

Jakub Stránský

**Analýza mechanických
vlastností materiálu
LUVOSINT PA12 9270 BK
zpracovaného technologií
SLS**

Bakalářská práce

Ostrava 2025



Jakub Stránský

**Analýza mechanických vlastností materiálu
LUVOSINT PA12 9270 BK zpracovaného
technologií SLS**

**Analysis of the mechanical properties of
material LUVOSINT PA12 9270 BK processed
by SLS technology**

Bakalářská práce

Vedoucí práce:
Ing. Jakub Měsíček, Ph.D.

Ostrava 2025

Bibliografický záznam

Autor: Jakub Stránský, Str0579

Název práce: Analýza mechanických vlastností materiálu LUVOSINT PA12 9270 BK
zpracovaného technologií SLS

Studijní program: Strojírenství – B0715A270011

Vedoucí práce: Ing. Jakub Měsíček, Ph.D.

Akademický rok: 2024/2025

Počet stran: 54

Klíčová slova: Aditivní technologie, 3D tisk, Materiál, Mechanické vlastnosti, Analýza

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STRÁNSKÝ, Jakub. *Analýza mechanických vlastností materiálu LUVOSINT PA12 9270 BK zpracovaného technologií SLS*. Ostrava, 2025. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Ing. Jakub Měsíček, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou mechanických vlastností materiálu LUVOSINT PA12 9270 BK, zpracovaného aditivní výrobní technologií selektivního laserového spékání (SLS). Hlavním cílem této práce je charakterizovat a otestovat mechanické vlastnosti tohoto polyamidového materiálu a porovnat jej s obdobným materiálem na trhu. Za tímto účelem byly testovány jednak vstupní materiály a jednak vzorky vytisknuté v různých orientacích z obou materiálů. Výsledky testů pak byly použity pro porovnání a zhodnocení obou materiálů. Tato bakalářská práce poskytuje pohled na proces 3D tisku selektivním laserovým spékáním a na následné testy.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

STRÁNSKÝ, Jakub. *Analysis of the mechanical properties of material LUVOSINT PA12 9270 BK processed by SLS technology*. Ostrava. 2025, Bachelor's Thesis. VSB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology. Thesis supervisor Ing. Jakub Měsíček, Ph.D.

This bachelor's thesis focuses on the analysis of the mechanical properties of the material LUVOSINT PA12 9270 BK, processed using the additive manufacturing technology of Selective Laser Sintering (SLS). The main objective of this thesis is to characterize and test the mechanical properties of this polyamide material and compare it with a similar material available on the market. For this purpose, both the input materials and the samples printed in various orientations from both materials were tested. The results of these tests were then used to compare and evaluate the two materials. This bachelor's thesis provides insight into the process of 3D printing using Selective Laser Sintering as well as the subsequent mechanical testing.

OBSAH

Úvod.....	7
1 Aditivní výroba technologií SLS.....	8
1.1 Stručná historie SLS tisku	8
1.2 Příprava před 3D tiskem	9
1.3 Proces tisku	11
1.4 Vady při SLS tisku.....	15
2 Materiály.....	19
2.1 Přehled materiálů využívaných v SLS technologii	19
2.2 Materiál LUVOSINT PA12 9270 BK	21
2.3 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů a metodika jejich testování.....	22
3 Experiment.....	27
3.1 Tisk.....	29
3.2 Měření velikosti a distribuce částic prášku	30
3.3 Zobrazení částic pomocí elektronové mikroskopie.....	32
3.4 Tahová zkouška	35
3.5 Měření drsnosti povrchu	44
3.6 Měření tvrdosti.....	45
4 Diskuze.....	46
5 Závěr	48
6 Použité zdroje	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
<i>SLS</i>	-	Selektivní laserové spékání (Selective laser sintering)
<i>SLM</i>	-	Selektivní laserové tavení (Selektivní laserové tavení)
<i>DMSL</i>	-	Přímé laserové tavení (Direct Metal Laser Sintering)
<i>PA12</i>	-	Druh polyamidu
<i>PA11</i>	-	Druh polyamidu
<i>CAD</i>	-	Počítačem podporované navrhování
<i>TPU</i>	-	Termoplastický polyuretan – konkrétní druh TPE
<i>TPE</i>	-	Termoplastický elastomer
<i>PA2200</i>	-	Druh polyamidu
<i>ČSN</i>	-	Česká státní norma
<i>ISO</i>	-	Mezinárodní norma
<i>R_m</i>	[MPa]	Pevnost v tahu
<i>E</i>	[GPa]	Modul pružnosti
<i>Shore</i>	[ShoreD]	Jednotka tvrdosti
<i>RP02</i>	[MPa]	Smluvní mez kluzu
<i>A</i>	%	Prodloužení
<i>F_m</i>	[N]	Maximální zatěžující síla
<i>FPS</i>	FPS	Snímky za sekundu

ÚVOD

Aditivní výroba, často označovaná jako 3D tisk, se v posledních desetiletích stala nedílnou součástí průmyslové výroby. Mezi jednu z nejrozšířenějších metod aditivní výroby/3D tisku lze zařadit také SLS metodu neboli Selektivní laserové spékání, které umožňuje rychlou výrobu prototypů a širokou škálu dílů s vysokou přesností a dobrými mechanickými vlastnostmi. Tato technologie využívá laser ke spékání tenkých práškových vrstev materiálu, čímž vytváří 3D objekty. [1-3] SLS tisk se osvědčil v mnoha odvětvích – např. v automobilovém [4,5], leteckém [6], spotřebním průmyslu [4], ve zdravotnictví [7] atd., a to především díky rychlému prototypování.

Jedním z materiálů často používaných v SLS technologii je polyamid PA12.

Jeho variantou je také LUVOSINT PA12 9270 BK – dále jen Luvosint PA12 od německé firmy Lehmann&Voss&Co. KG.

Cílem této bakalářské práce je analyzovat mechanické vlastnosti materiálu Luvosint PA12, zpracovaného technologií SLS. Práce se zaměřuje jednak na zkoumání samotného výchozího materiálu – prášku a dále na měření vlastností vzorků z něho tisknutých – jako jsou pevnost, pružnost a povrchová kvalita. Součástí zkoumání je také porovnání vlastností tohoto materiálu s jeho konkurenční obdobou. Výsledky této práce přispějí k lepšímu pochopení chování materiálu při aditivní výrobě a mohou být využity k optimalizaci procesních parametrů při použití technologie SLS nebo k porovnání s jinými materiály.

Stanovené cíle práce:

Podrobná rešerše technologie SLS a její uplatnění

Představení materiálů v SLS technologii

Příprava vzorků pro 3D tisk

Provedení testů – testy práškových materiálů, tahová zkouška, měření drsnosti a tvrdosti

Diskuse získaných výsledků

1 ADITIVNÍ VÝROBA TECHNOLOGIÍ SLS

Technologie SLS spadá do skupiny metod aditivní výroby známé jako powder bed fusion (spékání práškové vrstvy). Do této kategorie dále patří metody jako SLM (Selective Laser Melting) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering), přičemž všechny tyto technologie sdílejí podobný princip fungování, liší se však v několika klíčových aspektech.

Metoda SLS se od SLM a DMLS odlišuje především tím, že během procesu nedochází k úplnému roztavení práškového materiálu, ale pouze k jeho spékání. Významnou výhodou této technologie je skutečnost, že nevyžaduje podpurné struktury – nespečený prášek okolní vrstvy slouží jako dočasná opora a zároveň chrání tisknutý objekt před deformací.

Dalším rozdílem je druh použitých materiálů. SLS se primárně využívá pro tisk z polymerních a termoplastických prášků, zatímco technologie SLM a DMLS jsou určeny pro práci s kovovými materiály. Obecně platí, že výtisky vyrobené metodou SLS mají hrubší, mírně porézní povrchovou strukturu. [1,2]

Jak již bylo zmíněno v úvodu, oblast využití technologie SLS je velmi široká – od průmyslu, dopravy, medicíny, obranného sektoru až po spotřební zboží. Hlavní předností této metody je její vhodnost pro rapid prototyping (rychlé prototypování), kdy je možné během několika hodin převést digitální CAD model do fyzické podoby. [4-7]

SLS se však uplatňuje také v kusové a malosériové výrobě, přičemž výtisky mohou být po vhodných post-procesních úpravách použity jako plně funkční díly. Díky široké škále dostupných materiálů nabízí technologie SLS značnou variabilitu využití napříč mnoha průmyslovými obory.

1.1 Stručná historie SLS tisku



Obrázek č. 1.1 Výstřižek z novinového článku pojednávajícího o prvních krůčcích SLS

Zdroj: [47]

Metodu SLS vyvinuli v polovině 80. let 20. století Dr. Carl Deckard a Dr. Joseph Beaman na Texaské univerzitě v americkém Austinu. Oba vědci se zároveň podíleli na založení společnosti Desk Top Manufacturing (DTM) Corporation, která se zaměřila na vývoj a konstrukci zařízení pro

technologii SLS. Patent na tuto technologii byl udělen v roce 1989. V roce 1992 společnost DTM vyvinula první komerční SLS tiskárnu pod názvem SinterStation 2000, která byla uvedena na trh v roce 1993.

Dalším důležitým milníkem byl rok 2001, kdy společnost 3D Systems, založená Chuckem Hullem (vynálezcem metody 3D tisku stereolitografie – SLA), odkoupila firmu DTM Corporation. Tímto krokem došlo ke zrychlení vývoje jak samotných SLS zařízení, tak i tiskových materiálů.

V roce 2014 vypršela platnost původního patentu, což vedlo ke zvýšení konkurence na trhu, snížení cen zařízení a tím i k širší dostupnosti technologie SLS pro komerční i výzkumné účely. [8,9]

1.2 Příprava před 3D tiskem

Samotný proces tisku si je podobný s výše zmíněnými metodami spékání práškové vrstvy, avšak klíčovou součástí je důkladná příprava před samotným tiskem. Ta je nezbytná k dosažení optimálních výsledků. Před zahájením tisku je nutné připravit materiál, tiskové zařízení a samotný digitální model určený k výrobě.

Materiál

Při přípravě tiskového prášku lze použít buď zcela nový materiál, nebo v souladu s doporučeními výrobce směs nového a již použitého, avšak přeseťového prášku v přesně stanoveném poměru. Správné mísení je zásadní pro zajištění konzistentní kvality výtisků, zejména pokud jde o mechanické vlastnosti a přesnost rozměrů. Důležitým parametrem je také vlhkost prášku, která může ovlivnit kvalitu nanášení vrstvy a samotný proces spékání – prášky se totiž mohou sušit i zvlhčovat. [10]



Obr.č.1.2 Systém míchání prášku od firmy EOS.

1. Pytel se zásobou panenského prášku, 2. zásobník s již použitým a přeseťovým práškem, 3. Míchací a zvlhčovací stanice, 4. Zásobník pro namíchaný prášek,

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Dále je možné testovat prášek na správnou hustotu a sypkost pomocí Hallova testu, při němž je prášek prosypáván speciálním kuželem s definovaným sklonem a otvorem. Tento test umožňuje stanovit charakteristiku sypkosti materiálu.

Po testování a kontrole vlastností prášku, nebo míchání, je materiál uložen do zásobníků a následně dopravován k tiskovému zařízení. Při manipulaci s prášky je nezbytné dodržovat bezpečnostní pokyny výrobce, jelikož některé materiály mohou představovat zdravotní riziko. Mohou dráždit pokožku nebo při vdechnutí jemných částic způsobit podráždění dýchacích cest, případně jiné zdravotní komplikace. Doporučuje se použití ochranných rukavic a vhodného respirátoru. [10]

3D Tiskárna

Před tiskem je nutné tiskárnu vyčistit od zbytků prášku z předchozí operace – jedná se o čištění tiskové komory, přepadových komor a zařízení pro rozprostírání prášku (dále jen *recoater*). Pokud bude následně použit jiný prášek, musí se důsledně vyčistit celá tiskárna a zásobníky. Dále je nutné zkontrolovat a případně očistit optiku laseru. V případě potřeby se může provést také kalibrace laseru, nebo topných těles tiskárny. [10]

Následně je do 3D tiskárny vložen kontejner s připraveným práškovým materiálem, případně je přistaven externě a tiskárna si materiál automaticky nasává do vnitřních zásobníků. Současně s tiskovým zařízením se prášek předeheřívá na teplotu těsně pod bodem tání, čímž se minimalizuje množství energie potřebné pro samotné spékání materiálu. [3]

Pro zlepšení sypkosti a zajištění rovnoměrného nanášení vrstev je prášek zároveň provzdušňován pomocí vzduchu, což omezuje jeho nežádoucí slepování při vyšších teplotách.

Před samotným nanášením první vrstvy materiálu je tisková komora naplněna inertním plynem, nejčastěji dusíkem nebo argonem. Tento krok slouží k eliminaci kontaktu prášku s kyslíkem a tím k zabránění nežádoucí oxidace během procesu spékání.



Obr.č.1.3 Tiskárna EOS P396 od firmy EOS

1.Tisková komora. 2.Zásobníky s práškem, 3.Přepadové komory, 4.dvířka pro vyjímání a vkládání stavebního kontejneru.

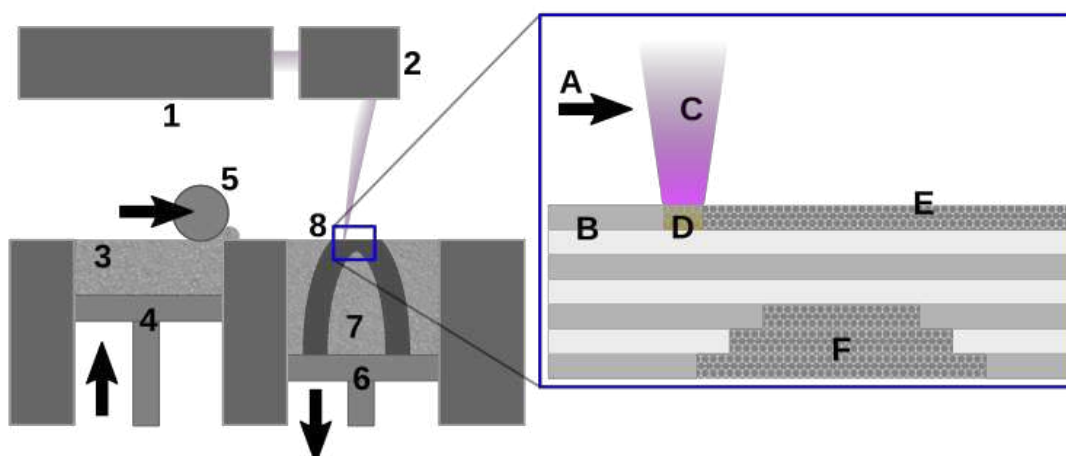
Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Model

Objekt určený k tisku je nejprve vytvořen pomocí softwaru typu CAD. Vytvořený model je následně převeden do vhodného datového formátu, který je kompatibilní s dalšími kroky výrobního procesu. Poté je importován do příslušného sliceovacího softwaru, jenž model rozdělí na jednotlivé vrstvy. Tyto vrstvy představují tisková data, podle nichž budou v průběhu procesu postupně spékány jednotlivé úseky materiálu.

