PETG 15%	32
Graf 8 - Maximální síla PETG 15%	33
Graf 9 - Bod zlomu PETG 15%	33
Graf 10 - Poměrné prodloužení PETG 15%	34
Graf 11 - Maximální síla PETG 50%	35
Graf 12 - Bod zlomu PETG 50%	35
Graf 13 - Poměrné prodloužení PETG 50%	36
Graf 14 - Maximální síla PETG 100%	37
Graf 15 - Bod zlomu PETG 100%	37
Graf 16 - Poměrné prodloužení PETG 100%	38
Graf 17 - Průběh zkoušky ABS	40
Graf 18 - Maximální síla ABS	40
Graf 19 - Bod zlomu ABS	41
Graf 20 - Poměrné prodloužení ABS	41
Graf 21 - Průběh zkoušky TPU	43
Graf 22 - Průběh zkoušky SLA	45
Graf 23 - Maximální síla SLA	45
Graf 24 - Bod zlomu SLA	46
Graf 25 - Poměrné prodloužení SLA	46