1.3 Proces tisku

Základem je spojování materiálu ve formě prášku, který je zahřátý těsně pod jeho tavicí teplotou, pomocí vysoce výkonného laseru (nejedná se o nepřetržitý tok energie, nýbrž na sebe v rychlém sledu navazující pulzy), jenž je na platformu směřován zrcadlem/skenerem. Ten nám postupně spéká tvar v celé vrstvě. Po zhotovení vrstvy nám základna s vrstvou sjede o výšku jedné vrstvy a následně nám recoater ze zásobníku přetáhne přes pracovní prostor novou vrstvu prášku. Dále se tento proces opakuje, dokud není celý objekt vytištěn. Jak již bylo zmíněno dříve – při této technologii 3D tisku nejsou vyžadovány podpory – těmi je samotný prášek, který nám nese vrstvy nad ním. [1-3]



Obrázek č.1.4 Schéma SLS tisku

1: Laser; 2: Zrcadlo/skener; 3: Prášek v zásobníku; 4: Zásobník; 5: Recoater; 6: Stavěcí základna; 7: Hotové vrstvy; 8: Spékaná vrstva

A: Směr pohybu laseru; B: Spečený prášek; C: laser; D: Spékající se prášek; E: Nespečený prášek; F: Nespečený prášek v minulých vrstvách.

Zdroj: [48]

Po dokončení tisku celého objektu je nutné nechat stavební kontejner pozvolna vychladnout, aby se minimalizovalo riziko smršťování a deformací výtisků vlivem teplotního rozdílu.

Následně je celý stavební kontejner vyjmut ze zařízení (viz. obr. č. 1.5) a přemístěn do tzv. odbavovací stanice (viz. obr. č. 1.5, vpravo dole). V této stanici se platforma se stavbou pomalu zvedá směrem vzhůru (viz. obr. č. 1.6, vpravo nahoře) a jednotlivé výtisky jsou postupně manuálně odebírány.

Zbylý nespečený prášek, který nezůstal přichycený na výtiscích, je vháněn do prosévací jednotky (viz. obr. č. 1.6, vpravo dole), kde je proséván přes sadu sít za účelem odstranění nežádoucích shluků prášku a nečistot. Přesátý prášek je následně dopravován zpět do zásobníku u míchací stanice, kde může být znovu použit po smísení s novým materiálem. [1,3]



Obrázek č.1.5: Zleva nahoře: stavební kontejner uvnitř 3D tiskárny, vyjímání stavebního kontejneru, vyjmutý kontejner, vkládání kontejneru do “odbavovací” stanice.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]



Obr. č.1.6: Zleva nahoře: kontejner v “odbalovací” stanici, vysouvání stavby, rozebírání stavby, prosévací soustava.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Po rozbalení stavby následuje fáze tzv. postprocessingu, tedy dodatečného zpracování výtisků. Prvním krokem je tryskání za účelem odstranění zbylého nespečeného prášku. Nejprve se výtisky umísťují do pískovací komory, kde jsou tryskány jemným tiskovým práškem. Tento postup slouží nejen k efektivnímu očištění povrchu, ale také k omezení kontaminace dalších tryskacích zařízení práškem (viz. obr. č. 1.7). Použitý prášek má dostatečnou sílu k uvolnění prášku uplývajícího na díle, aniž by narušil samotný povrch výtisku.

Po předběžném očištění může následovat finální tryskání – obvykle pískem nebo skleněnou balotinou – které se provádí buď ručně, nebo v automatizovaných tryskacích stanicích. Automatizované zařízení však není vhodné pro malé nebo křehké díly, u nichž hrozí poškození během otáčení v bubnu.



Obr.č.1.7: Zleva nahoře: pískovací komora s práškem, díl před otryskáním práškem, díl po otryskání práškem, automatická tryskací stanice s balotinou.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Následuje leštění nebo omílání – které nám scelují povrch a zvyšují jeho tvrdost.

Alternativou k leštění a omílání může být ještě chemické vyhlazení, které za pomoci rozpouštědel excelentně sceluje povrch a zvyšuje taktéž povrchovou tvrdost. Jeho nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. [11,12]

Lepení – pokud je díl příliš velký, tak se může pro potřeby 3D tisku rozdělit na několik menších. Pomocí speciálních spojů, které se před tiskem nastaví, se části slepí pro lepší pevnost a jednoduchost lepení. Použít se může například spoj Puzzle (viz. obr.č.1.8), Lap joint a další.



Obr.č.1.8 Spojení dílů přes Puzzle spoj.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Pokovování – Při pokovování SLS dílů je na jejich povrch nejprve aplikován vodivý sprej, který umožní následné pokovení dílu v pokovovací lázni. Tento proces zlepšuje povrchovou tvrdost a chemickou odolnost materiálu. [11]

Keramická vrstva – Na povrch dílu je nanášena směs polymeru s příměsí keramiky pomocí spreje. Po nanesení se díl suší na vzduchu nebo v peci. Keramika výrazně přispívá ke zvýšení tvrdosti, odolnosti a snižování tření povrchu. [11]

Práškování – Tento proces spočívá v nanášení polymerového prášku na díl za použití elektrostatického náboje. Po nanesení je prášek vytvrzen teplem, UV světlem, nebo oběma metodami současně. Práškování zlepšuje tvrdost a chemickou odolnost dílu a umožňuje i změnu barvy, pokud je použita barevná varianta prášku. [11]

Máčení – Díky pórovité struktuře tisknutých dílů je tato metoda jednoduchou alternativou pro obarvení výtisku. Díl je ponořen do lázně s barevným inkoustem, který se nasákne do jeho povrchu a obarví jej. [11,12]

Lakování – Tento proces zahrnuje mokré lakování dílu základovou barvou, následně se nanáší krycí barva. Lakování poskytuje ochranu proti vnějším vlivům a zlepšuje estetický vzhled výtisku. [12]

1.4 Vady při SLS tisku

Při SLS tisku, podobně jako u jiných aditivních technologií, se může vyskytnout řada vad, které ovlivňují kvalitu výsledného výrobku. Tyto chyby mohou být způsobeny různými faktory vzhledem k složitosti samotného procesu. Mezi hlavní příčiny problémů patří následující.

Parametry tisku

Mezi klíčové parametry ovlivňující kvalitu tisku patří teplota, výkon laseru, skenovací strategie, rychlost skenování laseru a správná kalibrace laseru. Každý z těchto faktorů může mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti výrobku.

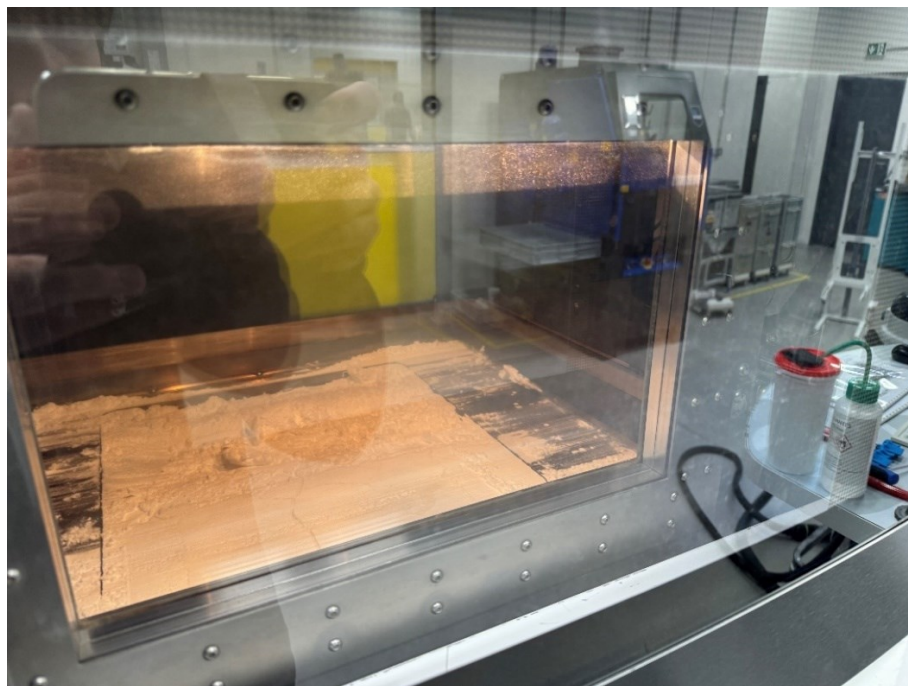
Orientace tisku

Dílce mohou při tisku podléhat nežádoucím deformacím. Je důležité zvážit orientaci dílu na stavební platformě, což může zahrnovat i jeho rozdělení na menší části, aby se minimalizovalo riziko deformací. Výběr optimálního úhlu tisku má vliv na konečnou kvalitu a stabilitu tisku.

Problémy s dokončením stavby

V některých případech může dojít k tomu, že stavba nebude dokončena. To může být způsobeno nárazem recoateru do stavby (viz. obr. č. 1.9 a 1.10), kdy se na recoater začne nabalovat vrstva prášku, což může vést k tomu, že tiskárna vyhodnotí náraz a tím pádem narušení procesu. Také může dojít k deformaci výtisku vlivem teplotních změn, což způsobí, že výtisk bude vystaven deformacím a následně dojde ke kolizi s recoaterem.

Proces SLS 3D tisku je velice komplexní a vyžaduje pečlivé sledování všech parametrů a správné nastavení tiskárny, aby se minimalizovaly možné vady a zajistila se co nejlepší kvalita tisku.



Obr.č.1.9 Havárie stavby.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]



Obr.č.1.10 Nejčastější důvod havárie stavby – “napečenina” na recoateru.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Konkrétní vady

Čáry

Problém: Napečený shluk prášku na recoateru. Tento problém nezpůsobí havárii, ale nestejnoměrně nám roztírá prášek – na povrchu tak zůstává viditelná čára (viz. obr.č.1.11)



Obr.č.1.11 Vada na výtisku.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Boule

Problém: Díl byl tištěn dutý s plochou kolmo na základnu. V okamžiku, kdy byla vytištěna tenká stěna na vrchní straně a dutina s nespečeným práškem se uzavřela, došlo k akumulaci tepla a tlaku, což vedlo k nadzvednutí části plochy (viz. obr.č.1.12)

Řešení: Spékání celého objemu.



Obr.č.1.12 Vada na výtisku.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Rýha

Problém: Napečený prášek na recoateru vytváří prohlubeň (viz. obr.č.1.13), která se sice postupně spéká, ale při poslední spékané vrstvě je níž než zbytek povrchu.



Obr.č.1.13 Vada na výtisku.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

2 MATERIÁLY

3D tisk metodou SLS nám umožňuje tvorbu složitých geometrických tvarů z široké škály materiálů. Výběr vhodného materiálu je klíčový pro dosažení požadovaných vlastností výsledného produktu. Tato kapitola se zaměřuje na materiály, které se v SLS technologii využívají nejčastěji, jejich vlastnosti a aplikace.

2.1 Přehled materiálů využívaných v SLS technologii

Polymery

Představují jednu z nejběžněji využívaných skupin materiálů v technologii SLS. Jedná se o plasty. Mezi jejich klíčové výhody patří vynikající zpracovatelnost, nízká hmotnost a možnost recyklace, což je činí atraktivní pro širokou škálu aplikací v aditivní výrobě. Polymery jsou rovněž cenově dostupné a snadno se zpracovávají, což je činí ideálními pro výrobu prototypů a funkčních dílů. Díky těmto vlastnostem se používají v širokém spektru průmyslových odvětví. Mezi nejčastěji používané polymery v SLS tisku patří nylon (polyamid), který se vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi, jako je vysoká pevnost a odolnost proti opotřebení. [13-15] Nylon je také flexibilní, což umožňuje tisk dílů, které musí vykazovat určitou míru flexibility.

PA 12

PA12 je syntetický materiál vyráběný z petrochemických surovin. Materiál se vyznačuje velmi dobrou pevností, houževnatostí a jistou mírou flexibility. Dále disponuje vysokou odolností vůči teplotnímu zatížení [16] a působení chemikálií, což rozšiřuje spektrum jeho možného použití. Díky jemné zrnitosti prášku je pak vhodný pro tisk komplexních a detailních dílů. [16]

Z výše zmíněných důvodů nachází uplatnění zejména v rychlém prototypování, dále v automobilovém průmyslu, zdravotnictví a při výrobě koncových produktů. [13-16]

Je nutné ale zmínit i některé jeho nevýhody mezi které patří degradace při vystavení UV světlu, náchylnost na absorpci vody ze vzduchu a dále náročnost tisku při tištění velkých rovných ploch.

Při porovnání technických listů tří různých výrobců — EOS PA2200 Balance, Sintratec PA12 Powder a Sinterit PA12 Industrial — se ukazuje, že pevnost v tahu se pohybuje v rozmezí 48 až 53 MPa. Modul pružnosti se dle dostupných údajů nachází mezi hodnotami 1,65 až 1,97 GPa. Poměrné prodloužení v rozmezí 6 až 18 %. Tvrdost materiálu byla stanovena v úzkém rozsahu 75 až 76 Shore D. [17-19]

PA11

PA11 je ve srovnání s PA 12 vyráběn z obnovitelných surovin, především z ricinového oleje. Díky tomu představuje ekologičtější alternativu. Materiál se vyznačuje vyšší houževnatostí, což jej předurčuje pro aplikace, kde je kladen důraz na zvýšenou mechanickou odolnost a dlouhou životnost. Kromě toho nabízí také vyšší pevnost a flexibilitu. [13-15]

Významnou předností PA 11 je jeho zvýšená odolnost vůči chemikáliím a rozpouštědlům, která je oproti PA 12 výrazně lepší. Další výhodou je vyšší odolnost proti UV záření a

povětrnostním vlivům, stejně jako nižší nasákavost vody. Tyto vlastnosti jej činí vhodným pro náročnější provozní podmínky.

Nevýhodou PA 11 oproti PA 12 je zejména jeho vyšší pořizovací cena. [15,20]

Na základě porovnání technických listů tří různých výrobců — EOS PA1101, Sinterit PA11 ESD a 3Dsystems DuraForm PA11 Black — byla zjištěna pevnost v tahu v rozmezí 46 až 50 MPa. Modul pružnosti se pohyboval mezi hodnotami 1,65 až 1,85 GPa. Poměrné prodloužení při přetržení se pohybovalo okolo 27 až 30 %. Tvrdost materiálu dosahovala úzkého rozpětí mezi 75 až 76 Shore D. [21-23]

Směsi polyamidů s plnivý

Pro zlepšení vlastností jako je pevnost, tuhost, odolnost, teplotní odolnost a tvrdost se polyamidy často kombinují s plnivý, jako jsou skelná vlákna, uhlíková vlákna nebo hliník.

Polyamid plněný skelnými vlákny

Oproti PA12 disponuje zvýšenou pevností, teplotní odolností a tuhostí a je tak vhodný pro mechanicky více namáhané díly. Nevýhodou je menší flexibilita, křehkost a se skelnými vlákny rostoucí váha. [14] Stejně tak nám zde začíná hrát roly anizotropie způsobená směrem vláken

Na základě porovnání technických listů tří různých výrobců — EOS PA 3200 GF, Sintratec PA12 GF a lamrapid3D PA12 GF30 — byla pozorována pevnost v tahu v rozmezí 46 až 75 MPa. Modul pružnosti se nacházel v rozmezí 2,7 až 4 GPa. Poměrné prodloužení se pohybovalo od 3 % do 9 %. Tvrdost materiálu pak dosahovala mezi 79 až 80 Shore D. [24-26]

Polyamid plněný uhlíkovými vlákny

Nabízí, podobně jako varianty plněné skleněnými vlákny, vyšší pevnost a odolnost v porovnání s běžnými polyamidy. [14] Díky těmto vlastnostem nachází uplatnění například v leteckém průmyslu, kde je vyžadována kombinace mechanické odolnosti a nízké hmotnosti. Přítomnost uhlíkových vláken však současně snižuje houževnatost materiálu, což vede ke zvýšení jeho křehkosti. Dalším důsledkem uhlíkových vláken je vznik anizotropie, kdy mechanické vlastnosti materiálu vykazují rozdíly v závislosti na směru zatížení.

Při porovnání technických listů tří různých výrobců — konkrétně Sinterit PA11 CF, BASF Ultrasint PA11 Black CF a 3DSystems DuraForm PA CF — byla pevnost v tahu udávána v rozmezí 82 až 84 MPa. Modul pružnosti se pohyboval mezi 2,95 a 8,5 GPa, poměrné prodloužení se pohybovalo v rozmezí 4 až 7 % a tvrdost materiálu dosahovala hodnot v rozmezí 80 až 81 Shore D. [27-29]

Alumid

Je kompozitní materiál kombinující polyamidový prášek (PA 12) s jemnými částicemi hliníku. Výsledkem této kombinace je charakteristicky matný, kovově vypadající povrch. Ve srovnání s čistým polyamidem nabízí Alumide, obdobně jako varianty plněné skleněnými či uhlíkovými vlákny, vyšší tuhost, odolnost vůči oděru a zvýšenou tepelnou odolnost. Nevýhodou tohoto

materiálu je však snížení flexibility a rázové houževnatosti, což je u kompozitních materiálů běžným jevem. [14]

Při porovnání údajů od tří výrobců — EOS (Alumide – Polyamide 12), Materialise (PA-AF) a Prosilas (PA12 ALU) — byla pevnost v tahu u všech materiálů shodně udávána na úrovni 48 MPa. Stejně tak byl u všech variant uváděn shodný modul pružnosti o hodnotě 3,8 GPa. Poměrné prodloužení při přetržení se pohybovalo v rozmezí 3,5 až 4 %, přičemž tvrdost materiálů dosahovala ve všech případech hodnoty 76 Shore D. [30-32]

TPU

Termoplastický polyuretan (TPU) je materiál s širokým spektrem využití, který nachází uplatnění například v automobilovém a spotřebním průmyslu či ve zdravotnictví [10]. K jeho oblíbenosti přispívají především vysoká pružnost, odolnost vůči oděru a nárazům, dobrá chemická odolnost a schopnost zachovávat své mechanické vlastnosti i při nízkých teplotách [10]. TPU se často používá pro výrobu ergonomických dílů na míru a komponent, u nichž je požadována pružnost a schopnost tlumení vibrací. [7,14]

Při porovnání technických parametrů materiálů od tří výrobců — EOS TPU 1301, Sinterit Flexa a 3DSystems DuraForm TPU 90 — byla pevnost v tahu udávána v rozmezí 5 až 7 MPa. Modul pružnosti se pohyboval mezi 21 a 60 MPa a poměrné prodloužení při přetržení dosahovalo hodnot v rozmezí 100 až 250 %. Tvrdost těchto materiálů byla uváděna v rozmezí 81 až 86 Shore A. [33-35]

2.2 Materiál LUVOSINT PA12 9270 BK

Jak již bylo zmíněno v úvodu, Luvosint PA12 představuje variantu klasického polyamidu PA12. Tato varianta se odlišuje zejména tím, že prášek je již v základní podobě černý (označení BK). Díky tomu není nutné díly po vytištění dodatečně barvit, a i při mechanickém poškození či poškrábání zůstávají povrchově stále černé.

Hlavní výhodou tohoto materiálu je možnost jeho plné recyklace. Dle údajů výrobce lze nevytavené částice opětovně použít ze 100 %, což představuje výrazné zlepšení oproti jiným typům PA12, u nichž je běžně recyklováno přibližně 50 % nepoužitého prášku. [36]

Další výhodou může být i příznivější cena. V době porovnávání činila přibližně 800 Kč/kg, zatímco cena srovnatelného materiálu EOS PA2200, se kterým bude Luvosint dále porovnáván, dosahovala zhruba 1800 Kč/kg. Přesná cena však bude záležet na množství objednaného materiálu a nabídce.

Stejně jako ostatní typy polyamidu 12 tak i Luvosint PA12 disponuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, mezi které patří především pevnost a houževnatost, tepelná stabilita a vysoká chemická odolnost. Dále je pro tento materiál charakteristická i nízká nasákavost — absorbuje pouze minimální množství vlhkosti, což je klíčové pro zachování jeho mechanických a zpracovatelských vlastností.

Materiál je rovněž certifikován podle normy UL94 V-2, která stanovuje požadavky na omezení šíření plamene v případě vznícení. [36]

Výrobce, společnost Lehmann & Voss & Co. KG, uvádí následující technické parametry: pevnost v tahu dosahuje 49 MPa, modul pružnosti činí 1,74 GPa, poměrné prodloužení je 9 % a tvrdost materiálu odpovídá 80 Shore D. [36]

2.3 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů a metodika jejich testování

Mechanické vlastnosti materiálů jsou hlavním aspektem při vybírání materiálu, který by mohl být vhodný pro požadovanou aplikaci.

Cílem této kapitoly je představit základní mechanické vlastnosti relevantní pro práškové materiály používané v (SLS), mezi které patří zejména pevnost v tahu, modul pružnosti, houževnatost a tvrdost. Součástí textu je také popis metodiky zkoušení těchto vlastností, která se opírá o příslušné normy a standardizované postupy.

Pevnost v tahu (R_m)

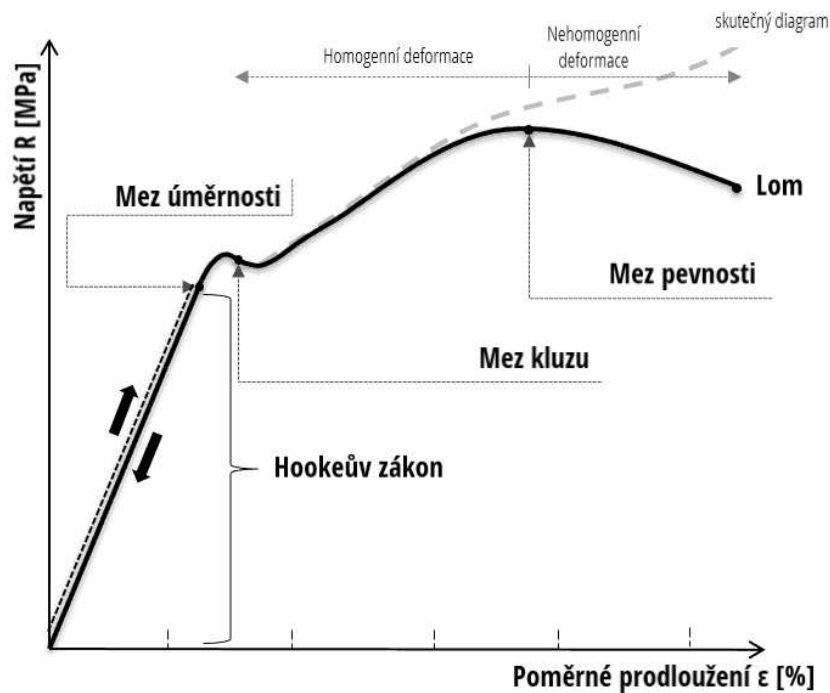
Pevnost v tahu patří mezi klíčové mechanické vlastnosti materiálů a vyjadřuje schopnost materiálu odolávat tahovému zatížení až do okamžiku jeho porušení. Tato charakteristika je zásadní zejména při navrhování konstrukčních prvků, neboť určuje maximální zatížení, které je materiál schopen bezpečně přenášet bez toho, aby došlo k jeho selhání.

Zkoušky pevnosti v tahu u plastických materiálů se provádějí v souladu s normou ISO 527 [37]. Při těchto testech se používají standardizovaná zkušební tělesa, která mají zpravidla tvar tzv. „psí kosti“ nebo válce. [37,38] Zkušební těleso je upnuto do čelistí trhacího stroje a vystaveno tahovému zatížení, která se rovnoměrně zvyšuje až do jeho přetržení.

Pevnost v tahu se následně vypočítá ze vztahu mezi maximální dosaženou silou a původní plochou průřezu zkušebního tělesa podle vztahu č. (1)

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

Vztah č. (1) Kde R_m je mez pevnosti v tahu [MPa ; N/mm²] , F_m je maximální dosažená tahová síla [N] a S_0 je počáteční průřez vzorku [mm²].



Obrázek č.2.1 Průběh tahové zkoušky

Zdroj: [49]

Meze kluzu

Zjišťují se při tahové zkoušce.

Horní mez kluzu

Horní mez kluzu představuje nejvyšší hodnotu napětí, při které materiál přechází z pružné (elastické) deformace do trvalé (plastické) deformace. Do dosažení této meze se materiál deformuje pružně, což znamená, že po odstranění zatížení se vrátí do svého původního tvaru. V oblasti blízké horní mezi kluzu již však dochází k nelineárnímu průběhu deformace. Jakmile je tato mez překročena, začne se materiál nevratně prodlužovat a po odlehčení se do původního tvaru již zcela nevrátí. [39,40]

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad (2)$$

Vztah č. Kde (2) R_{eH} je Horní mez kluzu [Mpa ; N/mm²], F_{eH} je maximální dosažená tahová síla na horní mezi kluzu [N] a S_0 je počáteční průřez vzorku [mm²].

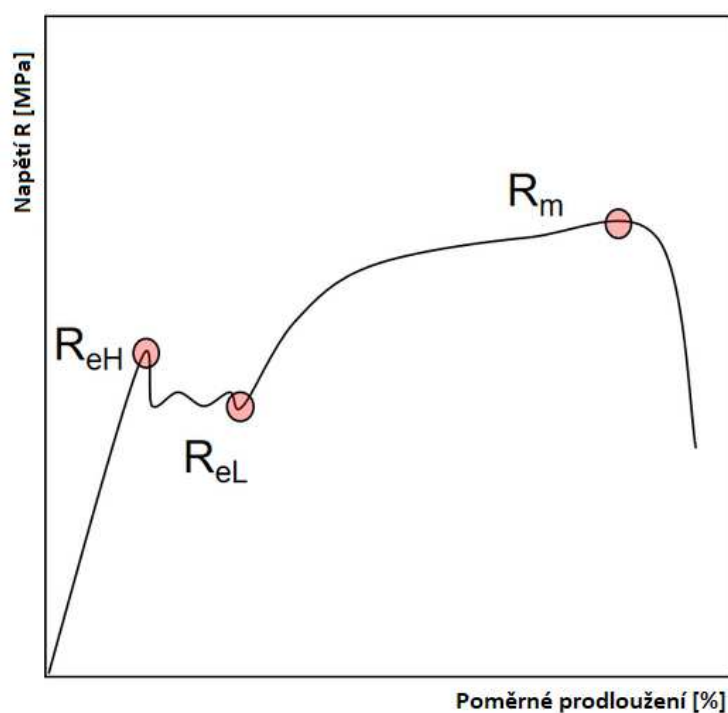
Dolní mez kluzu

Citace "Dolní mez kluzu je na jedné straně hodnota minimální meze kluzu, která je pro určitý materiál stabilně dosažena nebo překročena při vhodném tepelném zpracování. Na druhou stranu se jedná o maximální hodnotu napětí v tahu, ze které je třeba vycházet při navrhování

konstrukčních dílů a nosných konstrukcí, aby bylo možné bezpečně zabránit trvalým deformacím při zamýšleném použití konstrukčních dílů a nosných konstrukcí.“ [39]

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (3)$$

Vztah č. Kde (3) R_{eL} – Dolní mez kluzu [Mpa ; N/mm²], F_{eL} – maximální dosažená tahová síla na dolní mezi kluzu [N], S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²].



Obrázek č.23 Dolní mez kluzu R_{eL} a horní mez kluzu R_{eH}

Zdroj: [50]

Modul pružnosti

Modul pružnosti, také nazývaný Youngův modul pružnosti lze definovat jako poměr napětí a jím vyvolané deformace/prodloužení – to určuje, do jaké míry se materiál deformuje pod napětím. [41] Čím tužší je materiál, tím větší má modul pružnosti.

Metodika testování: Modul pružnosti se vypočítá z počáteční části křivky získané během zkoušky v tahu. Měří se od počátku zátěže až do meze úměrnosti, popřípadě do meze kluzu. [42]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} [\%] \quad (5)$$

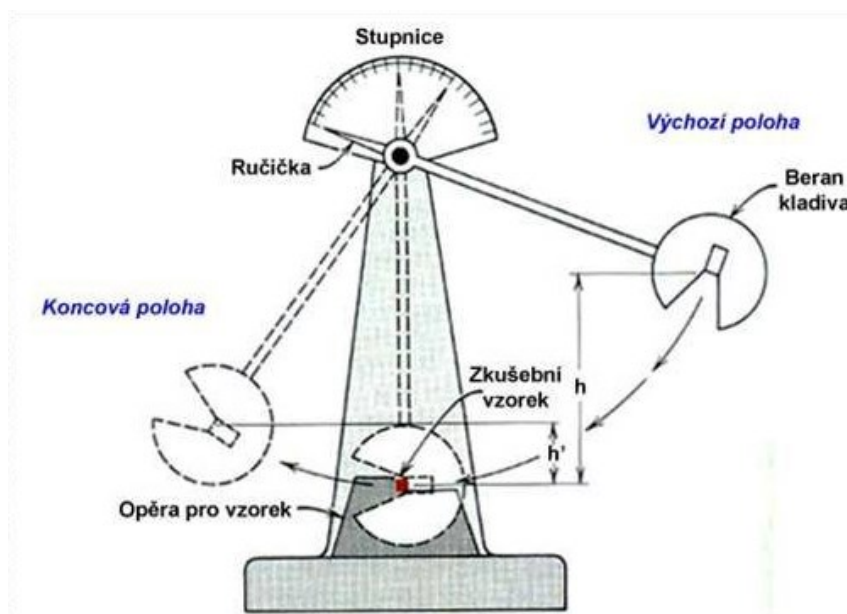
Vztah č. (4) Kde E – Modul pružnosti [MPa ; GPa], σ – napětí [MPa ; N/mm²], ε – poměrné prodloužení [%],

Vztah č. (5) Kde ε – poměrné prodloužení tělesa [%], Δl – prodloužení [mm], l_0 – původní délka tělesa [mm].

Rázová houževnatost

Je to schopnost materiálu odolávat dynamickým nárazům nebo úderům. Je to důležitá vlastnost pro ty aplikace, kde jsou díly vystaveny periodickému mechanickému namáhání.

Metodika testování: Rázová houževnatost se měří pomocí Charpyho nebo Izodova testu dle norem. Při těchto testech je zkušební těleso (s vrubem nebo bez vrubu) umístěno na podpěry a zatíženo kyvadlovým kladivem, které narazí do vzorku. Hodnota houževnatosti je vypočítána na základě energie potřebné k přeražení vzorku. [40]



Obr. č. 24 Charpyho kladívko

Zdroj: [51]

Tvrdost

Tvrdost materiálu se dá definovat jako odpor, který těleso klade proti vnikání cizího tělesa do povrchu. Tvrdší materiály obvykle vykazují vyšší odpor proti vnikání cizích těles – mají nižší opotřebení.[40]

Metodika testování: Tvrdost se u plastů měří pomocí Shoreho tvrdoměru a funguje na principu měření hloubky vtisku. Pro měření tvrdších elastomerů a plastů se pak konkrétně používá metoda D, při níž je vnikajícím tělesem kužel s vrcholovým úhlem 30°. Tvrdoměr se přikládá na testovaný materiál a pružina o stanovené síle vtlačuje vnikající těleso do materiálu. Hodnota tvrdosti se následně odečte z budíku se stupnicí viz. (obr.č.25) jako 0–100 Shore. [44]



Obr.č.25 Shoreho tvrdoměr

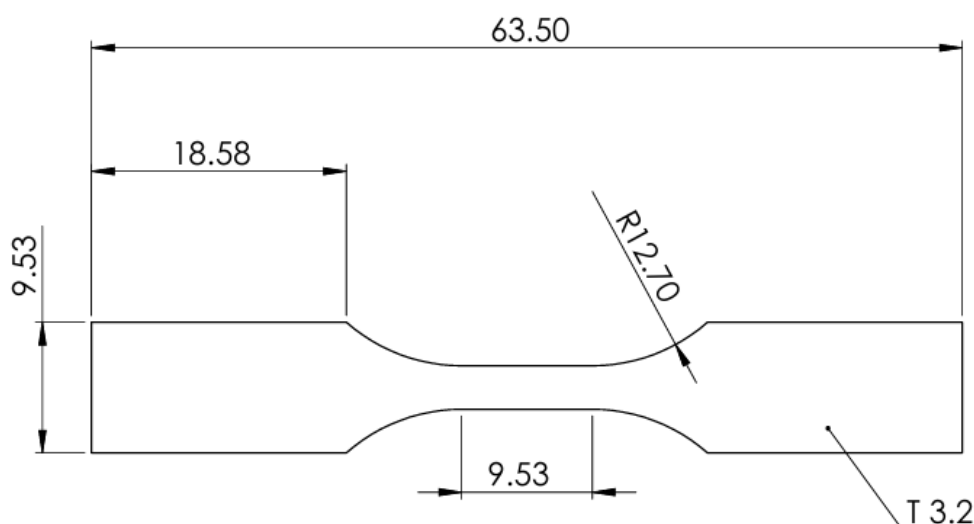
Zdroj: [52]

3 EXPERIMENT

Pro porovnání s materiálem Luvosint PA12, byl zvolen materiál PA2200 od společnosti EOS – níže tak budou uváděny testy a výsledky na obou těchto materiálech.

V této kapitole bude nejprve popsán proces výroby vzorků pomocí technologie SLS, včetně použitých parametrů tisku. Následně budou analyzovány vlastnosti práškových materiálů, jako je velikost částic a jejich distribuce. Nakonec budou provedeny mechanické zkoušky vytištěných vzorků, zahrnující testy pevnosti v tahu, modulu pružnosti, měření drsnosti a měření tvrdosti s cílem komplexně posoudit výkonnost obou materiálů.

Pro testování byly zvoleny vzorky s rozměry (viz. obr.č.3.1).



Obr.č.3.1 Rozměry tisknutých vzorků

Zdroj: [obrázek autora]

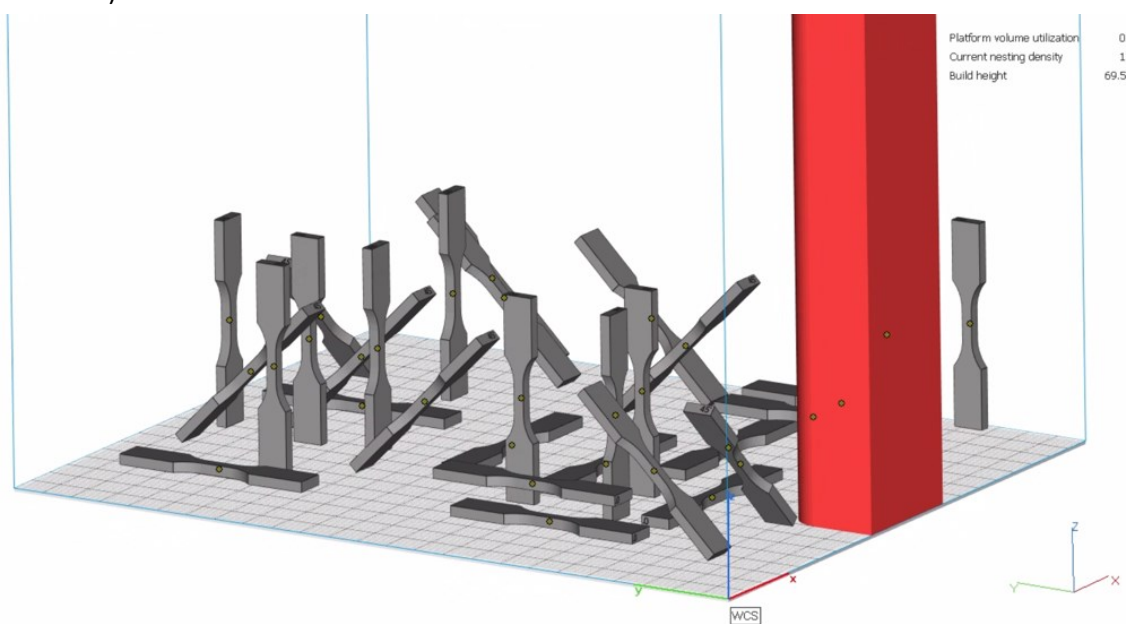
Nejprve byl v CAD softwaru vytvořen model a tento se následně exportoval do programu Materialise Magics – ten slouží pro přípravu dat pro 3D tisk a podporuje velkou bázi technologií, materiálů a tiskáren. Zde byly modely pro naše potřeby testování orientovány do tří poloh (viz. obr. č.3.2) zleva – v leže - 0°, pod úhlem - 45° a svisle - 90°.



Obr.č.3.2 Polohy modelů v programu Materialise Magic

Zdroj: [obrázek autora]

Následně byly jednotlivé polohy nakopírovány do požadovaného množství po deseti kusech, (viz. obr.č.3.3).



Obr.č.3.3 Vzorky na stavební plošině

Zdroj: [fotografie autora]

3.1 Tisk

Vzorky byly vytištěny na 3D tiskárně EOS P110 Velocis (viz. obr. č. 3.4), která se nachází v laboratoři Protolab na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě v Ostravě.



Obr.č.3.4 Tiskárna EOS P110 Velocis

Zdroj: [53]

Tato tiskárna je určena pro zpracování materiálů typu PA, TPU a Alomid.

Ve srovnání se svými předchůdci disponuje vylepšeným systémem řízení teploty a optimalizovaným nanášením práškových vrstev, což přispívá k dosažení vyšší produktivity tisku. Díky úzkému zaměření laserového paprsku je zařízení schopno vytvářet stěny o tloušťce menší než 0,5 mm. [58] Vybrané technické parametry tiskárny jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tabulka č.1 Parametry tiskárny EOS P110 Velocis

Zdroj: (tabulka autora – ze zdroje [45])

Stavební prostor	200x250x330 mm
Výkon laseru	30 W
Rychlost skenování/laseru	Až 5 m/s
Tloušťka vrstvy	60-120 μ m
Software	Materialise magics

Při tisku metodou (SLS), stejně jako při kterékoliv jiné metodě hrají tiskové parametry klíčovou roli v kvalitě výsledných dílů. Mezi nejdůležitější parametry patří zejména teplota procesu, výkon laseru, rychlost skenování, tloušťka vrstvy atd... Každý z těchto parametrů přímo ovlivňuje mechanické vlastnosti, přesnost a vzhled finálního výrobku. Teplota v tiskové komoře a teplota

prášku musí být pečlivě řízeny, aby se zajistilo rovnoměrné spékání bez deformací nebo nadměrného kroucení dílů. Výkon laseru a rychlost skenování určují, jak intenzivně a jak rychle bude prášek spékán, což má vliv na pevnost výtisku. Tloušťka vrstvy ovlivňuje jak detailnost tisku, tak i rychlost celého procesu. Správné nastavení všech parametrů je proto zásadní pro dosažení optimálních výsledků, ať už z hlediska mechanických vlastností, estetické kvality či produktivity. Při tisku tak byly využity parametry (viz. tabulka č.2).

Tabulka č.2 Parametry tisku. Zdroj: [tabulka autora]

Výška vrstvy	100 μm
Výkon laseru	30 W
Rychlost spékání	5 m/s
Teplota komory	168 $^{\circ}\text{C}$

3.2 Měření velikosti a distribuce částic prášku

Velikost a distribuce částic prášku představují klíčové parametry při výběru vhodného materiálu pro danou aplikaci. Vzhledem k tomu, že při metodě (SLS) nedochází k úplnému tavení prášku, částice se zcela neslévají dohromady. Pokud jsou částice příliš velké, může to vést k horšímu spojení mezi nimi, což negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného dílu a zvyšuje jeho pórovitost.

Velikost a distribuce částic prášku byly měřeny pomocí přístroje Sympatec Quicpic L02 (viz obr. 3.5 a 3.6). Tento přístroj pracuje na principu dynamické analýzy obrazu. Prášek je pomocí vibračního podavače dávkován do trysky, kde je proudem vzduchu unášen do měřicí oblasti před vysokorychlostní kamerou. Kamera zachycuje jednotlivé částice, přičemž specializovaný software následně vyhodnocuje jejich velikost, tvar (např. sféricitu) a další parametry.



Obr.č.3.5 a 3.6 Zařízení Sympatec Quicpic.

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Níže jsou uvedeny některé parametry přístroje Sympatec Quicpic L02 (viz. tabulka č.3)

Tabulka č.3 Parametry přístroje Sympatec Quicpic L02. Zdroj: [tabulka autora – informace z ukázky]

Rychlost kamery	225 FPS
Nejmenší zachycené částice	1,8 μm
Měřené pole	1,8 x 1,8 mm
Velikost trysky	4x14 mm
Tlak vzduchu v trysce	1 bar

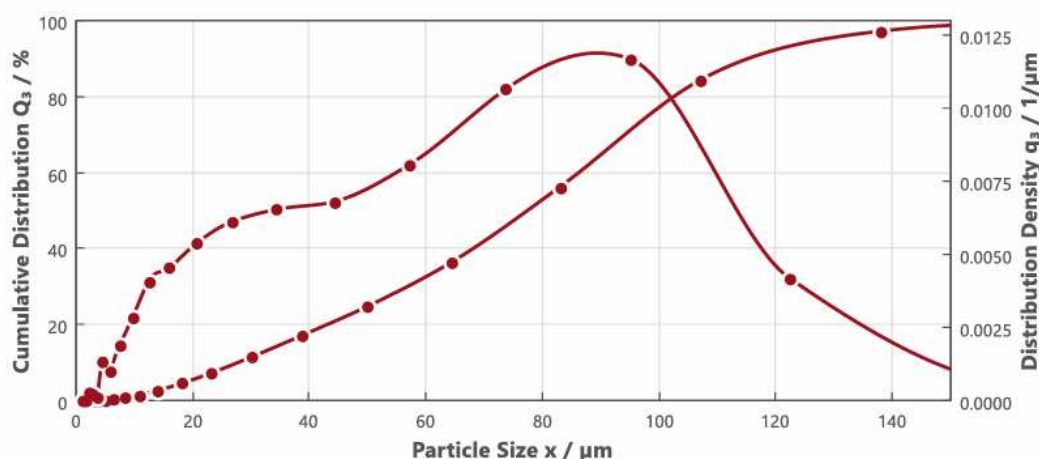
Výsledky naměřené na cca 1,5g prášku materiálu Luvosint PA12 byly následující (viz. tabulka č.5 a obr.č.3.7)

Tabulka č.5 Hodnoty kumulativní distribuce materiálu Luvosint PA12 viditelné na grafu.
Zdroj: [tabulka autora – výstupní protokol]

Kumulativní distribuce Luvosint PA12 9270 BK						
Velikost částice	27,67 μm	37 μm	77,14 μm	106,75 μm	120,73 μm	167,63 μm
Množství částic *	10,3%	16,3%	50,3%	84,3%	90,3%	99,3%

*Množství částic prášku, které je menší nebo rovno dané velikosti částice.

Velikost prášku se stanovuje na základě plochy částice na snímku – jež je matematicky převedena na kruh se stejným obsahem, z něhož se určí průměr.



Obr.č.3.7 Graf kumulativní distribuce a distribuční hustoty velikosti částic prášku materiálu Luvosint PA12. Zdroj: [výstupní protokol]

Z tabulky č. 5 a obrázku č. 3.7 je patrné, že velikost částic prášku Luvosint PA12 se pohybuje v širokém rozmezí přibližně od 0 do 170 μm . Největší podíl, přibližně 80 %, tvoří částice o velikosti v intervalu 30 až 120 μm .

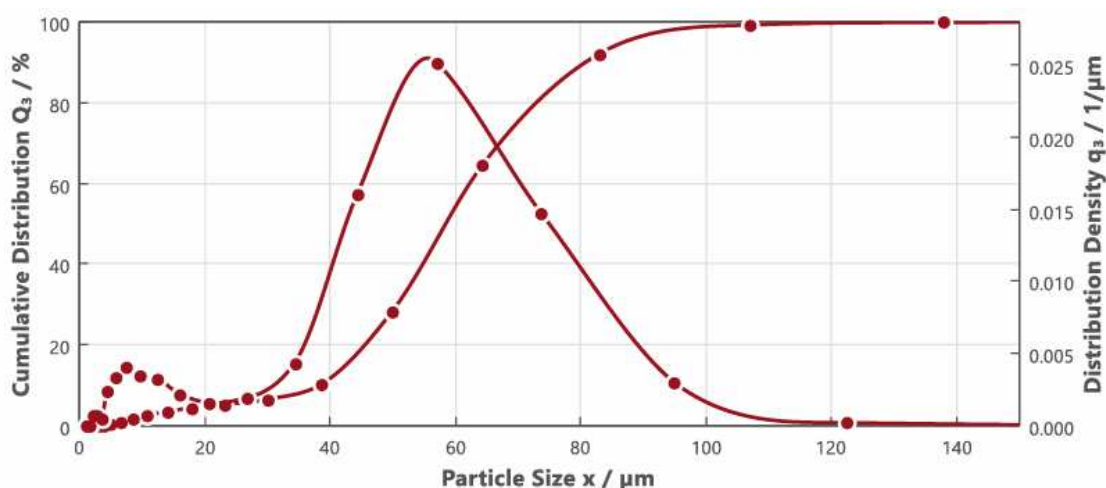
Výsledky naměřené na cca 1,5g prášku materiálu PA2200 byly následující (viz. tabulka č.6 a obr.č.3.8)

Tabulka č.6 Hodnoty kumulativní distribuce materiálu PA2200 viditelné na grafu.

Zdroj: [tabulka autora – výstupní protokol]

Kumulativní distribuce PA2200						
Velikost částice	38 μm	42,26 μm	58,57 μm	77,53 μm	81,59 μm	106,32 μm
Množství částic *	10,3%	16,3%	50,3%	84,3%	90,3%	99,3%

*Množství částic prášku, které je menší nebo rovno dané velikosti částice.



Obr.č.3.8 Výsledky měření – graf kumulativní distribuce a distribuční hustoty velikosti částic prášku materiálu PA2200. Zdroj: [výstupní protokol]

Z tabulky č. 6 a obrázku č. 3.8 je patrné, že velikost částic prášku PA2200 se pohybuje v relativně úzkém rozmezí přibližně od 0 do 120 μm . Nejvyšší podíl, přibližně 80 %, tvoří částice o velikosti v intervalu 40 až 85 μm .

3.3 Zobrazení částic pomocí elektronové mikroskopie

Zobrazení částic bylo provedeno pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Při tomto způsobu analýzy dopadá na vzorek umístěný ve vakuu proud elektronů, který je urychlován napětím. Interakce dopadajících elektronů se vzorkem generuje signály, jež jsou zachycovány detektorem a na jejichž základě je vytvořen obraz povrchu vzorku.

Pro potřeby zobrazení bylo nutné pokrýt povrch práškového vzorku tenkou vrstvou vodivého materiálu, což bylo provedeno pomocí zařízení SC 7620 Mini. Samotné snímání následně proběhlo na skenovacím elektronovém mikroskopu Explorer 4 od společnosti Thermo Fisher Scientific (viz obr. 3.9).



Obr.č.3.9 Elektronový mikroskop Explorer 4

Zdroj:[54]

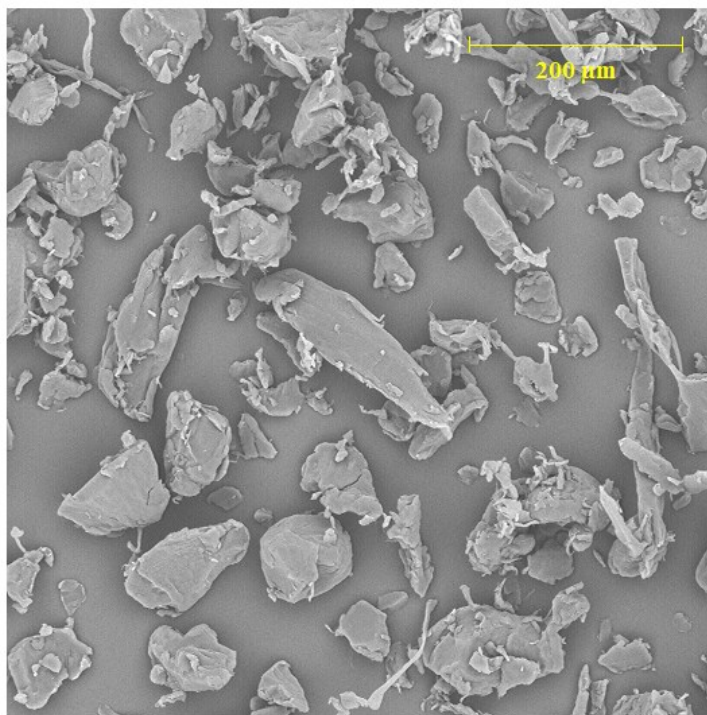
Zde jsou uvedeny některé parametry mikroskopu (viz. tabulka č.7)

Tabulka č.7 Parametry mikroskopu Explorer 4.

Zdroj: [46]

Explorer 4	
Zvětšení	80 - 40 000x
Urychlující napětí	5 - 20kV
Doba přípravy vakua	< 90s
Maximální velikost vzorku	100 x 100 x 35mm
Rozlišení obrázku	14nm

Na obrázcích č. 3.10 a 3.11 jsou uvedeny výsledky pozorování obou materiálů. Tyto výsledky potvrzují závěry získané z dynamické analýzy obrazu – částice prášku Luvosint PA12 se vyskytují ve výrazně širším spektru velikostí než částice prášku PA2200. Zároveň je zřejmé, že částice prášku PA2200 vykazují vyšší míru sféricity ve srovnání s částicemi Luvosintu PA12.



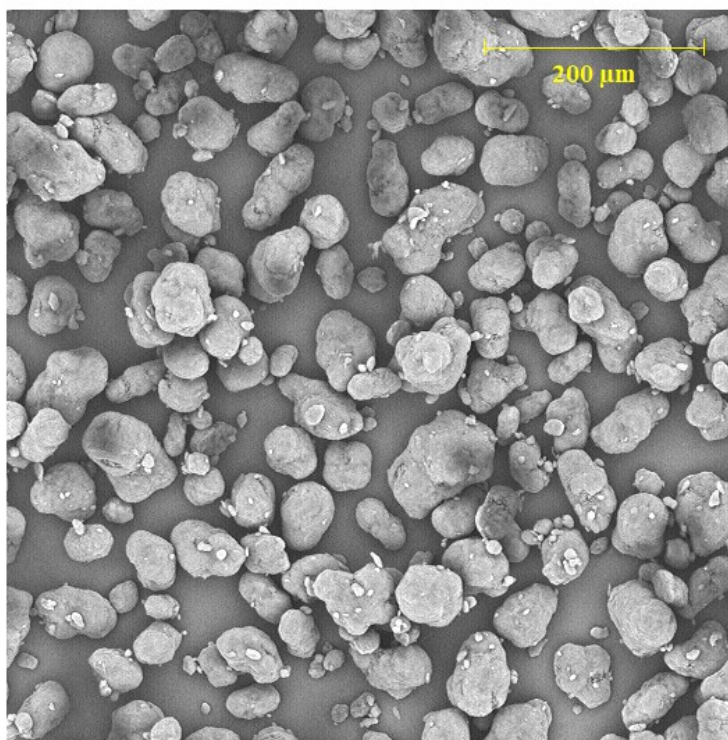
accelerating voltage = 20.00171 kV

mag = 150 x

SIMD-VSB-TUO

Obr.č.3.10 Materiál Luvosint PA12

Zdroj: [výstup mikroskopu]



accelerating voltage = 20.00171 kV

mag = 150 x

SIMD-VSB-TUO

Obr.č.3.11 Materiál PA2200

Zdroj: [výstup mikroskopu]

3.4 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 527 na zkušebním stroji Shimadzu AGX-V s maximální zatěžovací silou 300 kN v laboratoři společnosti ONE3D (viz obr. č. 3.12). Testování bylo realizováno na šesti vzorcích orientovaných horizontálně (H), šesti vzorcích orientovaných vertikálně (V) a šesti vzorcích tisknutých pod úhlem 45° (A), a to pro oba zkoumané materiály – Luvosint PA12 a PA2200.



Obr.č.3.12 Zařízení pro tahovou zkoušku Shimadzu AGX-V

Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Níže jsou uvedeny výsledky tahové zkoušky materiálu Luvosint PA12 i s grafy pro jednotlivé polohy.

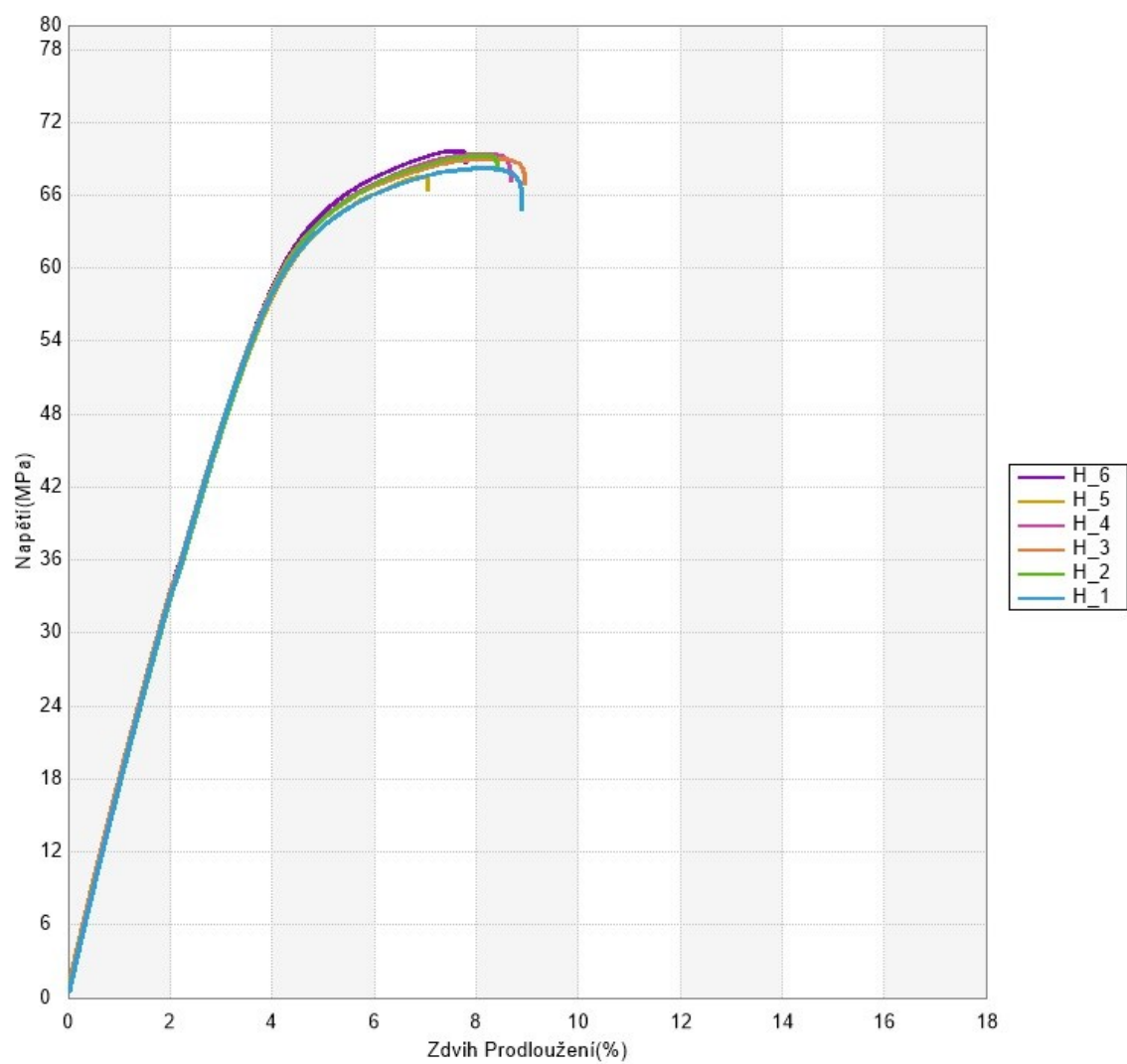
Tabulka č.8 Výsledky tahové zkoušky materiálu Luvosint PA12.

Zdroj: [tabulka autora]

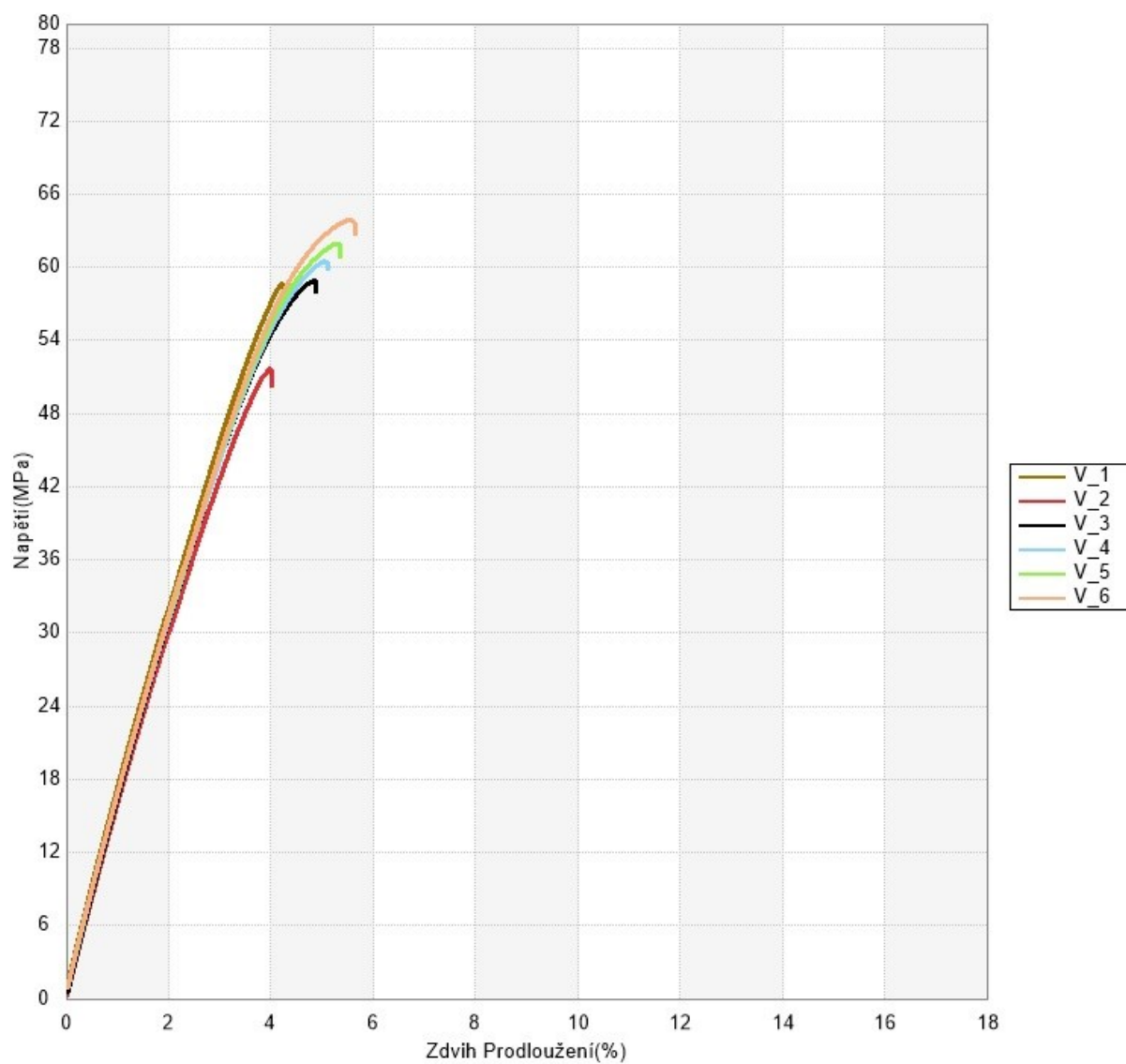
Luvosint PA12 9270 BK					
	E	R _m	R _{p02}	F _m	A
Č. vzorku	Modul pružnosti	Pevnost v tahu	Smluvní mez kluzu	Maximální zatěž. síla	Prodloužení
	GPa	MPa	MPa	N	%
H1	1,82	68,21	33,15	898,57	8,9
H2	1,79	69,28	33,51	961,41	8,41
H3	1,8	69,01	33,76	957,62	8,96
H4	1,81	69,38	34,04	937,03	8,68
H5	1,78	67,55	33,6	965,23	7,06
H6	1,8	69,65	33,52	966,46	7,8
Průměr	1,8	68,85	33,6	947,72	8,3
Sm.odch.*	0,014	0,804	0,295	26,356	0,74
V1	1,76	58,68	31	747,98	4,24
V2	1,68	51,65	29,28	663,8	4,02
V3	1,73	58,85	29,85	779,8	4,88
V4	1,73	60,49	29,31	799,29	5,11
V5	1,73	61,95	30,09	800,67	5,36
V6	1,73	63,93	30,11	865,75	5,64
Průměr	1,73	59,26	29,94	776,22	4,88
Sm.odch.*	0,026	4,218	0,635	67,222	0,634
A1	1,76	63,13	30,92	845,67	5,81
A2	1,74	61,59	30,02	822,73	5,83
A3	1,75	64,01	31,14	850,46	5,72
A4	1,78	67,13	31,55	846,1	6,05
A5	1,76	65,29	31,19	850,89	5,82
A6	1,76	65,73	30,77	844,86	6,2
Průměr	1,76	64,48	30,93	843,45	5,91
Sm.odch.*	0,013	1,982	0,52	10,467	0,181

*Směrodatná odchylka.

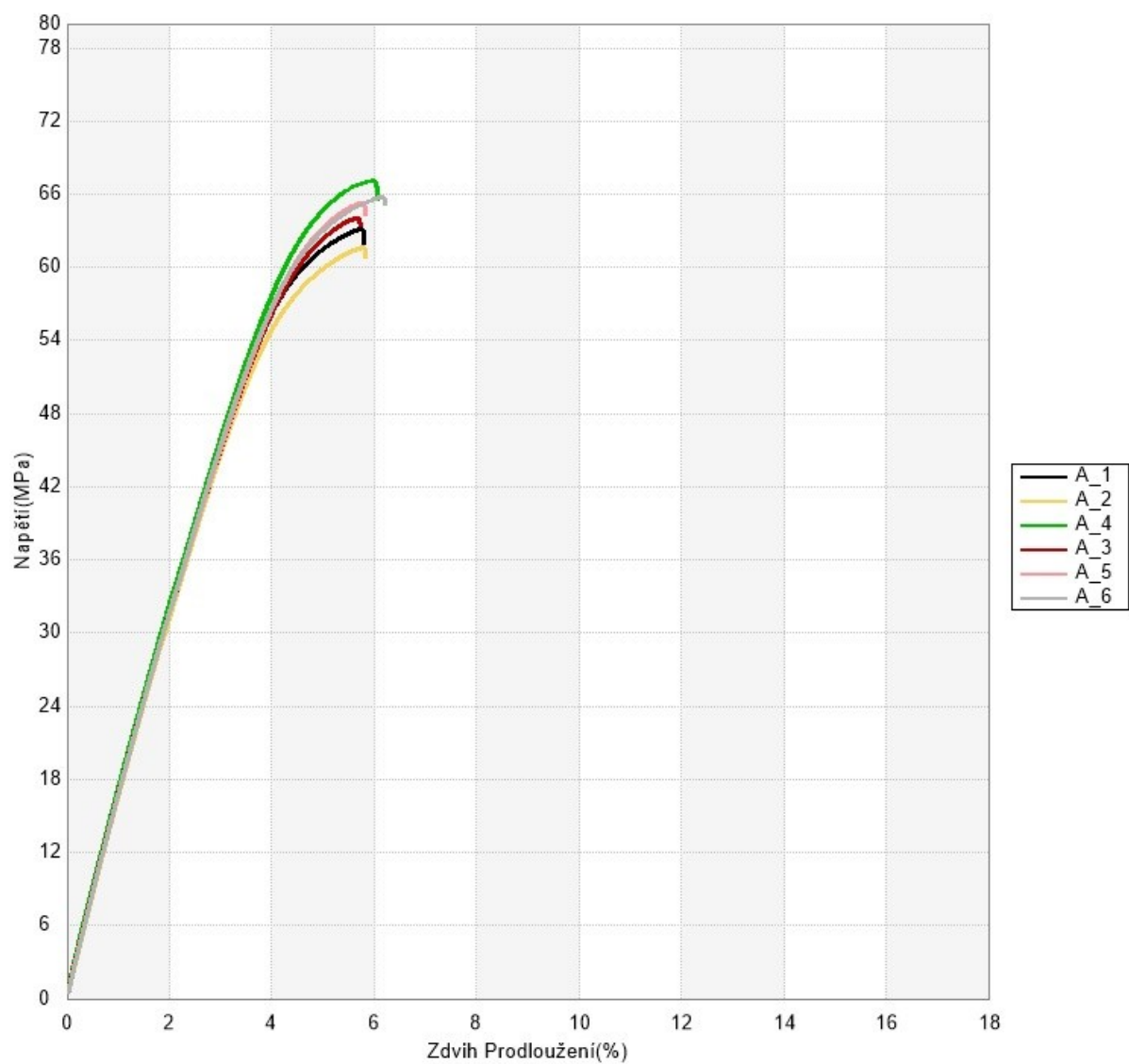
Z výsledků je vidět, že orientace tisku má znatelný vliv na výsledné vlastnosti, a to do takové míry, že můžeme prohlásit vertikálně tisknuté vzorky jako nejslabší. Vzorky tisknuté pod úhlem jsou na tom pak lépe, ale nejlepší se jeví vzorky tisknuté v horizontální poloze. To nám ukazuje, že polyamidy jsou izotropní materiály s anizotropním chováním v závislosti na směru tisku.



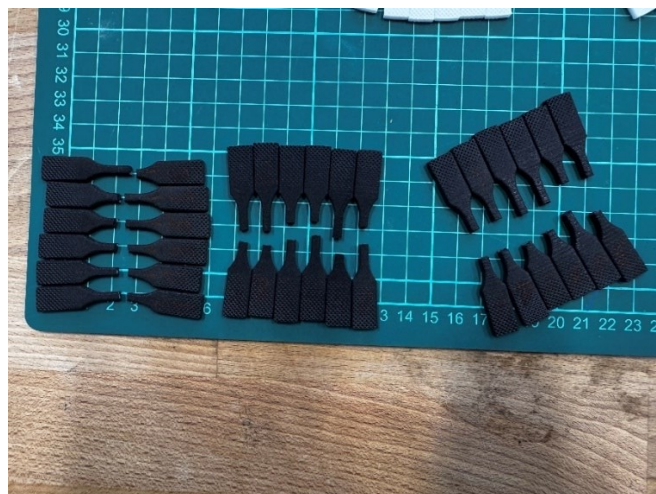
Obr.č.3.13 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu Luvosint PA12 pro horizontálně tisknuté vzorky. Zdroj: [obrázek autora]



Obr.č.3.14 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu Luvosint PA12 pro vertikálně tisknuté vzorky. Zdroj: [obrázek autora]



Obr.č.3.15 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu Luvosint PA12 pro vzorky tisknuté pod úhlem. Zdroj: [obrázek autora]



Obr.č.3.16 Natrhané vzorky tří poloh materiálu Luvosint PA12. Zdroj: [fotografie autora]

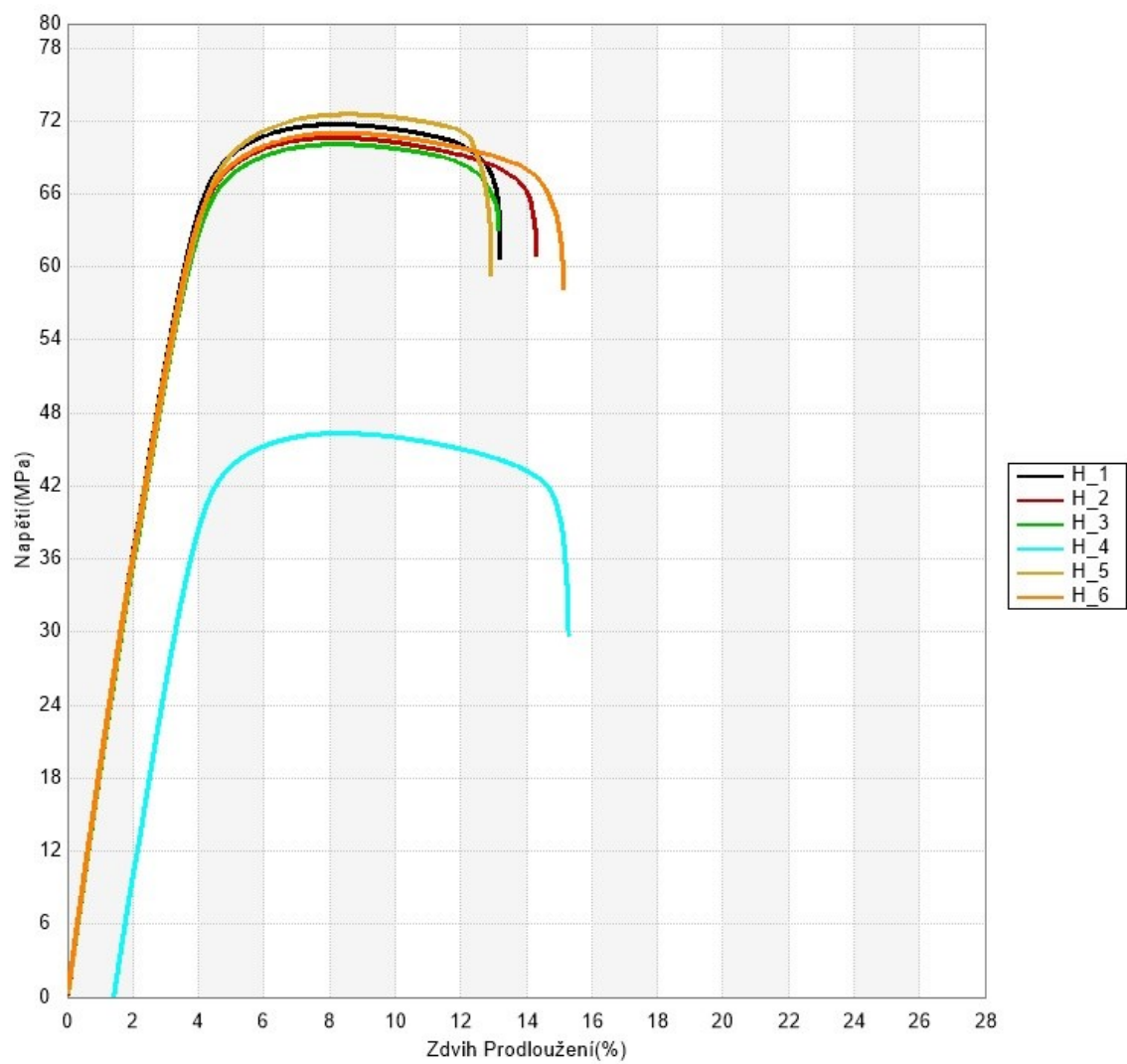
Níže jsou uvedeny výsledky tahové zkoušky materiálu PA2200 i s grafy pro jednotlivé polohy.

Tabulka č.9 Výsledky tahové zkoušky materiálu PA2200. Zdroj: [tabulka autora]

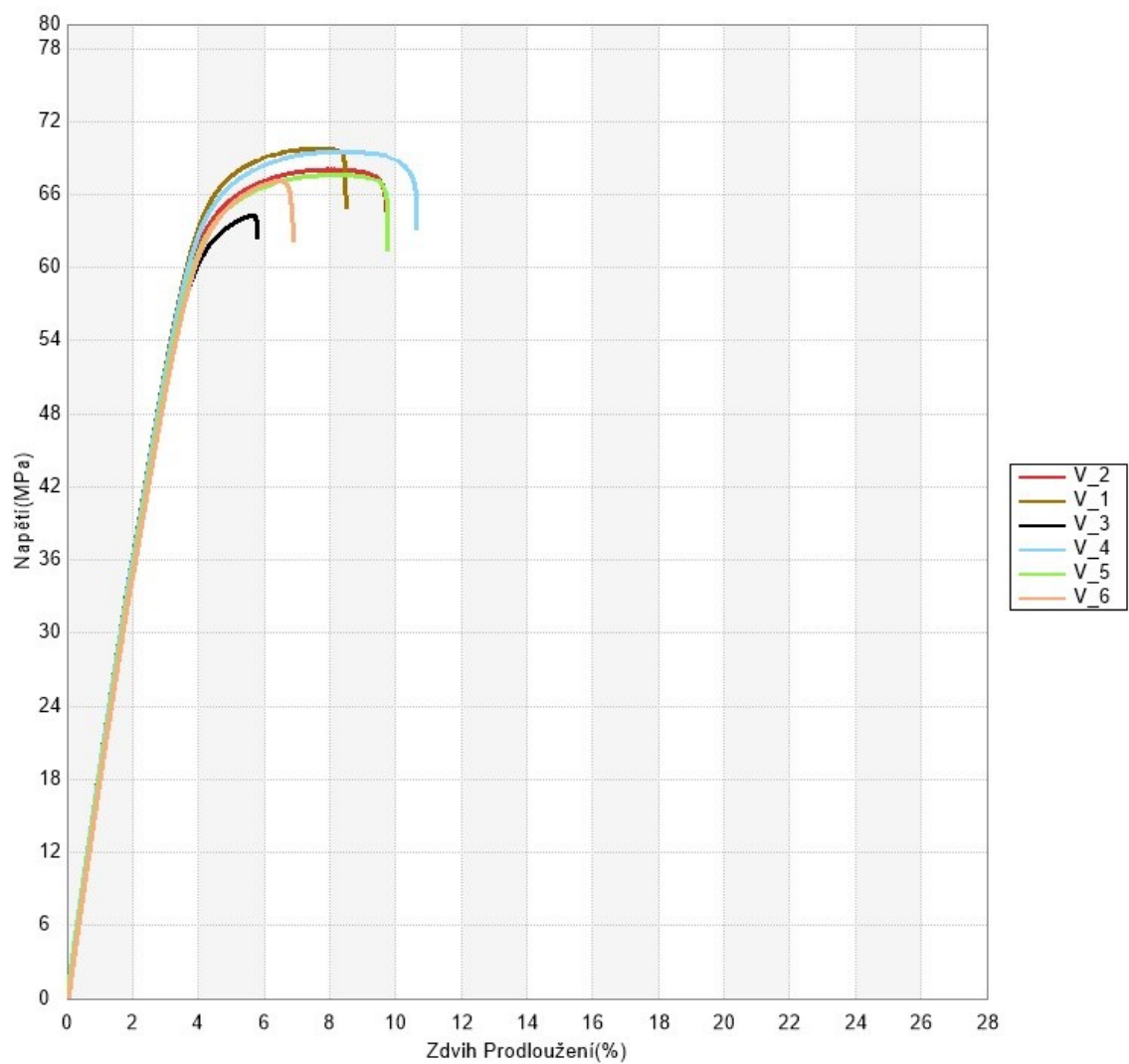
PA2200					
	E	R _m	R _{p02}	F _m	A
Č. vzorku	Modul pružnosti	Pevnost v tahu	Smluvní mez kluzu	Maximální zatěž. síla	Prodloužení
	GPa	MPa	MPa	N	%
H1	1,97	71,71	39,69	765,99	13,21
H2	1,99	70,62	37,5	777,76	14,31
H3	1,92	70,08	38,09	802,57	13,15
H4	/	/	/	/	/
H5	1,95	72,54	38,25	811,21	12,92
H6	1,97	71,02	38,21	791,9	15,13
Průměr	1,96	71,19	38,35	789,89	13,74
Sm.odch.*	0,026	0,959	0,809	18,287	0,943
V1	1,99	69,76	37,57	718,89	8,49
V2	1,94	68,05	38,3	699,07	9,69
V3	1,93	64,24	38,01	635,48	5,78
V4	1,95	69,53	38,15	720,91	10,65
V5	1,91	67,61	38,27	703,19	9,76
V6	1,94	67,12	36,22	689,49	6,88
Průměr	1,94	67,72	37,75	694,51	8,54
Sm.odch.*	0,027	2,001	0,797	31,296	1,878
A1	1,91	69,79	37,3	739,32	10,05
A2	1,9	71,01	38,09	743,15	11,43
A3	1,92	71,15	34,21	753,69	10,5
A4	1,93	74,95	37,13	786,72	8,85
A5	1,92	72,96	38,12	765,96	10,15
A6	1,94	71,61	39,97	758,71	10,39
průměr	1,92	71,91	37,47	757,93	10,23
Sm.odch.*	0,014	1,806	1,888	17,186	0,834

*Směrodatná odchylka.

Z obr.č.3.17 je na vzorku č.H4 vidět, že buď při testu došlo k chybě, nebo byl vzorek vadný – značná odchylka od zbytku vzorků – tento vzorek nebude počítán. I zde je z výsledků vidět, že se od sebe různé orientace tisku liší, avšak již ne v takové míře jako u Luvosintu PA12. To může ukazovat na lepší spékání prášku a tím i menší anizotropii než u Luvosintu PA12.

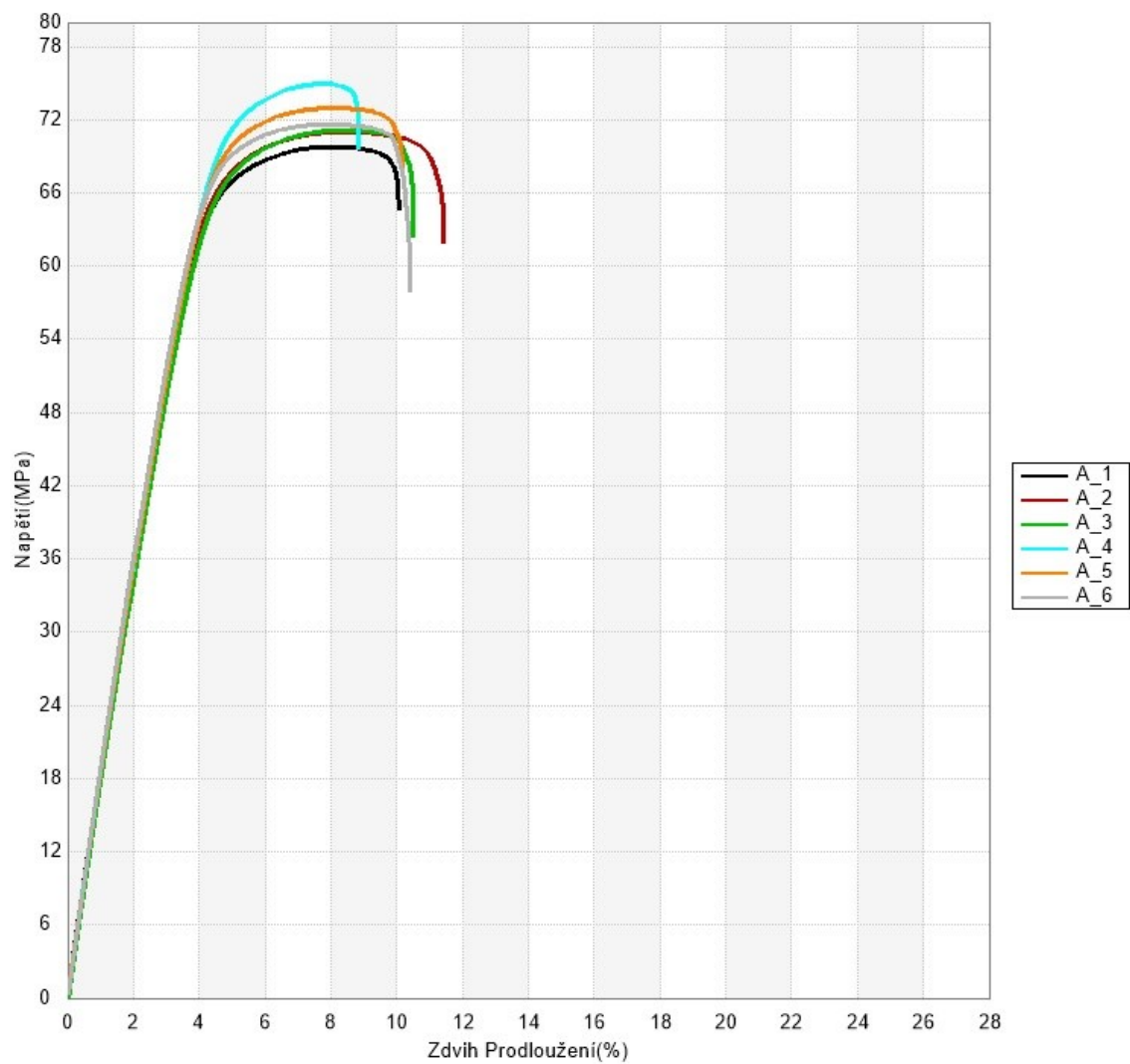


Obr.č.3.17 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu PA2200 pro vzorky tisknuté horizontálně. Zdroj: [obrázek autora]

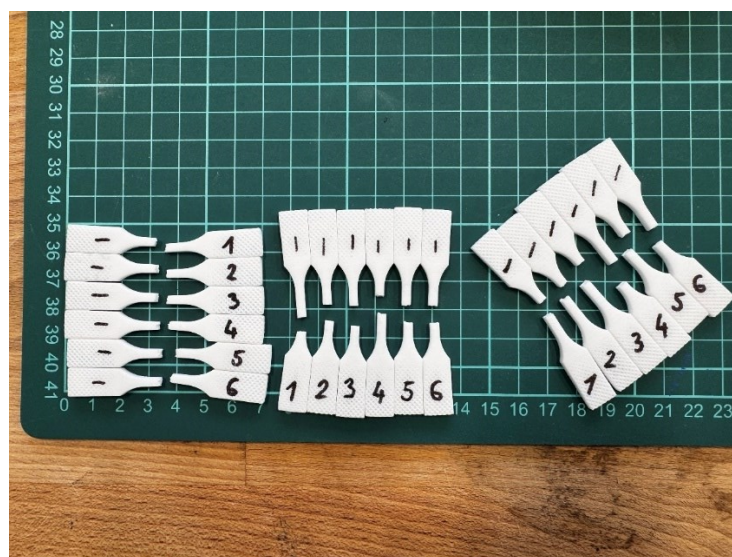


Obr.č.3.18 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu PA2200 pro vzorky tisknuté vertikálně.

Zdroj: [obrázek autora]



Obr.č.3.19 Graf výsledků tahové zkoušky materiálu PA2200 pro vzorky tisknuté pod úhlem. Zdroj: [obrázek autora]



Obr.č.3.20 Natrhané vzorky tří poloh materiálu PA2200. Zdroj: [fotografie autora]

3.5 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti bylo provedeno optickou metodou dle normy ČSN EN ISO 25178 na mikroskopu Keyence VHX-7100 v laboratoři ONE3D (viz. obr.č.3.21). Měření proběhlo na každém vzorku čtyřikrát na délce 4,3 milimetru.



Obr.č.3.21 Mikroskop Keyence VHX-7100. Zdroj: [fotografie autora – ONE3D]

Tabulka č.10 Výsledky naměřené drsnosti. Zdroj: [tabulka autora]

Měření drsnosti [Ra]							
Číslo měření	Luvosint PA12 9270 BK				PA2200		
	Horizontal	Vertical	45°		Horizontal	Vertical	45°
1	16,71	21,96	41,9		8,85	13,99	16,12
2	16,13	23,9	34,66		7,32	14,68	15,79
3	19,38	28,86	38,58		8,0	11,6	14,55
4	21,63	24,36	35,81		6,74	13,53	14,56

Také v tomto případě lze pozorovat rozdíly v drsnosti povrchu v závislosti na orientaci tisku. Nejnižší drsnost vykazují vzorky tištěné horizontálně, následované vzorky vertikálními a nejvyšší drsnost je patrná u vzorků tištěných pod úhlem. U horizontální orientace je měřená plocha tištěna rovnoběžně se základnou, a tedy vzniká v poslední fázi tisku jako jeden celek, což se pozitivně odráží na její kvalitě. V případě vertikálních vzorků je měřená plocha postupně vytvářena po celou dobu tisku, přičemž drobné nepřesnosti vedou ke vzniku vlnité struktury. U vzorků tištěných pod úhlem se na měřeném povrchu navíc vytváří tzv. „schody“, což má za následek nejvyšší drsnost povrchu ze všech tří orientací.

3.6 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti bylo provedeno na přístroj Hildebrand Digital Durometer HDD-2 (viz. obr.č.3.22), který měří tvrdost v jednotkách Shore.



Obr.č.3.22 Tvrdoměr Hildebrand Digital Durometer HDD-2.

Zdroj: [fotografie autora]

Tabulka č.11 Výsledky měření tvrdosti. Zdroj: [tabulka autora]

Tvrdost [Shore D]		
Č. vzorku	Luvosint PA12	PA 2200
1.	68,9	64,9
2.	63,2	62,9
3.	61,9	59,9

Z výsledků je patrné, že Luvosint PA12 má o něco větší tvrdost, než PA2200

4 DISKUZE

Měření velikosti a distribuce částic pomocí dynamické analýzy obrazu ukázalo, že prášek Luvosint PA12 vykazuje méně příznivé vlastnosti než prášek PA2200. Konkrétně bylo zjištěno, že částice materiálu Luvosint PA12 jsou rozloženy v širším velikostním intervalu, což by mohlo negativně ovlivnit rovnoměrnost a kvalitu spékání během procesu tisku.

Pro zpřesnění výsledků by však bylo vhodné provést doplňkové měření i na jiném zařízení pracujícím na obdobném principu. Důvodem je relativně úzké zorné pole použité kamery, která snímá pouze přibližně 10 % celkové plochy proudících částic, což může ovlivnit reprezentativnost naměřených dat.

Pozorování částic pomocí skenovací elektronové mikroskopie potvrdilo výsledky předchozí analýzy a dále ukázalo, že prášek Luvosint PA12 se vyznačuje nejen širším rozsahem velikostí částic, ale také nižší mírou sféricity ve srovnání s práškem PA2200. Nižší sféricita částic může negativně ovlivnit kvalitu spékání částic při tisku a v důsledku toho i výsledné mechanické a povrchové vlastnosti vytištěných dílů.

Výsledky tahových zkoušek potvrdily, že orientace tisku má výrazný vliv na mechanické vlastnosti vzorků vyrobených z materiálu Luvosint PA12. U materiálu PA2200 byl tento vliv méně výrazný (s výjimkou prodloužení), což může poukazovat na vyšší kvalitu prášku a s tím spojené lepší spékání během tisku.

U obou materiálů vykazovaly nejnižší hodnoty pevnosti vzorky tištěné ve vertikální orientaci (V), přičemž u materiálu PA2200 byly tyto výsledky srovnatelné se vzorky tištěnými pod úhlem 45° (A). Tento jev lze vysvětlit orientací zatížení kolmo na směr ukládání vrstev, což poukazuje na nižší soudržnost mezi jednotlivými vrstvami materiálu.

Naopak nejvyšších hodnot mechanických vlastností bylo dosaženo u vzorků tištěných v horizontální orientaci (H), kdy zatížení působí rovnoběžně se směrem tisku. Vzorky tištěné pod úhlem 45° (A) dosahovaly mezivýsledků – u obou materiálů byly jejich vlastnosti blíže horizontálně tištěným vzorkům, přičemž u PA2200 se tento trend projevil pouze u některých parametřů. To ukazuje, že i mírné odchýlení od vertikálního směru tisku může výrazně zlepšit výsledné mechanické vlastnosti.

Z uvedeného vyplývá, že i když se oba materiály řadí mezi technické termoplasty s izotropním charakterem, ve skutečnosti vykazují míru anizotropie, která je silně ovlivněna orientací tisku. Celkově z tahových zkoušek vychází jako mechanicky výhodnější materiál PA2200.

Pro hlubší porozumění dlouhodobému chování těchto materiálů by bylo vhodné do budoucna provést další studie zaměřené na časovou degradaci a změny mechanických vlastností v závislosti na působení vnějších vlivů. Taková analýza by umožnila lépe posoudit, který z materiálů vykazuje vyšší odolnost v čase.

Z výsledků měření drsnosti vyplývá, že orientace při tisku má významný vliv na výslednou povrchovou strukturu vzorků. Tento efekt je patrný zejména u vzorků tištěných pod úhlem 45°, kde dochází ke vzniku charakteristických „schodů“ na povrchu. Materiál PA2200 vykazuje

celkově nižší hodnoty drsnosti, což lze přičíst vyšší kvalitě samotného práškového materiálu – konkrétně menší velikosti částic a úzkému rozmezí jejich distribučního intervalu. Díky tomu dochází k rovnoměrnějšímu spékání prášku a k dosažení hladšího povrchu.

V testování tvrdosti je pak Luvosint PA12 oproti PA2200 o něco lepší.

Na základě provedených zkoušek lze konstatovat, že materiál Luvosint PA12 9270 BK vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti, zejména z hlediska pevnosti, což z něj činí vhodného kandidáta pro aplikace, kde je kladen důraz na pevnost a rozměrovou stálost výtisků.

Ve srovnání s materiálem PA2200 však v převážné většině sledovaných parametrů mírně zaostává. Výjimku představuje tvrdost, ve které Luvosint PA12 dosáhl lepších výsledků. Současně je však u tohoto materiálu patrná výrazná závislost mechanických vlastností na orientaci tisku, což je třeba zohlednit při návrhu i samotné výrobě dílů.

Jednou z nesporných výhod materiálu Luvosint PA12 je jeho výrazně nižší cena – při zhruba polovičních nákladech oproti PA2200 nabízí mechanické vlastnosti jen o něco horší. Další výhodou představuje jeho černé zbarvení, které zajišťuje barevnou konzistenci i v případě poškození povrchu. Díky tomu lze často upustit od dodatečných úprav, jako je barvení nebo lakování, čímž lze snížit výrobní náklady.

Z hlediska dosažených mechanických vlastností by bylo možné doporučit materiál PA2200, zejména pokud jsou požadavky na pevnost a stabilitu prioritní. V případech, kdy jsou mírně nižší vlastnosti akceptovatelné a důležitou roli hraje ekonomická stránka výroby, se však materiál Luvosint PA12 jeví jako velmi výhodná alternativa s dobrým poměrem cena/výkon. Při jeho použití je však nezbytné zohlednit projevy anizotropie vyplývající z orientace při tisku.

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byla analýza mechanických vlastností materiálu Luvosint PA12 9270 BK zpracovaného technologií (SLS) a jeho porovnání s běžně používaným materiálem PA2200.

V rámci experimentální části byly provedeny testy práškových materiálů, a to pomocí dynamické analýzy obrazu a skenovací elektronové mikroskopie. Dále následovalo mechanické hodnocení vytištěných vzorků prostřednictvím tahové zkoušky, měření drsnosti povrchu a tvrdosti.

Z výsledků vyplývá, že materiál PA2200 dosahuje obecně lepších mechanických vlastností než Luvosint PA12, avšak za cenu přibližně dvojnásobnou. Z tohoto důvodu je vhodnost jeho použití nutné posuzovat individuálně podle konkrétních požadavků na mechanickou odolnost a ekonomickou efektivitu.

Práce rovněž potvrdila, že orientace výtisků během procesu SLS má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Nejlepších hodnot bylo dosaženo u vzorků tištěných v horizontální orientaci, zatímco nejhorších výsledků dosáhly vzorky tištěné vertikálně. Orientace pod úhlem 45° poskytla mezivýsledky, blíže horizontální orientaci.

Získané poznatky mohou sloužit jako odrazový bod pro další testy, optimalizaci tiskových parametrů nebo pro porovnání s jinými materiály využívanými v aditivní výrobě.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jakubu Měsíčkovi, Ph.D., za nadměrnou trpělivost a velice cenné rady které mi během psaní práce poskytoval.

Dále děkuji paní Ing. Evě Olšovské, Ph.D. za provedené testy na elektronovém mikroskopu.

Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za trpělivost s mojí náladovostí a podporu během celé doby studia.

Dále chci poděkovat společnosti ONE3D za možnost zdokumentovat si procesy přímo v praxi a možnost využití jejich laboratoře pro potřebné testy.

Nakonec bych rád poděkoval svým kolegům z ONE3D za užitečné rady, vysvětlení a pomoc s testy – „Díky Petře, Martine, Láďo a Máro.“

Bakalářská práce vznikla v souvislosti s projektem Studentská grantová soutěž SP2025/062 „Specifický výzkum progresivních a udržitelných výrobních technologií a „SP2025/063 „Specifický výzkum inovativních a progresivních výrobních technologií“ financovaných MŠMT a Fakultou strojní VŠB – TUO.

6 POUŽITÉ ZDROJE

Na jazykovou a stylistickou úpravu této práce jsem využil nástroj ChatGPT od společnosti OpenAI. Všechny odborné závěry a obsah práce jsou mým vlastním výstupem.

- [1] JEYAPRAKASH, Natarajan; MURALIMOHAN, Cheepu a CHE-HUA, Yang (ed.). *Advances in additive manufacturing process*. Bentham Science Publisher, 2021. ISBN 978-981-5036-33-6. [cit.2025-01-24] Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=QZRUEAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [2] YANG, Li; HSU, Keng; BAUGHMAN, Brian; GODFREY, Donald; MEDINA, Francisco et al. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Springer Cham, 2017. ISBN 978-3-319-55128-9. [cit.2025-01-24] Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-55128-9>
- [3] KUTZ a MYER. *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing, Materials, and Applications (2nd Edition)*. 2. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-323-39041-5. [cit.2025-01-24] Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpAPEHPMA5/cid:kt011DYP23/viewerType:khtml/root_slug:applied-plastics-engineering/url_slug:selective-laser-sintering?q=selective%20laser%20sintering&b-q=selective%20laser%20sintering&include_synonyms=no&s_page_no=0&sort_on=default&view=collapsed&zoom=1&page=3&q=selective%20laser%20sintering
- [4] 3DPRINTUK. *Case Studies*. [Online] [cit.2025-01-24] Dostupné z: <https://www.3dprint-uk.co.uk/case-studies/>
- [5] STRATASYS. *SLS Allows 928 Motorsports to Improve Porsche 928 Performance*. 2017. [Online] [cit.2025-01-24] Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/case-studies/3d-printing-selective-laser-sintering-porsche-engine-928-motorsports/>
- [6] MAY, Vicky. *Can SLS 3D Printing Meet Aerospace Industry Standards?* 2024. [Online] [cit.2025-01-24] Dostupné z: <https://prototaluk.com/blog/can-sls-3d-printing-meet-aerospace-industry-standards/>
- [7] FORMLABS. *Introducing Formlabs' First Flexible SLS 3D Printing Material: TPU 90A*. Online. 2023. [cit. 2025-01-24] Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/flexible-sls-3d-printing-material-tpu-90a/>
- [8] 3D PRINTING CENTER. *History and development of SLS technology: from concept to practical application*. Online. 2022. [cit. 2025-02-20]. Dostupné

z: <https://3dprintingcenter.net/history-and-development-of-sls-technology-from-concept-to-practical-application/>

- [9] *Invention, optimism & realism: The back story of SLS 3D printing with Dr Joe Beaman*. Online. 2020. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/back-story-sls-3d-printing-dr-joe-beaman/>
- [10] VŠB / HAJNYŠ JIŘÍ. *Základy aditivních technologií*. Online. [cit. 2025-02-03] Dostupné z: <https://www.vsb.cz/e-vyuka/cs/subject/346-3008/01>
- [11] FORMLABS. *Guide to SLS Post-Processing Techniques: Media Blasting, Smoothing, Polishing, Coloring, and More*. [Online] [cit. 2025-01-24] Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/sls-post-processing-media-blasting/>
- [12] ONE3D. *Post-processing*. Online. [cit. 2025-01-26] Dostupné z: <https://www.one3d.cz/post-processing/>
- [13] Autor nenalezený. *PA11 vs. PA12: What Are the Differences?* Online. 2024. Dostupné z: <https://xometry.pro/en-eu/articles/pa11-vs-pa12/>. [cit. 2025-05-06].
- [14] TSE, Abigail. *Selective Laser Sintering (SLS) Materials Guide*. Online. 2024. [cit. 2025-01-24]. Dostupné z: <https://3dspro.com/resources/blog/selective-laser-sintering-materials-guide>.
- [15] WEERGE. *PA12 VS PA11: WHAT ARE THE DIFFERENCES?* Online. 2021. [cit. 2025-01-24] Dostupné z: <https://www.weerg.com/guides/nylon-pa-11-vs-pa-12>.
- [16] PROTO LABS. *Nylon PA 12 - 3D Printing Materials Explained*. Online. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JBOeg0ylhol&t=23s>. [cit. 2025-05-06].
- [17] EOS. *PA 2200 Balance*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-materials/data-sheets/mds-pa-2200-balance>. [cit. 2025-05-06].
- [18] SINTERIT. *PA12 Industrial*. Online. Dostupné z: <https://sinterit.com/materials/pa12-industrial/>. [cit. 2025-05-06].
- [19] SINRATEC. *Sintratec PA12 Powder*. Online. Dostupné z: <https://sintratec.com/3d-printing-materials/sintratec-pa12-powder/>. [cit. 2025-05-06].
- [20] FAMA3D. *PA11 vs PA12: What Are the Differences*. Online. Dostupné z: <https://www.fama3d.com/en/materials/pa11-vs-pa12-differences> [cit. 2025-05-06].

- [21]EOS. *PA 1101*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-materials/data-sheets/mds-pa-1101>. [cit. 2025-05-06].
- [22]SINTERIT. *PA11 ESD*. Online. Dostupné z: <https://sinterit.com/materials/pa11-esd/>. [cit. 2025-05-06].
- [23]3D SYSTEMS. *DuraForm PA11 Black*. Online. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2025-04/3d-systems-duraform-pa11-black-datasheet-us-a4-2025-03-04-web.pdf>. [cit. 2025-05-07].
- [24]IAMRAPID3D. *PA12 GF30*. Online. Dostupné z: https://iamrapid.com/materials/PA12-GF30/?utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-05-06].
- [25]SINTRATEC. *Sintratec PA12 GF*. Online. Dostupné z: <https://sintratec.com/3d-printing-materials/sintratec-pa12-gf-powder/>. [cit. 2025-05-06].
- [26]EOS. *PA 3200 GF*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-materials/data-sheets/mds-pa-3200-gf>. [cit. 2025-05-06].
- [27] SINTERIT. *PA11 Carbon Fiber*. Online. Dostupné z: <https://sinterit.com/wp-content/uploads/2022/06/PA11-Carbon-Fiber-extended-specification.pdf>. [cit. 2025-05-07].
- [28]BASF. *Ultrasint PA11 Black CF*. Online. Dostupné z: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrasint-powders-for-powder-bed-fusion-pbf/pa-11-line/ultrasint-pa11-black-cf/>. [cit. 2025-05-07].
- [29]3DSYSTEMS. *DuraForm PA CF*. Online. Dostupné z: https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2023-11/3d-systems-duraform-pa-cf-datasheet-us-en-2023-10-31-a_web65.pdf. [cit. 2025-05-07].
- [30] EOS. *Alumide*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-materials/data-sheets/mds-alumide>. [cit. 2025-05-07].
- [31]MATERIALISE. *PA-AF*. Online. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/pa12-af>. [cit. 2025-05-07].
- [32]PROSILAS. *PA12 ALU*. Online. Dostupné z: <https://www.prosilas.com/wp-content/uploads/2025/02/PA12-ALU-Prosilas.pdf>. [cit. 2025-05-07].
- [33]3DSYSTEMS. *DuraForm TPU 90*. Online. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2025-04/3d-systems-duraform-tpu-90a-datasheet-us-en-2025-04-03-web.pdf>. [cit. 2025-05-07].

- [34]SINTERIT. *FLEXA*. Online. Dostupné z: <https://sinterit.com/materials/flexa-performance/>. [cit. 2025-05-07].
- [35]EOS. *EOS TPU 1301*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-materials/data-sheets/mds-eos-tpu-1301>. [cit. 2025-05-07].
- [36]LEHMANN&VOSS&CO. Luvosint PA12 9270 BK. Online. [cit. 2025-01-25] Dostupné z: <https://schwarzeteile.de/en#kontakt>
- [37]ZWICK ROELL. *ISO 527-1 a ISO 527-2: Stanovení tahových vlastností plastů*. Online. [cit. 2025-01-25]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/plasty/termoplasticke-a-reaktoplasticke-lisovaci-hmoty/stanoveni-tahovych-vlastnosti-iso-527-1-2/>
- [38]MATCA. Zkouška tahem. Online. 2023. [cit. 2025-01-24] Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [39]ZWICK ROELL. *Mez kluzu Re a smluvní mez kluzu Rp0,2*. Online. [cit. 2025-01-25]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkouska-tahem/mez-kluzu/>
- [40]KNOUREK, Jiří; KŘÍBEK, Jan a MARŠÁLEK, Jaroslav. *Technologie zpracování kovů Základní poznatky*. 6. SNTL, 2014. ISBN 80-902655-5-3. [cit. 2025-01-24] Dostupné z: <https://www.cntl.cz/produkt/technologie-zpracovani-kovu-zakladni-poznatky-1/>
- [41]WIKISKRIPTA. *Youngův modul pružnosti*. Online. [cit. 2025-01-25] Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Young%C5%AFv_modul_pru%C5%BEnosti
- [42] OpenAI. *ChatGPT* [online].2025 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://chat.openai.com>
- [43]ZWICK ROELL. *Zkoušky rázem*. Online. [cit. 2025-01-26] Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkousky-razem/>
- [44]ZWICK ROELL. *Tvrdost Shore / Tvrdoměr podle ASTM D2240 & ISO 48-4*. Online. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/plasty/termoplasticke-a-reaktoplasticke-lisovaci-hmoty/stanoveni-tvrdosti/zkousky-tvrdosti-shore/>. [cit. 2025-04-08].
- [45]EOS. *FORMIGA P 110 Velocis*. Online. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-printers/data-sheets/sds-formiga-p-110-velocis>. [cit. 2025-05-08].

- [46] THERMOFISHER SCIENTIFIC. *Explorer 4*. Online. Dostupné z: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/Explorer-4-Additive-Brochure.pdf>. [cit. 2025-04-15].
- [47] Obrázek č. 1.1 Online. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://www.me.utexas.edu/news/619-selective-laser-sintering-from-a-texas-idea-to-a-global-industry>
- [48] Obrázek č. 1.4 Schéma SLS tisku. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering
- [49] Obrázek: Průběh zkoušky tahem Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [50] Obrázek: Horní a dolní mez kluzu. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/zkouseni-materialu/zkouska-tahem/mez-kluzu/>
- [51] Obrázek: Charpyho kladívko. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1567>
- [52] Obrázek: ZWICK ROELL. *Tvrdoměr*. Online. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/plasty/termoplasticke-a-reaktoplasticke-lisovaci-hmoty/stanoveni-tvrdosti/zkousky-tvrdosti-shore/>. [cit. 2025-05-10].
- [53] Obrázek. Online. [cit. 2025-02-24]. Dostupné z: <https://www.eos.info/polymer-solutions/polymer-printers/data-sheets/sds-formiga-p-110-velocis>
- [54] Obrázek. Online. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/EXPLORER4CLEANCHK>. [cit. 2025-04-15].

